

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais
pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos
aplicando a Técnica Centrífuga**

MARCOS ALCEU FELICETTI

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mônica Lopes Aguiar

SÃO CARLOS – SP

2008

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais
pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos
aplicando a Técnica Centrífuga**

MARCOS ALCEU FELICETTI

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Mônica Lopes Aguiar

SÃO CARLOS – SP

2008

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

F314ii

Felicetti, Marcos Alceu.

Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos aplicando a técnica centrífuga / Marcos Alceu Felicetti. -- São Carlos : UFSCar, 2008.
261 f.

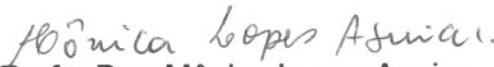
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2008.

1. Ar – poluição. 2. Força de adesão. 3. Técnica centrífuga. 4. Van der Waals, Forças de. 5. Compressão e desprendimento de partículas. I. Título.

CDD: 628.53 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **MARCOS ALCEU FELICETTI**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 25 DE MARÇO DE 2008.

BANCA EXAMINADORA:


Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar
Presidente, PPG-EQ/UFSCar


Prof. Dr. José Renato Coury
PPG-EQ/UFSCar


Prof. Dr. José Teixeira Freire
PPG-EQ/UFSCar


Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
EQ/UEM


Prof. Dr. Luis Alexandre Pedro de Freitas
FCFRP/USP

À minha família, especialmente à minha mãe **Lucilda Martha**,
ao meu pai **Alceu Felicetti** e a minha noiva **Viviane**
que nunca deixaram de acreditar em mim e sempre
estiveram presentes nos momentos de dificuldade
e de angústia me apoiando e me incentivando.
Devo a vocês o que sou hoje e a vontade de
ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

À Professora **Dr^a. Mônica Lopes Aguiar** por sua orientação, paciência, dedicação e grande amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos por ter concedido a realização desta tese de doutorado.

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido.

Aos Professores **Dr. José Antonio Silveira Gonçalves** (DEQ/UFSCar) e **Dr. José Renato Coury** (DEQ/UFSCar) pela contribuição durante o desenvolvimento do trabalho experimental e na publicação dos artigos científicos.

Aos Professores da Área de Controle Ambiental 1 e do Departamento de Engenharia Química que sempre foram de grande ajuda e pronta disposição sempre que se fez necessário.

Aos Professores **Dr. José Teixeira Freire** (DEQ/UFSCar) e **Dr. Luís Alexandre Pedro de Freitas** (FCFRP/USP), pela contribuição durante o desenvolvimento do trabalho experimental e pelas sugestões no Exame de Qualificação.

Aos Professores Doutores da banca de Doutorado, **José Renato Coury** (DEQ/UFSCar), **José Teixeira Freire** (DEQ/UFSCar), **Luís Alexandre Pedro de Freitas** (FCFRP/USP) e **Nehemias Curvelo Pereira** (DEQ/UEM), por aceitarem a responsabilidade de avaliar este trabalho e pela valiosa contribuição.

Ao **Dr. Giancarlo Richard Salazar Banda** pelas valiosas contribuições para a realização deste trabalho, pelas publicações dos artigos científicos e pela grande amizade.

Aos meus colegas de Pós-Graduação pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis, em especial: **Álvaro de Baptista Neto, André Maranhão, Edinalda e Nivaldo Correa, Edmundo Valdes, Eduardo Tanabe, Fabio Arouca, Juliana Steffens, Juliana Milanez, Marcos Vinícius, Nickeli Rossi, Sandra Mara (Balu), Simone Pozza, Vádila Guerra e Wania Christinelli.** Para a **turma do futebol** das terças-feiras.

Ao **Oscar** (Oficina do DEQ) pela amizade, pelas grandes ajudas e pronta disposição quando solicitado.

Aos alunos de Iniciação Científica, **Fernando Fernandes e Everton Dantas**, pelos trabalhos científicos desenvolvidos no laboratório de Controle Ambiental 1 e pela valiosa contribuição no desenvolvimento desta tese.

Aos meus companheiros de república, **Eliezer Gomes, Eduardo Gazolla, Douglas Ferreira, Ljubomir Dimitrov e Marcelo Batista** que formaram a minha família neste período vivido aqui em São Carlos. Companheiros com quem compartilhei momentos de alegria e de tristeza, de apoio e incentivo fundamentais para a realização deste trabalho.

Às grandes amizades formadas nesta cidade e que sempre me incentivaram e me apoiaram em todos os momentos de dificuldade para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, em especial: **Beno, Catarino, Camargo, Dirceu e Cássia, D. Elza e Sr. Luis** (*in memorian*), **Ademir, Francisco (Chico), Jéferson e Valdir, Dona Fátima, Fabio Rogério e Soraia e seus pais (D. Leonilda e Sr. Constante), André e Fernanda, Carlos Eduardo (Du) e Raul Leal**. Amizades sinceras e verdadeiras, que sem dúvida levarei de herança neste período de convívio e estadia nesta cidade. Muito obrigado. Vocês são inesquecíveis.

À **turma do futebol** das quintas-feiras e a dos sábados pela distração e amizade.

À toda a minha **família** que juntos sofremos e se emocionamos com mais esta conquista, que sem dúvida, pertence a vocês também. De coração, o meu muito obrigado. Sem a torcida de vocês, a oração e o desejo do meu sucesso muito provavelmente eu não teria chegado até o fim.

À **Viviane** meu grande amor, pela partilha das angústias e dos sofrimentos. Pelo leal companheirismo, atenção, paciência, compreensão, carinho e amor. Essa vitória é sua também.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram a chegar a esta etapa da vida acadêmica.

A Deus, quem sempre iluminou os meus sonhos e todos os meus passos.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Adesão	3
2.2 Forças envolvidas na Adesão entre Partículas e um Substrato	3
2.3 Morfologia das Partículas	9
2.4 Adesão e Aglomeração de Partículas Finas	11
2.4.1 Teoria da Adesão	11
2.4.2 Força de Aglomerados	13
2.5 Modelos Teóricos do Contato entre Partículas	14
2.5.1 Modelo de Hertz	14
2.5.2 Modelo de Derjaguin-Müller-Toporov (DMT)	16
2.5.3 Modelo de Johnson-Kendall-Roberts (JKR)	17
2.5.4 Modelo de Maugis	18
2.6 Influência da Rugosidade das Superfícies na Força de Adesão	20
2.7 Influência das Propriedades Mecânicas das Superfícies	23
2.8 Métodos Utilizados para Medir a Força de Adesão	25
2.9 Técnica Centrífuga	26
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 Equipamentos	30
3.1.1 Microcentrífuga	30

3.1.2 Microscópio Óptico (Olympus BX60) -----	31
3.1.3 Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5)-----	31
3.1.4 Microcomputador contendo os softwares necessários para o tratamento e análise dos resultados-----	31
3.2 Materiais Pulverulentos-----	32
3.3 Metodologia-----	35
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES-----	45
4.1 Determinação da Força de Adesão para Partículas de Concentrado Fosfático-----	45
4.2 Determinação da Força de Adesão para Partículas de Polvilho Doce-----	52
4.3 Cálculo da Distância de Separação Efetiva (z_0) entre a Superfície da Partícula e a Superfície do Substrato -----	60
4.4 Ajuste de uma equação para os resultados experimentais da força de adesão para os dois materiais pulverulentos investigados -----	66
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES-----	82
CAPÍTULO VI - SUGESTÕES -----	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	86
APÊNDICE A - Teste de validação da Técnica Centrífuga-----	98
APÊNDICE B - Gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon® e de vidro, em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro de partículas investigadas e resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos -----	100
APÊNDICE C - Gráficos de porcentagem de partículas de polvilho doce aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável e de vidro, em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro de partículas investigadas e resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos -----	107

APÊNDICE D - Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) e resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o concentrado fosfático e os substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro, para todas as faixas de diâmetros investigadas ----- 112

APÊNDICE E - Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) e resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o polvilho doce e os substratos construídos de aço inoxidável e de vidro, para todas as faixas de diâmetros investigadas ----- 211

APÊNDICE F - Planejamento fatorial estatístico ($2^k + 5$ pontos centrais) aplicado para os dois materiais pulverulentos orgânicos e aos substratos de aço inoxidável e de vidro utilizados no estudo da influência da força de adesão partícula-substrato ----- 256

RESUMO

Investigou-se neste trabalho a influência do tamanho das partículas do material pulverulento orgânico e inorgânico sobre a força de adesão dessas partículas e um substrato construído de diferentes materiais: aço inoxidável, PVC, Teflon[®] e vidro, aplicando a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e desprendimento. Utilizou-se para tanto uma microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos), cuja velocidade máxima de rotação é de 14000 rpm. A velocidade centrífuga é gerada para promover a compressão (*press-on*) e o desprendimento (*spin-off*) das partículas sobre a superfície do substrato. Um programa de análise de imagens (Image-Pro Plus 4.5) foi usado para a coleta e o tratamento das imagens. Para determinar a força de adesão utilizando-se a técnica centrífuga, no cabeçote da microcentrífuga foi necessário instalar dois tubos, construídos em alumínio, para a contenção dos adaptadores, também construído em alumínio. A finalidade dos adaptadores era de sustentar os substratos contendo as partículas do material pulverulento. Após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão (*press-on*) e da contagem das partículas inicialmente aderidas na superfície dos substratos, pelo programa de análise de imagens, os substratos retornaram para a microcentrífuga para a aplicação da velocidade centrífuga de desprendimento (*spin-off*) em diferentes velocidades de rotação. Após cada aumento da velocidade rotacional, o número de partículas remanescentes da compressão foi monitorado. O material pulverulento inorgânico, concentrado fosfático ($\rho_p = 3,07 \text{ g/cm}^3$ e $d_p = 39,38 \text{ }\mu\text{m}$), e os orgânicos, polvilho doce ($\rho_p = 1,49 \text{ g/cm}^3$ e $d_p = 25,24 \text{ }\mu\text{m}$) e maisena ($\rho_p = 1,47 \text{ g/cm}^3$ e $d_p = 23,08 \text{ }\mu\text{m}$) foram os pós utilizados na investigação da influência da força de adesão partícula substrato aplicando a técnica centrífuga. O critério de escolha dos materiais para a construção dos substratos e do tipo de material pulverulento utilizado foi a sua empregabilidade na indústria. As faixas de diâmetro estudadas para esses materiais pulverulentos foram de 8 – 13 μm , 13 – 18 μm , 18 – 23 μm , 23 – 28 μm e 28 – 33 μm . As partículas de cada material pulverulento foram inicialmente pressionadas sobre a superfície do substrato centrifugado a uma velocidade centrífuga de compressão particular, e imediatamente depois desta fase, o perfil de adesão foi determinado. Todos os pós obedeceram uma distribuição log-normal de porcentagem de partículas aderidas em relação a força de adesão. Foi obtida a força de adesão mediana geométrica para todos os pós e verificou-se que houve um aumento linear com a força de compressão aplicada preliminarmente. Para partículas

polidispersas aderidas a uma superfície, a força necessária para separar as partículas varia proporcionalmente ao seu tamanho. E a força de adesão, entre as partículas dos materiais pulverulentos utilizados nos experimentos e a superfície dos diferentes substratos, aumentou com o aumento do tamanho das partículas e com o aumento da velocidade centrífuga de compressão (*press-on*). A ordem de aderência indicou a seguinte relação para os materiais pulverulentos: polvilho doce > concentrado fosfático, e para os substratos: vidro > aço inoxidável > PVC > Teflon[®]. Utilizando-se os resultados experimentais levantados neste trabalho, estimou-se uma equação que representasse de forma mais geral os dados experimentais obtidos para os materiais pulverulentos.

ABSTRACT

It was investigated in this work the influence of the size of the particles of the organic and inorganic powdery material on the force of adhesion of those particles and a built substratum of different materials: stainless steel, PVC, Teflon® and glass, applying the centrifuge technique for different compression speeds and detachment. It was used for so much a centrifuga (MA - 860, Marconi Equipamentos), whose maximum speed of rotation is of 14000 rpm. The centrifugal speed is generated to promote the compression (*press-on*) and the detachment (*spin-off*) of the particles on the surface of the substratum. A program of analysis of images (Image-Pro Plus 4.5) it was used for the collection and the treatment of the images. To determine the adhesion force being used the centrifuge technique, in the headstock of the centrifuga it was necessary to install two tubes, built in aluminum, for the contention of the adapters, also built in aluminum. The purpose of the adapters was of sustaining the substratum containing the particles of the powdery material. After the application of the centrifugal speed of compression (*press-on*) and of the count of the particles initially stuck in the surface of the substratum, for the program of analysis of images, the substratum came back for the centrifuga for the application of the centrifugal speed of detachment (*spin-off*) in different rotation speeds. After each increase of the speed rotacional, the number of remaining particles of the compression was monitored. The material inorganic powdery, phosphatic rock ($\rho_p = 3,07 \text{ g/cm}^3$ and $d_p = 39,38 \text{ }\mu\text{m}$), and the organics, manioc starch ($\rho_p = 1,49 \text{ g/cm}^3$ and $d_p = 25,24 \text{ }\mu\text{m}$) and corn starch ($\rho_p = 1,47 \text{ g/cm}^3$ and $d_p = 23,08 \text{ }\mu\text{m}$), they were the powders used in the investigation of the influence of the force of adhesion particle substratum applying the centrifuge technique. The criterion of choice of the materials for the construction of the substratum and of the type of used powdery material it was your employability in the industry. The diameter strips studied for those powdery materials they were of 8 – 13 μm , 13 – 18 μm , 18 – 23 μm , 23 – 28 μm and 28 – 33 μm . The particles of each powdery material were pressed initially on the surface of the substratum centrifuged to a centrifugal speed of private compression, and immediately after this phase, the adhesion profile was determined. All the powders obeyed a log-normal distribution of percentage of particles stuck in relation to adhesion force. It was obtained the force of geometric medium adhesion for all the powders and it was verified that there was a lineal increase with the force of compression applied initially. For polydisperse particles stuck on a surface, the necessary force to separate the

particles varies proportionally to your size. And the adhesion force among the particles of the powdery materials used in the experiments and the surface of the different substratum, increased with the increase of the size of the particles and with the increase of the centrifugal speed of compression (*press-on*). the order of adherence indicated the following relationship for the powdery materials: manioc starch > phosphatic rock, and for the substratum: glass > stainless steel > PVC > Teflon[®]. Using the experimental results in this work, was considered an equation to represent in a more general way the experimental data obtained for the two powdery materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Força de Van der Waals (Hinds, 1998) -----	4
Figura 2.2 – Superfície submicroscópica de geometria de contato (Hinds, 1998)-----	4
Figura 2.3 – Força de adesão devido a um filme líquido (Hinds, 1998)-----	6
Figura 2.4 – Estados de Saturação de Líquido: (a) Estado Pendular; (b) Estado Funicular; (c) Estado Capilar (Newitt e Conway-Jones, 1958) -----	8
Figura 2.5 - Ponte Líquida entre uma esfera e uma superfície plana (Dahneke, 1972)-----	9
Figura 2.6 - Adesão pode ser definida como a força F exigida para romper duas partículas (Kendall e Stainton, 2001)-----	12
Figura 2.7 – Contato entre uma esfera elástica e uma superfície plana (Cappella e Dietler, 1999)-----	15
Figura 2.8 – Mapa da adesão para esferas elásticas, baseado no Modelo de Maugis (Johnson, 1998)-----	20
Figura 2.9 – Efeitos da rugosidade na adesão (Johnson, 1998)-----	21
Figura 2.10 – Uma esfera rugosa em contato com uma esfera lisa (Xie, 1997) -----	22
Figura 2.11 – Contato em sistema Sandwiche (Xie, 1997)-----	22
Figura 2.12 – Ilustração do contato entre duas esferas (a) antes da deformação; (b) depois da deformação (Xie, 1997)-----	24
Figura 2.13 – (a) Desprendimento das partículas na Técnica Centrífuga, (b) Análise das imagens das superfícies antes e depois de cada centrifugação (Mizes et al., 2000)----	28
Figura 3.1 – Microcentrífuga MA – 860: (a) fechada, (b) aberta e (c) detalhe do rotor com os adaptadores -----	30
Figura 3.2 – Equipamentos utilizados para a aquisição e análise das imagens -----	31
Figura 3.3 – Distribuição granulométrica das partículas de concentrado fosfático, de polvilho doce e de maisena, obtida no Malvern Mastersize Microplus MAF 5001 no DEQ – UFSCar-----	33
Figura 3.4 – Gráfico de Tensão em função da Deformação para o concentrado fosfático e para o polvilho doce obtida no Instron 5500R Universal, no DEMa – UFSCar-----	34
Figura 3.5 – Imagens dos materiais pulverulentos: (a) concentrado fosfático, (b) polvilho doce e (c) maisena, obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (DEMa – UFSCar) com ampliação de 3500 vezes -----	35

- Figura 3.6** – Diagrama esquemático do tubo e do adaptador, construídos em alumínio, que estão instalados na microcentrífuga -----36
- Figura 3.7** – Imagens topográficas dos substratos estudados, obtidas por microscopia de força atômica, com as medidas das rugosidades das superfícies: (a) aço inoxidável, (b) PVC, (c) Teflon[®] e (d) vidro -----37
- Figura 3.8** – Superfície do substrato construído de aço inoxidável, esmerilado, polido e contendo em sua superfície os reticulados (Câmera Digital, Sony DSC – P92)-----38
- Figura 3.9** - Um único reticulado da superfície do substrato: (a) Aço inoxidável, (b) PVC, (c) Teflon[®] e (d) vidro (ampliação de 100 vezes no Microscópio Óptico – Olympus BX60) -----39
- Figura 3.10** – Diâmetro Médio definido pelo software Image-Pro Plus 4.5-----40
- Figura 3.11** – Metodologia utilizada para a estimativa da rugosidade da superfície das partículas dos materiais pulverulentos -----43
- Figura 4.1** – Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos substratos, em função da força de adesão, após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm-----47
- Figura 4.2** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos construídos de (a) aço inoxidável, (b) PVC, (c) Teflon[®] e de (d) vidro nas faixas de diâmetros de: 8 – 13, 13 – 18, 28 – 33 e 18 – 23 μm , respectivamente, em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de todas as velocidade centrífuga de compressão investigadas -----50
- Figura 4.3** – Força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de concentrado fosfático, para os substratos de aço inoxidável, PVC, Teflon[®] e vidro, após aplicada a força de compressão de: (a) 1000, (b) 2000, (c) 5000 e (d) 10000 rpm, respectivamente -----52
- Figura 4.4** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos construídos em: (a) aço inoxidável e (b) vidro, em função da força de adesão, para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm-----53
- Figura 4.5** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro nas faixas de diâmetros de 23 – 28 e 13 – 18 μm , respectivamente, em função da força de adesão das partículas de polvilho doce após a aplicação das velocidades centrífugas de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm-----56

- Figura 4.6** – Força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de polvilho doce, para os substratos de aço inoxidável e vidro, após aplicada a força de compressão de: (a) 1000, (b) 2000, (c) 5000 e (d) 10000 rpm, respectivamente-----57
- Figura 4.7** – Força de adesão experimental e teórica em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático e de polvilho doce sobre o substrato construído de (a) aço inoxidável e de (b) vidro, após aplicada a velocidade centrífuga de compressão de 10000 rpm -----59
- Figura 4.8** – Distância de Separação Efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro, em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de (a) 2000 e de (b) 5000 rpm-----64
- Figura 4.9** – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e de polvilho doce e a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro, em função do diâmetro médio das partículas (*pression* = 10000 rpm) -----65
- Figura 4.10** – Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de: (a) aço inoxidável, (b) PVC, (c) Teflon[®] e (d) vidro -----68
- Figura 4.11** – Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de polvilho doce, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de: (a) aço inoxidável e (b) vidro-----69
- Figura 4.12** – Força de adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de concentrado fosfático, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de: (a) aço inoxidável, (b) PVC, (c) Teflon[®] e (d) vidro -----70
- Figura 4.13** – Força de adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de polvilho doce, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, de 2000, de 5000 e de 10000 rpm, utilizando o substrato construído de: (a) aço inoxidável e (b) vidro-----71
- Figure 4.14** – Superfície de resposta dos efeitos velocidade angular de compressão e diâmetro médio da partícula, com a força de adesão para: (a) polvilho doce e o aço inoxidável e (b) maisena e o substrato de vidro-----78

- Figure 4.15** – Força de adesão experimental em função da força de adesão calculada (Equação 63) das partículas de polvilho doce e de maisena quando utilizou-se os substratos de (a) aço inoxidável e de (b) vidro. As barras de erros (\perp) correspondem ao erro absoluto -----79
- Figure 4.16** – Força de adesão experimental em função da força de adesão calculada, utilizando as Equações (61) e (63), das partículas de polvilho doce e de maisena quando utilizou-se os substratos de (a) aço inoxidável e de (b) vidro. As barras de erros (\perp) correspondem ao erro absoluto -----81
- Figura A.1** – Teste realizado com a microcentrífuga para verificar a autenticidade da técnica: Press-on de 2000 rpm e sete spin-off de 2000 rpm -----99
- Figura B.1** - Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos quatro substratos, em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000 rpm ----- 101
- Figura B.2** - Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos quatro substratos, em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 5000 rpm ----- 102
- Figura B.3** - Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos quatro substratos, em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 10000 rpm----- 103
- Figura C.1** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos, construídos em: (a) aço inoxidável e (b) vidro, em função da força de adesão, para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm ----- 108
- Figura C.2** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos, construídos em: (a) aço inoxidável e (b) vidro, em função da força de adesão, para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 5000 rpm ----- 109
- Figura C.3** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos, construídos em: (a) aço inoxidável e (b) vidro, em função da força de adesão, para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm ----- 110
- Figure F.1** – Superfície de resposta dos efeitos da velocidade angular de compressão e do diâmetro médio da partícula, sobre a força de adesão maisena-vidro----- 258
- Figure F.2** – Superfície de resposta dos efeitos da velocidade angular de compressão e do diâmetro médio da partícula, sobre a força de adesão polvilho doce-aço inoxidável 259
- Figure F.3** – Superfície de resposta dos efeitos da velocidade angular de compressão e do diâmetro médio da partícula, sobre a força de adesão polvilho doce-vidro ----- 261

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Massa média e volume médio das partículas de concentrado fosfático, de polvilho doce e de maisena distribuídos em diferentes frações de tamanhos -----	33
Tabela 3.2 – Tensão superficial dos componentes da adesão (mJ m^{-2})-----	37
Tabela 4.1 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão, do desvio padrão geométrico e da força de adesão teórica para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga <i>press-on</i> de 1000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável, de PVC, de Teflon [®] e de vidro-----	48
Tabela 4.2 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão e desvio padrão geométrico para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável-----	49
Tabela 4.3 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão e desvio padrão geométrico para o polvilho doce após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável e de vidro-----	54
Tabela 4.4 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão e desvio padrão geométrico para o polvilho doce após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de vidro-----	55
Tabela 4.5 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de aço inoxidável-----	61
Tabela 4.6 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de PVC-----	61
Tabela 4.7 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de Teflon [®] -----	62
Tabela 4.8 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de vidro-----	62
Tabela 4.9 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de polvilho doce e a superfície do substrato construído de aço inoxidável-----	63

Tabela 4.10 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de polvilho doce e a superfície do substrato construído de vidro -----	63
Tabela 4.11 – Coeficientes de correlação lineares, para o concentrado fosfático e o polvilho doce, dos gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm-----	69
Tabela 4.12 – Coeficientes de correlação lineares, para o concentrado fosfático e para o polvilho doce, dos gráficos de força de adesão em função da velocidade angular de compressão -----	73
Tabela 4.13 - Valores utilizados no planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais -----	75
Tabela 4.14 – Matriz do planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais com a resposta força de adesão -----	75
Tabela 4.15 - Coeficientes de regressão para a resposta força de adesão quando investigou-se a maisena e o substrato construído de aço inoxidável-----	76
Tabela 4.16 – Valores das constantes k_1 , k_2 , e k_3 da Equação (63) para a maisena -----	77
Tabela 4.17 – Valores das constantes k_1 , k_2 , e k_3 da Equação (63) para o polvilho doce -----	77
Tabela A.1 - Resultados obtidos no Image-Pro Plus 4.5 para o concentrado fosfático e o substrato de aço inoxidável -----	99
Tabela B.1 – Resultados da Mediana Geométrica da Força de Adesão e Desvio Padrão Geométrico para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de PVC-----	104
Tabela B.2 – Resultados da Mediana Geométrica da Força de Adesão e Desvio Padrão Geométrico para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de Teflon® -----	105
Tabela B.3 – Resultados da Mediana Geométrica da Força de Adesão e Desvio Padrão Geométrico para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de vidro -----	105
Tabela C.1 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão e desvio padrão geométrico para o polvilho doce após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável-----	111

Tabela D.1 - D.160 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) e resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o concentrado fosfático e os substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon® e de vidro, para todas as faixas de diâmetros investigadas-----	113
Tabela E.1 - E.80 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) e resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o polvilho doce e os substratos construídos de aço inoxidável e de vidro, para todas as faixas de diâmetros investigadas -----	212
Tabela F.1 - Coeficientes de regressão para a resposta força de adesão quando investigou-se a maisena e o substrato construído de vidro -----	257
Tabela F.2 - Coeficientes de regressão para a resposta força de adesão quando investigou-se o polvilho doce e o substrato construído de aço inoxidável -----	258
Tabela F.3 - Coeficientes de regressão para a resposta força de adesão quando investigou-se o polvilho doce e o substrato construído de vidro -----	260

LISTA DE SÍMBOLOS

a = Raio de contato, [L].

a_0 = Raio de contato zero, [L].

A = Área projetada da partícula, [L²].

c = Comprimento da falha no tamanho da partícula, [L].

D = Média harmônica dos diâmetros das esferas, [L].

\bar{d} = Diâmetro médio da partícula, [L].

$d_p = d'_p$ = Diâmetro da partícula, [L].

$d_1 = d'_{p1}$ = Diâmetro da esfera 1, [L].

$d_2 = d'_{p2}$ = Diâmetro da esfera 2, [L].

d_i = Diâmetro interno da partícula, [L].

d_E = Diâmetro externo da partícula, [L].

\bar{d}_α = Diâmetro aritmético, [L].

d_β = Pseudo-diâmetro médio da partícula, [L].

E = Campo elétrico aplicado à partícula, [M L I⁻¹ t⁻³].

E_1 = Coeficiente de elasticidade da esfera 1, [M L⁻¹ t⁻²].

E_2 = Coeficiente de elasticidade da esfera 2, [M L⁻¹ t⁻²].

F = Força de compressão (press-on), [M L t⁻²].

$F^{0'}$ = Força de Van der Waals entre duas esferas, [M L t⁻²].

$F^{0''}$ = Força de Van der Waals entre uma partícula pequena e duas esferas, [M L t⁻²].

F^{0+} = Força total de Van der Waals, [M L t⁻²].

F_A = Força de adesão de uma partícula em uma superfície, [M L t⁻²].

$F_{adesão}$ = Força de adesão, [M L t⁻²].

F_c = Força de capilaridade, [M L t⁻²].

F_e = Força eletrostática, [M L t⁻²].

$F_{vdw} = F^0$ = Força de Van der Waals, [M L t⁻²].

H = Constante de Hamaker, [M L² t⁻²].

- h = Altura da deformação formada, [L].
 h_1 = valor do “achatamento” da esfera 1, [L].
 h_2 = valor do “achatamento” da esfera 2, [L].
 k = Constante da Equação (59-61), [-].
 k_1 = Parâmetro da Equação (60-61), [-].
 k_1 = Constante da Equação (63), [-].
 k_2 = Constante da Equação (63), [-].
 k_3 = Constante da Equação (63), [-].
 K = Módulo reduzido de elasticidade (Módulo de Young), $[M L^{-1} t^{-2}]$.
 K' = Dureza de contato entre as esferas, $[M t^{-2}]$.
 K_E = Constante de proporcionalidade, [-].
 m = adimensional (c/a), [-] – Equação (38).
 m = Massa das partículas, [M].
 q = Carga da partícula, [I t].
 r = Distância entre a superfície do substrato e o eixo de rotação, [L].
 r_p = Raio da partícula, [L].
 R = Raio da esfera, [L].
 R^2 = Coeficiente de regressão linear, [-].
 R' = Raio da rugosidade, [L].
 RH = Umidade relativa do ar, [-].
 R_p = Raio de curvatura da partícula, [L].
 R_s = Raio de curvatura da superfície no ponto de contato, [L].
 s = Área de deformação elástica entre duas esferas em contato, $[L^2]$.
 V_p = Volume da partícula, $[L^3]$.
 W = Trabalho de adesão por unidade de área ao contato das superfícies, $[M t^{-2}]$.
 W' = Trabalho de ruptura, $[M L^2 t^{-2}]$.
 x = Distância média entre o material e a camada fina da rugosidade da superfície, [L].
 x_q = Distância de separação de carga contrárias, [L].
 y = Distância do centro do círculo de contato, [L].
 z_0 = Distância de separação efetiva entre as superfícies, [L].
 Z_0 = Menor distância entre as superfícies de contato entre as duas esferas, [L].
 θ = Ângulo de contato entre a partícula aderida e o líquido, [-].

θ_1 = Ângulo de contato entre a esfera e o líquido, [-].

θ_2 = Ângulo de contato entre a superfície plana e o líquido, [-].

α = Ângulo entre a perpendicular do centro de gravidade da partícula e a linha conectando o centro de gravidade da partícula e a superfície do menisco, [-].

α' = Rugosidade, [-].

ν = Coeficiente de Poisson, [-].

ν_1 = Coeficiente de Poisson da esfera 1, [-].

ν_2 = Coeficiente de Poisson da esfera 2, [-].

δ = Deformação da esfera, [L].

$\bar{\delta}$ = Deformação da esfera calculado utilizando o modelo de Maugis, [L].

δ_c = Deslocamento de JKR ao desprendimento, [L].

ϕ = Esfericidade da partícula, [-].

ϕ_c = Fração de compactação da estruturas de aglomerado, [-].

β = Força que o campo elétrico aplica à carga da partícula, [M L t⁻²].

ϕ = Fração de compactação, [-].

λ = Parâmetro adimensional de Maugis, [-].

σ = Resistência a tração teórica, [M L⁻¹ T⁻²].

σ_A = Desvio padrão das alturas das rugosidades da superfície, [-].

σ_g = Desvio padrão geométrico, [-].

μ_M = Parâmetro adimensional de Müller, [-].

ρ_p = Densidade da partícula, [M L⁻³].

φ_p = Parâmetro adimensional de Pashley, [-].

ω = Velocidade angular da centrífuga, [T⁻¹].

γ = Tensão superficial do líquido, [M T⁻²].

γ_{s1} = Energia livre interfacial sólido-líquido, [M L² t⁻²].

γ_1 = Tensão superficial da fase 1 por unidade de área, [M T⁻²].

γ_2 = Tensão superficial da fase 2 por unidade de área, [M T⁻²].

γ_{12} = Tensão superficial da interface entre 1 e 2 por unidade de área, [M T⁻²].

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A adesão pode ser compreendida como atração entre dois corpos sólidos, com superfície de contato comuns, e produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares de ação a curta distância. A adesão entre superfícies sólidas em contato é muito importante para as propriedades mecânicas quando o assunto é a separação. Está presente na fluidização de partículas finas, na microencapsulação e em meios granulares (Charlaix e Crassous, 2005).

Compreender a adesão de partículas e a sua remoção das superfícies é importante para muitos processos industriais. Por exemplo, na indústria microeletrônica, partículas aderentes com diâmetro muito pequeno podem contaminar os dispositivos eletrônicos de uma placa e produzir graves defeitos quanto ao desempenho da mesma (Burdick et al., 2005). Como os dispositivos eletrônicos continuam diminuindo aceleradamente de tamanho, métodos para remoção dessas partículas micrométricas são necessários por essas indústrias (Rimai e Busnaina, 1995 e Krishanan et al., 1994). Conhecer a força de adesão não só é importante para a descrição quantitativa de dispositivos eletrônicos, mas também para os processos de filtração e de limpeza de ar industriais. Por isto um número grande de trabalhos teóricos e experimentais é dedicado aos problemas de adesão, como revisado por Corn (1966), Krupp (1967), Zimon (1969), Astm (1977), Lam e Newton (1982), Busnaina et al. (1993), Podczek (1995), Rimai et al. (2000), Oláh e Vancso (2005), Li et al. (2006) e Farshchi-Tabrizi et al. (2006).

A adesão de partículas micrométricas e nanométricas em superfícies vem ganhando destaque em vários campos da tecnologia. Adesão entre pós e superfícies tem um papel significativo, por exemplo, no transporte pneumático de materiais, na eletrofotografia (Lee, Jaffe e Mittal; 1998), nos produtos farmacêuticos, na fabricação de semicondutores, na formação de aerossol, em processos xerográficos, na pintura, entre outros (Li et al., 2006). Também tem comportamento direto na poluição ambiental (Corn, 1961) e higiene industrial (Kordecki e Orr; 1960). Uma compreensão das interações de adesão pode contribuir para o conhecimento de fenômenos como a fricção, a lubrificação e o desgaste de equipamentos (Bowden e Tabor; 1950). Enquanto a adesão é requerida em certos processos técnicos como na filtração, no revestimento de superfície, em outros pode gerar efeitos não desejados, como por exemplo, na contaminação de *chips* de microcomputadores (Weiner, Kokosinski, Cook e

Grunze; 1988), nas superfícies ópticas sensíveis, nas indústrias de alimentos e farmacêuticas e nas tubulações, resultando em uma redução na eficiência das instalações industriais. Nas indústrias de preenchimento de cápsulas, adesões indesejadas podem afetar seriamente o desempenho dos equipamentos, devido ao contato repetido do material particulado com as estruturas metálicas do equipamento (Siegel e Hanus; 1963).

Há várias técnicas experimentais e métodos diferentes que foram desenvolvidos, durante os anos, para medir a força de adesão entre partícula e uma superfície (Krupp, 1967; Boehme, Krupp, Rabenhorst e Sandstede, 1962; Lodge, 1983). Entre esses métodos (Microscopia de Força Atômica e Separação por Campo Elétrico), a técnica centrífuga vem sendo utilizada (Otsuka, Iida, Danjo e Sunada, 1988; Booth e Newton, 1987; Otsuka, Iida, Danjo e Sunada, 1983; Podczec et al., 1995; Shimada et al., 2000; Zhou et al., 2003 e Takeuchi, 2006) e tem como vantagem poder determinar a força de adesão entre partículas reais de formas regulares e irregulares em superfícies lisas ou rugosas. A técnica centrífuga permite determinar a força de adesão, através da distribuição da força adesiva dentro de um grupo grande de partículas (incluindo até 1000 partículas) sobre um substrato, em uma única medida (Böehme et al., 1962). Para este método, a força de adesão é igual em magnitude, mas com sinal oposto, à força centrífuga requerida para desprender as partículas do substrato. Os resultados levantados são tratados estatisticamente para se obter a força de adesão média das partículas.

Portanto, a força de adesão de diferentes materiais pulverulentos em diferentes substratos é investigada utilizando-se a técnica centrífuga. Dado o grande interesse de compreendermos o que este fenômeno representa na adesão de partículas em superfícies e sua complexidade, este fenômeno ainda está longe de ser compreendido. Isto se deve ao fato da adesão partícula-superfície ser influenciada pelas características físico-químicas dos materiais pulverulentos e dos substratos como, por exemplo, tamanho da partícula e rugosidade das superfícies. Assim, diante a importância da força de adesão em vários processos, este trabalho tem como objetivo investigar a influência do tamanho das partículas de materiais pulverulentos orgânicos e inorgânicos sobre a força de adesão partícula substrato, utilizando a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e desprendimento e em diferentes substratos. O que certamente, será um grande passo na determinação da força de adesão entre partículas, parâmetro de extrema importância para o dimensionamento de alguns equipamentos tais como: filtros de mangas, de secagem de pastas, de recobrimento de partículas entre outros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Adesão

Adesão entre superfícies é governada pela deformação de dois corpos em contato e, pelas forças de superfícies atuando entre eles. Estes dois fenômenos estão intrinsecamente acoplados e dependerão da deformação provocada pelas forças que estão agindo e, ao mesmo tempo, as forças de superfícies dependerão da geometria dos corpos. Esta interdependência faz com que a teoria da adesão seja um problema complexo e que ainda está em debate (Tykhoniuk et al., 2007).

Segundo Oláh e colaboradores (2005), o termo adesão é atribuído às forças atômicas e moleculares responsáveis em manter duas fases juntas. Podczec e colaboradores (1995) definiram a adesão de partículas como o resultado de forças que existem entre partículas microscópicas e uma superfície sólida em contato. Várias definições para a adesão foram apresentadas (Kemball, 1954; Eley e Tabor, 1961; Salomon, 1965; Bikerman, 1968; Good, 1976; Astm, 1977; Mittal, 1977 e Zimon, 1982), porém nenhuma é totalmente satisfatória ou universalmente aceita. Para todos os efeitos, a adesão pode ser compreendida como atração entre dois corpos sólidos, com superfícies de contato comuns, e produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares de ação a curta distância.

A determinação da força de adesão entre partículas é de grande interesse a uma gama de operações industriais, tão diversa como o processamento de materiais cerâmicos e até a limpeza de gases. Em todas as operações, estas forças são responsáveis pela resistência mecânica de aglomerados eventualmente formados no processo (Aguilar, 1995).

Para uma melhor compreensão teórica destes processos, é necessário distinguir as forças envolvidas na adesão entre partículas e um substrato.

2.2 – Forças envolvidas na Adesão entre Partículas e um Substrato

Geralmente, a força de adesão entre corpos contíguos é devida às forças de Van der Waals, eletrostática e capilar (Rumpf, 1977), mas o predomínio de uma ou várias destas forças depende das condições locais durante os experimentos e das propriedades físico-químicas dos materiais em contato. Todas estas forças, em tese, são afetadas pelo formato da

partícula, pela rugosidade da superfície, pelo tamanho da partícula, pela umidade relativa do ar e pela pressão de aplicação do contato (Ahrens et al., 2005). Assim, a força de adesão total é admitida como o somatório dessas três forças (Stewart, 1986).

A força mais importante é a força de Van der Waals. Esta força surge porque o movimento aleatório dos elétrons, em qualquer material, produz áreas transitórias de cargas concentradas chamadas dipolos (Rumpf, 1977). A qualquer instante estes dipolos induzem dipolos complementares no material vizinho, produzindo forças atrativas, como mostrado na Figura 2.1. A força de Van der Waals diminui rapidamente com a distância de separação entre as superfícies; conseqüentemente, esta influência estende-se apenas por alguns diâmetros moleculares longe da superfície (Krupp, 1967).

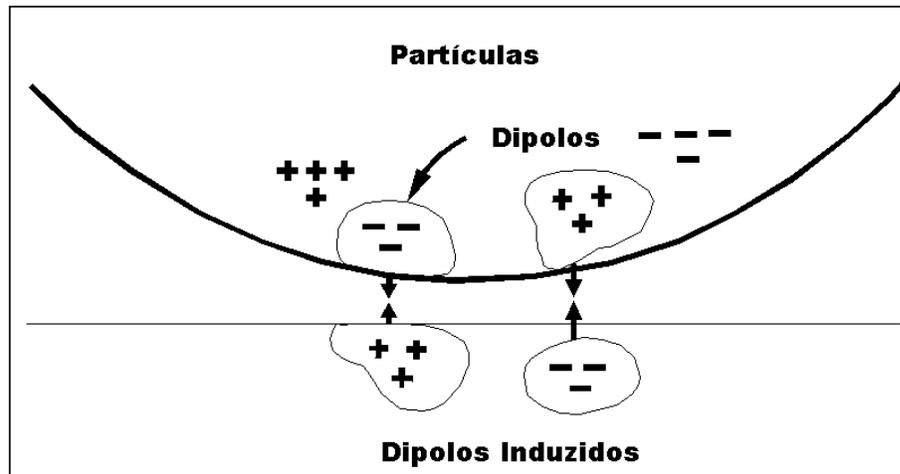


Figura 2.1 – Força de Van der Waals (Hinds, 1998).

Em um nível submicroscópico a maioria das superfícies é irregular e com picos, chamadas rugosidades, como mostrado na Figura 2.2.

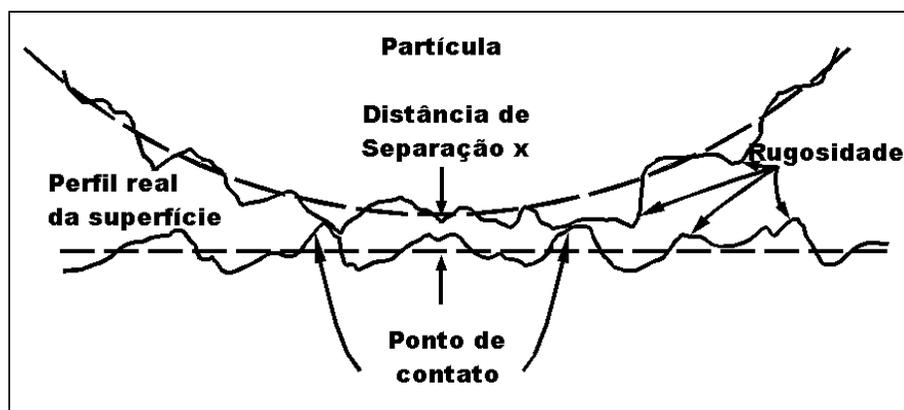


Figura 2.2 – Superfície submicroscópica de geometria de contato (Hinds, 1998).

Inicialmente, o contato entre uma partícula e uma superfície acontece somente em algumas rugosidades da superfície. Como mostra a Figura 2.2, a maior parte do material está separado por uma distância de separação x , que depende da rugosidade da superfície.

O efeito da força de Van der Waals é determinado integrando as forças entre todos os pares de moléculas de uma partícula esférica perto de uma superfície plana. A força de adesão resultante entre a partícula e uma superfície plana é dada pela Equação (1) proposta por Corn, (1961):

$$F_{vdw} = \frac{H \cdot D}{12 \cdot z_0^2} \quad (1)$$

sendo D expresso pela Equação (2):

$$D = \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \quad (2)$$

Em que, F_{vdw} é a força de Van der Waals, H é a constante de Hamaker, que depende dos materiais envolvidos e estende-se de $6 \cdot 10^{-20}$ até $150 \cdot 10^{-20}$ J para materiais comuns, D é a média harmônica dos diâmetros das esferas e z_0 é distância de separação efetiva entre as superfícies. A Equação (1) é aplicada para materiais duros com achatamento desprezível na área de contato. Depois do contato inicial da partícula, a força de Van der Waals e a força eletrostática deformam gradualmente a superfície para reduzir a distância de separação e aumentar a área de contato até que as forças atrativas equilibrem as forças que resistem à deformação. A dureza dos materiais envolvidos delimita o tamanho da área de contato final e, portanto, a intensidade da força de adesão. O achatamento pode provocar o aumento da força de adesão em até quinze vezes em metais leves e cem vezes em plásticos (Tsai et al., 1991).

A maioria das partículas de $0,1 \mu\text{m}$ ou maiores carrega alguma pequena carga resultante q , que induz uma carga igual, mas de sentido contrário na superfície. Isto resulta em uma força eletrostática atrativa expressa pela Equação (3) proposta por Hinds (1998):

$$F_e = \frac{K_E \cdot q^2}{x^2} \quad (3)$$

Em que, F_e é a força eletrostática, K_E é a constante de proporcionalidade que depende do sistema de unidades usado e x_q é a distância de separação de carga contrárias, que pode ser diferente da distância de separação das superfícies.

Partículas de material isolante a baixas umidades retêm a sua carga e a forma das superfícies são fortemente influenciadas pela força eletrostática. O equilíbrio de cargas para partículas maiores que $0,1 \mu\text{m}$ é aproximadamente proporcional a \sqrt{d} . Geralmente, a maioria dos materiais tem moléculas líquidas adsorvidas em sua superfície. Uma força de atração entre uma partícula e uma superfície é criada pela tensão superficial do líquido no espaço capilar no ponto de contato, como mostra a Figura 2.3.

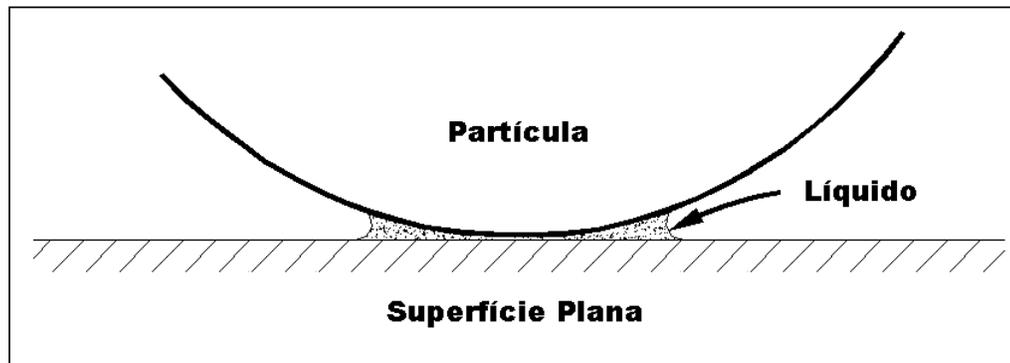


Figura 2.3 – Força de adesão devido a um filme líquido (Hinds, 1998).

Para umidades relativas maiores que 90% e superfícies lisas, esta força é representada pela Equação (4) proposta por Corn (1961):

$$F_c = 2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot d_p \quad (4)$$

Sendo que, F_c é a força de capilaridade, γ é a tensão superficial do líquido e d_p é o diâmetro da partícula. Para baixas umidades relativas do ar, a força depende da curvatura da rugosidade da superfície nos pontos de contato e não do diâmetro de partícula. Esta curvatura varia de partícula para partícula e origina uma distribuição da força de adesão em função do tamanho da partícula.

Medidas experimentais de forças de adesão são feitas determinando a força exigida para separar uma partícula de uma superfície. Estas podem ser medidas diretamente através de uma força centrífuga. Para materiais duros e superfícies limpas, uma expressão empírica útil

para a força de adesão, baseada em medidas diretas em partículas de vidro e quartzo ($> 20 \mu\text{m}$) a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Corn, 1961), é representada pela Equação (5):

$$F_{\text{adesão}} = 0,063 \cdot d_p \cdot [1 + 0,009 \cdot (\%RH)] \quad (5)$$

sendo que a força de adesão, $F_{\text{adesão}}$, é dada em Newton, o diâmetro da partícula, d_p , é dado em metro, e a umidade relativa do ar, %RH, em percentagem.

Segundo Rumpf (1977), a força eletrostática é dez vezes menor que a força de Van der Waals. O papel da força eletrostática na adesão é contribuir na sedimentação e na aglomeração das partículas (Visser, 1995). Em um ambiente seco, a força eletrostática pode surgir durante o contato de superfícies de materiais distintos, mas tende a ser constante no contato entre dois materiais idênticos (Zimon, 1982). Além disso, o uso de uma força de compressão para aumentar a verdadeira área de contato entre partículas e superfícies aumenta a força de Van der Waals por um fator de cerca de 5. Conseqüentemente, a relação entre força de Van der Waals e força eletrostática é dado por: $F_{\text{vdw}} \approx 50 \times F_e$ (Podczec et al., 1996).

Assim, as forças eletrostáticas são muito pequenas para influenciar significativamente as forças de adesão medidas após a aplicação de uma força externa. E, conforme mostrado por Gady et al. (1997, 1998a, 1998b) as forças de Van der Waals dominam as forças eletrostáticas quando a distância de separação partícula substrato é menor que 10 nm.

A força capilar surge da umidade entre os corpos contíguos. Materiais mais hidrofílicos porosos contêm freqüentemente umidade inserida nos poros que podem construir pontes líquidas nas superfícies aderidas (Schubert, 1981). Uma segunda fonte de força capilar é a umidade que se condensa na abertura entre os corpos contíguos. Tal condensação começa a ocorrer numa umidade relativa do ar acima de 50%. Abaixo deste valor não existe nenhuma força capilar (Zimon, 1982), e com umidades relativas do ar de 65-75% (Zimon, 1982; Ketkar e Keller, 1975) a força capilar domina a força de adesão. A extensão da força capilar devido à condensação de umidade depende da geometria da abertura entre os corpos contíguos e das propriedades dos materiais em contato como a rugosidade da superfície (Maugis, 1996).

As ligações de pontes líquidas móveis entre sólidos são a soma das forças devidas à sucção capilar e a tensão de superfície do líquido (Newitt e Conway-Jones, 1958). As pontes líquidas têm propriedades diferentes, dependendo da quantidade de líquido presente na ligação. Há três estados amplamente definidos de ponte líquida: o pendular, o capilar e o funicular, conforme podem ser vistos na Figura 2.4. Uma pequena quantidade de líquido

causa as pontes líquidas entre as partículas isoladas (Figura 2.4a). Esta região é chamada de estado pendular. Ao aumentar a quantidade de líquidos obtém-se primeiro o estado funicular (Figura 2.4b), onde ambas as pontes líquidas e alguns poros preenchidos com líquidos estão presentes e, em seguida, o estado capilar em que todos os poros estão completamente cheios (Figura 2.4c).

A força de atração devida à camada líquida adsorvida pode ser aproximadamente 50 vezes maior que as forças de Van der Waals para superfícies lisas, embora a rugosidade possa reduzir ou até mesmo eliminar estes efeitos (Rennie et al., 1998).

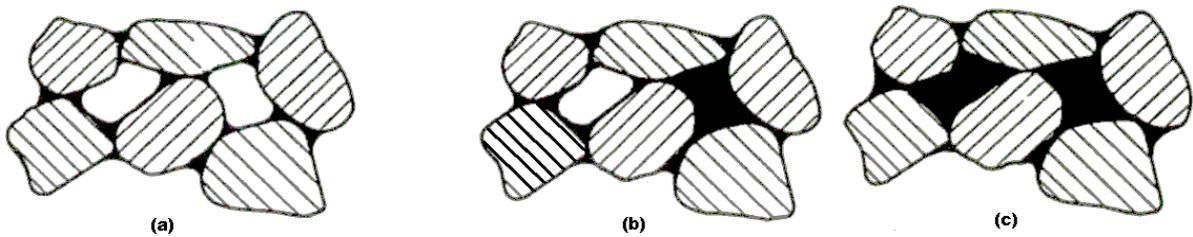


Figura 2.4 - Estados de Saturação de Líquido: **(a)** Estado Pendular; **(b)** Estado Funicular; **(c)** Estado Capilar (Newitt e Conway-Jones, 1958).

Um método simples para calcular as forças de capilaridade foi desenvolvido por O'Brien e Hermann (1973), conforme descrito na Equação (6):

$$F_c = 2\pi r_p \gamma \cdot (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (6)$$

sendo:

r_p = raio da partícula esférica aderida

γ = tensão superficial do líquido condensado

θ_1 e θ_2 = ângulos de contato entre os dois corpos em contato e o líquido, apresentados na Figura 2.5.

Posteriormente, Fisher e Israelachvili (1981) propuseram a Equação (7) para calcular a força de capilaridade:

$$F_c = 4\pi \cdot \gamma \cos \theta + 4\pi \cdot r_p \cdot \gamma_{sl} \quad (7)$$

sendo que:

θ = Ângulo de contato entre a partícula aderida e o líquido

γ_{sl} = energia livre interfacial sólido-líquido.

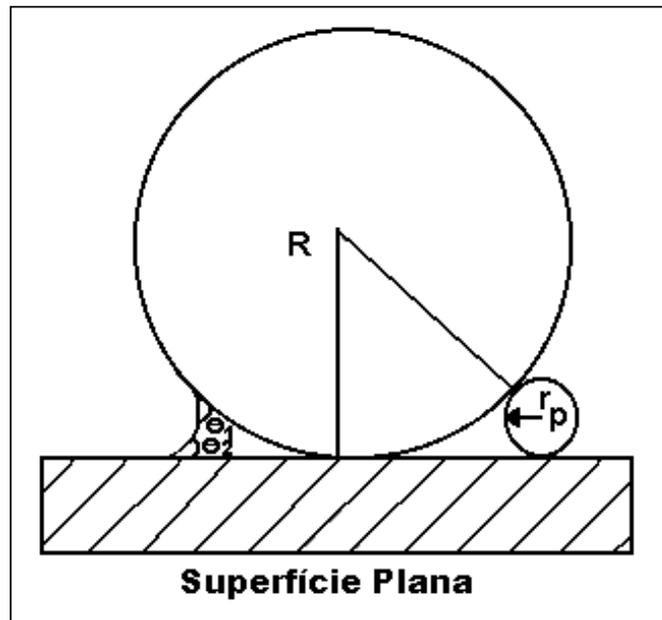


Figura 2.5 - Ponte líquida entre uma esfera e uma superfície plana (Dahneke, 1972).

Apresentadas as forças envolvidas na adesão entre partículas e um substrato, a força de adesão total é conhecida como o somatório dessas forças (Stewart, 1986) e está ilustrada na Equação (8).

$$F_{adesão} = F_{vdw} + F_e + F_c \quad (8)$$

Sendo:

F_{vdw} = força de Van der Waals

F_e = força eletrostática

F_c = força de capilaridade

2.3 - Morfologia das Partículas

A adesão entre partículas pode ser influenciada através da mudança da morfologia da partícula: atritando uma partícula a outra, ou acrescentando aerossóis entre elas ou partículas menores a sua superfície (Ott e Mizes, 1994). De modo geral, ambas as técnicas causam às partículas um contato mais íntimo e, por conseguinte uma maior adesão. O efeito da

rugosidade da superfície pode ser expresso mais rigorosamente usando a aproximação de Derjaguin (Israelachvili, 1992). A aproximação de Derjaguin é válida para atração de Van der Waals e atração eletrostática entre partículas. Quanto maior o contato entre duas superfícies maior é a adesão. Isto foi usado para explicar a diferença entre a adesão experimentalmente observada e a adesão predita pela teoria de Johnson, Kendal e Roberts (Schaefer et al., 1995; Johnson, Kendal e Roberts, 1971). A aplicabilidade da aproximação de Derjaguin para estes sistemas foi experimentalmente verificada por Mizes (2000). A aproximação de Derjaguin é determinada pela Equação (9):

$$F_{\text{adesão}} = W \left(\frac{R_p \cdot R_s}{R_p + R_s} \right) \quad (9)$$

sendo que, R_p é o raio de curvatura da partícula, R_s é o raio de curvatura da superfície no ponto de contato e W é o trabalho de adesão realizado para separar áreas unitárias de dois meios, desde o contato até o infinito no vácuo. Quando os dois meios são diferentes, este trabalho de adesão pode ser calculado pela Equação (10) sendo definido como W_{12} . Para os dois meios iguais, este trabalho é conhecido como trabalho de coesão W_{11} (Israelachvili, 1992).

$$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (10)$$

Sendo:

W_{12} = é o trabalho de adesão por unidade de área

γ_1 = é a tensão superficial da fase 1 por unidade de área

γ_2 = é a tensão superficial da fase 2 por unidade de área

γ_{12} = é a tensão superficial da interface entre 1 e 2 por unidade de área.

A energia superficial da interface é calculada utilizando a regra de Antonow's descrita por Adamson (1990), conforme mostra a Equação (11):

$$\gamma_{12} = \left| \gamma_1 - \gamma_2 \right| \quad (11)$$

O trabalho de adesão é a redução da energia livre de Gibbs por unidade de área, quando uma interface for formada entre duas superfícies individuais (Wu, 1985). O trabalho de adesão (ou separação) é um parâmetro fundamental que pode depender de vários fatores tais como: da rugosidade da superfície, dos materiais da superfície, da energia superficial, da pressão de aplicação e da umidade na superfície (Ahrens et al., 2005).

Para sólidos, γ_1 é usualmente denotada por γ_S e é dada em unidade de energia por unidade de área: $J m^{-2}$. Para líquidos, γ_1 é usualmente denotada por γ_L e é geralmente dada em unidade de tensão superficial ou energia superficial: $N m^{-1}$ (Israelachvili, 1992).

2.4 - Adesão e Aglomeração de Partículas Finas

Aumentando as forças de adesão entre partículas em um aglomerado aumenta-se a resistência do aglomerado, porque cada contato sobre a partícula requer mais força para provocar a ruptura deste aglomerado. Porém, partículas finas fortemente aderidas conduzem a estruturas leves devido a menores contatos e são considerados contatos fracos, embora cada contato da partícula individual possa ser mais forte. Assim, adesão pode aumentar ou diminuir a resistência do aglomerado. Como o processo de aglomeração é causado pela adesão, considera-se que a força do aglomerado final é proporcional a adesão (Kendall e Stainton, 2001).

2.4.1 - Teoria da Adesão

Adesão também pode ser definida como uma força F exigida para separar duas partículas idênticas, como mostrado na Figura 2.6.

A compreensão da conexão entre a força e a energia foi estabelecida por Bradley e Philos (1932). Eles criaram uma teoria de adesão para partículas esféricas rígidas somando a força de Van der Waals para todas as moléculas nas duas partículas e concluíram que a força de adesão deveria ser proporcional ao diâmetro da partícula (d_p) e ao trabalho de adesão (W) por unidade de área, dada pela Equação (12):

$$F_{\text{adesão}} = \frac{\pi \cdot W \cdot d_p}{2} \quad (12)$$

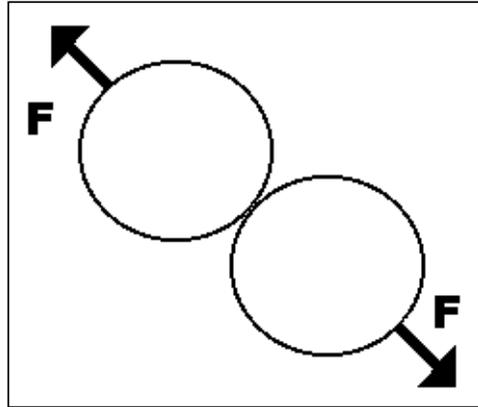


Figura 2.6 - Adesão pode ser definida como uma força F exigida para romper duas partículas (Kendall e Stainton, 2001).

Dois anos depois, Derjaguin (1934) tentou melhorar esta equação levando em conta a deformação elástica, mas não obteve a resposta adequada. Uma análise mais correta para adesão de esferas elásticas lisas foi encontrada em 1971 através de Johnson e colaboradores que mostraram que o trabalho de adesão de esferas lisas de borracha elástica pode ser medido através do tamanho da mancha de contato deformada elasticamente, e que a força de separação pode ser representada pela Equação (13):

$$F_{\text{adesão}} = \frac{3 \cdot \pi \cdot W \cdot d_p}{8} \quad (13)$$

Novamente, neste caso de partícula elástica, a força de adesão aumentou proporcionalmente com o diâmetro das partículas, confirmando a regra de Bradley e Philos (1932). Isto é contraditório porque foi constatado através de experiências que a força de coesão tende a diminuir com o aumento da partícula, partículas finas aderem mais e partículas grandes aderem menos. Esta observação é melhor explicada comparando a força de adesão da partícula com a força gravitacional que tende a romper as partículas (Kendal, 1994). Para compreender melhor torna-se necessário fazer a seguinte analogia:

Tomando uma partícula grande, como um pneu de carro liso de 1 metro de diâmetro, está claro que gravidade é muito maior que a força de adesão de 0,1 N. Se o pneu é áspero, então o raio de ação das forças de adesão são reduzidas e há muita pouca influência da adesão no comportamento do pneu. Agora, para uma partícula de 1 μm de diâmetro, como uma bactéria, a adesão é cerca de um milhão de vezes maior que a gravidade. Assim, partículas

pequenas são dominadas por forças de adesão e partículas grandes pela gravidade (Kendall e Stainton, 2001).

2.4.2 - Força de Aglomerados

A adesão é influenciada pela resistência de aglomerados. Seria esperado que, com o aumento da adesão, aglomerados devessem ficar mais fortes. Esta é uma teoria desenvolvida por Rumpf (1962) e Zimon (1982). O primeiro expressou a adesão de partículas em termos da constante de Hamaker e a separação entre superfícies, parâmetros que são difíceis de medir. Portanto, o modelo de adesão expresso pela Equação (13) é melhor representado, porque contém um parâmetro, W , que pode ser prontamente definido e medido experimentalmente. Ambas as teorias deram a mesma dependência linear da força de adesão com o tamanho de partícula. Isto conduz a uma resistência de aglomerado que diminui linearmente com o tamanho da partícula (Kendall, Howard e Birchall, 1983).

Se a força de separação para cada esfera é determinada pela Equação (13) de JKR, e se todas as esferas se desprendem simultaneamente como Rumpf (1962) assumiu, então a resistência à tração teórica σ do aglomerado pode ser expresso pela Equação (14) (Kendall, Alford e Birchall, 1986):

$$\sigma = \frac{3 \cdot \pi \cdot W}{8 \cdot d_p} \quad (14)$$

A equação (14) mostra que a resistência de um aglomerado pode ser surpreendentemente alta se o tamanho da partícula for bastante pequeno e não possuir nenhuma imperfeição. Por exemplo, um silicato de cálcio hidratado (partícula de cimento) com tamanho da partícula de 10 nm e um trabalho de adesão de $0,1 \text{ J m}^{-2}$ teria de acordo com a equação (14) uma resistência à tração teórica de 12 MPa.

Porém, o problema é mais complexo por causa da estrutura composta do produto do cimento. Falhas e rupturas no aglomerado tendem a reduzir a força, enquanto fraturas de não-equilíbrio tende a aumentar a força. Se estes são considerados os efeitos mais complexos, juntamente com a fração de compactação ϕ_c das estruturas de aglomerado, surge então a Equação (15) que é realística para a força de aglomerados (Kendall, Alford e Birchall, 1986):

$$\sigma = \frac{90 \cdot \phi_c^4 \cdot W'}{c^{1/2}} \quad (15)$$

Sendo W' o trabalho de ruptura.

O tamanho da partícula é importante, mas o comprimento da falha c também representa uma parte dos resultados indicada por uma dependência, $c^{-1/2}$. Se o aglomerado não tem defeitos e, então, só tem falhas que são comparáveis ao diâmetro da partícula, então $c = d_p$ e esta equação reduz a Equação (16):

$$\sigma = \frac{90 \cdot \phi_c^4 \cdot W'}{d_p^{1/2}} \quad (16)$$

Portanto, a força de aglomerados deve aumentar com a adesão, mas também deve influenciar fortemente na compactação, através do tamanho da partícula e pela estrutura do aglomerado.

2.5 - Modelos Teóricos do Contato entre Partículas

Os principais modelos mecânicos, que tentam explicar o contato entre esferas assim como a adesão entre partículas e uma superfície, são os modelos de Hertz, de Derjaguin-Müller-Toporov (DMT), de Johnson-Kendall-Roberts (JKR) e de Maugis (Capella e Dietler, 1999). Estes modelos desprezam o contato plástico e assumem somente o contato elástico. Foram desenvolvidos, para estudar a interação entre uma esfera perfeita e uma superfície plana, totalmente lisa, bem como, para estudar o contato entre duas esferas elásticas.

2.5.1 - Modelo de Hertz

A teoria de Hertz foi desenvolvida em 1881 e considera que quando uma esfera elástica está em contato com uma superfície plana e rígida, e na ausência de energia superficial e de força de compressão entre as mesmas, o contato ocorre somente na superfície da esfera, sem a existência de deformação. Mas, se uma esfera é comprimida contra uma superfície plana com uma força (F), então existirá uma deformação (δ) na esfera, como

mostra a Figura 2.7. Entretanto, o modelo de Hertz não considera as forças de superfície e nem as forças de adesão, considera somente a força externa (F) aplicada.

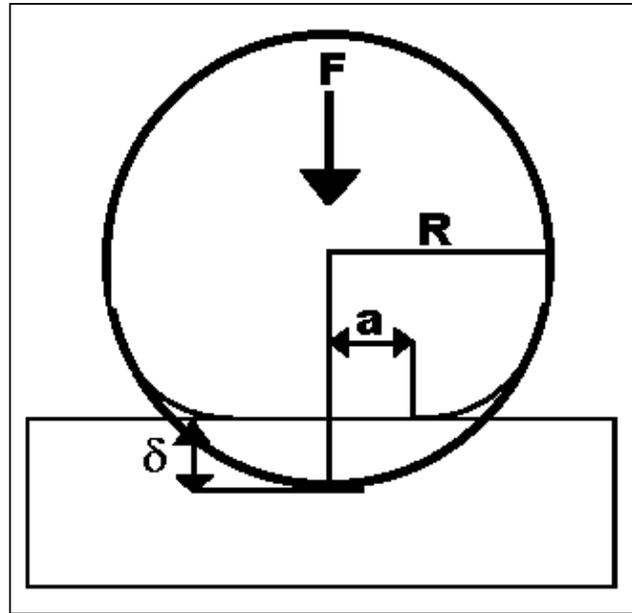


Figura 2.7 – Contato entre uma esfera elástica e uma superfície plana (Cappella e Dietler, 1999).

Para uma esfera de raio (R) comprimida contra uma superfície plana por uma força (F), a adesão ($F_{adesão}$), o raio de contato (a), o raio de contato na adesão zero (a_0) e a deformação da extremidade esférica (δ) são determinados pelas Equações (17) a (21):

$$F_{adesão} = 0 \quad (17)$$

$$a = \sqrt{\frac{RF}{K}} \quad (18)$$

$$a_0 = 0 \quad (19)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \frac{F}{K} \quad (20)$$

e,

$$P(x) = \frac{3K\sqrt{1-x^2}}{2\pi R} = \frac{3F\sqrt{1-x^2}}{2\pi a^2} \quad (21)$$

Na qual $x = y/a$, sendo que y é a distância do centro do círculo de contato, e o módulo reduzido de Young, K , é dado pela Equação (22):

$$\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \right) \quad (22)$$

Na Equação (22), E , E_i , ν e ν_i são os módulos de Young e os raios de Poisson da superfície plana, ou seja, da amostra e da extremidade final.

2.5.2 - Modelo de Derjaguin-Müller-Toporov (DMT)

Na teoria de Derjaguin-Müller-Toporov (DMT) de 1975, a esfera elástica é deformada de acordo com a teoria de Hertz, mas além da carga externa F , também são levadas em conta as forças que agem entre os dois corpos fora da região de contato. Estas forças somente produzem uma área finita de contato. Se uma carga externa for aplicada, a área de contato aumentará. Se uma carga negativa for aplicada, a área de contato diminuirá até alcançar valor zero. Neste momento a força de adesão alcança seu valor máximo. As Equações (23) a (27) são as equações correspondentes as Equações (17) a (21) obtidas minimizando a soma elástica e a energia de superfície. Veja as Equações (23) a (27):

$$F_{\text{adesão}} = 2\pi RW \quad (23)$$

$$a = \sqrt{(F + 2\pi RW) \frac{R}{K}} \quad (24)$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{2\pi W}{k} R^2} \quad (25)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} \quad (26)$$

$$P(x) = \frac{3K\sqrt{1-x^2}}{2\pi R} = \frac{3F\sqrt{1-x^2}}{2\pi a^2} \quad (27)$$

A teoria de Derjaguin-Müller-Toporov (DMT) é aplicável para sistemas com baixa adesão e pequenos raios.

2.5.3 - Modelo de Johnson-Kendall-Roberts (JKR)

A teoria de Johnson-Kendall-Roberts (JKR) de 1971, não leva em conta as forças de longa extensão fora da área de contato e considera somente forças de curta extensão dentro da região de contato. Com suposições de JKR, as equações correspondentes as Equações (17) a (22) são as Equações (28) a (32):

$$F_{\text{adesão}} = \frac{3}{2} \pi R W \quad (28)$$

$$a = \sqrt{\frac{R}{K} \left[F + 3\pi R W + \sqrt{6\pi R W F + (3\pi R W)^2} \right]} \quad (29)$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{6\pi R^2 W}{K}} \quad (30)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{6\pi W}{K}} \quad (31)$$

e,

$$P(x) = \frac{3K}{2\pi R} \sqrt{1-x^2} - \sqrt{\frac{3KW}{2\pi a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}} \quad (32)$$

As teorias de DMT e de JKR criaram várias controvérsias experimentais como também assuntos teóricos depois desta publicação. Até que em 1992 Attard e Parker, calcularam a deformação elástica e a adesão de dois corpos convexos que interagem por forças de superfície de extensões finitas. Comparando a força de adesão com o valor predito através da teoria de JKR, quando um certo parâmetro σ_A que é uma função da energia de superfície, raio de curvatura e dureza do material, muito menor que um, ou seja, para corpos duros com energias de superfície pequenas e raio pequenos de curvatura, o valor de DMT é mais preciso que valor de JKR. Müller (1983) apresentou um cálculo numérico altamente consistente que abandona a hipótese das forças de adesão não alterarem mais a geometria hertziana. O resultado é uma transição contínua da teoria de DMT para a teoria de JKR quando um único parâmetro μ_M for variado. Pashley (1984) já tinha apresentado um

parâmetro φ_p que é proporcional ao raio h , isto é, a altura da deformação formada quando a esfera está abaixo da distância de separação, z_0 , ou seja, uma dimensão atômica típica representada pela Equação (33):

$$\varphi_p = \frac{h}{z_0} \cong \sqrt{\frac{RW^2}{K^2 z_0^3}} \quad (33)$$

Quando $\varphi_p < 1$, $h < z_0$, forças de superfície fora da área de contato tornam-se importantes e o comportamento aproxima-se da teoria de DMT. Seguindo a análise de Müller et al. (1983) o modelo de DMT tem forte influência quando $\varphi_p < 3$ (sólidos duros de pequeno raio e baixa energia de superfície) e o modelo de JKR têm forte influência quando $\varphi_p > 3$ (corpos maleáveis de grande raio e grande energia de superfície).

2.5.4 - Modelo de Maugis

A teoria de Maugis (1996) é a teoria mais completa e precisa e é aplicada a todos os materiais, de grandes esferas rígidas com altas energias de superfície para pequenos corpos complacentes com baixas energias de superfície. Todas as propriedades dos materiais são descritas por um parâmetro dimensional λ dado pela Equação (34):

$$\lambda = \frac{2,06}{z_0} \sqrt{\frac{RW^2}{\pi K^2}} \quad (34)$$

Este parâmetro λ é proporcional ao parâmetro μ_M introduzido por Müller (1983) ($\lambda = 0,4 \mu_M$), o parâmetro φ_p apresentado por Pashley e o parâmetro σ_A apresentado por Attard e Parker (1982) ($\lambda \cong 0,4 \sqrt{\sigma_A^2}$). Um grande λ ocorre para corpos mais complacentes e adesivos, considerando que um pequeno λ ocorre para pequenos materiais rígidos com baixas energias de superfície. Na teoria de Maugis, adesão é considerada como uma tensão adicional constante em cima de uma região anular ao redor da área de contato. A relação da largura da região anular c para o raio de contato a é denotado por m . Introduzindo os parâmetros dimensionais expressos pelas Equações (35) a (37):

$$\bar{A} = \frac{a}{\sqrt{\pi WR^2 / K}} \quad (35)$$

$$\bar{F} = \frac{F}{\pi WR} \quad (36)$$

e,

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\sqrt{\pi^2 W^2 R / K^2}} \quad (37)$$

Um conjunto de equações paramétricas é obtido. Em particular, as Equações (38) a (40) dadas por Maugis, são correspondentes às Equações (17) e (21):

$$\bar{\delta} = \bar{A}^2 - \frac{4}{3} \bar{A} \lambda \sqrt{m^2 - 1} \quad (38)$$

$$\frac{\lambda \bar{A}^2}{2} \left[\sqrt{m^2 - 1} + (m^2 - 1) \operatorname{arctg} \sqrt{m^2 - 1} \right] + \frac{4 \lambda^2 \bar{A}}{3} \left[-m + 1 + \sqrt{m^2 - 1} \operatorname{arctg} \sqrt{m^2 - 1} \right] = 1 \quad (39)$$

e,

$$\bar{F} = \bar{A}^3 - \lambda \bar{A}^2 \left(\sqrt{m^2 - 1} + m^2 \operatorname{arctg} \sqrt{m^2 - 1} \right) \quad (40)$$

As Equações (38) a (40) formam um sistema de equações que habilita o cálculo de m . A força de adesão ($F_{\text{adesão}}$) dada pela Equação (40) é $2\pi RW$ para $\lambda \rightarrow 0$ (DMT) e $1,5\pi RW$ para $\lambda \rightarrow \infty$ (JKR).

Em 1997, Johnson e Greenwood construíram um mapa do comportamento elástico dos corpos, conforme mostra a Figura 2.8, sendo que, no eixo das abscissas tem-se a carga ou a força de compressão aplicada na partícula e no eixo das coordenadas tem-se o parâmetro adimensional de Maugis. A Figura 2.8 permite encontrar o modelo a ser aplicado em função das propriedades do material (Cappela e Dietler, 1999).

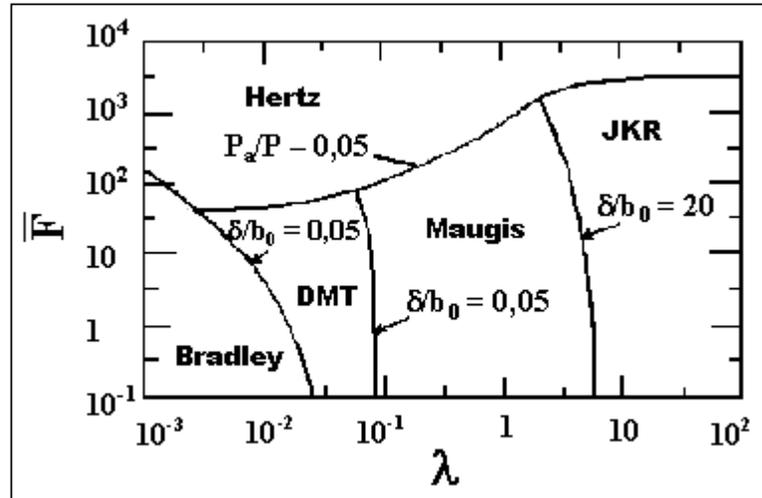


Figura 2.8 – Mapa da adesão para esferas elásticas baseado no Modelo de Maugis (Johnson, 1998).

2.6 - Influência da Rugosidade das Superfícies na Força de Adesão

É comum que superfícies planas e secas não aderem quando pressionadas contra elas. Isto pode facilmente ser atribuído à rugosidade da superfície. Este comportamento foi modelado por Johnson-Kendall-Roberts (1971) e condicionado por Fuller e Tabor (1975) e por Derjaguin-Müller-Toporov (1975) pelas condições de Maugis (1996), como ilustra a Figura 2.9. A influência da rugosidade é caracterizada pelo parâmetro (σ_A/δ_c) , onde δ_c é o deslocamento da força *spin-off* de JKR determinado pela Equação (41):

$$\delta_c = \frac{3}{4} \left(\frac{\pi^2 w^2 R}{E^2} \right)^{1/3} \quad (41)$$

Se todas as rugosidades são da mesma altura ($\sigma_A = 0$), todas as junções adesivas serão quebradas simultaneamente e (para um contato de JKR) $P_c = N \cdot p_c$, onde P_c é a força *spin-off* total e é normalizada por $N \cdot p_c$, onde N é aspereza inclinada esfericamente e p_c é a força *spin-off* de JKR para uma única aspereza ($= 1,5 \cdot \pi \cdot \omega \cdot R$). Para um contato de DMT, a força *spin-off* é aumentada pelo fator 4/3. Está claro na Figura 2.9 que a força *spin-off* cai rapidamente com o aumento de σ_A , tal que a adesão efetiva é eliminada quando σ_A excede $2\delta_c$.

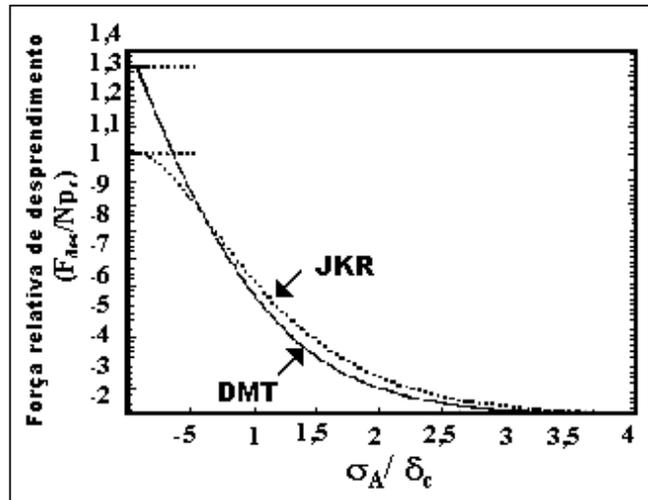


Figura 2.9 - Efeito da rugosidade na adesão (Johnson, 1998).

Quando uma superfície não é perfeitamente lisa, mas tem rugosidades, a distância entre as duas esferas contatadas é a distância z_0 mais o raio das rugosidades, R' , como mostra a Figura 2.10. E a força de Van der Waals, $F^{0'}$, entre duas esferas é representada pela Equação (42):

$$F^{0'} = \frac{H \cdot d_p}{12(z_0 + R')^2} = \frac{F^0}{(1 + R'/z_0)^2} \quad (42)$$

Supondo uma partícula muito pequena de diâmetro d_p' . A força de Van der Waals entre esta e uma esfera maior é $Hd_p' / 12z_0^2$.

Se a partícula pequena assumir uma posição entre as duas esferas maiores, a distância entre as duas esferas maiores é aumentada até $2z_0 + d_p'$, como mostra a Figura 2.11. Agora a força de Van der Waals consiste na força entre as duas esferas maiores (Equação (43)) mais a força entre a partícula pequena e as duas esferas (Equação (44)). Logo a força total do sistema, F^{0+} , é dada pela soma das Equações (43) e (44) originando a Equação (45):

$$F^{0'} = \frac{Hd_p}{12(2z_0 + d_p')^2} \quad (43)$$

$$F^{0''} = \frac{H(d'_{p1} + d'_{p2})}{12z_0^2} \quad (44)$$

$$F^{0+} = F^{0'} + F^{0''} = \frac{Hd_p}{12(2z_0 + d'_p)^2} + \frac{H(d'_{p1} + d'_{p2})}{12z_0^2} \quad (45)$$

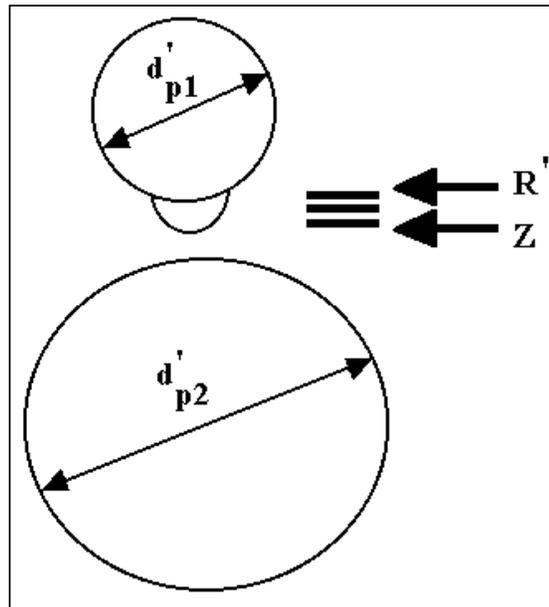


Figura 2.10 - Uma esfera rugosa em contato com uma esfera lisa (Xie, 1997).

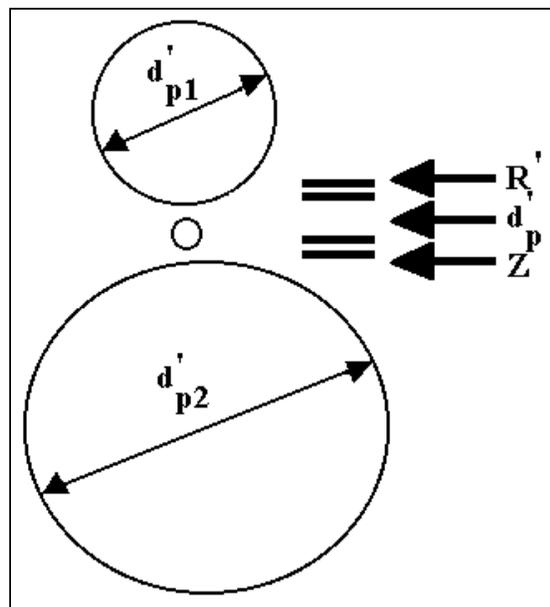


Figura 2.11 - Contato em sistema Sandwich (Xie, 1997).

Supondo agora que a partícula pequena é na realidade uma rugosidade existente na esfera 1 (na prática a rugosidade é assumida como a metade de uma esfera com raio $R'=d'/2$). Então a força de Van der Waals, F^{0+} , é dado pela Equação (46):

$$F^{0+} = F^{0'} = \frac{Hd_p}{12(z_0 + R')^2} + \frac{Hd'_p}{12z_0^2} \quad (46)$$

Dentro da faixa de tamanho (10 – 100 μm), a força total de Van der Waals, F^{0+} , é virtualmente a mesma força de Van der Waals para as esferas lisas, quando as rugosidades forem menores que 0,01 μm . Porém, a interação entre a rugosidade e a outra esfera original começa a dominar quando a rugosidade for maior que 0,1 μm .

A conclusão pode ser assumida que, quando duas esferas entram em contato, o diâmetro das equações para determinar a força de Van der Waals deve ser substituída pelo tamanho da superfície das rugosidades, se o raio das esferas for maior que 0,1 μm . Se o raio da superfície das rugosidades for menor que 0,01 μm , as esferas podem ser consideradas como lisas (Xie, 1997).

2.7 - Influência das Propriedades Mecânicas das Superfícies

O efeito da deformação sobre a força de adesão é freqüentemente tratado usando o método de energia desenvolvido por Johnson, Kendall, e Roberts (teoria de JKR) (1971) e por Derjaguin, Muller, e Toporov (teoria de DMT) (1975). Em geral, este método é para deformação pequena e completamente elástica. Porém, Dahneke (1972) e Cottaar e Rietema (1985) utilizaram a teoria de Hamaker para estudar os efeitos da deformação de partícula sobre a força de adesão, calculando a energia de superfície das interações intermoleculares sobre dois corpos em contato, o qual possui a vantagem de ser independente da natureza da deformação. Quando duas esferas entram em contato, o achatamento de cada uma delas pode ocorrer de diversas formas dependendo da dureza de cada uma delas, conforme pode ser visto na Figura 2.12 (a) e (b).

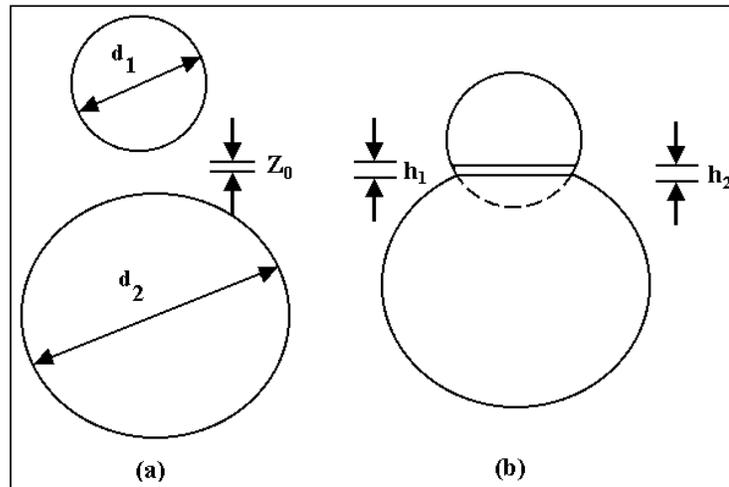


Figura 2.12 – Ilustração do contato entre duas esferas:
 (a) antes da deformação; (b) depois da deformação (Xie, 1997).

Sendo:

d_1 = diâmetro da esfera 1 (m).

d_2 = diâmetro da esfera 2 (m).

h_1 = valor do “achatamento” da esfera 1 (m).

h_2 = valor do “achatamento” da esfera 2 (m).

Z_0 = menor distância entre as superfícies de contato entre as duas esferas (m).

Para uma deformação totalmente elástica sob uma força de compressão F , a área de deformação, s , é dada pela Equação (47), descrita por Hertz (1881):

$$s = 1,63 \cdot \left(\frac{FD}{K'} \right)^{2/3} \quad (47)$$

em que K' é a dureza de contato entre as esferas e D a média harmônica dos diâmetros das duas esferas expresso pela Equação (48):

$$\frac{1}{K'} = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (48)$$

Os valores de v_1 e v_2 na Equação (48) são os raios de Poisson para as duas esferas em contato, e E_1 e E_2 são os valores do módulo de Young para estes materiais.

2.8 - Métodos Utilizados para Medir a Força de Adesão

Foram desenvolvidas muitas técnicas para caracterizar a adesão de partícula em superfície nos últimos 45 anos. Três destas técnicas são mais apropriadas para determinar as propriedades pertinentes a adesão de partículas em superfícies: Microscopia de força atômica (MFA), separação por campo elétrico e separação centrífuga.

Enquanto hoje em dia a microscopia de força atômica (MFA) é o método mais comum usado em vários campos da ciência, este método tem suas limitações quando investiga-se a aderência de partículas que apresentam tamanhos polidispersos numa superfície. Portanto, um valor representativo da força de adesão deve estar baseado em uma avaliação estatística que observa, pelo menos, algumas centenas de partículas.

Usando a técnica de microscopia de força atômica (MFA), levaria vários anos para executar um experimento confiável desta magnitude. A técnica de MFA pode medir com precisão a adesão de uma única partícula. Conseqüentemente, a técnica para medir a força de adesão entre partículas e uma superfície deve permitir a investigação de muitas partículas ao mesmo tempo.

Separação por campo elétrico caracteriza a adesão usando campos elétricos para remover partículas de uma superfície. Porém, este método caracteriza a força de adesão somente de partículas carregadas (Mizes, Ott, Eklund e Hays, 2000). Foi usada desde os anos cinquenta para medir a adesão de partículas e uma superfície (Donald, 1969, 1972; John e Montgomery, 1971 e Mastrangelo, 1982).

A técnica centrífuga pode ser utilizada para medir a força de adesão entre partículas de origem orgânica e inorgânica, como também pode medir a força de adesão de um agregado de partículas de uma única vez. Sendo assim, a técnica centrífuga oferece vantagens (Böhme et al., 1962 e Podczec e Newton, 1995) sobre as demais técnicas existentes, principalmente sobre a técnica de microscopia de força atômica, tais como: simplicidade e acessibilidade e a confiança nos resultados (Böhme et al., 1962; Booth e Newton, 1987 e Lam e Newton, 1991), além da viabilidade econômica desta técnica em relação a microscopia de força atômica e, principalmente, separação por campo elétrico, pois o custo de uma microcentrífuga é muito inferior ao custo de aquisição de um microscópio de força atômica e de um precipitador eletrostático. O erro provocado por esta técnica pode ser propagado através do cálculo das

forças (Zimon, 1982) e da influência de várias condições: umidade (Kulvanich e Stewart, 1988), deformação nos pontos de contato entre os corpos contíguos devido a carga externa (Lam e Newton, 1991) e da rugosidade da superfície (Zimon, 1982).

Em pesquisas farmacêuticas, por exemplo, cuja a manipulação com pós de alto custo e pequena disponibilidade são freqüentes, a técnica centrífuga oferece uma grande vantagem, pois a quantidade do material pulverulento necessário para a realização de cada teste experimental é da ordem de nanograma (Podczec et al., 1996).

O item 2.9 descreve em detalhes a técnica centrífuga utilizada neste trabalho para determinar a força de adesão entre partículas orgânicas e inorgânicas em uma superfície construída de diferentes substratos.

2.9 - Técnica Centrífuga

Para um melhor entendimento da técnica centrífuga é bom enfatizarmos que a força centrífuga tem linha de ação radial e aponta sempre do centro para o exterior da trajetória circular descrita pelo corpo no referencial fixo do laboratório.

A força centrífuga é empregada para consolidar ou remover as partículas de um material pulverulento sobre a superfície de um substrato.

O uso de uma centrífuga para medir forças de adesão está baseado no princípio que a força é o resultado da velocidade angular de uma partícula de massa determinada a uma distância determinada do centro de rotação. A velocidade angular excederá a força de adesão entre a partícula e a superfície sobre uma velocidade centrífuga crítica. No equilíbrio, a grandeza da força centrífuga, $F_{\text{centrífuga}}$, aplicada iguala-se a força de adesão, mas com sinal oposto, conforme mostra a Equação (49):

$$F_{\text{centrífuga}} = -F_{\text{adesão}} \quad (49)$$

A força centrífuga aplicada é representada pela Equação (50):

$$F_{\text{centrífuga}} = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (50)$$

A técnica centrífuga para determinar a adesão está baseada na separação de partículas de uma superfície de substrato devido a força centrífuga. A grandeza da força centrífuga aplicada depende da massa das partículas (m), da velocidade angular da centrífuga (ω) e da distância entre a superfície do substrato e o eixo de rotação (r).

Para partículas polidispersas aderidas a uma superfície, a força necessária para separar as partículas varia proporcionalmente ao tamanho das partículas (Zimon, 1982; Israelachvili, 1992).

Böhme et al., (1962) e Krupp (1967) desenvolveram uma técnica centrífuga para determinar a força de adesão de partículas esféricas. Um tubo foi especialmente construído e adaptado junto ao cabeçote do rotor da centrífuga com a finalidade de acomodar os substratos (discos de prova) contendo o material pulverulento paralelo ao eixo de rotação da centrífuga. O substrato foi colocado com a superfície empoeirada em direção ao eixo de rotação de forma que durante a centrifugação, as partículas fossem forçadas sobre a superfície do substrato pela força centrífuga. Este processo de centrifugação foi realizado a uma velocidade rotacional de 1 min antes de iniciar a desaceleração. Experiências preliminares tinham estabelecido que 1 min era suficiente para obter uma diferenciação entre os materiais nas propriedades de adesão, embora o trabalho adicional estabeleceu a ocorrência de um efeito de tempo significativo (Lam e Newton, 1991).

A técnica centrífuga usada para as experiências foi descrita em detalhes por Lam e Newton (1991). Os tubos da centrífuga que continham as partículas aderidas às superfícies do substrato foram colocados no cabeçote do rotor a um ângulo fixo. Desde que Lam e Newton (1993) demonstraram a influência da duração da pressão de contato, à máxima velocidade da centrífuga, na força de adesão, a máxima velocidade centrífuga foi alcançada por aumento crescente da velocidade do rotor e mantiveram exatamente 1 min (Kordecki e Orr, 1960; Booth e Newton, 1987; Staniforth et al., 1981; Kulvanich e Stewart, 1987; Podczec et al., 1995, 1996). E ainda, Felicetti e colaboradores (2004b) confirmou através de uma investigação experimental que a variação no tempo utilizado no desprendimento das partículas sobre o substrato não interferiu no valor da força de adesão. Desta forma, para facilitar a aquisição dos resultados experimentais, atribui-se a utilização do tempo de 1 min.

A técnica centrífuga descrita por Podczec e Newton (1995), mostra que duas forças centrífugas aplicadas devem ser diferenciadas:

(a) a força *press-on*, que é aplicada para aumentar o contato entre as partículas e a superfície do substrato. As superfícies empoeiradas, com o material pulverulento, são

posicionadas nos tubos adaptados a centrífuga, de forma que a força centrífuga atue sobre as partículas primeiro e em seguida sobre as superfícies.

(b) a força *spin-off*, que é aplicada para separar as partículas aderidas às superfícies.

As superfícies empoeiradas são posicionadas, nos tubos adaptados a centrífuga, de tal forma que a força centrífuga atue primeiro nas superfícies e em seguida sobre as partículas.

A Figura 2.13 ilustra bem o efeito da aplicação das forças centrífugas *press-on* e *spin-off* sobre a superfície do substrato contendo o material pulverulento. As partículas são depositadas em uma superfície plana e levadas a uma centrífuga. Conforme mostra a Figura 2.13 (a). A superfície é rotacionada a velocidades crescentes, e a cada aumento da velocidade rotacional o número de partículas que permanecem sob a superfície do substrato é fotografada na mesma área da superfície onde as partículas foram depositadas. Assim pode-se analisar as mesmas partículas que permaneceram na superfície do substrato após cada aumento da velocidade rotacional até que, a força gerada seja suficiente ou não para remover aquela partícula. Três microfotografias de um experimento típico são mostrados na Figura 2.13 (b).

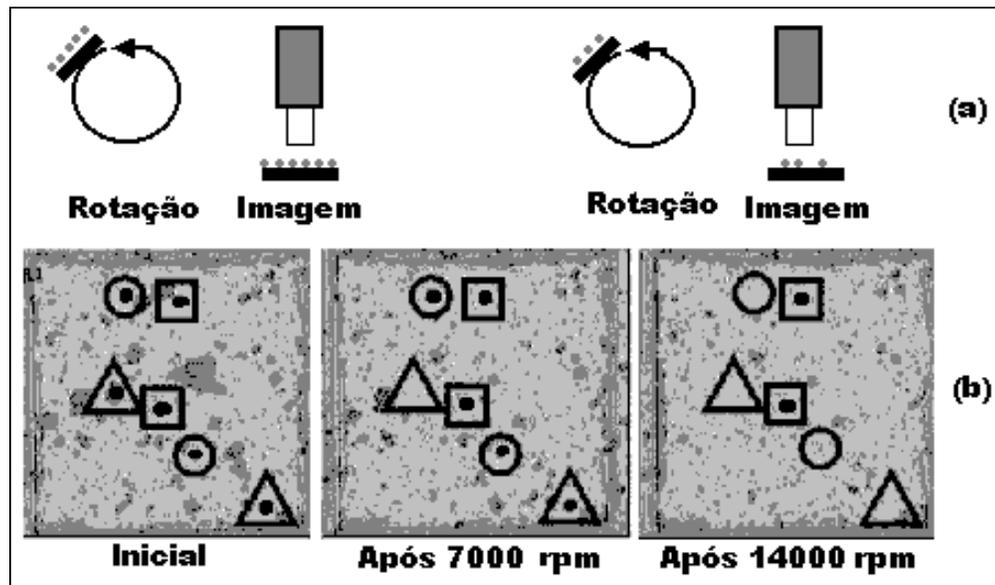


Figura 2.13 - (a) Desprendimento das partículas na Técnica Centrífuga, (b) Análise das imagens das superfícies antes e depois de cada centrifugação (Mizes et al., 2000).

A Figura 2.13 ilustra o que acontece a seis partículas em diferentes situações de adesão. Por exemplo, uma partícula fracamente aderida está presente dentro do triângulo. Esta partícula foi removida da superfície após a aplicação da força centrífuga de 7000 rpm. Uma

partícula fortemente aderida está sendo mostrada dentro do círculo e permanece aderida sobre a aplicação da força centrífuga de 7000 rpm, mas esta partícula foi removida entre 7000 e 14000 rpm. A partícula dentro do quadrado está fortemente aderida e não foi removida sobre a superfície do substrato após a aplicação da força centrífuga de 14000 rpm de rotação. A força de remoção para cada partícula é claramente identificável na imagem. Um software de análise de imagens foi usado para fotografar a posição e o tamanho de cada partícula na imagem. Este mesmo software localizou a mesma partícula por imagens subsequentes para identificar a cada aumento da velocidade rotacional onde a partícula era removida.

Como descrito anteriormente, a técnica centrífuga possui vantagens sobre as outras técnicas, quando se deseja determinar a força de adesão de materiais pulverulentos polidispersos. Sendo por isto a técnica centrífuga é a técnica utilizada neste estudo. Outra motivação para a aplicação da técnica centrífuga deve-se ao trabalho realizado por Banda (2002), que determinou a força de adesão de materiais pulverulentos sobre uma superfície aplicando uma velocidade de compressão constante (1000 rpm), e Felicetti (2004a) que variou a velocidade de compressão.

Apresentada a revisão bibliográfica, o capítulo a seguir descreve a metodologia e materiais e métodos, utilizados neste trabalho, a fim de conseguir atingir o objetivo de investigar a influência do tamanho das partículas do material pulverulento sobre a força de adesão partícula-substrato.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos utilizou-se uma microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos), cuja velocidade máxima de rotação é de 14000 rpm. Foram aplicadas quatro velocidades angulares de compressão (*press-on*) e oito velocidades angulares de desprendimento (*spin-off*). Dois materiais pulverulentos um orgânico e outro inorgânico foram utilizados nos experimentos, divididos em cinco faixas de diâmetros.

3.1 – Equipamentos

O sistema experimental utilizado era formado por uma microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos), um microscópio óptico (Olympus BX60), um programa analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) e um microcomputador que continha os softwares necessários para o tratamento e a análise dos resultados.

3.1.1 Microcentrífuga

Uma microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos) foi utilizada para a realização dos experimentos laboratoriais. Essa microcentrífuga possuía um sistema de seleção do tempo de aceleração e desaceleração e atingia velocidades de até 14000 rpm. A microcentrífuga utilizada nos experimentos está ilustrada na Figura 3.1.

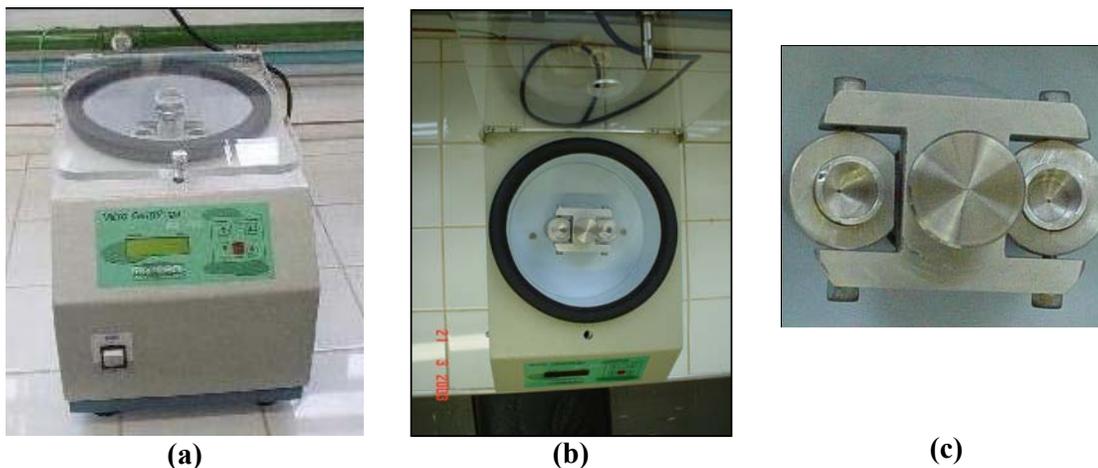


Figura 3.1 - Microcentrífuga MA – 860: (a) fechada, (b) aberta e (c) detalhe do rotor com os adaptadores.

3.1.2 Microscópio óptico (Olympus BX60)

O microscópio óptico com lente cuja capacidade de ampliação é de 100 vezes era conectado a uma câmara de vídeo colorida (CCD-Iris – Sony Co. Japan) com lente cujo aumento era de 100 vezes promoveram uma análise mais confiável das partículas sobre a superfície.

3.1.3 Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5)

O analisador de imagens permite fazer a contagem do número de partículas distribuídas na superfície dos substratos, e determinar o diâmetro médio e a área das mesmas.

3.1.4 Microcomputador contendo os softwares necessários para o tratamento e análise dos resultados

A Figura 3.2 apresenta os equipamentos (Microscópio óptico, analisador de imagens e microcomputador) que foram utilizados nos experimentos de laboratório no auxílio da determinação da força de adesão entre partículas e superfície.



Figura 3.2 – Equipamentos utilizados para a aquisição e análise das imagens.

Outros equipamentos também foram utilizados na realização deste trabalho, tais como:

- Picnômetro digital de Hélio (Micromeritics AccuPyc 1330)

Utilizado para determinar a densidade dos materiais pulverulentos. Foram efetuadas três medidas de densidade para cada material.

- Estufa de Secagem e Esterilização (FANEM 315SE)

O controle da umidade foi muito importante neste trabalho, porque um dos objetivos era a determinação da força de adesão de pós-secos, onde as forças predominantes eram as forças de

Van der Waals. Diante disso, o material pulverulento era colocado na estufa de secagem e esterilização durante 24 horas e posteriormente era armazenado num dessecador que continha esferas de sílica. A umidade relativa do laboratório era também monitorada utilizando-se um termo-higrômetro digital (Minipa MTH-1360) e mantida abaixo de 50%.

- Dispersor de Pó (Galai PD – 10, *vacuum gage*)

Para que as partículas não ficassem aglomeradas e, assim, evitar a ocorrência de erros na contagem das partículas no analisador de imagens, as partículas do material pulverulento foram dispersas sobre a superfície dos substratos, utilizando-se o sistema de dispersão de pó (Galai PD-10), que utiliza o vácuo para dispersar as partículas de pó na superfície do substrato.

3.2 – Materiais Pulverulentos

Dois tipos de materiais pulverulentos foram utilizados nos experimentos, com o intuito de comparar os valores de força de adesão partícula-substrato. Um material pulverulento inorgânico: o concentrado fosfático (Fosfértil S.A., Patos de Minas, MG), e um material pulverulento orgânico, o amido de mandioca, conhecido como polvilho doce, comercialmente adquirido em supermercados. Um segundo material pulverulento orgânico, o amido de milho, conhecido como maisena, foi utilizado para juntamente com o polvilho doce investigar através de um planejamento experimental estatístico a influência de alguns fatores (velocidade angular de compressão e diâmetro médio de partícula) sobre a variável resposta força de adesão. Como o polvilho doce e a maisena são materiais orgânicos e cujas propriedades físico-químicas são muito semelhante entre si, a finalidade da comparação entre esses dois materiais pulverulentos orgânicos foi estimar um modelo empírico que descrevesse a força de adesão partícula-substrato.

Foram realizadas medidas de força de adesão usando o concentrado fosfático passante por uma peneira de 400 mesh (37 μm de abertura). Para o polvilho doce, a utilização de peneiras não foi necessário, devido ao fato deste material pulverulento ser bastante homogêneo. Este procedimento foi realizado com a finalidade de se obter tamanhos semelhantes, para propósitos de comparação.

A densidade desses materiais foi determinada utilizando-se o Picnômetro digital de Hélio (Micromeritics AccuPyc 1330) com precisão de $\pm 0,06 \text{ g/cm}^3$. Foram efetuadas três medidas de densidade para cada material. O valor médio encontrado para o concentrado fosfático foi de $3,07 \text{ g/cm}^3$, para o polvilho doce foi de $1,49 \text{ g/cm}^3$ e para a maisena foi de $1,47 \text{ g/cm}^3$.

Os valores da massa média e do volume médio das partículas dos materiais pulverulentos das diferentes frações de tamanhos estão listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Massa média e volume médio das partículas de concentrado fosfático, de polvilho doce e de maisena distribuídos em diferentes frações de tamanhos.

Faixa de tamanho (μm)	Concentrado Fosfático			Polvilho Doce			Maisena		
	Diâmetro médio (μm)	Massa média $\times 10^{-11}$ (kg)	Volume médio $\times 10^{-15}$ (m ³)	Diâmetro médio (μm)	Massa média $\times 10^{-11}$ (kg)	Volume médio $\times 10^{-15}$ (m ³)	Diâmetro médio (μm)	Massa média $\times 10^{-11}$ (kg)	Volume médio $\times 10^{-15}$ (m ³)
8 – 13	10,56	0,224	0,731	11,18	0,113	0,761	10,89	0,111	0,754
13 – 18	15,45	0,659	2,151	15,53	0,299	2,004	14,93	0,283	1,923
18 – 23	20,25	1,469	4,790	20,36	0,669	4,486	20,84	0,747	5,074
23 – 28	25,52	2,898	9,451	25,29	1,276	8,561	25,51	1,408	9,561
28 – 33	30,67	4,844	15,803	30,61	2,256	15,130	30,24	2,249	15,276

A distribuição granulométrica dos materiais pulverulentos investigados neste trabalho foi obtida pelo analisador Malvern Mastersize Microplus MAF 5001 no DEQ – UFSCar, e está apresentada na Figura 3.3. Verifica-se nesta figura que o material pulverulento inorgânico, o concentrado fosfático, possui uma faixa mais larga de distribuição granulométrica que os outros dois materiais pulverulentos orgânicos, polvilho doce e maisena. O diâmetro médio (d_p) da partícula do concentrado fosfático foi de 39,38 μm, do polvilho doce foi de 25,24 μm e da maisena foi de 23,08 μm.

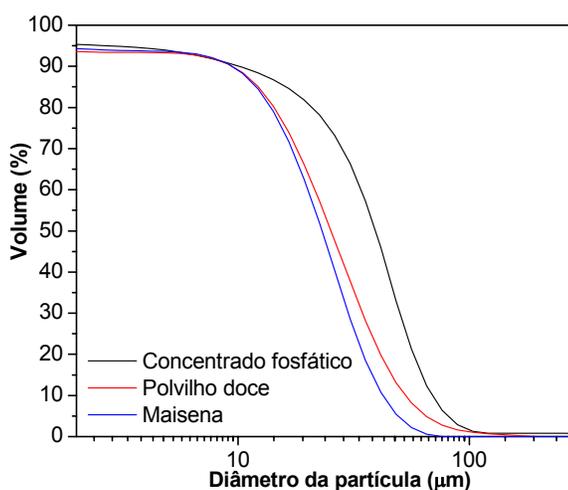


Figura 3.3 – Distribuição granulométrica das partículas de concentrado fosfático, de polvilho doce e de maisena, obtida no Malvern Mastersize Microplus MAF 5001 no DEQ – UFSCar.

O comportamento de tensão-deformação entre os materiais pulverulentos orgânicos e inorgânicos foi determinado através de testes de compressão utilizando o equipamento Instron 5500R Universal, no DEMa – UFSCar. As amostras dos materiais pulverulentos foram comprimidas em forma de corpos cúbicos de 1 cm³ em volume. Uma compressão de 1800 kg foi aplicada por uma prensa pneumática (Schwing Siwa), e os cubos resultantes foram levados aos testes de compressão. A Figura 3.4 apresenta os resultados dos testes de tensão-deformação obtidos para o concentrado fosfático e o polvilho doce. Observa-se na Figura 3.4, que o comportamento entre os dois materiais pulverulentos sob tensão-deformação é muito diferente. O polvilho doce é mais propenso a deformação sob a tensão que o concentrado fosfático na qual pode alterar consideravelmente a área de adesão.

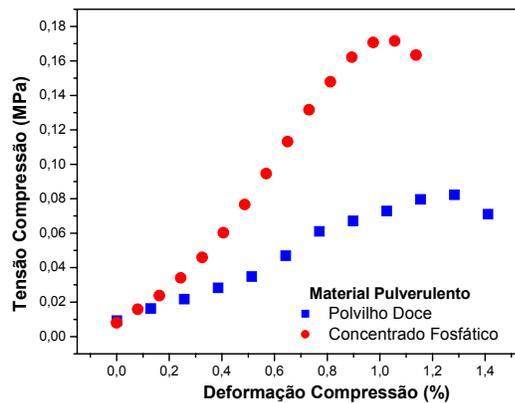


Figura 3.4 – Gráfico de Tensão em função da Deformação para o concentrado fosfático e o polvilho doce obtida no Instron 5500R Universal, no DEMa – UFSCar.

A Figura 3.5 apresenta as imagens dos materiais pulverulentos utilizados nesse estudo, obtidas no MEV com ampliação de 3500 vezes. Pode-se verificar nessa figura que as partículas de concentrado fosfático possuem formatos muito irregulares, com esfericidade (ϕ) de 0,60, enquanto que as partículas de polvilho doce possuem formatos regulares, bem próximos ao esférico com ϕ igual a 0,94, e as partículas de maisena, menos esféricas, com ϕ de 0,71. As esfericidades (ϕ) dos materiais pulverulentos foram determinadas por Ito (2002), de acordo com a metodologia de Arrieche (2003).

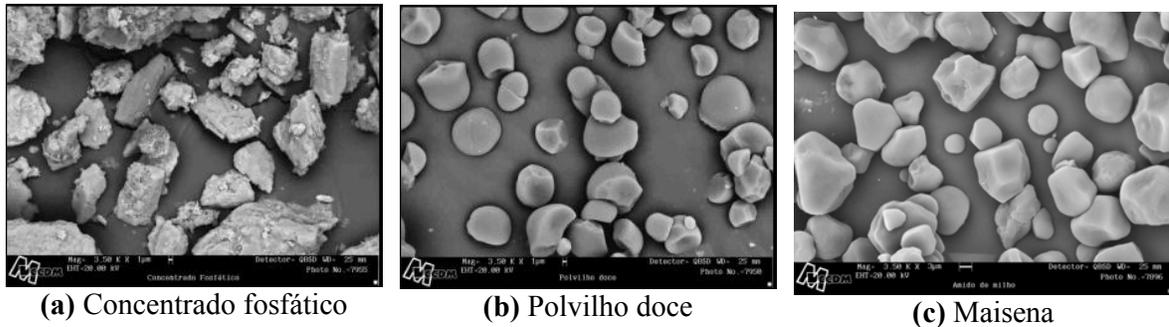


Figura 3.5 – Imagens dos materiais pulverulentos: (a) concentrado fosfático, (b) polvilho doce e (c) maisena, obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (DEMa – UFSCar) com ampliação de 3500 vezes.

3.3 – Metodologia

A técnica centrífuga foi usada para investigar a influência do tamanho das partículas, do material pulverulento orgânico e inorgânico, sobre a força de adesão partícula e substrato, constituído de diferentes materiais. Utilizou-se para tanto uma microcentrífuga, cuja velocidade máxima de rotação é de 14000 rpm. Essa microcentrífuga possuía um dispositivo de partida lenta, além de uma aceleração bastante moderada. Essas características foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho, pois evitava que as partículas fossem desprendidas da superfície dos substratos, no início de cada teste, devido a um arranque brusco da mesma. Outra característica importante era a sua capacidade de desaceleração lenta, com isso coibia o desprendimento das partículas no momento da parada do equipamento.

Através da técnica centrífuga foi possível coletar os dados e analisar as imagens, obtidas pelo Image-Pro Plus 4.5, para determinar o número de partículas aderidas na superfície dos substratos antes e depois de cada centrifugação.

Para determinar a força de adesão entre partículas e um substrato, utilizando a microcentrífuga, foram especialmente instalados no cabeçote desta microcentrífuga dois tubos construídos em alumínio. Nesses tubos foram colocados os adaptadores, construídos também em alumínio, cuja finalidade era de sustentar os substratos contendo o material pulverulento distribuído em sua superfície. Os tubos e os adaptadores foram construídos em alumínio, por ser um material muito leve e resistente, não apresentando grande inércia às velocidades de rotação da microcentrífuga.

A Figura 3.6 apresenta um diagrama esquemático desse dispositivo.

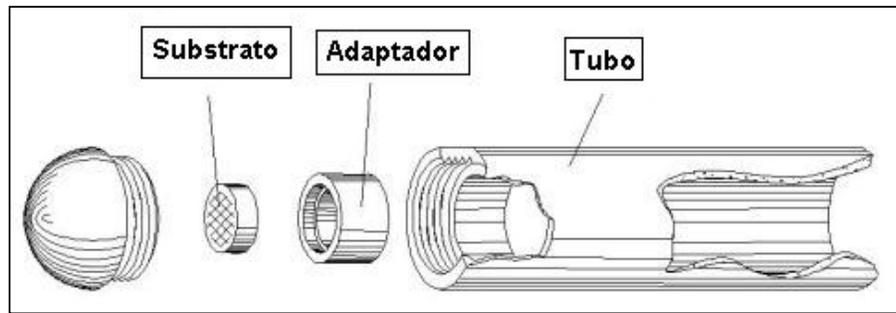


Figura 3.6 – Diagrama esquemático do tubo e do adaptador, construído em alumínio, instalados na microcentrífuga.

Os substratos, com 14 mm de diâmetro, são discos onde o material pulverulento é depositado em suas superfícies para a obtenção da força de adesão. Os substratos foram fabricados em aço inoxidável, PVC, Teflon® e vidro. O critério de escolha desses substratos na confecção dos substratos foi a sua grande empregabilidade na indústria. Estão nas mais diversas aplicações e possuem qualidades que os tornam adaptáveis a múltiplos usos. O aço inoxidável não é magnetizável, possui adequada maleabilidade mecânica, é flexível, resistente e a sua superfície é excepcionalmente lisa e pode ser espelhada pelo polimento. O PVC tem elasticidade, dureza, e rigidez e suas superfícies são excepcionalmente polidas. O vidro é resistente, transparente, leve e a exemplo do aço inoxidável sua superfície é excepcionalmente lisa. Já o Teflon® possui o mais baixo coeficiente de atrito de todos os sólidos conhecidos e é um produto que oferece uma excelente combinação de propriedades químicas, elétricas, mecânicas ou térmicas.

A Figura 3.7 apresenta imagens topográficas tridimensionais das superfícies dos substratos de (a) aço inoxidável, (b) PVC, (c) Teflon® e (d) vidro, obtidas por microscopia de força atômica. Os valores das rugosidades das superfícies dos substratos são: 1,54 nm, 47,86 nm, 77,02 nm e 130,63 nm para o vidro, aço inoxidável, PVC e Teflon®, respectivamente.

Através dos valores de rugosidades das superfícies dos substratos, foi possível determinar a força de adesão teórica, calculada a partir da tensão superficial, por unidade de área, dos componentes da adesão (γ) dada pela Equação (10) e apresentadas na Tabela 3.2.

$$W = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (10)$$

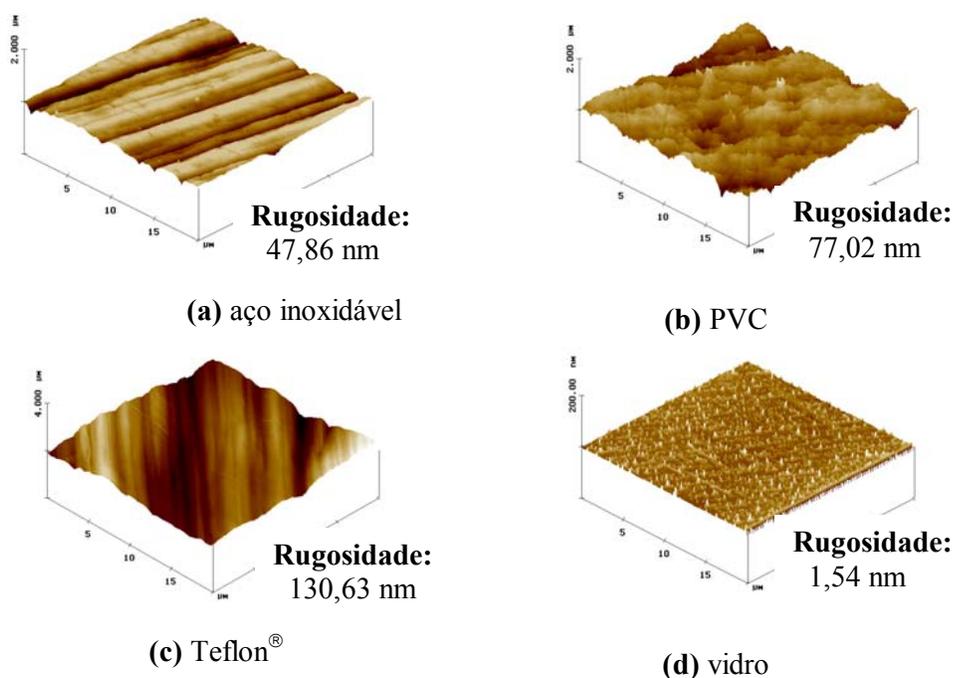


Figura 3.7 – Imagens topográficas dos substratos estudados, obtidas por microscopia de força atômica, com as medidas das rugosidades das superfícies: **(a)** aço inoxidável, **(b)** PVC, **(c)** Teflon[®] e **(d)** vidro.

Tabela 3.2 – Tensão superficial dos componentes da adesão (mJ m^{-2}).

Material	γ (mJ m^{-2})	Referência
Concentrado fosfático	100,6	Salazar et al., (2007) Van Oss et al., (1990,1992)
Polvilho doce	43	Biresaw e Carriere (2001)
PVC	42	Michalski et al., (1998) Wu, (1982) Morra (1996) Coquet et al., (1992)
Teflon [®]	18	Yamamoto et al., (1993) Fu et al., (2004) Lyman et al., (1965)
Vidro	57,7	Güleç et al., (2006) Bayoudh et al., (2005,2006)
Aço inoxidável	39	Salazar et al., (2007) Podczec (1999)

As superfícies dos substratos foram esmeriladas numa lixadeira a úmido (água), em lixas de carbetto de silício, na seqüência de 400, 600, 1500 e 2000 mesh, mantendo-se a

operação por aproximadamente cinco minutos em cada lixa. Posteriormente, a superfície dos substratos foi polida em uma politriz em baixa rotação, utilizando um veludo macio impregnado em seqüência com suspensões de alumina de 1 μm e 0,3 μm , respectivamente. Entre cada suspensão a amostra foi submetida à lavagem com água e finalmente com álcool etílico. A finalidade dessas etapas era reduzir a sua rugosidade a um mínimo.

Após o polimento, na superfície dos substratos foram feitos alguns reticulados, sendo que a área de cada reticulado foi de 0,5 mm^2 . Este reticulado serviu como referência na localização de uma determinada partícula ou de uma determinada área do substrato, no momento em que se usava o analisador de imagens, após cada centrifugação. Para se obter uma quantidade representativa de partículas sobre a superfície dos substratos, analisou-se cerca de quarenta reticulados de cada substrato. Antes de cada experimento, as superfícies dos substratos eram limpas com um banho usando etanol ou água destilada com o objetivo de retirar todas as impurezas da superfície dos substratos.

Um substrato, construído de aço inoxidável, esmerilado, polido e apresentando em sua superfície os reticulados, está ilustrado na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Superfície do substrato construído de aço inoxidável, esmerilado, polido e contendo em sua superfície os reticulados (Câmera Digital, Sony DSC – P92).

As imagens das superfícies limpas dos quatro substratos utilizados nos experimentos estão apresentadas na Figura 3.9 (a) aço inoxidável, (b) PVC, (c) Teflon[®] e (d) vidro.

A massa das partículas dos materiais pulverulentos utilizadas neste trabalho foi determinada usando a Equação (51):

$$m = \rho_p \cdot V_p \quad (51)$$

sendo:

m = massa da partícula, [M].

ρ_p = densidade da partícula, $[M L^{-3}]$.

V_p = volume da partícula, $[L^3]$.

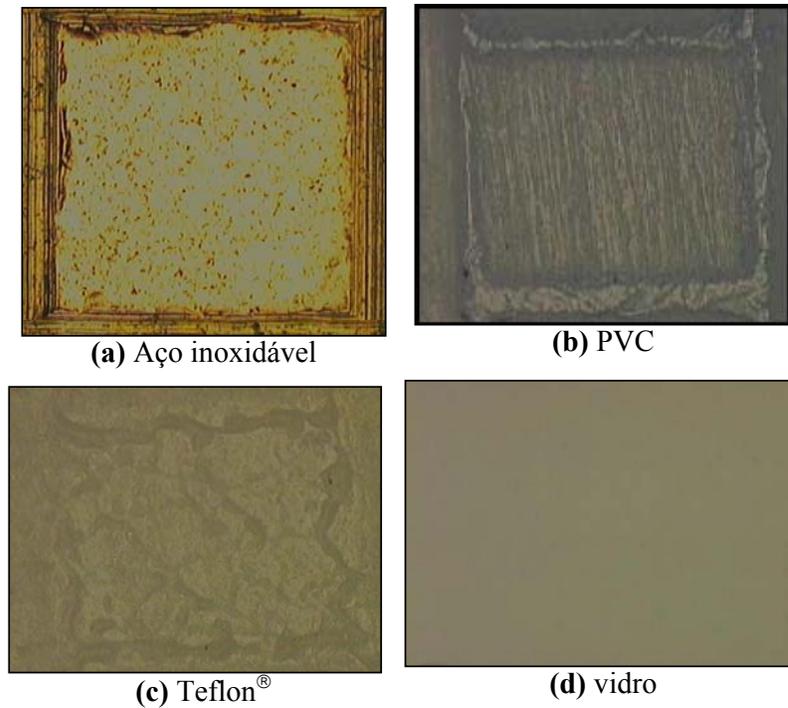


Figura 3.9 – Um único reticulado da superfície do substrato: **(a)** Aço inoxidável, **(b)** PVC, **(c)** Teflon[®] e **(d)** vidro (ampliação de 100 vezes no Microscópio Óptico – Olympus BX60).

As partículas de polvilho doce e de maisena possuem formatos regulares, portanto, o volume das partículas desses materiais pulverulentos foi calculado utilizando-se a Equação (52), que é a equação usada para determinar o volume de uma esfera:

$$V_p = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_p^3}{3} \quad (52)$$

Sendo r_p o raio médio da partícula.

O raio foi obtido pelo diâmetro médio partícula, dado pelo analisador de imagens (Image-Pro Plus 4.5).

As partículas do concentrado fosfático possuem formatos muito irregulares e distantes de uma esfera ($\phi = 0,60$; Ito, 2002), por isso, para o cálculo do volume da partícula deste material pulverulento usou-se a Equação (53):

$$V_p = \frac{4 \cdot A \cdot r_p}{3} \quad (53)$$

Sendo A a área projetada da partícula, determinada pelo software Image-Pro Plus 4.5, e r_p o seu raio. O raio médio da partícula foi obtido pela média do maior e do menor diâmetro da partícula medido a cada dois graus de intervalo passando através do centróide da partícula, conforme pode ser visto na Figura 3.10. Essas variáveis foram obtidas utilizando-se o analisador de imagens (Image-Pro Plus 4.5). O software Image-Pro Plus 4.5 foi calibrado utilizando uma calibração compatível com a lente do microscópio óptico.

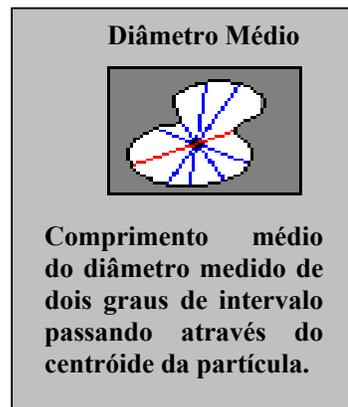


Figura 3.10 – Diâmetro Médio definido pelo software Image-Pro Plus 4.5.

A Equação (53) foi utilizada para evitar que o erro existente no cálculo do valor do volume das partículas de concentrado fosfático, fosse bem maior por estar elevado à potência de três. Essa equação foi testada por Banda (2002) em seu trabalho.

Os materiais pulverulentos eram, inicialmente, armazenados em dessecadores com sílica gel, com o intuito de manter a umidade baixa, evitando desta forma a formação de aglomerados e, conseqüentemente, a propagação de erros no momento em que se usava o analisador de imagens.

Para evitar a aglomeração das partículas nas superfícies dos substratos, e minimizar a ocorrência de erros na contagem das partículas no analisador de imagens, antes de cada corrida experimental, as partículas foram dispersas nas superfícies de cada um dos dois substratos usando-se um dispersor de pó (Galai PD-10). Este sistema utiliza o vácuo para dispersar as partículas de pó numa superfície.

Os substratos eram colocados na base do dispersor e depois de atingidos 0,55 bar de pressão relativa, o equipamento era desligado e em seguida cerca de 0,02 g do material particulado encontrado no topo do cilindro do dispersor era sugado pelo vácuo e disperso sobre a superfície dos substratos. Em seguida, os substratos contendo o material pulverulento eram levados até a centrífuga para o início dos experimentos.

O efeito da umidade relativa do ar no laboratório, durante os experimentos, era de grande interesse no trabalho. A umidade relativa do ar no ambiente de trabalho era monitorada e mantida abaixo de 50% usando, se necessário, um aparelho de ar-condicionado. Pois segundo Zimon (1982), abaixo deste valor não existe nenhuma força capilar influenciando a força de adesão. A temperatura do laboratório onde foram realizadas as corridas experimentais foi mantida entre 17 e 23° C. A umidade relativa do ar e a temperatura ambiente eram medidas utilizando-se um termo-higrômetro digital (Minipa MTH-1360).

Os materiais pulverulentos eram armazenados em dessecadores com sílica gel, antes da realização dos experimentos, para manter a umidade destes pós sempre baixa, já que, para pós-secos, as forças de Van der Waals são as forças predominantes na determinação da força de adesão.

Controlado o efeito da umidade relativa do ar no laboratório, deram-se início os experimentos para a determinação da força de adesão entre partículas e um substrato construído em diferentes superfícies. Depois que o pó estava suficientemente disperso na superfície dos substratos, estes foram colocados nos tubos de alumínio. Estes tubos foram construídos para inclinar os substratos à 45°, quando a microcentrífuga era acionada, porque o rotor na microcentrífuga era fixo à 45°. Os substratos foram orientados de forma que as superfícies empoeiradas, com o material pulverulento, estavam posicionadas de forma que a força centrífuga agisse sobre as partículas primeiro e em seguida as superfícies. Ou seja, a força centrífuga de compressão, *press-on*, estava sendo aplicada.

As velocidades angulares de compressão (*press-on*) utilizadas e aplicadas sobre os substratos contendo os materiais pulverulentos foram de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm.

Depois que as partículas eram consolidadas contra a superfície do substrato, os substratos eram levados a um microscópio óptico (Olympus BX60) e o analisador de imagens

(Image Pro-Plus 4.5) era utilizado, para a realização da contagem das partículas dos materiais pulverulentos em cinco faixas de diâmetro: 8 – 13 μm , 13 – 18 μm , 18 – 23 μm , 23 – 28 μm e 28 – 33 μm .

Em seguida, os substratos retornavam a microcentrífuga, para realizar a limpeza destes (velocidade angular de desprendimento, *spin-off*). Esta era a fase de separação entre o material particulado e a superfície dos substratos. A força centrífuga era usada para superar a adesão das partículas no substrato. Agora, os substratos eram orientados para que as superfícies empoeiradas fossem posicionadas de tal forma que a força centrífuga agisse primeiro nas superfícies e em seguida nas partículas. Após a aplicação da força *spin-off*, o número de partículas que permaneciam aderidas sobre a superfície era determinado. Uma distribuição da força de adesão foi obtida aumentando a força *spin-off* consecutivamente depois de cada contagem. A força de adesão média é o valor da força correspondente a 50% das partículas desprendidas a cada centrifugação.

O tempo de aplicação da velocidade angular de compressão (*press-on*) e da velocidade angular de desprendimento (*spin-off*), sobre os substratos, foi realizado com a duração de 1 minuto.

Durante a fase de separação (aplicação da velocidade angular de desprendimento, *spin-off*), os substratos foram expostos a velocidades de rotação crescentes e conseqüentemente forças centrífugas crescentes. A cada passo do aumento da velocidade rotacional, as imagens das partículas remanescentes nas superfícies dos substratos eram adquiridas, e todas elas foram comparadas com as imagens das partículas aderidas na compressão, para isso utilizou-se o microscópio óptico (Olympus BX60) e o analisador de imagens (Image Pro-Plus 4.5). As velocidades angulares de desprendimento das partículas (*spin-off*) usadas nas corridas experimentais foram de 1000, 3000, 5000, 7000, 9000, 11000, 13000 e 14000 rpm.

Para comprovação e validação da técnica centrífuga foi realizado um teste com o concentrado fosfático e o aço inoxidável. O teste constituiu de um experimento aplicando-se a velocidade angular de compressão (*press-on*) de 2000 rpm sobre as partículas deste material pulverulento sobre o substrato de aço inoxidável. Logo após a aplicação da velocidade angular de desprendimento (*spin-off*) de 2000 rpm, os substratos foram levados ao microscópio óptico (Olympus BX60) e ao analisador de imagens (Image Pro-Plus 4.5) para comparar com as imagens das partículas aderidas na compressão (*press-on*), conforme a metodologia descrita acima. Feito isso, foram aplicadas sucessivamente outras seis velocidade angulares de desprendimento (*spin-off*) de mesma magnitude da primeira, como forma de

verificar a autenticidade da técnica e observar se as medidas não tivessem algum tipo de vício. Os resultados demonstraram que não houve alteração no número de partículas sobre os substratos após sucessivas aplicações de velocidades angulares de desprendimento (*spin-off*), validando, desta maneira, a técnica centrífuga e os resultados apresentados no capítulo a seguir. Os resultados deste teste estão apresentados na Figura A.1 do Apêndice A.

A rugosidade das superfícies das partículas dos materiais pulverulentos foi estimada utilizando um procedimento adotado por Aguiar (1995). Este método se utilizou das microfotografias das partículas dos materiais pulverulentos obtidas do Microscópio Eletrônico de Varredura (Figura 3.5). Para cada partícula dessas microfotografias foram inicialmente desenhadas duas circunferências, uma externa e uma interna, e determinada o diâmetro de cada uma dessa circunferência (d_E e d_I , respectivamente). Usando estes diâmetros foi determinado um pseudo-diâmetro médio (d_β) utilizando a Equação (54):

$$d_\beta = \frac{d_E + d_I}{2} \quad (54)$$

Posteriormente, mais circunferências foram desenhadas no interior da partícula (d_α), conforme pode ser observado na Figura 3.11.

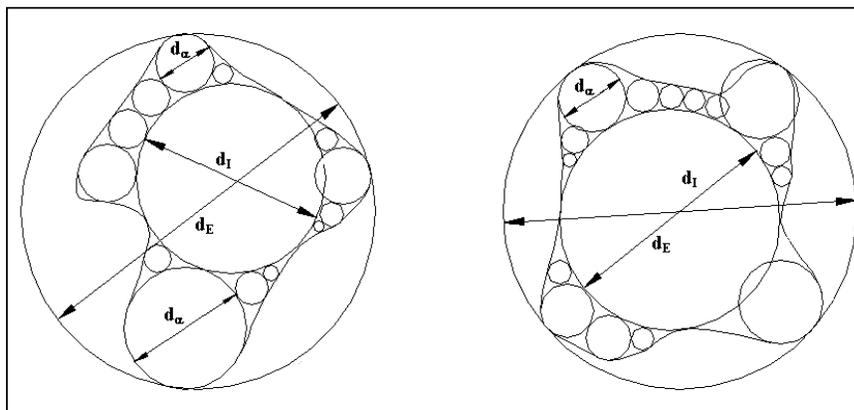


Figura 3.11 – Metodologia utilizada para a estimativa da rugosidade da superfície das partículas dos materiais pulverulentos.

Finalmente, a rugosidade (α') foi determinada como sendo a razão entre o pseudo-diâmetro médio da partícula e a média de todas as rugosidades \bar{d}_α :

$$\alpha = \frac{\bar{d}_\alpha}{d_\beta} \quad (55)$$

Sendo que o diâmetro aritmético (\bar{d}_α), foi determinado pela Equação (56).

$$\bar{d}_\alpha = \frac{(d_{\alpha 1} + d_{\alpha 2} + \dots + d_{\alpha n})}{n} \quad (56)$$

Finalmente, a força de adesão experimental obtida para os materiais pulverulentos foi comparada com a força de adesão teórica utilizando a Equação (23) de Derjaguin, Muller, e Toporov (teoria de DMT) (1975). A teoria de DMT é perfeitamente aplicável às partículas rígidas em contato, e é válido para os sistemas onde a distância entre a partícula e o substrato é menor que o raio da partícula. O modelo de DMT também supõe que forças de atração agem na área de contato partícula-substrato (Johnson, Kendall, e Roberts, teoria de JKR) (1971) e incluiu forças de superfície de longo alcance agindo fora da área de contato partícula-substrato, como é o caso das forças de Van der Waals de longa distância estudadas neste trabalho. Neste sentido, este modelo também foi utilizado por Podczec et al. (1996b) para descrever a força de adesão entre pós farmacêuticos (lactose e salmeterol X), sobre várias superfícies de alumínio e sobre o mesmo pó (autoadesão) obtidas pela técnica centrífuga.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da investigação da influência do tamanho das partículas dos materiais pulverulentos sobre a força de adesão partícula-substrato, utilizando a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e desprendimento. Os materiais pulverulentos utilizados neste trabalho, com o intuito de comparar os valores de força de adesão partícula-substrato, num primeiro momento, foram o concentrado fosfático ($\rho_p = 3,07 \text{ g/cm}^3$), como material pulverulento inorgânico, e o material pulverulento orgânico, o polvilho doce ($\rho_p = 1,49 \text{ g/cm}^3$). Num segundo momento, um planejamento fatorial completo foi realizado para avaliar quantitativamente a influência do tamanho da partícula (diâmetro médio da partícula) e da pressão de aplicação do contato (velocidade angular de compressão) sobre a variável resposta força de adesão entre os dois materiais pulverulentos orgânicos utilizados neste estudo, polvilho doce e maisena ($\rho_p = 1,47 \text{ g/cm}^3$), além disso, um modelo empírico foi obtido para representar os resultados de força de adesão partícula-substrato na região experimental investigada.

Os substratos foram fabricados em aço inoxidável, PVC, Teflon[®] e vidro.

Após o desenvolvimento da metodologia, apresentado no item 3.3, foram obtidos os resultados e, em seguida, construídos gráficos de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos em função da força de adesão para as cinco frações de pó investigadas neste trabalho.

4.1 - Determinação da Força de Adesão para Partículas de Concentrado Fosfático

A Figura 4.1 apresenta gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro, em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro das partículas de concentrado fosfático estudadas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm. A força de adesão foi calculada usando-se a Equação (49).

$$F_{\text{centrífuga}} = - F_{\text{adesão}} \quad (49)$$

sendo:

$$F_{\text{centrífuga}} = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (50)$$

A distância entre eixo de rotação da microcentrífuga e a superfície dos substratos (r) é de 0,057 m.

Os resultados obtidos da distribuição de partículas em relação a força de adesão são representadas em coordenadas do tipo logaritmo-probabilidade, como ilustrado na Figura 4.1.

Verifica-se na Figura 4.1 que as curvas obtidas apresentaram um comportamento linear, nestas coordenadas, indica que os resultados obedeceram a uma distribuição log-normal, como observado por outros autores (Zimon, 1982; Lam et al., 1991; Podczeczek et al., 1994; Podczeczek, 1999). O diâmetro médio, utilizado na legenda da Figura 4.1, foi obtido pela média dos diâmetros das partículas de concentrado fosfático dado pelo analisador de imagens (Image-Pro Plus 4.5).

Observa-se ainda nesta figura que a força de adesão apresentou um comportamento linear com o diâmetro da partícula do material pulverulento. Isto significa que a força de adesão entre partículas de concentrado fosfático e a superfície dos substratos aumentou com o aumento do diâmetro médio da partícula. Portanto, a granulometria da partícula tem influência direta na força de adesão partícula-superfície.

Lam e Newton (1991 e 1993), utilizando uma centrífuga cuja velocidade máxima de rotação atingia 18000 rpm, trabalhando com carbonato de cálcio ($\rho_p = 2,68 \text{ g/cm}^3$) e um substrato de aço inoxidável, Banda (2002) e Felicetti (2004), que utilizaram uma microcentrífuga que atingia uma velocidade máxima de rotação de 14000 rpm e também um substrato de aço inoxidável, com concentrado fosfático ($\rho_p = 2,94 \text{ g/cm}^3$) e calcário dolomítico ($\rho_p = 2,84 \text{ g/cm}^3$), encontraram resultados semelhantes aos da Figura 4.1.

Utilizando o mesmo procedimento adotado para a construção dos gráficos da Figura 4.1, construíram-se gráficos das Figuras B.1, B.2 e B.3, apresentados no Apêndice B, correspondentes à porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro em função da força de adesão, para as velocidades centrífugas de compressão de 2000, de 5000 e de 10000 rpm, respectivamente. Foi possível verificar em todas essas figuras o mesmo comportamento observado na Figura 4.1.

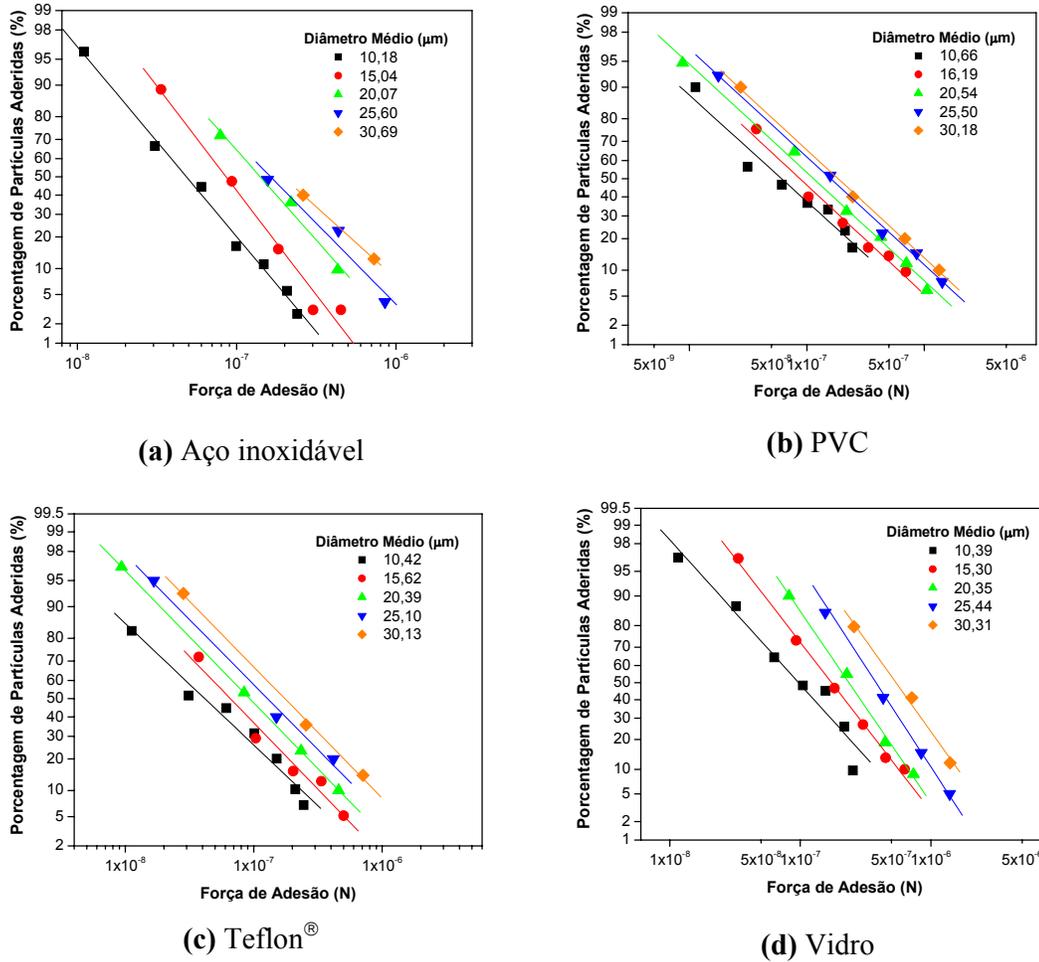


Figura 4.1 - Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos quatro substratos, em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.

Zimon [1982] e Lam et al., [1991] definiram a mediana geométrica da força de adesão como a força encontrada quando, após os experimentos com a centrífuga, há 50% de probabilidade das partículas permanecerem aderidas ao substrato. A mediana geométrica é utilizada para representar a força de adesão média de uma partícula no substrato. E o desvio padrão geométrico é utilizado com o objetivo de calcular a medida numérica da dispersão mínima e máxima da força de adesão da partícula na seção linear do plano logaritmo-probabilidade. O desvio padrão geométrico, σ_g , foi calculado utilizando a Equação (57):

$$\sigma_g = \frac{\text{mediana geométrica da força de adesão}}{\text{força de adesão para 16\% de partículas aderidas}} \quad (57)$$

A dispersão da distribuição, ou desvio padrão geométrico, é determinada através do mesmo gráfico. Utilizam-se os valores da força de adesão correspondentes a 16% das partículas aderidas ao substrato dos valores medidos projetados sobre a reta.

Esse procedimento foi usado para determinar a mediana geométrica da força de adesão, determinado graficamente, e seus respectivos desvios padrões geométricos para as cinco faixas de diâmetro dos materiais pulverulentos utilizados neste trabalho.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos, obtidos pela Equação (57) e da força de adesão teórica (teoria de DMT), obtidos pela Equação (23), para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 1000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável, de PVC, de Teflon® e de vidro.

Tabela 4.1 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão, do desvio padrão geométrico e da força de adesão teórica para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 1000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável, de PVC, de Teflon® e de vidro.

Substrato	Diâmetro médio (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico σ_g	Força de Adesão Teórica ($\times 10^{-7}$ N)
Aço inoxidável	10,18	0,60	0,53	0,40
	15,04	0,97	0,52	0,59
	20,07	1,39	0,40	0,79
	25,60	1,63	0,37	1,01
	30,69	1,92	0,32	1,21
PVC	10,66	0,48	0,17	0,44
	16,19	0,85	0,29	0,66
	20,54	1,25	0,25	0,84
	25,50	1,46	0,20	1,04
	30,18	1,85	0,22	1,23
Teflon®	10,42	0,43	0,25	0,28
	15,62	0,63	0,31	0,42
	20,39	0,92	0,29	0,55
	25,10	1,28	0,29	0,67
	30,13	1,75	0,29	0,81
Vidro	10,39	0,96	0,34	0,51
	15,30	1,43	0,33	0,74
	20,35	1,84	0,38	0,97
	25,44	2,72	0,33	1,22
	30,31	3,79	0,30	1,47

Observa-se na Tabela 4.1, que os valores de força de adesão teórica estão bastante distantes dos valores de força de adesão experimental do material pulverulento investigado. Estes desvios podem ser justificados devido à força de adesão teórica, obtida através da Equação (23), ser influenciada somente pela interação das partículas com as superfícies através da energia superficial (γ), enquanto que a força de adesão experimental é influenciada através da aplicação de uma velocidade angular de compressão (ω), dada pela Equação (50), provocando, desta maneira, a deformação elástica dessas partículas sobre a superfície dos substratos.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos, para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, de 5000 e de 10000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável. Os resultados desta tabela mostram que a força de adesão entre partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato de aço inoxidável aumenta com o aumento do tamanho das partículas e com o aumento da força *press-on*.

Tabela 4.2 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão e desvio padrão geométrico para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável.

Força <i>press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão (x 10^{-7} N)	Desvio Padrão Geométrico σ_g
2000 rpm	10,59	0,86	0,42
	15,47	1,38	0,37
	20,29	1,55	0,35
	25,57	1,91	0,32
	30,49	2,60	0,32
5000 rpm	10,59	1,08	0,44
	15,59	1,55	0,34
	20,22	1,95	0,38
	25,81	3,02	0,36
	30,49	3,45	0,36
10000 rpm	10,89	1,67	0,50
	15,70	2,85	0,44
	20,42	3,24	0,48
	25,09	4,46	0,46
	31,02	6,22	0,52

Resultados esses que podem ser comprovados através dos gráficos da Figura 4.2, de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro, nas faixas de diâmetros de: 8 – 13, 13 – 18, 28 – 33 e 18 – 23 μm , respectivamente, em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das velocidades centrífugas de compressão de 1000, de 2000, de 5000 e de 10000 rpm. Verifica-se, em todas as figuras, que a força de adesão aumenta quanto maior for a força de compressão (*press-on*) aplicada. Os resultados obtidos para os demais substratos investigados neste trabalho, estão apresentados no Apêndice B através das Tabelas B.1, B.2 e B.3.

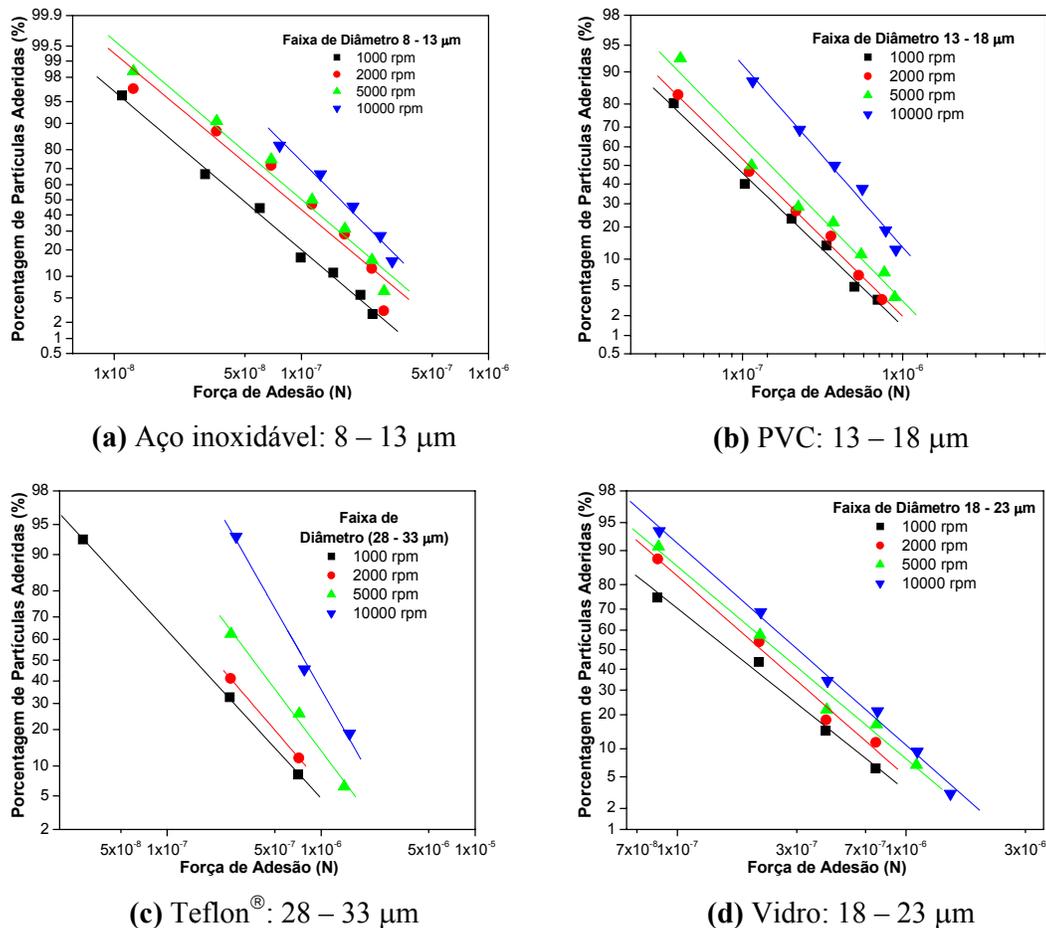


Figura 4.2 – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos construídos de (a) aço inoxidável, de (b) PVC, de (c) Teflon[®] e de (d) vidro nas faixas de diâmetros de: 8 – 13, 13 – 18, 28 – 33 e 18 – 23 μm , respectivamente, em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de todas as velocidades centrífugas de compressão investigadas.

A Figura 4.3 mostra gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático, para os quatro substratos e para todas as velocidades centrífugas de compressão (*press-on*) investigados neste trabalho. Observa-se que, para uma mesma velocidade de compressão aplicada, a força de adesão entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de vidro apresentou maior adesão em relação aos demais substratos, seguida do aço inoxidável, do PVC e do Teflon[®], respectivamente. Os valores da força de adesão das partículas de concentrado fosfático na superfície do substrato construído de vidro e de aço inoxidável, foram maiores que os substratos construídos de PVC e de Teflon[®]. Isto é justificado devido os dois primeiros substratos possuírem superfície excepcionalmente lisa, enquanto os dois últimos (PVC e Teflon[®]), apesar de possuírem uma superfície polida, possuem superfícies com maiores rugosidades em relação ao vidro e ao aço inoxidável.

E o substrato construído de vidro é o que possui maior adesão sobre as partículas dos materiais pulverulentos. Tal comportamento é confirmado, devido esse material possuir menor rugosidade em relação aos outros três substratos. Isto é comprovado através da Figura 3.7 que apresenta a rugosidade do substrato de vidro como sendo de 1,54 nm, o aço inoxidável de 47,86 nm, o PVC de 77,02 nm e o Teflon[®] apresentando a maior rugosidade de entre os substratos investigados igual a 130,63 nm.

Pode-se admitir, portanto, que a força de adesão diminui com o aumento da rugosidade na superfície do substrato. A diminuição da força de adesão com o aumento da rugosidade da superfície é devido a força de Van der Waals diminuir com a redução na área de contato entre a partícula e a superfície do substrato (Krupp, 1967). O mesmo comportamento foi observado no trabalho realizado por Takeuchi (2006) que utilizou a técnica centrífuga para estudar a força de adesão entre partículas de toner e um substrato de alumínio. A distância entre a rugosidade de uma partícula e uma superfície está relacionada através da verdadeira área de contato. Por que quanto menor for a área de contato, menor será o contato entre as rugosidades das superfícies envolvidas, e, conseqüentemente, menores serão as forças de Van der Waals. A distância entre a rugosidade das superfícies tem um efeito sobre o comportamento de separação das partículas aderidas na superfície do substrato (Zimon, 1982).

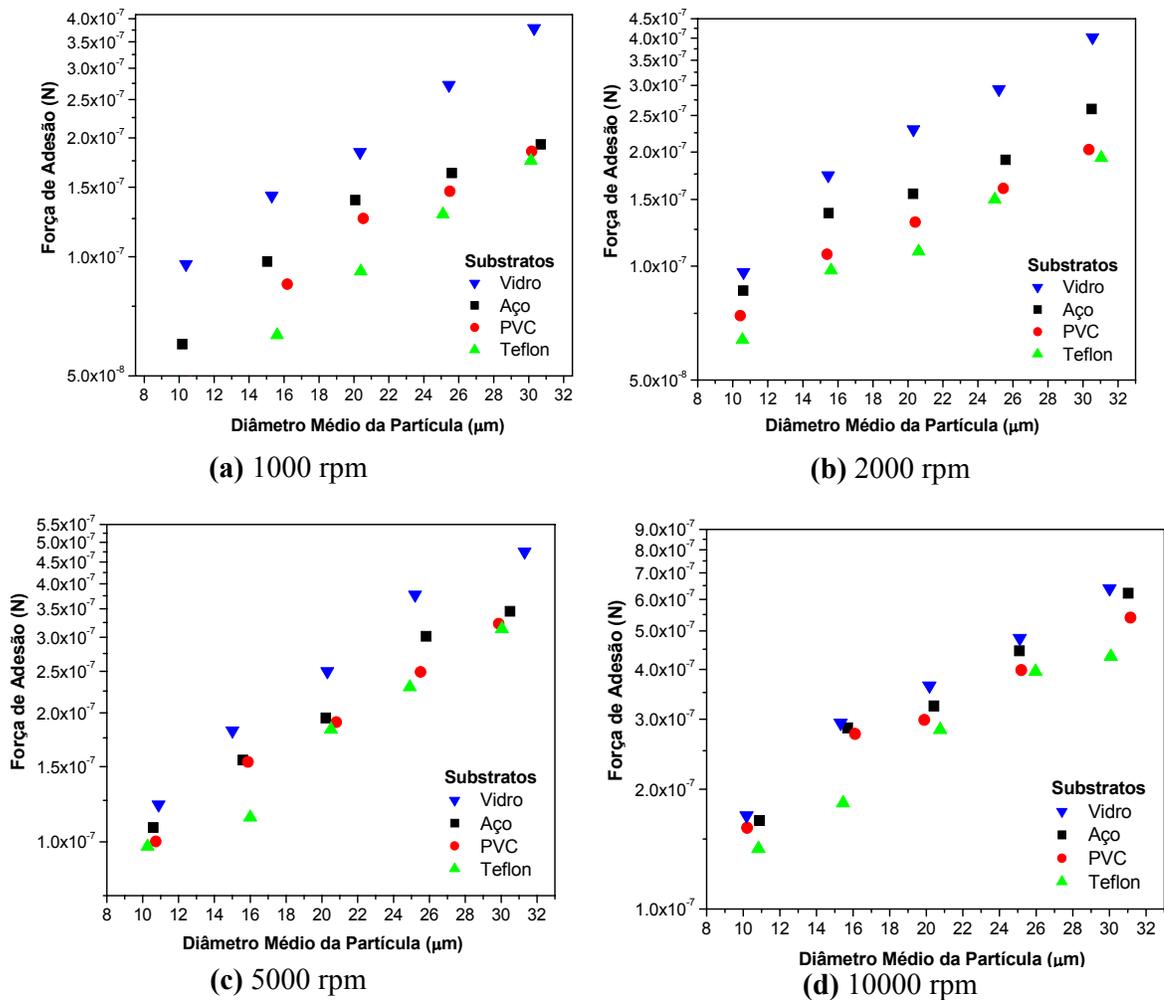


Figura 4.3 – Força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de concentrado fosfático, para os substratos de aço inoxidável, PVC, Teflon[®] e vidro, após aplicada a força de compressão de: (a) 1000, (b) 2000, (c) 5000 e (d) 10000 rpm, respectivamente.

4.2 - Determinação da Força de Adesão para Partículas de Polvilho Doce

Para a construção dos gráficos de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos diferentes substratos em função da força de adesão para o polvilho doce, foi utilizada a mesma metodologia empregada para o concentrado fosfático.

A Figura 4.4 apresenta gráficos de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável e de vidro em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro das partículas de polvilho doce estudadas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000 rpm.

Devido às partículas de polvilho doce possuírem coloração branca, e a superfície dos substratos construídos de PVC e de Teflon[®] possuírem coloração bastante clara, a identificação das partículas deste material pulverulento orgânico sobre essas superfícies se tornou extremamente difícil no microscópio óptico e, conseqüentemente, o tratamento dos resultados no software de análise de imagens foi comprometido. Este foi o motivo de se ter utilizado apenas os substratos de aço inoxidável e de vidro nos experimentos laboratoriais com o polvilho doce.

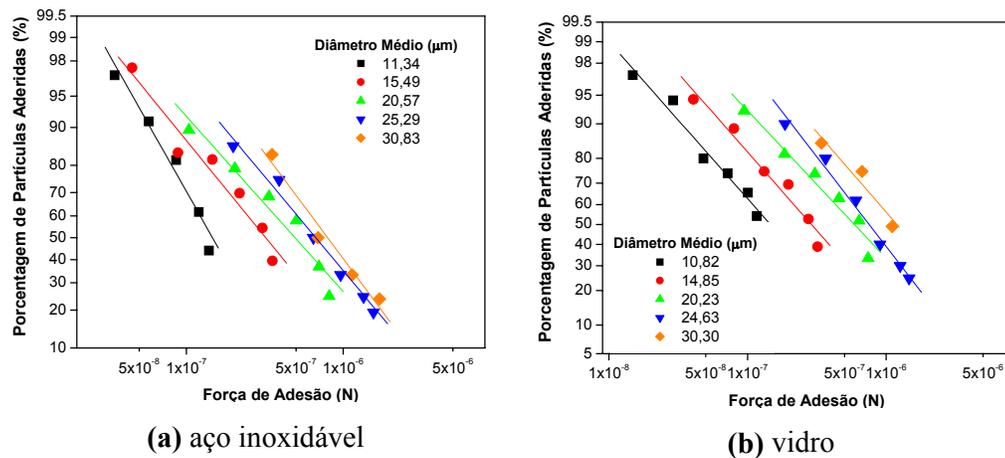


Figura 4.4 - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos, construídos em: **(a)** aço inoxidável e **(b)** vidro, em função da força de adesão, para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.

Pode-se observar que a Figura 4.4 apresentou uma distribuição log-normal similar à encontrada para o concentrado fosfático. Resultados similares foram obtidos por Lam e Newton (1992), que utilizaram uma centrífuga que atingia uma velocidade máxima de rotação de 18000 rpm para o estudo da força de adesão do amido ($\rho_P = 1,50 \text{ g/cm}^3$) numa superfície de aço inoxidável. Shimada et al., (2002), utilizando a técnica centrífuga, encontraram valores semelhantes para a força de adesão de partículas de amido de milho e amido de batata ($\rho_P = 1,48 \text{ g/cm}^3$) sobre o substrato de vidro. Banda em 2002 e Felicetti em 2004 investigaram a força de adesão do polvilho doce ($\rho_P = 1,48 \text{ g/cm}^3$) sobre uma superfície de aço inoxidável, obtiveram resultados muito semelhantes utilizando uma centrífuga cuja velocidade máxima de rotação era de 14000 rpm.

Utilizando o mesmo procedimento da Figura 4.4, construíram-se as Figuras C.1, C.2 e C.3, apresentadas no Apêndice C, correspondentes aos gráficos de porcentagem de partículas de polvilho doce aderida na superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro em função da força de adesão, para as velocidades centrífugas de compressão de 1000, de 5000 e de 10000 rpm, respectivamente. Verifica-se em todas essas curvas o mesmo comportamento observado nos gráficos da Figura 4.4.

Os resultados da mediana geométrica da força de adesão e dos desvios padrões, obtidos da Figura 4.4, assim como os resultados da força de adesão teórica obtidos da Equação (23), estão apresentados na Tabela 4.3. Observa-se que, a exemplo do que aconteceu com o concentrado fosfático, a força de adesão entre partículas de polvilho doce e a superfície do substrato construída de aço inoxidável e de vidro aumentou com o aumento do tamanho das partículas. Nota-se também, nessa figura, que os valores de força de adesão teórica também estão bastante distantes dos valores de força de adesão experimental. Tal comportamento é mais bem evidenciado para as partículas de polvilho doce, por ser um material propenso a maior deformação sob a tensão que o concentrado fosfático, alterando consideravelmente a área de adesão, conforme pode ser confirmado pela Figura 3.4.

Tabela 4.3 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão e desvio padrão geométrico para o polvilho doce após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável e de vidro.

Substrato	Diâmetro médio (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico σ_g	Força de Adesão Teórica ($\times 10^{-7}$ N)
Aço inoxidável	11,34	1,38	0,46	0,28
	15,49	2,86	0,28	0,40
	20,57	4,28	0,39	0,52
	25,29	5,08	0,40	0,66
	30,83	7,53	0,44	0,79
Vidro	10,82	1,44	0,31	0,33
	14,85	3,39	0,36	0,47
	20,23	5,91	0,38	0,63
	24,63	6,47	0,36	0,79
	30,30	8,04	0,40	0,92

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos, para o polvilho doce após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, de 5000 e de 10000 rpm, utilizando o substrato

construído de vidro. Os resultados desta tabela mostram que a força de adesão entre partículas de polvilho doce e a superfície do substrato de vidro aumenta com o aumento do tamanho das partículas e com o aumento da força *press-on*, comportamento semelhante ao encontrado com o material pulverulento inorgânico da Tabela 4.2.

Gráficos da Figura 4.5, de partículas de polvilho doce aderidas na superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro nas faixas de diâmetros de 23 – 28 e 13 – 18 μm , respectivamente, em função da força de adesão após a aplicação das velocidades centrífugas de compressão de 1000, de 2000, de 5000 e de 10000 rpm, comprovam os resultados apresentados na Tabela 4.4. Verifica-se, nessa figura que a força de adesão aumenta quanto maior for a força de compressão (*press-on*) aplicada para os dois substratos.

Os resultados obtidos para o substrato construído de aço inoxidável, estão apresentados na Tabela C.1, do Apêndice C.

Tabela 4.4 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão e desvio padrão geométrico para o polvilho doce após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de vidro.

Força <i>press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico σ_g
1000 rpm	10,44	1,19	0,62
	15,16	1,75	0,30
	20,10	2,87	0,36
	24,73	4,17	0,37
	29,94	6,50	0,37
5000 rpm	10,59	1,69	0,42
	15,03	3,76	0,38
	19,61	6,37	0,47
	25,00	7,59	0,52
	30,47	12,83	0,45
10000 rpm	10,49	2,01	0,60
	14,76	4,47	0,43
	19,69	6,46	0,54
	25,28	10,15	0,60
	30,68	15,34	0,39

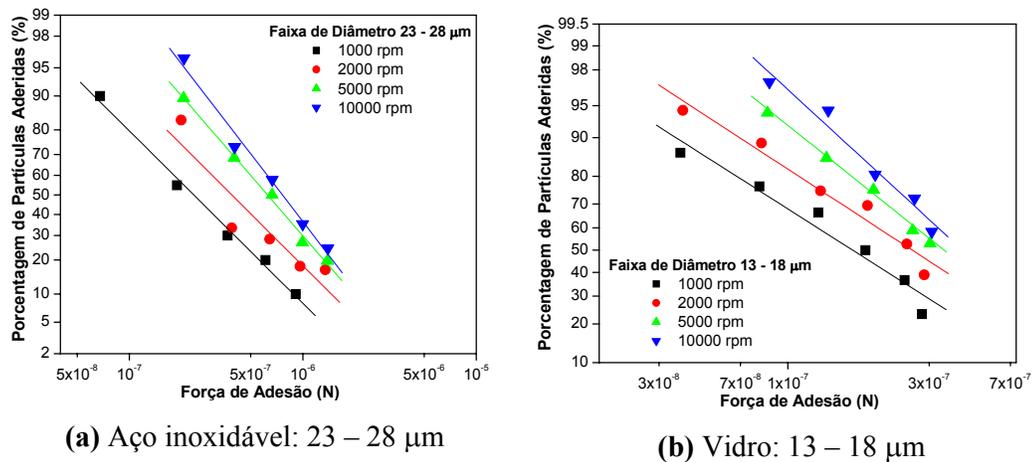


Figura 4.5 – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro nas faixas de diâmetros de 23 – 28 e 13 – 18 μm , respectivamente, em função da força de adesão das partículas de polvilho doce após a aplicação das velocidades centrífugas de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm.

A Figura 4.6 apresenta os gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de polvilho doce, para os substratos de aço inoxidável e de vidro, para todas as velocidades centrífugas de compressão (*press-on*) investigadas neste trabalho.

Observa-se, a exemplo da Figura 4.3, que para uma mesma velocidade de compressão aplicada, a força de adesão entre as partículas de polvilho doce e a superfície do substrato construído de vidro foi maior em relação ao substrato de aço inoxidável. Apesar de ambos os substratos, o aço inoxidável e o vidro, possuírem uma superfície excepcionalmente lisa, esses substratos possuem diferentes rugosidades em suas superfícies. O primeiro substrato possui maiores rugosidades em sua superfície que o vidro, conforme pode ser confirmado através da Figura 3.7. E sendo assim, a força de adesão das partículas de polvilho doce com o substrato de aço inoxidável foi menor em relação ao vidro, por que a força de adesão diminui com o aumento da rugosidade da superfície. Isto quer dizer que, a área de contato entre as partículas de polvilho doce e a superfície do substrato construído de aço inoxidável foi menor, devido à diminuição da força de Van der Waals com a rugosidade da superfície do aço inoxidável, que é maior que da superfície do vidro.

Os gráficos da Figura 4.6 apresentaram o mesmo comportamento que os gráficos da Figura 4.3, ou seja, a força de adesão das partículas do material pulverulento orgânico aumentou com o aumento do tamanho das partículas sobre a superfície desses substratos.

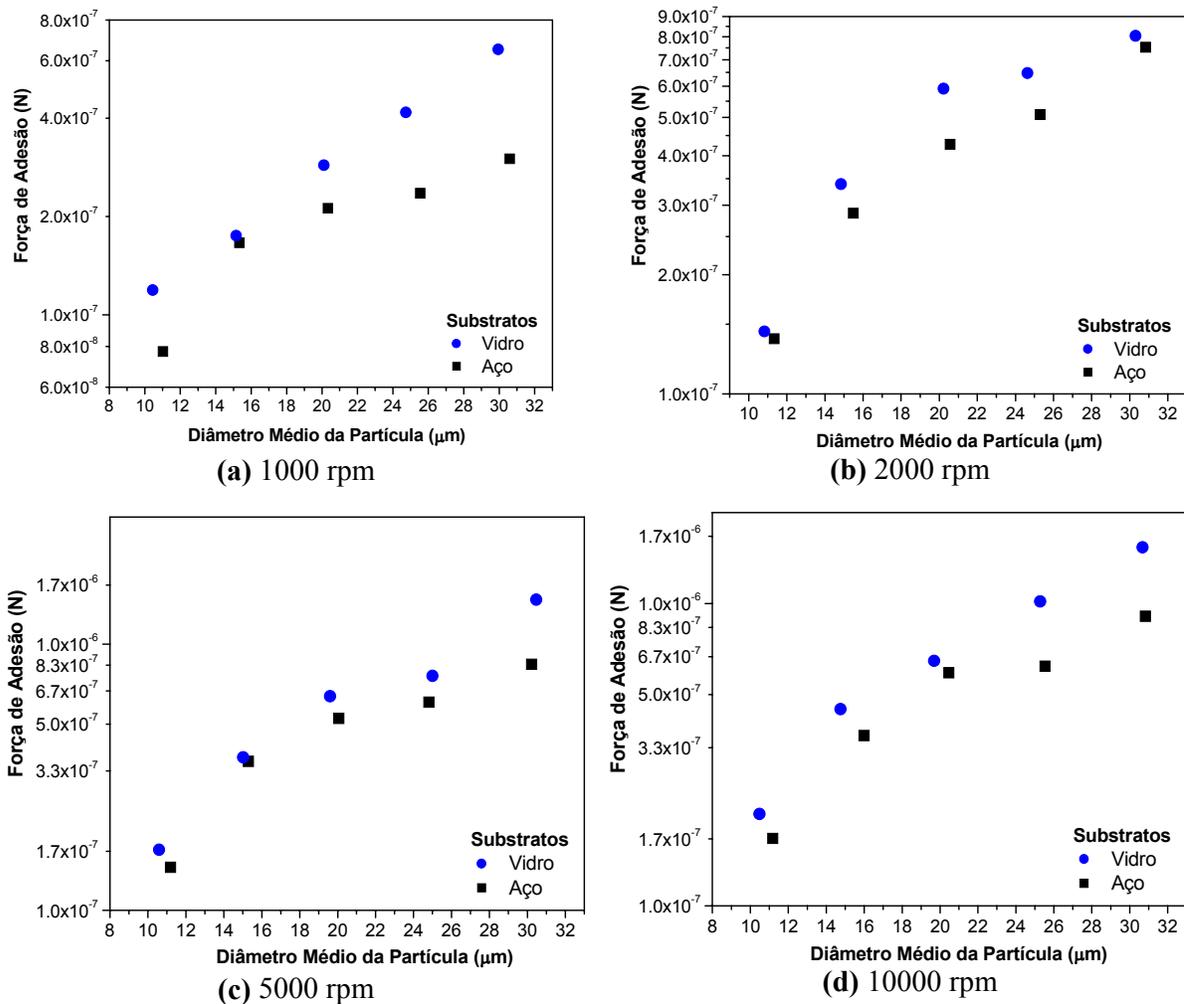


Figura 4.6 – Força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de polvilho doce, para os substratos de aço inoxidável e vidro, após aplicada a força de compressão de: **(a)** 1000, **(b)** 2000, **(c)** 5000 e **(d)** 10000 rpm, respectivamente.

A Figura 4.7 apresenta os gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático e de polvilho doce sobre a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm. Observa-se, nessa figura, que a força de adesão aumenta linearmente com o diâmetro da partícula, conforme já observado nos gráficos das figuras anteriores, e que para uma mesma velocidade de compressão aplicada, o material pulverulento orgânico (polvilho doce) apresentou maior força de adesão em relação ao material pulverulento inorgânico (concentrado fosfático). Pode-se observar, também, que a força de adesão teórica, obtida da Equação (23), cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.1 e

4.3, referentes ao concentrado fosfático e ao polvilho doce, respectivamente, estão bastante distantes dos valores de força de adesão experimental. E conforme justificativa já descrita anteriormente, a razão deste distanciamento é devido à força de adesão teórica ser influenciada somente pela interação das partículas com as superfícies através da energia superficial, enquanto que a força de adesão experimental é influenciada através da velocidade angular de compressão, provocando, desta maneira, a deformação elástica dessas partículas sobre a superfície dos substratos.

Além disso, a rugosidade das superfícies dos materiais pulverulentos é muito diferente. Utilizando o procedimento adotado por Aguiar (1995), estimou-se a rugosidade das superfícies das partículas do concentrado fosfático e do polvilho doce. A rugosidade estimada usando a Equação (56) foi $0.11d_p$ (ou 11%), para as partículas de concentrado fosfático e $0,04 d_p$ (ou 4%), para as partículas de polvilho doce. Estes resultados demonstraram que em média 11% do diâmetro das partículas do concentrado fosfático são rugosas, enquanto que a rugosidade das partículas de polvilho doce representa apenas 4% do seu diâmetro. Portanto, o material pulverulento inorgânico possui uma rugosidade 3 vezes mais elevada que o material pulverulento orgânico. E conforme verificado, anteriormente, a força de adesão diminui com o aumento da rugosidade da superfície. A diminuição da força de adesão com o aumento da rugosidade da superfície é devido a força de Van der Waals diminuir com a redução na área de contato entre a partícula e a superfície do substrato.

A diferença na força de adesão entre estes materiais pulverulentos pode ser explicada, como mencionado anteriormente, pelas propriedades físicas das partículas e das propriedades físicas e químicas dos substratos. As partículas do material pulverulento inorgânico (concentrado fosfático) possuem formatos muito irregulares ($\phi = 0,60$), enquanto que as partículas do material pulverulento orgânico (polvilho doce) possuem formatos regulares, bem próximos ao esférico ($\phi = 0,94$), como se pode verificar através da Figura 3.5, e uma menor faixa de distribuição granulométrica, conforme pode ser observado na Figura 3.3.

Além disso, as partículas de polvilho doce são mais suaves (ver Figura 3.5 (a)), apresentando um contato mais uniforme com a superfície do substrato que as partículas rugosas de concentrado fosfático (ver Figura 3.5 (b)). Em relação a este último, as microrugosidades permitem à partícula estar mais distante do substrato, reduzindo desta forma, a interação das forças de Van der Waals que são de curta distância. Portanto, a adesão varia de acordo com a topologia das partículas e dos substratos como consequência da natureza do curto alcance da força de Van der Waals. Igualmente, o comportamento mecânico das partículas sob tensão-deformação é muito diferente, conforme pode ser visto na Figura

3.4. O polvilho doce é mais propenso a deformação sob a tensão que o concentrado fosfático a qual pode alterar consideravelmente a área de adesão.

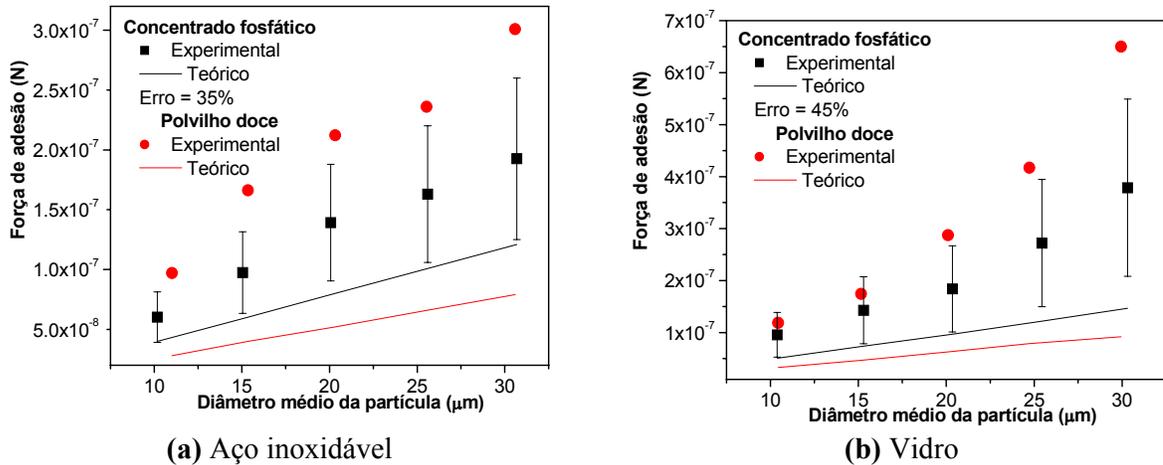


Figura 4.7 – Força de adesão experimental e teórica em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático e de polvilho doce sobre o substrato construído de **(a)** aço inoxidável e de **(b)** vidro, depois de aplicada a velocidade centrífuga de compressão de 10000 rpm.

Observa-se ainda na Figura 4.7, que os valores de força de adesão teórica do material pulverulento orgânico, polvilho doce, são menores que a força de adesão teórica do material pulverulento inorgânico, concentrado fosfático. A explicação de tal fenômeno é justificada devido ao polvilho doce apresentar uma tensão superficial cerca de duas vezes e meia menor que a do concentrado fosfático, conforme pode ser verificado na Tabela 3.2, obtendo desta maneira, uma força de adesão teórica menor, como se pode verificar através da Equação (23). E além disso, os grandes desvios obtidos entre os valores de força de adesão teórica e experimental é evidenciado nesta figura, sendo de 35% e de 45% para o material pulverulento inorgânico quando utilizou-se o substrato de aço inoxidável e de vidro, respectivamente. Os desvios obtidos para o material pulverulento orgânico foi de aproximadamente 75% para ambos os substratos. Estes valores porém, não estão apresentados nos gráficos da Figura 4.7, justamente devido ao alto valor destes desvios. A justificativa dos grandes desvios provocados, entre os valores de força de adesão teórica e os valores de força de adesão experimental, conforme já discutida anteriormente, se deve ao fato da força de adesão teórica ser influenciada somente pela interação das partículas com as superfícies através da energia superficial, enquanto que a força de adesão experimental é influenciada através da aplicação quadrática da velocidade angular de compressão (Equação (50)).

4.3 – Cálculo da Distância de Separação Efetiva (z_0) entre a Superfície da Partícula e a Superfície do Substrato

Com os resultados da força de adesão obtidos para os dois materiais pulverulentos utilizados neste trabalho, determinou-se a distância de separação efetiva (z_0) entre a superfície da partícula e a superfície do substrato.

Para a obtenção do valor da distância de separação efetiva, considere duas esferas ligadas. À distância de separação (z_0) é definida como a distância de separação efetiva na qual inicia o achatamento entre as esferas; ou em termos mais precisos, z_0 é a distância de separação quando as forças atrativas e repulsivas nas extremidades das esferas compensam uma a outra, resultando em uma força zero sobre as moléculas nas extremidades das esferas (Dahneke, 1972).

Assumindo que os materiais pulverulentos utilizados eram pós secos, e sendo assim, a força de Van der Waals é a componente que limita a força de adesão (Lam et al., 1991 e Li et al., 2006). Portanto, para o cálculo da distância de separação efetiva utilizou-se a Equação (58), que é um rearranjo da Equação (1).

$$F_{vdw} = \frac{H \cdot d \cdot p}{12 \cdot z_0^2} \quad (1)$$

$$z_0 = \sqrt{\frac{H \cdot d \cdot p}{12 \cdot F_{adesão}}} \quad (58)$$

A constante de Hamaker está diretamente relacionada à propriedade do material (Yu et al., 2003), e que na maioria dos materiais seu valor está estabelecido entre 10^{-19} e 10^{-20} J (Israelachvili, 1991). Vários métodos foram desenvolvidos nas últimas duas décadas para medir a constante de Hamaker (Xie, 1997). Podczeczek et al., (1994) utilizou em sua pesquisa o método de espectroscopia dielétrica para determinar a constante de Hamaker da lactose monohidratada. Porém os valores da constante de Hamaker utilizados neste trabalho foram obtidos da literatura.

O valor da constante de Hamaker utilizado para o concentrado fosfático foi de 8×10^{-20} J (Silva et al., 1999) e para o polvilho doce foi de $5,2 \times 10^{-20}$ J (Li et al., 1996). Shimada e colaboradores em 2002 utilizaram uma constante de Hamaker similar para o amido de batata ($4,8 \times 10^{-20}$ J).

O cálculo da distância de separação efetiva (z_0) entre a superfície das partículas dos dois materiais pulverulentos e a superfície dos substratos utilizados neste trabalho, obtido através da Equação (58), é apresentado nas Tabelas 4.5 a 4.10:

Tabela 4.5 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de aço inoxidável.

Aço inoxidável							
<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)	<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)
1000	10,18	0,60	1,06	2000	10,59	0,86	0,91
	15,04	0,97	1,01		15,47	1,38	0,86
	20,07	1,39	0,98		20,29	1,55	0,93
	25,6	1,63	1,02		25,57	1,91	0,95
	30,69	1,92	1,03		30,49	2,60	0,88
5000	10,59	1,08	0,81	10000	10,89	1,67	0,66
	15,59	1,55	0,82		15,70	2,85	0,61
	20,22	1,95	0,83		20,42	3,24	0,65
	25,81	3,02	0,81		25,09	4,46	0,61
	30,49	3,45	0,80		31,02	6,22	0,58

Tabela 4.6 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de PVC.

PVC							
<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)	<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)
1000	10,66	0,48	1,21	2000	10,43	0,74	0,97
	16,19	0,85	1,12		15,39	1,07	0,98
	20,54	1,25	1,05		20,43	1,31	1,02
	25,50	1,46	1,08		25,45	1,60	1,03
	30,18	1,85	1,04		30,34	2,03	0,99
5000	10,74	1,00	0,85	10000	10,21	1,60	0,65
	15,88	1,54	0,83		16,12	2,75	0,63
	20,81	1,90	0,85		19,89	2,99	0,67
	25,51	2,49	0,83		25,19	3,99	0,65
	29,86	3,23	0,79		31,16	5,40	0,62

Tabela 4.7 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de Teflon®.

Teflon®							
<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)	<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)
1000	10,42	0,43	1,27	2000	10,56	0,64	1,05
	15,62	0,63	1,28		15,61	0,97	1,03
	20,39	0,92	1,22		20,62	1,09	1,12
	25,10	1,28	1,14		24,96	1,50	1,05
	30,13	1,75	1,07		31,04	1,93	1,04
5000	10,28	0,98	0,84	10000	10,84	1,42	0,71
	16,00	1,14	0,84		15,46	1,84	0,74
	20,50	1,83	0,82		20,76	2,82	0,70
	24,91	2,29	0,85		25,96	3,95	0,66
	30,04	3,14	0,80		30,08	4,31	0,68

Tabela 4.8 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de vidro.

Vidro							
<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)	<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)
1000	10,39	0,96	0,85	2000	10,61	0,96	0,86
	15,30	1,43	0,85		15,45	1,74	0,77
	20,35	1,84	0,86		20,32	2,29	0,77
	25,44	2,72	0,79		25,20	2,93	0,76
	30,31	3,79	0,73		30,54	4,02	0,71
5000	10,89	1,22	0,77	10000	10,19	1,72	0,63
	15,01	1,82	0,74		15,33	2,93	0,59
	20,30	2,50	0,74		20,17	3,64	0,61
	25,20	3,77	0,67		25,11	4,80	0,59
	31,31	4,76	0,66		30,01	6,40	0,56

Tabela 4.9 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de polvilho doce e a superfície do substrato construído de aço inoxidável.

Aço inoxidável							
<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)	<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)
1000	11,02	0,77	0,78	2000	11,34	1,38	0,60
	15,34	1,66	0,63		15,49	2,86	0,48
	20,33	2,12	0,65		20,57	4,28	0,46
	25,54	2,36	0,68		25,29	5,08	0,46
	30,59	3,01	0,66		30,83	7,53	0,42
5000	11,19	1,45	0,58	10000	11,18	1,67	0,54
	15,29	3,62	0,43		15,99	3,66	0,44
	20,06	5,25	0,41		20,46	5,91	0,39
	24,81	6,06	0,42		25,53	6,20	0,42
	30,22	8,40	0,39		30,82	9,07	0,38

Tabela 4.10 – Valores da distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de polvilho doce e a superfície do substrato construído de vidro.

Vidro							
<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)	<i>Press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Distância de separação efetiva ($\times 10^{-9}$ m)
1000	10,44	1,19	0,62	2000	10,82	1,44	0,57
	15,16	1,75	0,61		14,85	3,39	0,44
	20,10	2,87	0,55		20,23	5,91	0,38
	24,73	4,17	0,51		24,63	6,47	0,41
	29,94	6,50	0,45		30,30	8,04	0,40
5000	10,59	1,69	0,52	10000	10,49	2,01	0,47
	15,03	3,76	0,42		14,76	4,47	0,37
	19,61	6,37	0,36		19,69	6,46	0,36
	25,00	7,59	0,38		25,28	10,15	0,33
	30,47	12,83	0,32		30,68	15,34	0,29

A Figura 4.8 apresenta um gráfico de distância de separação efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro, em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de **(a)** 2000 e de **(b)** 5000 rpm.

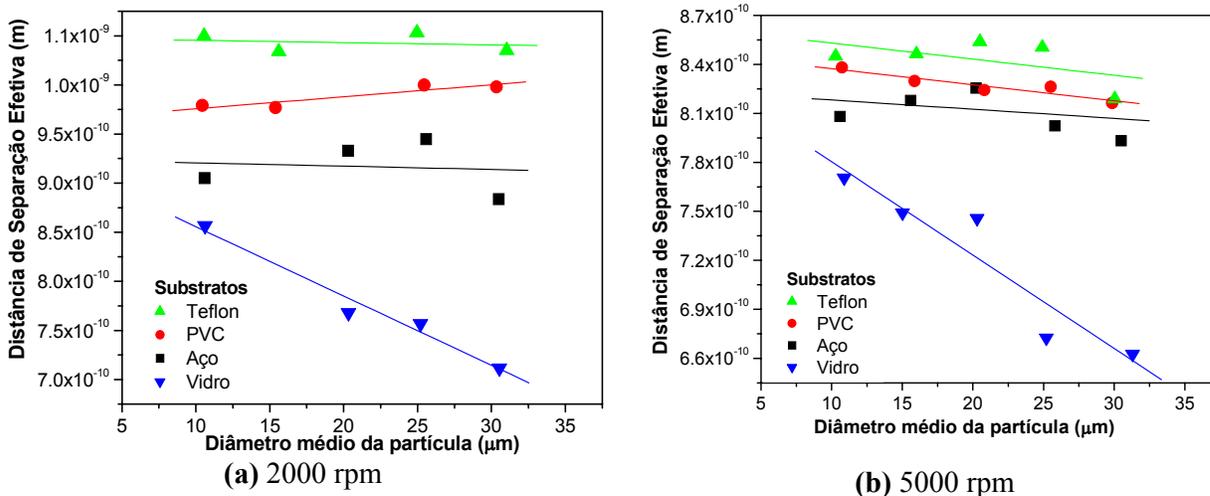


Figura 4.8 – Distância de separação efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro, em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de (a) 2000 e de (b) 5000 rpm.

Observando o gráfico da Figura 4.8 pode-se verificar que os valores da distância de separação efetiva (z_0), obtidos para o concentrado fosfático ($press-on = 2000$ e 5000 rpm), foram constantes quando utilizou-se os substratos construídos de aço inoxidável, de PVC e de Teflon[®]; quando se utilizou o substrato construído de vidro, a distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas e do substrato, apresentaram valores decrescentes. Tal comportamento pode ser justificado devido às características das propriedades mecânicas e físicas do vidro, por apresentar uma superfície excepcionalmente lisa e uma menor rugosidade da superfície e, quando submetido à velocidades de compressão acarretou uma diminuição entre as rugosidades das superfícies partícula-substrato, aumentando, portanto, a força de adesão e, conseqüentemente, reduzindo a distância de separação efetiva entre a superfície das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato de vidro. Outra justificativa é, além da influência das forças de Van der Waals existentes, outras forças de interação partícula-superfície estão agindo, como as forças eletrostáticas presentes no contato de materiais com superfícies distintas.

A Figura 4.9 apresenta um gráfico de distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas dos dois materiais pulverulentos e a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro, em função do diâmetro médio das partículas, após a $press-on$ de 10000 rpm. Observa-se neste gráfico que z_0 entre as superfícies das partículas e a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro apresentaram valores decrescentes. Esses resultados decrescentes de z_0 podem ser comprovados através dos resultados das Tabelas 4.5, 4.8,

4.9 e 4.10, correspondentes aos materiais pulverulentos inorgânicos e orgânicos e os substratos de aço inoxidável e de vidro, respectivamente.

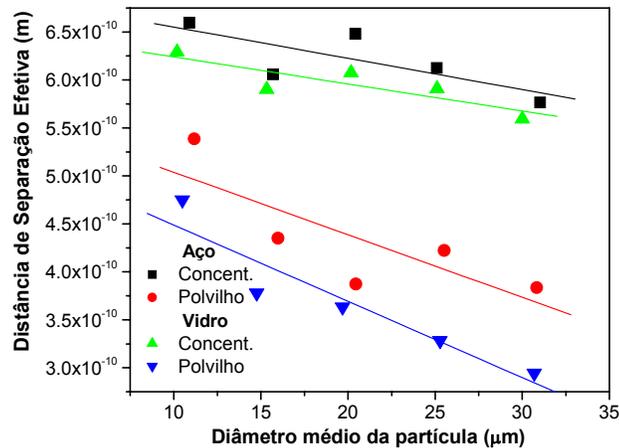


Figura 4.9 – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e de polvilho doce e a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro, em função do diâmetro médio das partículas (*press-on* = 10000 rpm).

Analisando os valores de distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas dos materiais pulverulentos e a superfície dos substratos, apresentados nas Tabelas 4.5 a 4.10, pode-se observar que os maiores valores de z_0 foram obtidas entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de Teflon[®], seguida do PVC, do aço inoxidável e por último para o substrato de vidro. Isto pode ser justificado devido às características das propriedades mecânicas e físicas do Teflon[®], por possuir o mais baixo coeficiente de atrito de todos os sólidos conhecidos, este material é muito utilizado, principalmente comercialmente, como revestimento de frigideiras por não aderir a outros materiais.

As Tabelas 4.5 a 4.8 mostram que todos os valores obtidos para a distância de separação efetiva (z_0), entre a superfície da partícula de concentrado fosfático e a superfície do substrato, estão dentro da faixa de valores sugeridos por Shubert (1981). Segundo Schubert (1981), a menor distância possível entre duas partículas esféricas em contato seria de 0,4 nm, e sugeriu que para todas as partículas, este valor estaria entre $0,4 \text{ nm} < (z_0) < 40 \text{ nm}$.

Pode ser observado também, através das Tabelas 4.5 a 4.10, para os valores de distância de separação efetiva entre as superfícies dos materiais pulverulentos e a superfície dos substratos, uma variação muito pequena de z_0 com o diâmetro da partícula, mostrando que z_0 é fracamente

dependente ao tamanho de partícula para a faixa de diâmetro investigada neste trabalho. Este mesmo comportamento foi observado no trabalho desenvolvido por Podczec e colaboradores (1994).

É interessante notar, também, que alguns valores de z_0 (Tabela 4.9 e 4.10), obtidos para o material pulverulento orgânico polvilho doce, não são da mesma ordem de grandeza da menor distância possível entre duas partículas calculadas por Schubert (1981), isto é, 0,4 nm. Isto pode ser justificado devido à natureza elástica do polvilho doce que permitiu um contato muito próximo à superfície plana do substrato durante o processo de compressão. Já que o polvilho doce é um material mais macio que o concentrado fosfático, podendo apresentar uma maior deformação e suavização nas microrugosidades da superfície que o outro material pulverulento durante a compressão, reduzindo, desta forma, a distância de separação efetiva entre a superfície das partículas de polvilho doce e a superfície do substrato; e aumentando a interação destas partículas com a superfície. Como o concentrado fosfático apresenta uma maior dureza que o material pulverulento orgânico, esse é menos sensível a estas mudanças quando comprimido.

Podczec e colaboradores (1995), investigaram a força de adesão entre partículas de amido ($\rho_P = 1,50 \text{ g/cm}^3$) e de carbonato de cálcio ($\rho_P = 2,68 \text{ g/cm}^3$) e um substrato construído de alumínio, aplicando a técnica centrífuga. Neste trabalho, também, foi verificado que as partículas de polvilho são deformáveis mais facilmente que as partículas de carbonato de cálcio. Isto se justifica devido às partículas do material pulverulento orgânico serem bastante elásticas.

Sendo assim, a razão para que os valores de z_0 entre as superfícies das partículas de polvilho doce e a superfície do substrato estejam fora da faixa sugerida por Shubert, poderia ser provocada pelo aumento do contato entre as partículas de polvilho doce e as rugosidades da superfície dos substratos devido à deformação elástica das partículas durante o processo de compressão (*press-on*). Porém, um aumento na força de desprendimento (*spin-off*) das partículas nas superfícies dos substratos poderia ter liberado energia elástica deste material para uma separação mais fácil das partículas. Ou seja, seria necessário uma microcentrífuga com velocidade de rotação maior que 14000 rpm para provocar um maior desprendimento das partículas sobre a superfície dos substratos.

4.4 – Ajuste de uma equação para os resultados experimentais da força de adesão para os dois materiais pulverulentos investigados

Sabe-se que a força de adesão entre corpos contíguos é influenciada pelo formato da partícula, pela rugosidade da superfície, pelo tamanho da partícula, pela umidade relativa do

ar e pela pressão de aplicação do contato, além das propriedades físico-química dos materiais envolvidos, como a densidade.

Desta forma, utilizou-se os resultados experimentais obtidos neste trabalho, com a finalidade de estimar uma equação que representasse de forma geral a força de adesão entre as partículas dos materiais pulverulentos orgânicos e inorgânicos e um substrato, construído de diferentes materiais.

Segundo Corn (1961), para materiais duros e superfícies limpas, uma expressão empírica para a força de adesão de partículas de vidro e de quartzo ($> 20 \mu\text{m}$) a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, é representada pela Equação (5):

$$F_{\text{adesão}} = 0,063 \cdot d_p \cdot [1 + 0,009 \cdot (\%RH)] \quad (5)$$

Sendo que a força de adesão, $F_{\text{adesão}}$, é dada em Newton, o diâmetro da partícula, d_p , em metro e a umidade relativa do ar, %RH, em porcentagem.

Baseando-se na Equação (5), ajustou-se uma equação que melhor representasse os resultados experimentais levantados neste trabalho. A umidade relativa do ar foi mantida constante em 40% ($\pm 5\%$) durante todos os experimentos. A Equação (5) pode ser representada pela Equação (59):

$$F_{\text{adesão}} = k \cdot d_p \quad (59)$$

em que k é uma constante, cujo valor está embutido a umidade relativa do ar e as características químicas e físicas dos materiais pulverulentos.

Portanto, a Equação (59) foi a equação linear que representou os resultados experimentais tanto para o concentrado fosfático como para o polvilho doce.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático e de polvilho doce, respectivamente, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm, para todos os substratos investigados neste trabalho.

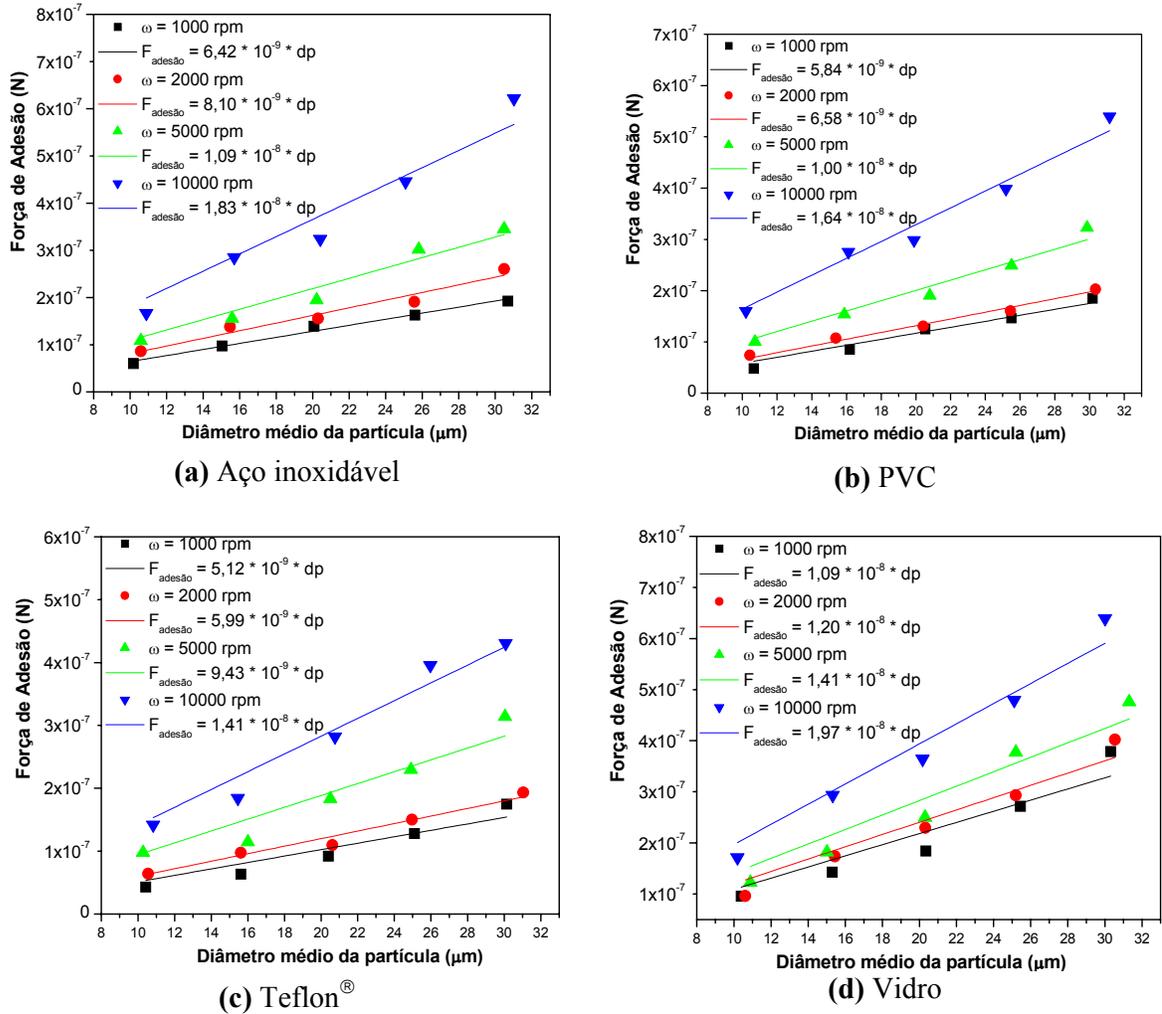


Figura 4.10 – Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de: **(a)** aço inoxidável, **(b)** PVC, **(c)** Teflon[®] e **(d)** vidro.

Observa-se nas Figuras 4.10 e 4.11, que a força de adesão apresentou um comportamento linear com o diâmetro médio da partícula dos materiais pulverulentos e com a velocidade angular de compressão. Lam e Newton (1992) observaram o mesmo comportamento utilizando o polvilho ($\rho_P = 1,50 \text{ g/cm}^3$) e a lactose ($\rho_P = 1,51 \text{ g/cm}^3$), para a velocidade angular de compressão de 10000 rpm.

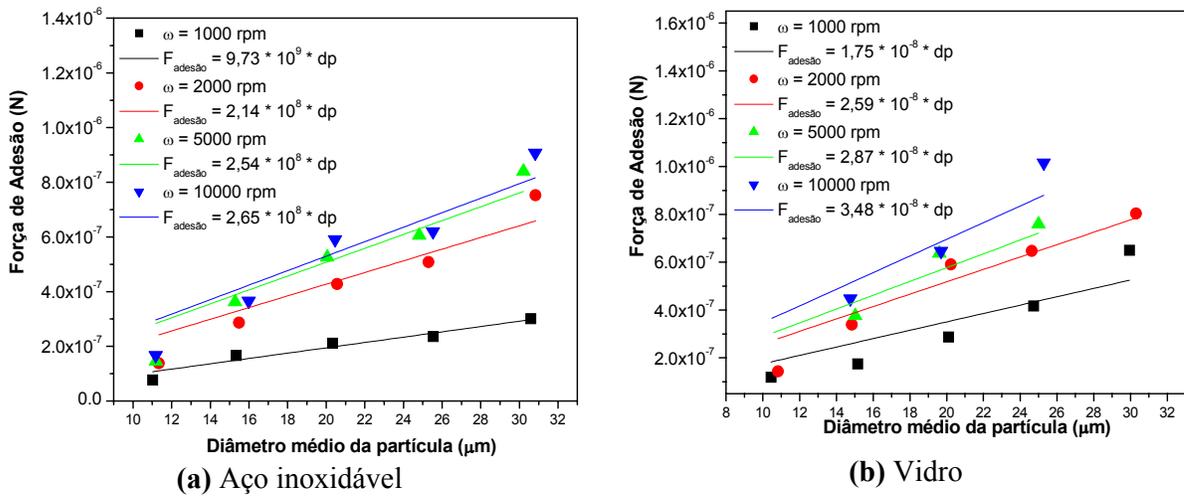


Figura 4.11 – Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de polvilho doce, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de: **(a)** aço inoxidável e **(b)** vidro.

A Tabela 4.11 apresenta os coeficientes de correlação lineares, para os dois materiais pulverulentos, dos gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm.

Tabela 4.11 - Coeficientes de correlação lineares, para o concentrado fosfático e o polvilho doce, dos gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm.

Concentrado Fosfático	Aço Inoxidável	PVC	Teflon®	Vidro	Polvilho Doce	Aço Inoxidável	Vidro
1000 rpm	0,99	0,98	0,96	0,95	1000 rpm	0,97	0,91
2000 rpm	0,98	0,99	0,99	0,98	2000 rpm	0,95	0,95
5000 rpm	0,98	0,98	0,96	0,97	5000 rpm	0,95	0,93
10000 rpm	0,97	0,99	0,98	0,98	10000 rpm	0,94	0,93

Pode-se dizer, que os valores dos coeficientes de correlação lineares, apresentados na Tabela 4.11, apresentaram bons resultados para os dois materiais pulverulentos investigados neste trabalho.

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam gráficos de força de adesão em função da velocidade angular de compressão, para o concentrado fosfático e para o polvilho doce, respectivamente, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm, para todos os substratos investigados neste trabalho.

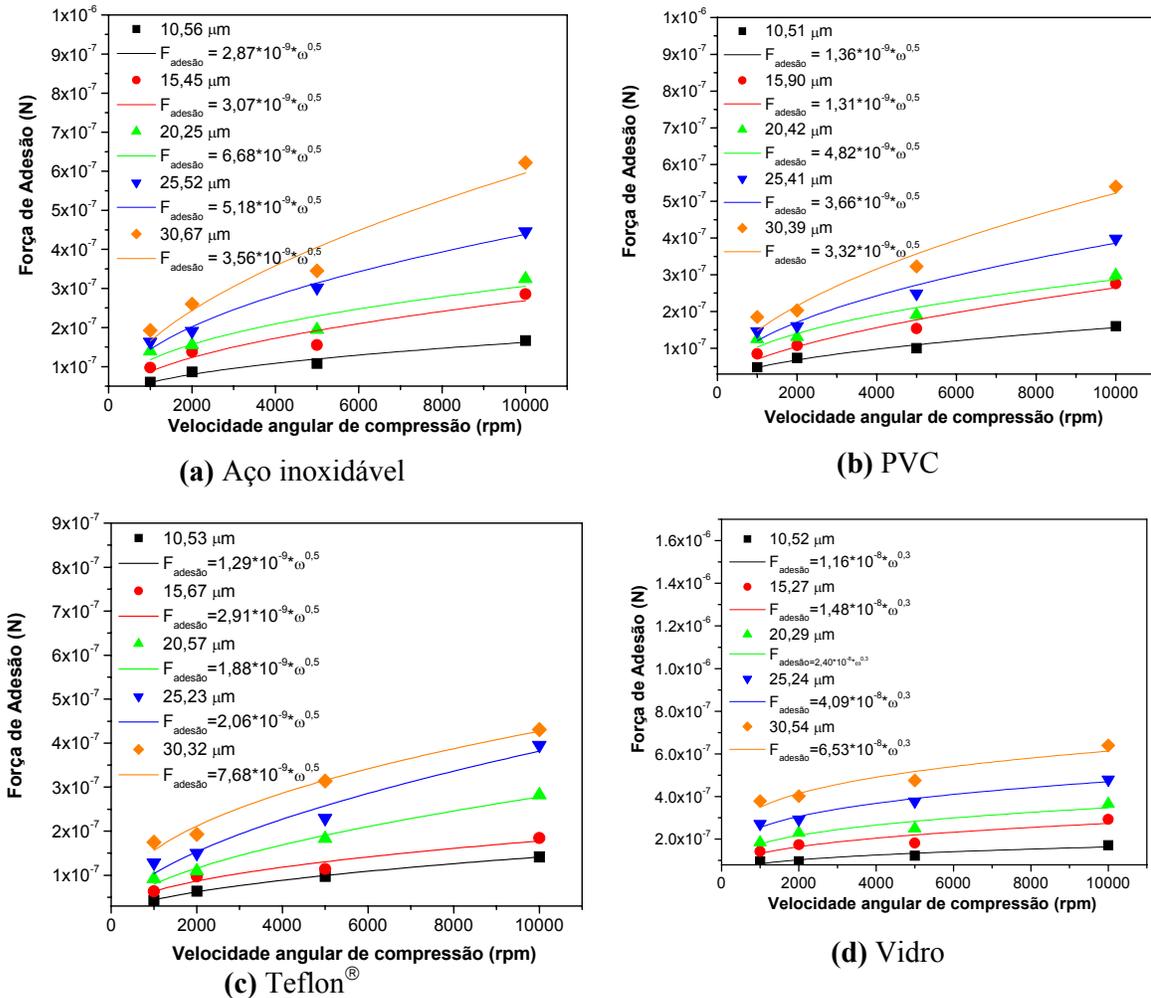


Figura 4.12 – Força de adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de concentrado fosfático, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de: **(a)** aço inoxidável, **(b)** PVC, **(c)** Teflon[®] e **(d)** vidro.

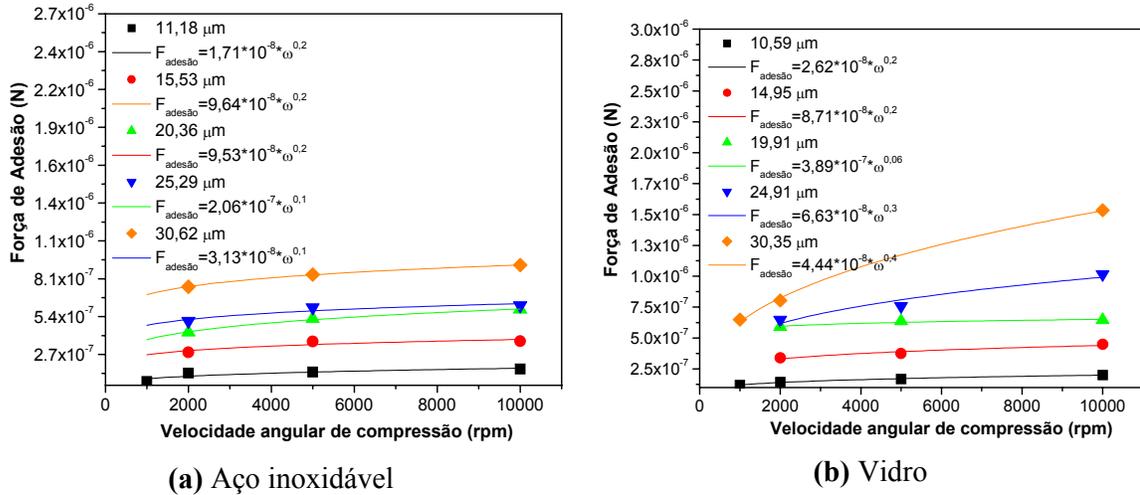


Figura 4.13 – Força de adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de polvilho doce, após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, de 2000, de 5000 e de 10000 rpm, utilizando o substrato construído de: **(a)** aço inoxidável e **(b)** vidro.

Pode-se observar nos gráficos das Figuras 4.12 e 4.13 que a força de adesão aumenta de forma não linear com o aumento da velocidade angular de compressão sobre as partículas de concentrado fosfático e de polvilho doce.

Portanto, a equação que melhor ajustou-se aos resultados experimentais foi a Equação (60):

$$F_{adesão} = k \cdot \omega^{k_1} \quad (60)$$

Para o concentrado fosfático, o valor do expoente k_1 foi 0,5 para todas as faixas de diâmetros de partículas quando se usou o substrato de aço inoxidável, de PVC e de Teflon®. Quando se usou o substrato construído de vidro, o valor do expoente k_1 foi 0,3.

Para o polvilho doce, o valor do expoente k_1 foi 0,2 para os diâmetros de 11,18, 15,53 e 20,36 μm e para os diâmetros 25,29 e 30,62 μm, o valor do expoente k_1 foi 0,1 quando se usou os substratos construídos de aço inoxidável. Para os substratos construídos de vidro, o valor do expoente k_1 foi instável para as faixas de diâmetros de partículas, sendo: 0,2 para os diâmetros médios de 10,59 e 14,95 μm, 0,06 para os diâmetros médios de 19,91 μm, 0,3 para os diâmetros médios de 24,91 μm e 0,4 para os diâmetros médios de 30,35 μm.

A variação no valor do expoente k_1 observada para os diâmetros médios, principalmente, para o polvilho doce, pode ser devido à limitação da centrífuga, cuja

velocidade máxima de rotação é de 14000 rpm. Conforme mencionado anteriormente, o polvilho doce é um material muito mais macio que o concentrado fosfático, apresentando desta forma, uma maior deformação e suavização nas microrugosidades da superfície que o material pulverulento inorgânico, durante a fase de compressão, reduzindo, desta forma, a distância de separação efetiva entre a superfície das partículas de polvilho doce e a superfície do substrato, e aumentando, com isso, a interação destas partículas com a superfície, ou seja, contribuindo para o aumento da força de adesão. Este mesmo comportamento foi observado por Lam e Newton (1991) quando investigaram a influência da força de adesão das partículas de polvilho ($\rho_p = 1,50 \text{ g/cm}^3$), lactose ($\rho_p = 1,51 \text{ g/cm}^3$) e carbonato de cálcio ($\rho_p = 2,681 \text{ g/cm}^3$) sobre um substrato construído de aço inoxidável.

Uma centrífuga com velocidade de rotação maior que 14000 rpm seria necessário, na realização dos experimentos, para provocar um maior desprendimento das partículas de polvilho doce sobre a superfície dos substratos. Por que as partículas de polvilho doce possuem uma pequena faixa de distribuição granulométrica e um menor diâmetro médio de partícula comparado ao material pulverulento inorgânico (concentrado fosfático), e conforme foi verificado por Kendal (1994), partículas finas aderem mais e partículas grandes aderem menos ao substrato.

A Tabela 4.12 apresenta os coeficientes de correlação lineares, para o concentrado fosfático e o polvilho doce, dos gráficos de força de adesão em função da velocidade angular de compressão. Analisando os valores dos coeficientes de correlação lineares mostrados nesta tabela, pode-se dizer que possuem uma proporcionalidade linear razoavelmente boa para os dois materiais pulverulentos utilizados.

Através das Figuras 4.10 a 4.13 pode-se observar o comportamento que a força de adesão assume com o diâmetro médio das partículas e com a velocidade angular de compressão.

Verifica-se que para os dois materiais pulverulentos investigados neste trabalho, a variação da força de adesão com o diâmetro médio das partículas é semelhante à Equação (5) proposta por Corn (1961). Observa-se também, que a força de adesão variou de forma não linear com a velocidade angular de compressão tanto para o concentrado fosfático como para o polvilho doce.

Tabela 4.12 - Coeficientes de correlação lineares, para o concentrado fosfático e para o polvilho doce, dos gráficos de força de adesão em função da velocidade angular de compressão.

Concentrado Fosfático	Aço Inoxidável	PVC	Teflon®	Vidro	Polvilho Doce	Aço Inoxidável	Vidro
8 – 13 µm	0,98	0,99	0,99	0,95	8 – 13 µm	0,89	0,99
13 – 18 µm	0,95	0,98	0,97	0,92	13 – 18 µm	0,91	0,98
18 – 23 µm	0,95	0,97	0,99	0,95	18 – 23 µm	0,99	0,96
23 – 28 µm	0,99	0,98	0,98	0,99	23 – 28 µm	0,94	0,97
28 – 33 µm	0,97	0,98	0,99	0,96	28 – 33 µm	0,99	0,99

Desta forma, utilizando os resultados experimentais obtidos neste trabalho e tomando como base a Equação (5) e os gráficos das Figuras 4.10 a 4.13, estimou-se a Equação (61) que representou de forma mais geral a influência do tamanho das partículas de dois materiais pulverulentos de naturezas diferentes (orgânico e inorgânico) sobre a força de adesão partícula-substrato, utilizando a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e de desprendimento em diferentes substratos.

$$F_{\text{adesão}} = k \cdot d_p \cdot \omega^{k_1} \cdot \phi \quad (61)$$

Sendo k uma constante, cujo valor está embutido a umidade relativa do ar e as características químicas e físicas dos materiais pulverulentos e dos substratos, k_1 é a constante da equação, d_p é o diâmetro da partícula (metro), ω é a velocidade angular de compressão (s^{-1}) e ϕ é a esfericidade da partícula (adimensional).

A presença da esfericidade (ϕ) na Equação (61) tem o intuito de confirmar a ordem de aderência entre os dois materiais pulverulentos. Por que através dos resultados experimentais obtidos neste trabalho, mostrou-se que o polvilho doce, cuja esfericidade é 0,94, possui maiores valores de força de adesão que o concentrado fosfático que possui $\phi = 0,64$. Ahrens e colaboradores (2005) também verificaram que a força de adesão partícula-substrato é afetada pelo formato da partícula, pela rugosidade da superfície e pela pressão de aplicação do contato, justificando desta maneira a presença da esfericidade na Equação (61).

4.4.1 – Planejamento Fatorial

Conforme dito anteriormente, a força de adesão entre partículas e superfícies é influenciada pelo formato da partícula, pela rugosidade da superfície, pelo tamanho da partícula, pela umidade relativa do ar e pela pressão de aplicação do contato, além das propriedades físico-químicas (como a densidade) dos materiais envolvidos.

Portanto, um planejamento fatorial completo foi realizado para avaliar quantitativamente a influência do tamanho da partícula (diâmetro médio da partícula) e da pressão de aplicação do contato (velocidade angular de compressão) sobre a variável resposta força de adesão.

Usando um planejamento experimental baseado em princípios estatísticos, pode-se extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos. A metodologia do planejamento fatorial, associada à análise de superfícies de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro.

Além disso, um modelo empírico foi obtido para descrever o processo estudado na região experimental investigada e, com isso pode-se compará-lo com a Equação (61). Nessa situação uma técnica conveniente é a metodologia de superfícies de resposta, que está baseada na modelagem por mínimos quadrados.

O planejamento fatorial escolhido foi o $2^k + 5$ pontos centrais aplicado para os dois materiais pulverulentos orgânicos, polvilho doce e maisena, e aos substratos de aço inoxidável e de vidro utilizados no estudo da influência da força de adesão partícula-substrato. As repetições do ponto central têm como intuito avaliar a repetibilidade do processo. O critério atribuído na utilização desses dois materiais pulverulentos, neste planejamento fatorial, foi devido esses dois materiais possuírem características físico-químicas muito semelhantes, tais como diâmetro médio da partícula, densidade e distribuição granulométrica, além de serem orgânicos.

Para o tratamento dos resultados experimentais utilizou-se o software *Statistica 6.0*, sendo possível obter o modelo representativo do comportamento do processo bem como as superfícies de resposta.

O planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais foi aplicado separadamente para cada material pulverulento orgânico e para cada substrato. Foram aplicados, portanto, quatro planejamentos experimentais estatísticos.

Para cada um deles, verificou-se que o termo linear, para a velocidade angular de compressão e para o diâmetro médio de partícula, foi significativo, podendo-se elaborar um modelo com as variáveis codificadas para a resposta força de adesão a 5% de significância.

Os níveis utilizados e os ensaios experimentais do planejamento fatorial estão apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14, respectivamente. A Tabela 4.14 mostra os desvios padrões para os cinco pontos centrais, correspondentes aos ensaios repetidos com os materiais pulverulentos, na velocidade angular de compressão de 5000 rpm e na faixa de diâmetro de 16 – 24 μm .

Tabela 4.13 - Valores utilizados no planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais.

Variáveis	-1	0	+1
Velocidade angular de compressão (rpm)	1000	5000	10000
Faixa de diâmetro de partícula (μm)	8-16	16-24	24-32

Tabela 4.14 – Matriz do planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais com a resposta força de adesão.

Ensaio	Velocidade angular de compressão (rpm)	Diâmetro médio de partícula (μm)	Força de adesão ($\times 10^{-7}$ N)			
			Maisena (Aço)	Maisena (Vidro)	Polvilho (Aço)	Polvilho (Vidro)
1	-1	-1	1,51	2,16	0,77	1,19
2	1	-1	11,44	13,77	1,67	2,01
3	-1	1	5,74	9,47	2,36	4,17
4	1	1	78,00	88,87	6,20	10,15
5	0	0	5,79 \pm 0,13	6,21 \pm 0,30	5,02 \pm 0,49	6,37 \pm 0,43
6	0	0	5,49 \pm 0,13	5,51 \pm 0,30	5,41 \pm 0,49	5,25 \pm 0,43
7	0	0	5,53 \pm 0,13	5,78 \pm 0,30	4,33 \pm 0,49	5,80 \pm 0,43
8	0	0	5,56 \pm 0,13	5,80 \pm 0,30	4,40 \pm 0,49	5,46 \pm 0,43
9	0	0	5,48 \pm 0,13	6,21 \pm 0,30	5,25 \pm 0,49	5,51 \pm 0,43

Será apresentado a seguir, o planejamento experimental estatístico para a maisena com o substrato de aço inoxidável, conforme descrito a seguir.

4.4.1.1 - Planejamento Experimental Estatístico – Maisena e Aço inoxidável

Utilizando a Tabela 4.14 da matriz do planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais com a resposta força de adesão (9 ensaios), realizou-se uma análise de variância (ANOVA) através do software *Statistica 6.0* e determinaram-se os coeficientes de regressão, apresentados na Tabela 4.15, para todos os parâmetros significativos do modelo. Pode-se observar nesta tabela, que apenas o termo linear para a velocidade angular de compressão e para o diâmetro médio da partícula (em negrito) foram significativos, podendo-se elaborar um modelo com as variáveis codificadas para a resposta força de adesão a 5% de significância e coeficiente de correlação linear de 0,91. O valor razoável deste coeficiente de correlação linear é motivado por não levar em consideração o termo de interação entre os efeitos e de apresentarem apenas termos de primeira ordem.

Tabela 4.15 - Coeficientes de regressão para a resposta força de adesão quando investigou-se a maisena e o substrato construído de aço inoxidável.

Fator	Coefficiente de regressão	Erro Padrão ($\times 10^{-7}$)	t(5)	p - valor	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	$1,350 \cdot 10^{-6}$	4,273	3,158	0,025136	$2,513 \cdot 10^{-7}$	$2,448 \cdot 10^{-6}$
ω	$2,055 \cdot 10^{-6}$	6,410	3,205	0,023848	$4,070 \cdot 10^{-7}$	$3,703 \cdot 10^{-6}$
d_m	$1,770 \cdot 10^{-6}$	6,410	2,761	0,039793	$1,220 \cdot 10^{-7}$	$3,418 \cdot 10^{-6}$
ω com d_m	$1,558 \cdot 10^{-6}$	6,410	2,431	0,059312	$-8,951 \cdot 10^{-8}$	$3,206 \cdot 10^{-6}$

O modelo empírico obtido contendo todos os parâmetros está apresentado na Equação 62.

$$F_{\text{adesão}} = 1,350 \cdot 10^{-6} + 2,055 \cdot 10^{-6} \cdot \omega + 1,770 \cdot 10^{-6} \cdot d_m + 1,558 \cdot 10^{-6} \cdot \omega \cdot d_m \quad (62)$$

Esse mesmo comportamento observado para a maisena e o substrato construído em aço inoxidável também foi observado para os outros três planejamentos experimentais estatísticos, e estão apresentados no Apêndice F.

Portanto, o modelo empírico obtido considerando-se somente os parâmetros significativos é representado pela Equação (63).

$$F_{\text{adesão}} = k_1 + k_2 \cdot \omega + k_3 \cdot d_m \quad (63)$$

Sendo k_1 , k_2 , e k_3 constantes da equação e dependem das características físico-químicas dos materiais envolvidos.

Observa-se que a variável velocidade angular de compressão, na Equação (63), apesar de possuir influência significativa sobre a força de adesão, esta apresentou, através do planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais, um comportamento linear diferente da Equação (61) que mostrou que a força de adesão aumenta de forma não linear com o aumento da velocidade angular de compressão sobre as partículas dos materiais pulverulentos. Esta dependência não linear pode ser justificada, muito provavelmente, por algum erro experimental provocado durante os ensaios com a microcentrífuga durante os experimentos laboratoriais. E desta forma, assume-se que a Equação (63) foi o modelo que melhor representou os resultados de força de adesão partícula-substrato.

As Tabelas 4.16 e 4.17 apresentam os valores das constantes k da Equação (63) para a maisena e o polvilho doce, respectivamente.

Tabela 4.16 – Valores das constantes k_1 , k_2 , e k_3 da Equação (63) para a maisena.

<i>Substrato</i>	$k (\times 10^{-6})$		
	k_1	k_2	k_3
Aço inoxidável	1,350	2,055	1,770
Vidro	1,587	2,275	2,060

Tabela 4.17 – Valores das constantes k_1 , k_2 , e k_3 da Equação (63) para o polvilho doce.

<i>Substrato</i>	$k (\times 10^{-7})$		
	k_1	k_2	k_3
Aço inoxidável	4,786	2,362	2,187
Vidro	5,208	1,700	2,780

A Figura 4.14 mostra a superfície de resposta e as respectivas curvas de contorno para a resposta força de adesão em função das variáveis estudadas (diâmetro médio de partícula e velocidade angular de compressão), quando se utilizou a maisena e o aço inoxidável.

Observa-se nesta figura, que a medida que à velocidade angular de compressão e o diâmetro médio das partículas do material pulverulento aumenta, a força de adesão aumenta, sendo que o fator diâmetro médio de partícula apresentou maior efeito na resposta força de adesão, confirmando desta maneira, a influência direta da granulometria da partícula na força de adesão partícula-substrato.

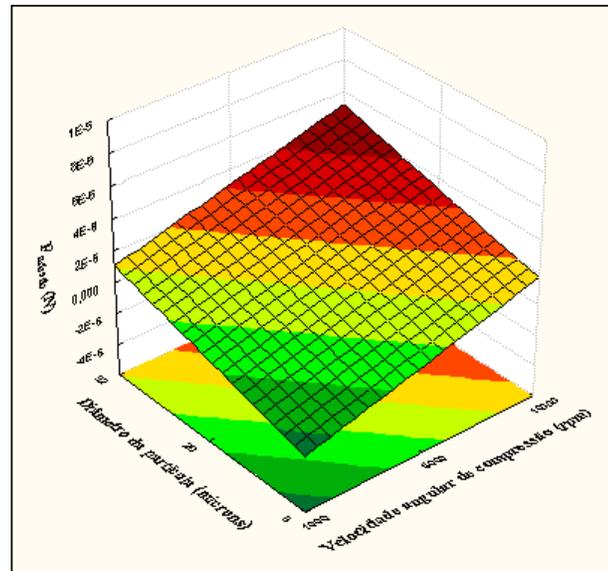


Figura 4.14 – Superfície de resposta dos efeitos da velocidade angular de compressão e do diâmetro médio da partícula, sobre a força de adesão maisena-aço inoxidável.

A Figura 4.15 mostra um gráfico da força de adesão calculada em função da força de adesão experimental das partículas de polvilho doce e de maisena, quando usou-se os substratos de (a) aço inoxidável e de (b) vidro. Observa-se nos gráficos da Figura 4.15, que a maisena possui maiores valores de força de adesão que o polvilho doce e, a força de adesão entre as partículas de maisena e a superfície do substrato construído de vidro apresentou maior valor de força de adesão que o substrato construído de aço inoxidável.

A diferença na força de adesão entre estes dois materiais pulverulentos orgânicos é justificada, novamente, pelas propriedades físicas das partículas e das propriedades físicas e químicas dos substratos. Apesar das partículas de maisena serem mais irregulares ($\phi = 0,71$) que as partículas de polvilho doce ($\phi = 0,94$), como pode-se verificar através da Figuras 3.5(b) e 3.5(c), estas apresentaram, muito provavelmente, um contato mais uniforme com a superfície do substrato que as partículas de polvilho doce, provocando uma maior aproximação das partículas

com a superfície do substrato, aumentando desta forma, a interação das forças de Van der Waals e conseqüentemente uma maior força de adesão que o polvilho doce.

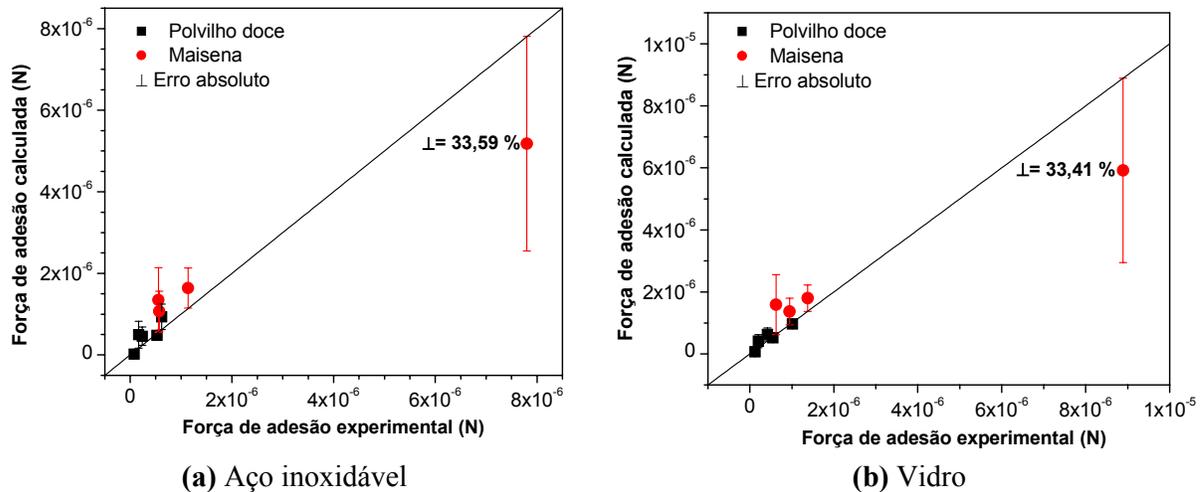


Figura 4.15 – Força de adesão experimental em função da força de adesão calculada (Equação 63) das partículas de polvilho doce e de maisena quando se utilizaram os substratos de (a) aço inoxidável e de (b) vidro. As barras de erros (\perp) correspondem ao erro absoluto.

Observa-se que o último ponto, referente a maisena, dos gráficos da Figura 4.15 (a) e (b) apresentaram um grande desvio ($\perp = \pm 33,5\%$), isto pode ser provocado pelo aumento do contato entre as partículas de maisena e as rugosidades da superfície dos substratos devido a deformação elástica dessas partículas durante o processo de compressão. Como esse ponto foi obtido através da aplicação de uma alta velocidade angular de compressão (10000 rpm), é bastante provável ter ocorrido uma liberação da energia elástica deste material para uma adesão mais forte desta partícula sobre a superfície desses substratos. Esse comportamento pode ter sido agravado devido às partículas de maisena serem mais propensas a deformação sob a tensão, alterando consideravelmente a área de adesão, que as partículas de polvilho doce e, além de possuírem, provavelmente, uma rugosidade ainda menor que o outro material pulverulento orgânico, aumentando, desta forma, a área de contato entre a partícula e as superfícies dos substratos e conseqüentemente a força de adesão.

Portanto, seria necessário uma microcentrífuga com velocidade de rotação maior que 14000 rpm para provocar um maior desprendimento destas partículas sobre a superfície dos substratos.

A Figura 4.16 apresenta um gráfico da força de adesão calculada, utilizando as Equações (61) e (63), em função da força de adesão experimental das partículas de polvilho doce e de

maisena, para os substratos de (a) aço inoxidável e de (b) vidro. A discussão a ser destacada nesta figura se faz valer dos mesmos argumentos realizados para a discussão da Figura 4.15, porém, observando os gráficos da Figura 4.16, pode-se verificar que o modelo empírico obtido através do planejamento fatorial estatístico $2^k + 5$ pontos centrais e o representado pela Equação (63), além de avaliar quantitativamente e investigar a influência do tamanho da partícula (diâmetro médio da partícula) e da pressão de aplicação do contato (velocidade angular de compressão) sobre a variável resposta força de adesão, foi o modelo que melhor representou os resultados de força de adesão partícula-substrato, na região experimental investigada, que o modelo empírico obtido através da Equação (61). Além disso, as repetições no ponto central permitem avaliar a repetibilidade do processo através dos valores dos desvios padrões, apresentados na Tabela 4.14; pois são os únicos pontos que são repetidos e nos garante a precisão e a sustentação do modelo. Isto leva a acreditar, através dos valores de desvio padrão nos pontos centrais, que os demais ensaios experimentais do planejamento estatístico também possuem uma boa confiabilidade nos resultados.

Porém, o modelo representado pela Equação (63) não é totalmente satisfatório, devido ao fato deste apresentar vícios nos resultados, ou seja, os resultados de força de adesão calculados não apresentaram uma dispersão em torno dos resultados de força de adesão experimental, conforme pode ser verificado através dos gráficos da Figura 4.15 e 4.16. Além disso, os resultados de força de adesão representados através do planejamento experimental estatístico, não levaram em consideração a influência das características químicas e físicas dos materiais pulverulentos e dos substratos, a umidade relativa do ar e a pressão de aplicação do contato das partículas dos materiais pulverulentos sobre a superfície dos substratos. Influências estas, assumidas na obtenção dos resultados experimentais de força de adesão partícula-substrato aplicando-se a técnica centrífuga e representados pela Equação (61). As forças de Van der Waals, componente limitante na força de adesão para as condições de trabalho assumidas neste estudo, também não foram levadas em consideração na obtenção da Equação (63), assim como uma possível presença das forças eletrostáticas na interação partícula-superfície. Desta forma seria necessário realizar um outro planejamento experimental estatístico, como forma de validar a Equação (63), como por exemplo um planejamento com delineamento composto central rotacional, pois este leva em consideração os termos quadráticos, não significativos no planejamento experimental realizado neste trabalho.

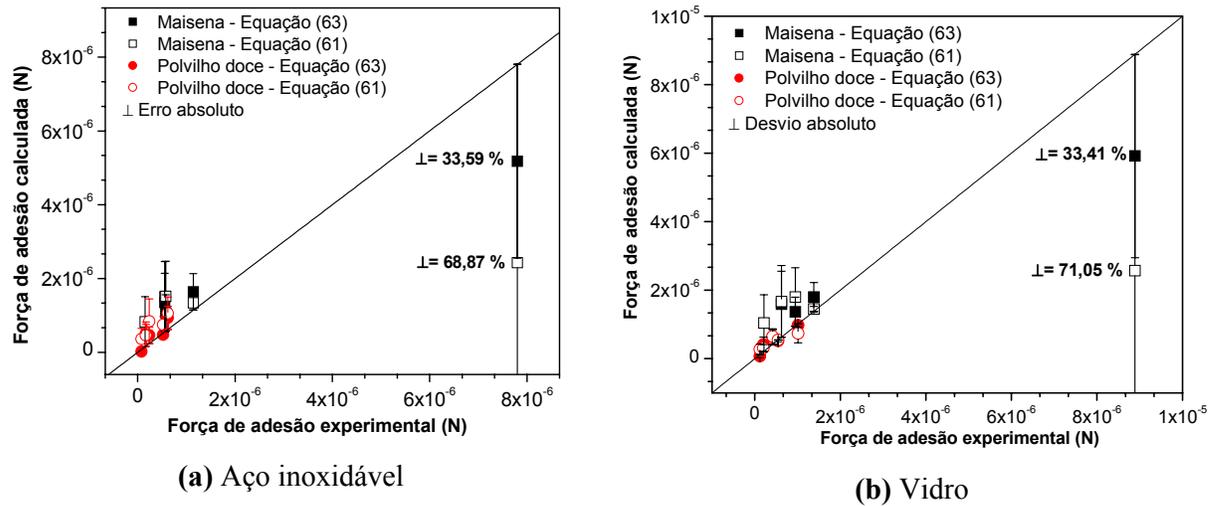


Figura 4.16 – Força de adesão experimental em função da força de adesão calculada, utilizando as Equações (61) e (63), das partículas de polvilho doce e de maisena quando foram utilizados os substratos de **(a)** aço inoxidável e de **(b)** vidro. As barras de erros (\perp) correspondem ao erro absoluto.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A técnica centrífuga foi o método utilizado para investigar a influência do tamanho das partículas de um material pulverulento orgânico (polvilho doce) e inorgânico (concentrado fosfático) sobre a força de adesão partícula-substrato, em diferentes substratos e velocidades de compressão e de desprendimento.

A partir desses resultados experimentais e tendo em vista os objetivos propostos, as principais conclusões deste trabalho são:

- A força de adesão entre as partículas dos materiais pulverulentos investigados e a superfície dos substratos apresentou um comportamento linear com o diâmetro das partículas.
- A força de adesão entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato construído de vidro apresentou sempre a maior grandeza em relação as demais superfícies dos substratos investigadas, seguida do aço inoxidável, do PVC e do Teflon[®], respectivamente, quando aplicou-se a mesma velocidade angular de compressão.
- Tanto para o polvilho doce, como para o concentrado fosfático, a força de adesão entre as partículas e a superfície dos substratos aumentou com o aumento da velocidade angular de compressão (*press-on*).
- A força de adesão entre as partículas de polvilho doce e a superfície do substrato construído de vidro apresentou sempre a maior grandeza em relação a superfície do substrato construído de aço inoxidável quando aplicou-se a mesma velocidade angular de compressão.
- Para uma mesma velocidade angular de compressão aplicada, o material pulverulento orgânico (polvilho doce) apresentou maior força de adesão em relação ao material pulverulento inorgânico (concentrado fosfático), quando usou-se os substratos de aço inoxidável e de vidro.

- O material pulverulento orgânico amido de milho (maisena) apresentou maiores valores de força de adesão que o material pulverulento orgânico amido de mandioca (polvilho doce) e, a força de adesão entre as partículas de maisena e a superfície do substrato construído de vidro apresentou maior grandeza que o substrato construído de aço inoxidável.
- A força de adesão diminuiu com o aumento da rugosidade da superfície das partículas e dos substratos.
- Os valores de força de adesão teórica, dos materiais pulverulentos investigados, ficaram bem distantes dos valores de força de adesão experimental, sendo de 35% e de 45% os desvios para o material pulverulento inorgânico quando utilizou-se o substrato de aço inoxidável e de vidro, respectivamente, e 75% os desvios obtidos para o material pulverulento orgânico para ambos os substratos investigados.
- A força de adesão teórica é influenciada somente pela interação das partículas com as superfícies através da energia superficial, enquanto que a força de adesão experimental é influenciada através da velocidade angular de compressão sobre as partículas, provocando, desta maneira, uma deformação elástica dessas partículas sobre a superfície dos substratos e o conseqüente aumento da força de adesão.
- Os valores da distância de separação efetiva (z_0) obtidos para o concentrado fosfático mantiveram-se constantes quando foram utilizados os substratos construídos de aço inoxidável, de PVC e de Teflon[®], para as velocidades angulares de compressão de 1000, de 2000 e de 5000 rpm. Quando se utilizou o substrato construído de vidro, a distância de separação efetiva entre a superfície das partículas do material pulverulento inorgânico e a superfície deste substrato apresentou valores decrescentes.
- A distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e de polvilho doce e a superfície dos substratos construídos de aço inoxidável e de vidro apresentaram valores decrescentes quando aplicou-se a velocidade angular de compressão de 10000 rpm.

- Os maiores valores de distância de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a superfície dos substratos foram para o Teflon[®], seguida para o PVC, para o aço inoxidável e por último para o substrato de vidro.
- Todos os valores, obtidos para a distância de separação efetiva (z_0) entre a superfície das partículas de concentrado fosfático e a superfície dos substratos, estão dentro da faixa de valores sugeridos por Shubert (1981).
- Alguns valores de z_0 , obtidos para o material pulverulento orgânico, polvilho doce, não são da mesma ordem de grandeza da menor distância possível entre duas superfícies.
- Os valores de distância de separação efetiva (z_0) entre as superfícies dos materiais pulverulentos e a superfície dos substratos, possuem uma variação muito pequena de z_0 com o diâmetro da partícula, mostrando que z_0 é fracamente dependente ao tamanho de partícula para a faixa de diâmetro investigada neste trabalho.
- O planejamento fatorial estatístico, $2^k + 5$ pontos centrais, comprovou que o termo linear para a velocidade angular de compressão e o termo linear para o diâmetro médio de partícula são parâmetros significativos (limite de confiança de 95%) sobre a variável resposta força de adesão.

➤ **Conclusão Final**

Pela definição da força de adesão e da força centrífuga apresentadas neste trabalho, a conclusão final desta tese de doutorado, é que os resultados físicos de força de adesão partícula-substrato obtidos através da técnica centrífuga são persistentes com a metodologia e as condições assumidas neste trabalho, pois, conforme exposto, no equilíbrio, a grandeza da força centrífuga aplicada iguala-se a força de adesão, mas com sinal oposto.

E através dos resultados de reprodutibilidade da velocidade angular de compressão, conclui-se que a pressão de aplicação do contato das partículas dos materiais pulverulentos sobre a superfície dos substratos, além de possuir influência direta na força de adesão partícula-substrato, validaram a técnica centrífuga e os resultados apresentados neste trabalho.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES

Para a continuidade deste estudo, são dadas as seguintes sugestões:

- Investigar a influência da umidade relativa do ar, de tal forma a considerar os efeitos das forças de capilaridade na força de adesão partícula-substrato.
- Investigar a influência do tamanho das partículas dos materiais pulverulentos sobre a força de adesão partícula-substrato considerando, além das forças de Van der Waals, as forças eletrostáticas.
- Utilizar um planejamento fatorial completo acrescido de repetições nos pontos centrais mais um delineamento composto central rotacional (DCCR).
- Investigar a força de adesão partícula-substrato, utilizando para um mesmo substrato diferentes valores de rugosidades de superfícies.
- Investigar a influência do tamanho das partículas do material pulverulento orgânico e inorgânico sobre a força de coesão entre as partículas, utilizando a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e de desprendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSON, A.W., *Physical Chemistry of Surfaces*, 5th edition, John Wiley & Sons, Inc. California, 1990.
- AGUIAR, M. L. and COURY, J.R. “Air filtration in fabric filters: cake-cloth adhesion force”. *Fluid/Part. Sep. Journal*, v.5, n.4, p. 193 - 198, 1992.
- AGUIAR, M. L., “Filtração de gases em filtros de tecido: Deposição e remoção da camada de pó formada”. São Carlos, UFSCar, 1995, (Tese de Doutorado).
- AHRENS, F., PATTERSON, T., MUELLER, S. and HOJJATIE, B., “Investigation of paper dryer picking, web transfer and quality issues using a new web adhesion and drying simulator”. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.22, nº 2, p. 217 - 225, 2005.
- ARRIECHE, L. S., “Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada”. São Carlos, UFSCar, 2003, (Dissertação de Mestrado).
- ASTM, D 907, Standard Definitions of Terms Relating to Adhesives, Annual Book of ASTM Standards, v. 22, p. 233, 1977.
- BANDA, G. R. S., “Desenvolvimento de uma metodologia experimental, para determinar a força de adesão entre partículas e uma superfície plana, utilizando a técnica centrífuga”. São Carlos, UFSCar, 2002, (Dissertação de Mestrado).
- BAYOUDH, S.; PONSONNET, L.; BEN OUADA, H.; BAKHROUF, A.; OTHMANE, A., “Bacterial detachment from hydrophilic and hydrophobic surfaces using a microjet impingement”. *Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.*, v.266, p. 160, 2005.
- BAYOUDH, S.; OTHMANE, A.; BETTAIEB, F.; BAKHROUF, A.; BEN OUADA, H.; PONSONNET, L., “Quantification of the adhesion free energy between bacteria and hydrophobic and hydrophilic substrata”. *Mater. Sci. Eng. C-Biomimetic Supramol. Syst.*, v.26, p.300, 2006.

- BERUTO, D.T., SEARCY, A.W. and KIM, M.G. “Microstructure, kinetic, structure, thermodynamic analysis for calcite decomposition: free-surface and powder bed experiments”. *Thermochim. Acta*, v.424, p.99 - 109, 2004.
- BIKERMAN, J.J., “The Science of Adhesive Joints”, 2nd ed., Academic Press, New York and London, p.349, 1968.
- BIRESAW, G. and CARRIERE, C.J., “Correlation between Mechanical Adhesion and Interfacial Properties of Starch/Biodegradable Polyester Blends”. *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* v.39 p.920 - 930, 2001.
- BÖEHME, G., KRUPP, H., RABENHORST, H. and SANDSTEDT G., “Adhesion measurements involving small particles”. *Trans. Inst. Chem. Eng.* v.40, p.252 - 259, 1962.
- BOOTH, S. W. and NEWTON, J.M., “Experimental investigation of adhesion between powders and surfaces”. *Journal of Pharmaceutical and Pharmacology.* v.39, p.679 - 684, 1987.
- BOWDEN, F.P. and TABOR, D., “The Friction and lubrication of solids”. Part. 1 Oxford University Press, London, 1950.
- BRADLEY, R. S., “The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of Solids”, *Philos. Mag.* v.13, p. 853 - 862, 1932.
- BURDICK1, G. M., BERMAN, N. S. and BEAUDOIN, S. P., “Hydrodynamic particle removal from surfaces”. *Thin Solid Films*, v. 488, p. 116 - 123, 2005.
- BUSNAINA, A., TAYLOR, A., J. and KASHKOUSH, I., “Measurements of Adhesion and Removal Forces of Submicron Particles on Silicon Surfaces”. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 7, n° 5, p. 441 - 455, 1993.
- CAPPELLA, B., and DIETLER, G., “Force-distance curves by atomic force microscopy”. *Surface Science Reports*, v.34, p. 1 - 104, 1999.

- CHARLAIX, E. and CRASSOUS, J., “Adhesion forces between wetted solid surfaces”. *The journal of Chemical Physics*, v. 122, nº 184701, p. 1 - 9, 2005.
- CHESTER, J.S., CHESTER, F.M. and KRONENBERG, A.K. “Fracture surface energy of the Punchbowl fault”, *San Andreas system, Nature*, v.437, p.133 - 136, 2005.
- COQUET, L.; COSETTE, P.; JUNTER, G-A.; BEUCHER, E.; SAITER, J-M.; JOUENNE T., “Adhesion of *Yersinia ruckeri* to fish farm materials: influence of cell and material surface properties”. *Colloid Surf. B-Biointerfaces*, v.26, p.373, 2002.
- CORN, M., “The adhesion of solid particles to solid surfaces, I. A review”. *J. Air Pollution Control Assoc.*, v.11, p. 523 - 528, 1961.
- COTTAAR, E. J. E., AND RIETEMA, K., “A theoretical study on the influence of gas adsorption on interparticle forces in powders”. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.109, n.1, p.249 - 260, 1985.
- DAHNEKE, B., “Influence of flattening on adhesion of particles”. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 40, n.1, p.1, 1972.
- DERJAGUIN, B.V, “Investigations on the friction and adhesion”, *Colloid-Z*, v. 69, p. 155 - 164, 1934.
- DERJAGUIN, B. V., MULLER V.M., TOPOROV Y.P., “Effect of contact deformations on the adhesion of particles”. *Journal of Colloid Interface Science*, v. 53, p. 314 -324, 1975.
- DONALD, D. K., J., “Electrostatic Contribution to Powder-Particle Adhesion”, *Appl. Phys.*, v.40, p. 3013, 1969.
- DONALD, D. K., “ Contribution of Charge to Powder Particle Adhesion”, *J. Adhesion*, v. 4, p. 233, 1972.

- ELEY, D.D. and TABOR, D., "In: Adhesion", D.D. ELEY, ed., Oxford University Press, London, p. 1 - 18, 1961.
- ENDO, Y., CHEN, D.R., PUI, D.Y.H., "Air and water permeation resistance across dust cakes on filters – effects of particle polydispersity and shape factor". *Powder Technology*, v. 118, p. 24 - 31, 2001.
- FARSHCHI-TABRIZI, M., KAPPL, M., CHENG, Y., GUTMANN, J. and BUTT, H. J., "On the adhesion between fine particles and nanocontacts: an atomic force microscope study". *Max-Planck-Institute for Polymer Research*, v. 22, p. 2171 - 2184, 2006.
- FELICETTI, M. A., "Determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície aplicando a Técnica Centrífuga". São Carlos, UFSCar, 2004^a, (Dissertação de Mestrado).
- FELICETTI, M. A., PIANTINO, F., AGUIAR, M. L., "Influência de tempo de remoção e do tamanho das partículas sobre a força de adesão partícula substrato". Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Publicado: Uberlândia, UFU, ENEMP 2004b.
- FISHER, L.R. and ISRAELACHVILI, J.N., "Direct measurements of the effect of meniscus forces on adhesion: a study of the applicability of macroscopic thermodynamics to microscopic surfaces". *Colloids Surf.*, v.3, p.303 - 319, 1981.
- FU, R. K. Y.; MEI, Y. F.; WAN, G.J.; SIU, G. G.; CHU, P. K.; HUANG, Y. X.; TIAN, X. B.; YANG, S. Q.; CHEN, J. Y., "Surface composition and surface energy of Teflon treated by metal plasma immersion ion implantation". *Surf. Sci.*, v.573, p.426, 2004.
- FULLER, K. N. G. and TABOR, D., "The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids". *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, v.345, p. 327 - 342, 1975.
- GADY, B., REIFENBERGER, R., RIMAI, D. S., L. P. DeMejo, "Contact Electrification and the Interaction Force between a Micrometer-Size Polystyrene Sphere and a Graphite Surface", *Langmuir*, v.13, n.9, p. 2533 - 2537, 1997.

- GADY, B., REIFENBERGER, R., RIMAI, D. S., J., “Contact electrification studies using atomic force microscope techniques”, *Appl. Phys.*, v. 84, p. 319, 1998a.
- GADY, B., SCHLEEF, D., REIFENBERGER, R., RIMAI, D. S., “The Interaction between Micrometer-size Particles and Flat Substrates: A Quantitative Study of Jump-to-Contact”, *J. Adhesion*, v. 67, p. 291, 1998b.
- GOOD, R.J., “Definition of adhesion”. *Journal of Adhesion*, v.8, n.1, p. 1 - 9, 1976.
- GÜLEÇ, H. A.; SARIOĞLU, K.; MUTLU, M., “Modification of food contacting surfaces by plasma polymerisation technique. Part I: Determination of hydrophilicity, hydrophobicity and surface free energy by contact angle method”. *J. Food Eng.*, v.75, p.187, 2006.
- HINDS, W., C., “Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles”. A Wiley-Interscience publication. Second edition, p. 141 - 144, 1998.
- ISRAELACHVILI, J., “Intermolecular and Surface Forces”. Second edition, Academic Press, New York, p. 161 - 164, 1992.
- ITO, L. X., Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases, São Carlos, UFSCar, 2002, (Dissertação de Mestrado).
- JOHN, D. F. St., MONTGOMERY, D. J., “Adhesion of Small Metal Spheres to Plane Metal Substrates”, *J. Appl. Phys.*, v. 42, p. 663, 1971.
- JOHNSON, K.L., KENDAL, L K. AND ROBERTSA.D. “Surface energy and the contact of elastic solids”. *Proc. R. Soc. A*, v.324, p. 301 - 313, 1971.
- KEMBALL, C., In: Adhesion and Adhesives, “Fundamentals and Practice”. Rutzler J.E., and Savage R.S. eds., Wiley, New York, p. 69 - 71, 1954.
- KENDALL, K, “Adhesion: molecules and mechanics”. *Science*, v. 263, p. 1720 - 1725, 1994.

- KENDALL, K., ALFORD, M. & BIRCHALL, J.D.; “The strength of green bodies”. *Br Ceram. Proc*, v.37, p. 255 - 265, 1986.
- KENDALL, K., HOWARD, A. J., BIRCHALL, J. D.; “The relation between porosity”, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* v. 310, p. 139 - 153, 1983.
- KENDALL, K., STAINTON, C., “Adhesion and aggregation of fine particles”. *Powder Technology*, v. 121, p. 223 - 229, 2001.
- KETKAR, A. B. and KELLER, D.V., “Adhesion of micron-sized limestone particles to a massive coal substrate”. *Journal of Adhesion*.v.7, p. 235 - 251, 1975.
- KORDECKI, M.C. and ORR, C., “Adhesion of solid particles to solid-surfaces”. *Archives of environmental health*, v.1, p. 1 - 9, 1960.
- KRISHNAN, S., BUSNAINA, A. A., RIMAI, D. S. and Demejo, D. P., “The Adhesion-induced Deformation and the Removal of Submicrometer Particles”. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 8, nº. 11, p. 1357- 1370, 1994.
- KRUPP, H., “Particle adhesion theory and experiment”, *Adv. Coll. Interface Science*, v.1, n.2, p. 111 - 239, 1967.
- KULVANICH, P., and STEWART, PLJL, “Fundamental considerations in the measurement of adhesional forces between particles using the centrifuge method”, *J. Pharm. Pharmacol.*, v. 40, p. 111, 1987.
- KULVANICH, P., and STEWART, PLJL, “Influence of relative humidity on the adhesive properties of a model interactive system”, *J. Pharm. Pharmacol.*, v. 40, p. 453 - 458, 1988.
- LAM, K.K., NEWTON, J.M., “Investigation of applied compression on the adhesion of powders to a substrate surface”. *Powder Technology*, v. 65, p. 167 - 175, 1991.

- LAM, K.K., NEWTON, J.M., "Influence of particle size on the adhesion behaviour of powders, after application of an initial press-on force". *Powder Technology*, v.73, p.117 - 125, 1992.
- LAM, K.K., NEWTON, J.M., "The influence of the time of application of contact pressure on particle adhesion to a substrate surface". *Powder Technology*, v.76, p.149 - 154, 1993.
- LEE, M. H., JAFFE, A. B., and MITTAL, in: Particles on Surfaces 1: Detection, Adhesion, and Removal, K. L. (ed), *Particles on Surfaces I*, Plenum Press, New York, p. 169 - 178, 1988.
- LI, Q., RUDOLPH, V., and PEUKERT, W., "London-van der Waals adhesiveness of rough particles". *Powder Technology*, v. 161, p. 248 - 255, 2006.
- LI, W., PERZL M., HEYDER, J., LANGER, R., BRAIN J. D., ENGLMEIER, K.H., NIVEN, R.W., EDWARDS, D. A., "Aerodynamics and aerosol particle deggregation phenomena in model oral-pharyngeal cavities". *Journal of Aerosol Science*, v. 27, n. 8, p. 1269 - 1286, 1996.
- LODGE, K. B., "Techniques for the measurement of forces between solids", *Adv. Colloid Interface Sci.*, v. 19, p. 27, 1983.
- LYMAN, D. J.; MUIR, W. M.; LEE, I. J., "The effect of chemical structure and surface properties of polymers on the coagulation of blood. I. Surface free energy effects.", *Trans. Amer. Soc. Artif. Int. Organs*, v. 11, p.301, 1965.
- MASTRANGELO, C. J., *Photogr. Sci. Eng.*, v. 26, p. 195, 1982.
- MAUGIS, D., "On the contact and adhesion of rough surfaces". *J. Adhesion Sci. And Tech.*, v.10, p. 161 - 175, 1996.
- MICHALSKI, M-C.; HARDY, J.; SARAMAGO, B. J. V. "On the Surface Free Energy of PVC/EVA Polymer Blends: Comparison of Different Calculation Methods". *J. Colloid Interface Sci.* v.208, p. 319, 1998.

- MITTAL, K.L., “Role of Interface in adhesion phenomena”. *Polymer Engineering Science*, v.17, n.7, p. 467 - 473, 1977.
- MIZES, H., OTT, M., EKLUND, E., HAYS, D., “Small particle adhesion: measurement and control”. *Colloids and Surfaces A* v.165, p. 11 - 23, 2000.
- MORRA, M., “Some Reflection on the Evaluation of the Lewis Acid–Base Properties of Polymer Surfaces by Wetting Measurements”. *J. Colloid Interface Sci.* v.182, p. 312, 1996.
- MULLER, V.M., YUSHCHENKO V.S., DERJAGUIN B.V., “On 2 methods of calculation the force of sticking of an elastic sphere to a rigid plane”. *Colloids and Surfaces*, v.7, n.3, p. 251 - 259, 1983.
- NEWITT, D.M., & CONWAY-JONES, J.M., *Trans. Inst. Chem. Eng.* v. 36, p. 442, 1958.
- O’BRIEN, W.J. and HERMANN, J.J., “Strength of liquid bridges between dissimilar materials”. *Journal of Adhesion*, v. 5, p. 91 - 103, 1973.
- OLÁH, A. and VANCISO, G. J., “Characterization of adhesion at solid surfaces: Development of an adhesion-testing device”. *European Polymer Journal*, v.41, n.12, p. 2803 – 2823, 2005.
- OTSUKA, A., IIDA, K., DANJO, K. and SUNADA, H.; “Measurement of the Adhesive Force between Particles of Powdered Organic Substances and a Glass Substrate by Means of the Impact Separation Method, I, Ef fect of Temperature”, *Chem. Pharm. Bull.*, 31, p. 4483, 1983.
- OTSUKA, A., IIDA, K., DANJO, K. and SUNADA, H.; “Measurement of the Adhesive Force between Particles of Powdered Materials and a Glass Substrate by Means of the Impact Separation Method, III, Ef fect of Particle Shape and Surface Asperity”, *Chem. Pharm. Bull.*, 36, p. 741, 1988.
- OTT, M. L., MIZES, H. A., *Colloids Surf. A*87, 245, (1994).

- PODCZECK, F., NEWTON, J.M., JAMES, M.B., “Assessment of adhesion and autoadhesion forces between particles and surfaces: Part I. The investigation of autoadhesion phenomena of salmeterol xinafoate and lactose monohydrate particles using compacted powder surfaces”. *Journal of Adhesion Science and Technology* v. 8, n 12, p. 1459 - 1472, 1994.
- PODCZECK, F., NEWTON, J.M., “Development of an ultracentrifuge technique to determine the adhesion and friction properties between particles and surfaces”. *J. Pharmaceutical sciences*, v.84, n.9, p. 1067 - 1071, 1995.
- PODCZECK, F., NEWTON, J.M., JAMES, M.B., “Assessment of adhesion and autoadhesion forces between particles and surfaces: Part II. The investigation of adhesion phenomena of salmeterol xinafoate and lactose monohydrate particles in particle-on-particle and particle-on-surface contact”. *Journal of Adhesion Science and Technology* v. 9, n 4, p. 475 - 486, 1995.
- PODCZECK, F., NEWTON, J.M., JAMES, M.B., “The influence of constant and changing relative humidity of the air on the autoadhesion force between pharmaceutical powder particles”. *International Journal of Pharm.*, v. 145, p. 221 - 229, 1996a.
- PODCZECK, F., NEWTON, J.M., JAMES, M.B., “The estimation of the true area of contact between microscopic particles and a flat surface in adhesion contact”. *J. Appl. Phys.*, v. 79, p. 1458 - 1463, 1996b.
- PODCZECK, F., “Investigations into the reduction of powder adhesion to stainless steel surfaces by surface modification to aid capsule filling”. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 178, p. 93 - 100, 1999.
- RENNIE, P.R., CHEN, X.D., MACKERETH, A.R., “Adhesion characteristics of whole milk powder to a stainless steel surface”. *Powder Technology*, v.97, p. 191 - 199, 1998.
- RIMAI, D. S. and BUSNAINA, A. A., “The Adhesion and Removal of Particles from Surfaces”. *Journal of Particulate Science and Technology*, v. 13, p. 249 – 270, 1995.

- RIMAI, D.S., QUESNEL, D.J., BUSNAINA, A.A., “The adhesion of dry particles in the nanometer to micrometer-size range”. *Colloids and Surfaces*, v. 165, p. 3 – 10, 2000.
- RUMPF, H. “The strength of granules and agglomerates”. In: *Agglomeration* (ed. W.A. Knepper). Proceedings of First International Symposium on Agglomeration, Philadelphia, Pa., John Wiley and Sons, N.Y. USA and London, UK., p. 379 -418, 1962.
- RUMPF, H., “Particle Adhesion”. In: Sastra, K.V.S. (Ed.) *agglomeration 77*, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, p. 97 - 129, 1977.
- SALAZAR-BANDA, G. R.; FELICETTI, M. A.; GONÇALVES, J. A. S.; COURY, J. R.; AGUIAR, M. L. “Determination of the adhesion force between particles and a flat surface, using the centrifuge technique”. *Powder Technol.* v.173, p.107-117, 2007.
- SALOMON, G., “Adhesion and adhesives”. Houwink R. and Salomon G. eds., Elsevier, New York, vol. 1, Second edition, p. 1 - 140, 1965.
- SCHAEFER, D. M., CARPENTER, M., GADY, B., REIFENBERGER, R., DEMEJO, L. P., RIMAI, D. S., in: RIMAI, D. S., DEMEJO, L. P., MITTAL, K. L. (Eds), *Fundamentals of Adhesion and Interfaces*, VSP, Utrecht, The Netherlands, p. 35 - 48, 1995.
- SCHUBERT, H, “Principles of Agglomeration”. *Int. Chem. Eng.*, v.21, n.3, p. 363 - 371, 1981.
- SHIMADA, Y., YONEZAWA, Y., SUNADA, H., NONAKA, R., KATOU, K. and MORISHITA, H., “Development of an apparatus for measuring adhesive force between fine particles”. *KONA*, n. 20, p. 223 - 230, 2002.
- SIEGEL, S., HANUS, E.J. and CARR, J.W., “Polytetrafluorethylene types tabled punches”. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, v.52, n.6, p. 604, 1963.

- SILVA, C.R.N., NEGRINI, V.S., AGUIAR, M. L. & COURRY, J. R. "Influence of gas velocity on cake formation and detachment". *Powder Technology* v.101, p. 165 -172, 1999.
- STANFORTH, J. N., REES, J. E., LAI, F. K., and HERSEY, J. A.; "Determination of interparticulate forces in ordered powder mixes", *J. Pharm. Pharmacol.*, 33, p. 485 - 490, 1981.
- STEWART, P.J. "Particle interaction in pharmaceutical systems". *Pharm. Int.*, v.7, p. 146 - 149, 1986.
- TAKEUCHI, M., "Adhesion forces of charged particles". *Chemical Engineering Science*, v.61, n.7, p. 2279 – 2289, 2006.
- VAN OSS, C.J., GOOD, R.J. and BUSSCHER, H.J. "Estimation of the polar surface-tension parameters of glycerol and formamide, for use in contact-angle measurements on polar solids". *J. Dispersion Sci. Technol.*, v.11, p.75 - 81, 1990.
- VAN OSS, C.J., GIESE, R.F., MURPHY, K., NORRIS, J., CHAUDHURY, M.K. and GOOD, R.J. "Determination of contact angles and pore sizes of porous-media by column and thin-layer wicking". *J. Adhes. Sci. Technol.*, v.6, p.413 - 428, 1992.
- VISSER, J., "Particle adhesion and removal: a review", *Particulate science and technology*, v.13, p. 169 - 196, 1995.
- WEINER J. J., KOKOSINSKI J., COOK M. R. and GRUNZE M., em MITTAL K. L. (ed), *Particles and Surfaces I*, Plenum Press, New York, p. 69, 1988.
- WU, S., "Phase-structure and adhesion in polymer blends - a criterion for rubber toughening". *Polymer*, v.26, n.12, p. 1855 - 1863, 1985.
- WU, S., *Polymer Interface and Adhesion*; Dekker, New York, 1982.

XIE, H.Y., “The role of Interparticle forces in the fluidization of fine particles”. *Powder Technology*, v.94, p. 99 - 108, 1997.

YAMAMOTO, H.; OHARA, S.; TANISHO, H.; OHKAWA, K.; NISHIDA, A., “Work of adhesion of synthetic polypeptides containing L-Lysine”., *J. Colloid Interface Sci.*, v.156, p.515, 1993.

YU, A. B., FENG, C. L., ZOU, R. P., YANG, R. Y., “On the relationship between porosity and interparticle forces”. *Powder Technology*, v.130, p. 70 - 76, 2003.

ZIMON A.D., “The adhesion of dust and powders”, *Adhesion of Dust and Powders*, Consultants Bureau, New York, p.109 -125, 1982.

Apêndice A

Teste de validação da Técnica Centrífuga

Para validação e comprovação da técnica centrífuga realizou-se um teste com a partícula de concentrado fosfático e a superfície de aço inoxidável. O teste constituiu de um experimento com a microcentrífuga, seguindo a metodologia descrita no Capítulo Materiais e Métodos, aplicando a velocidade angular de compressão de 2000 rpm sobre as partículas do material pulverulento, concentrado fosfático, sobre o substrato construído de aço inoxidável. Após a aplicação da velocidade angular de desprendimento de 2000 rpm foram aplicadas sucessivamente outras seis velocidade angulares de desprendimento de mesma magnitude, como forma de verificar a autenticidade da técnica e observar se as medidas não tivessem algum tipo de vício. Os resultados apresentados na Figura A.1 e na Tabela A.1, demonstraram que não houve alteração no número de partículas sobre os substratos após sucessivas aplicações de velocidades angulares de desprendimento, validando, desta maneira, a técnica centrífuga.

Compressão – Press-on: 2000 rpm

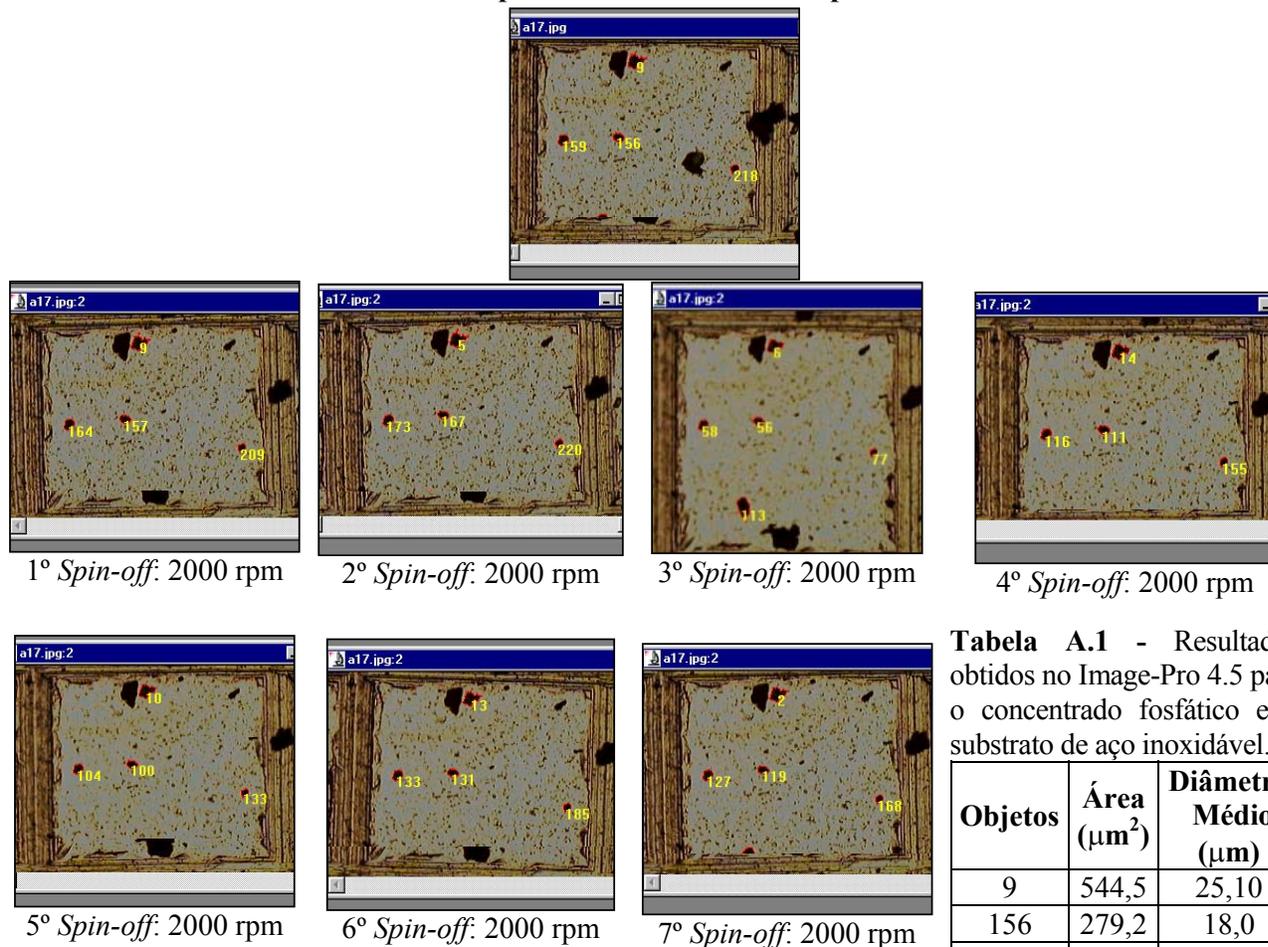


Tabela A.1 - Resultados obtidos no Image-Pro 4.5 para o concentrado fosfático e o substrato de aço inoxidável.

Objetos	Área (µm ²)	Diâmetro Médio (µm)
9	544,5	25,10
156	279,2	18,0
159	310,6	18,9
218	190,4	14,7
320	746,1	31,7

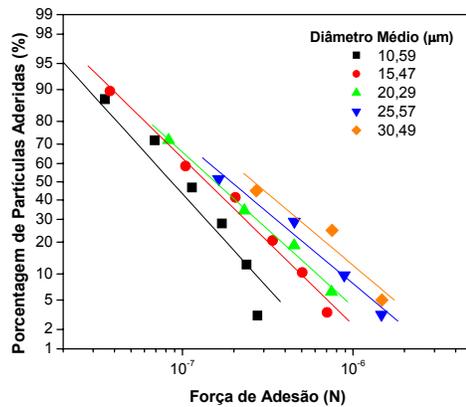
Figura A.1 – Teste realizado com a microcentrífuga para verificar a autenticidade da técnica:

Press-on de 2000 rpm e sete spin-off de 2000 rpm.

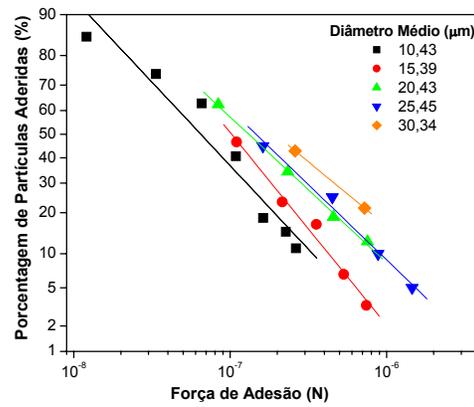
Apêndice B

Gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro, em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro de partículas investigadas e resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos.

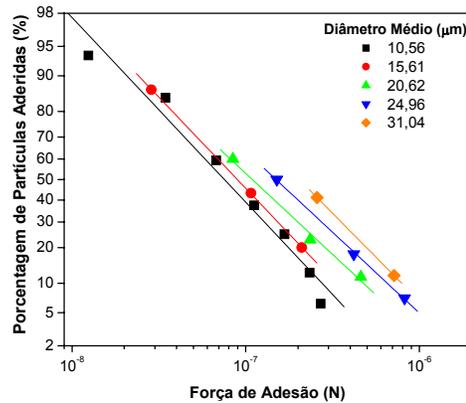
A Figura B.1 apresenta gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon® e de vidro, em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro das partículas de concentrado fosfático estudadas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000 rpm.



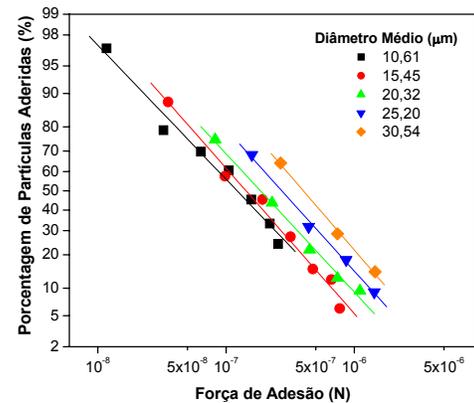
(a) Aço inoxidável



(b) PVC



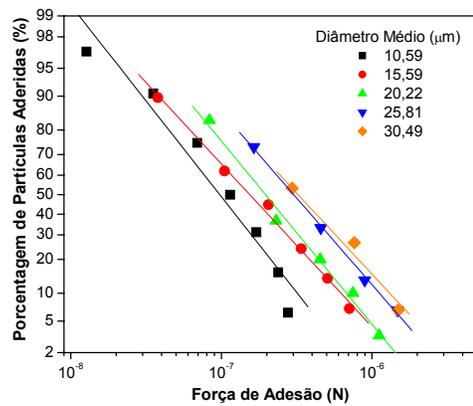
(c) Teflon®



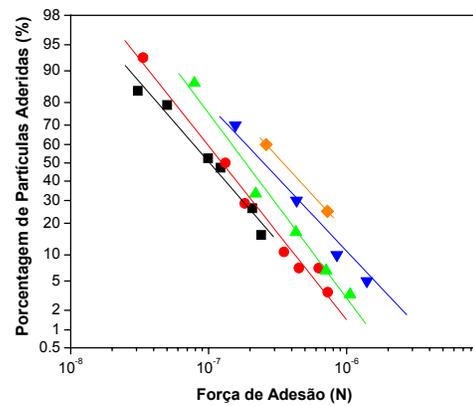
(d) Vidro

Figura B.1 - Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos quatro substratos, em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000 rpm.

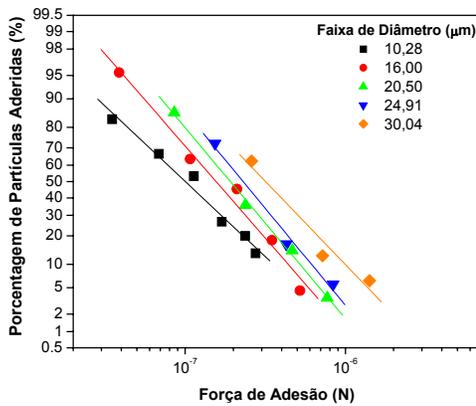
A Figura B.2 apresenta gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon® e de vidro, em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro das partículas de concentrado fosfático estudadas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 5000 rpm.



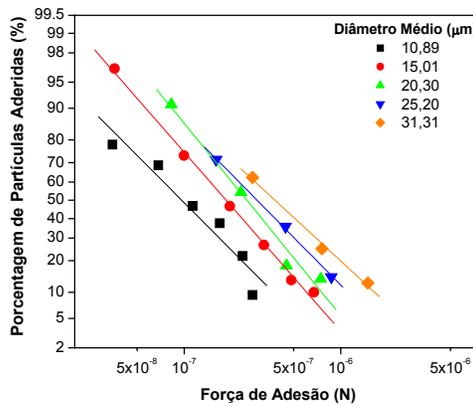
(a) aço inoxidável



(b) PVC



(c) Teflon®



(d) Vidro

Figura B.2 - Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos quatro substratos, em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 5000 rpm.

A Figura B.3 apresenta gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon® e de vidro, em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro das partículas de concentrado fosfático estudadas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 10000 rpm.

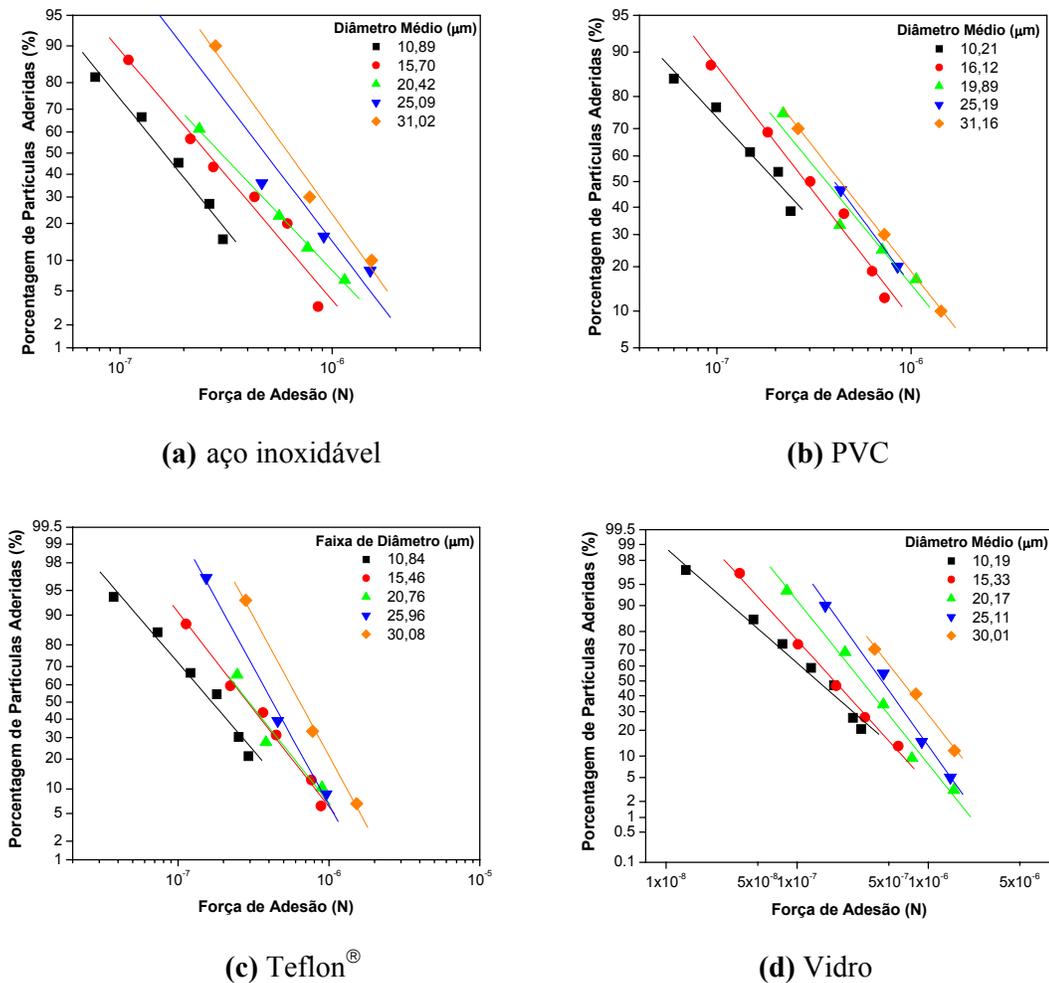


Figura B.3 - Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície dos quatro substratos, em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 10000 rpm.

A Tabela B.1 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos, obtidos pela Equação (57), para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de PVC.

Tabela B.1 – Resultados da Mediana Geométrica da Força de Adesão e Desvio Padrão Geométrico para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de PVC.

Força <i>press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico σ_g
2000 rpm	10,43	0,74	0,32
	15,39	1,07	0,34
	20,43	1,31	0,23
	25,45	1,60	0,26
	30,34	2,03	0,20
5000 rpm	10,74	1,00	0,33
	15,88	1,54	0,50
	20,81	1,90	0,42
	25,51	2,49	0,32
	29,86	3,23	0,31
10000 rpm	10,21	1,60	0,26
	16,12	2,75	0,38
	19,89	2,99	0,31
	25,19	3,99	0,40
	31,16	5,40	0,49

A Tabela B.2 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos, obtidos pela Equação (57), para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de Teflon®.

Tabela B.2 – Resultados da Mediana Geométrica da Força de Adesão e Desvio Padrão Geométrico para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de Teflon®.

Força <i>press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico σ_g
2000 rpm	10,56	0,64	0,31
	15,61	0,97	0,42
	20,62	1,09	0,32
	24,96	1,50	0,32
	31,04	1,93	0,33
5000 rpm	10,28	0,98	0,36
	16,00	1,14	0,33
	20,50	1,83	0,44
	24,91	2,29	0,46
	30,04	3,14	0,41
10000 rpm	10,84	1,42	0,35
	15,46	1,84	0,29
	20,76	2,82	0,43
	25,96	3,95	0,58
	30,08	4,31	0,38

A Tabela B.3 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos, obtidos pela Equação (57), para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de vidro.

Tabela B.3 – Resultados da Mediana Geométrica da Força de Adesão e Desvio Padrão Geométrico para o concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 2000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de vidro.

Força <i>press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico σ_g
2000 rpm	10,61	0,96	0,22
	15,45	1,74	0,37
	20,32	2,29	0,35
	25,20	2,93	0,32
	30,54	4,02	0,31
5000 rpm	10,89	1,22	0,44
	15,01	1,82	0,39
	20,30	2,50	0,43
	25,20	3,77	0,46
	31,31	4,76	0,40
10000 rpm	10,19	1,72	0,39
	15,33	2,93	0,65
	20,17	3,64	0,55
	25,11	4,80	0,52
	30,01	6,40	0,44

Apêndice C

Gráficos de porcentagem de partículas de polvilho doce aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável e de vidro, em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro de partículas investigadas e resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos.

A Figura C.1 apresenta gráficos de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável e de vidro em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro das partículas de polvilho doce estudadas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.

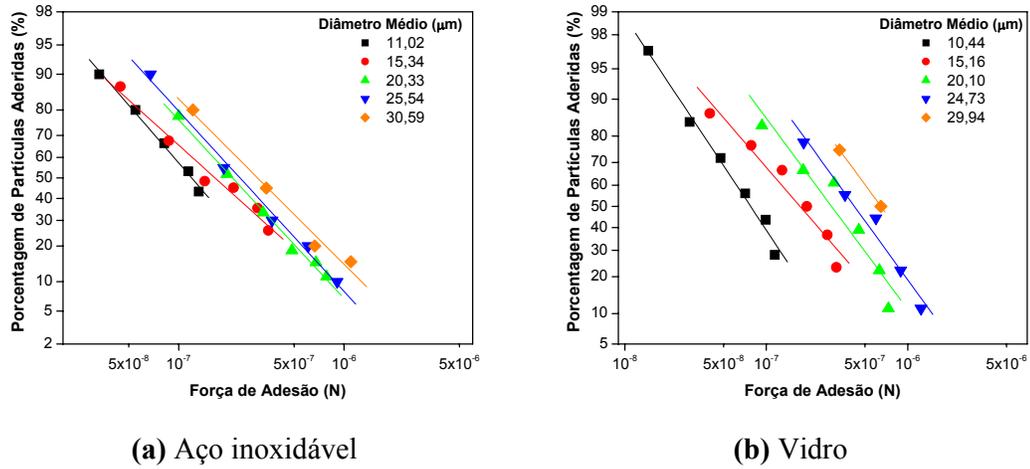


Figura C.1 - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos, construídos em: (a) aço inoxidável e (b) vidro, em função da força de adesão, para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.

A Figura C.2 apresenta gráficos de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável e de vidro em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro das partículas de polvilho doce estudadas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 5000 rpm.

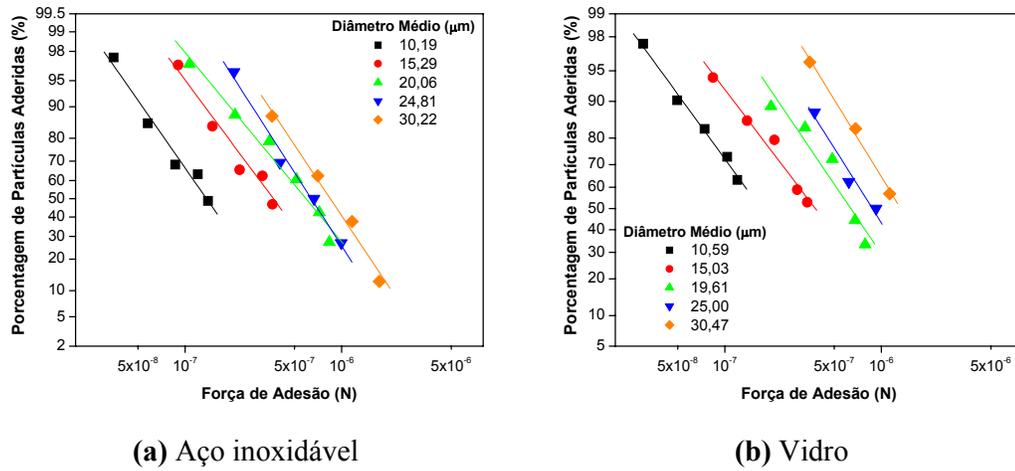


Figura C.2 - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos, construídos em: (a) aço inoxidável e (b) vidro, em função da força de adesão, para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 5000 rpm.

A Figura C.3 apresenta gráficos de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos de aço inoxidável e de vidro em função da força de adesão, para as cinco faixas de diâmetro das partículas de polvilho doce estudadas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 10000 rpm.

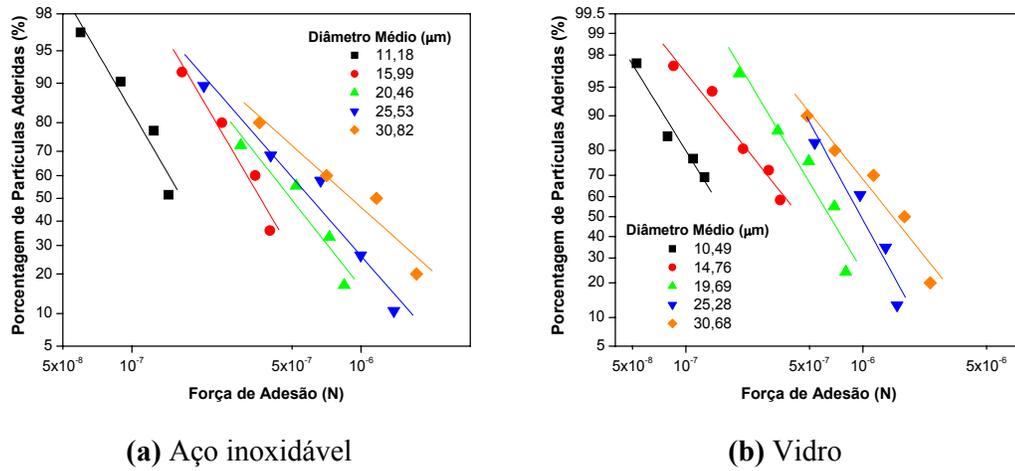


Figura C.3 - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos substratos, construídos em: (a) aço inoxidável e (b) vidro, em função da força de adesão, para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

A Tabela C.1 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos, obtidos pela Equação (57), para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 1000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável.

Tabela C.1 – Resultados da mediana geométrica da força de adesão e desvio padrão geométrico para o polvilho doce após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 5000 e 10000 rpm, utilizando o substrato construído de aço inoxidável.

Força <i>press-on</i> (rpm)	Diâmetro médio (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão ($\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico σ_g
1000 rpm	11,02	0,77	0,24
	15,34	1,66	0,29
	20,33	2,12	0,36
	25,54	2,36	0,36
	30,59	3,01	0,33
5000 rpm	11,19	1,45	0,51
	15,29	3,62	0,46
	20,06	5,25	0,45
	24,81	6,06	0,45
	30,22	8,40	0,49
10000 rpm	11,18	1,67	0,61
	15,99	3,66	0,59
	20,46	5,91	0,62
	25,53	6,20	0,47
	30,82	9,07	0,37

Apêndice D

Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) e resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o concentrado fosfático e os substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon[®] e de vidro, para todas as faixas de diâmetros investigadas.

Tabela D.1 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	65,359	8,890	4,445	387,342
	65,359	8,566	4,283	373,256
	131,680	12,147	6,074	1066,351
	69,204	8,591	4,296	396,365
	75,932	8,547	4,273	432,658
	79,777	8,669	4,334	461,041
	102,845	10,944	5,472	750,350
	73,049	9,101	4,550	443,188
	81,699	10,318	5,159	561,965
	92,272	11,033	5,517	678,711
	102,845	9,894	4,947	678,380
	152,826	12,751	6,376	1299,135
	148,981	12,646	6,323	1255,976
	74,010	9,446	4,723	466,055
	105,729	10,841	5,421	764,166
	122,068	12,573	6,287	1023,179
	76,894	10,764	5,382	551,798
	96,117	10,417	5,208	667,484
	127,835	12,866	6,433	1096,471
	87,466	9,735	4,867	567,644
	108,612	11,344	5,672	821,403
	84,583	10,320	5,160	581,915
	83,622	10,408	5,204	580,199
	67,282	8,872	4,436	397,941
	71,126	8,723	4,361	413,604
	70,165	8,085	4,042	378,174
	88,428	10,007	5,003	589,913
	130,719	12,582	6,291	1096,460
	91,311	11,129	5,565	677,489
	79,777	9,942	4,971	528,737
	76,894	9,036	4,518	463,204
	91,311	10,062	5,031	612,515
	67,282	8,003	4,001	358,954
	98,039	11,523	5,761	753,111
	70,165	9,252	4,626	432,800
	67,282	8,564	4,282	384,153
Somatória	3278,55	366,59	183,29	22992,09
Média	91,07	10,18	5,09	638,67

Tabela D.2 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	8	8	7	7	5	2	1	1	1
	10	10	9	4	4	1	1	1	0
	9	9	9	8	5	1	1	0	0
	4	4	4	3	2	2	1	0	0
	5	5	3	2	0	0	0	0	0
Somatória	36	36	32	24	16	6	4	2	1
Porcentagem	100	100	88,89	66,67	44,44	16,67	11,11	5,56	2,78

Tabela D.3 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
162,438	14,170	7,085	1534,478
214,341	15,672	7,836	2239,467
170,127	14,125	7,063	1602,070
195,117	16,606	8,303	2160,037
187,428	14,670	7,335	1833,028
170,127	14,038	7,019	1592,160
154,748	16,256	8,128	1677,100
181,661	14,404	7,202	1744,389
206,651	15,532	7,766	2139,821
163,399	13,689	6,844	1491,156
289,312	17,701	8,850	3414,025
234,525	16,288	8,144	2546,585
172,049	13,830	6,915	1586,281
222,030	15,971	7,986	2364,044
240,292	17,240	8,620	2761,835
141,292	13,737	6,868	1293,921
162,438	13,679	6,839	1481,277
166,282	13,701	6,850	1518,807
188,389	15,225	7,613	1912,211
158,593	13,590	6,795	1436,894
156,671	13,252	6,626	1384,158
162,438	13,655	6,828	1478,734

	173,972	14,032	7,016	1627,456
	173,010	15,445	7,723	1781,456
	253,749	17,853	8,926	3020,079
	207,612	15,494	7,747	2144,475
	198,962	15,185	7,592	2014,147
	240,292	16,758	8,379	2684,519
	210,496	15,266	7,633	2142,323
	221,069	15,910	7,955	2344,754
	197,040	14,779	7,389	1941,336
	152,826	13,643	6,821	1389,953
Somatória	6129,373	481,395	240,698	62282,977
Média	191,54	15,04	7,52	1946,34

Tabela D.4 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	6	6	4	3	1	0	0	0	0
	4	4	2	1	0	0	0	0	0
	7	7	5	3	1	0	0	0	0
	5	5	4	2	1	0	0	0	0
	10	10	8	3	2	1	1	0	0
Somatória	32	32	23	12	5	1	1	0	0
Porcentagem	100	100	71,88	37,50	15,63	3,13	3,13	0	0

Tabela D.5 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
429,642	22,661	11,331	6490,801
315,263	21,743	10,872	4569,867
343,137	20,690	10,345	4732,951
393,118	21,453	10,726	5622,317
299,885	18,443	9,221	3687,091
379,662	20,854	10,427	5278,316
347,943	19,840	9,920	4602,106
451,749	22,985	11,493	6922,342
313,341	19,692	9,846	4113,612
284,506	18,940	9,470	3592,390
335,448	20,174	10,087	4511,637

286,428	18,445	9,223	3522,206	
447,905	22,784	11,392	6803,319	
326,797	19,232	9,616	4190,066	
295,079	19,731	9,865	3881,444	
325,836	19,559	9,779	4248,682	
309,496	18,426	9,213	3801,954	
274,894	18,959	9,479	3474,394	
272,972	18,021	9,010	3279,454	
294,118	18,999	9,499	3725,276	
302,768	18,718	9,359	3778,151	
298,923	18,895	9,448	3765,489	
314,302	18,787	9,393	3936,493	
348,904	20,068	10,034	4667,901	
357,555	20,854	10,427	4970,925	
342,176	20,408	10,204	4655,357	
343,137	19,903	9,951	4552,899	
424,837	21,968	10,984	6221,994	
371,011	21,270	10,635	5260,983	
274,894	18,091	9,046	3315,410	
397,924	21,624	10,812	5736,405	
Somatória	10503,65	622,22	311,11	141912,23
Média	338,83	20,07	10,04	4577,81

Tabela D.6 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
4	4	1	1	1	0	0	0	0	
2	2	0	0	0	0	0	0	0	
2	2	1	1	1	0	0	0	0	
5	5	4	2	1	0	0	0	0	
2	2	2	1	0	0	0	0	0	
4	4	3	1	0	0	0	0	0	
5	5	3	1	0	0	0	0	0	
4	4	1	0	0	0	0	0	0	
3	2	0	0	0	0	0	0	0	
Somatória	31	30	15	7	3	0	0	0	0
Porcentagem	100	96,77	48,39	22,58	9,68	0	0	0	0

Tabela D.7 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	461,361	23,143	11,571	7118,141
	590,158	26,517	13,259	10432,814
	521,915	25,276	12,638	8794,447
	521,915	24,520	12,260	8531,552
	527,682	24,490	12,245	8615,170
	470,973	23,550	11,775	7394,357
	509,419	24,494	12,247	8318,379
	584,391	26,038	13,019	10144,190
	664,168	27,516	13,758	12183,628
	610,342	26,814	13,407	10910,407
	593,041	26,518	13,259	10484,348
	585,352	26,043	13,022	10162,900
	473,856	23,747	11,874	7501,791
	511,342	24,642	12,321	8400,203
	504,614	23,618	11,809	7945,352
	588,235	26,295	13,147	10311,601
	471,934	24,010	12,005	7554,064
	566,128	25,810	12,905	9741,203
	521,915	24,773	12,386	8619,465
	522,876	24,927	12,464	8689,167
	614,187	26,819	13,409	10981,082
	554,594	25,158	12,579	9301,493
	647,828	27,706	13,853	11965,665
	595,925	26,844	13,422	10664,599
	608,420	26,298	13,149	10666,918
	592,080	27,393	13,696	10812,555
	537,293	26,223	13,111	9392,801
	578,624	26,053	13,026	10049,902
	546,905	25,646	12,823	9350,768
	613,226	27,091	13,545	11075,201
Somatória	16690,70	767,97	383,98	286114,16
Média	556,36	25,60	12,80	9537,14

Tabela D.8 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
4	4	2	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
Somatória	30	27	4	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	90	13,33	3,33	0	0	0	0

Tabela D.9 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
692,042	29,367	14,683	13548,771
796,809	31,400	15,700	16679,776
721,838	29,750	14,875	14316,335
704,537	30,670	15,335	14405,444
894,848	32,457	16,228	19362,481
840,062	32,892	16,446	18420,590
905,421	32,394	16,197	19553,462
714,148	29,594	14,797	14089,630
754,517	29,932	14,966	15056,183
742,983	29,370	14,685	14547,571
879,469	32,169	16,084	18861,007
723,760	29,231	14,615	14103,953
823,722	31,364	15,682	17223,619
769,896	31,061	15,531	15942,723

	875,625	31,934	15,967	18641,183
	716,071	29,686	14,843	14171,578
	657,439	28,454	14,227	12471,303
Somatória	13213,19	521,72	260,86	271395,61
Média	777,25	30,69	15,34	15964,45

Tabela D.10 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Somatória	17	13	2	0	0	0	0	0	0
Porcentagem	100	76,47	11,76	0	0	0	0	0	0

Tabela D.11 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
126,874	11,225	5,613	949,450
98,039	10,108	5,054	660,635
90,350	10,170	5,085	612,546
113,418	11,599	5,799	876,999
103,806	10,695	5,347	740,138
82,661	9,841	4,921	542,316
121,107	11,994	5,997	968,335
119,185	11,249	5,625	893,816
148,020	12,397	6,199	1223,376
111,496	11,793	5,896	876,550

129,758	12,073	6,036	1044,341	
115,340	12,172	6,086	935,922	
87,466	9,751	4,875	568,573	
62,476	9,095	4,548	378,820	
77,855	9,735	4,868	505,281	
122,068	11,656	5,828	948,592	
115,340	10,727	5,364	824,864	
89,389	10,448	5,224	622,649	
93,233	10,406	5,203	646,820	
97,078	10,248	5,124	663,263	
110,534	11,253	5,627	829,244	
92,272	9,930	4,965	610,856	
61,515	8,216	4,108	336,946	
132,641	11,822	5,911	1045,348	
88,428	9,629	4,815	567,673	
94,195	10,798	5,399	678,095	
85,544	9,459	4,729	539,435	
129,758	11,831	5,916	1023,475	
96,117	10,331	5,166	661,993	
80,738	9,628	4,814	518,211	
70,165	8,527	4,264	398,868	
63,437	8,270	4,135	349,755	
136,486	12,065	6,033	1097,823	
117,263	10,762	5,381	841,285	
82,661	9,752	4,876	537,430	
93,233	10,177	5,089	632,585	
110,534	10,972	5,486	808,547	
104,767	10,563	5,282	737,794	
80,738	9,593	4,797	516,348	
144,175	12,695	6,347	1220,191	
Somatória	4080,16	423,66	211,83	29435,19
Média	102,00	10,59	5,30	735,88

Tabela D.12 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
10	10	10	5	5	4	3	2	1	
6	6	6	4	3	2	1	1	0	
6	6	6	4	1	0	0	0	0	
6	6	5	4	2	2	2	1	1	
12	12	11	8	6	5	3	2	1	
Somatória	40	40	38	25	17	13	9	6	3
Porcentagem	100	100,00	95,00	62,50	42,50	32,50	22,50	15,00	7,50

Tabela D.13 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	160,515	13,440	6,720	1438,251
	209,535	15,291	7,645	2135,995
	163,399	13,314	6,657	1450,311
	245,098	16,574	8,287	2708,187
	191,273	14,905	7,453	1900,643
	209,535	16,169	8,084	2258,621
	167,243	13,533	6,767	1508,870
	282,584	17,798	8,899	3352,891
	248,943	17,485	8,743	2901,884
	221,069	16,476	8,238	2428,218
	183,583	14,495	7,247	1773,968
	238,370	16,601	8,300	2638,100
	229,719	16,388	8,194	2509,686
	211,457	15,491	7,746	2183,797
	184,544	14,492	7,246	1783,000
	199,923	14,821	7,410	1975,323
	180,700	14,181	7,091	1708,338
	159,554	13,446	6,723	1430,283
	152,826	14,282	7,141	1455,152
	228,758	15,944	7,972	2431,563
	223,952	16,505	8,253	2464,261
	211,457	15,502	7,751	2185,295
	213,379	15,518	7,759	2207,505
	252,787	17,312	8,656	2917,534
	184,544	14,674	7,337	1805,348
	197,040	14,387	7,194	1889,922
	226,836	15,505	7,753	2344,747
	209,535	15,452	7,726	2158,468
	255,671	17,121	8,561	2918,262
	276,817	17,983	8,992	3318,741
	177,816	14,512	7,256	1720,349
Somatória	6498,46	479,60	239,80	67903,51
Média	209,63	15,47	7,74	2190,44

Tabela D.14 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	5	5	4	1	0	0	0	0	0
	6	6	4	1	0	0	0	0	0
	4	4	4	1	0	0	0	0	0
	7	7	5	0	0	0	0	0	0
	5	5	4	2	1	0	0	0	0
	4	4	3	0	0	0	0	0	0
Somatória	31	31	24	5	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	77,42	16,13	3,23	0	0	0	0

Tabela D.15 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
347,943	20,345	10,172	4719,215
356,594	19,546	9,773	4646,645
374,856	20,680	10,340	5167,929
384,467	20,865	10,432	5347,830
297,001	18,812	9,406	3724,700
391,196	21,032	10,516	5485,072
384,467	20,306	10,153	5204,679
417,147	21,410	10,705	5953,972
322,953	19,514	9,757	4201,357
285,467	18,866	9,433	3590,424
307,574	18,361	9,180	3764,860
322,953	19,762	9,881	4254,860
296,040	19,114	9,557	3772,245
395,040	21,797	10,899	5740,494
304,690	18,998	9,499	3858,994
394,079	21,417	10,709	5626,737
335,448	19,547	9,773	4371,332
397,924	21,791	10,896	5780,787
346,021	19,888	9,944	4587,677
306,613	18,510	9,255	3783,508
284,506	18,255	9,128	3462,490
359,477	20,376	10,188	4883,214
394,079	21,094	10,547	5541,825
327,759	19,359	9,680	4230,056

	386,390	21,950	10,975	5654,200
	389,273	22,729	11,365	5898,617
	478,662	22,973	11,486	7330,771
	303,729	18,694	9,347	3785,198
	324,875	20,725	10,362	4488,628
	434,448	22,394	11,197	6486,074
	312,380	20,047	10,023	4174,763
	343,137	20,037	10,018	4583,614
Somatória	11307,19	649,19	324,60	154102,77
Média	353,35	20,29	10,14	4815,71

Tabela D.16 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	2	1	0	0	0	0	0
	3	3	2	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	1	1	0	0	0	0
	3	3	2	0	0	0	0	0	0
	4	4	3	2	1	1	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	1	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	4	4	3	2	1	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	3	3	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	32	32	23	11	6	2	0	0	0
Porcentagem	100	100	71,875	34,38	18,75	6,25	0	0	0

Tabela D.17 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
555,556	26,475	13,238	9805,579
534,410	25,943	12,971	9242,636
520,953	24,856	12,428	8632,640
625,721	27,271	13,635	11375,825
623,799	27,033	13,517	11242,108
468,089	24,047	12,024	7504,186
539,216	24,938	12,469	8964,812
492,118	23,915	11,957	7845,873

548,827	25,194	12,597	9218,247	
575,740	25,947	12,974	9959,195	
627,643	27,365	13,683	11450,487	
654,556	27,996	13,998	12216,537	
616,109	27,504	13,752	11297,162	
573,818	25,862	12,931	9893,532	
475,779	23,320	11,660	7396,774	
630,527	27,429	13,715	11529,944	
532,487	25,303	12,651	8982,187	
591,119	26,533	13,267	10456,152	
560,361	26,190	13,095	9783,892	
637,255	27,392	13,696	11637,243	
526,720	25,329	12,664	8894,198	
535,371	24,959	12,479	8908,079	
509,419	24,373	12,186	8277,326	
533,449	25,138	12,569	8939,984	
513,264	24,382	12,191	8342,995	
496,924	24,198	12,099	8016,460	
519,992	23,586	11,793	8176,404	
574,779	25,718	12,859	9854,961	
470,973	23,679	11,839	7434,702	
485,390	24,630	12,315	7970,263	
581,507	26,117	13,058	10124,704	
Somatória	17131,87	792,62	396,31	293375,09
Média	552,64	25,57	12,78	9463,71

Tabela D.18 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	2	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	1	1	1	0	0	0
2	2	2	1	1	0	0	0	0

	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	31	31	16	9	3	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	51,61	29,03	9,68	3,23	0	0	0

Tabela D.19 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	682,430	28,433	14,216	12935,529
	716,071	30,840	15,420	14722,469
	806,421	32,681	16,340	17569,502
	794,887	32,171	16,085	17048,033
	684,352	28,409	14,205	12961,294
	668,012	30,478	15,239	13572,907
	671,857	29,396	14,698	13166,676
	777,586	31,114	15,557	16129,372
	684,352	30,885	15,442	14090,586
	809,304	31,000	15,500	16725,648
	767,974	30,331	15,166	15529,050
	724,721	30,457	15,228	14715,172
	726,644	29,099	14,549	14096,301
	779,508	29,900	14,950	15537,991
	856,401	32,075	16,038	18312,827
	787,197	32,908	16,454	17270,014
	701,653	29,988	14,994	14027,557
	822,760	30,703	15,351	16840,664
	668,973	28,153	14,076	12555,672
	762,207	30,850	15,425	15676,021
Somatória	14893,31	609,87	304,93	303483,29
Média	744,67	30,49	15,25	15174,16

Tabela D.20 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0

	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	4	4	3	2	1	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	1	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	20	20	9	5	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	45	25	5	0	0	0	0

Tabela D.21 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
112,457	11,593	5,797	869,155
99,962	10,533	5,266	701,920
97,078	9,950	4,975	643,977
105,729	10,334	5,167	728,419
101,884	10,696	5,348	726,502
81,699	9,264	4,632	504,588
88,428	9,967	4,983	587,571
120,146	12,915	6,457	1034,455
99,000	9,732	4,866	642,298
40,369	8,197	4,099	220,611
91,311	9,556	4,778	581,687
62,476	8,538	4,269	355,609
71,126	8,736	4,368	414,260
131,680	12,014	6,007	1054,635
99,962	10,800	5,400	719,751
65,359	8,004	4,002	348,768
99,962	11,820	5,910	787,670
123,991	11,664	5,832	964,130
83,622	11,511	5,755	641,692
141,292	12,959	6,480	1220,670
93,233	10,091	5,045	627,205
106,690	10,265	5,132	730,102
82,661	9,442	4,721	520,325
104,767	10,572	5,286	738,382
87,466	10,644	5,322	620,637
76,894	9,088	4,544	465,879
86,505	9,794	4,897	564,816
139,369	12,621	6,311	1172,675
100,923	10,424	5,212	701,325

	135,525	11,431	5,715	1032,778
	141,292	12,972	6,486	1221,936
	152,826	12,850	6,425	1309,163
Somatória	3225,68	338,98	169,49	23453,59
Média	100,80	10,59	5,30	732,92

Tabela D.22 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	3	3	2	1	1	0	0
	3	3	3	3	3	2	1	1	1
	2	2	2	2	1	1	1	0	0
	4	4	3	3	3	2	1	1	0
	4	4	4	4	3	2	1	0	0
	2	2	2	2	2	1	1	1	0
	2	2	2	2	2	1	1	0	0
	3	3	3	2	2	2	1	1	1
	3	3	3	3	2	1	1	1	0
	4	4	4	3	2	2	0	0	0
	2	2	2	2	2	1	1	0	0
Somatória	32	32	31	29	24	16	10	5	2
Porcentagem	100	100	96,875	90,63	75,00	50,00	31,25	15,625	6,25

Tabela D.23 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
173,010	14,345	7,173	1654,611
268,166	17,755	8,877	3174,186
256,632	17,087	8,544	2923,443
265,283	17,831	8,916	3153,573
152,826	13,422	6,711	1367,462
215,302	15,507	7,754	2225,837
230,681	16,042	8,021	2467,103
226,836	15,913	7,956	2406,393
168,205	13,717	6,859	1538,201
247,982	17,735	8,868	2932,030
168,205	13,974	6,987	1566,990
160,515	14,185	7,092	1517,911
241,253	16,850	8,425	2710,033

174,933	14,460	7,230	1686,306	
223,952	16,395	8,197	2447,767	
222,991	16,880	8,440	2509,418	
137,447	13,212	6,606	1210,600	
135,525	13,042	6,521	1178,333	
204,729	16,169	8,085	2206,897	
207,612	16,501	8,251	2283,940	
240,292	16,486	8,243	2641,007	
153,787	13,995	6,998	1434,866	
235,486	17,054	8,527	2677,387	
176,855	14,533	7,266	1713,489	
239,331	16,844	8,422	2687,590	
193,195	14,619	7,310	1882,896	
241,253	16,883	8,441	2715,347	
238,370	16,566	8,283	2632,572	
168,205	14,156	7,078	1587,432	
Somatória	5968,86	452,16	226,08	63133,62
Média	205,82	15,59	7,80	2177,02

Tabela D.24 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	3	2	1	1	0	0	0
	3	3	3	3	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	3	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	1	1	0	0
	6	6	5	4	3	1	1	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	2	2	2	1	1	1	0	0	0
Somatória	29	29	27	21	13	7	3	1	1
Porcentagem	100	100	93,10	72,41	44,83	24,14	10,34	3,45	3,45

Tabela D.25 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	393,118	21,260	10,630	5571,681
	258,554	18,487	9,243	3186,523
	425,798	22,050	11,025	6259,140
	449,827	22,512	11,256	6751,036
	326,797	19,222	9,611	4187,804
	391,196	21,116	10,558	5507,047
	411,380	21,871	10,935	5998,131
	366,205	20,564	10,282	5020,392
	366,205	20,687	10,344	5050,565
	371,972	20,493	10,246	5081,775
	313,341	18,749	9,374	3916,491
	401,769	21,694	10,847	5810,569
	299,885	18,739	9,370	3746,421
	289,312	18,227	9,114	3515,594
	284,506	18,027	9,013	3419,135
	412,341	21,778	10,889	5986,754
	347,943	19,698	9,849	4569,156
	404,652	22,366	11,183	6033,505
	331,603	19,592	9,796	4331,275
	377,739	20,598	10,299	5187,182
	314,302	19,476	9,738	4080,995
	446,943	22,987	11,493	6849,176
	366,205	20,638	10,319	5038,565
	333,526	19,031	9,515	4231,491
	357,555	20,382	10,191	4858,423
	322,953	19,776	9,888	4257,739
	308,535	18,967	9,484	3901,352
	390,235	21,277	10,638	5535,304
	275,855	18,019	9,009	3313,721
	292,195	18,363	9,182	3577,151
Somatória	10632,45	606,65	303,32	144774,09
Média	354,41	20,22	10,11	4825,80

Tabela D.26 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	3	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	3	3	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	1	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	2	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	2	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	3	3	3	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Somatória	30	30	25	11	6	3	1	0	0
Porcentagem	100	100	83,33	36,6667	20,00	10	3,33	0	0

Tabela D.27 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
533,449	24,602	12,301	8749,124
548,827	25,821	12,911	9447,549
462,322	23,015	11,508	7093,701
656,478	27,711	13,856	12127,789
647,828	27,728	13,864	11975,405
505,575	24,661	12,330	8311,967
475,779	23,505	11,752	7455,374
565,167	26,013	13,006	9800,990
645,905	26,806	13,403	11542,691
514,225	25,647	12,823	8792,097
470,012	25,227	12,614	7904,744
577,662	26,034	13,017	10026,021
600,730	26,516	13,258	10619,311
569,973	25,917	12,959	9848,172
666,090	27,946	13,973	12409,703

Somatória	8440,02	387,15	193,57	146104,64
Média	562,67	25,81	12,90	9740,31

Tabela D.28 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	15	15	11	5	2	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	73,33	33,33	13,33	6,67	0	0	0

Tabela D.29 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
845,828	32,275	16,137	18199,131	
804,498	30,314	15,157	16258,162	
771,819	31,584	15,792	16251,565	
674,740	28,244	14,122	12705,038	
730,488	29,265	14,632	14251,643	
913,110	32,965	16,483	20067,317	
762,207	30,114	15,057	15301,990	
815,071	31,144	15,572	16923,202	
654,556	28,047	14,023	12238,807	
759,323	29,932	14,966	15152,137	
657,439	29,231	14,616	12811,768	
794,887	32,161	16,081	17042,951	
734,333	30,125	15,063	14747,949	
760,284	30,202	15,101	15307,912	
867,935	31,756	15,878	18374,517	
Somatória	11546,52	457,36	228,68	235634,09
Média	769,77	30,49	15,25	15708,94

Tabela D.30 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	3	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	15	15	6	0	0	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	40	0	0	0	0	0	0

Tabela D.31 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
121,107	11,148	5,574	900,086
62,476	8,248	4,124	343,547
126,874	11,627	5,814	983,451
133,602	12,463	6,232	1110,072
107,651	10,390	5,195	745,677
85,544	9,526	4,763	543,268
141,292	12,694	6,347	1195,706
136,486	12,999	6,500	1182,809
138,408	12,087	6,044	1115,317
124,952	11,515	5,758	959,251
154,748	12,799	6,399	1320,388
73,049	9,303	4,652	453,072
67,282	8,983	4,491	402,913
140,331	12,545	6,273	1173,641
115,340	11,387	5,694	875,598
121,107	11,276	5,638	910,427
68,243	9,543	4,771	434,142
68,243	10,025	5,013	456,105
89,389	10,049	5,024	598,827
122,068	11,783	5,891	958,869

	142,253	12,839	6,419	1217,547
	62,476	8,087	4,043	336,811
	62,476	8,864	4,432	369,183
	136,486	12,214	6,107	1111,401
	124,952	11,248	5,624	936,995
	145,136	12,893	6,446	1247,494
	130,719	11,950	5,975	1041,438
	115,340	11,160	5,580	858,149
	110,534	10,833	5,417	798,285
	82,661	8,869	4,435	488,759
	108,612	10,781	5,390	780,599
	75,932	9,269	4,635	469,221
	83,622	9,972	4,986	555,911
Somatória	3579,39	359,37	179,69	26874,96
Média	108,47	10,89	5,45	814,39

Tabela D.32 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	4	4	4	4	3	3	2	1	0
	9	9	9	9	7	7	4	4	2
	6	6	6	6	5	5	5	4	3
	6	6	6	6	5	4	4	3	2
	4	4	4	4	3	3	1	1	1
	4	4	4	4	4	3	1	1	1
Somatória	33	33	33	33	27	25	17	14	9
Porcentagem	100	100	100	100	81,82	75,76	51,52	42,42	27,27

Tabela D.33 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
163,399	13,675	6,838	1489,698
157,632	13,630	6,815	1432,334
156,671	13,881	6,940	1449,826
286,428	17,594	8,797	3359,525
144,175	13,049	6,525	1254,236
227,797	16,453	8,227	2498,653
229,719	16,510	8,255	2528,465
158,593	13,067	6,533	1381,539
199,923	15,232	7,616	2030,195

173,972	13,682	6,841	1586,907	
224,913	15,077	7,539	2260,720	
187,428	15,072	7,536	1883,281	
236,448	17,109	8,554	2696,908	
254,710	17,840	8,920	3029,335	
191,273	15,075	7,538	1922,308	
223,952	16,187	8,094	2416,816	
162,438	13,405	6,702	1451,648	
252,787	16,789	8,395	2829,433	
256,632	16,906	8,453	2892,459	
243,176	16,248	8,124	2634,159	
248,943	17,073	8,537	2833,495	
232,603	16,997	8,498	2635,629	
205,690	15,161	7,580	2078,918	
287,389	17,439	8,720	3341,203	
192,234	14,855	7,427	1903,727	
189,350	14,472	7,236	1826,802	
204,729	16,352	8,176	2231,806	
263,360	17,693	8,846	3106,372	
236,448	16,873	8,436	2659,707	
260,477	17,522	8,761	3042,747	
Somatória	6453,29	470,92	235,46	68688,85
Média	215,11	15,70	7,85	2289,63

Tabela D.34 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	0	0	0	0	0	
7	7	7	7	6	4	3	2	0	
6	6	6	6	5	5	2	1	0	
3	3	3	2	2	1	1	1	0	
3	3	3	2	1	1	1	0	0	
5	5	5	3	1	1	1	1	0	
5	5	5	5	2	1	1	1	1	
Somatória	30	30	30	26	17	13	9	6	1
Porcentagem	100	100	100	86,67	56,67	43,33	30	20	3,33

Tabela D.35 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
338,331	20,532	10,266	4631,059
311,419	20,252	10,126	4204,483

368,128	20,561	10,280	5045,979	
441,176	22,795	11,398	6704,553	
300,846	19,310	9,655	3872,962	
455,594	22,902	11,451	6955,903	
379,662	21,126	10,563	5347,169	
393,118	21,450	10,725	5621,568	
417,147	21,613	10,806	6010,499	
390,235	21,493	10,746	5591,486	
405,613	21,600	10,800	5840,926	
406,574	21,276	10,638	5766,875	
395,040	21,084	10,542	5552,683	
401,769	20,764	10,382	5561,568	
368,128	20,958	10,479	5143,426	
303,729	18,934	9,467	3833,927	
295,079	18,566	9,283	3652,361	
329,681	19,563	9,782	4299,784	
292,195	19,070	9,535	3714,697	
396,002	21,537	10,769	5685,860	
330,642	19,358	9,679	4267,150	
371,011	20,424	10,212	5051,656	
308,535	18,805	9,403	3868,075	
429,642	22,632	11,316	6482,556	
291,234	18,091	9,045	3512,387	
307,574	18,799	9,400	3854,799	
433,487	22,482	11,241	6497,108	
333,526	19,480	9,740	4331,470	
359,477	20,302	10,151	4865,305	
312,380	18,972	9,486	3951,034	
283,545	18,331	9,166	3465,137	
Somatória	11150,52	633,06	316,53	153184,44
Média	359,69	20,42	10,21	4941,43

Tabela D.36 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
3	3	3	3	1	1	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0	0
3	3	3	2	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
6	6	6	5	1	0	0	0	0
4	4	4	3	1	0	0	0	0
3	3	3	0	0	0	0	0	0
3	3	3	1	0	0	0	0	0

	6	6	6	2	0	0	0	0	0
Somatória	31	31	31	19	3	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	100	61,29	9,68	3,23	0	0	0

Tabela D.37 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	625,721	27,235	13,617	11360,884
	486,351	23,995	11,998	7780,085
	499,808	24,396	12,198	8128,893
	590,158	26,229	13,114	10319,464
	472,895	23,251	11,625	7330,033
	594,963	26,380	13,190	10463,244
	550,750	25,123	12,562	9224,334
	477,701	24,317	12,158	7744,054
	456,555	23,029	11,515	7009,434
	497,885	23,964	11,982	7954,140
	624,760	27,457	13,729	11436,088
	471,934	23,509	11,755	7396,497
	557,478	25,171	12,585	9354,786
	653,595	27,780	13,890	12104,379
	471,934	23,030	11,515	7245,816
	521,915	24,469	12,234	8513,710
	583,429	25,507	12,753	9920,858
	572,857	26,023	13,011	9938,165
	500,769	24,168	12,084	8068,331
	461,361	23,357	11,678	7183,932
	488,274	23,544	11,772	7664,052
	590,158	26,188	13,094	10303,557
	562,284	26,092	13,046	9780,634
	589,196	27,042	13,521	10621,853
	558,439	26,078	13,039	9708,778
Somatória	13461,17	627,33	313,67	226556,00
Média	538,45	25,09	12,55	9062,24

Tabela D.38 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Press-on	Spin-off							
10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	0	0	0	0	0	0
3	3	3	2	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0

2	2	2	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	25	25	24	9	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	96	36	4	0	0	0

Tabela D.39 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	758,362	29,318	14,659	14822,314
	838,139	31,289	15,644	17482,991
	853,518	31,765	15,883	18074,708
	826,605	32,536	16,268	17929,646
	716,071	29,272	14,636	13973,650
	859,285	32,267	16,134	18484,543
	740,100	31,636	15,818	15609,399
	686,274	28,494	14,247	13036,397
	901,576	32,971	16,486	19817,491
	843,906	31,379	15,690	17653,994
	878,508	32,578	16,289	19080,150
	861,207	32,857	16,429	18864,664
	772,780	30,229	15,115	15573,588
	738,178	30,746	15,373	15130,815
	660,323	29,938	14,969	13179,279
	775,663	31,466	15,733	16271,120
	895,809	32,997	16,498	19705,911
	724,721	29,861	14,931	14427,403
	751,634	29,677	14,838	14870,654
	674,740	29,161	14,581	13117,568
Somatória	15757,40	620,44	310,22	327106,29
Média	787,87	31,02	15,51	16355,31

Tabela D.40 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	0	0	0	0	
1	1	1	1	0	0	0	0	0	
2	2	2	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
2	2	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
3	3	3	2	0	0	0	0	0	
2	2	2	1	0	0	0	0	0	
2	2	2	1	0	0	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	
Somatória	20	20	18	6	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	90	30	5	0	0	0	0

Tabela D.41 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
73,049	9,661	4,830	470,471
146,098	12,598	6,299	1227,072
67,282	8,186	4,093	367,175
50,942	9,039	4,519	306,968
133,602	12,279	6,140	1093,683
132,641	11,900	5,950	1052,323
74,971	8,486	4,243	424,126
122,068	11,664	5,832	949,239
74,010	8,572	4,286	422,934
58,631	8,236	4,118	321,914
133,602	12,487	6,243	1112,158
123,991	12,762	6,381	1054,880
149,942	12,951	6,476	1294,628
73,049	8,106	4,053	394,749
96,117	10,974	5,487	703,172
74,010	8,550	4,275	421,835
137,447	12,629	6,315	1157,223
86,505	8,773	4,387	505,960

	88,428	10,231	5,116	603,139
	57,670	8,504	4,252	326,933
	67,282	8,504	4,252	381,453
	142,253	12,265	6,132	1163,151
	83,622	9,655	4,827	538,236
	143,214	12,811	6,406	1223,169
	81,699	9,296	4,648	506,309
	141,292	12,397	6,199	1167,777
	134,564	12,285	6,143	1102,108
	101,884	11,287	5,643	766,630
	126,874	11,844	5,922	1001,820
	154,748	12,805	6,403	1321,077
Somatória	3131,49	319,74	159,87	23382,31
Média	104,38	10,66	5,33	779,41

Tabela D.42 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	1	1	1	1	1	1	1
	3	3	3	2	2	1	1	0	0
	4	4	4	2	1	1	1	1	0
	3	3	2	2	1	1	1	1	1
	2	2	2	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	1	1	1	1
	3	3	3	2	2	2	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	2	1	1	1	0
Somatória	30	30	27	17	14	11	10	7	5
Porcentagem	100	100	90	56,67	46,67	36,67	33,33	23,33	16,67

Tabela D.43 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
193,195	14,728	7,364	1896,922
244,137	16,844	8,422	2741,469

199,923	15,592	7,796	2078,100	
175,894	14,045	7,023	1646,994	
250,865	16,376	8,188	2738,860	
230,681	16,327	8,163	2510,826	
171,088	13,626	6,813	1554,171	
141,292	14,115	7,057	1329,539	
231,642	16,940	8,470	2616,012	
247,982	16,566	8,283	2738,641	
263,360	17,506	8,753	3073,674	
222,030	16,728	8,364	2476,051	
206,651	15,925	7,963	2194,006	
240,292	16,580	8,290	2656,053	
228,758	15,772	7,886	2405,373	
207,612	15,644	7,822	2165,205	
187,428	15,168	7,584	1895,314	
256,632	17,744	8,872	3035,702	
269,127	17,670	8,835	3170,352	
228,758	16,528	8,264	2520,561	
263,360	17,906	8,953	3143,772	
222,991	17,351	8,675	2579,410	
257,593	17,354	8,677	2980,167	
191,273	15,654	7,827	1996,091	
193,195	14,781	7,391	1903,766	
195,117	15,493	7,747	2015,352	
229,719	16,898	8,449	2587,889	
228,758	16,384	8,192	2498,679	
257,593	17,260	8,630	2963,994	
Somatória	6436,95	469,51	234,75	70112,95
Média	221,96	16,19	8,09	2417,69

Tabela D.44 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
4	4	3	1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0

	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	2	1	1	1	1	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	2	2	1	1	1	1	1	1	0
Somatória	30	30	25	12	8	5	2	1	0
Porcentagem	100	100	83,33	40,00	26,6667	16,67	6,67	3,33	0

Tabela D.45 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
397,924	21,877	10,939	5803,713
356,594	20,390	10,195	4847,398
416,186	22,231	11,116	6168,275
394,079	21,766	10,883	5718,285
290,273	20,256	10,128	3919,762
323,914	19,897	9,949	4296,688
468,089	22,862	11,431	7134,457
314,302	19,061	9,531	3994,021
364,283	20,242	10,121	4915,924
390,235	20,550	10,275	5346,214
355,632	20,222	10,111	4794,313
311,419	19,357	9,678	4018,747
382,545	20,764	10,382	5295,506
332,564	21,482	10,741	4762,823
377,739	21,035	10,518	5297,245
303,729	19,038	9,519	3854,901
363,322	20,836	10,418	5046,699
424,837	22,393	11,197	6342,303
318,147	18,656	9,328	3956,840
365,244	20,096	10,048	4893,204
318,147	19,434	9,717	4121,888
338,331	19,903	9,952	4489,249
333,526	19,740	9,870	4389,209
299,885	18,737	9,368	3745,913
334,487	18,994	9,497	4235,477
378,701	21,694	10,847	5477,083
339,293	19,957	9,978	4514,151
416,186	22,681	11,341	6293,011

	380,623	21,403	10,702	5431,107
	376,778	20,899	10,449	5249,448
	353,710	20,146	10,073	4750,515
	325,836	19,319	9,659	4196,548
	444,060	22,986	11,493	6804,830
	309,496	19,363	9,682	3995,218
Somatória	12200,12	698,27	349,13	168100,96
Média	358,83	20,54	10,27	4944,15

Tabela D.46 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	1	1	0	0
	2	1	1	1	0	0	0	0	0
	3	3	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	3	3	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	4	4	2	1	1	0	0	0	0
	4	4	2	1	1	1	1	0	0
Somatória	34	33	22	11	7	4	2	0	0
Porcentagem	100	97,06	64,71	32,35	20,59	11,76	5,88	0	0

Tabela D.47 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
628,604	27,469	13,734	11511,239
463,283	23,515	11,757	7262,733
451,749	23,020	11,510	6932,933

478,662	24,133	12,067	7701,178	
634,371	27,624	13,812	11682,721	
495,002	24,406	12,203	8053,870	
595,925	26,796	13,398	10645,421	
463,283	23,410	11,705	7230,346	
497,885	24,327	12,163	8074,546	
537,293	25,091	12,546	8987,611	
457,516	23,046	11,523	7029,266	
587,274	26,937	13,469	10546,427	
517,109	24,260	12,130	8363,360	
586,313	26,135	13,067	10215,334	
599,769	26,877	13,438	10746,638	
569,012	25,869	12,934	9813,048	
479,623	23,534	11,767	7524,959	
474,817	24,290	12,145	7688,804	
659,362	27,770	13,885	12207,089	
610,342	26,665	13,332	10849,792	
630,527	27,361	13,680	11501,025	
525,759	24,734	12,367	8669,371	
592,080	26,045	13,023	10280,579	
486,351	23,885	11,942	7744,205	
554,594	25,972	12,986	9602,475	
656,478	27,784	13,892	12159,592	
644,944	27,414	13,707	11787,177	
Somatória	14877,93	688,37	344,18	254811,74
Média	551,03	25,50	12,75	9437,47

Tabela D.48 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	1	1	1		0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	1	1	1	0	0	0	0

	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	27	25	14	6	4	2	0	0	0
Porcentagem	100	92,59	51,85	22,22	14,81	7,41	0	0	0

Tabela D.49 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
822,760	31,139	15,569	17079,746
769,896	30,180	15,090	15490,464
864,091	32,576	16,288	18765,735
668,012	28,176	14,088	12548,164
766,052	30,953	15,477	15807,741
833,333	31,573	15,787	17540,672
841,984	32,237	16,119	18095,481
836,217	31,955	15,977	17814,088
717,032	29,652	14,826	14174,276
725,682	29,620	14,810	14329,864
823,722	32,429	16,215	17808,401
706,459	28,632	14,316	13485,027
854,479	31,823	15,912	18128,126
728,566	29,469	14,735	14313,440
707,420	29,116	14,558	13731,711
678,585	28,420	14,210	12857,100
800,654	30,687	15,344	16379,856
856,401	31,947	15,974	18239,779
796,809	32,573	16,287	17303,130
722,799	29,310	14,655	14123,530
684,352	28,370	14,185	12943,341
702,614	28,788	14,394	13484,580
735,294	29,108	14,554	14268,651
704,537	28,844	14,422	13547,983
689,158	28,527	14,263	13106,216
794,887	31,069	15,535	16464,237
704,537	28,644	14,322	13453,975
795,848	30,365	15,182	16110,603
699,731	28,644	14,322	13362,079
817,955	30,528	15,264	16647,048
Somatória	22849,86	905,36	461405,04
Média	761,66	30,18	15380,17

Tabela D.50 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	3	1	1	0	0	0	0	0
	2	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	2	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	30	27	12	6	3	0	0	0	0
Porcentagem	100	90,00	40,00	20	10	0	0	0	0

Tabela D.51 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
75,932	9,923	4,962	502,324
58,631	8,437	4,218	329,768
81,699	8,796	4,398	479,072
83,622	9,884	4,942	551,012
146,098	12,495	6,247	1216,947
111,496	11,345	5,672	843,247
93,233	10,124	5,062	629,236
122,068	11,908	5,954	969,034
105,729	10,783	5,392	760,061
90,350	10,314	5,157	621,229
90,350	9,468	4,734	570,271
70,165	9,163	4,582	428,631
77,855	8,937	4,469	463,879
105,729	10,851	5,426	764,857
74,010	8,931	4,466	440,672
100,923	11,181	5,590	752,253

	128,797	12,178	6,089	1045,639
	101,884	11,707	5,853	795,156
	83,622	9,560	4,780	532,970
	121,107	11,710	5,855	945,450
	140,331	12,422	6,211	1162,096
	126,874	12,439	6,220	1052,143
	123,030	11,576	5,788	949,440
	96,117	10,476	5,238	671,308
	70,165	8,154	4,077	381,398
	79,777	8,739	4,370	464,792
	85,544	10,083	5,042	575,041
Somatória	2645,14	281,58	140,79	18897,92
Média	97,97	10,43	5,21	699,92

Tabela D.52 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	1	0	0	0
	3	3	3	2	2	1	0	0	0
	2	2	2	2	2	1	0	0	0
	3	3	2	2	1	1	0	0	0
	4	4	3	3	3	2	2	1	1
	2	2	2	2	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	2	2	2	2	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Somatória	27	27	23	20	17	11	5	4	3
Porcentagem	100	100	85,1852	74,07	62,96	40,74	18,52	14,81	11,11

Tabela D.53 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
214,341	15,300	7,650	2186,327
215,302	15,830	7,915	2272,164
185,506	14,440	7,220	1785,835
171,088	13,840	6,920	1578,617
215,302	15,644	7,822	2245,517
188,389	14,853	7,426	1865,381

	3	3	3	2	1	1	0	0	0
	3	3	3	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Somatória	30	30	25	14	7	5	2	1	0
Porcentagem	100	100	83,33	46,67	23,33	16,67	6,67	3,33	0,00

Tabela D.55 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	379,662	21,256	10,628	5380,100
	340,254	20,487	10,243	4647,078
	395,040	21,602	10,801	5689,238
	415,225	22,379	11,190	6194,885
	273,933	19,294	9,647	3523,449
	358,516	20,460	10,230	4890,203
	424,837	22,348	11,174	6329,438
	287,389	18,275	9,137	3501,290
	349,865	19,985	9,993	4661,455
	437,332	22,493	11,247	6558,062
	419,070	22,066	11,033	6164,930
	320,069	18,965	9,482	4046,697
	382,545	21,402	10,701	5458,281
	436,371	22,763	11,382	6622,153
	437,332	22,441	11,221	6542,825
	322,953	19,386	9,693	4173,844
	307,574	19,893	9,947	4079,077
	283,545	18,000	9,000	3402,593
	297,962	19,164	9,582	3806,840
	323,914	19,366	9,683	4181,949
	367,166	20,795	10,397	5090,089
	321,992	19,437	9,719	4172,417
	423,875	22,729	11,364	6422,837
	370,050	20,649	10,325	5094,170
	348,904	20,072	10,036	4668,863
	361,399	20,520	10,260	4943,890
	357,555	20,803	10,402	4958,924
	327,759	19,664	9,832	4296,763
	315,263	19,217	9,609	4039,019
	356,594	20,791	10,396	4942,677
	283,545	18,347	9,174	3468,159
	302,768	18,689	9,344	3772,288
Somatória	11330,26	653,74	326,87	155724,49
Média	354,07	20,43	10,21	4866,39

Tabela D.56 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>								
2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000	
2	2	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	
3	3	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
2	2	1	0	0	0	0	0	0	
2	2	2	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	0	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	0	0	0	0	
3	3	1	1	0	0	0	0	0	
2	2	2	1	0	0	0	0	0	
2	2	2	1	0	0	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	
3	3	1	0	0	0	0	0	0	
2	2	2	2	1	0	0	0	0	
3	3	3	1	1	1	0	0	0	
Somatória	32	32	20	11	6	4	0	0	0
Porcentagem	100	100	62,5	34,375	18,75	12,50	0	0	0

Tabela D.57 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
489,235	23,898	11,949	7794,636
647,828	27,565	13,783	11904,960
594,963	26,305	13,152	10433,478
522,876	24,986	12,493	8709,690
511,342	23,998	11,999	8180,824
553,633	25,488	12,744	9407,476
529,604	26,078	13,039	9207,171
559,400	25,598	12,799	9546,495
485,390	23,878	11,939	7726,910
561,323	25,503	12,751	9543,589
472,895	23,835	11,917	7514,204
609,381	26,903	13,452	10929,636
582,468	26,561	13,280	10313,825
655,517	27,969	13,985	12222,866

	512,303	24,515	12,258	8372,825
	666,090	27,902	13,951	12390,220
	525,759	24,833	12,416	8703,986
	465,206	23,512	11,756	7292,034
	478,662	23,875	11,938	7618,780
	572,857	25,861	12,930	9876,327
Somatória	10996,73	509,06	254,53	187689,93
Média	549,84	25,45	12,73	9384,50

Tabela D.58 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	20	20	9	5	2	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	45	25	10	5	0	0	0

Tabela D.59 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
714,148	29,091	14,546	13850,387
771,819	30,923	15,462	15911,378
769,896	30,375	15,187	15590,332
696,847	28,733	14,367	13348,426
725,682	29,838	14,919	14435,253
727,605	31,107	15,554	15089,135

	750,673	32,416	16,208	16222,753
	813,149	30,897	15,449	16749,285
	815,071	31,159	15,580	16931,438
	727,605	29,451	14,726	14285,921
	693,964	31,074	15,537	14376,208
	695,886	28,853	14,426	13385,574
	785,275	30,614	15,307	16026,992
	753,556	30,211	15,105	15176,935
Somatória	10441,18	424,74	212,37	211380,02
Média	745,80	30,34	15,17	15098,57

Tabela D.60 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Somatória	14	14	6	3	0	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	42,86	21,43	0	0	0	0	0

Tabela D.61 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
86,505	9,905	4,952	571,221
99,000	10,436	5,218	688,776
64,398	8,129	4,064	348,982
129,758	12,570	6,285	1087,387
127,835	12,190	6,095	1038,901
108,612	11,140	5,570	806,620
100,923	10,509	5,254	707,050
89,389	9,311	4,655	554,846

74,971	8,865	4,433	443,104	
112,457	11,196	5,598	839,413	
82,661	10,137	5,068	558,609	
126,874	11,670	5,835	987,111	
140,331	12,927	6,464	1209,385	
71,126	9,963	4,982	472,429	
120,146	12,241	6,121	980,478	
155,709	12,450	6,225	1292,404	
66,321	8,423	4,212	372,418	
141,292	12,271	6,135	1155,814	
86,505	9,804	4,902	565,387	
Somatória	1984,81	204,14	102,07	14680,33
Média	104,46	10,74	5,37	772,65

Tabela D.62 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
4	4	4	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Somatória	19	19	19	16	15	10	9	5	3
Porcentagem	100	100	100	84,21	78,95	52,63	47,37	26,32	15,79

Tabela D.63 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
160,515	13,386	6,693	1432,490
192,234	14,732	7,366	1887,937
199,923	15,428	7,714	2056,259
249,904	17,450	8,725	2907,218
232,603	16,903	8,452	2621,179
263,360	17,887	8,943	3140,412
201,845	16,951	8,475	2280,978

267,205	17,500	8,750	3117,337	
155,709	13,812	6,906	1433,772	
236,448	16,204	8,102	2554,326	
266,244	17,460	8,730	3099,129	
211,457	15,811	7,905	2228,830	
231,642	16,701	8,350	2579,054	
176,855	14,800	7,400	1744,929	
260,477	17,563	8,781	3049,821	
219,146	15,626	7,813	2282,899	
136,486	13,614	6,807	1238,792	
245,098	16,598	8,299	2712,170	
184,544	15,239	7,620	1874,868	
243,176	17,194	8,597	2787,435	
225,875	16,937	8,469	2550,460	
160,515	14,563	7,281	1558,373	
157,632	13,048	6,524	1371,216	
163,399	14,056	7,028	1531,134	
270,088	17,882	8,941	3219,842	
230,681	15,841	7,920	2436,136	
227,797	16,257	8,129	2468,910	
198,962	15,210	7,605	2017,471	
Somatória	5969,82	444,65	222,33	64183,38
Média	213,21	15,88	7,94	2292,26

Tabela D.64 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1	1	0	0	0	0
3	3	3	3	1	1	0	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
5	5	5	5	4	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Somatória	28	28	26	14	8	3	2	2	1
Porcentagem	100	100	92,86	50	28,57	10,71	7,14	7,14	3,57

Tabela D.65 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	385,429	22,676	11,338	5826,569
	407,536	21,519	10,760	5846,506
	437,332	22,760	11,380	6635,874
	406,574	21,580	10,790	5849,377
	313,341	18,909	9,454	3949,888
	447,905	22,679	11,340	6772,139
	303,729	18,640	9,320	3774,313
	305,652	18,803	9,402	3831,529
	409,458	21,262	10,631	5803,874
	332,564	19,753	9,876	4379,327
	281,622	18,856	9,428	3540,219
	440,215	22,259	11,130	6532,598
	346,982	19,718	9,859	4561,207
	350,827	20,051	10,025	4689,547
	450,788	22,524	11,262	6769,042
	397,924	21,613	10,806	5733,440
	392,157	21,139	10,570	5526,579
	268,166	18,374	9,187	3284,845
	358,516	20,148	10,074	4815,496
	339,293	19,853	9,926	4490,609
	253,749	18,131	9,065	3067,142
	449,827	22,887	11,443	6863,315
	443,099	22,649	11,325	6690,571
	317,186	18,823	9,411	3980,193
	420,992	21,968	10,984	6165,689
	427,720	22,795	11,397	6499,904
	288,351	18,274	9,137	3512,961
	416,186	22,384	11,192	6210,716
	425,798	22,849	11,425	6486,137
	353,710	20,518	10,259	4838,383
Somatória	11172,63	624,39	312,20	156927,99
Média	372,42	20,81	10,41	5230,93

Tabela D.66 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	0	0	0	0	0	0

1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
3	3	2	2	1	1	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
6	6	5	3	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
2	2	2	1	0	0	0	0	0	
Somatória	30	30	26	10	5	5	3	1	1
Porcentagem	100	100	86,67	33,33	16,67	16,67	10	3,33	3,33

Tabela D.67 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	596,886	26,308	13,154	10468,411
	479,623	24,739	12,369	7910,186
	532,487	25,066	12,533	8898,109
	646,867	27,570	13,785	11889,610
	628,604	26,872	13,436	11261,325
	586,313	26,355	13,178	10301,554
	557,478	25,315	12,657	9408,273
	597,847	26,393	13,196	10519,177
	465,206	23,198	11,599	7194,411
	605,536	26,816	13,408	10825,272
	455,594	23,005	11,503	6987,331
	581,507	27,293	13,646	10580,541
	503,652	24,379	12,190	8185,815
	562,284	25,903	12,951	9709,728
	489,235	24,027	12,013	7836,497
	586,313	26,817	13,409	10482,143
	444,060	23,332	11,666	6907,351
	591,119	26,466	13,233	10429,526
	550,750	25,275	12,637	9280,111
	539,216	24,976	12,488	8978,295
Somatória	11000,58	510,10	255,05	188053,67
Média	550,03	25,51	12,75	9402,68

Tabela D.68 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	4	4	3	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
Somatória	20	20	14	6	2	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	70	30	10	5	0	0	0

Tabela D.69 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
811,2264404	30,75178146	15,37589	16631,1055
605,5363159	29,58252525	14,79126	11942,1956
647,8277588	28,29496765	14,14748	12220,177
591,1187744	29,57449341	14,78725	11654,6922
693,0026855	31,055439	15,52772	14347,6684
637,2548828	28,04390717	14,02195	11914,0778
833,333313	31,81679344	15,9084	17675,9959
805,4594116	31,25821686	15,62911	16784,8166
668,9734497	28,76868057	14,38434	12830,3223
684,3521729	28,48485565	14,24243	12995,7819
671,8569946	28,20833588	14,10417	12634,6452
695,8861694	28,52584457	14,26292	13233,8271
682,4298096	28,29680634	14,1484	12873,7228
797,7700806	32,33943939	16,16972	17199,6248
822,760437	32,84904861	16,42452	18017,9317
863,1295776	32,51132965	16,25566	18707,6602
589,1964722	29,5230217	14,76151	11596,5735
692,0415039	28,89346695	14,44673	13330,3189
767,9738159	29,89131355	14,94566	15303,8308

	688,1968384	28,52516747	14,26258	13087,2867
Somatória	14249,33	597,20	298,60	284982,25
Média	712,47	29,86	14,93	14249,11

Tabela D.70 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Somatória	20	20	12	2	0	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	60	10	0	0	0	0	0

Tabela D.71 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
137,447	12,440	6,220	1139,941
73,049	9,191	4,596	447,596
132,641	11,644	5,822	1029,616
74,971	8,650	4,325	432,318
118,224	11,105	5,552	875,230
74,971	9,763	4,882	487,983
96,117	9,798	4,899	627,811
100,923	10,759	5,379	723,856
64,398	8,394	4,197	360,353
96,117	11,036	5,518	707,165
65,359	8,938	4,469	389,442
103,806	12,405	6,202	858,477

	68,243	8,587	4,294	390,675
Somatória	1206,27	132,71	66,35	8470,46
Média	92,79	10,21	5,10	651,57

Tabela D.72 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Somatória	13	13	13	13	11	10	8	7	5
Porcentagem	100	100	100	100	84,62	76,92	61,54	53,85	38,46

Tabela D.73 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
200,884	15,397	7,699	2062,022	
239,331	17,337	8,668	2766,115	
171,088	13,917	6,959	1587,387	
215,302	16,224	8,112	2328,658	
248,943	17,681	8,841	2934,393	
276,817	17,898	8,949	3302,961	
265,283	17,194	8,597	3040,804	
193,195	14,743	7,371	1898,790	
248,943	16,744	8,372	2778,931	
241,253	17,688	8,844	2844,918	
175,894	14,595	7,297	1711,422	
237,409	16,292	8,146	2578,654	
158,593	13,870	6,935	1466,475	
212,418	17,111	8,556	2423,146	
190,311	15,127	7,564	1919,258	
219,146	16,174	8,087	2363,026	
Somatória	3494,81	257,99	129,00	38006,96
Média	218,43	16,12	8,06	2375,43

Tabela D.74 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	3	3	3	3	2	2	1	1	1
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Somatória	16	16	16	14	11	8	6	3	2
Porcentagem	100	100	100	87,5	68,75	50	37,5	18,75	12,5

Tabela D.75 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	433,487	22,538	11,269	6513,215
	328,720	19,086	9,543	4182,703
	435,409	22,196	11,098	6443,043
	252,787	18,025	9,013	3037,738
	266,244	18,141	9,070	3219,942
	298,923	18,561	9,280	3698,819
	355,632	20,078	10,039	4760,295
	367,166	21,208	10,604	5191,171
	384,467	21,425	10,712	5491,431
	288,351	18,143	9,072	3487,763
	306,613	19,035	9,518	3890,938
	351,788	20,270	10,135	4753,759
Somatória	4069,59	238,71	119,35	54670,82
Média	339,13	19,89	9,95	4555,90

Tabela D.76 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	12	12	12	9	4	3	2	0	0
Porcentagem	100	100	100	75	33,33	25	16,67	0	0

Tabela D.77 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	515,186	24,917	12,458	8557,908
	525,759	25,145	12,573	8813,653
	693,964	27,595	13,798	12766,677
	535,371	24,728	12,364	8825,808
	474,817	23,391	11,695	7404,202
	498,847	24,100	12,050	8014,711
	496,924	24,239	12,120	8030,049
	561,323	25,376	12,688	9495,994
	568,051	25,928	12,964	9819,022
	494,041	24,110	12,055	7940,903
	612,265	26,624	13,312	10867,178
	516,148	24,629	12,314	8474,677
	635,333	26,964	13,482	11420,756
	595,925	26,339	13,169	10463,892
	420,992	23,714	11,857	6655,616
Somatória	8144,94	377,80	188,90	137551,05
Média	543,00	25,19	12,59	9170,07

Tabela D.78 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	15	15	15	7	3	0	0	0
Porcentagem	100	100	100	46,67	20,00	0	0	0

Tabela D.79 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	810,265	31,961	15,980	17264,344
	713,187	29,302	14,651	13931,910
	651,672	29,320	14,660	12737,918
	694,925	28,727	14,364	13308,876
	775,663	32,296	16,148	16700,480
	756,440	30,442	15,221	15351,857
	814,110	31,136	15,568	16898,602
	931,373	32,708	16,354	20309,136
	865,052	32,748	16,374	18885,857
	886,198	32,947	16,474	19465,071
Somatória	7898,88	311,59	155,79	164854,05
Média	789,89	31,16	15,58	16485,40

Tabela D.80 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de PVC.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	10	10	10	7	3	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	100	70	30	10	0	0	0

Tabela D.81 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
87,466	9,621	4,810	561,008
76,894	9,746	4,873	499,582
123,991	12,370	6,185	1022,545
103,806	11,211	5,606	775,874
81,699	9,263	4,632	504,531
66,321	8,691	4,345	384,248
73,049	8,706	4,353	423,960
100,923	10,300	5,150	693,025
96,117	10,002	5,001	640,906
77,855	8,878	4,439	460,822
145,136	12,076	6,038	1168,451
132,641	12,344	6,172	1091,529
67,282	8,380	4,190	375,883
68,243	8,464	4,232	385,088
126,874	11,517	5,759	974,144
89,389	9,747	4,873	580,820
137,447	12,030	6,015	1102,284
60,554	8,151	4,075	329,034
119,185	11,118	5,559	883,405
129,758	12,305	6,152	1064,439
128,797	12,236	6,118	1050,623
80,738	8,936	4,468	480,969

	123,991	12,231	6,116	1011,028
	138,408	12,727	6,363	1174,310
	94,195	10,110	5,055	634,862
	114,379	12,790	6,395	975,249
	58,631	8,095	4,047	316,396
	75,932	8,935	4,468	452,318
	117,263	11,063	5,532	864,883
Somatória	2896,96	302,04	151,02	20882,21
Média	99,90	10,42	5,21	720,08

Tabela D.82 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	2	2	2	2	1	1	0
	2	2	2	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	1	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	3	3	2	2	1	1	1	0	0
	4	4	3	2	2	1	1	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	0	0	0	0
Somatória	29	29	24	19	16	11	7	3	2
Porcentagem	100	100	82,76	65,52	55,17	37,93	24,14	10,34	6,90

Tabela D.83 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
255,671	17,337	8,668	2955,010
206,651	15,307	7,653	2108,782
197,040	15,284	7,642	2007,641
226,836	16,531	8,266	2499,948

140,331	13,394	6,697	1253,104	
151,865	13,205	6,602	1336,888	
198,962	15,080	7,540	2000,225	
230,681	16,517	8,258	2540,057	
238,370	15,824	7,912	2514,606	
251,826	17,230	8,615	2892,626	
272,011	17,125	8,563	3105,477	
272,011	17,589	8,795	3189,652	
226,836	16,610	8,305	2511,799	
175,894	13,969	6,984	1637,987	
238,370	17,369	8,685	2760,241	
153,787	13,065	6,532	1339,452	
196,078	15,930	7,965	2082,409	
150,904	13,022	6,511	1310,047	
164,360	14,660	7,330	1606,397	
183,583	14,982	7,491	1833,647	
247,982	17,232	8,616	2848,851	
255,671	17,275	8,637	2944,456	
227,797	16,311	8,156	2477,071	
242,215	16,762	8,381	2706,625	
197,040	14,814	7,407	1945,900	
203,768	15,364	7,682	2087,166	
186,467	14,599	7,299	1814,782	
199,923	14,828	7,414	1976,292	
147,059	13,081	6,541	1282,493	
277,778	17,754	8,877	3287,696	
237,409	16,318	8,159	2582,734	
216,263	15,626	7,813	2252,851	
Somatória	6771,43	499,99	250,00	71692,91
Média	211,61	15,62	7,81	2240,40

Tabela D.84 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	2	2	2	1	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	1	1	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1	1	0	0	0

	3	3	2	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	2	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Somatória	32	32	23	8	5	4	1	0	0
Porcentagem	100	100	71,88	25	15,63	12,5	3,13	0	0

Tabela D.85 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
438,293	22,016	11,008	6433,100
400,807	21,594	10,797	5769,981
341,215	19,907	9,954	4528,417
412,341	22,121	11,060	6080,804
403,691	21,701	10,850	5840,196
315,263	20,080	10,040	4220,272
331,603	18,901	9,451	4178,522
336,409	20,093	10,047	4506,380
290,273	18,298	9,149	3540,875
283,545	19,537	9,769	3693,085
311,419	19,377	9,688	4022,892
408,497	21,623	10,812	5888,667
388,312	21,039	10,519	5446,398
397,924	21,382	10,691	5672,354
311,419	19,194	9,597	3984,812
300,846	18,869	9,434	3784,403
378,701	20,890	10,445	5274,118
280,661	18,570	9,285	3474,508
317,186	18,906	9,453	3997,758
422,914	22,609	11,304	6374,317
378,701	21,017	10,508	5305,999
387,351	21,422	10,711	5531,853
369,089	20,799	10,400	5117,868
253,749	18,141	9,070	3068,798
360,438	20,124	10,062	4835,663
434,448	22,191	11,095	6427,119
371,011	20,790	10,395	5142,218
376,778	20,900	10,450	5249,656
357,555	20,853	10,426	4970,659

	306,613	18,887	9,443	3860,597
Somatória	10667,05	611,83	305,91	146222,29
Média	355,57	20,39	10,20	4874,08

Tabela D.86 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
3	3	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Somatória	30	28	16	7	3	0	0	0	0
Porcentagem	100	93,33	53,33	23,33	10	0	0	0	0

Tabela D.87 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
589,196	26,150	13,075	10271,822
622,837	27,759	13,879	11526,101
441,176	23,290	11,645	6850,078
471,934	26,265	13,132	8263,468
466,167	23,395	11,698	7270,718
504,614	25,359	12,679	8530,843
645,905	27,496	13,748	11840,065
533,449	24,685	12,342	8778,787
501,730	25,094	12,547	8393,695
607,459	26,320	13,160	10658,978
553,633	25,270	12,635	9326,764
484,429	23,105	11,552	7461,772

	528,643	24,088	12,044	8489,207
	479,623	23,953	11,977	7658,959
	605,536	26,534	13,267	10711,515
	512,303	24,411	12,206	8337,312
	491,157	23,943	11,972	7839,897
	592,080	26,489	13,245	10455,783
	470,012	23,760	11,880	7444,993
	502,691	24,703	12,352	8278,762
Somatória	10604,57	502,07	251,03	178389,52
Média	530,23	25,10	12,55	8919,48

Tabela D.88 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	20	18	6	0	0	0	0	0	0
Porcentagem	100	90	30	0	0	0	0	0	0

Tabela D.89 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
704,537	28,915	14,458	13581,165
737,216	28,448	14,224	13981,660
685,313	28,779	14,390	13148,462
665,129	28,272	14,136	12536,359
783,353	31,980	15,990	16701,184

	767,974	30,492	15,246	15611,206
	770,857	30,200	15,100	15519,966
	789,120	31,335	15,668	16484,780
	805,459	31,319	15,660	16817,699
	714,148	29,835	14,918	14204,534
	789,120	32,717	16,358	17211,725
	694,925	28,704	14,352	13298,137
	721,838	29,332	14,666	14115,307
	831,411	31,556	15,778	17490,565
Somatória	10460,40	421,89	210,94	210702,75
Média	747,17	30,13	15,07	15050,20

Tabela D.90 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Somatória	14	13	5	2	0	0	0	0	0
Porcentagem	100	92,85	35,71	14,29	0	0	0	0	0

Tabela D.91 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
95,156	10,601	5,300	672,474
81,699	10,492	5,246	571,461
128,797	12,488	6,244	1072,238
64,398	8,344	4,172	358,218
93,233	9,145	4,572	568,403
103,806	11,249	5,625	778,508
116,301	11,658	5,829	903,895
99,962	9,741	4,870	649,130

79,777	9,533	4,767	507,029
69,204	8,446	4,223	389,655
99,962	10,027	5,013	668,192
90,350	8,993	4,496	541,656
112,457	11,876	5,938	890,386
53,825	8,601	4,301	308,645
73,049	8,870	4,435	431,958
105,729	10,740	5,370	757,040
93,233	10,882	5,441	676,365
139,369	12,486	6,243	1160,140
123,991	12,103	6,052	1000,449
149,942	12,943	6,472	1293,851
113,418	11,798	5,899	892,032
98,039	10,681	5,341	698,119
66,321	8,493	4,247	375,523
126,874	11,704	5,852	989,954
154,748	12,590	6,295	1298,854
72,088	9,444	4,722	453,888
107,651	10,627	5,313	762,636
133,602	11,946	5,973	1064,036
72,088	9,029	4,515	433,922
98,039	10,522	5,261	687,697
87,466	10,552	5,276	615,290
122,068	11,186	5,593	910,303
Somatória	3226,64	337,79	168,90
Média	100,83	10,56	5,28
	730,69		

Tabela D.92 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	2	2	0	0	0	0
5	5	5	4	3	2	1	0	0
3	3	3	3	1	0	0	0	0
3	3	3	3	2	2	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	1	1	1	1	1	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0
3	3	3	3	2	1	1	0	0
3	3	2	2	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	2	2	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	2	2	1	1	1	0
2	2	2	2	1	1	1	0	0

Somatória	32	32	30	27	19	12	10	6	2
Porcentagem	100	100	93,75	84,38	59,38	37,5	31,25	18,75	6,25

Tabela D.93 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
255,671	17,120	8,560	2917,998
135,525	13,001	6,501	1174,670
278,739	17,902	8,951	3326,625
207,612	15,079	7,539	2087,027
219,146	15,828	7,914	2312,437
171,088	13,769	6,884	1570,468
167,243	13,702	6,851	1527,733
274,894	17,837	8,919	3268,868
207,612	15,108	7,554	2091,130
237,409	16,373	8,187	2591,444
184,544	15,162	7,581	1865,337
239,331	16,672	8,336	2660,026
259,516	17,374	8,687	3005,948
202,807	15,357	7,678	2076,334
249,904	17,204	8,602	2866,164
219,146	15,340	7,670	2241,081
168,205	14,367	7,183	1611,028
283,545	17,716	8,858	3348,776
153,787	13,542	6,771	1388,386
165,321	13,719	6,859	1512,014
231,642	16,954	8,477	2618,212
195,117	15,007	7,503	1952,044
229,719	16,595	8,297	2541,396
245,098	17,084	8,542	2791,434
262,399	17,820	8,910	3117,288
197,040	15,127	7,563	1987,074
200,884	15,127	7,563	2025,811
151,865	13,301	6,650	1346,601
215,302	15,715	7,857	2255,582
146,098	13,418	6,709	1306,907
Somatória	6356,21	468,32	67385,84
Média	211,87	15,61	2246,19

Tabela D.94 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	5	5	4	2	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	5	5	3	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	0	0	0	0
Somatória	30	30	26	10	5	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	86,67	33,33	16,67	0	0	0	0

Tabela D.95 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
428,681	22,615	11,307	6463,013
382,545	22,874	11,437	5833,453
399,846	21,203	10,602	5652,034
376,778	20,790	10,395	5222,041
379,662	20,890	10,445	5287,341
338,331	19,807	9,904	4467,596
336,409	19,415	9,708	4354,325
347,943	19,907	9,954	4617,705
322,953	19,931	9,966	4291,271
347,943	20,633	10,317	4786,107
277,778	18,400	9,200	3407,359
281,622	18,090	9,045	3396,276
403,691	21,663	10,832	5830,159
391,196	21,500	10,750	5607,091
455,594	22,765	11,382	6914,378
407,536	21,691	10,846	5893,302
389,273	22,136	11,068	5744,704
419,070	22,505	11,252	6287,326

354,671	20,617	10,308	4874,783	
385,429	21,337	10,669	5482,706	
405,613	21,692	10,846	5865,583	
404,652	21,735	10,868	5863,485	
316,225	19,020	9,510	4009,819	
359,477	20,628	10,314	4943,588	
366,205	20,634	10,317	5037,424	
297,001	20,379	10,189	4034,988	
364,283	20,943	10,472	5086,119	
369,089	20,869	10,435	5135,055	
294,118	18,859	9,430	3697,916	
320,069	19,610	9,805	4184,307	
344,098	19,927	9,964	4571,297	
290,273	18,634	9,317	3606,019	
358,516	21,429	10,714	5121,675	
348,904	20,068	10,034	4667,784	
278,739	18,356	9,178	3410,965	
Somatória	12544,21	721,55	360,78	173649,00
Média	358,41	20,62	10,31	4961,40

Tabela D.96 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
3	3	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
3	3	1	1	0	0	0	0	0
3	3	1	0	0	0	0	0	0
3	3	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0

Somatória	35	35	15	2	0	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	42,86	5,71	0	0	0	0	0

Tabela D.97 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
661,284	27,184	13,592	11984,164
446,943	23,061	11,530	6871,309
576,701	25,399	12,699	9764,923
455,594	23,637	11,818	7179,129
467,128	23,227	11,613	7233,201
623,799	26,884	13,442	11180,090
562,284	25,542	12,771	9574,616
413,303	23,687	11,843	6526,524
463,283	23,320	11,660	7202,459
422,914	23,118	11,559	6518,024
489,235	23,827	11,913	7771,305
577,662	27,523	13,761	10599,258
435,409	23,538	11,769	6832,539
582,468	26,229	13,114	10184,904
641,100	27,072	13,536	11570,522
544,022	25,141	12,571	9118,244
609,381	27,850	13,925	11314,285
513,264	26,365	13,183	9021,621
431,565	23,204	11,602	6676,039
591,119	26,040	13,020	10261,845
473,856	23,413	11,706	7396,149
496,924	24,256	12,128	8035,655
563,245	25,613	12,806	9617,471
499,808	25,197	12,598	8395,655
595,925	26,391	13,195	10484,560
485,390	23,665	11,833	7657,996
458,478	23,110	11,555	7063,760
556,517	25,288	12,644	9382,209
Somatória	14638,60	698,78	245418,46
Média	522,81	24,96	8764,94

Tabela D.98 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
3	3	1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0

1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
3	3	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	28	28	9	3	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	32,14	10,71	3,57	0	0	0

Tabela D.99 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
850,634	32,415	16,207	18381,975
823,722	31,019	15,510	17034,128
717,032	30,570	15,285	14613,192
861,207	32,414	16,207	18610,075
805,459	31,144	15,572	16723,487
692,042	28,791	14,395	13282,984
899,654	32,798	16,399	19671,090
725,682	29,845	14,923	14438,823
688,197	28,587	14,293	13115,455
851,596	32,855	16,427	18652,759
777,586	31,086	15,543	16114,441
736,255	31,322	15,661	15374,160
839,100	31,331	15,666	17526,813
805,459	31,426	15,713	16874,886
712,226	29,365	14,683	13943,158
873,702	32,606	16,303	18991,815
654,556	30,065	15,032	13119,384
Somatória	13314,11	527,64	276468,62
Média	783,18	31,04	16262,86

Tabela D.100 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de Teflon®.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	17	17	7	2	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	41,18	11,76	5,88	0	0	0	0

Tabela D.101 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon®.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
85,544	9,406	4,703	536,392
61,515	8,958	4,479	367,379
128,797	11,885	5,943	1020,522
62,476	9,625	4,813	400,899
94,195	10,394	5,197	652,703
96,117	10,666	5,333	683,459
57,670	8,008	4,004	307,886
99,000	10,830	5,415	714,777
65,359	8,734	4,367	380,567
93,233	9,865	4,932	613,137
76,894	9,531	4,766	488,585
103,806	10,674	5,337	738,686
107,651	11,283	5,641	809,730
61,515	8,819	4,409	361,652
77,855	9,578	4,789	497,127
88,428	9,680	4,840	570,646
79,777	9,581	4,791	509,577
112,457	11,050	5,525	828,398
74,971	10,903	5,451	544,927

119,185	11,070	5,535	879,585
131,680	12,345	6,172	1083,691
79,777	9,256	4,628	492,296
99,962	10,747	5,374	716,213
87,466	9,980	4,990	581,942
79,777	9,187	4,594	488,632
99,000	10,896	5,448	719,146
105,729	10,891	5,445	767,629
109,573	10,853	5,426	792,799
130,719	11,774	5,887	1026,040
117,263	11,974	5,987	936,043
Somatória	2787,39	308,44	154,22
Média	92,91	10,28	5,14

Tabela D.102 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
3	3	3	3	3	2	1	1	1	
2	2	2	2	1	1	1	0	0	
6	6	6	5	4	3	2	2	1	
4	4	4	3	2	1	1	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
3	3	3	2	2	2	1	1	1	
3	3	3	2	2	2	1	1	1	
1	1	1	1	1	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
2	2	2	1	1	1	1	1	0	
2	2	2	2	0	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
Somatória	30	30	30	25	20	16	8	6	4
Porcentagem	100	100	100	83,33	66,67	53,33	26,67	20	13,33

Tabela D.103 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
205,690	15,947	7,973	2186,735
240,292	16,587	8,294	2657,170
184,544	15,229	7,615	1873,678
174,933	14,157	7,078	1651,012
272,972	17,794	8,897	3238,187
232,603	16,200	8,100	2512,051
167,243	13,944	6,972	1554,639

198,001	15,350	7,675	2026,232	
192,234	15,042	7,521	1927,717	
242,215	16,870	8,435	2724,086	
164,360	13,442	6,721	1472,922	
272,011	17,659	8,830	3202,377	
268,166	17,787	8,893	3179,859	
176,855	14,330	7,165	1689,534	
190,311	15,086	7,543	1913,964	
222,991	16,482	8,241	2450,279	
210,496	16,443	8,221	2307,402	
264,321	17,493	8,746	3082,508	
240,292	16,672	8,336	2670,817	
230,681	16,275	8,138	2502,889	
263,360	17,291	8,645	3035,783	
195,117	15,985	7,993	2079,305	
Somatória	4809,69	352,06	176,03	51939,15
Média	218,62	16,00	8,00	2360,87

Tabela D.104 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	2	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	1	0	0	0	0	0	
2	2	1	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	
3	3	3	1	1	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	0	0	0	0	
5	5	5	3	2	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	0	0	0	0	
Somatória	22	22	21	14	10	4	1	0	0
Porcentagem	100	100	95,45	63,64	45,45	18,18	4,55	0	0

Tabela D.105 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	361,3994446	21,1190815	10,55954	5088,28288
	331,6032104	19,88161469	9,940807	4395,20484
	427,7200928	21,91310692	10,95655	6248,45075
	377,7393188	21,13784218	10,56892	5323,06274
	383,5063477	22,06332779	11,03166	5640,95084
	385,4286804	21,42469025	10,71235	5505,12673
	326,7973938	19,64999008	9,824995	4281,0437
	361,3994446	20,19266319	10,09633	4865,07817
	300,8458252	18,54896736	9,274484	3720,25293
	367,1664734	20,68812561	10,34406	5063,99075
	324,8750305	19,99202728	9,996014	4329,94032
	315,2633667	19,1983223	9,599161	4035,01848
	417,1472473	22,0320549	11,01603	6127,07404
	391,1956787	21,55974007	10,77987	5622,7181
	364,282959	20,71450806	10,35725	5030,62819
	342,1760864	19,95617676	9,978088	4552,35098
	378,7005005	20,95444679	10,47722	5290,30633
	394,0791931	21,5799408	10,78997	5669,47044
	260,4767456	18,8106823	9,405341	3266,49687
	291,2341309	18,63558769	9,317794	3618,21279
	390,2345276	21,02845764	10,51423	5470,68682
	399,8461914	21,38944817	10,69472	5701,65959
	306,6128235	19,40009308	9,700047	3965,54488
	298,9234924	18,46993256	9,234966	3680,73116
	342,1760864	20,10765648	10,05383	4586,90613
	359,4771118	20,54124069	10,27062	4922,73725
	355,6324463	20,71883011	10,35942	4912,19216
	429,6424255	22,17157364	11,08579	6350,56578
Somatória	9985,58	573,88	286,94	137264,68
Média	356,63	20,50	10,25	4902,31

Tabela D.106 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
3	3	3	2	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0

1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1	0	0	0	0
Somatória	28	28	24	10	4	1	0	0
Porcentagem	100	100	85,71	35,71	14,29	3,57	0	0

Tabela D.107 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	531,526	24,855	12,427	8807,264
	459,439	23,171	11,585	7096,978
	651,672	27,974	13,987	12153,275
	536,332	25,020	12,510	8946,053
	481,546	23,773	11,886	7631,789
	462,322	23,468	11,734	7233,032
	426,759	23,963	11,982	6817,728
	502,691	24,360	12,180	8163,625
	429,642	23,969	11,984	6865,323
	477,701	23,731	11,866	7557,641
	652,634	27,977	13,988	12172,275
	587,274	26,358	13,179	10319,527
	540,177	26,003	13,001	9364,011
	544,983	25,229	12,615	9166,283
	534,410	25,204	12,602	8979,516
	521,915	24,368	12,184	8478,688
	463,283	23,390	11,695	7224,202
	578,624	25,595	12,797	9873,190
Somatória	9382,93	448,41	224,20	156850,40
Média	521,27	24,91	12,46	8713,91

Tabela D.108 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	18	18	13	3	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	72,22	16,67	5,56	0	0	0	0

Tabela D.109 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	827,566	31,359	15,679	17301,005
	763,168	30,228	15,114	15379,401
	766,052	30,628	15,314	15641,527
	780,469	32,108	16,054	16705,963
	686,274	28,986	14,493	13261,708
	751,634	29,323	14,661	14693,317
	672,818	28,808	14,404	12921,736
	707,420	30,315	15,157	14296,799
	816,032	31,411	15,705	17088,185
	767,013	29,760	14,880	15217,734
	735,294	31,168	15,584	15278,204
	691,080	28,355	14,177	13063,716
	719,915	28,841	14,420	13841,983
	747,789	30,166	15,083	15038,497
	664,168	28,709	14,354	12711,551
	703,576	30,428	15,214	14272,198
Somatória	11800,27	480,59	240,30	236713,52
Média	737,52	30,04	15,02	14794,60

Tabela D.110 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	16	16	10	2	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	62,5	12,5	6,25	0	0	0	0

Tabela D.111 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
120,146	10,869	5,435	870,586
100,923	10,488	5,244	705,657
66,321	8,008	4,004	354,083
114,379	11,282	5,641	860,290
101,884	11,229	5,614	762,679
107,651	11,130	5,565	798,784
114,379	11,477	5,739	875,165
59,592	9,234	4,617	366,869
74,010	9,099	4,549	448,921
110,534	11,250	5,625	829,036
99,962	10,339	5,169	688,975
54,787	8,688	4,344	317,324
58,631	8,115	4,057	317,195
128,797	11,746	5,873	1008,531
74,010	11,058	5,529	545,595
128,797	12,020	6,010	1032,122
73,049	10,350	5,175	504,056
91,311	9,965	4,982	606,603
95,156	10,373	5,186	658,023

	135,525	12,098	6,049	1093,033
	98,039	10,258	5,129	670,451
	108,612	10,874	5,437	787,364
	111,496	11,030	5,515	819,853
	143,214	12,909	6,454	1232,497
	107,651	11,041	5,520	792,376
	130,719	11,776	5,888	1026,189
	147,059	12,474	6,237	1222,915
	147,059	12,616	6,308	1236,850
	142,253	12,590	6,295	1193,967
	89,389	9,721	4,861	579,314
	95,156	10,488	5,244	665,322
	99,962	10,481	5,241	698,470
	133,602	12,553	6,276	1118,062
Somatória	3464,05	357,63	178,81	25687,16
Média	104,97	10,84	5,42	778,40

Tabela D.112 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	4	4	4	3	3	2	2	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	6	6	6	5	5	4	4	2	2
	4	4	4	4	3	3	1	1	1
	3	3	3	3	2	2	1	1	0
	2	2	2	2	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	2	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	2	2	1	1	1	0
	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	3	3	3	3	3	2	2	1	1
Somatória	33	33	33	31	28	22	18	10	7
Porcentagem	100	100	100	93,94	84,85	66,67	54,55	30,30	21,21

Tabela D.113 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
225,875	16,144	8,072	2431,057
225,875	16,570	8,285	2495,136
207,612	15,269	7,635	2113,357

	3	3	3	2	2	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	5	5	5	4	2	2	2	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	1	0
Somatória	32	32	32	28	19	14	10	4	2
Porcentagem	100	100	100	87,5	59,375	43,75	31,25	12,5	6,25

Tabela D.115 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
341,215	20,220	10,110	4599,569
378,701	20,982	10,491	5297,256
398,885	21,276	10,638	5657,804
271,050	18,134	9,067	3276,734
420,992	22,452	11,226	6301,526
416,186	22,210	11,105	6162,215
272,972	18,153	9,077	3303,542
381,584	20,974	10,487	5335,682
303,729	18,717	9,359	3790,006
351,788	20,332	10,166	4768,318
342,176	20,134	10,067	4592,900
344,098	19,627	9,813	4502,346
417,147	22,351	11,175	6215,666
397,924	21,734	10,867	5765,614
406,574	22,263	11,132	6034,484
352,749	20,480	10,240	4816,157
328,720	19,297	9,648	4228,834
418,108	21,912	10,956	6107,788
350,827	20,144	10,072	4711,326
417,147	22,218	11,109	6178,749
390,235	21,103	10,552	5490,182
313,341	19,419	9,710	4056,593
391,196	21,223	10,612	5534,953
355,632	19,842	9,921	4704,295
391,196	21,928	10,964	5718,751
360,438	20,483	10,242	4922,011
438,293	22,615	11,308	6608,080
293,156	18,921	9,461	3697,891
435,409	22,894	11,447	6645,491
Somatória	10681,47	602,04	149024,76
Média	368,33	20,76	5138,78

Tabela D.116 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon®.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	5	5	5	3	2	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	1	0	0	0
	4	4	4	2	1	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	3	3	3	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	2	2	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	0	0	0
Somatória	29	29	29	19	8	3	0	0	0
Porcentagem	100	100	100	65,52	27,59	10,34	0	0	0

Tabela D.117 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon®.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
584,391	26,340	13,170	10262,083
446,943	23,154	11,577	6899,144
553,633	25,291	12,645	9334,520
621,876	26,867	13,434	11138,758
613,226	26,499	13,250	10833,398
553,633	25,268	12,634	9325,992
663,206	27,974	13,987	12368,269
594,002	26,826	13,413	10623,136
541,138	25,592	12,796	9232,368
540,177	25,097	12,549	9037,881
618,031	26,904	13,452	11085,061
478,662	23,797	11,899	7593,907
510,381	24,180	12,090	8227,358
609,381	26,959	13,480	10952,393
620,915	26,570	13,285	10998,516
517,109	24,946	12,473	8599,886
467,128	23,717	11,858	7385,770
627,643	27,208	13,604	11384,446

	487,313	25,620	12,810	8323,325
	588,235	26,738	13,369	10485,597
	621,876	26,902	13,451	11153,234
	654,556	27,351	13,675	11935,018
	646,867	27,342	13,671	11790,913
Somatória	13160,32	597,14	298,57	228970,97
Média	572,19	25,96	12,98	9955,26

Tabela D.118 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	23	23	22	9	2	0	0	0
Porcentagem	100	100	95,65	39,13	8,70	0	0	0

Tabela D.119 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
688,197	28,166	14,083	12922,620
726,644	29,954	14,977	14510,640
712,226	31,764	15,882	15081,901
808,343	31,653	15,827	17057,811
677,624	28,239	14,119	12756,845
777,586	30,613	15,306	15869,230

	683,391	28,112	14,056	12807,629
	812,188	31,296	15,648	16945,434
	841,023	31,525	15,762	17675,472
	762,207	30,859	15,429	15680,465
	672,818	28,127	14,063	12616,194
	835,256	32,351	16,176	18014,362
	665,129	28,917	14,459	12822,568
	725,682	29,767	14,884	14401,026
	750,673	29,863	14,931	14944,722
Somatória	11138,98	451,21	225,60	224106,92
Média	742,60	30,08	15,04	14940,46

Tabela D.120 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de Teflon[®].

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	15	15	14	5	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	93,33	33,33	6,67	0	0	0	0

Tabela D.121 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
98,039	12,483	6,241	815,872
49,020	8,213	4,107	268,399
126,874	11,679	5,839	987,809
74,971	10,286	5,143	514,090
73,049	9,161	4,580	446,118
78,816	9,589	4,795	503,867
65,359	8,575	4,287	373,629
61,515	8,751	4,375	358,867

71,126	8,769	4,384	415,800	
87,466	9,969	4,985	581,312	
125,913	12,134	6,067	1018,544	
93,233	11,736	5,868	729,451	
75,932	9,044	4,522	457,801	
83,622	9,499	4,750	529,568	
123,030	12,862	6,431	1054,947	
124,952	11,986	5,993	998,462	
144,175	12,637	6,319	1214,643	
98,039	10,225	5,113	668,325	
144,175	12,754	6,377	1225,854	
73,049	9,914	4,957	482,817	
59,592	8,212	4,106	326,237	
127,835	12,491	6,246	1064,529	
70,165	8,585	4,292	401,562	
83,622	9,638	4,819	537,272	
66,321	8,407	4,203	371,693	
144,175	12,953	6,477	1245,042	
99,962	10,760	5,380	717,026	
123,991	12,316	6,158	1018,016	
108,612	10,872	5,436	787,200	
66,321	8,569	4,285	378,873	
55,748	9,081	4,541	337,499	
Somatória	2878,70	322,15	161,07	20831,12
Média	92,86	10,39	5,20	671,97

Tabela D.122 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
3	3	3	3	3	2	2	2	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	2	2	2	2	2	1	1	1	0
2	2	2	2	2	1	1	1	0	0
4	4	4	4	4	3	3	2	2	1
9	9	9	9	6	5	2	2	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
4	4	4	3	3	2	2	2	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	2	2	2	2	1	1	1	1	0
2	2	2	2	2	2	1	1	1	0
Somatória	31	31	30	27	20	15	14	8	3
Porcentagem	100	100	96,77	87,10	64,52	48,39	45,16	25,81	9,68

Tabela D.123 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	208,574	15,191	7,596	2112,315
	224,913	16,296	8,148	2443,389
	205,690	16,118	8,059	2210,154
	139,369	13,574	6,787	1261,190
	236,448	16,290	8,145	2567,877
	221,069	15,854	7,927	2336,574
	155,709	14,156	7,078	1469,517
	199,923	15,214	7,607	2027,740
	161,476	13,312	6,656	1433,093
	184,544	14,822	7,411	1823,542
	235,486	16,351	8,176	2567,008
	253,749	17,534	8,767	2966,140
	269,127	17,101	8,551	3068,294
	196,078	14,952	7,476	1954,534
	163,399	14,421	7,210	1570,893
	191,273	15,270	7,635	1947,162
	236,448	16,339	8,169	2575,475
	223,952	16,466	8,233	2458,417
	181,661	14,826	7,413	1795,580
	242,215	16,897	8,448	2728,460
	185,506	15,104	7,552	1867,959
	208,574	15,480	7,740	2152,513
	171,088	15,714	7,857	1792,263
	205,690	15,172	7,586	2080,455
	148,020	14,550	7,275	1435,803
	194,156	14,650	7,325	1896,281
	158,593	13,360	6,680	1412,517
	174,933	14,088	7,044	1642,969
	199,923	15,061	7,531	2007,396
	184,544	14,839	7,419	1825,610
Somatória	5962,13	459,00	229,50	61431,12
Média	198,74	15,30	7,65	2047,70

Tabela D.124 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	1	1	1	1	1	0
5	5	5	3	2	2	1	0	0
3	3	3	2	1	0	0	0	0

	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	4	4	4	4	3	2	1	1	0
	3	3	2	1	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	1	0	0	0
Somatória	30	30	29	22	14	8	4	3	0
Porcentagem	100	100	96,67	73,33	46,67	26,67	13,33	10,00	0

Tabela D.125 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
325,8362122	20,40820503	10,2041	4433,154816
329,6808777	21,15023804	10,57512	4648,552693
349,8654175	20,06808472	10,03404	4680,752558
413,3025818	21,86585808	10,93293	6024,810398
310,4575195	18,83789063	9,418945	3898,909864
329,6808777	20,80023193	10,40012	4571,625813
355,6324463	21,59446526	10,79723	5119,795003
362,3606262	20,69401169	10,34701	4999,130023
370,0499878	20,74368286	10,37184	5117,466393
334,4867249	19,73692894	9,868464	4401,16048
293,1564636	18,78358078	9,39179	3671,018744
394,0791931	21,30932426	10,65466	5598,374208
273,9331055	18,95429611	9,477148	3461,472797
372,9334717	20,7563858	10,37819	5160,500678
344,0984192	20,07226753	10,03613	4604,557018
311,4186707	19,56263733	9,781319	4061,447008
401,7685547	21,62167549	10,81084	5791,272875
339,292572	19,71321297	9,856606	4459,031154
278,7389526	18,33531189	9,167656	3407,177088
437,3317871	22,27201271	11,13601	6493,506081
398,8850403	22,72735214	11,36368	6043,73385
310,4575195	20,0431881	10,02159	4148,372306
313,3410034	19,14253235	9,571266	3998,760196
352,7489319	20,19830894	10,09915	4749,954604
371,9723206	20,78572464	10,39286	5154,476153
399,8461914	21,56620789	10,7831	5748,777391
415,2249146	22,06311989	11,03156	6107,438047
400,807373	21,55864906	10,77932	5760,576998
331,6032104	19,75487137	9,877436	4367,185845
284,5059509	18,88941574	9,444708	3582,767459

	317,1856995	19,09090233	9,545451	4036,907472
	286,4282837	18,24037933	9,12019	3483,040364
Somatória	11111,11	651,34	325,67	151785,71
Média	347,22	20,35	10,18	4743,30

Tabela D.126 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	3	3	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	5	5	3	3	2	1	0	0	0
	3	3	2	2	0	0	0	0	0
	3	3	2	1	1	1	0	0	0
Somatória	32	32	21	12	6	2	0	0	0
Porcentagem	100	100	65,63	37,5	18,75	6,25	0	0	0

Tabela D.127 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
675,702	27,674	13,837	12466,188
602,653	27,040	13,520	10863,807
486,351	23,649	11,825	7667,886
554,594	26,031	13,016	9624,574
459,439	23,487	11,743	7193,797
575,740	26,139	13,070	10033,025
617,070	27,090	13,545	11144,124
661,284	27,006	13,503	11905,553
530,565	25,484	12,742	9014,100
533,449	25,033	12,516	8902,485
464,245	23,484	11,742	7268,299
634,371	27,447	13,724	11607,805
458,478	23,074	11,537	7052,675
456,555	23,122	11,561	7037,747

	585,352	25,779	12,889	10059,854
	570,934	25,409	12,704	9671,083
	493,080	23,879	11,939	7849,350
	668,973	27,657	13,829	12334,621
	639,177	27,540	13,770	11735,477
	501,730	24,195	12,097	8092,859
	477,701	23,284	11,642	7415,117
	618,993	26,903	13,451	11101,649
	521,915	24,774	12,387	8619,836
Somatória	12788,35	585,18	292,59	218661,91
Média	556,02	25,44	12,72	9507,04

Tabela D.128 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	4	4	3	2	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	23	23	14	5	2	1	1	0	0
Porcentagem	100	100	60,87	21,74	8,70	4,35	4,35	0	0

Tabela D.129 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
733,372	32,119	16,060	15703,450
696,847	28,452	14,226	13217,988
778,547	30,232	15,116	15691,117
708,381	29,188	14,594	13784,177
875,625	32,591	16,295	19024,957
835,256	31,777	15,888	17694,459
697,809	28,660	14,330	13332,785

	754,517	29,747	14,874	14963,121
	756,440	30,043	15,022	15150,706
Somatória	6836,79	272,81	136,40	138562,76
Média	759,64	30,31	15,16	15395,86

Tabela D.130 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	9	9	5	0	0	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	55,56	0	0	0	0	0	0

Tabela D.131 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
63,437	8,238	4,119	348,409
64,398	8,556	4,278	367,320
111,496	10,966	5,483	815,124
64,398	9,039	4,519	388,054
68,243	9,511	4,755	432,686
137,447	12,853	6,426	1177,725
126,874	11,991	5,996	1014,245
122,068	12,350	6,175	1005,065
80,738	9,364	4,682	504,047
74,010	9,029	4,515	445,511
123,030	11,926	5,963	978,135
83,622	9,708	4,854	541,193
125,913	12,056	6,028	1012,039
137,447	12,093	6,047	1108,123
114,379	11,011	5,506	839,644
83,622	9,300	4,650	518,468
102,845	10,056	5,028	689,479
102,845	10,524	5,262	721,588
77,855	9,585	4,793	497,500
131,680	12,762	6,381	1120,327

74,010	9,202	4,601	454,018	
117,263	11,528	5,764	901,230	
101,884	11,297	5,648	767,321	
102,845	10,343	5,171	709,128	
98,039	10,376	5,188	678,156	
74,010	8,718	4,359	430,160	
120,146	11,714	5,857	938,259	
102,845	10,350	5,175	709,654	
121,107	12,088	6,044	975,975	
95,156	11,357	5,678	720,438	
114,379	11,320	5,660	863,150	
86,505	10,093	5,046	582,039	
103,806	10,660	5,330	737,695	
Somatória	3308,34	349,97	174,98	23991,90
Média	100,25	10,61	5,30	727,03

Tabela D.132 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
5	5	5	4	4	3	3	3	2	
5	5	5	4	4	3	3	2	1	
4	4	4	3	3	3	2	1	1	
3	3	3	3	2	2	1	1	1	
3	3	2	1	1	1	1	0	0	
8	8	8	7	5	4	2	1	1	
5	5	5	4	4	4	3	3	2	
Somatória	33	33	32	26	23	20	15	11	8
Porcentagem	100	100	96,97	78,79	69,70	60,61	45,45	33,33	24,24

Tabela D.133 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
239,3310242	16,99767876	8,498839	2712,04791
208,5736237	15,37277317	7,686387	2137,570004
225,8746643	16,06192589	8,030963	2418,654745
177,8162231	14,31243229	7,156216	1696,655102
154,7481689	13,73374653	6,866873	1416,848085
277,777771	17,46653366	8,733267	3234,543192
242,2145233	17,00636292	8,503181	2746,125391
195,1172638	15,37520504	7,687603	1999,978625
255,6708984	16,96274948	8,481375	2891,254267
220,1076508	17,5100956	8,755048	2569,404004

196,0784302	15,40435982	7,70218	2013,641794	
156,6705017	13,6140337	6,807017	1421,944993	
217,2241364	16,13602257	8,068011	2336,755711	
158,5928497	13,57489872	6,787449	1435,254582	
178,7773895	14,36829662	7,184148	1712,484375	
215,3018036	16,81701088	8,408505	2413,821849	
153,7870026	13,03198814	6,515994	1336,100263	
247,0203705	16,91797829	8,458989	2786,056843	
171,0880432	13,96741199	6,983706	1593,104791	
231,6416779	17,07289314	8,536447	2636,529076	
203,7677765	15,00992393	7,504962	2039,025884	
167,2433624	14,01761532	7,008808	1562,902079	
192,2337494	15,65429974	7,82715	2006,189822	
148,9811554	13,28164387	6,640822	1319,143099	
179,7385559	14,95863152	7,479316	1792,428551	
154,7481689	13,98805523	6,994028	1443,083956	
249,9038849	17,07195663	8,535978	2844,23219	
269,1272583	17,29780388	8,648902	3103,540355	
223,9523163	16,87250328	8,436252	2519,090794	
234,525177	16,86624908	8,433125	2637,040035	
180,6997223	14,62524891	7,312624	1761,852278	
163,3986969	13,83907318	6,919537	1507,524349	
185,5055695	14,74252605	7,371263	1823,213794	
Somatória	6677,24	509,93	254,96	69868,04
Média	202,34	15,45	7,73	2117,21

Tabela D.134 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	4	4	4	3	3	2	2	2	1
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	4	4	4	3	2	1	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	4	4	3	3	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	7	7	7	6	6	5	3	2	1
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	1	1	0	0	0	0
Somatória	33	33	29	19	15	9	5	4	2
Porcentagem	100	100	87,88	57,58	45,45	27,27	15,15	12,12	6,06

Tabela D.135 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	298,923	18,790	9,395	3744,422
	284,506	18,703	9,351	3547,373
	372,933	20,840	10,420	5181,326
	312,380	19,154	9,577	3988,787
	336,409	19,610	9,805	4397,993
	371,011	20,759	10,379	5134,441
	398,885	21,629	10,814	5751,614
	366,205	21,274	10,637	5193,748
	409,458	21,806	10,903	5952,426
	418,108	22,256	11,128	6203,646
	448,866	22,694	11,347	6791,067
	320,069	19,854	9,927	4236,340
	320,069	19,417	9,708	4143,178
	303,729	18,674	9,337	3781,144
	433,487	22,121	11,060	6392,663
	347,943	19,896	9,948	4615,025
	272,972	18,131	9,066	3299,528
	339,293	19,911	9,955	4503,688
	285,467	18,476	9,238	3516,162
	390,235	21,510	10,755	5595,938
	272,972	18,117	9,058	3296,918
	294,118	18,789	9,394	3684,074
	370,050	20,570	10,285	5074,508
	377,739	21,426	10,713	5395,702
	431,565	22,403	11,201	6445,457
	314,302	18,871	9,435	3954,045
	277,778	18,121	9,060	3355,667
	396,002	21,180	10,590	5591,523
	400,807	21,412	10,706	5721,372
	297,962	18,930	9,465	3760,312
	416,186	22,475	11,237	6235,791
	424,837	22,606	11,303	6402,442
Somatória	11305,27	650,40	325,20	154888,32
Média	353,29	20,32	10,16	4840,26

Tabela D.136 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	3	3	2	1	1	1	1	0	0
	2	2	1	1	1	1	1	0	0
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	4	4	3	1	1	1	1	0	0
	2	2	1	1	1	1	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	1	0	0	0	0	0
Somatória	32	32	24	14	7	4	3	0	0
Porcentagem	100	100	75,00	43,75	21,88	12,50	9,38	0	0

Tabela D.137 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
672,818	27,750	13,875	12447,257
620,915	26,975	13,488	11166,220
590,158	26,389	13,195	10382,591
573,818	26,259	13,129	10045,233
470,012	23,483	11,742	7358,311
594,963	26,701	13,351	10590,876
650,711	27,447	13,724	11906,742
496,924	24,274	12,137	8041,568
470,012	23,392	11,696	7329,559
592,080	26,330	13,165	10393,136
464,245	23,520	11,760	7279,316
618,993	26,840	13,420	11075,640
579,585	26,130	13,065	10096,368
448,866	23,011	11,505	6885,821
479,623	23,762	11,881	7597,938
605,536	26,335	13,167	10631,003
587,274	25,896	12,948	10138,793
492,118	23,801	11,901	7808,701

	442,138	23,078	11,539	6802,418
	511,342	24,218	12,109	8255,800
	547,866	25,778	12,889	9415,300
	444,060	23,007	11,503	6810,920
Somatória	11954,06	554,38	277,19	202459,51
Média	543,37	25,20	12,60	9202,71

Tabela D.138 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	2	1	1	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	22	22	15	7	4	2	0	0	0
Porcentagem	100	100	68,18	31,82	18,18	9,09	0	0	0

Tabela D.139 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
763,168	29,778	14,889	15150,210
808,343	31,032	15,516	16722,980
904,460	32,973	16,487	19882,105
705,498	29,005	14,503	13641,987
729,527	29,346	14,673	14272,376
693,964	28,283	14,141	13084,807
686,274	28,655	14,328	13110,221
609,381	28,341	14,171	11513,701
744,906	29,801	14,900	14799,180
861,207	32,244	16,122	18512,567
789,120	31,922	15,961	16793,598

	753,556	31,570	15,785	15859,949
	912,149	32,572	16,286	19807,044
	858,324	32,031	16,016	18328,816
Somatória	10819,88	427,55	213,78	221479,54
Média	772,85	30,54	15,27	15819,97

Tabela D.140 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	3	3	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Somatória	14	14	9	4	2	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	64,29	28,57	14,29	0	0	0	0

Tabela D.141 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
63,437	8,798	4,399	372,062
118,224	10,524	5,262	829,421
120,146	11,480	5,740	919,509
82,661	9,799	4,899	539,989
150,904	12,607	6,303	1268,254
99,000	10,335	5,168	682,128
130,719	11,975	5,987	1043,548
101,884	10,507	5,253	713,658
114,379	11,058	5,529	843,176
143,214	12,153	6,077	1160,359
148,981	12,968	6,484	1287,981
131,680	11,832	5,916	1038,736
125,913	11,997	5,998	1007,017
72,088	8,818	4,409	423,765
96,117	10,515	5,258	673,794
58,631	8,054	4,027	314,820
72,088	9,616	4,808	462,120

80,738	9,482	4,741	510,367	
99,000	10,637	5,319	702,045	
135,525	12,012	6,006	1085,288	
89,389	10,284	5,142	612,848	
140,331	12,958	6,479	1212,308	
112,457	10,868	5,434	814,751	
60,554	8,017	4,008	323,624	
60,554	9,237	4,619	372,895	
148,981	12,815	6,407	1272,757	
72,088	8,897	4,449	427,588	
138,408	12,351	6,175	1139,642	
135,525	12,189	6,095	1101,283	
118,224	11,373	5,686	896,340	
143,214	12,528	6,264	1196,165	
128,797	11,921	5,960	1023,567	
Somatória	3493,85	348,60	174,30	26271,81
Média	109,18	10,89	5,45	820,99

Tabela D.142 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
4	4	4	3	3	2	2	1	1	
4	4	4	3	3	1	1	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	0	0	
3	3	3	2	2	1	0	0	0	
4	4	4	4	3	3	3	2	1	
6	6	6	4	4	3	3	2	1	
3	3	3	3	2	1	1	1	0	
3	3	3	2	1	1	0	0	0	
4	4	4	3	3	2	1	1	0	
Somatória	32	32	32	25	22	15	12	7	3
Porcentagem	100	100	100	78,13	68,75	46,88	37,50	21,88	9,38

Tabela D.143 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
173,972	13,914	6,957	1613,761
236,448	16,964	8,482	2674,127
117,263	13,354	6,677	1043,976
182,622	14,951	7,476	1820,293
156,671	14,981	7,490	1564,690
207,612	15,410	7,705	2132,875

183,583	14,465	7,232	1770,336	
229,719	16,547	8,273	2534,101	
170,127	13,603	6,801	1542,807	
152,826	13,081	6,540	1332,696	
230,681	16,063	8,032	2470,307	
212,418	15,878	7,939	2248,510	
195,117	15,380	7,690	2000,621	
270,088	17,804	8,902	3205,696	
155,709	13,398	6,699	1390,829	
159,554	13,822	6,911	1470,236	
212,418	15,363	7,682	2175,594	
192,234	14,775	7,387	1893,457	
259,516	17,597	8,798	3044,450	
192,234	14,733	7,366	1888,061	
196,078	15,096	7,548	1973,378	
148,981	13,212	6,606	1312,260	
146,098	13,016	6,508	1267,773	
195,117	14,957	7,478	1945,515	
176,855	14,242	7,121	1679,171	
272,972	17,666	8,833	3214,923	
207,612	16,402	8,201	2270,133	
151,865	14,914	7,457	1509,934	
189,350	15,564	7,782	1964,636	
155,709	13,259	6,629	1376,348	
Somatória	5731,45	450,41	225,20	58331,49
Média	191,05	15,01	7,51	1944,38

Tabela D.144 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
3	3	3	2	1	1	1	1	0	0
3	3	3	2	1	1	1	0	0	0
2	2	1	1	1	1	0	0	0	0
2	2	2	2	1	1	0	0	0	0
3	3	3	3	1	1	1	1	0	0
2	2	2	1	1	1	0	0	0	0
2	2	2	2	1	0	0	0	0	0
2	2	2	1	1	0	0	0	0	0
4	4	4	3	2	1	0	0	0	0
2	2	2	2	2	1	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	2	1	0	0	0	0	0
Somatória	30	30	29	22	14	8	4	3	0
Porcentagem	100	100	96,67	73,33	46,67	26,67	13,33	10	0

Tabela D.145 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	397,924	21,712	10,856	5759,931
	370,050	20,943	10,471	5166,616
	363,322	20,669	10,334	5006,245
	283,545	19,157	9,578	3621,165
	393,118	21,054	10,527	5517,821
	303,729	18,744	9,372	3795,343
	294,118	18,805	9,403	3687,327
	335,448	19,798	9,899	4427,540
	357,555	20,508	10,254	4888,577
	350,827	20,374	10,187	4765,048
	432,526	22,143	11,072	6385,003
	445,021	22,908	11,454	6796,254
	387,351	20,778	10,389	5365,568
	302,768	19,210	9,605	3877,483
	388,312	21,123	10,562	5468,244
	299,885	18,609	9,305	3720,408
	245,098	18,015	9,008	2943,709
	391,196	21,731	10,866	5667,396
	339,293	19,855	9,928	4491,204
	301,807	18,652	9,326	3752,809
	372,933	20,606	10,303	5123,156
	382,545	21,202	10,601	5407,089
Somatória	7738,37	446,60	223,30	105633,94
Média	351,74	20,30	10,15	4801,54

Tabela D.146 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	2	2	2	1	0	0	0	0	0
3	3	3	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	2	2	2	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Somatória	22	22	20	12	4	3	0	0	0
Porcentagem	100	100	90,91	54,55	18,18	13,64	0	0	0

Tabela D.147 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	479,623	23,690	11,845	7574,835
	554,594	25,469	12,735	9416,735
	642,061	26,853	13,426	11494,110
	643,983	27,700	13,850	11892,291
	542,099	24,998	12,499	9034,181
	570,934	25,937	12,968	9872,059
	605,536	26,656	13,328	10760,984
	613,226	26,582	13,291	10867,066
	448,866	23,003	11,501	6883,434
	535,371	25,007	12,504	8925,500
	488,274	24,027	12,013	7821,032
	589,196	26,231	13,115	10303,293
	470,012	23,458	11,729	7350,358
	474,817	23,249	11,625	7359,471
Somatória	7658,59	352,86	176,43	129555,35
Média	547,04	25,20	12,60	9253,95

Tabela D.148 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>								
5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000	
2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	14	14	10	5	2	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	71,43	35,71	14,29	0	0	0	0

Tabela D.149 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	881,392	32,998	16,499	19389,194
	699,731	31,146	15,573	14529,208
	794,887	30,433	15,217	16127,282
	656,478	28,008	14,004	12257,830
	916,955	32,734	16,367	20010,507
	841,984	32,240	16,120	18096,920
	851,596	32,613	16,307	18515,621
	781,430	30,323	15,162	15796,947
Somatória	6424,45	250,50	125,25	134723,51
Média	803,06	31,31	15,66	16840,44

D.150 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Somatória	8	8	5	2	1	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	62,5	25	12,5	0	0	0	0

Tabela D.151 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	91,311	9,716	4,858	591,463
	80,738	8,502	4,251	457,604
	74,010	8,462	4,231	417,509
	146,098	12,862	6,431	1252,756

125,913	11,683	5,842	980,732	
116,301	10,633	5,316	824,421	
100,923	11,011	5,505	740,813	
77,855	8,277	4,138	429,602	
108,612	11,056	5,528	800,576	
90,350	10,036	5,018	604,483	
112,457	11,196	5,598	839,408	
92,272	10,473	5,237	644,256	
86,505	10,093	5,047	582,080	
77,855	9,241	4,620	479,627	
76,894	9,628	4,814	493,544	
110,534	10,646	5,323	784,491	
49,020	8,194	4,097	267,790	
70,165	8,607	4,304	402,626	
74,010	9,282	4,641	457,998	
124,952	11,447	5,723	953,519	
102,845	10,705	5,352	733,960	
93,233	9,987	4,994	620,751	
144,175	12,724	6,362	1222,970	
86,505	9,823	4,912	566,507	
63,437	8,732	4,366	369,277	
89,389	9,771	4,886	582,303	
69,204	8,458	4,229	390,226	
93,233	10,752	5,376	668,279	
145,136	12,766	6,383	1235,220	
69,204	8,244	4,122	380,352	
75,932	8,929	4,465	452,005	
107,651	10,585	5,293	759,682	
105,729	11,023	5,512	776,995	
144,175	12,906	6,453	1240,452	
Somatória	3276,62	346,45	173,23	23004,28
Média	96,37	10,19	5,09	676,60

Tabela D.152 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	2	2	1	0	0	0
4	4	4	3	1	0	0	0	0
6	6	6	5	5	5	4	2	1
7	7	6	6	5	4	4	3	2
3	3	3	2	2	2	2	1	1
3	3	3	3	3	2	2	1	1
4	4	4	3	3	3	2	1	1
5	5	5	5	4	3	2	1	1

Somatória	34	34	33	29	25	20	16	9	7
Porcentagem	100	100	97,06	85,29	73,53	58,82	47,06	26,47	20,59

Tabela D.153 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	250,865	16,995	8,497	2842,292
	199,923	15,281	7,640	2036,656
	165,321	13,595	6,797	1498,327
	240,292	17,347	8,674	2778,972
	151,865	13,960	6,980	1413,365
	186,467	14,562	7,281	1810,273
	244,137	16,533	8,266	2690,838
	180,700	14,732	7,366	1774,688
	163,399	13,751	6,875	1497,922
	216,263	15,611	7,806	2250,781
	248,943	16,566	8,283	2749,391
	208,574	15,791	7,896	2195,734
	166,282	14,134	7,067	1566,793
	173,972	14,015	7,008	1625,491
	198,962	15,069	7,535	1998,826
	202,807	15,459	7,729	2090,109
	196,078	15,145	7,573	1979,764
	142,253	13,002	6,501	1233,020
	209,535	15,840	7,920	2212,716
	153,787	14,500	7,250	1486,641
	174,933	14,721	7,360	1716,737
	161,476	13,309	6,655	1432,732
	272,011	17,758	8,879	3220,249
	236,448	16,501	8,251	2601,088
	192,234	14,605	7,303	1871,766
	264,321	17,866	8,933	3148,195
	177,816	15,092	7,546	1789,010
	201,845	15,612	7,806	2100,826
	227,797	16,537	8,269	2511,428
	216,263	16,059	8,030	2315,347
Somatória	6025,57	459,95	229,97	62439,98
Média	200,85	15,33	7,67	2081,33

Tabela D.154 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>								
10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000	

	3	3	3	2	2	1	0	1	0
	6	6	6	5	3	2	1	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	3	3	3	2	2	1	1	1	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	2	1	1	0	0
	2	2	2	2	1	1	0	0	0
	4	4	4	3	2	1	1	1	0
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
Somatória	30	30	29	22	14	8	4	3	0
Porcentagem	100	100	96,67	73,33	46,67	26,67	13,33	10,00	0

Tabela D.155 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$).
Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
439,254	22,846	11,423	6689,993
328,720	19,258	9,629	4220,314
284,506	18,159	9,079	3444,184
273,933	18,275	9,137	3337,331
338,331	19,660	9,830	4434,374
329,681	19,610	9,805	4309,979
380,623	21,184	10,592	5375,478
361,399	20,111	10,056	4845,502
288,351	18,279	9,139	3513,788
449,827	22,402	11,201	6718,067
346,021	19,564	9,782	4513,069
388,312	21,263	10,631	5504,406
350,827	19,916	9,958	4657,994
343,137	19,870	9,935	4545,345
414,264	21,920	10,960	6053,679
427,720	22,007	11,003	6275,157
380,623	21,250	10,625	5392,033
393,118	21,442	10,721	5619,383
327,759	19,440	9,720	4247,824
332,564	19,883	9,942	4408,316
301,807	18,881	9,440	3798,869
360,438	20,562	10,281	4940,994
309,496	20,230	10,115	4174,165
420,031	22,265	11,133	6234,762
362,361	20,481	10,241	4947,786
432,526	22,610	11,305	6519,678
284,506	18,305	9,153	3471,944
296,040	18,676	9,338	3685,834

	327,759	19,572	9,786	4276,622
	379,662	21,051	10,526	5328,274
	267,205	18,077	9,039	3220,205
	298,923	18,524	9,262	3691,571
Somatória	11219,72	645,57	322,79	152396,92
Média	350,62	20,17	10,09	4762,40

Tabela D.156 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	1	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	3	3	2	2	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	0	0	0	0
	2	2	2	2	0	0	0	0	0
	4	4	4	3	1	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	3	3	2	1	1	0	0	0	0
Somatória	32	32	30	22	11	3	1	1	0
Porcentagem	100	100	93,75	68,75	34,38	9,38	3,13	3,13	0

Tabela D.157 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
626,682	27,136	13,568	11336,984
501,730	24,154	12,077	8079,298
650,711	27,683	13,842	12009,179
627,643	27,425	13,713	11475,488
508,458	24,188	12,094	8199,131
591,119	27,554	13,777	10858,294
501,730	24,573	12,286	8219,175
470,973	23,431	11,715	7356,796
455,594	23,029	11,515	6994,696
643,022	27,453	13,726	11768,586
457,516	23,029	11,515	7024,102
490,196	24,022	12,011	7850,226

	492,118	24,041	12,020	7887,338
	515,186	26,079	13,039	8956,996
	525,759	24,725	12,362	8666,216
	525,759	24,931	12,465	8738,433
	497,885	24,253	12,126	8050,013
	483,468	23,633	11,816	7617,129
	631,488	27,466	13,733	11562,922
	466,167	23,419	11,710	7278,165
Somatória	10663,21	502,22	251,11	179929,17
Média	533,16	25,11	12,56	8996,46

Tabela D.158 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	3	3	2	1	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Somatória	20	20	18	11	3	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	90	55	15	5	0	0	0

Tabela D.159 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
713,187	29,790	14,895	14163,749
825,644	31,615	15,808	17401,861
746,828	30,754	15,377	15312,113
717,993	29,186	14,593	13970,370
770,857	30,373	15,186	15608,676
747,789	30,107	15,053	15008,973
777,586	30,004	15,002	15553,703
687,236	28,235	14,118	12936,285
723,760	30,287	15,144	14613,874

	745,867	29,595	14,798	14716,140
	720,877	30,848	15,424	14825,173
	866,974	32,733	16,367	18919,161
	685,313	29,068	14,534	13280,555
	784,314	31,072	15,536	16246,835
	760,284	29,962	14,981	15186,217
	694,925	28,002	14,001	12972,993
	685,313	28,523	14,262	13031,516
Somatória	12654,75	510,16	255,08	253748,20
Média	744,40	30,01	15,00	14926,36

Tabela D.160 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrifuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 3066 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	17	17	12	7	2	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	70,59	41,18	11,76	0	0	0	0

Apêndice E

Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) e resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o polvilho doce e os substratos construídos de aço inoxidável e de vidro, para todas as faixas de diâmetros investigadas.

Tabela E.1 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	126,874	11,871	5,936	875,968
	84,583	9,836	4,918	498,255
	112,457	10,979	5,490	692,979
	75,932	9,730	4,865	482,285
	117,263	11,308	5,654	757,149
	68,243	8,244	4,122	293,379
	148,020	12,544	6,272	1033,540
	146,098	12,785	6,392	1094,151
	88,428	10,348	5,174	580,259
	135,525	12,340	6,170	983,839
	129,758	11,926	5,963	888,246
	90,350	9,802	4,901	493,114
	74,971	8,864	4,432	364,696
	109,573	10,768	5,384	653,670
	102,845	10,508	5,254	607,469
	140,331	12,538	6,269	1032,121
	115,340	11,552	5,776	807,246
	108,612	10,872	5,436	672,875
	129,758	12,161	6,080	941,663
	77,855	8,803	4,402	357,200
	123,991	11,416	5,708	778,921
	115,340	11,199	5,599	735,361
	121,107	11,434	5,717	782,797
	129,758	11,832	5,916	867,267
	92,272	10,004	5,002	524,214
	115,340	11,238	5,619	743,130
	116,301	11,311	5,655	757,643
	111,496	10,771	5,385	654,273
	154,748	12,929	6,464	1131,593
	107,651	10,786	5,393	656,960
Somatória	3370,82	330,70	165,35	21742,26
Média	112,36	11,02	5,51	724,74

Tabela E.2 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	2	2	2	1	1	1
4	4	4	4	4	3	3	3	2
3	3	3	3	3	3	2	2	1

	5	5	5	5	4	3	3	2	2
	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	4	4	4	4	3	3	3	2	2
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	5	5	5	5	4	4	3	3	2
	3	3	3	3	3	2	2	1	1
Somatória	30	30	30	30	27	24	20	16	13
Porcentagem	100	100	100	100	90	80	66,67	53,33	43,33

Tabela E.3 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)	
269,127	17,161	8,581	2646,255	
275,855	17,858	8,929	2981,758	
194,156	14,990	7,495	1763,542	
278,739	17,705	8,852	2905,821	
212,418	15,113	7,557	1807,433	
220,108	16,163	8,081	2210,751	
235,486	16,364	8,182	2294,315	
271,050	17,772	8,886	2938,899	
191,273	14,694	7,347	1661,242	
167,243	13,603	6,801	1317,888	
177,816	14,096	7,048	1466,533	
151,865	13,018	6,509	1155,007	
214,341	15,550	7,775	1968,790	
157,632	13,322	6,661	1237,874	
205,690	15,374	7,687	1902,592	
201,845	15,526	7,763	1959,802	
179,739	14,309	7,155	1534,113	
256,632	17,082	8,541	2609,743	
229,719	16,284	8,142	2261,029	
152,826	13,245	6,622	1216,555	
247,982	16,730	8,365	2451,644	
190,311	14,772	7,386	1687,957	
226,836	15,982	7,991	2137,325	
172,049	14,046	7,023	1450,909	
174,933	14,318	7,159	1536,844	
181,661	14,422	7,211	1570,578	
205,690	15,874	7,937	2094,296	
147,059	13,045	6,522	1162,248	
198,962	15,131	7,565	1813,805	
235,486	16,650	8,325	2416,988	
198,001	15,309	7,655	1878,692	
Somatória	6422,53	475,51	237,75	60041,23
Média	207,18	15,34	7,67	1936,81

Tabela E.4 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	3	2	2	2	2	1	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	7	7	7	6	4	3	2	2	1
	2	2	2	2	1	1	1	1	0
	4	4	4	3	3	3	3	2	2
	4	4	4	3	2	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	4	4	4	4	3	2	2	1	1
	3	3	3	3	2	1	1	1	0
Somatória	31	31	31	27	21	15	14	11	8
Porcentagem	100	100	100	87,10	67,74	48,39	45,16	35,48	25,81

Tabela E.5 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
313,341	19,021	9,511	3603,552
341,215	20,015	10,007	4198,047
362,361	20,168	10,084	4295,054
381,584	21,334	10,667	5084,465
334,487	19,765	9,883	4042,944
417,147	21,927	10,963	5519,725
317,186	18,927	9,463	3550,112
288,351	18,287	9,144	3202,184
342,176	20,207	10,104	4320,506
414,264	22,186	11,093	5717,572
458,478	22,881	11,440	6271,919
326,797	19,458	9,729	3857,105
281,622	18,107	9,054	3108,512
376,778	20,851	10,425	4746,274
341,215	19,798	9,899	4062,918
356,594	20,328	10,164	4398,013
371,011	20,891	10,446	4774,049
367,166	20,483	10,241	4499,409
411,380	21,753	10,877	5389,700
300,846	18,873	9,436	3519,695
320,069	19,219	9,609	3716,775
368,128	20,758	10,379	4683,229
408,497	22,134	11,067	5678,010
344,098	19,942	9,971	4152,308

	445,982	22,540	11,270	5996,334
	286,428	18,368	9,184	3244,959
	364,283	20,719	10,359	4656,702
Somatória	9641,48	548,94	274,47	120290,07
Média	357,09	20,33	10,17	4455,19

Tabela E.6 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	4	4	4	3	2	2	2	1	1
	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	3	3	3	2	2	1	0	0	1
	2	2	2	2	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	4	4	4	3	2	1	0	0	0
	3	3	3	3	2	2	1	1	1
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	2	1	0	0	0
Somatória	27	27	27	21	14	9	5	4	3
Porcentagem	100	100	100	77,78	51,85	33,33	18,52	14,81	11,11

Tabela E.7 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
459,439	23,344	11,672	6660,630
562,284	25,996	12,998	9198,717
596,886	26,267	13,134	9489,288
483,468	23,746	11,873	7010,528
554,594	25,434	12,717	8615,118
601,692	26,674	13,337	9937,521
609,381	26,690	13,345	9954,747
629,566	27,094	13,547	10414,571
519,992	24,643	12,321	7835,477
570,934	25,535	12,767	8717,765
498,847	24,226	12,113	7444,860
567,090	25,532	12,766	8715,206
596,886	27,098	13,549	10418,405
466,167	23,827	11,914	7083,192
644,944	27,163	13,582	10494,341

	537,293	24,704	12,352	7894,061
	501,730	24,130	12,065	7356,451
	638,216	27,544	13,772	10942,019
	666,090	27,982	13,991	11471,568
	440,215	23,162	11,581	6506,237
Somatória	11145,71	510,79	255,40	176160,70
Média	557,29	25,54	12,77	8808,04

Tabela E.8 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	3	2	1	1	1	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	20	20	18	9	5	4	2	0	0
Porcentagem	100	100	90	45	25	20	10	0	0

Tabela E.9 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
693,003	28,347	14,173	11926,540
767,013	30,476	15,238	14820,884
865,052	32,193	16,096	17469,071
750,673	30,256	15,128	14502,092
793,925	31,776	15,888	16799,636
732,411	30,861	15,431	15390,406
819,877	31,185	15,592	15878,974
689,158	28,665	14,333	12333,230
685,313	28,941	14,470	12691,926
853,518	32,011	16,006	17175,334
692,042	29,884	14,942	13974,295

	747,789	29,740	14,870	13773,257
	646,867	28,417	14,209	12015,742
	790,081	32,142	16,071	17386,818
	885,236	32,322	16,161	17679,888
	764,129	30,206	15,103	14431,028
	920,800	32,988	16,494	18796,724
	864,091	32,580	16,290	18107,873
	681,469	28,275	14,138	11836,543
	784,314	30,478	15,239	14824,020
Somatória	15426,76	611,75	305,87	301814,28
Média	771,34	30,59	15,29	15090,71

Tabela E.10 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	2	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Somatória	20	20	11	5	2	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	55	25	10	5	0	0	0

Tabela E.11 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
133,602	12,211	6,105	953,306
131,680	12,317	6,159	978,496
139,369	12,114	6,057	930,903
154,748	12,899	6,450	1123,767
97,078	10,483	5,242	603,247
126,874	11,492	5,746	794,711

147,059	12,249	6,125	962,386	
109,573	10,890	5,445	676,270	
131,680	12,727	6,364	1079,471	
65,359	8,736	4,368	349,059	
142,253	12,444	6,222	1008,925	
99,000	10,358	5,179	581,895	
112,457	10,566	5,283	617,671	
83,622	9,684	4,842	475,462	
77,855	8,800	4,400	356,778	
137,447	12,404	6,202	999,182	
146,098	12,942	6,471	1134,900	
141,292	12,447	6,223	1009,590	
125,913	11,422	5,711	780,303	
107,651	10,676	5,338	637,126	
63,437	8,042	4,021	272,320	
99,962	10,428	5,214	593,775	
131,680	12,307	6,153	975,961	
143,214	12,919	6,460	1129,073	
145,136	12,472	6,236	1015,683	
113,418	10,748	5,374	650,101	
93,233	10,349	5,174	580,275	
121,107	11,425	5,712	780,758	
142,253	12,432	6,216	1006,125	
135,525	12,098	6,049	927,093	
113,418	10,795	5,397	658,619	
127,835	12,199	6,099	950,456	
102,845	10,802	5,401	659,931	
108,612	10,668	5,334	635,697	
Somatória	4052,29	385,54	192,77	26889,32
Média	119,18	11,34	5,67	790,86

Tabela E.12 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
3	3	3	3	3	3	3	2	2
2	2	2	2	2	2	1	1	1
3	3	3	3	2	2	2	1	1
2	2	2	2	2	2	2	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0
4	4	4	4	4	3	3	2	1
2	2	2	2	2	2	2	1	1
5	5	5	5	5	5	5	4	3
2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	0	0
3	3	3	3	3	2	2	2	1

	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	3	3	3	3	3	3	2	2	1
Somatória	34	34	34	34	33	31	29	21	15
Porcentagem	100	100	100	100	97,06	91,18	85,29	61,76	44,12

Tabela E.13 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	228,758	16,691	8,345	2434,636
	177,816	14,065	7,033	1456,975
	206,651	15,743	7,872	2042,978
	210,496	15,597	7,799	1986,779
	222,030	15,860	7,930	2088,807
	224,913	16,194	8,097	2223,496
	211,457	15,686	7,843	2020,859
	226,836	16,231	8,115	2238,796
	206,651	15,064	7,532	1790,021
	180,700	14,078	7,039	1460,850
	227,797	16,078	8,039	2176,021
	243,176	16,928	8,464	2539,967
	201,845	15,129	7,564	1813,078
	151,865	13,149	6,574	1190,328
	222,991	15,828	7,914	2076,431
	237,409	16,596	8,298	2393,316
	242,215	16,787	8,393	2476,876
	152,826	13,648	6,824	1331,182
	249,904	17,045	8,523	2593,105
	213,379	15,495	7,748	1948,025
	218,185	15,844	7,922	2082,700
	221,069	15,641	7,820	2003,336
	180,700	14,838	7,419	1710,577
	234,525	16,325	8,162	2277,828
	281,622	17,960	8,980	3033,478
	203,768	15,272	7,636	1865,059
	247,020	16,951	8,476	2550,418
	196,078	14,977	7,489	1759,050
	143,214	13,019	6,510	1155,493
	212,418	15,419	7,709	1919,341
	185,506	14,335	7,167	1542,337
	184,544	14,432	7,216	1573,943
	183,583	14,272	7,136	1522,194
Somatória	6931,95	511,18	255,59	65278,28
Média	210,06	15,49	7,75	1978,13

Tabela E.14 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	3	3	3	3	3	3	3	2	1
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	4	4	4	4	4	3	3	2
	5	5	5	4	4	4	4	3	3
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	5	5	5	4	3	3	3	3	2
	4	4	4	4	3	3	3	2	1
	4	4	4	4	4	4	4	3	2
Somatória	33	33	33	31	27	27	23	18	13
Porcentagem	100	100	100	93,94	81,82	81,82	69,70	54,55	39,39

Tabela E.15 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	392,157	21,478	10,739	5187,564
	329,681	19,406	9,703	3826,548
	329,681	19,188	9,594	3698,802
	328,720	19,537	9,768	3904,340
	273,933	18,183	9,092	3147,946
	445,021	22,577	11,289	6025,828
	399,846	21,383	10,691	5119,210
	450,788	22,664	11,332	6095,529
	347,943	19,852	9,926	4096,390
	370,050	21,200	10,600	4988,717
	340,254	19,946	9,973	4154,848
	319,108	19,106	9,553	3651,855
	348,904	20,275	10,137	4363,903
	403,691	21,511	10,756	5212,028
	442,138	22,603	11,301	6046,102
	331,603	19,198	9,599	3704,988
	325,836	19,164	9,582	3685,386
	449,827	22,915	11,458	6300,352
	361,399	20,642	10,321	4605,256
Somatória	6990,58	390,83	195,41	87815,59
Média	367,93	20,57	10,28	4621,87

Tabela E.16 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	2	2	1	0
	2	2	2	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	2	2	2	1	1	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Somatória	19	19	19	17	15	13	11	7	2
Porcentagem	100	100	100	89,47	78,95	68,42	57,89	36,84	10,53

Tabela E.17 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
560,361	25,489	12,745	8671,216
619,954	26,957	13,479	10256,895
642,061	27,289	13,644	10640,373
588,235	26,228	13,114	9447,015
496,924	24,181	12,090	7403,104
486,351	23,937	11,969	7181,431
503,652	24,094	12,047	7323,344
615,148	26,708	13,354	9975,465
458,478	23,323	11,661	6642,606
513,264	24,555	12,277	7751,854
569,012	25,701	12,851	8889,277
618,993	26,980	13,490	10283,451
454,633	23,100	11,550	6453,750
577,662	25,961	12,981	9161,950
486,351	23,886	11,943	7136,012
557,478	25,412	12,706	8592,109

	578,624	26,139	13,069	9350,663
	548,827	25,340	12,670	8519,448
Somatória	9876,01	455,28	227,64	153679,96
Média	548,67	25,29	12,65	8537,78

Tabela E.18 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	2	2	2	1	1	1	1	0	0
2	2	2	2	2	2	1	1	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Somatória	18	18	18	15	10	9	6	3	1
Porcentagem	100	100	100	83,33	55,56	50	33,33	16,67	5,56

Tabela E.19 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
849,673	32,324	16,162	17684,520	
628,604	28,663	14,332	12330,043	
827,566	31,637	15,818	16579,959	
881,392	32,772	16,386	18429,818	
792,003	31,264	15,632	16000,179	
668,973	28,298	14,149	11865,046	
Somatória	4648,21	184,96	92,48	92889,56
Média	774,70	30,83	15,41	15481,59

Tabela E.20 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	6	6	6	5	3	2	0	0	0
Porcentagem	100	100	100	83,33	50	33,33	0	0	0

Tabela E.21 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
122,068	11,606	5,803	818,613
74,010	9,494	4,747	448,035
102,845	10,578	5,289	619,704
148,020	12,613	6,307	1050,655
122,068	11,352	5,676	766,078
149,942	12,841	6,421	1108,711
92,272	10,139	5,070	545,801
126,874	11,905	5,953	883,512
84,583	9,160	4,580	402,458
123,030	11,899	5,950	882,183
136,486	12,357	6,178	987,850
73,049	9,026	4,513	385,008
99,000	10,540	5,270	613,016
129,758	11,662	5,831	830,409
139,369	12,470	6,235	1015,214
141,292	12,495	6,248	1021,497
122,068	11,161	5,581	728,024
124,952	11,887	5,944	879,567
107,651	10,922	5,461	682,152
86,505	9,635	4,817	468,294
123,991	12,040	6,020	913,753
102,845	10,473	5,237	601,499
108,612	11,103	5,551	716,577
148,020	12,865	6,432	1114,816
62,476	8,738	4,369	349,342
138,408	12,418	6,209	1002,652
131,680	12,354	6,177	987,183

110,534	10,618	5,309	626,765
128,797	11,944	5,972	892,190
130,719	11,914	5,957	885,481
141,292	12,708	6,354	1074,505
138,408	12,421	6,211	1003,457
101,884	10,283	5,141	569,256
123,030	12,155	6,077	940,213
151,865	12,888	6,444	1120,745
129,758	12,261	6,131	965,223
74,010	8,982	4,491	379,464
74,010	8,708	4,354	345,699
61,515	8,353	4,176	305,141
135,525	12,491	6,245	1020,395
85,544	9,263	4,632	416,171
Somatória	4708,77	458,72	229,36
Média	114,85	11,19	5,59

Tabela E.22 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
4	4	4	4	4	4	4	3	3	3
5	5	5	5	5	5	4	4	4	3
4	4	4	4	4	4	3	3	3	2
3	3	3	3	3	3	3	2	2	1
3	3	3	3	3	3	3	2	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
5	5	5	5	5	4	3	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	2	2	1
4	4	4	4	4	4	3	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	5	5	5	5	5	5	4	4	3
Somatória	41	41	41	41	40	35	28	26	20
Porcentagem	100	100	100	100	97,56	85,37	68,29	63,41	48,78

Tabela E.23 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
181,661	14,257	7,128	1517,298
201,845	15,212	7,606	1843,189
222,030	16,359	8,180	2292,324

237,409	16,716	8,358	2445,746	
167,243	13,876	6,938	1398,819	
216,263	15,388	7,694	1907,819	
205,690	15,507	7,754	1952,533	
201,845	15,345	7,672	1891,877	
200,884	15,083	7,542	1796,648	
213,379	15,800	7,900	2065,274	
159,554	13,511	6,755	1291,369	
229,719	16,438	8,219	2325,800	
248,943	16,815	8,408	2489,492	
220,108	15,510	7,755	1953,685	
176,855	14,020	7,010	1442,863	
141,292	13,098	6,549	1176,652	
199,923	14,969	7,485	1756,332	
204,729	16,527	8,263	2363,545	
191,273	14,476	7,238	1588,184	
201,845	14,973	7,486	1757,577	
220,108	16,039	8,020	2160,574	
273,933	17,812	8,906	2959,180	
181,661	14,058	7,029	1454,735	
260,477	17,295	8,648	2708,913	
148,981	13,140	6,570	1188,051	
153,787	13,249	6,625	1217,742	
193,195	14,738	7,369	1676,207	
192,234	15,186	7,593	1833,674	
237,409	16,409	8,205	2313,468	
176,855	13,989	6,994	1433,368	
238,370	16,530	8,265	2364,750	
251,826	16,916	8,458	2534,520	
Somatória	6551,33	489,24	244,62	61102,21
Média	204,73	15,29	7,64	1909,44

Tabela E.24 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	2	2	2	1	1	1
4	4	4	4	4	4	3	3	3
2	2	2	2	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	0
4	4	4	4	4	4	2	2	2
4	4	4	4	4	3	3	3	2
3	3	3	3	3	3	3	2	1
3	3	3	3	3	2	2	2	1
5	5	5	5	4	4	3	4	3
2	2	2	2	2	2	1	1	0

	2	2	2	2	2	1	1	1	1
Somatória	32	32	32	32	31	27	21	20	15
Porcentagem	100	100	100	100	96,875	84,375	65,63	62,50	46,88

Tabela E.25 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	317,186	19,027	9,514	3606,979
	332,564	19,460	9,730	3858,387
	382,545	20,748	10,374	4676,494
	413,303	21,818	10,909	5438,236
	290,273	18,202	9,101	3157,492
	356,594	20,174	10,087	4299,241
	401,769	21,529	10,764	5224,558
	350,827	19,913	9,957	4134,679
	321,992	18,944	9,472	3559,714
	297,001	18,163	9,082	3137,346
	445,021	22,692	11,346	6118,415
	449,827	22,728	11,364	6147,463
	297,001	18,649	9,325	3396,250
	366,205	20,448	10,224	4476,377
	325,836	19,243	9,621	3730,881
	366,205	20,947	10,473	4812,119
	294,118	18,568	9,284	3351,660
	328,720	19,619	9,810	3954,195
	323,914	19,307	9,654	3768,574
	294,118	18,171	9,086	3141,648
	454,633	22,782	11,391	6190,849
	325,836	19,718	9,859	4013,877
	351,788	20,220	10,110	4328,762
	305,652	18,954	9,477	3565,532
	444,060	22,706	11,353	6129,229
	398,885	21,252	10,626	5025,497
	323,914	19,049	9,525	3619,318
	367,166	20,657	10,328	4615,261
	442,138	22,813	11,407	6216,723
	298,923	18,467	9,233	3297,321
	349,865	20,014	10,007	4197,467
	296,040	18,558	9,279	3346,562
	257,593	18,460	9,230	3293,935
Somatória	11571,51	662,00	331,00	141831,04
Média	350,65	20,06	10,03	4297,91

Tabela E.26 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	3	3	3	3	3	3	2	2	1
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	4	4	4	4	4	4	3	3	2
	3	3	3	2	2	2	2	2	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	1	1
	3	3	3	3	2	2	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	2	2	1	1	0	0
	2	2	2	2	2	2	1	0	1
	3	3	3	3	2	2	2	1	1
Somatória	33	33	33	32	29	26	20	14	9
Porcentagem	100	100	100	96,97	87,88	78,79	60,61	42,42	27,27

Tabela E.27 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
619,954	27,364	13,682	10727,978
460,400	26,449	13,224	9687,476
563,245	25,901	12,950	9097,658
494,041	25,011	12,506	8192,429
496,924	23,956	11,978	7198,618
545,944	25,154	12,577	8333,139
567,090	26,291	13,145	9514,743
538,255	25,019	12,510	8200,297
410,419	23,390	11,695	6700,504
559,400	25,827	12,914	9020,557
483,468	23,531	11,766	6822,229
467,128	23,209	11,605	6545,972
514,225	24,256	12,128	7472,200
471,934	23,154	11,577	6499,314
551,711	25,036	12,518	8216,636
545,944	25,235	12,617	8413,817

	462,322	23,322	11,661	6642,115
	545,944	25,370	12,685	8550,154
	470,973	23,100	11,550	6453,976
	623,799	27,107	13,554	10429,239
	492,118	23,931	11,965	7175,649
	531,526	24,859	12,430	8043,976
	518,070	24,417	12,209	7622,432
	512,303	24,330	12,165	7540,709
	481,546	24,395	12,198	7601,969
	572,857	25,560	12,780	8743,648
Somatória	13501,54	645,17	322,59	209447,43
Média	519,29	24,81	12,41	8055,67

Tabela E.28 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	2	2	1	1	0	0	0
	2	2	2	2	2	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	3	3	3	2	2	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	2	1	1	0	0	0
	2	2	2	2	1	0	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Somatória	26	26	26	25	18	13	7	2	0
Porcentagem	100	100	100	96,15	69,23	50,00	26,92	7,69	0

Tabela E.29 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
849,673	32,523	16,262	18012,918
794,887	30,700	15,350	15149,982

	730,488	29,710	14,855	13731,736
	727,605	31,139	15,569	15809,161
	686,274	28,526	14,263	12153,530
	689,158	28,587	14,293	12231,632
	820,838	31,958	15,979	17089,536
	648,789	28,622	14,311	12276,975
Somatória	5947,71	241,76	120,88	116455,47
Média	743,46	30,22	15,11	14556,93

Tabela E.30 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	2	2	2	1	1	0	0	0	0
	3	3	3	3	2	1	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	8	8	8	7	5	3	1	0	0
Porcentagem	100	100	100	87,5	62,5	37,5	12,5	0	0

Tabela E.31 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
98,039	10,719	5,360	644,896
76,894	9,245	4,622	413,670
102,845	10,534	5,267	612,079
108,612	10,723	5,361	645,531
99,962	10,262	5,131	565,774
88,428	10,283	5,142	569,351
90,350	9,733	4,866	482,743
94,195	10,190	5,095	554,096
74,971	9,240	4,620	413,074
82,661	9,469	4,734	444,529
148,981	12,997	6,499	1149,581
90,350	10,306	5,153	573,082
108,612	10,858	5,429	670,230
146,098	12,882	6,441	1119,273
141,292	12,520	6,260	1027,477
106,690	10,763	5,382	652,851
116,301	11,076	5,538	711,370
134,564	12,752	6,376	1085,853

	93,233	10,095	5,048	538,731
	101,884	10,162	5,081	549,386
	129,758	12,124	6,062	933,045
	144,175	12,582	6,291	1042,835
	72,088	8,625	4,313	335,978
	130,719	12,177	6,088	945,295
	116,301	11,230	5,615	741,582
	148,981	12,838	6,419	1107,957
	148,981	12,972	6,486	1142,905
	132,641	12,425	6,212	1004,241
	128,797	12,249	6,125	962,294
	132,641	12,044	6,022	914,707
	144,175	12,597	6,299	1046,742
Somatória	3534,22	346,67	173,33	23601,16
Média	114,01	11,18	5,59	761,33

Tabela E.32 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	4	4	4	4	4	3	3	3	2
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	3	3	3	3	3	3	3	2	2
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	5	5	5	5	5	5	4	4	3
	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	3	3	3	3	3	3	3	2	2
	4	4	4	4	4	4	3	3	3
Somatória	31	31	31	31	31	30	28	24	16
Porcentagem	100	100	100	100	100	96,77	90,32	77,42	51,61

Tabela E.33 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
228,758	16,133	8,067	2198,768
240,292	16,945	8,472	2547,417

255,671	16,844	8,422	2502,113	
222,991	16,911	8,456	2532,394	
191,273	14,805	7,402	1698,986	
196,078	15,218	7,609	1845,504	
274,894	17,594	8,797	2851,603	
176,855	14,375	7,187	1555,282	
164,360	13,360	6,680	1248,539	
272,011	17,713	8,856	2909,754	
259,516	17,079	8,540	2608,641	
214,341	15,736	7,868	2040,430	
186,467	14,260	7,130	1518,423	
215,302	15,839	7,920	2080,648	
255,671	17,256	8,628	2690,525	
176,855	14,557	7,279	1615,266	
194,156	15,036	7,518	1779,948	
256,632	17,286	8,643	2704,686	
283,545	17,977	8,989	3042,114	
271,050	17,878	8,939	2992,120	
250,865	16,820	8,410	2491,813	
280,661	17,806	8,903	2956,083	
175,894	14,379	7,190	1556,681	
184,544	14,434	7,217	1574,457	
159,554	13,467	6,734	1278,840	
Somatória	5588,24	399,71	199,86	54821,03
Média	223,53	15,99	7,99	2192,84

Tabela E.34 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
3	3	3	3	3	3	3	2	2	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
3	3	3	3	3	3	3	2	2	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	5	5	5	5	5	4	4	4	3
3	3	3	3	3	3	3	3	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
Somatória	25	25	25	25	25	23	20	15	9
Porcentagem	100	100	100	100	100	92	80	60	36

Tabela E.35 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	408,497	21,867	10,934	5474,967
	362,361	21,079	10,539	4903,730
	439,254	22,174	11,087	5708,493
	291,234	18,257	9,129	3186,534
	371,972	20,637	10,319	4602,154
	412,341	21,651	10,825	5313,793
	348,904	19,719	9,859	4014,702
	319,108	18,709	9,354	3428,780
	286,428	18,015	9,008	3061,485
	383,506	21,521	10,761	5219,322
	418,108	22,155	11,077	5693,883
	371,972	21,227	10,614	5008,253
	282,584	18,060	9,030	3084,243
	295,079	18,558	9,279	3346,524
	438,293	22,653	11,327	6086,730
	408,497	21,925	10,963	5518,821
	297,001	18,504	9,252	3317,122
	400,807	21,567	10,784	5252,788
Somatória	6535,95	368,28	184,14	82222,33
Média	363,11	20,46	10,23	4567,91

Tabela E.36 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>								
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	2	2	2	2	2	1	1	1	0

Somatória	18	18	18	18	18	13	10	6	3
Porcentagem	100	100	100	100	100	72,22	55,56	33,33	16,67

Tabela E.37 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	547,866	24,447	12,224	7650,342
	469,050	23,575	11,787	6860,266
	640,138	27,467	13,733	10849,876
	496,924	23,993	11,996	7231,613
	484,429	23,468	11,734	6767,272
	438,293	23,097	11,549	6451,661
	571,895	25,848	12,924	9041,868
	644,944	27,639	13,820	11055,669
	671,857	27,988	13,994	11478,996
	491,157	23,694	11,847	6965,196
	488,274	23,625	11,812	6903,848
	479,623	23,678	11,839	6950,496
	657,439	27,839	13,920	11297,388
	650,711	27,670	13,835	11091,851
	668,012	27,821	13,911	11275,190
	569,012	25,348	12,674	8527,621
	630,527	27,120	13,560	10444,069
	587,274	26,313	13,156	9539,077
	510,381	24,381	12,191	7588,566
Somatória	10697,81	485,01	242,50	167970,87
Média	563,04	25,53	12,76	8840,57

Tabela E.38 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	2	2	2	1	1	1	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	1	1	1	0	0	0

	3	3	3	3	2	2	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	19	19	19	17	13	11	5	2	0
Porcentagem	100	100	100	89,47	68,42	57,89	26,32	10,53	0

Tabela E.39 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	774,702	30,582	15,291	14976,340
	742,022	30,118	15,059	14304,869
	896,770	32,980	16,490	18782,558
	687,236	28,703	14,351	12381,517
	864,091	32,065	16,033	17262,784
	820,838	32,187	16,093	17459,280
	767,974	30,372	15,186	14669,806
	771,819	30,402	15,201	14713,456
	774,702	30,464	15,232	14803,746
	728,566	30,331	15,166	14610,849
Somatória	7828,72	308,21	154,10	153965,20
Média	782,87	30,82	15,41	15396,52

Tabela E.40 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de aço inoxidável.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Somatória	10	10	10	10	10	9	6	2	0
Porcentagem	100	100	100	100	100	90	60	20	0

Tabela E.41 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
124,952	11,814	5,907	863,403
123,030	11,809	5,905	862,291
139,369	12,231	6,115	957,984
68,243	8,113	4,056	279,569
118,224	11,526	5,763	801,756
73,049	8,782	4,391	354,596
76,894	9,380	4,690	432,151
77,855	8,943	4,471	374,471
89,389	9,892	4,946	506,771
145,136	12,719	6,360	1077,392
101,884	10,774	5,387	654,909
88,428	10,305	5,152	572,956
141,292	12,297	6,149	973,649
98,039	9,600	4,800	463,288
140,331	12,558	6,279	1036,843
106,690	10,884	5,442	675,017
84,583	8,333	4,166	302,971
109,573	11,301	5,650	755,670
83,622	9,780	4,890	489,756
103,806	10,596	5,298	622,924
91,311	9,931	4,966	512,861
97,078	10,447	5,224	597,071
141,292	12,539	6,270	1032,270
59,592	8,166	4,083	285,068
75,932	9,224	4,612	410,978
99,000	10,097	5,049	539,061
130,719	11,992	5,996	902,987
81,699	9,440	4,720	440,482
69,204	8,733	4,366	348,715
80,738	9,089	4,545	393,183
99,000	10,163	5,081	549,574
127,835	12,686	6,343	1068,945
Somatória	3247,79	334,14	20139,56
Média	101,49	10,44	629,36

Tabela E.42 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
2	2	2	2	2	1	1	1	1
4	4	4	4	4	3	2	2	1

	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	5	5	5	5	5	4	3	2	1
	3	3	3	3	2	2	2	1	1
	5	5	5	5	4	4	4	3	2
	3	3	3	3	2	2	1	1	0
	4	4	4	4	3	3	2	2	1
	4	4	4	3	3	2	2	1	1
Somatória	32	32	32	31	27	23	18	14	9
Porcentagem	100	100	100	96,88	84,38	71,88	56,25	43,75	28,13

Tabela E.43 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)	
236,448	16,358	8,179	2291,887	
185,506	14,424	7,212	1571,283	
236,448	16,475	8,237	2341,319	
212,418	15,600	7,800	1987,853	
154,748	13,341	6,671	1243,289	
219,146	15,644	7,822	2004,586	
152,826	13,189	6,594	1201,137	
172,049	13,955	6,978	1423,070	
179,739	14,334	7,167	1541,994	
217,224	15,982	7,991	2137,419	
216,263	15,665	7,833	2012,833	
268,166	17,640	8,820	2874,301	
208,574	15,597	7,798	1986,485	
198,962	15,106	7,553	1805,044	
172,049	13,944	6,972	1419,603	
193,195	15,085	7,542	1797,219	
173,972	14,376	7,188	1555,811	
266,244	17,199	8,599	2663,724	
196,078	14,803	7,402	1698,528	
250,865	16,736	8,368	2454,390	
206,651	15,521	7,760	1957,641	
258,554	17,044	8,522	2592,391	
160,515	13,377	6,689	1253,483	
261,438	17,399	8,700	2757,949	
167,243	13,746	6,873	1360,041	
153,787	13,264	6,632	1221,974	
188,389	14,854	7,427	1715,972	
150,904	13,218	6,609	1209,240	
245,098	16,714	8,357	2444,949	
192,234	14,248	7,124	1514,518	
Somatória	6095,73	454,84	227,42	56039,93
Média	203,19	15,16	7,58	1868,00

Tabela E.44 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	3	3	3	3	2	2	2	1	1
	3	3	3	3	2	2	1	1	0
	3	3	3	3	3	2	1	1	1
	2	2	2	1	1	1	1	1	0
	3	3	3	2	2	2	2	1	1
	3	3	3	3	3	2	2	1	1
	2	2	2	2	2	2	1	1	0
	3	3	3	3	2	2	2	1	1
	3	3	3	2	2	2	1	1	1
	5	5	5	4	4	3	2	2	1
Somatória	30	30	30	26	23	20	15	11	7
Porcentagem	100	100	100	86,67	76,67	66,67	50	36,67	23,33

Tabela E.45 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	392,157	21,420	10,710	5146,180
	314,302	18,809	9,404	3484,076
	369,089	20,508	10,254	4515,921
	295,079	18,613	9,306	3376,153
	388,312	21,821	10,910	5440,240
	280,661	18,101	9,050	3105,185
	353,710	19,729	9,864	4020,596
	304,690	18,688	9,344	3417,405
	390,235	21,546	10,773	5237,478
	419,070	22,131	11,066	5675,757
	353,710	20,202	10,101	4317,151
	283,545	18,131	9,066	3120,819
	338,331	19,887	9,943	4118,106
	380,623	21,049	10,525	4883,252
	430,604	22,077	11,039	5634,051
	279,700	18,378	9,189	3250,224
	343,137	19,623	9,812	3956,562
	395,040	21,123	10,561	4934,517
Somatória	6312,00	361,84	180,92	77633,67
Média	350,67	20,10	10,05	4312,98

Tabela E.46 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	1	1
	3	3	3	2	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	2	2	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	2	2	1	1	0
Somatória	18	18	18	15	12	11	7	4	2
Porcentagem	100	100	100	83,33	66,67	61,11	38,89	22,22	11,11

Tabela E.47 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	446,943	23,072	11,536	6430,722
	670,896	27,919	13,959	11394,443
	481,546	24,153	12,076	7377,552
	520,953	24,706	12,353	7896,268
	551,711	25,468	12,734	8649,290
	573,818	26,264	13,132	9485,636
	472,895	23,157	11,578	6501,705
	467,128	23,525	11,762	6816,502
	507,497	24,311	12,155	7523,167
Somatória	4693,39	222,57	111,29	72075,29
Média	521,49	24,73	12,37	8008,37

Tabela E.48 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	2	2	2	2	1	1	1	0	0

	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Somatória	9	9	9	7	5	4	2	1	0
Porcentagem	100	100	100	77,78	55,56	44,44	22,22	11,11	0

Tabela E.49 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	850,634	32,523	16,262	18012,709
	681,469	28,419	14,210	12017,924
	690,119	28,825	14,413	12540,528
	759,323	29,980	14,990	14109,192
Somatória	2981,55	119,75	59,87	56680,35
Média	745,39	29,94	14,97	14170,09

Tabela E.50 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 1000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	1000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Somatória	4	4	4	3	2	0	0	0	0
Porcentagem	100	100	100	75	50	0	0	0	0

Tabela E.51 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	82,661	9,362	4,681	429,698
	85,544	9,697	4,849	477,468
	148,981	12,921	6,461	1129,623
	138,408	12,490	6,245	1020,313
	78,816	9,242	4,621	413,320
	124,952	11,922	5,961	887,296
	99,000	10,419	5,210	592,229
	115,340	11,101	5,550	716,191
	123,030	11,621	5,811	821,811

97,078	10,420	5,210	592,342	
96,117	10,093	5,046	538,272	
138,408	12,222	6,111	955,824	
126,874	11,398	5,699	775,339	
62,476	8,225	4,113	291,350	
109,573	10,609	5,305	625,272	
110,534	11,123	5,562	720,643	
147,059	12,826	6,413	1104,667	
111,496	10,845	5,423	667,952	
143,214	12,421	6,210	1003,304	
109,573	10,956	5,478	688,588	
132,641	11,948	5,974	893,023	
105,729	10,516	5,258	608,830	
131,680	12,232	6,116	958,201	
68,243	8,124	4,062	280,734	
136,486	12,117	6,058	931,499	
154,748	12,998	6,499	1149,692	
137,447	12,783	6,391	1093,633	
108,612	10,813	5,406	661,896	
64,398	8,314	4,157	300,953	
101,884	10,458	5,229	598,938	
94,195	10,212	5,106	557,626	
63,437	8,024	4,012	270,512	
92,272	9,951	4,975	515,921	
116,301	11,491	5,746	794,483	
75,932	8,957	4,479	376,276	
Somatória	3833,14	378,85	189,43	24443,72
Média	109,52	10,82	5,41	698,39

Tabela E.52 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
5	5	5	5	5	4	3	3	3	
3	3	3	2	2	2	2	2	1	
6	6	6	6	6	5	5	4	4	
6	6	6	6	6	5	5	4	4	
4	4	4	4	4	3	3	3	2	
2	2	2	2	2	1	1	1	0	
5	5	5	5	5	4	4	3	3	
4	4	4	4	4	4	3	3	2	
Somatória	35	35	35	34	34	28	26	23	19
Porcentagem	100	100	100	97,14	97,14	80	74,29	65,71	54,29

Tabela E.53 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	150,904	13,071	6,535	1169,291
	249,904	16,843	8,421	2501,759
	184,544	14,432	7,216	1573,982
	223,952	15,993	7,997	2141,920
	180,700	14,815	7,407	1702,461
	206,651	15,054	7,527	1786,258
	154,748	13,286	6,643	1227,993
	166,282	13,888	6,944	1402,500
	168,205	13,538	6,769	1299,260
	157,632	14,184	7,092	1494,004
	178,777	14,215	7,108	1504,132
	163,399	13,500	6,750	1288,132
	182,622	14,307	7,153	1533,264
	246,059	16,538	8,269	2368,577
	167,243	13,559	6,780	1305,299
	155,709	13,160	6,580	1193,388
	213,379	15,652	7,826	2007,755
	171,088	14,209	7,104	1501,937
	211,457	15,465	7,732	1936,633
	183,583	14,260	7,130	1518,216
	277,778	17,699	8,849	2902,843
	152,826	13,261	6,630	1221,024
	198,962	14,975	7,488	1758,488
	208,574	15,741	7,871	2042,276
	192,234	15,005	7,503	1769,052
	168,205	14,112	7,056	1471,589
	202,807	15,560	7,780	1972,699
	244,137	17,085	8,543	2611,340
	171,088	13,735	6,867	1356,613
	219,146	15,677	7,839	2017,463
	243,176	16,790	8,395	2478,387
	164,360	13,816	6,908	1380,769
	222,030	16,004	8,002	2146,137
	238,370	16,495	8,247	2349,750
	172,049	13,857	6,929	1393,195
	198,001	14,743	7,371	1677,820
Somatória	6990,58	534,52	267,26	63006,21
Média	194,18	14,85	7,42	1750,17

Tabela E.54 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	4	4	4	4	4	3	3	3	2
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	4	4	4	4	4	3	3	2	2
	5	5	5	5	4	4	4	3	2
	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	6	6	6	5	4	3	3	2	2
	2	2	2	2	2	1	1	1	0
	4	4	4	4	4	3	3	2	1
	7	7	7	7	6	6	5	4	3
Somatória	36	36	36	35	32	27	25	19	14
Porcentagem	100	100	100	97,22	88,89	75	69,44	52,78	38,89

Tabela E.55 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
446,943	22,340	11,170	5838,188
297,962	18,861	9,430	3513,025
360,438	20,283	10,141	4369,117
353,710	20,421	10,210	4458,820
371,011	20,701	10,350	4644,700
307,574	18,998	9,499	3590,424
356,594	20,781	10,391	4698,938
297,001	18,270	9,135	3193,137
311,419	19,349	9,675	3792,943
386,390	21,324	10,662	5077,140
356,594	20,087	10,043	4243,592
351,788	20,187	10,093	4307,256
356,594	19,988	9,994	4181,064
322,953	19,538	9,769	3905,098
363,322	20,487	10,243	4502,038
415,225	22,083	11,041	5638,436
349,865	20,325	10,162	4396,088
405,613	22,388	11,194	5875,366
404,652	22,436	11,218	5913,022
402,730	21,412	10,706	5139,914
368,128	20,796	10,398	4708,866
343,137	20,017	10,009	4199,648
281,622	18,024	9,012	3065,916
318,147	19,418	9,709	3833,468

	286,428	18,531	9,266	3332,114
	320,069	18,034	9,017	3071,216
	378,701	21,163	10,581	4962,745
Somatória	9514,61	546,24	273,12	118452,28
Média	352,39	20,23	10,12	4387,12

Tabela E.56 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	4	4	4	4	3	2	2	2	1
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	4	4	4	4	4	4	3	3	2
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	3	3	3	3	2	2	2	1	1
	4	4	4	4	3	3	3	3	2
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	2	2	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Somatória	27	27	27	27	22	20	17	14	9
Porcentagem	100	100	100	100	81,48	74,07	62,96	51,85	33,33

Tabela E.57 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	472,895	23,397	11,699	6706,312
	641,100	27,340	13,670	10700,803
	468,089	23,705	11,852	6974,193
	493,080	23,963	11,982	7205,182
	485,390	23,862	11,931	7113,956
	584,391	26,025	13,012	9228,854
	608,420	26,782	13,391	10058,056
	476,740	23,491	11,745	6787,298
	470,012	23,580	11,790	6865,201
	467,128	24,153	12,077	7377,587
Somatória	5167,24	246,30	123,15	79017,44
Média	516,72	24,63	12,31	7901,74

Tabela E.58 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	2	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Somatória	10	10	10	9	8	5	4	3	1
Porcentagem	100	100	100	90	80	50	40	30	10

Tabela E.59 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	697,809	28,987	14,494	12753,478
	847,751	31,607	15,803	16532,414
Somatória	1545,56	60,59	30,30	29285,89
Média	772,78	30,30	15,15	14642,95

Tabela E.60 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 2000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	2000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Somatória	4	4	4	3	2	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	100	75	50	25	0	0	0

Tabela E.61 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	146,098	12,754	6,377	1086,242
	98,039	10,134	5,067	544,920
	76,894	9,155	4,577	401,730
	84,583	10,157	5,078	548,598
	128,797	11,695	5,848	837,595
	126,874	10,779	5,389	655,739
	96,117	10,157	5,078	548,589
	97,078	10,002	5,001	523,940
	65,359	8,159	4,080	284,425
	124,952	11,775	5,888	854,901
	121,107	11,437	5,719	783,343
	130,719	11,760	5,880	851,517
	122,068	12,135	6,067	935,652
	148,981	12,840	6,420	1108,294
	66,321	8,299	4,150	299,287
	108,612	10,544	5,272	613,720
	85,544	9,927	4,964	512,233
	68,243	8,256	4,128	294,610
	127,835	11,850	5,925	871,370
	64,398	8,177	4,088	286,238
	92,272	10,131	5,066	544,451
	79,777	9,183	4,592	405,515
	144,175	12,747	6,373	1084,452
	72,088	8,600	4,300	333,087
	131,680	12,131	6,066	934,846
	142,253	12,554	6,277	1035,892
	140,331	12,973	6,486	1143,163
	140,331	12,422	6,211	1003,650
	68,243	8,709	4,354	345,846
	74,971	9,196	4,598	407,199
	77,855	9,181	4,591	405,225
	121,107	11,746	5,873	848,475
	96,117	9,933	4,966	513,110
	103,806	10,781	5,390	656,058
	110,534	10,946	5,473	686,685
	85,544	9,930	4,965	512,631
	112,457	11,139	5,569	723,580
	67,282	8,167	4,083	285,199
	103,806	11,512	5,756	798,911
	115,340	10,943	5,472	686,175
	110,534	11,316	5,658	758,708
Somatória	4279,12	434,23	217,12	26955,80
Média	104,37	10,59	5,30	657,46

Tabela E.62 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	5	5	5	5	5	5	4	4	3
	8	8	8	8	8	8	7	6	5
	6	6	6	6	6	5	5	4	4
	8	8	8	8	8	6	6	5	4
	14	14	14	14	13	13	12	11	10
Somatória	41	41	41	41	40	37	34	30	26
Porcentagem	100	100	100	100	97,56	90,24	82,93	73,17	63,41

Tabela E.63 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
205,690	15,343	7,671	1891,080
150,904	13,216	6,608	1208,671
164,360	13,389	6,695	1256,867
184,544	14,439	7,220	1576,321
260,477	17,306	8,653	2713,671
149,942	13,016	6,508	1154,476
205,690	15,270	7,635	1864,154
240,292	16,274	8,137	2256,894
238,370	16,565	8,283	2380,165
162,438	13,471	6,736	1280,014
233,564	16,174	8,087	2215,245
163,399	13,480	6,740	1282,604
240,292	16,549	8,275	2373,183
158,593	13,205	6,602	1205,574
165,321	13,706	6,853	1348,022
215,302	15,334	7,667	1887,914
255,671	17,157	8,578	2644,296
264,321	17,386	8,693	2751,892
148,981	13,026	6,513	1157,327
152,826	13,118	6,559	1181,940
160,515	13,446	6,723	1272,726
173,010	13,914	6,957	1410,407
186,467	14,142	7,071	1480,841
278,739	17,945	8,973	3025,826
166,282	13,852	6,926	1391,719
150,904	13,468	6,734	1278,977
217,224	15,654	7,827	2008,539
186,467	14,665	7,332	1651,329

	245,098	16,787	8,393	2476,834
	155,709	13,364	6,682	1249,705
	269,127	17,510	8,755	2810,746
	223,952	15,413	7,706	1917,040
	265,283	17,837	8,918	2971,230
	218,185	15,575	7,788	1978,403
Somatória	6857,94	510,99	255,50	62554,63
Média	201,70	15,03	7,51	1839,84

Tabela E.64 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	5	5	5	5	5	5	5	4	3
	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	4	4	4	4	4	4	3	2	2
	5	5	5	5	5	4	4	3	3
	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	3	3	3	3	3	2	2	2	1
	4	4	4	4	4	3	3	2	2
	4	4	4	4	3	3	2	2	2
	5	5	5	5	4	4	4	3	3
Somatória	34	34	34	34	32	29	27	20	18
Porcentagem	100	100	100	100	94,12	85,29	79,41	58,82	52,94

Tabela E.65 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
297,001	18,601	9,301	3369,866
305,652	18,952	9,476	3564,342
315,263	18,729	9,364	3439,798
273,933	18,474	9,237	3301,296
341,215	19,993	9,997	4184,505
304,690	18,549	9,275	3341,660
344,098	19,640	9,820	3966,762
368,128	20,540	10,270	4537,606
442,138	22,545	11,272	5999,790
317,186	19,336	9,668	3785,069
456,555	22,897	11,448	6285,237
291,234	18,316	9,158	3217,037
358,516	20,406	10,203	4449,370
367,166	20,765	10,382	4687,847
283,545	18,516	9,258	3323,991

	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	3	3	3	3	2	2	1	0	0
Somatória	8	8	8	8	7	5	4	1	0
Porcentagem	100	100	100	100	87,5	62,5	50	12,5	0

Tabela E.69 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	855,440	32,224	16,112	17520,727
	712,226	28,723	14,362	12407,704
Somatória	1567,67	60,95	30,47	29928,43
Média	783,83	30,47	15,24	14964,22

Tabela E.70 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 5000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	5000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Somatória	4	4	4	3	2	1	0	0	0
Porcentagem	100	100	100	75	50	25	0	0	0

Tabela E.71 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
130,719	11,936	5,968	890,469
70,165	8,917	4,458	371,226
91,311	8,751	4,376	350,931
74,010	9,206	4,603	408,510
80,738	8,792	4,396	355,821
78,816	9,219	4,609	410,233
99,962	10,140	5,070	545,844
57,670	8,059	4,030	274,065

66,321	8,048	4,024	272,962	
95,156	10,163	5,082	549,691	
75,932	9,049	4,524	387,925	
110,534	10,870	5,435	672,410	
99,962	10,533	5,267	611,867	
112,457	10,835	5,418	666,064	
82,661	9,721	4,860	480,973	
117,263	10,077	5,039	535,830	
99,962	10,232	5,116	560,918	
93,233	10,070	5,035	534,602	
68,243	8,833	4,416	360,789	
145,136	12,863	6,431	1114,272	
70,165	8,801	4,400	356,924	
90,350	10,164	5,082	549,758	
90,350	10,485	5,242	603,472	
91,311	10,226	5,113	559,855	
139,369	12,643	6,322	1058,219	
90,350	9,854	4,927	500,961	
147,059	12,793	6,396	1096,196	
121,107	11,170	5,585	729,664	
127,835	11,783	5,891	856,508	
139,369	12,313	6,156	977,381	
106,690	10,444	5,222	596,403	
142,253	12,916	6,458	1128,115	
111,496	11,262	5,631	747,963	
76,894	9,342	4,671	426,888	
133,602	12,081	6,040	923,127	
129,758	12,148	6,074	938,756	
138,408	12,450	6,225	1010,346	
87,466	9,823	4,912	496,338	
127,835	12,228	6,114	957,287	
Somatória	4011,92	409,24	204,62	24869,56
Média	102,87	10,49	5,25	637,68

Tabela E.72 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 8 – 13 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
7	7	7	7	7	6	6	6	6
4	4	4	4	4	4	3	2	2
5	5	5	5	5	5	4	4	3
4	4	4	4	4	4	3	3	2
6	6	6	6	6	6	6	5	5
5	5	5	5	5	5	4	4	3
8	8	8	8	8	8	7	6	6

Somatória	39	39	39	39	39	38	33	30	27
Porcentagem	100	100	100	100	100	97,44	84,62	76,92	69,23

Tabela E.73 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	198,001	15,034	7,517	1779,149
	207,612	15,311	7,655	1879,331
	159,554	13,294	6,647	1230,133
	172,049	13,953	6,976	1422,214
	153,787	13,418	6,709	1264,798
	237,409	16,378	8,189	2300,443
	214,341	15,545	7,773	1966,945
	222,991	15,932	7,966	2117,286
	244,137	17,036	8,518	2588,717
	155,709	13,271	6,635	1223,754
	200,884	15,368	7,684	1900,246
	170,127	13,132	6,566	1185,707
	267,205	17,495	8,747	2803,622
	160,515	13,033	6,517	1159,184
	193,195	14,865	7,433	1719,955
	230,681	15,575	7,787	1978,260
	179,739	14,515	7,258	1601,223
	178,777	14,249	7,125	1514,938
	186,467	14,409	7,205	1566,404
	162,438	14,411	7,205	1567,021
	256,632	16,945	8,472	2547,527
	229,719	16,011	8,005	2149,085
	218,185	15,342	7,671	1890,913
	218,185	15,833	7,917	2078,254
	169,166	13,248	6,624	1217,439
	194,156	14,958	7,479	1752,460
	164,360	13,893	6,946	1403,939
	189,350	14,663	7,331	1650,688
	161,476	13,374	6,687	1252,455
	179,739	14,368	7,184	1553,089
	168,205	13,730	6,865	1355,321
	200,884	15,162	7,581	1825,114
	213,379	15,533	7,767	1962,351
	188,389	14,183	7,091	1493,744
	164,360	13,666	6,833	1336,259
	183,583	14,396	7,198	1562,012
Somatória	6995,39	531,53	265,76	61799,98
Média	194,32	14,76	7,38	1716,67

Tabela E.74 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 13 – 18 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	5	5	5	5	5	5	4	4	3
	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	4	4	4	4	4	4	4	3	2
	6	6	6	6	6	6	4	4	3
	4	4	4	4	3	3	2	2	2
	7	7	7	7	7	7	6	6	5
	4	4	4	4	4	4	4	3	3
	4	4	4	4	4	4	3	3	2
Somatória	36	36	36	36	35	35	29	26	21
Porcentagem	100	100	100	100	97,22	97,22	80,56	72,22	58,33

Tabela E.75 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
328,720	19,549	9,775	3911,899
287,389	18,109	9,055	3109,635
371,972	20,672	10,336	4625,098
337,370	19,899	9,949	4125,650
284,506	18,118	9,059	3114,231
289,312	18,545	9,272	3339,391
403,691	21,716	10,858	5362,073
298,923	18,613	9,306	3376,243
278,739	18,173	9,087	3142,655
357,555	19,980	9,990	4176,449
421,953	22,085	11,042	5639,786
296,040	18,590	9,295	3363,815
315,263	19,058	9,529	3624,500
320,069	19,024	9,512	3605,111
453,672	22,695	11,348	6120,829
292,195	18,347	9,174	3233,812
369,089	20,730	10,365	4664,376
346,021	19,871	9,935	4108,034
325,836	19,386	9,693	3814,889
346,021	20,042	10,021	4215,517
331,603	19,643	9,822	3968,560
297,962	18,667	9,333	3405,782
366,205	20,827	10,413	4730,164
418,108	22,074	11,037	5632,035
334,487	19,586	9,793	3933,835

	288,351	18,245	9,122	3179,821
	299,885	18,727	9,363	3438,763
	283,545	18,179	9,090	3145,846
	417,147	21,797	10,898	5422,372
Somatória	9761,63	570,95	285,47	117531,17
Média	336,61	19,69	9,84	4052,80

Tabela E.76 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 18 – 23 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	2	2	2	2	2	2	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	3	3	3	3	3	3	2	2	2
	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	2	2	2	2	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	1	1	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Somatória	29	29	29	29	28	25	22	16	7
Porcentagem	100	100	100	100	96,55	86,21	75,86	55,17	24,14

Tabela E.77 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
695,886	27,937	13,969	11416,837
627,643	27,222	13,611	10562,201
463,283	23,714	11,857	6982,612

582,468	26,039	13,019	9244,229	
593,041	26,310	13,155	9536,022	
469,050	23,038	11,519	6402,068	
519,031	24,914	12,457	8097,427	
638,216	26,536	13,268	9783,986	
517,109	24,149	12,074	7373,716	
495,963	23,934	11,967	7179,078	
529,604	24,799	12,400	7985,771	
536,332	24,817	12,408	8002,475	
505,575	24,670	12,335	7861,375	
586,313	26,208	13,104	9425,786	
566,128	26,245	13,123	9465,461	
615,148	26,826	13,413	10108,137	
519,992	24,622	12,311	7815,700	
598,808	26,758	13,379	10031,497	
651,672	27,526	13,763	10920,491	
470,012	23,601	11,800	6883,082	
458,478	23,017	11,508	6384,619	
498,847	23,608	11,804	6889,626	
551,711	25,037	12,518	8217,513	
Somatória	12690,31	581,53	290,76	196569,71
Média	551,75	25,28	12,64	8546,51

Tabela E.78 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 23 – 28 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	0	0	
1	1	1	1	1	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	1	0	
2	2	2	2	2	2	2	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	2	2	2	2	1	1	1	0	
1	1	1	1	1	1	1	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	1	0	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	
2	2	2	2	2	1	1	1	0	
4	4	4	4	4	3	2	2	1	
Somatória	23	23	23	23	23	19	14	8	3
Porcentagem	100	100	100	100	100	82,61	60,87	34,78	13,04

Tabela E.79 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 4.5) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	Área (μm^2)	Diâmetro Médio (μm)	Raio (μm)	Volume (μm^3)
	763,168	30,129	15,064	14320,096
	769,896	30,375	15,187	14673,632
	723,760	29,309	14,654	13182,591
	688,197	28,912	14,456	12654,327
	668,012	28,131	14,066	11656,713
	875,625	32,391	16,196	17794,610
	861,207	31,354	15,677	16138,440
	892,926	32,874	16,437	18602,684
	796,809	31,356	15,678	16142,363
	815,071	31,971	15,986	17110,988
Somatória	7854,67	306,80	153,40	152276,44
Média	785,47	30,68	15,34	15227,64

Tabela E.80 – Resultados experimentais obtidos com a microcentrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 28 – 33 μm ($\rho_p = 1491 \text{ kg/m}^3$). Velocidade angular de compressão (*Press-on*) 10000 rpm e substrato de vidro.

	<i>Press-on</i>	<i>Spin-off</i>							
	10000 rpm	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	14000
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Somatória	10	10	10	9	8	7	5	2	0
Porcentagem	100	100	100	90	80	70	50	20	0

Apêndice F

Planejamento fatorial estatístico ($2^k + 5$ pontos centrais) aplicado para os dois materiais pulverulentos orgânicos e aos substratos de aço inoxidável e de vidro utilizados no estudo da influência da força de adesão partícula-substrato.

F.1 - Planejamento Experimental Estatístico – Maisena e Vidro

Com base na matriz (Tabela 4.14) do planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais com a resposta força de adesão (9 ensaios), realizou-se uma análise de variância (ANOVA) através do software *Statistica 6.0* e determinou-se os coeficientes de regressão, apresentados na Tabela F.1, para todos os parâmetros significativos do modelo. Pode-se observar nesta tabela, que apenas o termo linear para a velocidade angular de compressão e para o diâmetro médio da partícula (em negrito) foram significativos, podendo-se elaborar um modelo com as variáveis codificadas para a resposta força de adesão a 5% de significância e coeficiente de correlação linear de 0,90.

Tabela F.1 - Coeficientes de regressão para a resposta força de adesão quando investigou-se a maisena e o substrato construído de vidro.

Fator	Coefficiente de regressão	Erro Padrão ($\times 10^{-7}$)	t(5)	p - valor	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	$1,587 \cdot 10^{-6}$	5,080	3,124	0,026143	$2,810 \cdot 10^{-7}$	$2,893 \cdot 10^{-6}$
ω	$2,275 \cdot 10^{-6}$	7,620	2,986	0,030588	$3,165 \cdot 10^{-7}$	$4,234 \cdot 10^{-6}$
d_m	$2,060 \cdot 10^{-6}$	7,620	2,704	0,042592	$1,015 \cdot 10^{-7}$	$4,019 \cdot 10^{-6}$
ω com d_m	$1,695 \cdot 10^{-6}$	7,620	2,223	0,076748	$-2,642 \cdot 10^{-8}$	$3,654 \cdot 10^{-6}$

O modelo empírico obtido contendo todos os parâmetros significativos está apresentado na Equação F.1.

$$F_{\text{adesão}} = 1,587 \cdot 10^{-6} + 2,275 \cdot 10^{-6} \cdot \omega + 2,060 \cdot 10^{-6} \cdot \mathbf{d_m} + 1,695 \cdot 10^{-6} \cdot \omega \cdot \mathbf{d_m} \quad (\text{F.1})$$

A Figura F.1 mostra a superfície de resposta e as respectivas curvas de contorno para a resposta força de adesão em função das variáveis estudadas (diâmetro médio de partícula e velocidade angular de compressão), quando utilizou-se a maisena e o vidro. Observa-se nesta figura, que a medida que a velocidade angular de compressão e o diâmetro médio das partículas do material pulverulento aumenta, a força de adesão aumenta, sendo que o fator diâmetro médio de partícula apresentou maior efeito na resposta força de adesão, confirmando desta maneira, a influência direta da granulometria da partícula na força de adesão partícula-substrato.

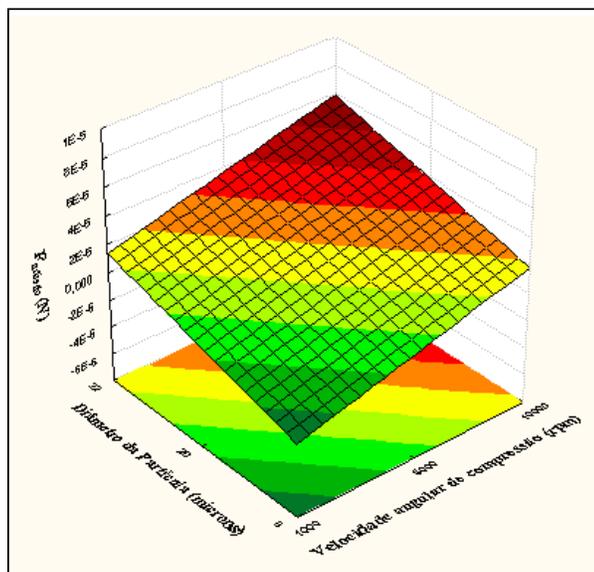


Figure F.1 – Superfície de resposta dos efeitos da velocidade angular de compressão e do diâmetro médio da partícula, sobre a força de adesão maisena-vidro.

F.2 - Planejamento Experimental Estatístico – Polvilho doce e Aço inoxidável

Com base na matriz (Tabela 4.14) do planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais com a resposta força de adesão (9 ensaios), realizou-se uma análise de variância (ANOVA) através do software *Statistica 6.0* e determinou-se os coeficientes de regressão, apresentados na Tabela F.2, para todos os parâmetros significativos do modelo. Pode-se observar nesta tabela, que apenas o termo linear para a velocidade angular de compressão e para o diâmetro médio da partícula (em negrito) foram significativos, podendo-se elaborar um modelo com as variáveis codificadas para a resposta força de adesão a 5% de significância e coeficiente de correlação linear de 0,93.

Tabela F.2 - Coeficientes de regressão para a resposta força de adesão quando investigou-se o polvilho doce e o substrato construído de aço inoxidável.

Fator	Coefficiente de regressão	Erro Padrão ($\times 10^{-8}$)	t(5)	p - valor	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	$4,786 \cdot 10^{-7}$	4,171	11,473	0,000088	$3,713 \cdot 10^{-7}$	$5,858 \cdot 10^{-7}$
ω	$2,362 \cdot 10^{-7}$	6,257	3,776	0,012946	$7,541 \cdot 10^{-8}$	$3,971 \cdot 10^{-7}$
d_m	$2,187 \cdot 10^{-7}$	6,257	3,496	0,017357	$5,791 \cdot 10^{-8}$	$3,796 \cdot 10^{-7}$
ω com d_m	$1,568 \cdot 10^{-7}$	6,257	2,505	0,054144	$-4,091 \cdot 10^{-9}$	$3,176 \cdot 10^{-7}$

O modelo empírico obtido contendo todos os parâmetros significativos está apresentado na Equação F.2.

$$F_{\text{adesão}} = 4,786 \cdot 10^{-7} + 2,362 \cdot 10^{-7} \cdot \omega + 2,187 \cdot 10^{-7} \cdot d_m + 1,568 \cdot 10^{-7} \cdot \omega \cdot d_m \quad (\text{F.2})$$

A Figura F.2 mostra a superfície de resposta e as respectivas curvas de contorno para a resposta força de adesão em função das variáveis estudadas (diâmetro médio de partícula e velocidade angular de compressão), quando utilizou-se o polvilho doce e o aço inoxidável. Observa-se nesta figura, que a medida que a velocidade angular de compressão e o diâmetro médio das partículas do material pulverulento aumenta, a força de adesão aumenta, sendo que o fator diâmetro médio de partícula apresentou maior efeito na resposta força de adesão, confirmando desta maneira, a influência direta da granulometria da partícula na força de adesão partícula-substrato.

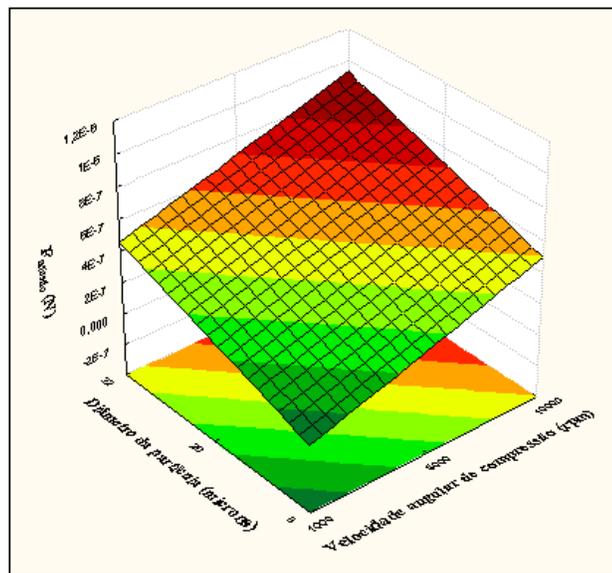


Figure F.2 – Superfície de resposta dos efeitos da velocidade angular de compressão e do diâmetro médio da partícula, sobre a força de adesão polvilho doce-aço inoxidável.

F.3 - Planejamento Experimental Estatístico – Polvilho doce e Vidro

Com base na matriz (Tabela 4.14) do planejamento fatorial $2^k + 5$ pontos centrais com a resposta força de adesão (9 ensaios), realizou-se uma análise de variância (ANOVA) através do software *Statistica 6.0* e determinou-se os coeficientes de regressão, apresentados na Tabela F.3, para todos os parâmetros significativos do modelo. Pode-se observar nesta

tabela, que apenas o termo linear para a velocidade angular de compressão e para o diâmetro médio da partícula (em negrito) foram significativos, podendo-se elaborar um modelo com as variáveis codificadas para a resposta força de adesão a 5% de significância e coeficiente de correlação linear de 0,95.

Tabela F.3 - Coeficientes de regressão para a resposta força de adesão quando investigou-se o polvilho doce e o substrato construído de vidro.

Fator	Coeficiente de regressão	Erro Padrão ($\times 10^{-8}$)	t(5)	p - valor	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	$5,208 \cdot 10^{-7}$	3,528	14,76048	0,000026	$4,301 \cdot 10^{-7}$	$6,115 \cdot 10^{-7}$
ω	$1,700 \cdot 10^{-7}$	5,292	3,21222	0,023670	$3,396 \cdot 10^{-8}$	$3,060 \cdot 10^{-7}$
d_m	$2,780 \cdot 10^{-7}$	5,292	5,25293	0,003318	$1,420 \cdot 10^{-7}$	$4,140 \cdot 10^{-7}$
ω com d_m	$1,290 \cdot 10^{-7}$	5,292	2,43751	0,058834	$-7,043 \cdot 10^{-9}$	$2,650 \cdot 10^{-7}$

O modelo empírico obtido contendo todos os parâmetros significativos está apresentado na Equação F.3.

$$F_{\text{adesão}} = 5,208 \cdot 10^{-7} + 1,700 \cdot 10^{-7} \cdot \omega + 2,780 \cdot 10^{-7} \cdot d_m + 1,290 \cdot 10^{-7} \cdot \omega \cdot d_m \quad (\text{F.3})$$

A Figura F.3 mostra a superfície de resposta e as respectivas curvas de contorno para a resposta força de adesão em função das variáveis estudadas (diâmetro médio de partícula e velocidade angular de compressão), quando utilizou-se o polvilho doce e o vidro. Observa-se nesta figura, que a medida que a velocidade angular de compressão e o diâmetro médio das partículas do material pulverulento aumenta, a força de adesão aumenta, sendo que o fator diâmetro médio de partícula apresentou maior efeito na resposta força de adesão, confirmando desta maneira, a influência direta da granulometria da partícula na força de adesão partícula-substrato.

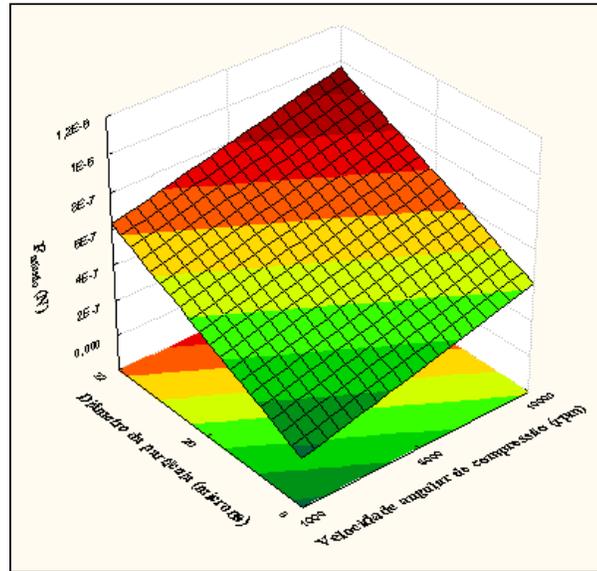


Figure F.3 – Superfície de resposta dos efeitos da velocidade angular de compressão e do diâmetro médio da partícula, sobre a força de adesão polvilho doce-vidro.