

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

**DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE ADESÃO ENTRE  
PARTÍCULAS E UMA SUPERFÍCIE APLICANDO A  
TÉCNICA CENTRÍFUGA**

**MARCOS ALCEU FELICETTI**

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica Lopes Aguiar**

**SÃO CARLOS – SP**

**2004**

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

F314df

Felicetti, Marcos Alceu.

Determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície aplicando a técnica centrífuga / Marcos Alceu Felicetti. -- São Carlos : UFSCar, 2004.

148 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2004.

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

CDD: 628.53 (20<sup>a</sup>)

**Para Viviane,**

**Com todo amor que existe em meu coração...**

**Não existiu um só instante em que eu pudesse sentir sua ausência...**

**Você se fez presente em cada um dos nossos dias, mesmo naqueles  
em que eu estive ausente...**

**Viveu e lutou comigo todas as lutas, venceu comigo cada vitória e  
sofreu comigo os momentos tristes...**

**Esteve presente a cada momento da minha vida e me fez feliz  
em todos eles...**

**Obrigado por estar sempre ao meu lado,  
por ser o meu anjo...**

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

## AGRADECIMENTOS

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

À Professora **Dr<sup>a</sup>. Mônica Lopes Aguiar** por sua orientação, paciência, amizade e dedicação.

Ao Professor **Dr. José Antonio Silveira Gonçalves** (DEQ/UFSCar) pela contribuição durante o desenvolvimento do trabalho experimental e pelas sugestões no Exame de Qualificação.

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

Aos Professores Doutores da banca de Mestrado, **João Jorge Ribeiro Damasceno** (DEQ/UFU) e **Luís Alexandre Pedro de Freitas** (FCFRP/USP), por aceitarem a responsabilidade de avaliar este trabalho e pela valiosa contribuição.

Ao Doutorando **Giancarlo Richard Salazar Banda** pelas valiosas contribuições para a realização deste trabalho e pela grande amizade.

Aos meus colegas de Pós-Graduação pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis, em especial: **Ana Paula Ribeiro, Edinalda e Nivaldo Correa, Edmundo Valdes, Érica Tieni, Juliana Steffens, Karina Bassan, Maria Carolina Falaguasta, Normanda Freitas, Ricardo Bruno e Wania Christinelli.**

Aos meus companheiros de república, **Eliezer Gomes, Leon Feitosa e Ljubomir Dimitrov** que formaram a minha família neste período vivido aqui em São Carlos. Companheiros com quem compartilhei momentos de alegria e de apoio fundamentais para a realização deste trabalho.

Às grandes amigas que sempre me incentivaram e apoiaram em todos os momentos para o desenvolvimento deste trabalho, em especial: **Anderson Martins, Dárley Melo, Euclides Braun, Fabio Rogério Silva, Gracinda Marina e Nélvio Hubner, Raul Leal, Robson Peguin e Roger Dalefe** e com carinho ao **Marcos Vinícius Rodrigues e Gisele Sancinetti.**

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido.

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.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a$  = Raio de contato, [L].  
 $a_0$  = Raio de contato zero, [L].  
 $A$  = Área projetada da partícula, [L<sup>2</sup>] – Equação (53).  
 $A$  = Constante de Hamaker, [M L<sup>2</sup> t<sup>-2</sup>] – Equação (1).  
 $c$  = Comprimento da falha no tamanho da partícula, [L].  
 $\bar{d}$  = Diâmetro da médio da partícula, [L].  
 $d$  = Diâmetro da partícula, [L].  
 $d'$  = Diâmetro da partícula, [L].  
 $d_p$  = Diâmetro da partícula, [L].  
 $D$  = Média harmônica dos diâmetros das esferas, [L].  
 $d_1$  = Diâmetro da esfera 1, [L].  
 $d_2$  = Diâmetro da esfera 2, [L].  
 $E$  = Campo elétrico aplicado à partícula, [M L I<sup>-1</sup> t<sup>-3</sup>].  
 $E_1$  = Coeficiente de elasticidade da esfera 1, [M L<sup>-1</sup> t<sup>-2</sup>].  
 $E_2$  = Coeficiente de elasticidade da esfera 2, [M L<sup>-1</sup> t<sup>-2</sup>].  
 $F$  = Força de adesão, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F$  = Força de compressão (*press-on*), [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F_0$  = Força de adesão não-eletrostática da partícula à superfície, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F^0$  = Força de Van der Waals entre duas esferas, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F^{0+}$  = Força total de Van der Waals, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F^{0+}$  = Força total do sistema, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F_A$  = Força de adesão de uma partícula em uma superfície, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F_{ad}$  = Força de adesão, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F_c$  = Força de capilaridade, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F_e$  = Força eletrostática, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $F_{vdw}$  = Força de Van der Waals, [M L t<sup>-2</sup>].  
 $h$  = 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 (57), [-].

$k_1$  = Parâmetro da Equação (57), [-].

$k_2$  = Parâmetro da Equação (57), [-].

$K$  = Módulo reduzido de elasticidade (Módulo de Young),  $[M L^{-1} t^{-2}]$ .

$K_E$  = Constante de proporcionalidade, [-].

$m$  = adimensional ( $c/a$ ), [-] – Equação (39).

$M$  = Massa da partícula,  $[M]$  – Equação (51).

$m$  = Massa das partículas,  $[M]$  – Equação (50).

$q$  = Carga da partícula,  $[I t]$ .

$R$  = Coeficiente de regressão linear, [-].

$r$  = Distância entre a superfície do substrato e o eixo de rotação,  $[L]$ .

$R$  = Raio da esfera,  $[L]$ .

$r$  = Raio da partícula,  $[L]$ .

$R'$  = 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 ao contato das superfícies,  $[M L t^{-2}]$ .

$W'$  = Trabalho de ruptura,  $[M L^2 t^{-2}]$ .

$w$  = Velocidade angular da superfície do substrato,  $[T^{-1}]$ .

$x$  = 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,  $[L]$ .

$\theta$  = Ângulo de contato entre a partícula aderida e o líquido, [-].

$\theta_1$  = Ângulo de contato entre a esfera e o líquido, [-].

$\theta_2$  = Ângulo de contato entre a superfície plana e o líquido, [-].



$\alpha$  = 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, [-].

$\nu$  = Coeficiente de Poisson, [-].

$\nu_1$  = Coeficiente de Poisson da esfera 1, [-].

$\nu_2$  = Coeficiente de Poisson da esfera 2, [-].

$\delta$  = Deformação da esfera, [L].

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

$\delta_c$  = Deslocamento de JKR ao desprendimento, [L].

$\varepsilon$  = Esfericidade da partícula, [-].

$\beta$  = Força que o campo elétrico aplica à carga da partícula, [M L t<sup>-2</sup>].

$\phi$  = Fração de compactação da estruturas de aglomerado, [-].

$\phi$  = Fração de compactação, [-].

$\lambda$  = Parâmetro adimensional de Maugis, [-].

$\sigma$  = Tensão superficial do líquido condensado, [M L<sup>-1</sup> T<sup>-2</sup>].

$\sigma_A$  = Desvio padrão das alturas das rugosidades da superfície, [-].

$\sigma_g$  = Desvio padrão geométrico, [-].

$\mu_M$  = Parâmetro adimensional de Müller, [-].

$\rho_p$  = Densidade da partícula, [M L<sup>-3</sup>].

$\varphi_p$  = Parâmetro adimensional de Pashley, [-].

$\gamma$  = Tensão superficial do líquido, [M T<sup>-2</sup>].

$\gamma_{s1}$  = Energia livre interfacial sólido-líquido, [M L<sup>2</sup> t<sup>-2</sup>].

$\gamma_1$  = Tensão superficial da fase 1 por unidade de área, [M T<sup>-2</sup>].

$\gamma_2$  = Tensão superficial da fase 2 por unidade de área, [M T<sup>-2</sup>].

$\gamma_{12}$  = Tensão superficial da interface entre 1 e 2 por unidade de área, [M T<sup>-2</sup>].

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Força de Van der Waals (Hinds, 1998) .....	4
<b>Figura 2.2</b> – Superfície submicroscópica de geometria de contato (Hinds, 1998) .....	4
<b>Figura 2.3</b> – Força de adesão devido a um filme líquido (Hinds, 1998).....	6
<b>Figura 2.4</b> – Estados de Saturação de Líquido: (a) Estado Pendular; (b) Estado Funicular; (c) Estado Capilar (Newitt e Conway-Jones, 1958) .....	8
<b>Figura 2.5</b> – Ponte Líquida entre uma esfera e uma superfície (Dahneke, 1972).....	9
<b>Figura 2.6</b> – Adesão pode ser definida como a força $F$ exigida para romper duas partículas (Kendall e Stainton, 2001).....	12
<b>Figura 2.7</b> – Contato entre uma esfera elástica e uma superfície plana (Cappella e Dietler, 1999) .....	16
<b>Figura 2.8</b> – Mapa da adesão para esferas elásticas, baseado no Modelo de Maugis (Johnson, 1998) .....	21
<b>Figura 2.9</b> – Efeitos da rugosidade na adesão (Johnson, 1998).....	22
<b>Figura 2.10</b> – Uma esfera rugosa em contato com uma esfera lisa (Xie, 1997) .....	23
<b>Figura 2.11</b> – Contato em sistema Sandwiche (Xie, 1997).....	24
<b>Figura 2.12</b> – Ilustração do contato entre duas esferas (a) antes da deformação; (b) depois da deformação (Xie, 1997) .....	25
<b>Figura 2.13</b> – (a) Desprendimento das partículas na Técnica Centrífuga, (b) Análise das imagens das superfícies antes e depois de cada centrifugação (Mizes et al., 2000).....	29
<b>Figura 3.1</b> – Microcentrífuga MA – 860.....	31
<b>Figura 3.2</b> – Equipamentos ligados em série para a aquisição e análise de imagens.....	32
<b>Figura 3.3</b> – Dispensador de Pó Galai PD – 10.....	33
<b>Figura 3.4</b> – Distribuição granulométrica do concentrado fosfático, obtida no Horiba, do DEMA – UFSCar .....	34
<b>Figura 3.5</b> – Distribuição granulométrica do calcário dolomítico, obtida no Horiba, do DEMA – UFSCar .....	35

<b>Figura 3.6</b> – Distribuição granulométrica do polvilho doce, obtida no Horiba, do DEMA – UFSCar .....	35
<b>Figura 3.7</b> – Distribuição granulométrica para concentrado fosfático, calcário dolomítico e o polvilho doce obtida no Horiba, do DEMA – UFSCar .....	36
<b>Figura 3.8</b> – Tubo e adaptador, construídos em alumínio, que estão instalados na microcentrífuga .....	37
<b>Figura 3.9</b> – <b>(a)</b> Superfície do disco de prova contendo os reticulados (Câmera Digital, Sony DSC – P92); <b>(b)</b> Um único reticulado da superfície do disco de prova (Com ampliação de 100 vezes do Microscópio Óptico – Olympus BX60) .....	38
<b>Figura 3.10</b> – Diâmetro Médio definido pelo software Image-Pro Plus 3.0 .....	39
<b>Figura 3.11</b> – Microfotografia do disco de prova após a aplicação da força de compressão ( <i>press-on</i> ) de 2000 rpm (Com ampliação de 100 vezes do Microscópio Óptico – Olympus BX60) .....	41
<b>Figura 3.12</b> – Microfotografia da superfície do disco de prova após aplicação da força <i>spin-off</i> de 14000 rpm (Com ampliação de 100 vezes do Microscópio Óptico – Olympus BX60) .....	43
<b>Figura 4.1</b> – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 1000 rpm ....	45
<b>Figura 4.2</b> - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 1000 rpm.....	47
<b>Figura 4.3</b> - Porcentagem de Partículas aderidas em função da força de adesão variando a força de compressão para partículas de 10 – 17 $\mu\text{m}$ .....	50
<b>Figura 4.4</b> – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 2000 rpm .....	51
<b>Figura 4.5</b> - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 2000 rpm.....	52

<b>Figura 4.6</b> – Porcentagem de Partículas aderidas em função da força de adesão variando a força de compressão para partículas de 17 - 24 $\mu\text{m}$ .....	53
<b>Figura 4.7</b> – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 10000 rpm .....	55
<b>Figura 4.8</b> - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 10000 rpm .....	56
<b>Figura 4.9</b> – Porcentagem de Partículas aderidas em função da força de adesão variando a força de compressão para partículas de 10 - 17 $\mu\text{m}$ .....	57
<b>Figura 4.10</b> – Força de Adesão em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 10000 rpm .....	59
<b>Figura 4.11</b> – Distância de Separação Efetiva em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 2000 rpm.....	63
<b>Figura 4.12</b> – Imagem do material pulverulento polvilho doce, obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.....	64
<b>Figura 4.13</b> – Imagem do material pulverulento concentrado fosfático, obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.....	65
<b>Figura 4.14</b> – Imagem do material pulverulento calcário dolomítico, obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.....	65
<b>Figura 4.15</b> – Força de Adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático, após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000, e 10000 rpm, para o ajuste da Equação (58) .....	67
<b>Figura 4.16</b> – Força de Adesão em função do diâmetro médio das partículas de calcário dolomítico, após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000, e 10000 rpm, para o ajuste da Equação (58) .....	68
<b>Figura 4.17</b> – Força de Adesão em função do diâmetro médio das partículas de polvilho doce, após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000, e 10000 rpm, para o ajuste da Equação (58).....	69

- Figura 4.18** – Força de Adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de concentrado fosfático, após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000, e 10000 rpm, para o ajuste da Equação (61)..... 70
- Figura 4.19** – Força de Adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de calcário dolomítico, após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000, e 10000 rpm, para o ajuste da Equação (61)..... 70
- Figura 4.20** – Força de Adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de polvilho doce, após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000, e 10000 rpm, para o ajuste da Equação (61)..... 71
- Figura D.1** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm..... 141
- Figura D.2** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm..... 141
- Figura D.3** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm ..... 142
- Figura D.4** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm ..... 142
- Figura D.5** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm..... 143
- Figura D.6** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm..... 143
- Figura D.7** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm ..... 144

- Figura D.8** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm..... 144
- Figura D.9** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm..... 145
- Figura D.10** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm..... 145
- Figura D.11** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm..... 146
- Figura D.12** – Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm..... 146
- Figura D.13** – Força de Adesão em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 1000 rpm..... 147
- Figura D.14** – Força de Adesão em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 2000 rpm..... 147
- Figura D.15** - Distância de Separação Efetiva em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 1000 rpm..... 148
- Figura D.16** - Distância de Separação Efetiva em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 10000 rpm..... 148

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> – Massa média para cada partícula de concentrado fosfático .....	46
<b>Tabela 4.2</b> – Resultados da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 1000 rpm.....	48
<b>Tabela 4.3</b> – Resultados da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 2000 rpm.....	49
<b>Tabela 4.4</b> – Resultados da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 10000 rpm.....	49
<b>Tabela 4.5</b> – Comparação da Mediana Geométrica da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 1000 rpm, 2000 e 10000 rpm .....	50
<b>Tabela 4.6</b> – Massa média para cada partícula de calcário dolomítico.....	52
<b>Tabela 4.7</b> – Comparação da Mediana Geométrica da força de adesão para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 1000, 2000 e 10000 rpm.....	54
<b>Tabela 4.8</b> – Massa média para cada partícula de polvilho doce .....	55
<b>Tabela 4.9</b> – Resultados da força de adesão para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 10000 rpm.....	57
<b>Tabela 4.10</b> – Comparação da Mediana Geométrica da força de adesão para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão ( <i>press-on</i> ) de 10000 rpm .....	58
<b>Tabela 4.11</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 1000 rpm.....	60
<b>Tabela 4.12</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 2000 rpm.....	61
<b>Tabela 4.13</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 10000 rpm.....	61
<b>Tabela 4.14</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 1000 rpm.....	61

<b>Tabela 4.15</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 2000 rpm.....	61
<b>Tabela 4.16</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 10000 rpm.....	62
<b>Tabela 4.17</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 1000 rpm.....	62
<b>Tabela 4.18</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 2000 rpm.....	62
<b>Tabela 4.19</b> – Distância de Separação Efetiva entre as superfícies para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga ( <i>press-on</i> ) de 10000 rpm.....	62
<b>Tabela A.1</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm).....	86
<b>Tabela A.2</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm).....	87
<b>Tabela A.3</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm).....	88
<b>Tabela A.4</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm).....	90
<b>Tabela A.5</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm).....	91
<b>Tabela A.6</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm).....	92
<b>Tabela A.7</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm).....	93



<b>Tabela A.8</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm).....	94
<b>Tabela A.9</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 – 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm).....	95
<b>Tabela A.10</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm).....	96
<b>Tabela A.11</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm).....	97
<b>Tabela A.12</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm).....	98
<b>Tabela A.13</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm).....	99
<b>Tabela A.14</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm).....	101
<b>Tabela A.15</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm).....	102
<b>Tabela A.16</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 –24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm).....	103
<b>Tabela A.17</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm).....	104

<b>Tabela A.18</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	104
<b>Tabela B.1</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	106
<b>Tabela B.2</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	107
<b>Tabela B.3</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	108
<b>Tabela B.4</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	109
<b>Tabela B.5</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	110
<b>Tabela B.6</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	111
<b>Tabela B.7</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	111
<b>Tabela B.8</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 - 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	113
<b>Tabela B.9</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	113

<b>Tabela B.10</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	114
<b>Tabela B.11</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm).....	115
<b>Tabela B.12</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	116
<b>Tabela B.13</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm).....	116
<b>Tabela B.14</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 - 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	118
<b>Tabela B.15</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm).....	118
<b>Tabela B.16</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	119
<b>Tabela B.17</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm).....	119
<b>Tabela B.18</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	120
<b>Tabela C.1</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	122
<b>Tabela C.2</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) ..	123

<b>Tabela C.3</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	124
<b>Tabela C.4</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) ...	124
<b>Tabela C.5</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) .....	125
<b>Tabela C.6</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1,491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 1000 rpm) ..	126
<b>Tabela C.7</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1,491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	127
<b>Tabela C.8</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 - 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) ...	129
<b>Tabela C.9</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	130
<b>Tabela C.10</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	130
<b>Tabela C.11</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	131
<b>Tabela C.12</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 2000 rpm) .....	132
<b>Tabela C.13</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 – 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	133

<b>Tabela C.14</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 - 17 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	135
<b>Tabela C.15</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	135
<b>Tabela C.16</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1,491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	136
<b>Tabela C.17</b> – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	137
<b>Tabela C.18</b> – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31 $\mu\text{m}$ ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ , <i>Press-on</i> = 10000 rpm) .....	138

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIAS E AGRADECIMENTOS.....	i
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
SUMÁRIO.....	xix
RESUMO.....	xxi
ABSTRACT.....	xxiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Adesão.....	3
2.2 Componentes da Força de Adesão.....	3
2.3 Fatores Físicos que Controlam a Adesão.....	9
2.3.1 Morfologia das Partículas.....	10
2.4 Adesão e Aglomeração de Partículas Finas.....	11
2.4.1 Teoria da Adesão.....	12
2.4.2 Força de Aglomerados.....	13
2.5 Modelos Teóricos do Contato entre Partículas.....	15
2.5.1 Modelo de Hertz.....	15
2.5.2 Modelo de Derjaguin-Müller-Toporov (DMT).....	17
2.5.3 Modelo de Johnson-Kendall-Roberts (JKR).....	17
2.5.4 Modelo de Maugis.....	19
2.6 Características das Superfícies que Influenciam a Adesão.....	21
2.6.1 Influência da Rugosidade das superfícies na Força de Adesão.....	21
2.6.2 Influência das Propriedades Mecânicas das Superfícies.....	25
2.7 Métodos Utilizados para Medir a Força de Adesão.....	26

2.7.1 Técnica Centrífuga .....	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
3.1 Materiais.....	31
3.1.1 Equipamentos.....	31
3.1.2 Matéria Prima.....	34
3.2 Método .....	36
3.2.1 Determinação da Massa das Partículas .....	38
3.2.2 Dispersão do Material Pulverulento na Superfície dos Discos de Prova .....	40
3.2.3 Procedimento Experimental.....	40
3.3 Tratamento dos Dados .....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	44
Determinação da Força de Adesão para Partículas de Concentrado Fosfático.....	45
Determinação da Força de Adesão para Partículas de Calcário Dolomítico .....	51
Determinação da Força de Adesão para Partículas de Polvilho Doce .....	54
Cálculo da Distância de Separação Efetiva entre as Superfícies .....	60
Obtenção de uma Equação para a Força de Adesão para os Três Materiais Pulverulentos testados.....	66
5. CONCLUSÕES .....	74
6. SUGESTÕES .....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
APÊNDICE A.....	85
APÊNDICE B .....	105
APÊNDICE C .....	121
APÊNDICE D .....	139

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo investigar a influência do tamanho das partículas do material pulverulento sobre a força de adesão partícula substrato, utilizando a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e desprendimento. Uma microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos), cuja velocidade máxima de rotação é de 14000 rpm, foi o equipamento utilizado no desenvolvimento dos experimentos laboratoriais juntamente com um programa de análise de imagens (Image-Pro Plus 3.0). Para a realização dos experimentos foram especialmente construídos dois tubos e instalados junto ao cabeçote da microcentrífuga. Nesses tubos são colocados os adaptadores cuja finalidade é de sustentar os discos de prova contendo o material pulverulento. A velocidade centrífuga é gerada para promover a compressão (*Press-on*) ou o desprendimento (*Spin-off*) das partículas sobre a superfície dos discos. Após a contagem das partículas inicialmente aderidas na superfície, os discos retornam para a microcentrífuga para se fazer o desprendimento destas partículas, também em diferentes velocidades de rotação. Após cada aumento da velocidade rotacional, o número de partículas aderidas na superfície dos discos foi monitorado. A influência das forças aplicadas na adesão do concentrado fosfático ( $\rho = 3,066 \text{ g/cm}^3$  e  $d_p = 14,91 \text{ }\mu\text{m}$ ), polvilho doce ( $\rho = 1,491 \text{ g/cm}^3$  e  $d_p = 4,93 \text{ }\mu\text{m}$ ) e do calcário dolomítico ( $\rho = 2,838 \text{ g/cm}^3$  e  $d_p = 11,97 \text{ }\mu\text{m}$ ) sobre um substrato de aço inoxidável foi investigado usando a técnica centrífuga. As faixas de diâmetro estudadas para esses materiais particulados foram de 10 – 17  $\mu\text{m}$ , 17 – 24  $\mu\text{m}$  e 24 – 31  $\mu\text{m}$ . As partículas de cada pó foram inicialmente pressionadas sobre a superfície do substrato centrifugado a uma velocidade 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 partículas dos três materiais pulverulentos utilizados nos experimentos, e a superfície do disco de aço



inoxidável aumentou com o aumento do tamanho das partículas e com o aumento da força de compressão (*press-on*). A ordem de aderência indicou a seguinte relação: polvilho doce > calcário dolomítico > concentrado fosfático.

## ***ABSTRACT***

The present work is dedicated to the investigation of the influence of particles size of the powdery material on the adhesion force of particle-substrate, using the centrifugal technique for different compression speeds and detachment. A centrifuge (MA - 860, Marconi Equipamentos), with maximum speed of rotation 14000 rpm, was used in the adhesion experiments and also a program of analysis of images (Image-Pro Plus 3.0). For the experiments development, two tubes were specially builded and installed in the headstock of the centrifuge. Inside of those tubes there are two adapters placed with the purpose to stand the proof disks containing the powdery material. The centrifugal force speed is generated to promote the compression (Press-on) or the detachment (Spin-off) of the particles on the surface of the disks. After the count of the particles initially stuck on the surface, the disks were returned back in the centrifuge to proceed the detachment of the particles, using different rotation speeds. After each increase of the rotational speed, the number of particles stuck on the surface of the disks is monitored. The centrifugal speed will exceed above of the adhesion force between the particle and the surface. At equilibrium, the magnitude of the centrifugal force applied equals the adhesion force. The influence of the applied forces in the adhesion of the phosphatic concentrate ( $\rho = 3,066 \text{ g/cm}^3$  and  $d_p = 14,91 \text{ }\mu\text{m}$ ), the manioc starch ( $\rho = 1,491 \text{ g/cm}^3$  and  $d_p = 4,93 \text{ }\mu\text{m}$ ) and the dolomite limestone ( $\rho = 2,838 \text{ g/cm}^3$  and  $d_p = 11,97 \text{ }\mu\text{m}$ ) on a substratum of stainless steel was investigated using the centrifugal technique. The range diameter studied for those particulate materials were of 10 - 17  $\mu\text{m}$ , 17 - 24  $\mu\text{m}$  and 24 - 31  $\mu\text{m}$ . The particles of each powder were pressed initially on the surface of the substratum centrifuged to a private speed, 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 particles of the three powdery materials, used in the experiments, and the surface of the disk of stainless steel

increased with the increase of the size of the particles and with the increase of the compression force (press-on). the order of adherence indicated the following relationship: manioc starch > dolomite limestone > phosphatic concentrate.

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A força de adesão pode ser definida como a força exigida para desprender uma partícula aderida a uma determinada superfície. Conhecer a força de adesão não só é importante para a descrição quantitativa da filtração, mas também para os processos 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) e Astm (1977).

A adesão de partículas micrométricas em superfícies vem ganhando destaque em vários campos da tecnologia. Adesão entre pós e superfícies tem um papel significativo em, por exemplo, transporte pneumático de materiais, eletrofotografia (Lee, Jaffe e Mittall; 1998), fluidização de partículas finas e microencapsulação. 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) e tem como vantagem poder determinar a força de adesão entre partículas reais de formas regulares e irregulares em superfícies lisas ou rugosas. 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. A técnica centrífuga apresenta outra vantagem importante sobre as demais técnicas existentes, principalmente sobre a técnica de microscopia de força atômica. 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. Os resultados levantados são tratados estatisticamente para se obter a força de adesão média das partículas.

Diante da importância da força de adesão em vários processos, este trabalho tem como finalidade estudar e determinar a magnitude da força de adesão entre partículas e uma superfície empregando a técnica centrífuga. A identificação da força de adesão entre partículas e superfícies é um parâmetro muito importante a ser estudado e determinado, pois auxilia, por exemplo, no dimensionamento dos equipamentos, na escolha dos componentes como candidatos para misturas de pó e na influência das propriedades da força de adesão de pós nas camadas metálicas dos equipamentos. Por outro lado, podem ser esperadas medidas de adesão para fornecer um novo conhecimento na física e química das superfícies e interfaces. Esta técnica foi usada em outros estudos e proporcionou informações sobre a força de adesão de vários pós e materiais particulados [Lam e Newton (1982), Podczek (1995), Podczek & Newton (1996), Rennie (1998), Podczek (1999), Banda (2002)].

Dando continuidade 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) usando a técnica centrífuga, o objetivo deste trabalho é investigar a influência do tamanho das partículas do material pulverulento sobre a força de adesão partícula substrato, utilizando a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e desprendimento. 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**

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. Entretanto, foram apresentadas várias definições para a adesão (Kemball, 1954; Eley e Tabor, 1961; Salomon, 1965; Bikerman, 1968; Good, 1976; Astm, 1977 e Mittal, 1977), porém nenhuma é totalmente satisfatória ou universalmente aceita.

A determinação da força de adesão entre partículas é de grande interesse a uma gama extensiva de operações industriais, tão diversos como no processamento de materiais cerâmicos e até na limpeza de gases. Em todas as operações, estas forças são responsáveis pela força de aglomerados (algumas vezes são desejados, outras não) eventualmente formados no processo (Aguiar, 1995).

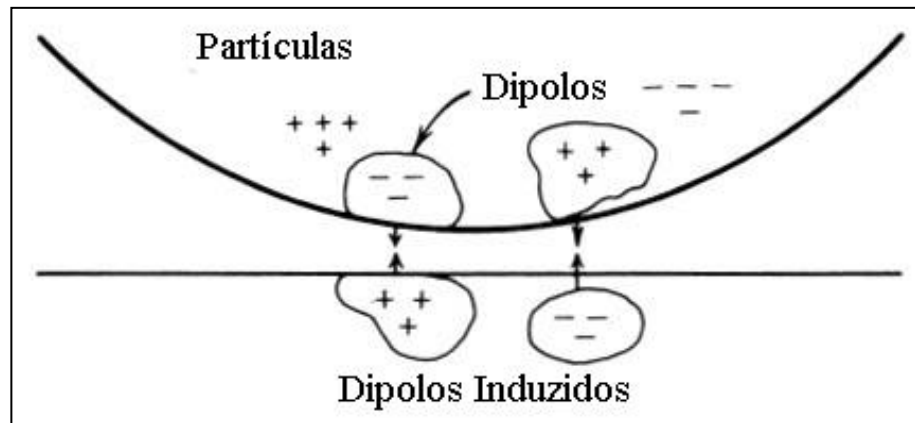
Para uma melhor compreensão teórica destes processos, é necessário distinguir as forças envolvidas na adesão entre partículas e um substrato.

#### **2.2 - Componentes da Força de Adesão**

Geralmente, a força de adesão entre corpos contíguos é devido às forças de Van der Waals, Eletrostática e Capilar (Rumpf, 1977), mas o domínio de uma ou várias destas forças dependem das condições ambientais durante os experimentos e das propriedades físico-química dos materiais em contato. Todas estas forças, em tese, são afetadas pelo material, pela forma, pela aspereza da superfície, pelo tamanho da partícula, pela umidade relativa do ar, pela duração de contato e pela velocidade inicial de contato.

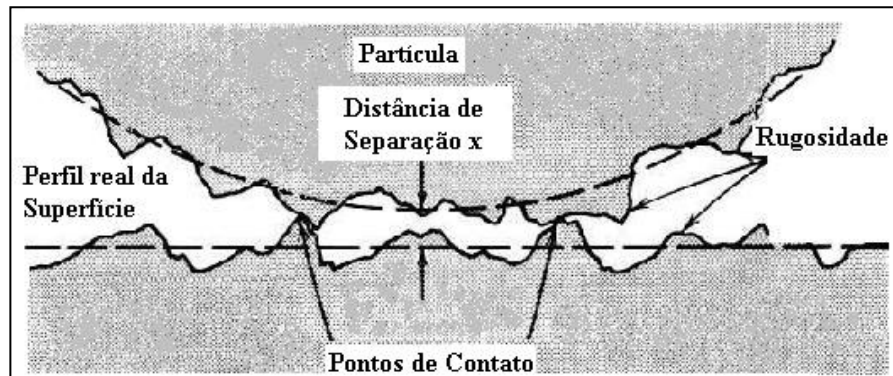
A força mais importante é a força de Van der Waals. Esta força surge porque o movimento aleatório dos elétrons, em qualquer material, produz áreas transitórias de

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 maioria do material está separado por uma distância de separação  $x$ , que depende da rugosidade da superfície.

O efeito líquido 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):

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

sendo  $D$  expresso pela Equação (2):

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

em que,  $A$  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 controla o tamanho da área de contato final e, portanto, a intensidade da força adesiva. O achatamento pode aumentar a força adesiva por até quinze vezes mais em metais leves e cem vezes mais em plásticos (Tsai et al., 1991).

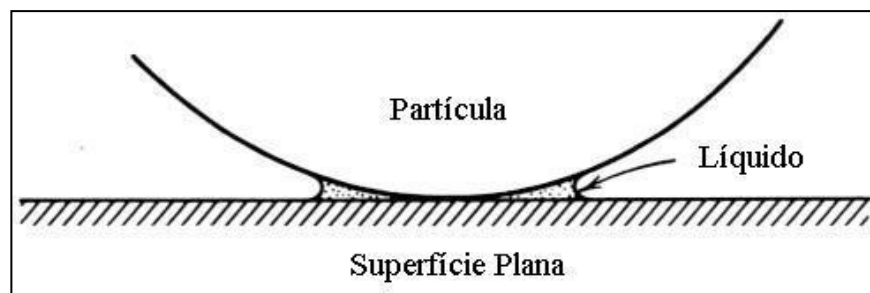
A maioria das partículas de  $0,1 \mu\text{m}$  ou maiores carrega alguma pequena carga resultante  $q$ , que induz uma carga igual, mas de sentido contrária na superfície. Isto resulta em uma força eletrostática atrativa expressa pela Equação (3) proposta por Hinds (1998):



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

em que  $K_E$  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  $\sqrt{d}$ . Abaixo das condições normais, a maioria dos materiais tem adsorvidas moléculas líquidas 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):

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

sendo que,  $\gamma$  é a tensão superficial do líquido,  $d$  é o diâmetro da partícula e  $\pi = 3,1416$  radianos. 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 adesiva, 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):

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

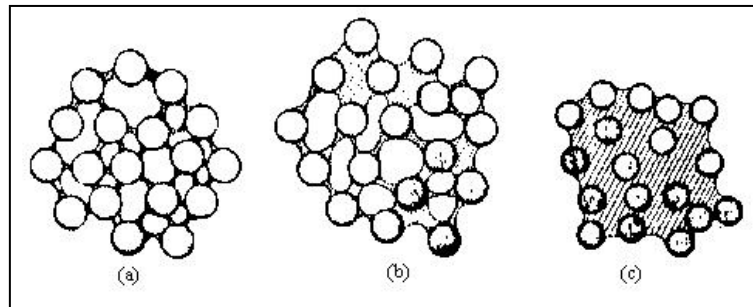
sendo que a força de adesão,  $F_{\text{ad}}$ , é dada em Newton, o diâmetro da partícula,  $d$ , é dado em metro, e a umidade relativa do ar, %RH, em percentagem.

A força eletrostática é dez vezes menor que a força de Van der Waals (Rumpf, 1977). 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 surge durante o contato de superfícies, mas é constante no contato entre dois materiais definidos (Zimon, 1982).

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: superfície, energia livre e aspereza de 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 vaso capilar e o funicular, conforme podem ser vistos na Figura 2.4. O estado pendular foi estudado extensivamente (Newitt e Conway-Jones, 1958) e é mais

aplicável às situações de adesão típicas. 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 aspereza 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):

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

sendo:

$F_c$  = força de Capilaridade

$r$  = raio da partícula esférica aderida

$\gamma$  = tensão superficial do líquido condensado

$\theta_1$  e  $\theta_2$  = ângulos de contato entre os dois corpos em contato e o líquido, apresentados na Figura 2.5.

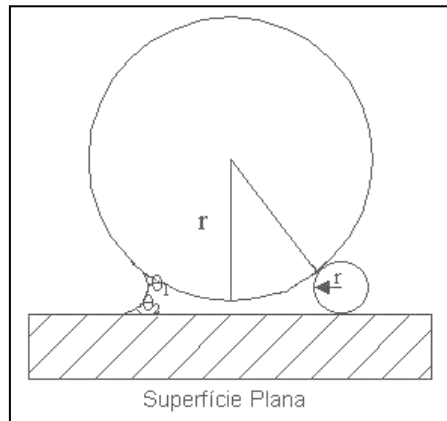
Posteriormente, Fisher e Israelachvili (1981) propuseram a Equação (7) para calcular a força de capilaridade:

$$F_c = 4\pi r \gamma \cos \theta + 4\pi r \gamma_{s1} \quad (7)$$

sendo que:

$\gamma$  = tensão superficial do líquido condensado

$\gamma_{s1}$  = energia livre interfacial sólido-líquido



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

A força de adesão total é o somatório de várias forças (Stewart, 1986) e está ilustrada pela Equação (8).

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

Sendo:

$F_{vdw}$  = força de Van der Waals

$F_e$  = força Eletrostática

$F_c$  = força de Capilaridade

### 2.3 - Fatores Físicos que Controlam a Adesão

Considera-se que os três fatores que controlam a adesão são: a forma irregular da partícula, a carga e a distribuição da carga sobre a partícula, na presença de partículas vizinhas (Lam e Newton, 1991). Estes três efeitos da morfologia, da carga e da partícula vizinha, podem ser vistos em condições individuais na Equação (9):

$$F_{ad} = F_0 + \alpha \cdot q^2 - \beta \cdot q \cdot E + \gamma \cdot E^2 \quad (9)$$

Na equação (9),  $F_{ad}$  é a força de adesão de uma partícula em uma superfície,  $q$  é a carga na partícula e  $E$  é o campo elétrico aplicado à partícula para tentar remove-la da superfície.  $F_0$  representa toda a força de adesão não-eletrostática da partícula à superfície, incluindo a força de atração de Van der Waals e a força de capilaridade.  $\alpha$  é um coeficiente que depende da geometria da partícula e das constantes dielétricas da partícula e da superfície. A terceira parcela da equação é a força que o campo elétrico aplica à partícula para removê-la da superfície.  $\beta$  depende da geometria da situação e das constantes dielétricas. A última parcela é a atração por polarização da partícula, induzida pelo campo elétrico, para sua imagem na superfície (Mizes et alii., 2000).

### 2.3.1 - Morfologia das Partículas

A adesão pode ser modificada pela morfologia da partícula, atritando uma partícula ou acrescentando aerossóis ou partículas menores a sua superfície (Ott e Mizes, 1994). De modo geral, ambas estas técnicas causam as partículas um contato menos íntimo e, por conseguinte uma menor adesão. O efeito da rugosidade da superfície pode ser expresso mais rigorosamente usando a aproximação de Derjaguin (Israelachvili, 1991). Esta aproximação é válida para forças de atração de ação longa devido à dependência da lei de força. A aproximação de Derjaguin é válida para atração de Van der Waals e atração eletrostática entre partículas. Quanto maior o contato entre duas superfícies menor é a adesão. Isto foi usado para explicar a diferença entre a adesão experimentalmente observada e a adesão predita pela teoria de JKR (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 (10):

$$F_{ad} = W \left( \frac{R_p \cdot R_s}{R_p + R_s} \right) \quad (10)$$

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 (11) sendo definido como  $W_{12}$ . Para os dois meios iguais, este trabalho é conhecido como trabalho de coesão  $W_{11}$  (Israelachvili, 1991).

$$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (11)$$

Onde:

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

$\gamma_1$  = é a tensão superficial da fase 1 por unidade de área

$\gamma_2$  = é a tensão superficial da fase 2 por unidade de área

$\gamma_{12}$  = 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), como mostra a Equação (12):

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

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).

Para sólidos,  $\gamma_1$  é usualmente denotada por  $\gamma_S$  e é dada em unidade de energia por unidade de área:  $J m^{-2}$ . Para líquidos,  $\gamma_1$  é usualmente denotada por  $\gamma_L$  e é geralmente dada em unidade de tensão superficial ou energia superficial:  $N m^{-1}$  (Israelachvili, 1991).

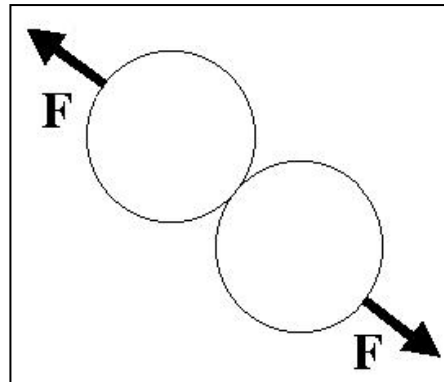
## 2.4 - Adesão e Aglomeração de Partículas Finas

Aumentando as forças de adesão entre partículas em um aglomerado aumenta-se a força do aglomerado, porque a 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 força 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 a força  $F$  exigida para separar duas partículas, como mostrado na Figura 2.6.



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

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 ( $D$ ) e ao trabalho de adesão ( $W$ ) por unidade de área, dada pela Equação (13):

$$F_{ad} = \frac{\pi \cdot W \cdot D}{2} \quad (13)$$

Dois anos depois, Derjaguin (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 et al. (Johnson, Kendal e Roberts, 1971) 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 (14):

$$F_{ad} = \frac{3 \cdot \pi \cdot W \cdot D}{8} \quad (14)$$

Novamente, neste caso de partícula elástica, a força de adesão aumentou proporcionalmente com o diâmetro das partículas, confirmando a regra de Bradley e Philos. Isto é paradoxal porque foi constatado através de experiências que força de adesão tende a diminuir com o aumento da partícula, partículas finas aderem mais e partículas grandes aderem menos. Esta observação é mais bem explicada comparando a força de adesão da partícula com a força gravitacional que tende 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 adesivas são reduzidas e há muita pouca influência da adesão no comportamento do pneu. Agora, uma partícula de 1  $\mu\text{m}$  de diâmetro, como a bactéria que possui uma adesão 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**

Uma influência óbvia da adesão está na força de aglomerados. Seria esperado que, com aumentos de adesão, aglomerados devessem ficar mais fortes. Esta é uma teoria desenvolvida por Rumpf (1962) e Zimon (1982) nos anos cinquenta. Rumpf (1962) expressou a adesão de partícula em termos da constante de Hamaker e a separação entre superfícies, parâmetros que são difíceis de medir. Frequentemente é melhor usar o trabalho do modelo de adesão da Equação (14); porque contém um



parâmetro,  $W$ , que pode ser prontamente definido e medido experimentalmente. Ambas as teorias deram a mesma dependência linear por força de adesão em tamanho de partícula. Isto conduz a uma força 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 (14) de JKR, e se todas as esferas se desprendem simultaneamente como Rumpf (1962) assumiu, então a resistência à tração teórica  $\sigma$  do aglomerado pode ser expresso pela Equação (15) (Kendall, Alford e Birchall, 1986):

$$\sigma = \frac{3 \cdot \pi \cdot W}{8 \cdot D} \quad (15)$$

Esta equação mostra que a força 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 m<sup>2</sup> J teria de acordo com a equação (15) 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  $\phi$  das estruturas de aglomerado, surge então a Equação (16) que é realística para a força de aglomerados (Kendall, Alford e Birchall, 1986):

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

sendo  $\phi$  a fração de compactação e  $W'$  é o trabalho de ruptura. O tamanho da partícula é importante, mas o comprimento da falha  $c$  também representa para 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  $c = D$  e esta equação reduz a Equação (17):

$$\sigma = \frac{90 \cdot \phi^4 \cdot W'}{D} \quad (17)$$

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 cilíndrica 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 ( $\delta$ ) na esfera, como mostrado na 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.

Para uma esfera de raio ( $R$ ) comprimida contra uma superfície plana por uma força ( $F$ ), a adesão ( $F_{ad}$ ), o raio de contato ( $a$ ), o raio de contato na adesão zero ( $a_0$ ) e a deformação da extremidade esférica ( $\delta$ ) são determinados pelas Equações (18) a (22):

$$F_{ad} = 0 \quad (18)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{RF}{K}} \quad (19)$$

$$a_0 = 0 \quad (20)$$

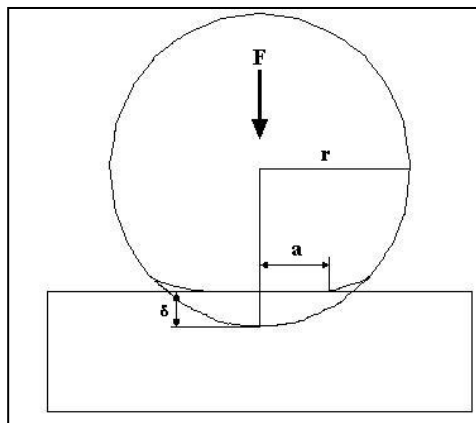
$$\delta = \frac{a^2}{R} = \frac{F}{Ka} \quad (21)$$

e,

$$P(x) = \frac{3Ka\sqrt{1-x^2}}{2\pi R} = \frac{3F\sqrt{1-x^2}}{2\pi a^2} \quad (22)$$

na qual  $x = y/a$ , onde  $y$  é a distância do centro do círculo de contato, e o módulo reduzido de Young  $K$  é dado pela Equação (23):

$$\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left( \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \right) \quad (23)$$



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

Na Equação (23),  $E$ ,  $E_i$ ,  $\nu$  e  $\nu_i$  são o módulo 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) 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 (24) a (28) são as equações correspondentes as Equações (18) a (22) obtidas minimizando a soma elástica e a energia de superfície. Veja as Equações (24) a (28):

$$F_{ad} = 2\pi RW \quad (24)$$

$$a = \sqrt[3]{(F + 2\pi RW) \frac{R}{K'}} \quad (25)$$

$$a_0 = \sqrt[3]{\frac{2\pi W}{k} R^2} \quad (26)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} \quad (27)$$

$$P(x) = \frac{3K_a \sqrt{1-x^2}}{2\pi R} = \frac{3F\sqrt{1-x^2}}{2\pi a^2} \quad (28)$$

A teoria de DMT é aplicável para sistemas com baixa adesão e raios de pequena extensão.

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

A teoria de Johnson-Kendall-Roberts (JKR) negligencia 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 (18) a (22) são as Equações (29) a (33):

$$F_{ad} = \frac{3}{2} \pi R W \quad (29)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{R}{K} \left[ F + 3\pi R W + \sqrt{6\pi R W F + (3\pi R W)^2} \right]} \quad (30)$$

$$a_0 = \sqrt[3]{\frac{6\pi R^2 W}{K}} \quad (31)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{6\pi W a}{K}} \quad (32)$$

e,

$$P(x) = \frac{3Ka}{2\pi R} \sqrt{1-x^2} - \sqrt{\frac{3KW}{2\pi a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}} \quad (33)$$

O método de JKR é satisfatório para sistemas altamente adesivos com baixa dureza e raio de extensão grande. Uma dificuldade com a teoria de JKR é prever uma tensão infinita para  $x = 1$ , isto é, na extremidade da área de contato. Esta situação não física surge porque a teoria de JKR considera somente as forças dentro da área de contato e assume, implicitamente, que a ação das forças atrativas é de uma pequena extensão infinitésima. Esta expansão infinitésima desaparece assim que uma lei da força de extensão finita, por exemplo, potencial Lennard-Jones, é assumido. 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  $\sigma_A$  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  $\mu_M$  for variado. Pashley (1984) já tinha apresentado um parâmetro  $\varphi_p$  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 (34):

$$\varphi_p = \frac{h}{z_0} \cong \sqrt{\frac{RW^2}{K^2 z_0^3}} \quad (34)$$

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  $\lambda$  dado pela Equação (35):

$$\lambda = \frac{2,06}{z_0} \sqrt[3]{\frac{RW^2}{\pi K^2}} \quad (35)$$

Na qual  $z_0$  é novamente uma dimensão atômica típica. Este parâmetro  $\lambda$  é proporcional ao parâmetro  $\mu_M$  introduzido por Müller (1983) ( $\lambda = 0,4\mu_M$ ), o parâmetro  $\varphi_p$  apresentado por Pashley e o parâmetro  $\sigma_A$  apresentado por Attard e Parker (1982) ( $\lambda \cong 0,4\sqrt[3]{\sigma_A^2}$ ). Um grande  $\lambda$  ocorre para corpos mais complacentes e adesivos, considerando que um pequeno  $\lambda$  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 (36) a (38):

$$\bar{A} = \frac{a}{\sqrt[3]{\pi WR^2 / K}} \quad (36)$$

$$\bar{F} = \frac{F}{\pi WR} \quad (37)$$

e

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\sqrt[3]{\pi^2 W^2 R / K^2}} \quad (38)$$

Um conjunto de equações paramétricas é obtido. Em particular, as Equações (39) a (41) são correspondentes as Equações (18) e (21):

$$\bar{\delta} = \bar{A}^2 - \frac{4}{3} \bar{A} \lambda \sqrt{m^2 - 1} \quad (39)$$

$$\frac{\lambda \bar{A}^2}{2} \left[ \sqrt{m^2 - 1} + (m^2 - 1) \arctg \sqrt{m^2 - 1} \right] + \frac{4 \lambda^2 \bar{A}}{3} \left[ -m + 1 + \sqrt{m^2 - 1} \arctg \sqrt{m^2 - 1} \right] = 1 \quad (40)$$

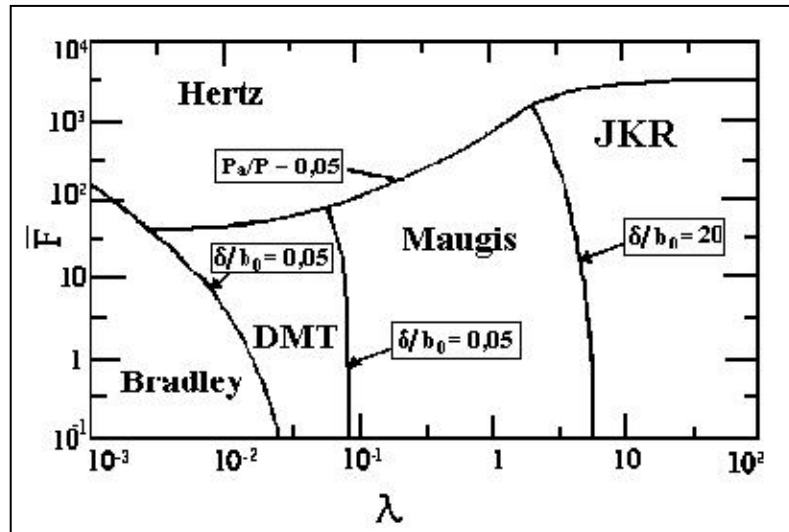
e,

$$\bar{F} = \bar{A}^3 - \lambda \bar{A}^2 \left( \sqrt{m^2 - 1} + m^2 \arctg \sqrt{m^2 - 1} \right) \quad (41)$$

As Equações (39) a (41) formam um sistema de equações que habilita o cálculo de  $m$ ,  $F$  e  $\bar{\delta}(\bar{A})$  se  $\bar{A}(\bar{\delta})$  é dado pela Equação (39) reduz a Equação (27) para  $\lambda \rightarrow 0$  (DMT) e para Equação (32) para  $\lambda \rightarrow \infty$  (JKR). A força de adesão  $F_{ad}$  dada pela Equação (41) 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, mostrado na 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. Esta figura permite encontrar o modelo a ser aplicado em função das propriedades do material (Cappella e Dietler, 1999).



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

## 2.6 – Características das Superfícies que Influenciam a Adesão

A força de adesão depende de algumas características tais como: a rugosidade das superfícies, o tamanho e a forma das partículas e as propriedades mecânicas das superfícies (Lam e Newton, 1991).

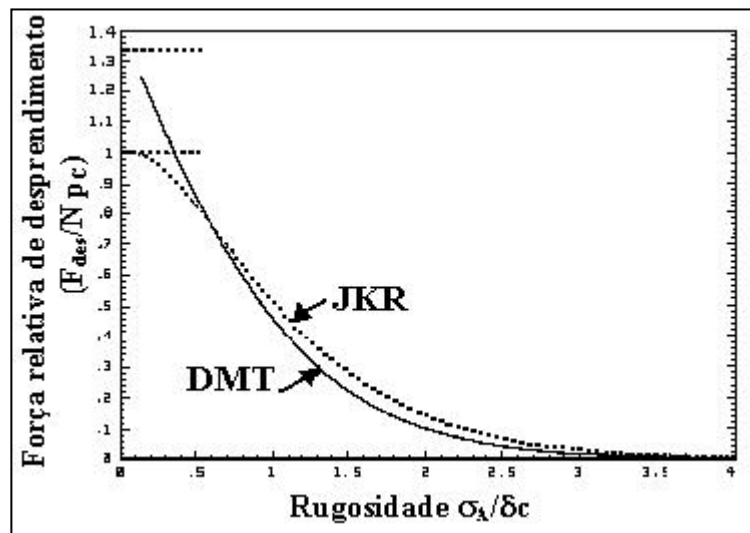
### 2.6.1 - Influência da Rugosidade das Superfícies na Força de Adesão

É comum que superfícies planas e secas não aderem quando pressionadas contra elas. Isto pode facilmente ser atribuído a rugosidade da superfície. Este comportamento foi modelado por JKR e condicionado por Fuller e Tabor (1975) e por DMT pelas condições de Maugis (1996), como mostrado na Figura 2.9. A influência da rugosidade é caracterizada pelo parâmetro  $(\sigma/\delta_c)$ , onde  $\delta_c$  é o deslocamento da força *spin-off* de JKR determinado pela Equação (42):



$$\delta_c = \frac{3}{4} \left( \frac{\pi^2 w^2 R}{E^*} \right)^{1/3} \quad (42)$$

Se todas as rugosidades são da mesma altura ( $\sigma = 0$ ), todas as junções adesivas serão quebradas simultaneamente e (para um contato de JKR)  $P_c = N \cdot p_c$ . 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  $\sigma$ , tal que a adesão efetiva é eliminada quando  $\sigma$  excede  $2\delta_c$ .

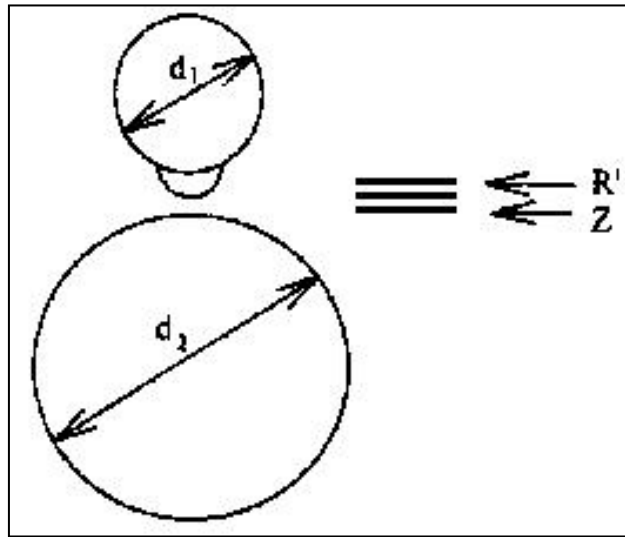


**Figura 2.9** - Efeito da rugosidade na adesão (Johnson, 1998).

Quando uma superfície não é perfeitamente lisa, mas tem rugosidades, a distância entre as duas esferas contatando é a distância  $z_0$  mais o raio das rugosidades,  $R'$ , como mostrado na Figura 2.10. Assim, a força de Van der Waals,  $F^0$ , entre duas esferas é representada pela Equação (43):

$$F^0 = \frac{A \cdot D}{12(z_0 + R')^2} = \frac{F^0}{(1 + R' / z_0)^2} \quad (43)$$

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



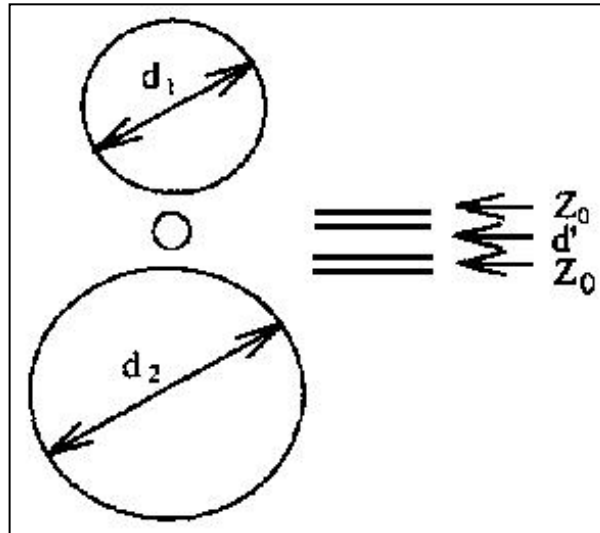
**Figura 2.10** - Uma esfera rugosa em contato com uma esfera lisa (Xie, 1997).

Se a partícula pequena assumir uma posição entre as duas esferas maiores, distância entre as duas esferas maiores é aumentada até  $2z_0 + d'$ , como mostrado na Figura 2.11; a força de Van der Waals agora consiste na força entre as duas esferas maiores, Equação (44), mais a força entre a partícula pequena e as duas esferas, Equação (45). Logo a força total do sistema,  $F^{0+}$ , é dada pela soma das Equações (44) e (45) originando a Equação (46):

$$F^{0'} = \frac{AD}{12(2z_0 + d')^2} \quad (44)$$

$$F^{0''} = \frac{A(D_1' + D_2')}{12z_0^2} \quad (45)$$

$$F^{0+} = F^{0'} + F^{0''} = \frac{AD}{12(2z_0 + d')^2} + \frac{A(D_1' + D_2')}{12z_0^2} \quad (46)$$



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

Imagine 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 (47):

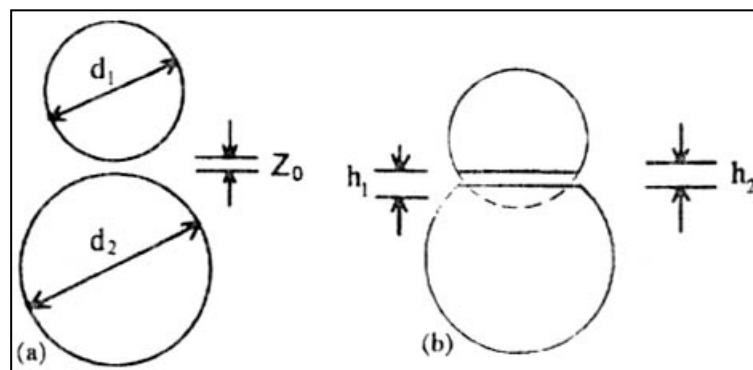
$$F^{0+} = F^{0'} = \frac{AD}{12(z_0 + R')^2} + \frac{AD_2'}{12z_0^2} \quad (47)$$

Dentro da faixa de tamanho de interesse (10 – 100  $\mu\text{m}$ ), 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  $\mu\text{m}$ . Porém, a interação entre a rugosidade e a outra esfera original começa a dominar quando a rugosidade for maior que 0,1  $\mu\text{m}$ .

A conclusão pode ser assumida que, quando duas esferas entram em contato, o diâmetro nas equações para determinar a força de Van der Waals devem ser substituídas pelo tamanho da superfície das rugosidades, se o raio das esferas forem maiores que 0,1  $\mu\text{m}$ . Se os raio da superfície das rugosidades são menores que 0,01  $\mu\text{m}$ , as esferas podem ser consideradas como lisas (Xie, 1997).

### 2.6.2 - Influência das Propriedades Mecânicas das Superfícies

O efeito da deformação sobre a força de adesão é frequentemente 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

$h_2$  = valor do “achatamento” da esfera 2

$Z_0$  = 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 (48), descrita por Hertz:

$$s = 1,63 \cdot \left( \frac{FD}{K} \right)^{2/3} \quad (48)$$

onde  $K$ , dado pela equação (48), é a dureza de contato entre as esferas e  $D$  a média harmônica dos diâmetros das duas esferas expresso pela Equação (49):

$$\frac{1}{K} = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) + \left( \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad (49)$$

Os valores de  $\nu_1$  e  $\nu_2$  na Equação (49) 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.

## 2.7 - Métodos Utilizados para Medir a Força de Adesão

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

Enquanto hoje em dia microscopia de força atômica (MFA) é o método mais comum usado em disciplinas de ciência físicas, este método tem suas limitações quando investiga-se a aderência de partículas que apresentam tamanhos polidispersos em tamanhos e formas numa superfície. Assim, um valor representativo da força de adesão deve estar baseado em uma avaliação estatística que observa algumas centenas de partículas pelo menos. Usando a técnica de MFA, levaria vários anos para executar uma confiável experiência 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 de tais materiais 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).

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 conglomerado de partículas de uma única vez. Assim sendo, a técnica centrífuga (Böhme 1962) oferece vantagens (Podczeczek e Newton 1995). As vantagens deste método são sua simplicidade, acessibilidade e a confiança nos resultados (Lam e Newton, 1991; Böhme, Krupp, Rabenhorst e Sandstede, 1962; Booth e Newton, 1987). O erro pode ser determinado exatamente no cálculo das forças (Zimon, 1982), e na influência de várias condições (umidade (Kulvanich e Stewart, 1988), deformação nos pontos de contato entre os corpos contíguos por causa da carga externa (Lam e Newton, 1991) e rugosidade da superfície (Zimon, 1982)). Em pesquisas farmacêuticas, por exemplo, a manipulação com pós de custo muito alto e disponibilidade mínima são freqüentes, a técnica centrífuga oferece uma grande vantagem, pois a quantidade do material pulverulento necessário para a realização para cada teste é da ordem de nanograma (Podczeczek, Newton e James, 1996). Além disso, possui outra vantagem de poder medir a força de adesão de partículas reais, de formas irregulares e superfícies rugosas.

### 2.7.1 - Técnica Centrífuga

A força centrífuga é empregada para consolidar ou remover as partículas de uma superfície.

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 definida a uma distância definida 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 magnitude da força centrífuga aplicada iguala-se a força de adesão, mas oposto de sinal, ( $F_{centrifuga} = - F_{adesão}$ ), 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 adesão está baseado na separação de partículas de uma superfície de substrato devido a força centrífuga ( $F_{\text{centrífuga}}$ ). A magnitude da  $F_{\text{centrífuga}}$  aplicada depende da massa das partículas ( $m$ ), da velocidade angular ( $\omega$ ) da superfície do substrato e da distância entre a superfície do substrato e o eixo de rotação.

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

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 as superfícies (discos de prova) contendo o material particulado paralelo ao eixo de rotação da centrífuga. O disco foi colocado com a superfície empoeirada em direção ao eixo de rotação de forma que durante a centrifugação, as partículas foram 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).

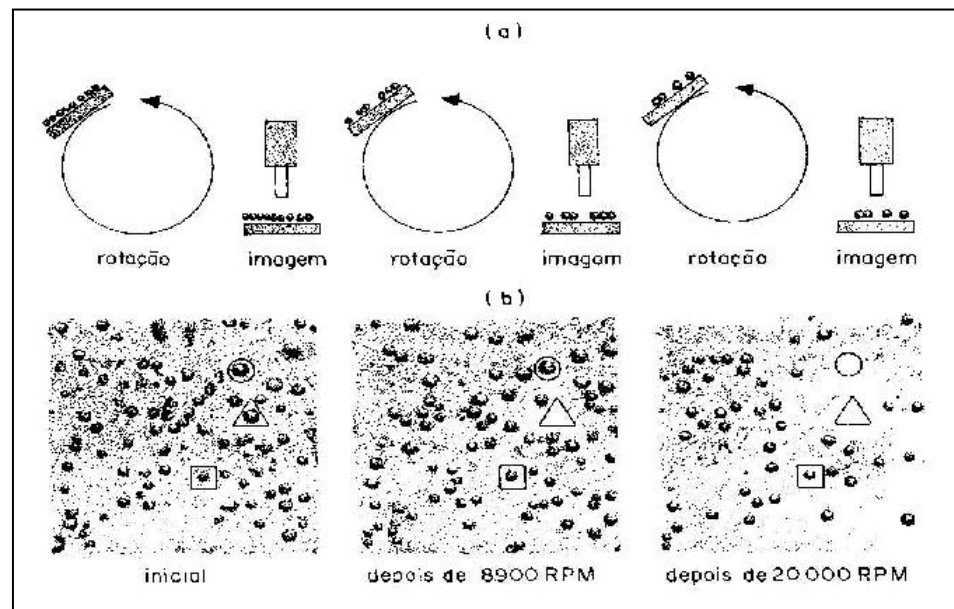
A técnica centrífuga usada para as experiências foi descrita em detalhes por Lam e Newton (1991). Os tubos da centrífuga que continham as partículas aderidas às superfícies do substrato foram colocados no cabeçote do rotor a um ângulo fixo. Desde que Lam e Newton (1993) demonstraram a influência da duração da pressão de contato, a máxima velocidade 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). De acordo com Equação (50) a força centrífuga aplicada poderia ser calculada.

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*.



**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).

Como descrito anteriormente, a técnica centrífuga possui vantagens quando se deseja determinar a força de adesão de materiais pulverulentos polidispersos, sendo por isto a técnica utilizada neste estudo. Outra motivação para a aplicação da técnica centrífuga se deve 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).



Apresentada a revisão bibliográfica, o capítulo a seguir descreve a metodologia, materiais e métodos, utilizada 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, utilizando a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e desprendimento.

## CAPÍTULO III

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – Materiais

##### 3.1.1 – 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 3.0) e um microcomputador que continha os softwares necessários para o tratamento dos dados e análise dos resultados.

1. Microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos), cuja velocidade máxima é de 14000 rpm. A microcentrífuga utilizada nos experimentos está ilustrada na Figura 3.1.



**Figura 3.1** - Microcentrífuga MA – 860

2. Microscópio óptico (Olympus BX60)

O microscópio óptico com lente cuja capacidade de ampliação é de 1000 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 e fiel das partículas sobre a superfície.

### 3. Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0)

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

4. Microcomputador contendo os softwares necessários para o tratamento dos dados e análise dos resultados.

A Figura 3.2 mostra os equipamentos ligados em série (Microscópio óptico, analisador de Imagens e microcomputador) que foram utilizados nos experimentos laboratoriais no auxílio da determinação da força de adesão entre partículas e superfície.



**Figura 3.2** – Equipamentos ligados em série para a aquisição e análise de imagens.

Também foram utilizados outros equipamentos como:

- Balança Analítica de Alta Precisão (Mettler Toledo, MT5);  
Capaz de determinar a massa com precisão de 1  $\mu\text{g}$ .
- Picnômetro digital de Hélio (Micromeritics AccuPyc 1330);

Utilizado para a obtenção das densidades dos materiais pulverulentos.

- Estufa de Secagem e Esterilização (FANEM 315SE);

A estufa de secagem e esterilização, foi utilizada para retirar a umidade do material em estudo.

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

A dispersão das partículas na superfície do disco foi realizada utilizando-se um sistema de dispersão de pó, como mostra a Figura 3.3. O objetivo era evitar a aglomeração das partículas sobre a superfície e, conseqüentemente, a minimização dos erros no momento da contagem das partículas através do analisador de imagens. A umidade relativa do ar no ambiente de trabalho era controlada e mantida abaixo de 50%.

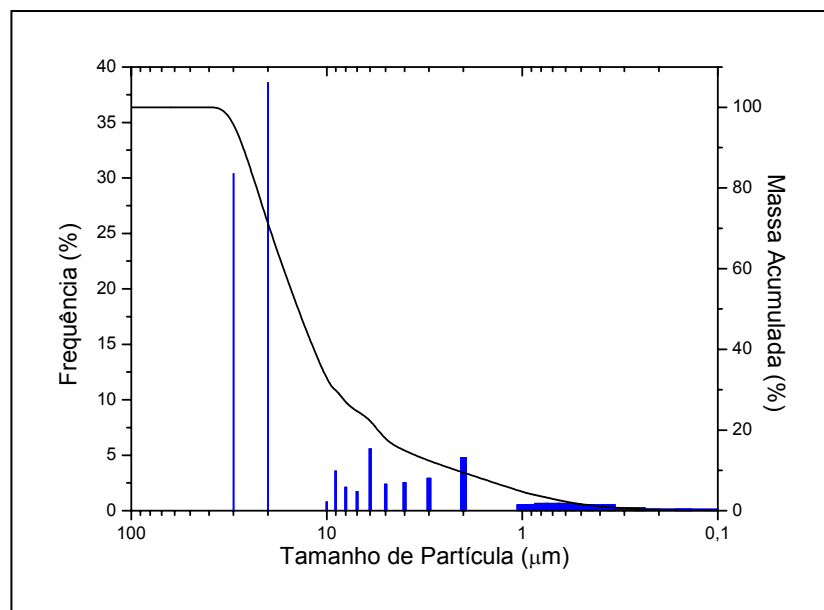


**Figura 3.3** - Dispensador de Pó Galai PD – 10.

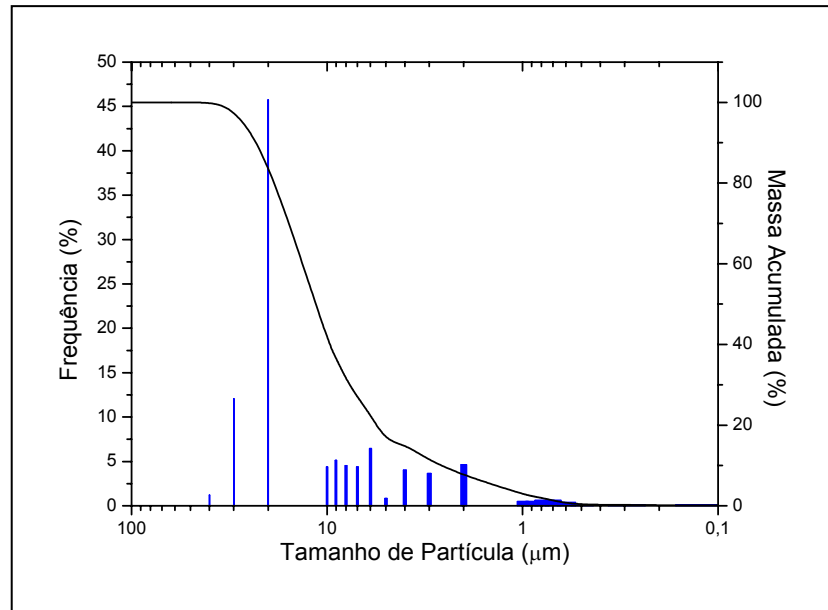
Uma peneira foi utilizada para separar o material pulverulento em uma fração menor que 400 mesh (37  $\mu\text{m}$  de abertura). A separação foi realizada com a finalidade de se obter o diâmetro dos materiais pulverulentos utilizados nos experimentos com a microcentrífuga. Para o concentrado fosfático e o calcário dolomítico, a utilização de peneiras tornou-se necessário, devido ao fato destes materiais pulverulentos serem bastante heterogêneos.

### 3.1.2 – Matéria Prima

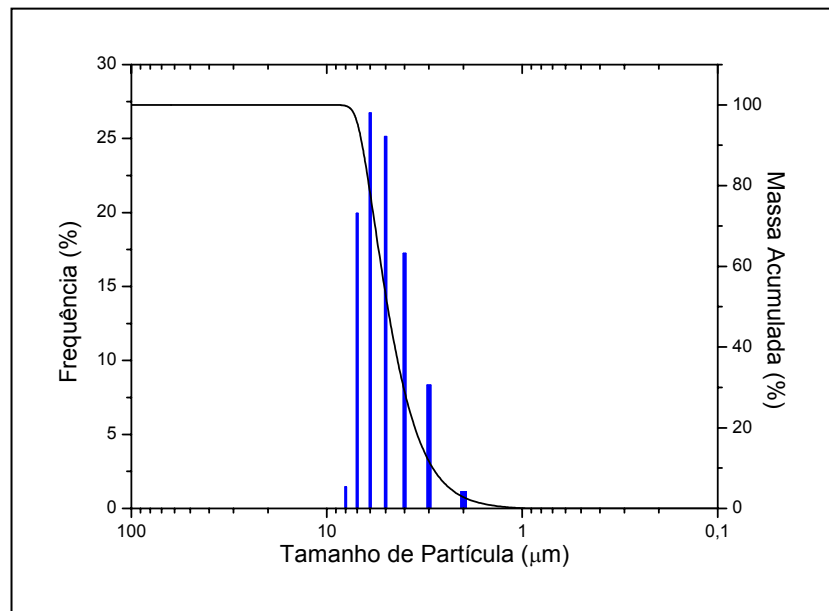
Três tipos de materiais pulverulentos foram utilizados como matéria prima nos experimentos, com o intuito de comparar os valores de força de adesão partícula-superfície. Dois deles são inorgânicos: o concentrado fosfático (Fosfértil S.A., Patos de Minas, MG), cuja densidade é de  $\rho = 3,066 \text{ g/cm}^3$  e o calcário dolomítico (Riedi S.A., Toledo, PR), com  $\rho = 2,838 \text{ g/cm}^3$ . O outro sólido é um material orgânico derivado da mandioca, conhecido como polvilho doce, com  $\rho = 1,491 \text{ g/cm}^3$ , comercialmente adquirido em supermercados. A densidade desses materiais foi determinada utilizando-se o Picnômetro digital de Hélio (Micromeritics AccuPyc 1330) com precisão de  $\pm 0,06 \text{ g/cm}^3$ . A distribuição granulométrica e o diâmetro médio de partícula do concentrado fosfático, do calcário dolomítico e do polvilho doce foram obtidos através de um caracterizador de partículas, Horiba, no DEMA – UFSCar. O diâmetro médio ( $d_p$ ) da partícula do concentrado fosfático foi de  $14,91 \mu\text{m}$ , o diâmetro médio ( $d_p$ ) da partícula de calcário dolomítico foi de  $11,97 \mu\text{m}$  e do polvilho doce foi  $d_p = 4,93 \mu\text{m}$ . A distribuição granulométrica para cada um dos materiais pulverulentos está representado pelas Figuras 3.4 a 3.6.



**Figura 3.4** – Distribuição granulométrica do concentrado fosfático, obtida no Horiba, do DEMA – UFSCar.

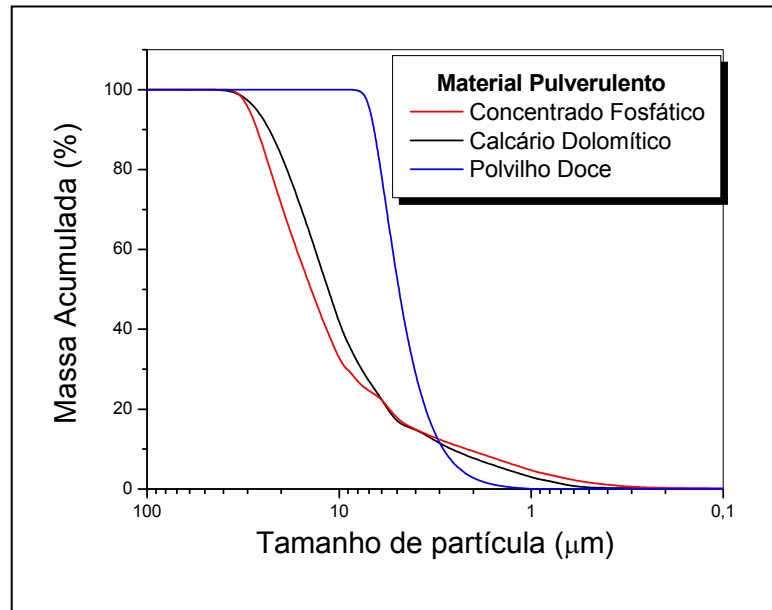


**Figura 3.5** – Distribuição granulométrica do calcário dolomítico, obtida no Horiba, do DEMA – UFSCar.



**Figura 3.6** – Distribuição granulométrica do polvilho doce, obtida no Horiba, do DEMA – UFSCar.

Na Figura 3.7 encontra-se uma comparação da distribuição granulométrica dos três materiais pulverulentos.



**Figura 3.7** – Distribuição granulométrica para concentrado fosfático, calcário dolomítico e o polvilho doce obtida no Horiba, do DEMA – UFSCar.

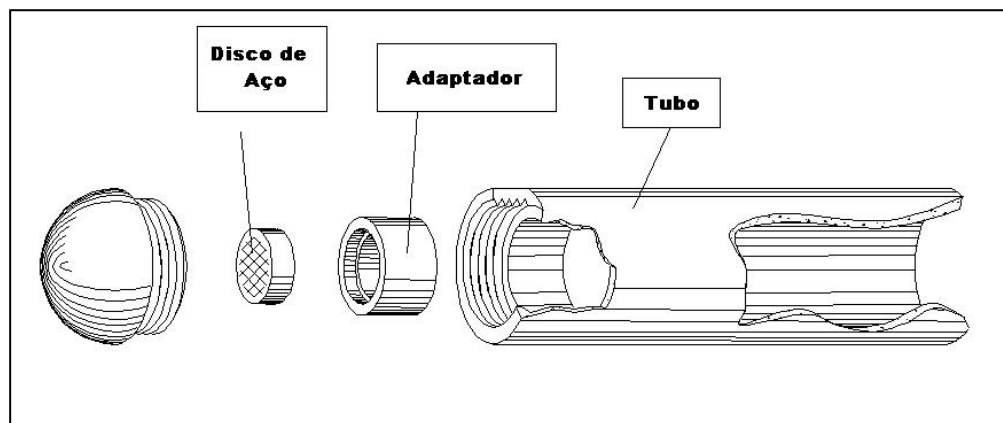
Nota-se na Figura 3.7 que o concentrado fosfático e o calcário dolomítico possuem uma faixa mais larga de distribuição granulométrica do que a do polvilho doce. Os materiais pulverulentos inorgânicos apresentam praticamente a mesma distribuição granulométrica e possuem valores muito próximos de densidade e de diâmetro médio de partículas.

### 3.2 – Métodos

A determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície foi efetuada usando a técnica centrífuga. A técnica centrífuga foi usada para estabelecer o efeito do tamanho das partículas no comportamento da força de adesão entre estas partículas e uma superfície de aço inoxidável. Uma microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos), com velocidade máxima de 14000 rpm, foi utilizada. No cabeçote desta microcentrífuga, foram especialmente instalados dois tubos construídos em alumínio. Nesses tubos foram colocados os adaptadores, construídos também em alumínio, cuja finalidade era de sustentar os discos de prova contendo o material pulverulento distribuído em sua superfície. Os tubos e os adaptadores foram construídos em

alumínio, por ser um material muito leve, não apresentando grande inércia às velocidades de rotação da microcentrífuga.

O tubo e o adaptador, foram instalados na microcentrífuga. Eles estão ilustrados na Figura 3.8.



**Figura 3.8** – Tubo e o adaptador, construído em alumínio, que estão instalados na microcentrífuga.

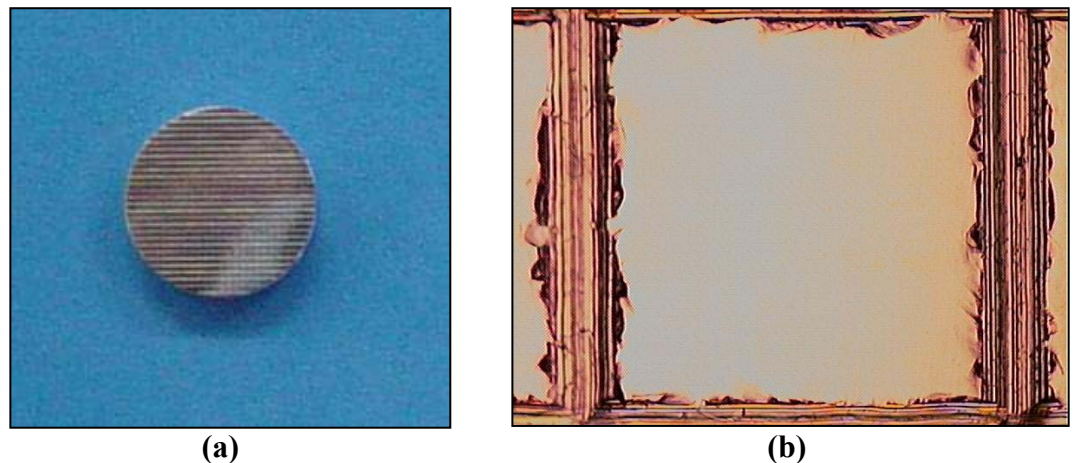
Os discos de prova, com 14 mm de diâmetro são os substratos onde o material particulado é depositado em suas superfícies para decorrente análises e obtenção da força de adesão. Os discos de prova foram fabricados de aço inoxidável devido o seu alto grau de resistência e polimento. A superfície receptora do material pulverulento foi esmerilhada para reduzir a sua rugosidade e em seguida foi polida para se obter uma superfície mais lisa e conseqüentemente propiciar uma boa imagem no microscópio óptico.

Após o polimento, na superfície dos discos de prova foi feito um reticulado, com área de  $0,5 \text{ mm}^2$ . Este reticulado serviu como referência na localização de uma determinada partícula ou de uma determinada área do disco, 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 discos de prova, analisou-se quarenta reticulados de cada disco de prova, conforme mostrado na Figura 3.9 (a). Antes de cada experimento, as superfícies dos discos de prova eram limpas com um banho usando



etanol ou água destilada com o objetivo de retirar todas as impurezas da superfície dos discos.

Um disco de prova esmerilado, polido e apresentando em sua superfície os reticulados, está ilustrado na Figura 3.9 (a) e (b).



**Figura 3.9** – (a) Superfície do disco de prova contendo os reticulados (Câmera Digital, Sony DSC – P92); (b) Um único reticulado da superfície do disco de prova (Com ampliação de 100 vezes do Microscópio Óptico – Olympus BX60).

### 3.2.1 – Determinação da Massa das Partículas

A determinação da massa das partículas dos materiais pulverulentos foi obtida utilizando a Equação (51):

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

sendo:

$M$  = massa da partícula

$\rho_p$  = densidade da partícula

$V_p$  = volume da partícula

As partículas de polvilho doce possuem formatos regulares, bem próximos de uma esfera (esfericidade = 0,94; Ito 2002). Portanto, o volume das partículas desse

material pulverulento foi calculado utilizando-se a Equação (52), que é a equação usada para determinar o volume de uma esfera:

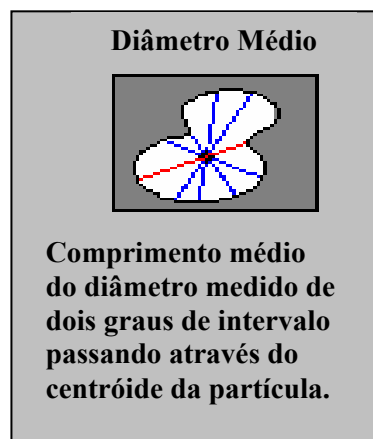
$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \quad (52)$$

sendo  $r$  o raio médio da partícula de polvilho doce, e foi obtida pelo diâmetro médio desta partícula, dado pelo analisador de imagens (Image-Pro Plus 3.0).

As partículas do concentrado fosfático e do calcário dolomítico possuem formatos muito irregulares ( $\text{Esfericidade}_{\text{concentrado}} = 0,60$  e  $\text{Esfericidade}_{\text{calcário}} = 0,64$ ) Ito (2002). Assim, para aplicar a Equação (51), o volume usado foi o da Equação (53):

$$V = \frac{4 \cdot A \cdot r}{3} \quad (53)$$

sendo  $A$  a área projetada da partícula, determinada pelo software Image-Pro Plus 3.0, e  $r$  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 3.0). O software Image-Pro Plus 3.0 foi calibrado utilizando uma calibração existente no microcomputador.



**Figura 3.10** – Diâmetro Médio definido pelo software Image-Pro Plus 3.0.

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 (2202) em sua dissertação de mestrado.

### **3.2.2 - Dispersão do Material Pulverulento na Superfície dos Discos de Prova**

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 discos de prova, 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 discos de prova usando-se um dispersor de pó (Galai PD-10, vacuum gage). Este sistema utiliza o vácuo para dispersar as partículas de pó numa superfície.

Os discos de prova 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 discos. Em seguida, os discos contendo o material pulverulento eram levados até a centrífuga para o início dos experimentos.

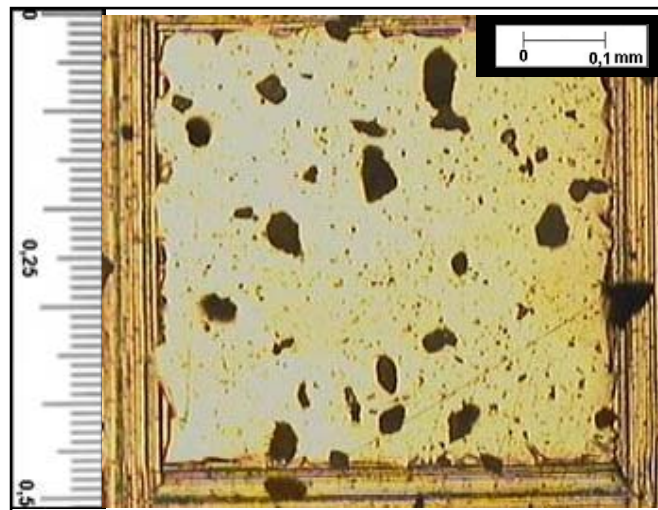
### **3.2.3 – Procedimento Experimental**

O efeito da umidade relativa do ar no laboratório era de grande interesse no trabalho. A umidade relativa do ar no ambiente de trabalho era controlada e mantida abaixo de 50% usando, se necessário, um aparelho de ar-condicionado. A temperatura do laboratório onde foram realizadas as corridas experimentais foi mantida entre 15 e 20° 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 uma superfície de aço inoxidável. Depois que o pó estava suficientemente espalhado na superfície dos discos de prova, estes foram colocados nos tubos de alumínio. Estes tubos foram construídos para inclinar os discos à 45°, quando a microcentrífuga era acionada, porque o rotor na microcentrífuga era fixo à 45°. Os discos de prova 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.

A velocidade de compressão (*press-on*) aplicada, para as corridas experimentais, era de 1000, 2000 e 10000 rpm. A Figura 3.11 ilustra a superfície do disco de prova após aplicação da força de compressão (*press-on*) de 2000 rpm.



**Figura 3.11** – Microfotografia do disco de prova após a aplicação da força de compressão (*press-on*) de 2000 rpm (Com ampliação de 100 vezes do Microscópio Óptico – Olympus BX60).

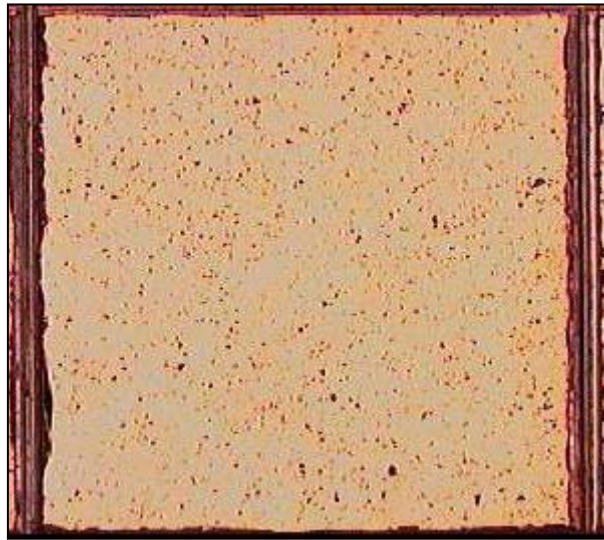
Depois que as partículas eram consolidadas contra a superfície do substrato, os discos de prova eram levados a um microscópio óptico (Olympus BX60) e um

analisador de imagens (Image Pro-Plus 3.0) era utilizado, para a realização da contagem das partículas dos materiais pulverulentos nas faixas de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$ , 17 – 24  $\mu\text{m}$  e 24 – 31  $\mu\text{m}$ .

Em seguida os discos de prova retornavam a microcentrífuga para realizar a limpeza destes (força centrífuga *spin-off*). Esta era a fase de separação entre o material particulado e a superfície dos discos, em que a força centrífuga era usada para superar a adesão das partículas no substrato. Agora, os discos de prova eram orientados para que as superfícies empoeiradas fossem posicionadas de tal forma que a força centrífuga agisse primeiro as superfícies e em seguida as partículas. Após a aplicação da força *spin-off*, o número de partículas que permaneciam aderidas sobre a superfície era determinado. A Figura 3.12 ilustra a superfície do disco de prova após aplicação da força *spin-off* de 14000 rpm. 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. Um *software* foi usado para executar a análise da característica nas imagens adquiridas; produzindo informações sobre o perímetro, sobre a área e o diâmetro equivalente da partícula.

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

Durante a fase de separação (aplicação da força centrífuga *spin-off*), o disco foi exposto a velocidades de rotação crescentes e conseqüentemente forças centrífugas crescentes. A cada passo do aumento da velocidade rotacional, as imagens das partículas remanescentes nos discos eram adquiridas, e todas elas foram comparadas com as imagens das partículas aderidas ao substrato. As velocidades angulares (*spin-off*) usadas nas corridas experimentais foram de 1000, 3000, 5000, 7000, 9000, 11000, 13000 e 14000 rpm.



**Figura 3.12** – Microfotografia da superfície do disco de prova após aplicação da força *spin-off* de 14000 rpm (Com ampliação de 100 vezes do Microscópio Óptico – Olympus BX60).

### 3.3 – Tratamento dos Dados

Gráficos de velocidade angular em função da porcentagem de partículas aderidas, na superfície dos discos de prova, foram construídos, com a finalidade de apresentar o comportamento das partículas dos materiais pulverulentos com o aumento da força centrífuga de compressão (*press-on*). As forças de adesão correspondentes para as oito velocidades angulares (*spin-off*) foram determinadas, utilizando a Equação (50), para as diferentes condições de trabalho.

Construíram-se também gráficos para a força de adesão em função da porcentagem de partículas aderidas nas superfícies dos discos de prova. Estes gráficos foram construídos em coordenadas logarítmica-probabilidade. Finalmente, estimou-se a força de adesão média partícula-superfície, representada pela mediana geométrica da força de adesão e seu respectivo desvio padrão geométrico.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme já mencionado, o objetivo deste trabalho foi determinar a força de adesão entre partículas e uma superfície, aplicando a técnica centrífuga para três materiais pulverulentos. Os materiais pulverulentos utilizados foram o concentrado fosfático ( $\rho = 3,066 \text{ g/cm}^3$ ), o polvilho doce ( $\rho = 1,491 \text{ g/cm}^3$ ) e o calcário dolomítico ( $\rho = 2,838 \text{ g/cm}^3$ ). As forças centrífugas (*press-on*) aplicadas, para aumentar o contato entre as partículas e a superfície do substrato, foram de 1000, 2000 e 10000 rpm. A força centrífuga de compressão (*press-on*) de 1000 rpm foi escolhida para comparar com os resultados obtidos no trabalho desenvolvido por Banda (2002), que também utilizou esta força. Escolheu-se 2000 rpm, por ser o dobro da velocidade angular utilizada naquele trabalho e 10000 rpm para uma velocidade angular bastante grande.

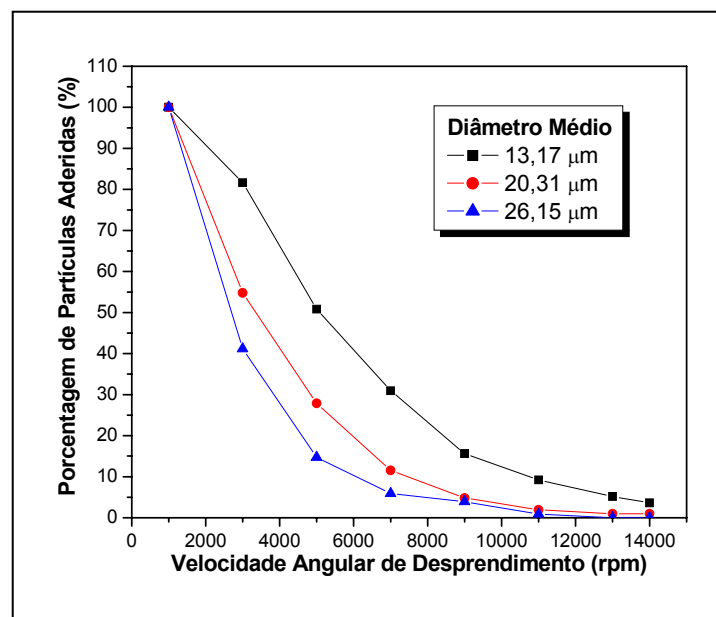
Devido a limitação da centrífuga utilizada (cuja velocidade máxima é de 14000 rpm) as forças centrífugas *spin-off* (descompressão) aplicadas para separar as partículas aderidas e a superfície foram de 1000, 3000, 5000, 7000, 9000, 11000, 13000 e 14000 rpm.

Os materiais pulverulentos utilizados nos experimentos foram peneirados em uma peneira de 400 mesh (37  $\mu\text{m}$  de abertura), os quais foram divididos em três faixas de diâmetros. As faixas de diâmetro estudadas para esses materiais pulverulentos foram de 10 – 17  $\mu\text{m}$ , 17 – 24  $\mu\text{m}$  e 24 – 31  $\mu\text{m}$ , que foram obtidas utilizando o analisador de imagens, Image Pro-Plus 3.0.

Após o desenvolvimento do procedimento experimental (conforme descrito no item 3.2.3), foram levantados os resultados e, em seguida, construídos gráficos de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas. Para cada material pulverulento, foi aplicada a força centrífuga de compressão (*press-on*) de 1000, 2000 e 10000 rpm. E, para cada força *press-on* foi aplicada a força centrífuga de desprendimento (*spin-off*) de 1000, 3000, 5000, 7000, 9000, 11000, 13000 e 14000 rpm.

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

A Figura 4.1 apresenta um gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm. Observa-se que, com o aumento da velocidade angular, a porcentagem de partículas aderidas na superfície diminui até que todas as partículas são desprendidas após a aplicação da força centrífuga *spin-off* de 14000 rpm. O diâmetro médio, utilizado na legenda da Figura 4.1, foi obtido pela média dos diâmetros das partículas de concentrado fosfático dado pelo Image Pro-Plus 3.0.



**Figura 4.1** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.

Utilizando as curvas apresentadas na Figura 4.1, construíram-se os gráficos da Figura 4.2, de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão, para as três frações de pó (10 – 17  $\mu\text{m}$ , 17 – 24  $\mu\text{m}$  e 24 – 31  $\mu\text{m}$ ). A força de adesão foi calculada usando-se a Equação (54):



$$F_{\text{centrífuga}} = - F_{\text{adesão}} \quad (54)$$

sendo:

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

A magnitude da  $F_{\text{centrífuga}}$  aplicada depende da massa das partículas ( $m$ ) dada em kg, da velocidade angular ( $\omega$ ) da superfície do substrato na centrífuga, dada em rad/s e da distância entre a superfície do substrato e o eixo de rotação ( $r$ ). Esta distância entre a superfície do substrato e o eixo de rotação foi de 0,057 m.

A massa das partículas de concentrado fosfático foi obtida utilizando-se a Equação (51) e os resultados estão na Tabela 4.1.

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

no qual:

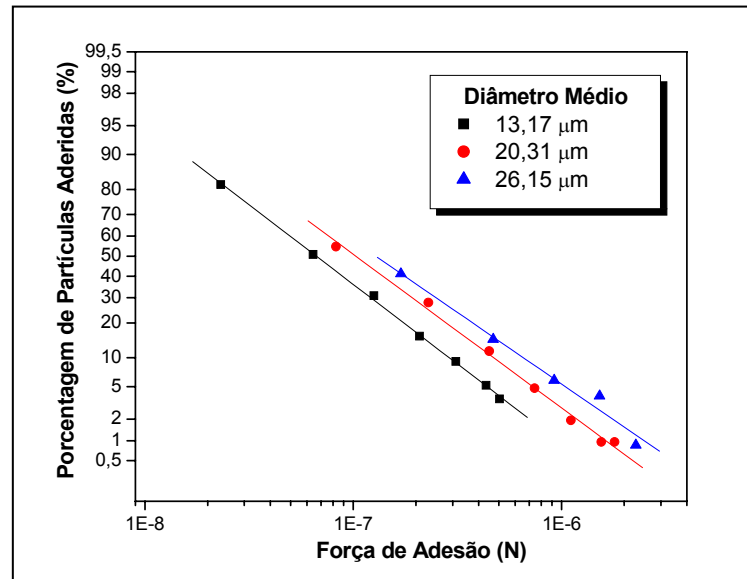
$M$  = massa da partícula

$\rho_p$  = densidade da partícula

$V_p$  = volume da partícula

**Tabela 4.1** – Massa média para cada partícula de Concentrado Fosfático.

Material Pulverulento	Faixas de diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Massa Média (kg)	Volume Médio ( $\text{m}^3$ )
Concentrado Fosfático ( $\rho = 3,066 \text{ g/cm}^3$ )	10 – 17	13,17	$3,95 \times 10^{-12}$	$1,29 \times 10^{-15}$
	17 – 24	20,31	$1,42 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-15}$
	24 - 31	26,15	$3,22 \times 10^{-11}$	$1,05 \times 10^{-14}$



**Figura 4.2** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão, para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.

Os resultados obtidos da distribuição de partículas em relação a força de adesão são geralmente apresentados na forma de curvas integrais (Zimon, 1982; Lam e Newton, 1991; Podczeck, 1999). Porém, estas curvas também podem ser representadas em coordenadas do tipo logaritmo-probabilidade como ilustrado na Figura 4.2. Percebe-se que as curvas obtidas desta figura apresentaram um comportamento linear. Nestas coordenadas, isto significa que os resultados obedeceram a uma distribuição log-normal.

Para cada curva, de porcentagem de partículas aderidas em função da força de adesão, pode-se caracterizar a força de adesão média (mediana geométrica) e o desvio padrão geométrico (Zimon, 1982). A força de adesão média é definida como aquela à qual 50% das partículas permanecerem aderidas ao substrato após a centrifugação. Isto foi usado para representar a força de adesão média de uma partícula ao substrato. O desvio padrão geométrico,  $\sigma_g$ , foi calculado utilizando a Equação (55):

$$\sigma_g = \frac{\text{mediana geométrica da força de adesão}}{\text{força de adesão para 16\% de partículas aderidas}} \quad (55)$$

Nesta equação, o valor da força, que levou a 16% de partículas aderidas ao substrato, foi determinado graficamente.

Esse procedimento foi usado para determinar a mediana da força de adesão e seus respectivos desvios padrões geométricos para as três faixas de diâmetro dos materiais pulverulentos.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão e os seus respectivos desvios padrões geométricos, obtidos pela Equação (55), para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 1000 rpm. Esta tabela mostra que a força de adesão tem uma variação diretamente proporcional com o diâmetro da partícula. Portanto, a granulometria da partícula tem influência direta na força de adesão partícula superfície. Lam e Newton (1992), utilizando uma centrífuga que atingia uma velocidade máxima de rotação de 18000 rpm, e Banda (2002), que utilizou uma centrífuga que atingia uma velocidade máxima de rotação de 14000 rpm, encontraram resultados semelhantes.

**Tabela 4.2** – Resultados da força de adesão média para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 1000 rpm.

<b>Material Pulverulento</b>	<b>Faixas de diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Mediana Geométrica da Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Desvio Padrão Geométrico <math>\sigma_g</math></b>
Concentrado Fosfático ( $\rho = 3,066 \text{ g/cm}^3$ )	10 – 17	13,17	0,66	0,32
	17 – 24	20,31	1,02	0,31
	24 - 31	26,15	1,29	0,28

Utilizando o mesmo procedimento para a construção do gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento, construíram-se os gráficos da Figura D.1 e Figura D.2, correspondentes às forças centrífugas de compressão de 2000 e 10000 rpm (Anexo D). Verifica-se em todas essas curvas o mesmo comportamento observado no gráfico da Figura 4.1.

Novamente para as velocidades de 2000 e 10000 rpm adotou-se o mesmo procedimento para determinar a força de adesão usado no gráfico da Figura 4.2. As

curvas também obedeceram a uma distribuição log-normal, conforme podem ser verificadas nos gráficos da Figura D.3 e Figura D.4 do Anexo D.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da força de adesão e do desvio padrão geométrico para o concentrado fosfático, utilizando a força centrífuga *press-on* de 2000 rpm.

**Tabela 4.3** – Resultados da força de adesão média para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 2000 rpm.

<b>Material Pulverulento</b>	<b>Faixas de diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Mediana Geométrica da Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Desvio Padrão Geométrico <math>\sigma_g</math></b>
Concentrado Fosfático ( $\rho = 3,066 \text{ g/cm}^3$ )	10 – 17	12,66	0,86	0,32
	17 – 24	19,83	1,32	0,35
	24 - 31	27,42	2,46	0,39

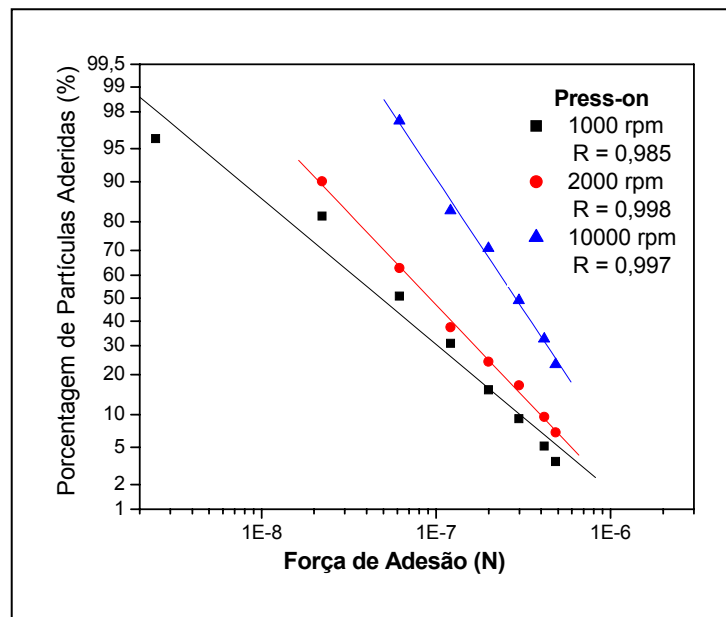
A Tabela 4.4 apresenta os resultados da força de adesão e do desvio padrão geométrico para o concentrado fosfático, após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 10000 rpm.

**Tabela 4.4** – Resultados da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 10000 rpm.

<b>Material Pulverulento</b>	<b>Faixas de diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Mediana Geométrica da Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Desvio Padrão Geométrico <math>\sigma_g</math></b>
Concentrado Fosfático ( $\rho = 3,066 \text{ g/cm}^3$ )	10 – 17	13,01	2,90	0,45
	17 – 24	19,97	4,17	0,49
	24 - 31	26,09	5,53	0,54

A Figura 4.3 apresenta um gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm para a faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$ . Nota-se, nessa figura que a força de adesão aumenta quanto maior for a velocidade de compressão (*press-on*).

A Tabela 4.5 mostra que a força de adesão entre partículas de concentrado fosfático e a superfície do disco de aço inoxidável aumenta com o aumento do tamanho das partículas e com o aumento da força de compressão (*press-on*).



**Figura 4.3** – Porcentagem de Partículas aderidas em função da força de adesão variando a força de compressão para partículas de 10 – 17  $\mu\text{m}$ .

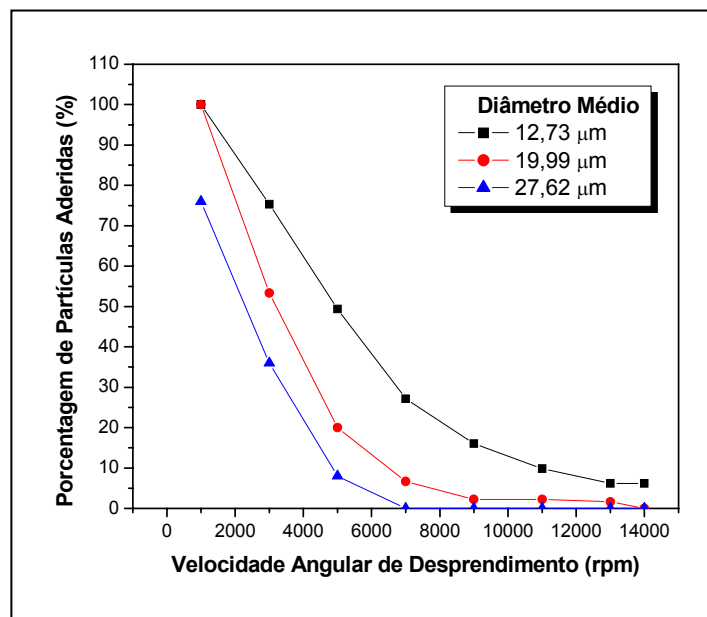
**Tabela 4.5** – Comparação da Mediana Geométrica da Força de Adesão para o concentrado fosfático após aplicação da força centrífuga de compressão (*press-on*) de 1000, 2000 e 10000 rpm.

Material Pulverulento Concentrado Fosfático	Faixas de Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Mediana Geométrica da Força de Adesão ( $\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico $\sigma_g$
Press-on 1000 rpm	10 – 17	13,17	0,66	0,32
	17 – 24	20,31	1,02	0,31
	24 – 31	26,15	1,29	0,28
Press-on 2000 rpm	10 – 17	12,66	0,86	0,32
	17 – 24	19,83	1,32	0,35
	24 – 31	27,42	1,84	0,39
Press-on 10000 rpm	10 – 17	13,01	2,37	0,45
	17 – 24	19,97	4,17	0,49
	24 – 31	26,09	5,53	0,54

## 4.2 - Determinação da Força de Adesão para Partículas de Calcário Dolomítico

O mesmo procedimento aplicado para o concentrado fosfático foi usado para o calcário dolomítico.

A Figura 4.4 apresenta um gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.



**Figura 4.4** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.

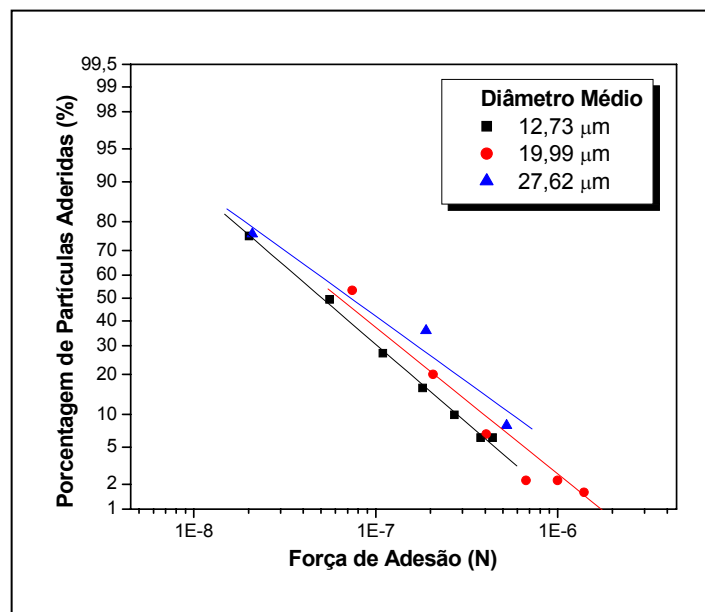
Utilizando o mesmo procedimento para a construção do gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento, das partículas de calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm, construiu-se os gráficos da Figura D.5 e Figura D.6, correspondentes as forças centrífugas de compressão de 1000 e 10000 rpm (Anexo D). Verifica-se em todas essas curvas o mesmo comportamento assumido pelo gráfico da Figura 4.4.

Utilizando as curvas apresentadas na Figura 4.4, foi construído o gráfico da Figura 4.5 de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da

força de adesão para as três frações de pós (10 – 17  $\mu\text{m}$ , 17 – 24  $\mu\text{m}$  e 24 – 31  $\mu\text{m}$ ). A força de adesão foi calculada usando as Equações (50) e (54). A massa das partículas do calcário dolomítico foi obtida usando-se a Equação (51) e está apresentada na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – Massa média para cada partícula do Calcário Dolomítico

Material Pulverulento	Faixas de diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Massa Média (kg)	Volume Médio ( $\text{m}^3$ )
Calcário Dolomítico ( $\rho = 2,838 \text{ g/cm}^3$ )	10 – 17	12,73	$3,83 \times 10^{-12}$	$1,35 \times 10^{-15}$
	17 – 24	19,99	$1,40 \times 10^{-11}$	$4,94 \times 10^{-15}$
	24 - 31	27,62	$3,29 \times 10^{-11}$	$1,16 \times 10^{-14}$

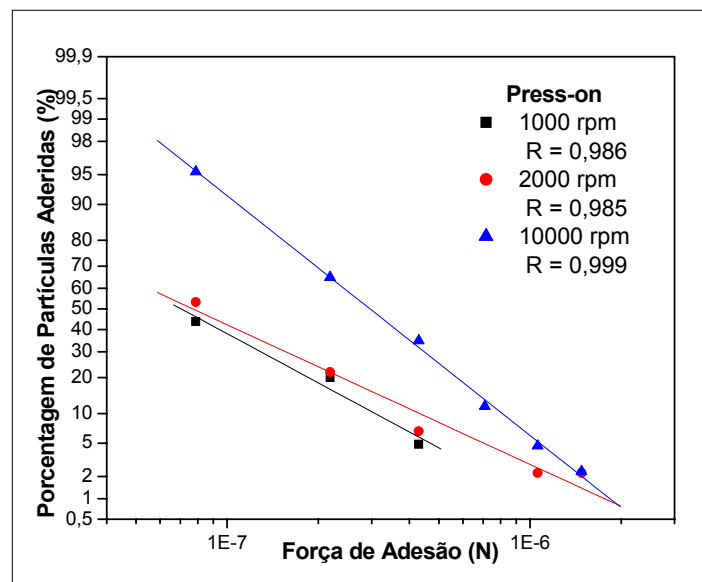


**Figura 4.5** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.

Percebe-se que as curvas obtidas na Figura 4.5 apresentaram um comportamento linear, nestas coordenadas, mostrando que os resultados obedeceram a uma distribuição log-normal.

Para a velocidade de compressão de 1000 e 10000 rpm, foi utilizado o mesmo procedimento. Os resultados levantados apresentaram o mesmo comportamento e estão apresentados na Figura D.7 e Figura D.8 do Anexo D.

A Figura 4.6 apresenta um gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão das partículas de calcário dolomítico após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm para a faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$ . Nota-se, nessa figura que a força de adesão aumenta quanto maior for a velocidade de compressão (*press-on*).



**Figura 4.6** – Porcentagem de Partículas aderidas em função da força de adesão variando a força de compressão para partículas de 17 - 24  $\mu\text{m}$ .

A Tabela 4.7 mostra que a força de adesão entre partículas de calcário dolomítico e a superfície do disco de aço inoxidável aumenta com o aumento do tamanho das partículas e com o aumento da força de compressão (*press-on*).



**Tabela 4.7** – Comparação da Mediana Geométrica da Força de Adesão para o calcário dolomítico após aplicação da força centrífuga de compressão (*press-on*) de 1000, 2000 e 10000 rpm.

<b>Material Pulverulento Calcário Dolomítico</b>	<b>Faixas de Diâmetro (µm)</b>	<b>Diâmetro Médio (µm)</b>	<b>Mediana Geométrica da Força de Adesão (x 10<sup>-7</sup> N)</b>	<b>Desvio Padrão Geométrico σ<sub>g</sub></b>
Press-on 1000 rpm	10 – 17	13,38	0,85	0,19
	17 – 24	20,87	2,27	0,21
	24 – 31	27,25	5,03	0,27
Press-on 2000 rpm	10 – 17	12,73	1,39	0,26
	17 – 24	19,99	3,94	0,24
	24 – 31	27,62	5,79	0,20
Press-on 10000 rpm	10 – 17	12,81	2,48	0,34
	17 – 24	20,19	4,40	0,33
	24 – 31	27,30	7,34	0,44

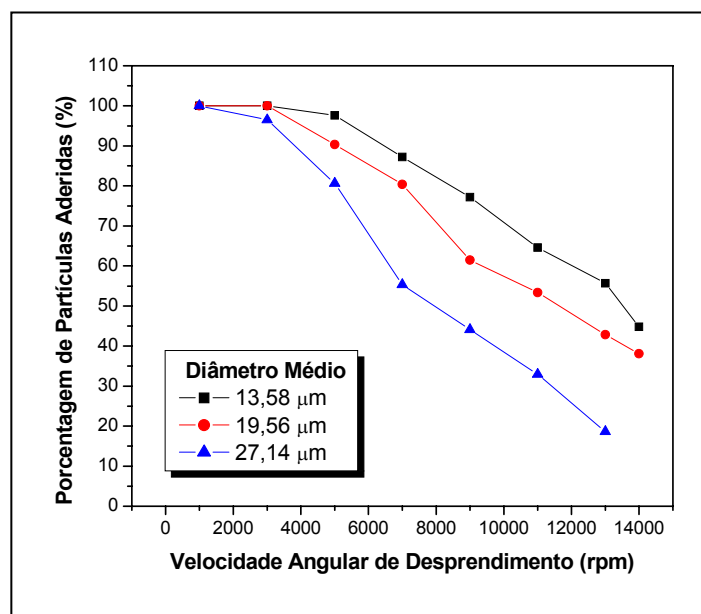
### 4.3 - Determinação da Força de Adesão para Partículas de Polvilho Doce

Na construção dos gráficos de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas e, de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o polvilho doce, foi utilizada a mesma metodologia empregada para o concentrado fosfático e para o calcário dolomítico.

A Figura 4.7 apresenta um gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

Utilizando o mesmo procedimento usado para a construção da Figura 4.7, construiu-se os gráficos da Figura D.9 e Figura D.10, correspondentes as forças centrífugas de compressão de 1000 e 2000 rpm (Anexo D). Verifica-se em todas essas curvas o mesmo comportamento assumido pelo gráfico da Figura 4.7. Porém, este gráfico não apresentou o mesmo comportamento que os gráficos da Figura 4.1 e Figura 4.4. Observa-se que, com o aumento da velocidade angular, a porcentagem de partículas aderidas de polvilho doce na superfície do disco não provocou um desprendimento satisfatório, após a aplicação da força centrífuga *spin-off* de 14000 rpm. Isto pode ser

explicado devido o pequeno diâmetro e a menor densidade das partículas de polvilho doce e, apresentaram a menor massa entre os materiais pulverulentos utilizados nos experimentos. Portanto, partículas menores aderem mais fortemente que partículas maiores sobre o mesmo material. Assim, torna-se necessário uma centrífuga com velocidade de rotação maior que 14000 rpm para provocar um maior desprendimento das partículas sobre a superfície do disco de prova, similar ao comportamento atingido pelos gráficos da Figura 4.1 e Figura 4.4.



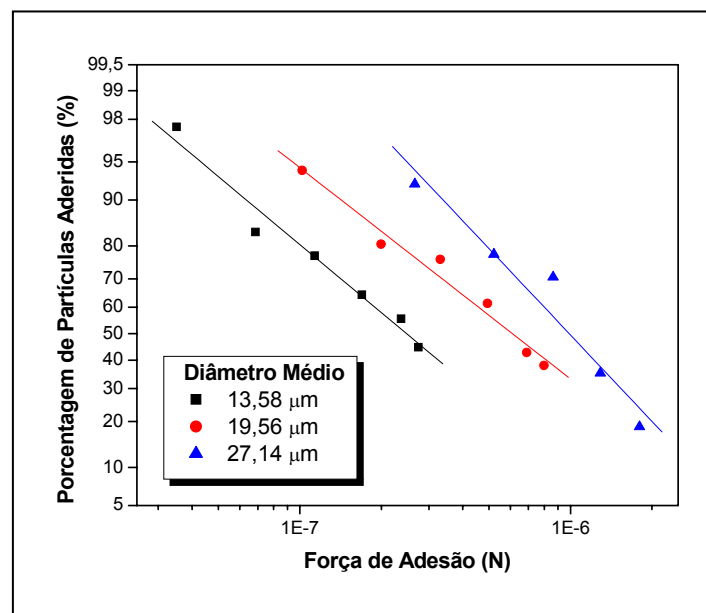
**Figura 4.7** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

A força de adesão foi calculada usando a Equação (54). A massa das partículas do polvilho doce foi obtida usando-se a Equação (51) e está apresentada na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8** – Massa média para cada partícula do Polvilho Doce

Material Pulverulento	Faixas de diâmetro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Massa Média (kg)	Volume Médio (m <sup>3</sup> )
Polvilho Doce ( $\rho = 1,491 \text{ g/cm}^3$ )	10 – 17	13,58	$2,19 \times 10^{-12}$	$1,47 \times 10^{-15}$
	17 – 24	19,56	$6,41 \times 10^{-12}$	$4,29 \times 10^{-15}$
	24 - 31	27,14	$1,52 \times 10^{-11}$	$1,02 \times 10^{-14}$

A Figura 4.8 apresenta um gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão do polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm. Pode-se observar que a Figura 4.8 apresentou uma distribuição log-normal similar à encontrada para o concentrado fosfático e para o calcário dolomítico. Foram obtidos resultados similares com os encontrados 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 da lactose numa superfície de aço e Banda (2002) que investigou a força de adesão do concentrado fosfático e do polvilho doce utilizando uma centrífuga cuja velocidade máxima de rotação era de 14000 rpm.



**Figura 4.8** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão do polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

Os resultados das forças de adesão médias e dos desvios padrões, obtido da Figura 4.8, estão apresentados na Tabela 4.9. Observa-se que, a exemplo do que aconteceu com o concentrado fosfático e com o calcário dolomítico, a força de adesão entre partículas de polvilho doce e a superfície do disco de aço inoxidável aumentou com o aumento do tamanho das partículas.

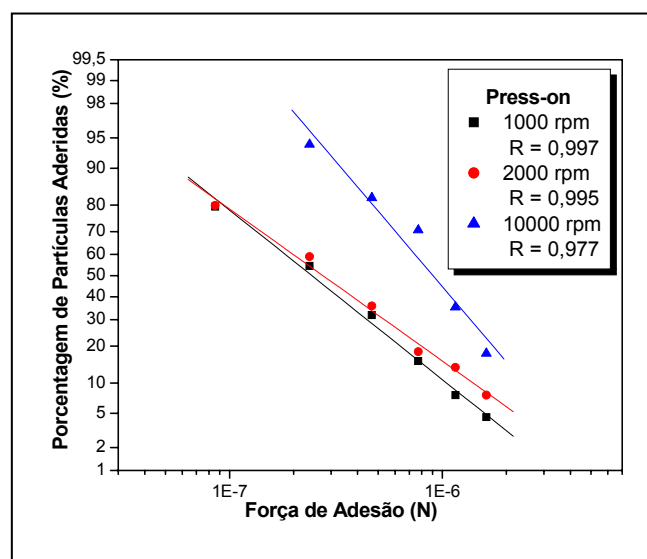
**Tabela 4.9** – Resultados da força de adesão para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga *press-on* de 10000 rpm.

Material Pulverulento	Faixas de diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Mediana Geométrica da Força de Adesão ( $\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico $\sigma_g$
Polvilho Doce ( $\rho = 1,491 \text{ g/cm}^3$ )	10 – 17	13,58	2,49	0,33
	17 – 24	19,56	6,11	0,31
	24 - 31	27,14	9,87	0,43

Para as velocidades de compressão de 1000 e 2000 rpm, foi utilizado o mesmo procedimento. Os resultados levantados apresentaram o mesmo comportamento, e estão apresentados na Figura D.11 e Figura D.12 do Anexo D.

A Figura 4.9 apresenta um gráfico de porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão das partículas de polvilho doce após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$ . Nota-se, nessa figura que a força de adesão aumenta quanto maior for a velocidade de compressão (*press-on*).

A Tabela 4.10 mostra que a força de adesão entre partículas de polvilho doce e a superfície do disco de aço inoxidável aumentou com o aumento do tamanho das partículas e com o aumento da força de compressão (*press-on*).



**Figura 4.9** – Porcentagem de Partículas aderidas em função da força de adesão variando a força de compressão para partículas de 10 - 17  $\mu\text{m}$ .

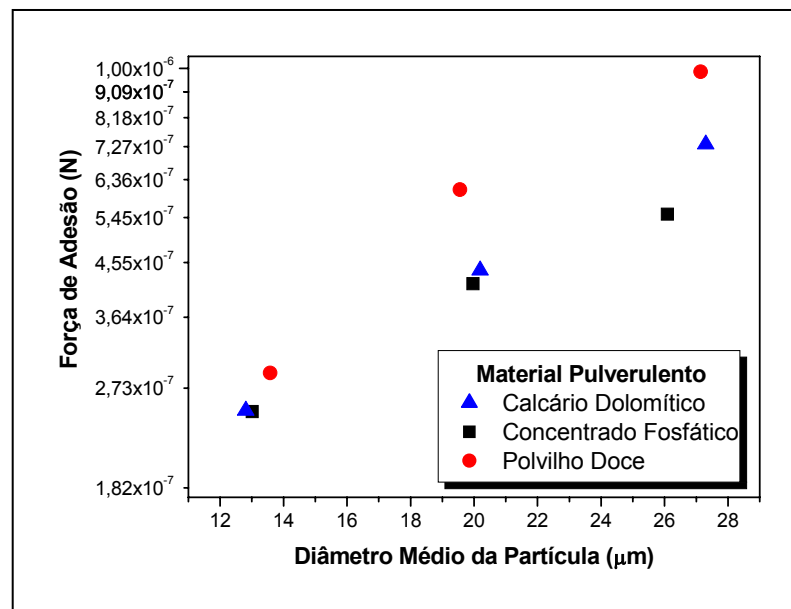
**Tabela 4.10** – Comparação da Mediana Geométrica da Força de Adesão para o polvilho doce após aplicação da força centrífuga de compressão (*press-on*) de 1000, 2000 e 10000 rpm.

Material Pulverulento Polvilho doce	Faixas de Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Mediana Geométrica da Força de Adesão ( $\times 10^{-7}$ N)	Desvio Padrão Geométrico $\sigma_g$
Press-on <i>1000 rpm</i>	10 – 17	13,57	2,05	0,26
	17 – 24	19,40	3,78	0,15
	24 – 31	26,32	5,26	0,20
Press-on <i>2000 rpm</i>	10 – 17	13,94	2,10	0,26
	17 – 24	20,44	4,06	0,20
	24 – 31	26,18	8,60	0,29
Press-on <i>10000 rpm</i>	10 – 17	13,58	2,49	0,33
	17 – 24	19,56	6,11	0,31
	24 – 31	27,14	9,87	0,43

A Figura 4.10 apresenta um gráfico de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas, dos três materiais pulverulentos utilizados nos experimentos, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão (*press-on*) de 10000 rpm. Observa-se que, para uma mesma velocidade de compressão aplicada, o material pulverulento orgânico (polvilho doce) apresentou maior força de adesão em relação aos materiais pulverulentos inorgânicos (calcário dolomítico e concentrado fosfático). E, as forças de adesão das partículas dos três materiais pulverulentos utilizados nos experimentos, aumentaram com o aumento do tamanho das partículas sobre a superfície do disco de aço inoxidável.

Esta diferença na força de adesão dos três materiais pulverulentos, pode ser explicada pelas características físicas das partículas. As partículas dos materiais pulverulentos inorgânicos (concentrado fosfático e do calcário dolomítico) possuem formatos muito irregulares ( $\text{Esfericidade}_{\text{concentrado}} = 0,60$  e  $\text{Esfericidade}_{\text{calcário}} = 0,64$ ), apresentam praticamente a mesma distribuição granulométrica e possuem valores muito próximos de densidade e de diâmetros médios, enquanto as partículas do material pulverulento orgânico (polvilho doce) possuem formatos regulares, bem próximos ao esférico ( $\text{esfericidade} = 0,94$ ) e uma menor faixa de distribuição granulométrica,

conforme pode ser visto na Figura 3.7. Levando em conta o trabalho realizado por Ito (2002), a porosidade do concentrado fosfático possui valor mais alto que a porosidade do polvilho doce. E como as partículas do concentrado fosfático e do calcário dolomítico possuem formatos irregulares, praticamente a mesma distribuição granulométrica e possuem valores muito próximos de densidade e de diâmetros médios de partículas, atribui-se que a porosidade do calcário dolomítico também é maior que a porosidade do material pulverulento orgânico (polvilho doce). Endo (2001) concluiu em seu trabalho que partículas esféricas monodispersas possuem menores valores de porosidade, do que as partículas irregulares polidispersas.



**Figura 4.10** – Força de Adesão em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 10000 rpm.

Portanto, pode-se concluir que a força de adesão dos três materiais pulverulentos utilizados nos experimentos aumenta com o aumento do tamanho das partículas e com o aumento da força de compressão (*press-on*). Segundo Ito (2002), que observou que a porosidade depende do formato da partícula, provavelmente a força de adesão também será, como pode ser verificado na Figura 4.10.

Para a velocidade de compressão de 1000 e 2000 rpm, foi utilizado o mesmo procedimento usado no gráfico da Figura 4.10, os resultados levantados apresentaram o mesmo comportamento e estão apresentados na Figura D.13 e Figura D.14 do Anexo D.

#### 4.4 – Cálculo da Distância de Separação Efetiva entre as Superfícies

Com os resultados da força de adesão para os três materiais pulverulentos utilizados, determinou-se a distância de separação efetiva ( $z_0$ ) entre a superfície da partícula e a superfície do disco de prova. Assumindo que os materiais pulverulentos utilizados estavam secos, pois as corridas experimentais foram realizadas com umidade relativa do ar abaixo de 50%, a força de Van der Waals é a componente mais importante e é ela que limita a força de adesão (Banda, 2002). Sendo assim, utilizou-se a Equação (56), que é um rearranjo da Equação (1) mostrada no item 2.3 do Capítulo II.

$$F_{vdw} = \frac{A \cdot d_1}{12 \cdot z_0^2} \quad (1)$$

$$z_0 = \sqrt{\frac{A \cdot d_1}{12 \cdot F_{adesão}}} \quad (56)$$

O valor da constante de Hamaker utilizado para o concentrado fosfático foi de  $8 \times 10^{-20}$  J (Silva et al., 1999), para o polvilho doce foi de  $5,2 \times 10^{-20}$  J (Li *et al.*, 1996) e para o calcário dolomítico foi de  $5,61 \times 10^{-20}$  J (Aguiar, 1995).

O valor de  $z_0$  calculado para os três materiais pulverulentos, utilizando a Equação (54), está apresentado nas Tabelas 4.11 a 4.19:

**Tabela 4.11** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.

Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Força de Adesão ( $\times 10^{-7}$ N)	Distância de Separação Efetiva ( $\times 10^{-9}$ m)
13,17	0,66	1,16
20,31	1,02	1,15
26,15	1,29	1,15

**Tabela 4.12** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.

<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Distância de Separação Efetiva (<math>\times 10^{-10}</math> m)</b>
12,66	0,86	10,00
19,83	1,32	9,97
27,42	1,84	9,89

**Tabela 4.13** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Distância de Separação Efetiva (<math>\times 10^{-10}</math> m)</b>
13,01	2,37	5,65
19,97	4,17	5,61
26,09	5,53	5,47

**Tabela 4.14** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.

<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Distância de Separação Efetiva (<math>\times 10^{-10}</math> m)</b>
13,38	0,85	8,58
20,87	2,27	6,56
27,25	5,03	5,03

**Tabela 4.15** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.

<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Distância de Separação Efetiva (<math>\times 10^{-10}</math> m)</b>
12,73	1,39	6,54
19,99	3,94	4,87
27,62	5,79	4,72



**Tabela 4.16** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Distância de Separação Efetiva (<math>\times 10^{-10}</math> m)</b>
12,81	2,48	4,92
20,19	4,40	4,63
27,30	7,34	4,17

**Tabela 4.17** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.

<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Distância de Separação Efetiva (<math>\times 10^{-10}</math> m)</b>
13,57	2,05	5,35
19,40	3,78	4,72
26,32	5,26	4,66

**Tabela 4.18** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.

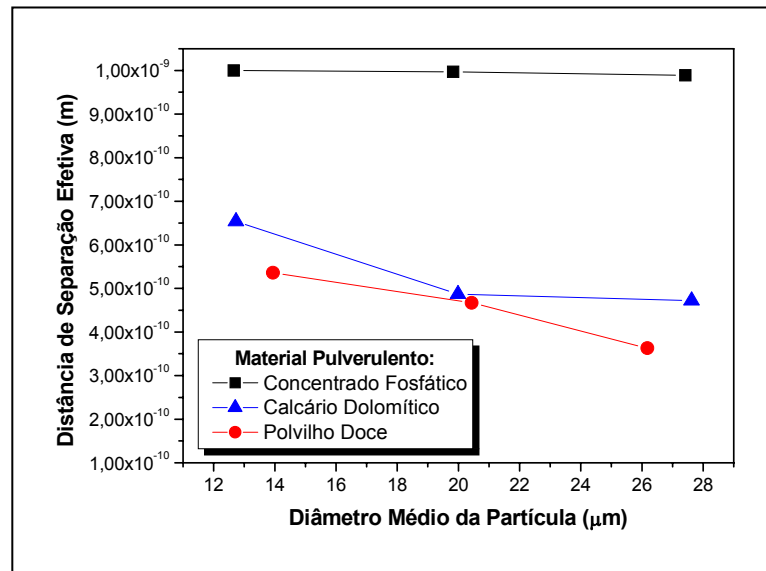
<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Distância de Separação Efetiva (<math>\times 10^{-10}</math> m)</b>
13,94	2,10	5,36
20,44	4,06	4,67
26,18	8,60	3,63

**Tabela 4.19** – Distância de separação efetiva entre as superfícies para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Força de Adesão (<math>\times 10^{-7}</math> N)</b>	<b>Distância de Separação Efetiva (<math>\times 10^{-10}</math> m)</b>
13,58	2,49	4,86
19,56	6,11	3,72
27,14	9,87	3,45

A Figura 4.11 apresenta um gráfico de distância de separação efetiva em função do diâmetro médio das partículas, dos três materiais pulverulentos utilizados nos

experimentos, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão (*press-on*) de 2000 rpm.



**Figura 4.11** – Distância de Separação Efetiva em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 2000 rpm.

Pode-se observar também, que os valores da distância de separação efetiva ( $z_0$ ) obtidos para o concentrado fosfático, aplicado a uma velocidade *press-on* de 1000, 2000 e 10000 rpm, foram mantidos praticamente constantes. Isto mostrou que  $Z_0$  foi independente do tamanho das partículas. O calcário dolomítico e o polvilho doce apresentaram valores decrescentes da distância de separação efetiva ( $z_0$ ) das partículas quando se aumentou a força de compressão sobre as partículas, conforme pode ser visto na Tabela 4.14 a 4.16.

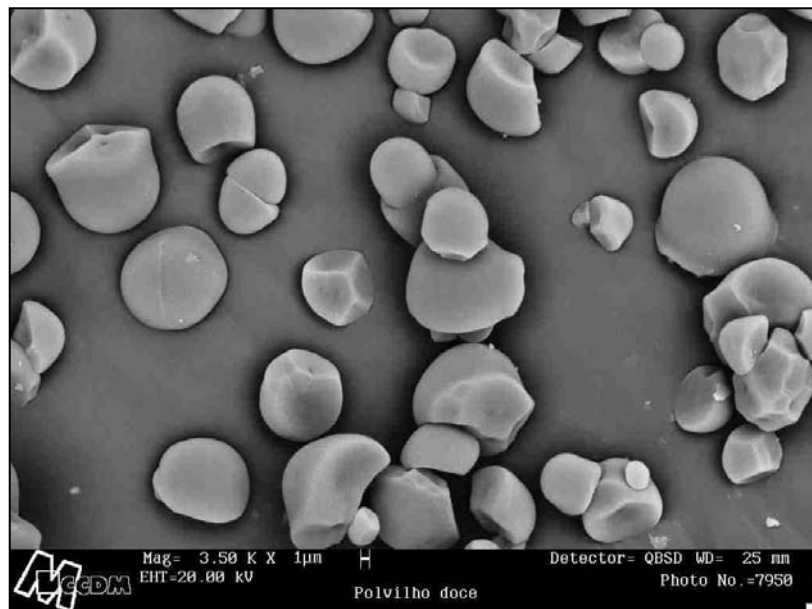
O concentrado fosfático e o calcário dolomítico apresentaram os maiores valores da distância de separação efetiva ( $z_0$ ).

Para a velocidade de compressão de 1000 e 10000 rpm, foi utilizado o mesmo procedimento usado no gráfico da Figura 4.11. Os resultados obtidos apresentaram o mesmo comportamento e estão apresentados na Figura D.15 e Figura D.16 do Anexo D.

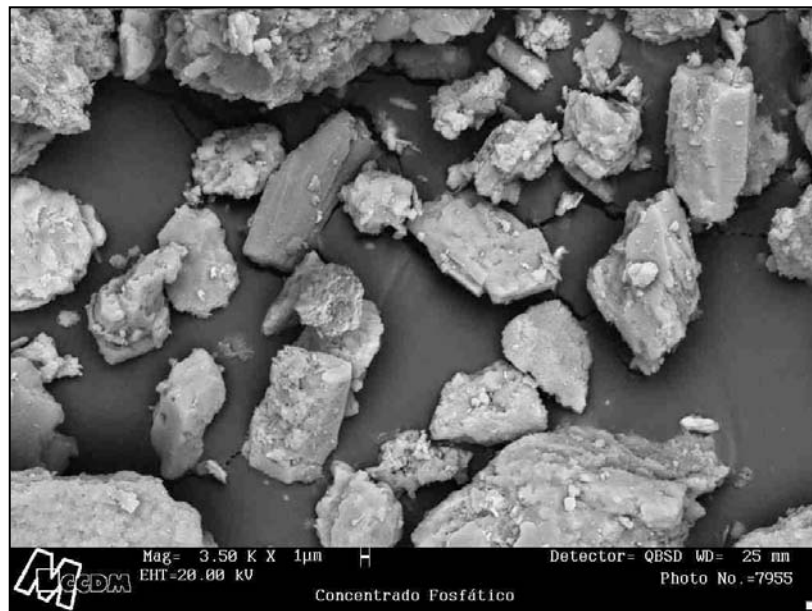
Segundo SCHUBERT (1981), a menor distância possível entre duas partículas esféricas lisas em contato seria de  $4 \times 10^{-10}$  metros, e sugeriu que para partículas reais, este valor estaria entre  $4 \times 10^{-10} \text{ m} < (z_0) < 4 \times 10^{-8} \text{ m}$ .

Pode-se observar nas Tabelas 4.18 e 4.19 esse valor não foram obedecido. A menor distância entre duas partículas esféricas de polvilho doce foi de  $3,45 \times 10^{-10}$  m. Isto pode ter ocorrido devido à alta velocidade de compressão (*press-on* = 10000 rpm) aplicada sobre as partículas do polvilho doce na superfície dos discos de prova, que são menos resistentes que as do material inorgânico. As partículas esféricas do polvilho foram comprimidas contra a superfície desses discos, provocando possivelmente a deformação elástica e conseqüentemente a aproximação entre elas.

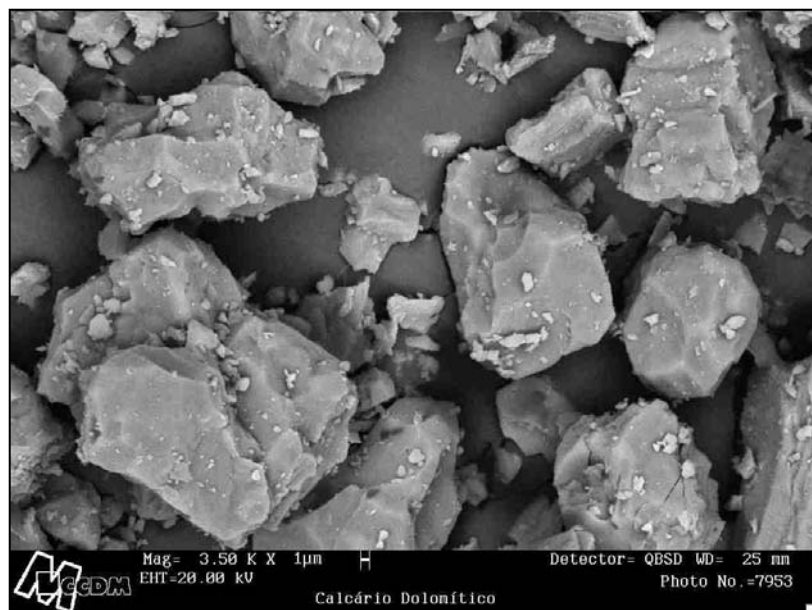
Além do formato da partícula, as propriedades químicas das partículas e a faixa de distribuição granulométrica influenciam na distância de separação efetiva entre as superfícies. Observou-se neste trabalho que o polvilho doce possui partículas regulares, aproximadamente esféricas (esfericidade igual a 0,94), e uma pequena faixa de distribuição granulométrica; o concentrado fosfático e o calcário dolomítico apresentam partículas irregulares (esfericidade igual a 0,60 e 0,64 respectivamente) e uma ampla faixa de distribuição granulométrica, conforme pode ser observado na Figura 3.7 do Capítulo II. As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam a imagem dos três materiais pulverulentos, obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.



**Figura 4.12** – Imagem do material pulverulento polvilho doce, obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.



**Figura 4.13** – Imagem do material pulverulento concentrado fosfático, obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.



**Figura 4.14** – Imagem do material pulverulento calcário dolomítico, obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.

#### 4.5 – Obtenção de uma Equação para a Força de Adesão para os Três Materiais Pulverulentos testados

Sabe-se que a força de adesão varia, com a densidade, com a esfericidade, com o diâmetro da partícula, e também com a umidade relativa do ar.

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

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

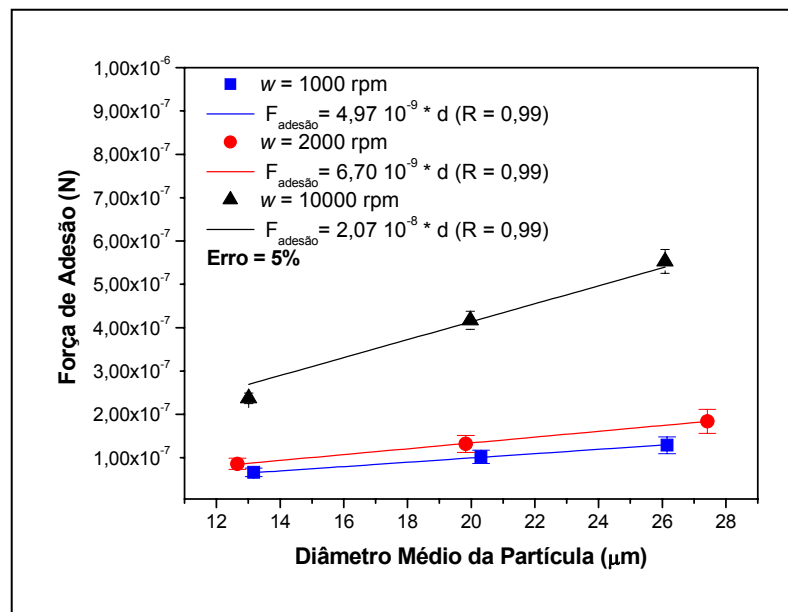
Sendo que a força de adesão,  $F_{ad}$ , dada em Newton, o diâmetro da partícula,  $d$ , em metro, e a umidade relativa do ar,  $\%RH$ , em percentagem.

Baseando-se na Equação (5), tentou-se ajustar uma equação que melhor relacionasse os resultados experimentais levantados neste estudo. Como a umidade relativa do ar foi mantida constante em 39%, durante todos os experimentos, a Equação (5) pode ser representada pela Equação (57):

$$F_{ad} = k \cdot d \quad (57)$$

Onde  $k$  é uma constante, cujo valor está embutido a umidade relativa do ar e as características químicas e físicas dos materiais pulverulentos, e  $d$  é o diâmetro da partícula, em metro.

As Figuras 4.15 a 4.17 apresentam gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas, para os três materiais pulverulentos, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm.

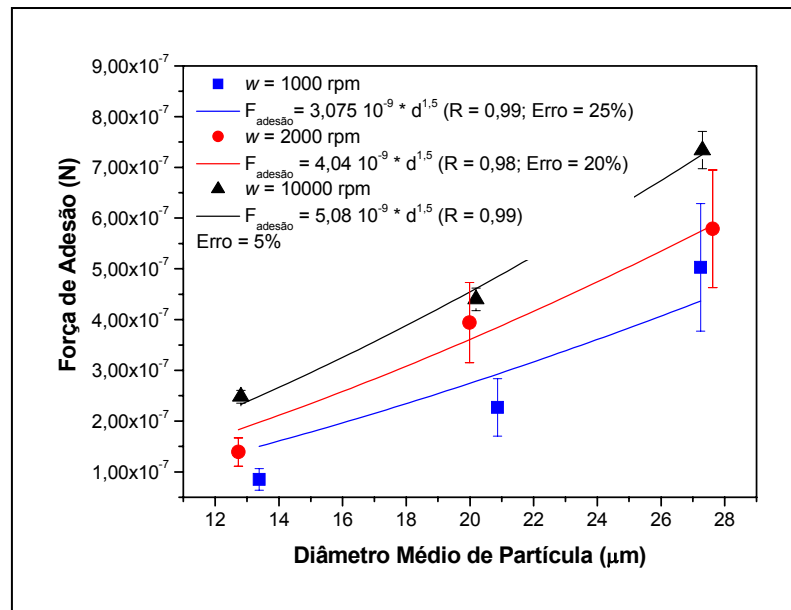


**Figura 4.15** – Força de Adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm.

Observa-se na Figura 4.15, que a força de adesão aumenta linearmente com o aumento do diâmetro da partícula de concentrado fosfático, cuja esfericidade é 0,6, e com o aumento da velocidade angular de compressão. Portanto, para o concentrado fosfático ajustou-se uma equação linear representada pela Equação (58), para as três velocidades de compressão, como mostra a Figura 4.15, onde o coeficiente de correlação linear para as três equações foi de 0,99.

$$F_{ad} = k \cdot d^{k_1} \quad (58)$$

A Figura 4.16 apresenta o gráfico de força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de calcário dolomítico, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm.



**Figura 4.16** – Força de Adesão em função do diâmetro médio das partículas de calcário dolomítico após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm.

Observa-se na Figura 4.16, o mesmo comportamento assumido para o concentrado fosfático. Porém, as equações de força de adesão em função do diâmetro médio de partícula deste material, cuja esfericidade é 0,64, possuem uma dependência não linear, apesar de ter sido utilizados apenas três pontos.

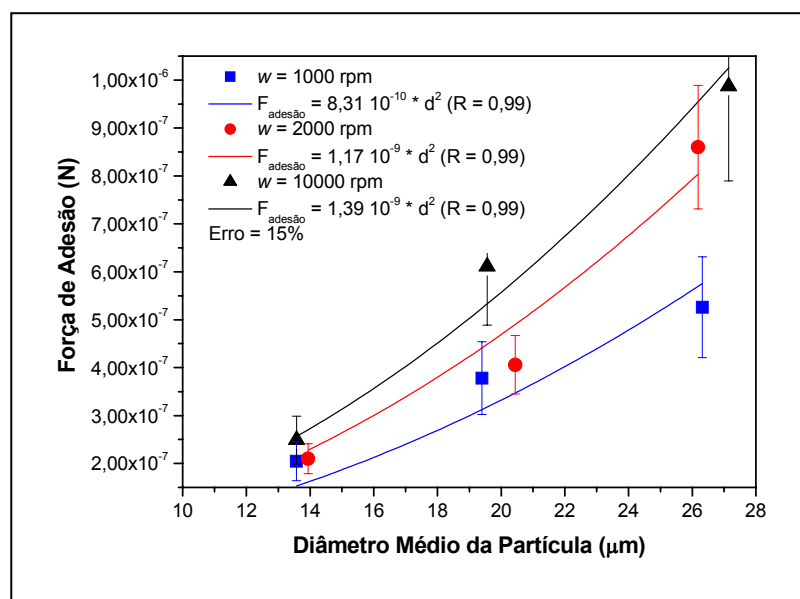
Ajustou-se uma curva para verificar qual a relação da força de adesão com o diâmetro da partícula. E o melhor ajuste foi o da Equação (59), com coeficiente de correlação linear igual a 0,99, como mostra a Figura 4.16.

$$F_{ad} = k \cdot d^{1,5} \quad (59)$$

A Figura 4.17 apresenta o gráfico de força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de polvilho doce após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm. Observa-se nesta figura, que o polvilho doce, cuja esfericidade é 0,94, apresentou o mesmo comportamento assumido para o concentrado fosfático e calcário dolomítico. A força de adesão aumentou com o aumento do diâmetro médio da partícula e com o aumento da velocidade angular de

compressão. Mas, agora a dependência da força de adesão em função do diâmetro médio de partícula de polvilho doce é de ordem quadrática, conforme está apresentado na Equação (60):

$$F_{ad} = k \cdot d^2 \quad (60)$$

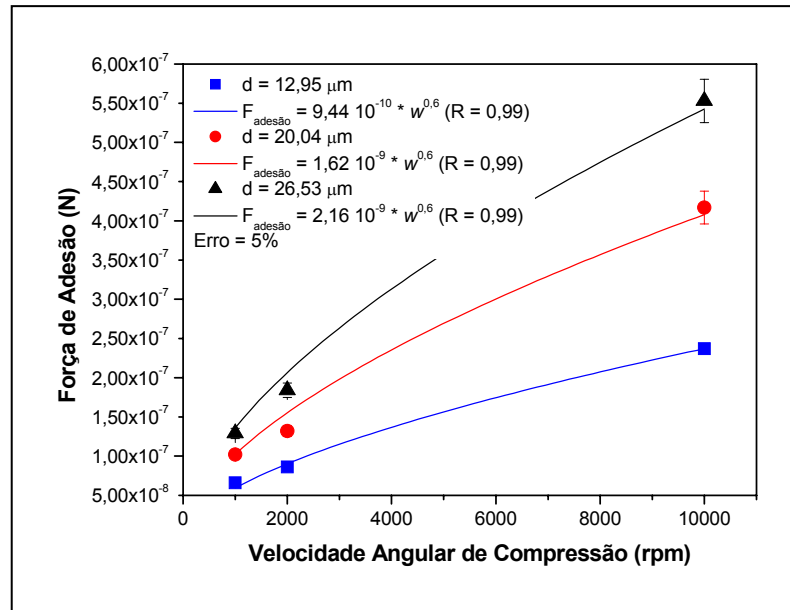


**Figura 4.17** – Força de Adesão em função do diâmetro médio das partículas de polvilho doce após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm.

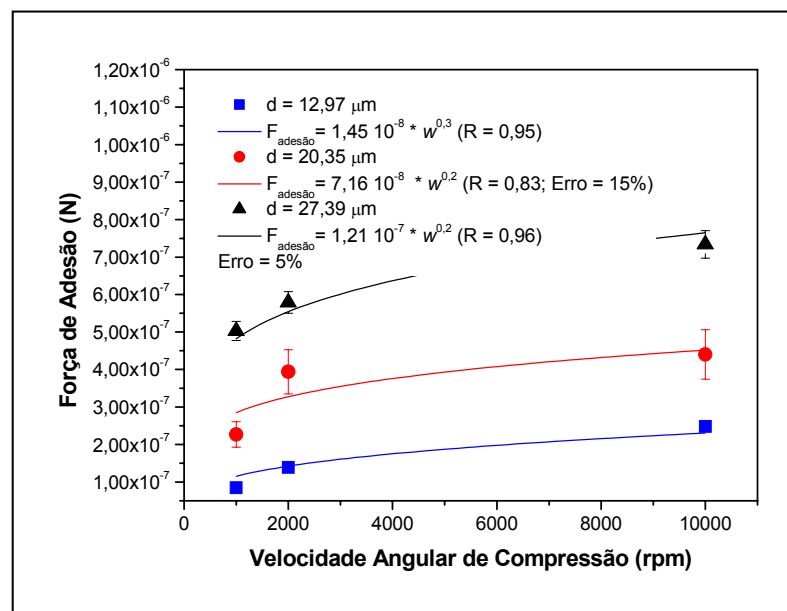
Analisando as Equações (58), (59) e (60) ajustadas, verifica-se que a dependência do diâmetro da partícula com a força de adesão aumentou com o aumento da esfericidade do material pulverulento.

As Figuras 4.18 a 4.20 apresentam gráficos de força de adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas para os três materiais pulverulentos utilizados, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm.

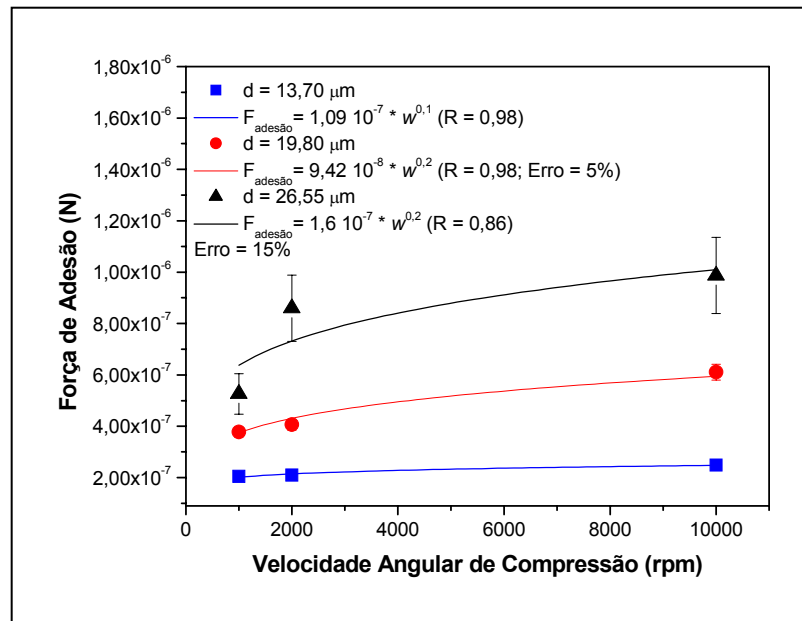




**Figura 4.18** – Força de Adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das forças centrífuga de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm.



**Figura 4.19** – Força de Adesão em função da velocidade angular de compressão das partículas de calcário dolomítico após a aplicação das forças centrífugas de compressão de 1000, 2000 e 10000 rpm.



**Figura 4.20** – 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, 2000 e 10000 rpm.

Pode-se observar nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 que a força de adesão aumenta de forma não linear com o aumento da velocidade angular de compressão sobre as partículas de concentrado fosfático, calcário dolomítico e polvilho doce.

A equação que melhor ajustou-se aos dados experimentais foi a Equação (61):

$$F_{\text{ad}} = k \cdot w^{k_2} \quad (61)$$

Para o concentrado fosfático, o expoente  $k_2$  foi 0,66 para todas as faixas de diâmetro médio de partícula, como mostra a Figura 4.18.

Para o calcário dolomítico, o expoente  $k_2$  foi igual a 0,2 para os diâmetros de 20,35 e 27,39  $\mu\text{m}$ . Enquanto para o diâmetro de 12,97  $\mu\text{m}$ ,  $k_2$  foi 0,3. A mesma variação para o expoente foi observado para o polvilho doce, que variou de 0,2 para os diâmetros de 19,80 e 26,55  $\mu\text{m}$  e 0,1 para o diâmetro de 13,70  $\mu\text{m}$ .

A variação no expoente  $k_2$  observada para os menores diâmetros tanto para o calcário dolomítico como para o polvilho doce, pode ser devido à limitação da

centrífuga, cuja velocidade máxima de rotação é de 14000 rpm. Como se pode observar na Figura 4.4, o menor diâmetro das partículas de calcário dolomítico aderidas na superfície do disco não provocou um desprendimento satisfatório, após a aplicação da força centrífuga *spin-off* de 14000 rpm. Já na Figura 4.7 correspondente as partículas de polvilho doce não houve um desprendimento satisfatório para nenhum dos diâmetros médios deste material pulverulento, influenciando desta maneira, no cálculo exato do valor da força de adesão. Isto pode ser explicado devido à pequena distribuição granulométrica e a menor densidade das partículas de polvilho doce. Assim, torna-se necessário uma centrífuga com velocidade de rotação maior que 14000 rpm para provocar um maior desprendimento das partículas sobre a superfície do disco de prova, similar ao comportamento atingido pelo gráfico da Figura 4.1.

Analisando as Figuras 4.15 a 4.20 foi possível ter uma idéia de como a força de adesão varia com o diâmetro médio da partícula e com a velocidade angular de compressão.

Nota-se que para o concentrado fosfático, a variação da força de adesão com o diâmetro médio da partícula é semelhante à Equação (5) proposta por Corn (1961). Mas para os outros materiais pulverulentos não ocorreu essa variação. Verificou-se também que a força de adesão variou de forma não linear para o calcário dolomítico e para o polvilho doce, apesar de ter sido utilizados apenas três pontos.

Utilizando os dados experimentais levantados neste trabalho, o *software* Microsoft Excel e o Origin 6.1 e, tomando como base a Equação (5) e os gráficos das Figuras 4.15 a 4.20 tentou-se estimar uma equação que representasse de forma mais geral os dados experimentais obtidos para os três materiais pulverulentos utilizados neste trabalho. Portanto, a Equação (62) foi a que melhor representou a força de adesão entre partículas, dos três materiais pulverulentos, e uma superfície de aço inoxidável para uma umidade relativa do ar constante.

$$F_{ad} = k \cdot d_p^{k_1} \cdot w^{k_2} \cdot \varepsilon \quad (62)$$

Sendo  $k$  é uma constante, cujo valor está embutido a umidade relativa do ar e as características químicas e físicas dos materiais pulverulentos,  $k_1$  e  $k_2$  são os parâmetros da equação,  $d_p$  é o diâmetro da partícula, está em metro,  $w$  é a velocidade angular de

compressão, cuja unidade é  $s^{-1}$  e  $\varepsilon$  é a esfericidade da partícula, adimensional. No entanto, a Equação (62) precisa ser melhor investigada para ser validada.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

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

- Para os três materiais pulverulentos utilizados nos experimentos, a força de adesão entre partículas e a superfície do disco de aço inoxidável aumentou com o aumento do tamanho das partículas.
- Para os três materiais pulverulentos utilizados nos experimentos, a força de adesão entre partículas e a superfície do disco de aço inoxidável aumentou com o aumento da velocidade de compressão (*Press-on*).
- Todos os três pós obedeceram à distribuição log-normal para a porcentagem das partículas em relação à força de desprendimento para as velocidade de compressão (*press-on*) de 1000, 2000 e 10000 rpm.
- A distância de separação efetiva ( $z_0$ ) estimada para o concentrado fosfático, após a aplicação da força de compressão (*press-on*) de 1000 rpm, foi de  $1,2 \times 10^{-9}$  m para todos os diâmetros médios de partículas analisados na centrífuga (13,17; 20,31 e 26,15  $\mu\text{m}$ ); 2000 rpm, foi de  $9,91 \times 10^{-10}$  m,  $1,0 \times 10^{-9}$  m e  $8,62 \times 10^{-10}$  m para os diâmetros médios de partículas 12,66; 19,83 e 27,42  $\mu\text{m}$  respectivamente e para 10000 rpm, foi de  $5,0 \times 10^{-10}$  m para todos os diâmetros médios de partículas analisados na centrífuga (13,01; 19,97 e 26,09  $\mu\text{m}$ ).
- A distância de separação efetiva ( $z_0$ ) estimada para o calcário dolomítico, após a aplicação da força de compressão (*press-on*) de 1000 rpm, foi de  $8,58 \times 10^{-10}$  m,  $6,56 \times 10^{-10}$  m e  $5,03 \times 10^{-10}$  m para os diâmetros médios de partículas 13,38; 20,87 e 27,25  $\mu\text{m}$  respectivamente; para 2000 rpm, foi de  $6,54 \times 10^{-9}$  m,  $4,87 \times$

$10^{-9}$  m e  $4,72 \times 10^{-9}$  m para os diâmetros médios de partículas 12,73; 19,99 e 27,62  $\mu\text{m}$  respectivamente e para 10000 rpm, foi de  $4,92 \times 10^{-10}$  m,  $4,63 \times 10^{-10}$  m e  $4,17 \times 10^{-10}$  m para os diâmetros médios de partículas 12,81; 20,19 e 27,30  $\mu\text{m}$  respectivamente.

- A distância de separação efetiva ( $z_0$ ) estimada para o polvilho doce, após a aplicação da força de compressão (*press-on*) de 1000 rpm, foi de  $5,35 \times 10^{-10}$  m,  $4,72 \times 10^{-10}$  m e  $4,66 \times 10^{-10}$  m para os diâmetros médios de partículas 13,57; 19,40 e 26,32  $\mu\text{m}$  respectivamente; para 2000 rpm, foi de  $5,36 \times 10^{-10}$  m,  $4,67 \times 10^{-10}$  m e  $3,63 \times 10^{-10}$  m para os diâmetros médios de partículas 13,94; 20,44 e 26,18  $\mu\text{m}$  respectivamente e para 10000 rpm, foi de  $4,86 \times 10^{-10}$  m,  $3,72 \times 10^{-10}$  m e  $3,45 \times 10^{-10}$  m para os diâmetros médios de partículas 13,58; 19,56 e 27,14  $\mu\text{m}$  respectivamente.
- Todos os valores de  $z_0$  estimados, para o concentrado fosfático, calcário dolomítico e para o polvilho doce, obedeceram a faixa de valores sugeridas por Schubert (1981), ( $4 \times 10^{-10}$  m  $< z_0 < 4 \times 10^{-8}$  m), exceto para o caso do polvilho doce com velocidade de compressão (*press-on*) de 2000 e 10000 rpm.
- A força de adesão, para todos os materiais pulverulentos, aumentou com o aumento da força de compressão (*press-on*). A ordem de aderência indicou a seguinte relação: polvilho doce  $>$  calcário dolomítico  $>$  concentrado fosfático.
- A dependência do diâmetro da partícula com a força de adesão aumentou com o aumento da esfericidade do material pulverulento.
- A força de adesão aumenta de forma não linear com o aumento da velocidade angular de compressão sobre as partículas de concentrado fosfático, calcário dolomítico e polvilho doce.

- A Equação (62) foi a que melhor representou a força de adesão entre partículas, dos três materiais pulverulentos, e uma superfície de aço inoxidável para uma umidade relativa do ar constante.

## CAPÍTULO VI

### SUGESTÕES

Para continuidade destes estudos, são dadas as seguintes sugestões:

- Investigar a influência da umidade relativa do ar e da temperatura na força de adesão entre partículas do material pulverulento e uma superfície.
- Examinar a influência das propriedades físico-químicas do material pulverulento na força de adesão.
- Utilizar outro material particulado orgânico, por exemplo o amido de milho, nos testes experimentais com a centrífuga para a determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície de aço inoxidável para comparar com os resultados do polvilho doce obtidos neste trabalho.
- A distância de separação efetiva ( $z_0$ ) entre a superfície da partícula e a superfície do disco de prova para os três materiais pulverulentos, foi determinada utilizando a Equação (52) mostrada no item 2.3 do Capítulo II. Para esta equação o valor da constante de Hamaker,  $A$ , para cada material pulverulento, foi estimada utilizando o valor da literatura. Para se obter uma distância de separação efetiva ( $z_0$ ) entre a superfície da partícula e a superfície do substrato mais próxima da realidade sugere-se que o valor da constante de Hamaker seja determinada empiricamente, utilizando, por exemplo, o equipamento Zeta Sizer.
- Propor um planejamento experimental para validar a Equação (62).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSON, A.W., Physical Chemistry of Surfaces, 5<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc. California, 1990.
- AGUIAR, M. L. & COURRY, J.R. “Air filtration in fabric filters: cake-cloth adhesion force”. *Fluid/Part. Sep. Journal*, v.5, n.4, p.193-198, 1992.
- ASTM, D 907, Standard Definitions of Terms Relating to Adhesives, Annual Book of ASTM Standards, 22, 233, (1977).
- BANDA, S. Giancarlo, “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.
- BIKERMAN, J.J., The Science of Adhesive Joints, 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, New York, 1968.
- BÖEHME, G., KRUPP, H., RABENHORST, H. AND SANDSTEDTE 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., *Philos. Mag.* 13, (1932), 853 – 862.

- CAPPELLA, B., AND DIETLER, G., “Force-distance curves by atomic force microscopy” *Surface Science Reports*, v.34, p. 1-104, 1999.
- 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, *Colloid-Z*, 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- GOOD, R.J., “Definition of adhesion”, *Journal of Adhesion*, v.8, n.1, p. 1-9, 1976.
- HINDS, W., C., “Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles”. A Wiley-Interscience publication. 2<sup>nd</sup> ed., p. 141-144, 1998.
- ISRAELACHVILI, J., *Intermolecular & Surface Forces*. Second edition, Academic Press Limited, London 1991.
- ITO, L. X., *Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases*, São Carlos, UFSCar, 2002, (Dissertação de Mestrado).
- 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*, 263, 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.; *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* 310, 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. e ORR, C., "Adhesion of solid particles to solid-surfaces", *Archives of environmental health*, v.1, p. 1-9, 1960.
- KRUPP, H. *Adv. Coll. Interface Science*, v.1, p. 111-239, 1967.
- KULVANICH, P., AND STEWART, PLJL, *J. Pharm. Pharmacol.*, 40 (1987), 111.
- KULVANICH, P., AND STEWART, PLJL, *J. Pharm. Pharmacol.*, 40 (1988), 453.
- 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.
- LEE, M. H., JAFFE, A. B., AND MITTAL, K. L. (ed), *Particles on Surfaces I* Plenum Press, New York, p. 169, 1988.
- 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., *Adv. Colloid Interface Sci.*, 19 (1983) 27.
- MAUGIS, D., "On the contact and adhesion of rough surfaces", *J. Adhesion Sci. And Tech.*, v.10, p. 161-175, 1996.
- 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.
- 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.
- OTSUKA, A., IIDA, K., DANJO, K. and SUNADA, H.; *Chem. Pharm. Bull.*, 31, p. 4483, 1983.
- OTSUKA, A., IIDA, K., DANJO, K. and SUNADA, H.; *Chem. Pharm. Bull.*, 36, p. 741, 1988.
- OTT, M. L., MIZES, H. A., *Colloids Surf.* A87, 245, (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, 1996.
- 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.
- 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.
- SALOMON, G., “Adhesion and adhesives”, Vol. 1, 2<sup>nd</sup> ed., Houwink R. and Salomon G eds., Elsevier, New York, 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, pp. 35 – 48, 1995.
- SCHUBERT, H, “Principles of Agglomeration”, *Int. Chem. Eng.*, v.21, n.3, p. 363-371, 1981.

- 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.
- STANIFORTH, J. N., REES, J. E., LAI, F. K., AND HERSEY, J. A.; *J. Pharm. Pharmacol.*, 33, p. 485, 1981.
- STEWART, P.J. "Particle interaction in pharmaceutical systems". *Pharm. Int.*, v.7, p. 146-149, 1986.
- 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. e 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.
- XIE, H.Y., "The role of Interparticle forces in the fluidization of fine particles", *Powder Technology*, v.94, p. 99-108, 1997.
- ZIMON A.D., *Adhesion of Dust and Powders*, Consultants Bureau, New York, p.109-125, 1982.

**ANEXO A**



**Tabela A.1** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}^2$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
167,3225861	14,38135433	52,39115906	7,190677166	1604,216932
134,6501312	12,38735676	39,67457962	6,193678379	1111,972809
218,8064728	15,83323002	59,59884262	7,916615009	2309,608809
174,2531128	14,69580841	55,51520538	7,347904205	1707,193574
200,9851227	16,85353088	72,60723114	8,426765442	2258,205982
191,0843811	14,74281597	49,7242012	7,371407986	1878,081244
120,789093	11,75969505	50,19805908	5,879847527	946,9619331
203,9553528	15,83293819	65,63200378	7,916469097	2152,80833
125,7394638	12,30968666	44,95621872	6,15484333	1031,8756
104,9478989	11,28114414	37,96224594	5,640572071	789,2882497
175,2431946	14,24751663	46,15075684	7,123758316	1664,52022
82,17618561	10,56798172	40,35843277	5,28399086	578,9576182
118,8089447	12,03516006	44,74483871	6,017580032	953,2564444
154,4516296	13,11743736	47,65309525	6,558718681	1350,673052
131,6799164	13,50636673	47,47135925	6,753183365	1185,678161
93,06700134	12,55376339	44,63593292	6,276881695	778,8940762
155,4416962	13,90164185	54,07502747	6,950820923	1440,596525
167,3225861	14,07474804	49,81680679	7,03737402	1570,015493
120,789093	11,48018646	45,36062622	5,740093231	924,454207
151,4813995	12,80539322	47,49747086	6,402696609	1293,185924
243,5583344	16,43482399	76,04499054	8,217411995	2668,558904
171,2828979	14,16361046	45,4593277	7,081805229	1617,32283
143,5608063	13,04093838	44,71091843	6,520469189	1248,111752
107,9181213	12,10571766	37,7121048	6,052858829	870,9508715
149,5012512	13,77077961	59,62068939	6,885389805	1372,499188
113,8585663	10,63022518	50,69860077	5,315112591	806,894799
86,13648224	11,34582996	39,58614349	5,672914982	651,5265874
161,3821411	13,37507629	55,48774719	6,687538147	1438,998967
81,18611145	10,06513214	31,67446709	5,032566071	544,7659598
158,4119263	12,90146923	54,36149216	6,450734615	1362,497728
111,878418	10,28904247	49,58942795	5,144521236	767,4145295
180,1935577	14,58732796	50,14753723	7,293663979	1752,361682
161,3821411	14,61875534	61,65274429	7,30937767	1572,804025
254,4491577	16,8330822	80,22834778	8,4165411	2855,442392
111,878418	10,95251846	39,00429535	5,476259232	816,9002923
201,9752045	16,0024395	74,78982544	8,001219749	2154,73066
110,8883438	12,05517673	42,39097977	6,027588367	891,1857217
134,6501312	13,37746429	49,30821991	6,688732147	1200,851548
106,9280472	10,77642441	39,20503235	5,388212204	768,201345
<b><math>\Sigma = 5882,03</math></b>	<b><math>\Sigma = 526,99</math></b>	<b><math>\Sigma = 2015,49</math></b>	<b><math>\Sigma = 263,49</math></b>	<b><math>\Sigma = 53630,41</math></b>
<b>Média = 147,05</b>	<b>Média = 13,17</b>	<b>Média = 50,39</b>	<b>Média = 6,59</b>	<b>Média = 1340,76</b>

**Tabela A.2** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>1000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
15	13	10	6	5	1	1	0	0
10	9	8	5	5	3	1	1	0
18	17	16	9	8	3	2	0	0
17	16	10	6	4	1	1	0	0
17	17	16	13	9	6	2	2	1
16	16	13	9	5	3	1	1	1
19	19	18	15	5	3	1	0	0
16	16	15	10	5	4	2	1	1
11	9	8	7	3	1	1	1	1
16	15	14	9	6	4	3	2	1
14	12	11	8	6	3	3	2	1
13	12	12	9	6	4	2	1	0
10	10	9	6	2	1	1	0	0
22	20	17	10	6	1	1	0	0
17	16	16	10	6	4	3	1	1
17	16	12	7	2	0	0	0	0
8	8	5	3	2	1	0	0	0
15	13	10	6	6	2	2	2	0
14	13	11	7	6	4	2	2	2
13	11	9	4	2	2	2	0	0
14	14	11	7	4	2	2	1	1
14	13	12	7	4	2	0	0	0
18	16	14	9	4	1	0	0	0
16	15	14	7	5	2	1	0	0
24	21	19	13	4	1	1	0	0
19	19	13	8	5	3	1	1	1
20	20	17	11	7	5	2	2	2
15	16	13	6	3	0	0	0	0
23	22	16	6	3	2	1	1	1
18	18	16	5	1	0	0	0	0
19	19	14	10	5	3	1	0	0
16	16	15	10	6	4	2	0	0
15	15	12	8	4	2	2	1	1
20	20	15	8	6	4	3	3	3
16	16	15	10	4	1	1	0	0
16	16	16	11	7	1	1	0	0
23	22	21	12	10	8	4	2	2
14	14	10	5	4	2	2	2	2
18	18	16	12	6	3	3	1	0
<b><math>\Sigma = 636</math></b>	<b><math>\Sigma = 608</math></b>	<b><math>\Sigma = 519</math></b>	<b><math>\Sigma = 324</math></b>	<b><math>\Sigma = 191</math></b>	<b><math>\Sigma = 97</math></b>	<b><math>\Sigma = 58</math></b>	<b><math>\Sigma = 30</math></b>	<b><math>\Sigma = 22</math></b>
<b>100 %</b>	<b>95,60 %</b>	<b>81,60 %</b>	<b>50,94 %</b>	<b>30,03 %</b>	<b>15,25 %</b>	<b>9,12 %</b>	<b>4,72 %</b>	<b>3,46 %</b>

**Tabela A.3** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}^2$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
400,9801636	21,32000923	79,16373444	10,66000462	5699,267193
256,4292908	17,23283958	63,71814346	8,616419792	2946,003222
423,7518616	22,17239952	84,31986237	11,08619976	6263,730382
430,682373	22,18722725	85,82913971	11,09361362	6370,431789
407,910675	21,68130684	93,38959503	10,84065342	5896,024339
353,456604	21,84973335	107,5048752	10,92486668	5148,621699
486,1265869	23,76643181	112,9356155	11,8832159	7702,329585
317,8139343	19,2388382	73,21801758	9,619419098	4076,247239
332,6650391	19,09531021	81,27692413	9,547655106	4234,894745
274,2506104	17,83163643	69,27426147	8,915818214	3260,224783
253,4590759	17,18210602	55,25281143	8,591053009	2903,307143
282,1712341	18,15279579	65,69793701	9,076397896	3414,797861
235,6377411	17,23617935	65,92388153	8,618089676	2707,662912
288,1116943	18,54353905	67,20143127	9,271769524	3561,740303
382,1687622	20,85967255	86,88870239	10,42983627	5314,610158
343,5558472	20,13495445	70,36873627	10,06747723	4611,654223
487,1166687	23,42572212	101,3612823	11,71286106	7607,373148
325,7345276	19,23290253	69,9613266	9,616451263	4176,546946
277,2208557	18,52273178	63,87621307	9,261365891	3423,25837
273,2605591	17,46282578	59,98851776	8,731412888	3181,26769
353,456604	22,49572372	132,7173004	11,24786186	5300,841408
389,0992737	21,24707031	74,38689423	10,62353516	5511,479751
262,369751	17,83367538	67,92980194	8,916837692	3119,344646
265,3399658	17,43501663	74,40792084	8,717508316	3084,137811
279,2010193	17,88656425	69,71408081	8,943282127	3329,297981
277,2208557	17,78605652	62,99863434	8,893028259	3287,110539
284,1513977	19,80825424	76,29875183	9,904127121	3752,362086
405,930542	21,81533051	82,22833252	10,90766525	5903,672624
260,3895874	17,53654289	74,63741302	8,768271446	3044,222112
427,7121887	22,66204262	77,33617401	11,33102131	6461,887899
350,4863892	18,64428711	127,218689	9,322143555	4356,379245
369,2977905	20,61977386	69,37220764	10,30988693	5076,557953
327,7146606	22,9627533	113,2716599	11,48137665	5016,820603
456,4243469	22,87059784	90,94772339	11,43529892	6959,131788
291,0819092	18,56978035	68,32771301	9,284890175	3603,551411
289,1017456	18,31875229	67,75759125	9,159376144	3530,655509
309,8933105	18,52033424	72,93115997	9,260167122	3826,218461
289,1017456	18,56835747	65,79207611	9,284178734	3578,763038
379,1985474	21,24347115	93,85929871	10,62173557	5370,328933
477,2159119	23,97367096	133,6318207	11,98683548	7627,078165
471,2754822	23,6486969	109,7560349	11,82434845	7430,034023
475,2357788	23,50493813	83,74103546	11,75246906	7446,925051

**Continuação da Tabela A.3**

448,5037537	23,84739304	135,683197	11,92369652	7130,430194
429,6923523	21,80226898	100,661026	10,90113449	6245,512163
352,4665222	19,7723217	79,15293121	9,886160851	4646,054311
266,3300476	17,45785332	65,02474213	8,728926659	3099,700603
363,3573608	20,86652946	95,98947906	10,43326473	5054,671384
315,8337708	18,86594772	65,28250122	9,432973862	3972,335606
252,4689941	17,76039696	71,00313568	8,880198479	2989,299704
445,5334778	22,51012039	93,29833984	11,2550602	6686,008149
284,1513672	20,77347183	74,5710144	10,38673592	3935,206948
288,1116638	18,33423615	68,37812042	9,167118073	3521,538187
418,8014832	21,70974541	87,20124817	10,8548727	6061,382384
410,8808899	23,51192474	107,6822586	11,75596237	6440,400375
345,5359802	21,93057632	84,59908295	10,96528816	5051,868791
379,1984863	23,54870605	91,25870514	11,77435303	5953,089127
295,0421753	18,02408981	99,97865295	9,012044907	3545,244444
448,5037231	23,00366592	91,87913513	11,50183296	6878,153209
319,7940369	19,41502571	65,73181152	9,707512856	4139,206299
298,0123901	19,13502312	103,0712509	9,567511559	3801,649316
426,7220764	22,42873383	79,69044495	11,21436691	6380,557246
317,8138733	22,34230614	71,81603241	11,17115307	4733,796568
344,5458984	19,99669456	78,52513885	9,998347282	4593,186063
267,3201294	17,00898361	82,41854858	8,504491806	3031,229133
332,6650391	19,13888741	90,7050705	9,569443703	4244,559151
246,5285339	17,18756866	69,30860901	8,593784332	2824,817403
306,9230652	18,69744682	72,64866638	9,348723412	3825,785127
458,4044495	22,84121704	84,51540375	11,42060852	6980,343682
339,59552	19,61934662	73,31464386	9,809673309	4441,761478
312,8635254	18,56142807	86,17101288	9,280714035	3871,462548
263,3598022	18,68049812	76,57393646	9,340249062	3279,794861
265,3399353	17,54184723	68,12013245	8,770923615	3103,035073
316,823822	20,58403778	76,25923157	10,29201889	4347,675682
405,9305115	22,61841965	109,5348129	11,30920982	6121,004437
283,1612854	19,50792122	69,22083282	9,753960609	3682,592032
423,7518616	22,2902317	77,60245514	11,14511585	6297,01812
473,2555847	23,85719872	88,02018738	11,92859936	7527,035018
294,0520935	19,37151527	80,99917603	9,685757637	3797,489747
284,1513672	18,13581848	74,64385986	9,067909241	3435,545078
324,7444153	19,30895805	70,93270111	9,654479027	4180,317529
312,8635254	19,88425636	75,96231079	9,942128181	4147,372364
429,6922913	22,54667664	88,64041138	11,27333832	6458,755429
378,2084656	22,18100357	113,8876495	11,09050179	5592,69555
<b><math>\Sigma = 28694,34</math></b>	<b><math>\Sigma = 1681,68</math></b>	<b><math>\Sigma = 6886,37</math></b>	<b><math>\Sigma = 840,84</math></b>	<b><math>\Sigma = 395166,4</math></b>
<b>Média = 345,71</b>	<b>Média = 20,26</b>	<b>Média = 82,97</b>	<b>Média = 10,13</b>	<b>Média = 4761,04</b>

**Tabela A.4** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

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

**Continuação da Tabela A.4**

3	3	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
3	3	2	1	1	0	0	0	0
3	3	2	2	1	0	0	0	0
5	5	3	3	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 104</math></b>	<b><math>\Sigma = 104</math></b>	<b><math>\Sigma = 57</math></b>	<b><math>\Sigma = 29</math></b>	<b><math>\Sigma = 12</math></b>	<b><math>\Sigma = 5</math></b>	<b><math>\Sigma = 2</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>54,81%</b>	<b>27,88%</b>	<b>11,54%</b>	<b>4,81%</b>	<b>1,92%</b>	<b>0,96%</b>	<b>0,96%</b>

**Tabela A.5** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}^2$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
527,7097168	25,2540493	122,5430603	12,62702465	8884,538136
480,1861267	24,09634972	111,1536636	12,04817486	7713,821892
398,0099487	25,08461189	93,98765564	12,54230595	6655,950062
690,0819092	28,61755943	127,1056824	14,30877972	13165,64003
471,2754822	24,38239861	126,8125839	12,1911993	7660,551106
598,0050049	26,96283531	129,629715	13,48141766	10749,27364
649,4888916	27,20829391	155,2604523	13,60414696	11780,98977
528,6997681	25,17673683	95,83826447	12,58836842	8873,956616
525,7295532	25,00645828	133,7998962	12,50322914	8764,42276
609,8859253	26,68936348	99,59255981	13,34468174	10851,64476
641,5682983	27,68154716	112,3189545	13,84077358	11839,73541
498,0074768	24,18331718	90,17895508	12,09165859	8028,981848
763,3474731	30,13813591	104,6152878	15,06906796	15337,24659
522,7593384	25,92868614	196,3818512	12,96434307	9036,308542
613,8461914	26,79519844	106,7232819	13,39759922	10965,42034
529,6898804	24,84901428	106,6633606	12,42450714	8774,847602
610,8759766	27,24199104	190,844986	13,62099552	11094,31859
397,0198669	25,54260635	116,9189301	12,77130318	6760,614784
542,5608521	25,23828888	103,2688065	12,61914444	9128,871679
572,2630615	25,17259789	87,39243317	12,58629894	9603,565288
757,4069824	30,11203384	112,1045227	15,05601692	15204,70979
630,6774902	27,14481163	106,3962173	13,57240582	11413,08111
693,0521851	28,36425209	109,2676392	14,18212605	13105,27126
571,2730103	26,14782524	123,7438583	13,07391262	9958,364558
428,7022705	27,68750572	136,5975952	13,84375286	7913,131045
504,9379883	25,76062584	114,9476547	12,88031292	8671,679059
502,9578552	24,48028755	85,49878693	12,24014378	8208,368615
519,7891235	24,0258007	98,42951202	12,01290035	8325,566594
611,8660278	26,41216087	99,78691864	13,20608044	10773,80264
646,5186768	28,20504379	160,913208	14,1025219	12156,72506



**Tabela A.7** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}^2$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
116,8287964	11,72178078	48,52099228	5,860890388	912,9610265
100,9876022	10,25857735	35,00096512	5,129288673	690,6594191
165,3424377	13,64092541	44,85643387	6,820462704	1503,615907
93,06700134	10,32134628	36,18694687	5,160673141	640,3844989
82,17618561	10,04778576	45,30768204	5,023892879	550,4591383
215,8362427	15,51920128	53,22646713	7,759600639	2233,070729
116,8287964	11,77180004	39,23039246	5,885900021	916,8568201
85,14640808	10,41217995	33,62932587	5,206089973	591,0398152
106,9280472	10,85462284	41,52687454	5,42731142	773,7757488
124,7493896	12,17252445	41,76914597	6,086262226	1012,343331
168,3126678	13,51256847	50,3232193	6,756284237	1516,2243
177,2233429	15,20644093	52,62319565	7,603220463	1796,624196
122,7692413	11,41700077	40,70856094	5,708500385	934,4376819
127,7196121	11,33861732	48,15059662	5,669308662	965,4425378
252,4689941	16,82147789	62,07003403	8,410738945	2831,267735
152,4714813	12,5824461	48,78259659	6,291223049	1278,97613
197,024826	15,12770653	67,68350983	7,563853264	1987,022498
98,01737976	12,38239765	39,78918076	6,191198826	809,126782
114,8486404	11,96863174	41,73256302	5,984315872	916,3873892
87,1265564	12,0894165	43,62600327	6,044708252	702,2061526
80,19603729	10,22798061	30,39806938	5,113990307	546,8290098
142,5707245	12,30080128	52,34629822	6,150400639	1169,1561
127,7196121	13,92263603	56,16411209	6,961318016	1185,462449
211,875946	15,97700214	68,69394684	7,988501072	2256,761629
141,580658	12,67113972	40,23852921	6,335569859	1195,992199
246,5285492	15,75007248	74,00209045	7,87503624	2588,561679
116,8287964	14,69994736	104,8784637	7,349973679	1144,918104
85,14640808	10,08739948	34,94748306	5,043699741	572,6038886
86,13648224	11,49127007	46,10471725	5,745635033	659,8783866
113,8585663	11,5550909	39,72049332	5,777545452	877,0973891
180,1935577	13,61780834	65,93158722	6,808904171	1635,894223
150,491333	14,100667	60,32682037	7,0503335	1414,685449
128,7096863	11,60074902	40,10653687	5,800374508	995,4191776
203,9553528	15,42273808	63,79230499	7,711369038	2097,033323
127,7196121	11,48002338	45,60106277	5,740011692	977,4827558
106,9280472	10,36372948	40,31453705	5,181864738	738,7822363
168,3126678	14,54579163	49,60752487	7,272895813	1632,160663
86,13648224	10,36934662	33,25514221	5,184673309	595,4526939
<b><math>\Sigma = 5881,04</math></b>	<b><math>\Sigma = 544,54</math></b>	<b><math>\Sigma = 2096,95</math></b>	<b><math>\Sigma = 272,27</math></b>	<b><math>\Sigma = 51895,94</math></b>
<b>Média = 136,77</b>	<b>Média = 12,66</b>	<b>Média = 48,77</b>	<b>Média = 6,33</b>	<b>Média = 1206,88</b>



**Tabela A.8** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>2000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
10	10	9	5	3	3	2	1	1
10	10	7	4	1	1	1	0	0
11	11	7	4	4	4	3	3	2
13	13	12	10	6	4	3	2	2
14	14	12	8	4	3	1	1	0
20	20	20	12	10	6	5	4	3
13	13	10	7	3	2	2	0	0
14	14	13	9	7	4	3	1	1
11	11	11	6	5	2	1	0	0
14	14	12	9	6	2	1	1	1
14	14	14	9	6	4	3	1	1
14	14	13	9	8	3	2	2	2
13	13	13	9	4	4	4	3	2
17	17	15	13	4	3	2	2	1
13	13	12	9	6	3	2	0	0
25	25	24	16	8	7	7	4	3
16	16	13	9	5	5	1	0	0
7	7	7	5	3	0	0	0	0
13	13	13	10	5	3	1	0	0
11	11	9	9	4	3	2	1	0
<b><math>\Sigma = 273</math></b>	<b><math>\Sigma = 273</math></b>	<b><math>\Sigma = 246</math></b>	<b><math>\Sigma = 172</math></b>	<b><math>\Sigma = 102</math></b>	<b><math>\Sigma = 66</math></b>	<b><math>\Sigma = 46</math></b>	<b><math>\Sigma = 26</math></b>	<b><math>\Sigma = 19</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>90,11%</b>	<b>63,00%</b>	<b>37,36%</b>	<b>24,18%</b>	<b>16,85%</b>	<b>9,52%</b>	<b>6,96%</b>

**Tabela A.9** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 – 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}^2$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
403,9504089	21,32822609	92,21348572	10,66411304	5743,6971
458,4045105	22,75069237	94,1324234	11,37534618	6952,679999
245,5384827	17,06510544	78,40743256	8,532552719	2793,426731
285,141449	18,55335808	89,85600281	9,276679039	3526,887604
295,0422058	18,5343647	66,7328949	9,26718235	3645,61323
380,1885986	21,43095398	126,5930939	10,71547699	5431,869574
386,1290588	21,41909027	78,4977417	10,70954514	5513,688778
388,1092224	21,08956528	104,9534836	10,54478264	5456,703187
123,7593155	18,26565552	61,98849869	9,132827759	1507,030016
508,8983154	23,43726158	191,5307007	11,71863079	7951,455291
284,1513977	19,23285484	84,47455597	9,616427422	3643,361724
308,9032593	18,59182358	69,83298492	9,295911789	3828,716599
226,727066	17,48252678	70,53601837	8,74126339	2642,508002
269,3002625	17,09341621	80,8510437	8,546708107	3068,840982
257,4193726	17,40054321	74,01243591	8,700271606	2986,157944
448,5037537	22,55940628	99,99810791	11,27970314	6745,318931
416,8213806	23,83688927	124,9788818	11,91844463	6623,816729
251,4789276	18,90340042	85,79473877	9,451700211	3169,204577
290,0918274	19,04995537	99,02500153	9,524977684	3684,157576
189,1042328	19,21654129	79,86815643	9,608270645	2422,619532
280,1911011	17,92844391	71,96529388	8,964221954	3348,92696
339,5955505	19,98832703	66,06027222	9,994163513	4525,297947
364,3474121	20,71694183	70,4603653	10,35847092	5032,109429
232,667511	17,13607597	59,43112183	8,568037987	2658,00543
379,1985474	22,15182304	155,1877136	11,07591152	5599,959413
402,9603271	21,50254059	95,81362152	10,75127029	5776,447193
273,2605591	17,82203484	59,20105743	8,911017418	3246,706135
283,1613159	18,46415138	73,7646637	9,232075691	3485,555602
298,0124207	18,39324188	78,43414307	9,196620941	3654,276358
458,4045105	22,53334427	103,9188614	11,26667213	6886,257766
372,2680054	23,52692604	124,8106689	11,76346302	5838,88122
444,543457	22,84685135	78,28974152	11,42342567	6770,945521
371,2779541	20,6391449	83,2740097	10,31957245	5108,572995
358,4069824	21,14460564	80,35504913	10,57230282	5052,249534
131,6799164	20,47059631	114,6375275	10,23529816	1797,044274
398,0099487	22,26558113	91,81188965	11,13279057	5907,948536
283,1613159	18,44141769	63,22909927	9,220708847	3481,264068
367,3176575	20,40850639	79,05169678	10,2042532	4997,603174
282,1712341	18,049757	67,77347565	9,024878502	3395,414806
360,3871155	23,23221016	112,6229706	11,61610508	5581,726137
257,4193726	17,0915947	74,01524353	8,545797348	2933,138388
317,8139343	18,88121986	97,86168671	9,440609932	4000,476513

**Continuação da Tabela A.9**

255,4392242	17,34006882	76,68744659	8,670034409	2952,889151
362,3672791	20,17886353	85,94651794	10,08943176	4874,773247
372,2680054	20,50056267	84,97773743	10,25028133	5087,802382
247,518631	17,09653854	64,92676544	8,548269272	2821,14121
375,2382507	20,88981438	74,82704926	10,44490719	5225,771603
247,518631	18,73986053	68,68746185	9,369930267	3092,30975
483,1563721	22,60501099	106,7120667	11,30250549	7281,170066
289,1017456	18,44306183	88,57977295	9,221530914	3554,614246
234,6476593	17,29175949	69,31962585	8,645879745	2704,980593
223,7568359	17,88018417	110,131752	8,940092087	2667,208958
254,4491577	17,37846184	62,75850677	8,689230919	2947,956651
346,5260925	21,38465881	109,2568283	10,69232941	4940,228172
<b><math>\Sigma = 17365,91</math></b>	<b><math>\Sigma = 1070,61</math></b>	<b><math>\Sigma = 4759,06</math></b>	<b><math>\Sigma = 535,30</math></b>	<b><math>\Sigma = 34567,41</math></b>
<b>Média = 321,59</b>	<b>Média = 19,83</b>	<b>Média = 88,13</b>	<b>Média = 9,91</b>	<b>Média = 4343,84</b>

**Tabela A.10** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
	<b>2000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>
6	6	4	1	1	0	0	0	0
5	5	5	2	1	0	0	0	0
4	4	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
4	4	2	2	0	0	0	0	0
6	6	4	1	1	0	0	0	0
5	5	3	0	0	0	0	0	0
4	4	4	0	1	0	0	0	0
2	2	1	1	1	0	0	0	0
3	3	2	0	0	0	0	0	0
5	5	5	1	1	0	0	0	0
3	3	3	2	0	0	0	0	0
4	4	1	0	0	0	0	0	0
6	6	5	1	0	0	0	0	0
6	6	5	1	1	0	0	0	0
3	3	1	0	1	0	0	0	0
4	4	3	1	0	0	0	0	0
3	3	2	2	0	0	0	0	0
5	5	3	0	0	0	0	0	0
3	3	2	2	1	1	0	0	0
4	4	3	1	1	1	0	0	0

**Continuação da Tabela A. 10**

5	5	3	2	1	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0
8	8	5	0	0	0	0	0	0
7	7	5	2	1	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
6	6	6	2	0	0	0	0	0
4	4	3	0	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 121</math></b>	<b><math>\Sigma = 121</math></b>	<b><math>\Sigma = 84</math></b>	<b><math>\Sigma = 24</math></b>	<b><math>\Sigma = 12</math></b>	<b><math>\Sigma = 2</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>69,42%</b>	<b>19,83%</b>	<b>9,92%</b>	<b>1,65%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>

**Tabela A.11 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).**

<b>Área (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Perímetro (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>Raio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Volume (<math>\mu\text{m}^3</math>)</b>
720,774231	30,12002754	113,0931702	15,06001377	14473,15979
690,0819092	28,69737625	122,0013657	14,34868813	13202,36013
691,0720215	28,16905594	101,9474335	14,08452797	12977,89762
610,8759766	26,63742828	94,90910339	13,31871414	10848,11001
702,9528809	28,85962868	104,0127335	14,42981434	13524,63941
488,1067505	24,11538124	84,7129364	12,05769062	7847,253583
740,5757446	29,15804482	101,7885971	14,57902241	14395,82717
782,1588745	30,56527519	122,8113861	15,2826376	15937,93416
577,2134399	27,89230728	110,2247238	13,94615364	10733,20976
699,982666	28,91403008	121,7414856	14,45701504	13492,8799
497,017395	24,04291916	104,3416214	12,02145958	7966,499366
554,4417114	25,43282318	99,01358032	12,71641159	9400,678674
588,104248	27,01783371	109,5666962	13,50891685	10592,86852
528,6997681	24,92277336	83,66098785	12,46138668	8784,442997
605,9255981	26,75704575	106,2226944	13,37852287	10808,5193
631,6675415	27,49389458	110,4889755	13,74694729	11578,00053
<b><math>\Sigma = 10109,65</math></b>	<b><math>\Sigma = 438,80</math></b>	<b><math>\Sigma = 1690,54</math></b>	<b><math>\Sigma = 219,40</math></b>	<b><math>\Sigma = 186564,28</math></b>
<b>Média = 631,85</b>	<b>Média = 27,42</b>	<b>Média = 105,66</b>	<b>Média = 13,71</b>	<b>Média = 11660,27</b>

**Tabela A.12** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>2000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
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
2	2	0	0	0	0	0	0	0
4	4	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	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	2	0	0	0	0	0	0
2	2	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	2	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	2	0	0	0	0	0	0
4	4	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
2	2	0	0	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 42</math></b>	<b><math>\Sigma = 42</math></b>	<b><math>\Sigma = 22</math></b>	<b><math>\Sigma = 3</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>52,38%</b>	<b>7,14%</b>	<b>2,38%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>

**Tabela A.13** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}^2$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
146,5310211	12,74898815	47,52456665	6,374494076	1245,414835
118,8089447	11,55710411	42,13746262	5,778552055	915,3915621
52,47394943	10,56536865	31,06868935	5,282684326	369,6044136
107,9181213	11,37607956	50,26986313	5,68803978	818,4567562
247,518631	16,69569397	76,4883728	8,347846985	2754,996876
103,9578247	11,50894165	41,94841003	5,754470825	797,6296924
127,7196121	11,72358131	42,95928574	5,861790657	998,2208387
108,9081955	12,67141914	51,35874939	6,335709572	920,0142622
258,4094543	16,70842934	89,40072632	8,354214668	2878,410739
70,29528809	10,1749382	28,43787003	5,087469101	476,8334748
115,8387146	10,41946983	41,2800827	5,209734917	804,6519949
231,6774292	15,62550735	82,55890656	7,812753677	2413,384916
199,0049744	16,10152245	67,13321686	8,050761223	2136,188708
116,8287964	12,11907673	48,12008667	6,059538364	943,904765
188,114151	15,71599865	71,48860168	7,857999325	1970,934495
118,8089447	11,72402477	51,71895599	5,862012386	928,6126739
116,8287964	11,06734753	36,56507874	5,533673763	861,9899271
173,2630463	14,10656929	60,48528671	7,053284645	1629,431445
94,0570755	10,16707802	36,44544983	5,083539009	637,5237499
176,2332611	15,49029827	60,4325676	7,745149136	1819,937187
117,8188705	11,52577305	53,90668106	5,762886524	905,3023751
169,3027496	13,86171627	48,9275856	6,930858135	1564,551119
169,3027496	14,62847519	59,64790726	7,314237595	1651,094048
221,7766876	16,19496155	59,18102646	8,097480774	2394,443285
132,6699829	12,11797428	50,18503189	6,058987141	1071,794294
210,8858643	15,77595234	74,81227875	7,88797617	2217,950229
192,0744629	13,63862991	66,60621643	6,819314957	1746,421677
103,9578247	10,67242622	46,66434097	5,336213112	739,6548097
166,3325195	15,02664661	54,57968521	7,513323307	1666,279994
89,10670471	10,05574322	45,81695557	5,027871609	597,3560944
179,2034912	14,00206947	64,93862152	7,001034737	1672,813156
76,23574066	10,12267494	34,21993256	5,061337471	514,4730811
99,00745392	10,34801579	40,04305267	5,174007893	683,020464
239,5980377	16,17529678	70,47981262	8,087648392	2583,712913
223,7568359	15,79977608	66,89352417	7,899888039	2356,871936
129,6997681	12,43695164	66,10721588	6,218475819	1075,379829
91,08685303	11,01543331	36,08914566	5,507716656	668,9074367
180,1935577	13,09724045	60,20345306	6,548620224	1573,358902
93,06700134	11,52664852	39,03645706	5,763324261	715,1670756
185,1439362	14,26208782	60,46510315	7,131043911	1760,359385
161,3821411	14,26946354	78,43502045	7,13473177	1535,224386
193,0645294	14,4795475	69,77745819	7,23977375	1863,658016

**Continuação da Tabela A.13**

221,7766876	15,88438034	84,98879242	7,94219017	2348,523505
150,491333	14,48939705	64,53624725	7,244698524	1453,685784
103,9578247	10,22073555	43,79442978	5,110367775	708,3502898
158,4119263	12,97911358	55,91112137	6,489556789	1370,697589
85,14640808	10,409729	36,82868195	5,204864502	590,9006892
216,8263245	16,42840385	66,44647217	8,214201927	2374,740283
151,4813995	16,96762657	59,44961929	8,483813286	1713,51988
149,5012512	13,08540821	43,87411118	6,542704105	1304,189933
134,6501312	12,12886238	41,97137833	6,06443119	1088,768607
199,9950562	15,42237568	51,50016403	7,71118784	2056,265927
118,8089447	11,32679653	38,23365784	5,663398266	897,1498285
165,3424377	14,53269482	58,01687622	7,266347408	1601,914125
244,5484009	16,68001938	61,25107193	8,340009689	2719,381377
110,8883438	10,68973255	37,57955551	5,344866276	790,2444923
119,7990189	13,69164085	48,26192093	6,845820427	1093,496761
92,07692719	10,2627449	36,49427414	5,131372452	629,9746768
202,965271	16,96557045	70,12186432	8,482785225	2295,614403
142,5707245	11,92575455	66,49299622	5,962877274	1133,508977
174,2531128	14,68357372	53,70861435	7,341786861	1705,772285
95,04714966	10,07627678	37,7726593	5,03813839	638,4809247
166,3325195	13,95287609	50,09256363	6,976438046	1547,211357
125,7394638	11,8422327	45,36290741	5,921116352	992,6906603
118,8089447	11,68949318	57,20137787	5,84474659	925,8775658
126,729538	11,81586456	47,05611801	5,907932281	998,2793711
124,7493896	11,61836624	38,34189606	5,809183121	966,2560649
224,7469177	16,10468292	55,960392	8,052341461	2412,985232
76,23574066	10,3210907	39,33341599	5,160545349	524,5573292
131,6799164	13,5775795	53,03422546	6,788789749	1191,929689
116,8287964	12,04661465	42,68451691	6,023307323	938,2609932
100,9876022	10,12234211	39,98777008	5,061171055	681,4873724
122,7692413	12,16409302	47,84013367	6,082046509	995,5843142
141,580658	13,21137905	47,12504578	6,605689526	1246,983826
120,789093	12,32259369	50,93664932	6,161296844	992,2899435
131,6799164	11,61137199	43,1883812	5,805685997	1019,322996
104,9478989	11,57390594	45,86140823	5,786952972	809,771407
124,7493896	12,00084591	41,82936478	6,000422955	998,0654683
98,01737976	10,67156792	39,88661957	5,335783958	697,3327501
78,21588898	10,32016087	34,28909683	5,160080433	538,1337043
135,640213	12,14935398	46,25722504	6,074676991	1098,627308
116,8287964	10,52929497	43,05253983	5,264647484	820,0832386
127,7196121	12,77154255	47,5254097	6,385771275	1087,450974
234,6476593	16,71460724	75,88552856	8,357303619	2614,695643
<b><math>\Sigma = 12349,2</math></b>	<b><math>\Sigma = 1101,67</math></b>	<b><math>\Sigma = 4452,82</math></b>	<b><math>\Sigma = 550,84</math></b>	<b><math>\Sigma = 112050</math></b>
<b>Média = 143,59</b>	<b>Média = 12,81</b>	<b>Média = 51,78</b>	<b>Média = 6,40</b>	<b>Média = 1302,91</b>

**Tabela A.14** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>10000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
25	25	25	25	20	20	16	13	8
18	18	18	18	18	15	10	6	5
18	18	18	18	17	16	12	7	4
18	18	18	18	17	13	8	5	4
23	23	23	23	23	21	8	4	3
25	25	25	24	23	20	17	12	11
23	23	23	23	22	20	12	11	9
20	20	20	20	14	14	11	10	8
22	22	22	22	18	17	15	7	1
29	29	29	28	24	19	13	10	6
24	24	24	24	23	20	10	6	4
25	25	25	25	20	19	15	10	3
22	22	22	22	19	14	11	10	6
21	21	21	21	17	14	9	5	4
15	15	15	15	13	13	9	7	6
18	18	18	15	13	9	9	4	4
19	19	19	16	14	14	8	6	6
15	15	15	15	14	11	7	7	7
10	10	10	9	6	6	4	2	1
12	12	12	12	12	11	6	2	2
19	19	19	19	13	11	9	7	5
14	14	14	13	11	11	8	6	4
22	22	22	22	13	11	7	7	4
14	14	14	14	11	11	8	5	4
12	12	12	12	11	8	5	4	2
19	19	19	19	15	15	7	5	5
15	15	15	15	15	13	12	10	8
15	15	15	15	12	11	9	8	7
15	15	15	15	14	10	4	0	0
17	17	17	17	13	12	11	6	3
14	14	14	13	11	7	5	1	1
16	16	16	12	11	6	4	1	1
17	17	17	17	16	12	9	4	2
15	15	15	13	11	11	7	2	2
11	11	11	11	9	6	6	5	3
12	12	12	12	8	6	3	2	1
11	11	11	11	7	5	2	0	0
8	8	8	8	8	1	1	1	1
<b><math>\Sigma = 668</math></b>	<b><math>\Sigma = 668</math></b>	<b><math>\Sigma = 668</math></b>	<b><math>\Sigma = 651</math></b>	<b><math>\Sigma = 556</math></b>	<b><math>\Sigma = 473</math></b>	<b><math>\Sigma = 327</math></b>	<b><math>\Sigma = 218</math></b>	<b><math>\Sigma = 155</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>97,46%</b>	<b>83,23%</b>	<b>70,81%</b>	<b>48,95%</b>	<b>32,63%</b>	<b>23,20%</b>



**Tabela A.15** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}^2$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
445,5335083	22,73836327	84,09460449	11,36918163	6753,801839
251,4789124	18,15727997	59,27704239	9,078639984	3044,115345
264,349884	17,22893333	71,53348541	8,614466667	3036,311019
292,071991	18,58059883	75,87568665	9,290299416	3617,914996
313,8536072	19,46896744	78,5574646	9,734483719	4073,603772
351,4764404	19,9974823	72,56137085	9,99874115	4685,762598
256,4292908	17,36535454	75,86707306	8,682677269	2968,657032
350,4863892	20,15515327	79,48065948	10,07757664	4709,404596
407,9107056	21,86788177	79,22304535	10,93394089	5946,762056
459,3945618	22,92694283	89,75952911	11,46347141	7021,675235
489,0968018	23,65034103	97,9653244	11,82517052	7711,53744
350,4863892	20,28106499	74,77492523	10,14053249	4738,824824
427,7121887	21,99184608	79,25146484	10,99592304	6270,787082
275,2407227	17,80282021	69,59473419	8,901410103	3266,707399
279,2010193	18,49230957	61,82289124	9,246154785	3442,047787
265,3399658	17,55596924	61,49085617	8,777984619	3105,533518
324,7444458	19,65180206	64,19249725	9,825901031	4254,54238
344,545929	19,579319	81,55278778	9,7896595	4497,316435
316,8238525	18,68792534	96,03491974	9,343962669	3947,187001
386,1290588	20,72966003	87,43722534	10,36483002	5336,216079
420,7816772	22,27642059	82,08228302	11,1382103	6249,006414
479,1960754	23,60477829	95,20684052	11,80238914	7540,878079
421,7717285	22,33192062	80,51644135	11,16596031	6279,315175
380,1885986	20,92965698	88,60025024	10,46482849	5304,811305
268,3101807	17,63519096	59,45399475	8,817595482	3154,467516
277,2208557	17,76507187	64,45908356	8,882535934	3283,232284
312,8635559	18,52889633	77,53754425	9,264448166	3864,677596
268,3101807	17,72870064	61,83398438	8,864350319	3171,193914
457,4144287	23,37677574	84,99095917	11,68838787	7128,583014
257,4193726	17,86625099	60,6365509	8,933125496	3066,079414
<b><math>\Sigma = 10395,78</math></b>	<b><math>\Sigma = 598,95</math></b>	<b><math>\Sigma = 2295,67</math></b>	<b><math>\Sigma = 299,48</math></b>	<b><math>\Sigma = 141470,95</math></b>
<b>Média = 346,53</b>	<b>Média = 19,97</b>	<b>Média = 76,52</b>	<b>Média = 9,98</b>	<b>Média = 4715,70</b>

**Tabela A.16** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 17 –24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>10000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
2	2	2	2	1	0	0	0	0
2	2	2	2	2	0	0	0	0
2	2	2	2	2	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0
3	3	3	2	2	1	0	0	0
3	3	3	3	1	1	0	0	0
4	4	4	3	2	1	0	0	0
2	2	2	1	1	1	0	0	0
6	6	6	3	3	1	1	1	1
3	3	3	2	2	1	0	0	0
2	2	2	2	2	1	1	1	1
4	4	4	2	1	1	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	1	1	0	0	0
2	2	2	1	1	0	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0	0
3	3	3	2	1	1	1	1	1
3	3	3	3	2	1	0	0	0
4	4	4	3	1	0	0	0	0
3	3	3	3	2	0	0	0	0
4	4	4	3	2	2	1	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	0
3	3	3	3	1	0	0	0	0
5	5	5	5	3	3	0	0	0
3	3	3	3	1	0	0	0	0
3	3	3	2	2	1	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
4	4	4	4	1	0	0	0	0
4	4	4	4	1	0	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0	0
5	5	5	5	4	2	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	5	5	5	3	0	0	0	0
3	3	3	3	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 125</math></b>	<b><math>\Sigma = 125</math></b>	<b><math>\Sigma = 123</math></b>	<b><math>\Sigma = 107</math></b>	<b><math>\Sigma = 63</math></b>	<b><math>\Sigma = 24</math></b>	<b><math>\Sigma = 6</math></b>	<b><math>\Sigma = 6</math></b>	<b><math>\Sigma = 5</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>98,4%</b>	<b>85,6%</b>	<b>50,4%</b>	<b>19,2%</b>	<b>4,8%</b>	<b>4,8%</b>	<b>4%</b>

**Tabela A.17** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}^2$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
510,878418	24,63323212	80,36286163	12,31661606	8389,724435
514,8387451	24,58421707	86,14126587	12,29210854	8437,938311
498,0074768	24,24370575	84,53251648	12,12185287	8049,031153
610,8759766	26,75055695	147,5502014	13,37527847	10894,18173
606,9156494	26,69594765	102,9527588	13,34797382	10801,45894
465,335022	25,63888168	115,55616	12,81944084	7953,779714
514,8387451	24,47892952	96,04776764	12,23946476	8401,800904
598,0050049	26,66075516	121,3423691	13,33037758	10628,84335
595,03479	26,4776516	93,57462311	13,2388258	10503,41591
793,0496826	30,76442337	116,4329147	15,38221169	16265,14413
<b><math>\Sigma = 5707,78</math></b>	<b><math>\Sigma = 260,93</math></b>	<b><math>\Sigma = 1044,49</math></b>	<b><math>\Sigma = 130,46</math></b>	<b><math>\Sigma = 100325,32</math></b>
<b>Média = 570,78</b>	<b>Média = 26,09</b>	<b>Média = 104,45</b>	<b>Média = 13,05</b>	<b>Média = 10032,53</b>

**Tabela A.18** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Concentrado Fosfático na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 3066 \text{ kg/m}^3$ ).

Press-on				Spin-off				
<b>10000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
2	2	2	2	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	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	0	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	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0
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
2	2	2	1	1	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 30</math></b>	<b><math>\Sigma = 30</math></b>	<b><math>\Sigma = 30</math></b>	<b><math>\Sigma = 22</math></b>	<b><math>\Sigma = 9</math></b>	<b><math>\Sigma = 2</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>73,33%</b>	<b>30,00%</b>	<b>67%</b>	<b>3,33%</b>	<b>3,33%</b>	<b>0%</b>

**ANEXO B**

**Tabela B.1** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
87,12654877	10,88515949	36,39680481	5,442579746	632,2575862
200,9851074	14,97471905	52,48735428	7,487359524	2006,463678
104,9478989	11,36296463	52,70069885	5,681482315	795,0128419
94,0570755	10,31098747	49,07300568	5,155493736	646,5475515
217,816391	15,62812519	62,70371628	7,814062595	2269,374551
157,4218445	14,65962887	57,54901505	7,329814434	1538,497211
195,0446777	14,76804161	58,5724411	7,384020805	1920,285278
184,1538544	14,98847866	68,39803314	7,49423933	1840,124078
94,0570755	10,23319149	32,97846985	5,116595745	641,6693764
141,580658	12,76903725	57,83806229	6,384518623	1205,232463
260,3895874	16,87209511	69,62378693	8,436047554	2928,878589
204,9454193	15,28992462	55,99017715	7,644962311	2089,066675
256,4292908	16,89069939	77,46305084	8,445349693	2887,513376
92,07692719	10,19530964	36,07870865	5,097654819	625,8351888
134,6501312	13,16039371	48,06894684	6,580196857	1181,365827
140,5905762	12,95661736	47,74521637	6,478308678	1214,385533
248,5086975	16,99888611	56,05872726	8,499443054	2816,247364
197,024826	15,08123016	55,52983475	7,540615082	1980,917833
168,3126678	14,06824589	60,24094772	7,034122944	1578,575998
133,6600647	13,62255859	45,58815002	6,811279297	1213,861375
120,789093	13,01910305	41,58577728	6,509551525	1048,3771
97,0273056	11,23553753	38,47735977	5,617768764	726,769289
168,3126678	14,61769581	58,17581177	7,308847904	1640,22892
214,8461761	15,55298138	52,07995605	7,776490688	2227,665718
210,8858643	15,45768642	56,02209091	7,728843212	2173,205041
138,6104279	12,51695633	44,19924927	6,258478165	1156,653782
117,8188705	11,3838625	39,18743515	5,691931248	894,1558811
159,4019928	12,82378578	50,89619064	6,411892891	1362,758006
102,9677505	10,51601028	35,13280487	5,258005142	721,8732825
139,6005096	13,21138859	46,75063324	6,605694294	1229,544387
254,4491577	16,79277039	67,78591156	8,396385193	2848,604187
157,4218445	13,02047729	44,68490982	6,510238647	1366,471701
92,07692719	10,35555553	37,2356987	5,177777767	635,6718219
96,03723145	10,80072498	34,14056396	5,400362492	691,5144833
208,9057159	15,3313694	55,40852356	7,6656847	2135,207134
235,6377411	16,81706238	70,21042633	8,408531189	2641,82306
141,580658	12,44068527	47,6847229	6,220342636	1174,240271
165,3424377	13,48048115	43,93909073	6,740240574	1485,93041
230,6873627	16,67658806	64,97711182	8,338294029	2564,718745
211,875946	15,70956135	53,21518326	7,854780674	2218,985448
240,5881042	16,96220398	62,89549255	8,48110199	2720,603
218,8064728	15,68064594	65,37104797	7,840322971	2287,35122
157,4218445	12,89091873	45,52933502	6,445459366	1352,874803

**Continuação da Tabela B.1**

97,0273056	10,62535858	34,57810974	5,312679291	687,2999428
267,3201294	16,81622505	72,50421906	8,408112526	2996,876971
94,0570755	10,24854565	34,21138382	5,124272823	642,6321544
153,4615479	12,58503151	45,79685974	6,292515755	1287,54561
172,2729645	13,84962654	54,28733063	6,924813271	1590,610814
182,1737061	13,99591255	50,38615799	6,997956276	1699,791506
83,16625977	10,35868645	36,50338745	5,179343224	574,3288053
210,8858643	15,06804752	60,33249664	7,534023762	2118,425483
108,9081955	10,19340897	36,18029404	5,096704483	740,0971843
102,9677505	10,86461163	37,64771652	5,432305813	745,8030798
117,8188705	11,10346222	38,0221138	5,55173111	872,1315852
94,0570755	10,31544018	34,6244812	5,157720089	646,8267571
103,9578247	10,53282928	36,11662292	5,266414642	729,9800136
199,0049744	15,62552834	78,13855743	7,812764168	2073,038577
181,1836395	14,49586391	48,99734497	7,247931957	1750,942255
188,114151	14,11316204	55,50954056	7,05658102	1769,923663
163,3622894	14,22652721	51,29396057	7,113263607	1549,385371
107,9181213	10,23591232	44,25792694	5,117956161	736,4269521
143,5608063	12,8250351	41,70059967	6,412517548	1227,448253
187,1240845	13,73125172	68,26342773	6,865625858	1712,965271
98,01737976	11,58126354	35,53639221	5,790631771	756,7767378
165,3424377	13,3148737	43,95824432	6,657436848	1467,675783
<b><math>\Sigma = 10416,57</math></b>	<b><math>\Sigma = 869,72</math></b>	<b><math>\Sigma = 3275,52</math></b>	<b><math>\Sigma = 434,86</math></b>	<b><math>\Sigma = 97694,27</math></b>
<b>Média = 160,25</b>	<b>Média = 13,38</b>	<b>Média = 50,39</b>	<b>Média = 6,69</b>	<b>Média = 1502,99</b>

**Tabela B.2** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>								
	<b>1000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
2	2	1	1	1	1	1	1	0	0
5	5	5	4	3	2	2	2	2	2
5	5	4	4	3	2	2	2	2	2
4	4	3	2	1	1	1	1	1	1
3	3	3	2	2	2	2	2	2	1
5	5	3	2	1	1	1	1	1	0
5	5	4	2	2	2	2	2	2	2
7	7	4	4	3	3	2	1	1	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
6	6	4	2	2	1	1	1	1	1
<b><math>\Sigma = 44</math></b>	<b><math>\Sigma = 44</math></b>	<b><math>\Sigma = 33</math></b>	<b><math>\Sigma = 23</math></b>	<b><math>\Sigma = 18</math></b>	<b><math>\Sigma = 15</math></b>	<b><math>\Sigma = 14</math></b>	<b><math>\Sigma = 12</math></b>	<b><math>\Sigma = 9</math></b>	
<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>75 %</b>	<b>52,27 %</b>	<b>40,91 %</b>	<b>34,09 %</b>	<b>31,82 %</b>	<b>27,27 %</b>	<b>20,45 %</b>	

**Tabela B.3** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
418,8015137	22,20333099	91,29654694	11,1016655	6199,192419
425,7320557	22,92646217	82,09028625	11,46323109	6507,019913
335,6352539	19,64092064	85,02209473	9,82046032	4394,790257
267,3201294	19,53021049	62,49352264	9,765105247	3480,545598
368,3077087	20,52622414	70,912117	10,26311207	5039,97772
269,3002625	17,799757	58,70700836	8,899878502	3195,652822
406,9206238	21,91549873	89,70869446	10,95774937	5945,24561
472,2655334	23,88583565	114,7179031	11,94291782	7520,304609
414,841217	21,57835388	86,77684021	10,78917694	5967,727057
294,052124	17,79761505	70,94910431	8,898807526	3488,951006
385,1389771	20,50154305	101,0791016	10,25077152	5263,962211
444,543457	22,98620033	80,29149628	11,49310017	6812,243307
275,2407227	18,40585136	79,27281952	9,202925682	3377,359887
311,8734741	19,40078926	65,23838043	9,70039463	4033,727698
487,1166687	23,70164299	86,28569031	11,8508215	7696,976917
285,141449	18,20435333	70,38339233	9,102176666	3460,543791
412,861084	23,08383369	104,6259232	11,54191685	6353,611068
453,4541321	23,25304031	82,71807861	11,62652016	7029,458142
313,8536072	19,61805344	105,326004	9,809026718	4104,797891
489,0968018	23,35882187	100,4480667	11,67941093	7616,483379
437,6129456	22,60018349	92,75973511	11,30009174	6593,421911
349,4963074	19,78448868	76,76779175	9,892244339	4609,737157
271,280426	18,12303162	64,09056854	9,061515808	3277,615825
320,7841492	19,31160164	65,35992432	9,655800819	4129,903801
430,6824036	22,4911747	89,67881775	11,24558735	6457,702119
356,4268188	20,25574303	71,73959351	10,12787151	4813,1267
445,5335388	23,82346725	111,6528168	11,91173363	7076,102449
456,4243469	23,4932785	87,51726532	11,74663925	7148,602865
398,0099487	21,36646461	79,41743469	10,68323231	5669,376991
330,6848755	19,4362011	87,46266174	9,718100548	4284,838493
342,5657959	20,61878204	69,25642395	10,30939102	4708,859654
373,2580872	20,94491005	73,81993103	10,47245502	5211,904707
325,7345276	18,78823662	90,84281158	9,394118309	4079,984919
416,8213806	23,64357185	103,1078644	11,82178593	6570,097508
321,774231	19,26826286	71,49153137	9,634131432	4133,353643
267,3201294	17,6110878	63,13962936	8,8055439	3138,532179
456,4243469	23,00382042	87,65763855	11,50191021	6999,669141
342,5657959	20,21657944	67,67906189	10,10828972	4617,00575
399,0000305	21,27258301	86,59256744	10,6362915	5658,507513
265,3399658	17,82720947	72,17480469	8,913604736	3153,514101
328,7047424	19,63439369	93,64740753	9,817196846	4302,612214
429,6923523	22,62803268	85,70719147	11,31401634	6482,061728
<b><math>\Sigma = 15597,63</math></b>	<b><math>\Sigma = 876,46</math></b>	<b><math>\Sigma = 3479,91</math></b>	<b><math>\Sigma = 438,23</math></b>	<b><math>\Sigma = 220605,10</math></b>
<b>Média = 371,37</b>	<b>Média = 20,87</b>	<b>Média = 82,85</b>	<b>Média = 10,43</b>	<b>Média = 5252,50</b>

**Tabela B.4** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>1000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
2	2	1	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0
3	3	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	1	1	0	0	0	0
5	5	2	1	0	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0
7	7	3	1	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
5	5	2	1	0	0	0	0	0
4	4	2	1	1	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 41</math></b>	<b><math>\Sigma = 41</math></b>	<b><math>\Sigma = 18</math></b>	<b><math>\Sigma = 9</math></b>	<b><math>\Sigma = 2</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>43,90%</b>	<b>21,95%</b>	<b>4,88%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>



**Tabela B.5** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
594,0447388	26,46076965	97,2850647	13,23038483	10479,254
558,4020386	25,61276436	86,30806732	12,80638218	9534,813221
586,1240845	27,75359154	106,7656631	13,87679577	10844,69895
497,017395	24,08778	88,60671997	12,04389	7981,363778
596,0248413	27,33185005	119,1782074	13,66592503	10860,30773
613,8461914	26,88673019	107,5852509	13,4433651	11002,87795
574,2432251	25,59034157	114,1862335	12,79517078	9796,720182
648,4987793	28,73194313	118,7166672	14,36597157	12421,75336
697,0124512	28,48264694	116,6718292	14,24132347	13235,17304
559,3920898	24,79205704	95,46322632	12,39602852	9245,653732
651,4690552	27,72312737	97,79150391	13,86156368	12040,50639
541,5707397	25,42660332	90,18751526	12,71330166	9180,202912
711,8635864	30,09233856	122,1614227	15,04616928	14281,09337
596,0248413	27,08039093	120,0468292	13,54019547	10760,39047
650,4789429	27,38131523	111,2195969	13,69065762	11873,97932
624,7369995	27,40527916	137,5185242	13,70263958	11414,06125
636,6179199	27,33472252	103,6276779	13,66736126	11601,18279
651,4690552	27,98325157	103,6295776	13,99162579	12153,48164
612,8561401	26,36101532	92,73239136	13,18050766	10770,34007
736,6154175	30,4136219	155,4414063	15,20681095	14935,42853
724,7345581	30,70974922	115,7956314	15,35487461	14837,61102
511,8685303	24,56001663	84,75369263	12,28000832	8380,999745
677,2109985	28,99980164	110,8396454	14,49990082	13092,65642
673,2506714	28,91350937	110,7431717	14,45675468	12977,35973
582,1638184	26,67002106	116,5705261	13,33501053	10350,88086
562,3623047	25,99787903	97,86541748	12,99893951	9746,818112
583,1538696	26,74317551	125,7288132	13,37158775	10396,92419
655,4293213	27,63772011	117,8007355	13,81886005	12076,38142
566,3226318	25,85385895	98,34391785	12,92692947	9761,083628
689,0918579	28,53979874	128,9474945	14,26989937	13111,02862
<b><math>\Sigma = 18563,90</math></b>	<b><math>\Sigma = 817,56</math></b>	<b><math>\Sigma = 3292,51</math></b>	<b><math>\Sigma = 408,78</math></b>	<b><math>\Sigma = 339145,03</math></b>
<b>Média = 618,80</b>	<b>Média = 27,25</b>	<b>Média = 109,75</b>	<b>Média = 13,63</b>	<b>Média = 11304,83</b>



**Continuação da Tabela B.7**

141,580658	13,07413292	55,6664772	6,53706646	1234,029561
181,1836395	14,85340595	57,39249039	7,426702976	1794,129433
116,8287964	11,43650627	40,81959915	5,718253136	890,742175
231,6774292	16,70723724	53,53630066	8,353618622	2580,459849
149,5012512	13,21944714	45,23377228	6,609723568	1317,549258
182,1737061	14,22463799	50,34438705	7,112318993	1727,570013
136,6302795	13,22524071	43,61148834	6,612620354	1204,645557
253,4590759	16,97167778	58,74372864	8,48583889	2867,750511
149,5012512	12,95580101	50,76638412	6,477900505	1291,272308
101,9776764	10,62291813	42,36101151	5,311459064	722,2003382
135,640213	12,70875263	53,32234573	6,354376316	1149,211943
75,2456665	10,13114071	28,64642143	5,065570354	508,2162901
175,2431946	14,5269165	48,54717636	7,263458252	1697,16217
96,03723145	10,50569439	37,3092804	5,252847195	672,6252024
224,7469177	16,42409134	55,62508774	8,21204567	2460,842603
231,6774292	15,74312973	57,20139694	7,871564865	2431,551882
217,816391	16,42266846	60,05275726	8,211334229	2384,750916
166,3325195	13,65782833	49,42428207	6,828914165	1514,493998
102,9677505	10,92199612	37,61346436	5,460998058	749,7422478
107,9181213	11,48885536	39,31887436	5,744427681	826,570458
142,5707245	12,4614048	45,27325821	6,2307024	1184,421007
146,5310211	12,42676449	55,37650681	6,213382244	1213,93766
95,04714966	10,65672398	32,68225479	5,328361988	675,2608258
134,6501312	12,42426777	42,74694061	6,212133884	1115,28619
152,4714813	13,79497147	47,13142776	6,897485733	1402,226489
215,8362427	15,90694714	62,99433136	7,953473568	2288,863802
180,1935577	15,04863262	53,58010483	7,524316311	1807,777767
179,2034912	15,06309223	57,89890671	7,531546116	1799,572478
121,7791672	11,70790482	38,89521027	5,853952408	950,5192652
123,7593155	11,88796425	49,08779144	5,943982124	980,8308787
104,9478989	10,83654976	37,13063431	5,418274879	758,1820854
191,0843811	14,97868919	57,53870773	7,489344597	1908,129036
145,5409546	13,59827995	48,72356796	6,799139977	1319,40443
163,3622894	13,25022984	53,71371078	6,625114918	1443,058588
177,2233429	14,86525822	56,30746841	7,432629108	1756,313836
<b><math>\Sigma = 691,89</math></b>	<b><math>\Sigma = 687,35</math></b>	<b><math>\Sigma = 2486,35</math></b>	<b><math>\Sigma = 343,67</math></b>	<b><math>\Sigma = 68056,19</math></b>
<b>Média = 142,44</b>	<b>Média = 12,73</b>	<b>Média = 46,04</b>	<b>Média = 6,36</b>	<b>Média = 1260,30</b>

**Tabela B.8** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 - 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
	<b>2000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>
8	8	6	2	1	1	0	0	0
4	4	3	3	2	1	1	0	0
6	6	4	3	0	0	0	0	0
4	4	3	1	1	1	1	1	1
11	11	9	3	2	1	0	0	0
10	10	7	6	3	1	0	0	0
11	11	7	5	2	0	0	0	0
9	9	8	7	4	3	2	2	2
7	7	6	5	5	4	3	2	2
5	5	4	2	0	0	0	0	0
6	6	4	3	2	1	1	0	0
<b><math>\Sigma = 81</math></b>	<b><math>\Sigma = 81</math></b>	<b><math>\Sigma = 61</math></b>	<b><math>\Sigma = 40</math></b>	<b><math>\Sigma = 22</math></b>	<b><math>\Sigma = 13</math></b>	<b><math>\Sigma = 8</math></b>	<b><math>\Sigma = 5</math></b>	<b><math>\Sigma = 5</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>75,31%</b>	<b>49,38%</b>	<b>27,16%</b>	<b>16,05%</b>	<b>9,88%</b>	<b>6,17%</b>	<b>6,17%</b>

**Tabela B.9** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Área (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Perímetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Raio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Volume (<math>\mu\text{m}^3</math>)</b>
288,1116943	18,22759247	68,6579361	9,113796234	3501,055033
288,1116943	18,96231651	81,25786591	9,481158257	3642,176759
305,9330139	19,8861618	63,95910263	9,943080902	4055,888944
381,1786804	21,92718315	113,2752686	10,96359158	5572,116493
471,2754822	23,47625542	96,70876312	11,73812771	7375,855728
232,667511	17,04366684	59,99062729	8,52183342	2643,671694
329,6948242	19,43342781	69,45310211	9,716713905	4271,400377
297,0223694	18,5912571	61,7623024	9,295628548	3681,346155
282,1712341	17,7046814	76,56035614	8,852340698	3330,5012
254,4491577	17,77402115	72,23931885	8,887010574	3015,056474
394,0496521	21,35711861	85,8432312	10,6785593	5610,510105
448,5037537	23,43016815	115,4094086	11,71508408	7005,67891
308,9032593	19,02593231	79,35079956	9,512966156	3918,115001
318,8039856	19,38645554	65,13332367	9,693227768	4120,319528
314,843689	18,7052784	86,97369385	9,352639198	3926,159236
252,4689941	17,25610542	59,70195007	8,628052711	2904,421053
304,9429626	18,27145576	80,52297974	9,135727882	3714,501235
339,5955505	20,2585125	72,70220184	10,12925625	4586,467136
438,6029968	22,63703537	92,49760437	11,31851768	6619,114368

Continuação da Tabela B.9

259,3995361	17,28264046	60,31214905	8,641320229	2988,739278
247,518631	17,76038361	60,48511124	8,880191803	2930,683891
367,3176575	21,06657219	79,17578125	10,53328609	5158,749298
304,9429626	18,74155617	69,97519684	9,370778084	3810,070442
373,2580872	20,82507706	83,54762268	10,41253853	5182,085618
262,369751	18,15306282	66,44605255	9,07653141	3175,209714
409,8908386	22,5336628	87,28173065	11,2668314	6157,561294
405,930542	21,58369255	89,79462433	10,79184628	5840,986677
333,6551208	19,25214958	94,61679077	9,626074791	4282,38553
253,4590759	17,01176453	65,50582886	8,505882263	2874,524078
315,8337708	18,67945862	84,31620026	9,339729309	3933,069234
407,9107056	21,50090218	84,66747284	10,75045109	5846,965451
323,754364	19,04576111	69,75836945	9,522880554	4110,765517
334,6451721	20,31077003	89,05879211	10,15538502	4531,267423
399,0000305	22,17484093	106,252388	11,08742046	5898,508138
484,1464233	23,89372253	89,32826996	11,94686127	7712,040203
452,4640503	23,04129219	83,54057312	11,5206461	6950,237592
485,1365051	23,30379868	99,07518005	11,65189934	7537,01563
<b><math>\Sigma = 12671,96</math></b>	<b><math>\Sigma = 739,52</math></b>	<b><math>\Sigma = 2965,14</math></b>	<b><math>\Sigma = 369,76</math></b>	<b><math>\Sigma = 172415,22</math></b>
<b>Média = 342,49</b>	<b>Média = 19,99</b>	<b>Média = 80,14</b>	<b>Média = 9,99</b>	<b>Média = 4659,87</b>

**Tabela B.10** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
	<b>2000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>
4	4	1	0	0	0	0	0	0
3	3	2	0	0	0	0	0	0
3	3	3	0	0	0	0	0	0
6	6	2	1	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
9	9	4	2	1	0	0	0	0
7	7	6	3	1	0	0	0	0
3	3	2	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	0	0	0	0	0
4	4	2	1	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 45</math></b>	<b><math>\Sigma = 45</math></b>	<b><math>\Sigma = 24</math></b>	<b><math>\Sigma = 9</math></b>	<b><math>\Sigma = 3</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>53,33%</b>	<b>20%</b>	<b>6,67%</b>	<b>2,22%</b>	<b>2,22%</b>	<b>2,22%</b>	<b>2,22%</b>

**Tabela B.11** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
644,5384521	28,19567108	135,1258087	14,09783554	12115,4628
611,8660278	27,21324539	136,5904999	13,6066227	11100,57357
548,5012817	25,70653534	97,32963562	12,85326767	9400,045055
765,3275757	29,96718788	126,4579315	14,98359394	15289,81017
704,9330444	29,31507301	128,4021606	14,65753651	13776,77578
750,4765015	29,93613434	128,2156677	14,96806717	14977,57691
653,4491577	27,60881996	98,82148743	13,80440998	12027,30677
662,3598633	28,02170753	101,232132	14,01085377	12373,63625
690,0819092	28,80425072	107,1014099	14,40212536	13251,52822
664,3400269	28,08310509	105,9914474	14,04155254	12437,82053
758,3970947	29,58397484	110,3858414	14,79198742	14957,60038
657,4094849	28,76924515	109,1518555	14,38462257	12608,78309
472,2655334	24,00979042	88,16860962	12,00489521	7559,330987
495,037262	24,06424904	100,8949356	12,03212452	7941,79997
593,0546265	26,44219398	113,5302124	13,22109699	10454,44365
732,6551514	30,45982933	112,6630325	15,22991467	14877,70058
535,6303101	25,1786499	102,919632	12,58932495	8990,965369
649,4888916	28,88464737	107,9458618	14,44232368	12506,8384
723,7444458	30,0927372	120,6740723	15,0463686	14519,63427
766,317688	30,52077866	110,6404495	15,26038933	15592,40836
604,9355469	27,01363182	108,5111618	13,50681591	10894,33743
631,6675415	27,45522881	113,1945724	13,7276144	11561,71792
540,5806885	25,09148026	102,162323	12,54574013	9042,646447
522,7593384	25,2482357	116,6678925	12,62411785	8799,167327
697,0124512	28,71151733	97,91815948	14,35575867	13341,52338
612,8561401	27,54597473	116,0363312	13,77298737	11254,47983
571,2730103	25,99183655	115,6286926	12,99591827	9898,956471
698,0025635	28,67707443	124,8991165	14,33853722	13344,44764
503,947937	24,25639343	88,08151245	12,12819672	8149,306286
<b><math>\Sigma = 18462,91</math></b>	<b><math>\Sigma = 800,85</math></b>	<b><math>\Sigma = 3225,34</math></b>	<b><math>\Sigma = 400,42</math></b>	<b><math>\Sigma = 343046,62</math></b>
<b>Média = 636,65</b>	<b>Média = 27,62</b>	<b>Média = 111,22</b>	<b>Média = 13,81</b>	<b>Média = 11829,19</b>

**Tabela B.12** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>								
	<b>2000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
2	1	0	0	0	0	0	0	0	
2	1	0	0	0	0	0	0	0	
3	3	1	0	0	0	0	0	0	
4	4	2	1	0	0	0	0	0	
3	3	2	1	0	0	0	0	0	
3	2	1	0	0	0	0	0	0	
3	2	1	0	0	0	0	0	0	
2	1	1	0	0	0	0	0	0	
3	2	1	0	0	0	0	0	0	
<b><math>\Sigma = 25</math></b>	<b><math>\Sigma = 19</math></b>	<b><math>\Sigma = 9</math></b>	<b><math>\Sigma = 2</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>
<b>100%</b>	<b>76%</b>	<b>36%</b>	<b>8%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>

**Tabela B.13** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Área (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Perímetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Raio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Volume (<math>\mu\text{m}^3</math>)</b>
70,29528809	10,09153461	30,20899773	5,045767307	472,9248886
219,7965393	16,32093811	58,25780487	8,160469055	2391,52381
219,7965393	15,62211418	52,39386368	7,811057091	2289,124423
241,578186	16,01040268	80,53875732	8,00520134	2578,509358
85,14640808	10,23740768	31,75564384	5,118703842	581,1189949
99,00745392	10,64999962	36,75163269	5,324999809	702,9528976
128,7096863	12,9717207	42,94571686	6,485860348	1113,057401
88,11663055	10,34089279	32,69209671	5,170446396	607,4697532
184,1538544	14,77501011	58,62698746	7,387505054	1813,916707
112,8684921	12,01871586	47,72565842	6,009357929	904,3562242
103,9578247	10,76781464	47,00125885	5,383907318	746,2657243
149,5012512	13,12166691	56,32847214	6,560833454	1307,803747
156,431778	13,43452549	47,73108673	6,717262745	1401,057806
201,9752045	15,21516991	53,0753479	7,607584953	2048,724702
162,3722229	13,6067934	53,39634323	6,803396702	1472,910194
97,0273056	10,83940697	39,67534256	5,419703484	701,1456349
92,07692719	10,76456451	33,93862152	5,382282257	660,778682
129,6997681	12,45944977	46,98400879	6,229724884	1077,325163
86,13648224	11,14365482	36,59635925	5,571827412	639,9168172
88,11663055	10,50691891	34,87704468	5,253459454	617,2228611
216,8263245	15,39295197	73,05000305	7,696475983	2225,064798

**Continuação da Tabela B.13**

143,5608063	12,39782524	47,48099136	6,198912621	1186,561192
95,04714966	10,01369572	42,2381134	5,006847858	634,5154903
211,875946	14,90193081	70,38272858	7,450965405	2104,907125
115,8387146	12,53149223	42,5922699	6,265746117	967,7546349
175,2431946	14,65557766	49,73630905	7,32778883	1712,193498
188,114151	15,4475832	51,49089432	7,723791599	1937,272666
103,9578247	11,35400105	43,26473999	5,677000523	786,8915003
86,13648224	10,10371113	37,07631302	5,051855564	580,1987561
123,7593155	11,23387718	44,44787216	5,616938591	926,8646336
221,7766876	15,79801369	65,78878021	7,899006844	2335,754098
76,23574066	10,10654545	30,69825935	5,053272724	513,6533185
178,2134094	15,36400318	66,04380798	7,682001591	1825,380926
152,4714813	13,12350082	51,96445084	6,561750412	1333,973074
133,6600647	13,02716637	47,39685059	6,513583183	1160,807933
122,7692413	11,66187191	45,40443039	5,830935955	954,4794446
164,3523712	14,28823471	62,18721008	7,144117355	1565,536837
164,3523712	14,15357018	49,64517975	7,076785088	1550,78188
150,491333	13,28997326	46,96315002	6,644986629	1333,350528
137,6203613	12,37197113	46,59740448	6,185985565	1135,090092
165,3424377	13,814291	49,48799133	6,9071455	1522,7257
85,14640808	10,16457844	41,08114624	5,082289219	576,9848958
198,0149078	15,05058002	57,99835587	7,525290012	1986,826144
115,8387146	11,43199062	37,39516449	5,715995312	882,8447328
165,3424377	13,2056551	61,46151733	6,602827549	1455,636804
137,6203613	12,47421265	45,93834686	6,237106323	1144,470434
199,0049744	15,51201916	52,66086578	7,756009579	2057,979317
148,5111847	13,0972414	46,99371719	6,548620701	1296,724558
104,9478989	10,75740051	47,27170181	5,378700256	752,6443874
135,640213	12,33898163	52,23011398	6,169490814	1115,774731
101,9776764	11,67639923	39,08588791	5,838199615	793,8213748
209,8957977	16,03391075	69,05230713	8,016955376	2243,633659
198,0149078	15,00891781	55,74539566	7,504458904	1981,326318
86,13648224	10,03887081	35,90859985	5,019435406	576,4753449
102,9677505	10,2643919	41,06330109	5,13219595	704,6008964
251,4789276	16,81128693	68,47024536	8,405643463	2818,456272
132,6699829	13,25204945	44,00110626	6,626024723	1172,099449
131,6799164	11,96797371	40,63962173	5,983986855	1050,627852
228,7072144	16,20106506	66,03729248	8,100532532	2470,200307
172,2729645	13,86709404	47,62975311	6,93354702	1592,616933
186,1340027	14,41122246	55,73568726	7,205611229	1788,279013
166,3325195	13,37760639	52,77366638	6,688803196	1483,420651
119,7990189	11,19837475	37,78791428	5,599187374	894,3695384
199,9950562	15,94003487	57,16464233	7,970017433	2125,285445
<b><math>\Sigma = 10373,01</math></b>	<b><math>\Sigma = 922,02</math></b>	<b><math>\Sigma = 3485,23</math></b>	<b><math>\Sigma = 461,01</math></b>	<b><math>\Sigma = 92870,97</math></b>
<b>Média = 144,07</b>	<b>Média = 12,81</b>	<b>Média = 48,41</b>	<b>Média = 6,40</b>	<b>Média = 1289,87</b>



**Tabela B.14** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 10 - 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>10000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
6	6	6	6	4	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	1	0
11	11	11	11	7	7	6	2	1
8	8	8	8	7	5	2	2	1
10	10	10	10	8	5	4	3	3
5	5	5	5	5	3	2	1	1
4	4	4	4	3	3	3	3	1
8	8	8	8	7	5	3	1	0
6	6	6	6	3	2	1	1	1
10	10	10	10	8	3	2	1	0
<b><math>\Sigma = 70</math></b>	<b><math>\Sigma = 70</math></b>	<b><math>\Sigma = 70</math></b>	<b><math>\Sigma = 70</math></b>	<b><math>\Sigma = 54</math></b>	<b><math>\Sigma = 37</math></b>	<b><math>\Sigma = 27</math></b>	<b><math>\Sigma = 17</math></b>	<b><math>\Sigma = 10</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>77,14%</b>	<b>52,86%</b>	<b>38,57%</b>	<b>24,29%</b>	<b>14,29%</b>

**Tabela B.15** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Área (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Perímetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Raio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Volume (<math>\mu\text{m}^3</math>)</b>
240,5881042	17,01408958	57,30938339	8,507044792	2728,925039
464,3449402	23,20077324	78,2232132	11,60038662	7182,107775
476,2258301	23,41012383	81,87266541	11,70506191	7432,337101
282,1712341	17,61848831	69,26473236	8,809244156	3314,28706
335,6352539	20,00979424	85,72399902	10,00489712	4477,328246
374,2481689	20,78149796	72,08815765	10,39074898	5184,958372
348,5062256	19,69748306	80,48619843	9,848741531	4576,46365
464,3449402	22,97721481	84,47490692	11,48860741	7112,902292
358,4069824	20,40768433	77,15285492	10,20384216	4876,171038
468,3052368	23,23175621	90,06324768	11,61587811	7253,035396
258,4094238	17,77622223	60,0848465	8,888111115	3062,362229
486,1265869	23,57564163	93,24320221	11,78782082	7640,497467
356,4268188	19,8462925	80,00393677	9,923146248	4715,833933
313,8536072	18,99619865	79,16901398	9,498099327	3974,683647
356,4268188	20,21804428	97,1954422	10,10902214	4804,168804
278,2109375	17,24222946	70,37444305	8,621114731	3197,984549
278,2109375	18,09075928	66,65177155	9,045379639	3355,364732
318,8039856	19,57801437	68,47521973	9,789007187	4161,032675
310,8833923	18,9079361	77,06869507	9,453968048	3918,775544
354,4466858	20,10309219	106,2698593	10,0515461	4750,316268
295,0422058	18,6473217	76,23812866	9,323660851	3667,831285

**Continuação da Tabela B. 15**

313,8536072	19,472332	76,56021881	9,736166	4074,307759
406,9206238	21,10959053	98,5136795	10,55479527	5726,618498
424,7419739	22,45549965	87,86334229	11,22774982	6358,52883
369,2977905	20,2587471	79,1040802	10,12937355	4987,673695
<b><math>\Sigma = 8934,43</math></b>	<b><math>\Sigma = 504,63</math></b>	<b><math>\Sigma = 1993,48</math></b>	<b><math>\Sigma = 252,31</math></b>	<b><math>\Sigma = 122534,50</math></b>
<b>Média = 357,38</b>	<b>Média = 20,19</b>	<b>Média = 79,74</b>	<b>Média = 10,09</b>	<b>Média = 4901,38</b>

**Tabela B.16 – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).**

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>								
	<b>1000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
7	7	7	6	2	1	1	1	1	1
2	2	1	1	0	0	0	0	0	0
4	4	4	3	3	1	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	2	1	1	0	0	0
3	3	3	1	1	0	0	0	0	0
6	6	6	4	2	1	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0	0
5	5	4	2	2	0	0	0	0	0
4	4	4	3	2	1	0	0	0	0
4	4	4	2	1	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 43</math></b>	<b><math>\Sigma = 43</math></b>	<b><math>\Sigma = 41</math></b>	<b><math>\Sigma = 28</math></b>	<b><math>\Sigma = 15</math></b>	<b><math>\Sigma = 5</math></b>	<b><math>\Sigma = 2</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>95,35%</b>	<b>65,12%</b>	<b>34,88%</b>	<b>11,63%</b>	<b>4,65%</b>	<b>2,33%</b>	<b>2,33%</b>	<b>2,33%</b>

**Tabela B.17 – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).**

<b>Área (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Perímetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Raio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Volume (<math>\mu\text{m}^3</math>)</b>
711,8635864	29,26563454	137,3642273	14,63281727	13888,75971
450,4839172	24,03817749	85,82293701	12,01908875	7219,208239
735,6253662	30,02329254	135,0355225	15,01164627	14723,93038
634,6377563	27,75858688	120,2271881	13,87929344	11744,43153
733,6452026	29,76031876	120,2340546	14,88015938	14555,67672
820,7717896	30,8768177	138,326416	15,43840885	16895,21395
602,9553833	27,19016647	125,0626144	13,59508324	10929,63817
524,739502	24,55607414	102,0848541	12,27803707	8590,36141
576,2233887	25,69129181	100,4212494	12,8456459	9869,28215

**Continuação da Tabela B. 17**

557,4119263	25,38546753	104,6065063	12,69273376	9433,44157
620,7767334	26,71988106	98,93049622	13,35994053	11058,05365
604,9355469	26,35917473	98,7556076	13,17958736	10630,40119
<b><math>\Sigma = 7574,07</math></b>	<b><math>\Sigma = 327,62</math></b>	<b><math>\Sigma = 1366,87</math></b>	<b><math>\Sigma = 163,81</math></b>	<b><math>\Sigma = 139538,40</math></b>
<b>Média = 631,17</b>	<b>Média = 27,30</b>	<b>Média = 113,91</b>	<b>Média = 13,65</b>	<b>Média = 11628,20</b>

**Tabela B.18** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Calcário Dolomítico na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 2838 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	2	2	1	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1	0	0	0	0
2	2	2	1	1	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	1	0	0	0	0	0
3	3	3	2	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	1	0	0	0	0
3	3	2	1	0	0	0	0	0
3	3	3	1	0	0	0	0	0
3	3	3	2	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 27</math></b>	<b><math>\Sigma = 27</math></b>	<b><math>\Sigma = 25</math></b>	<b><math>\Sigma = 18</math></b>	<b><math>\Sigma = 3</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>92,59%</b>	<b>66,67%</b>	<b>11,11%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>

**ANEXO C**

**Tabela C.1** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
134,6501	12,6376	38,6253	6,3188	1056,8083
100,9876	11,0063	36,9408	5,5032	698,1101
104,9479	10,3142	37,7031	5,1571	574,5252
203,9553	16,0307	56,9237	8,0153	2157,0279
225,7370	16,6515	66,2501	8,3258	2417,4702
183,1638	15,2015	49,9297	7,6008	1839,3274
177,2233	13,9869	45,4279	6,9934	1432,7147
248,5087	16,8815	64,0475	8,4408	2519,0420
199,9950	14,9884	57,7479	7,4942	1763,0623
245,5385	16,9812	56,0860	8,4906	2563,9430
177,2233	14,1948	45,5124	7,0974	1497,5813
132,6700	11,4877	43,8619	5,7439	793,7804
138,6104	11,9213	43,6771	5,9607	887,0972
149,5013	13,2230	48,0828	6,6115	1210,5626
93,0670	10,0010	37,4870	5,0005	523,7650
167,3226	12,8758	54,0966	6,4379	1117,6947
110,8883	11,7374	39,8496	5,8687	846,6777
189,1042	14,2898	51,4180	7,1449	1527,8419
239,5980	16,4687	58,2230	8,2343	2338,7078
119,7990	11,7692	42,1193	5,8846	853,5727
124,7494	12,5175	40,3449	6,2587	1026,9562
135,6402	12,4204	51,6053	6,2102	1003,2322
126,7295	12,0658	39,2001	6,0329	919,7498
226,7271	16,1229	55,6778	8,0614	2194,4572
196,0348	15,6596	51,1392	7,8298	2010,6743
207,9156	15,7581	62,1525	7,8791	2048,8707
189,1042	14,4480	53,6790	7,2240	1579,1486
182,1737	15,1472	48,9459	7,5736	1819,6746
96,0372	10,1394	33,3217	5,0697	545,7998
241,5782	16,7649	60,8045	8,3824	2467,1687
101,9777	10,4444	36,8270	5,2222	596,5566
107,9181	11,0996	35,3232	5,5498	716,0186
192,0745	15,3044	53,6237	7,6522	1876,9151
205,9355	15,2409	48,2743	7,6205	1853,6761
149,5013	13,7929	45,4307	6,8964	1373,9283
230,6874	15,3118	87,7182	7,6559	1879,6490
244,5484	16,6976	60,3364	8,3488	2437,6070
176,2333	13,9211	47,4619	6,9606	1412,6078
242,5683	16,6654	57,1333	8,3327	2423,5071
94,0571	10,9380	35,4127	5,4690	685,1996
<b><math>\Sigma = 6814,68</math></b>	<b><math>\Sigma = 553,11</math></b>	<b><math>\Sigma = 1978,42</math></b>	<b><math>\Sigma = 276,55</math></b>	<b><math>\Sigma = 59490,71</math></b>
<b>Média = 154,88</b>	<b>Média = 12,57</b>	<b>Média = 44,96</b>	<b>Média = 6,29</b>	<b>Média = 1352,06</b>

**Tabela C.2** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>1000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
9	9	9	9	8	8	8	8	7
11	11	11	11	11	11	11	10	10
18	18	18	17	17	17	17	16	16
6	6	6	6	6	6	6	6	5
14	14	14	14	14	14	12	9	9
9	9	9	8	7	7	5	3	3
10	10	10	10	9	8	8	8	8
7	7	7	7	7	6	5	5	4
7	7	7	7	6	5	5	4	4
9	9	9	9	9	9	7	7	6
10	10	10	10	10	10	9	8	7
10	10	10	9	9	9	9	8	8
9	9	9	9	9	9	9	7	7
4	4	3	3	3	2	2	2	2
7	7	7	7	7	6	5	5	5
11	11	11	11	10	10	9	9	8
10	10	10	10	10	9	9	8	8
9	9	9	9	9	9	9	7	7
11	11	11	11	10	10	10	10	9
7	7	7	7	7	7	7	6	6
<b><math>\Sigma = 188</math></b>	<b><math>\Sigma = 188</math></b>	<b><math>\Sigma = 187</math></b>	<b><math>\Sigma = 184</math></b>	<b><math>\Sigma = 178</math></b>	<b><math>\Sigma = 172</math></b>	<b><math>\Sigma = 162</math></b>	<b><math>\Sigma = 146</math></b>	<b><math>\Sigma = 139</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>99,47%</b>	<b>97,87%</b>	<b>94,68%</b>	<b>91,49%</b>	<b>86,17%</b>	<b>77,66%</b>	<b>73,94%</b>

**Tabela C.3** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
269,3003	17,6672	66,5222	8,8336	2887,3838
332,6650	19,7900	89,5436	9,8950	4058,2152
297,0223	18,3983	61,7613	9,1991	3260,8461
298,0124	18,2806	72,7788	9,1403	3198,7021
283,1613	18,0728	63,2180	9,0364	3090,8271
356,4268	20,3966	73,8900	10,1983	4442,9975
376,2283	20,2429	70,6290	10,1214	4343,2597
381,1787	21,1363	91,2530	10,5681	4944,0618
283,1613	17,8935	64,6460	8,9467	2999,7472
257,4194	18,0190	66,4170	9,0095	3063,3265
334,6452	19,6196	97,6553	9,8098	3954,3229
254,4491	18,2149	87,0018	9,1074	3164,3107
354,4467	20,2906	72,5589	10,1453	4374,0790
398,0099	21,5621	75,1846	10,7811	5248,9610
273,2606	18,0840	65,2312	9,0420	3096,5789
478,2060	23,4669	86,6846	11,7334	6766,5093
344,5459	20,2698	69,2516	10,1349	4360,6081
300,9827	18,8899	66,4398	9,4449	3529,2940
346,5261	20,3673	91,3403	10,1836	4423,8313
231,6774	17,2596	53,8682	8,6298	2692,0948
<b><math>\Sigma = 6451,33</math></b>	<b><math>\Sigma = 387,92</math></b>	<b><math>\Sigma = 1485,88</math></b>	<b><math>\Sigma = 193,96</math></b>	<b><math>\Sigma = 77899,96</math></b>
<b>Média = 322,57</b>	<b>Média = 19,40</b>	<b>Média = 74,29</b>	<b>Média = 9,70</b>	<b>Média = 3895,00</b>

**Tabela C.4** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Press-on	Spin-off							
	1000 rpm	3000 rpm	5000 rpm	7000 rpm	9000 rpm	11000 rpm	13000 rpm	14000 rpm
14	14	14	13	12	9	8	5	4
4	4	4	4	4	3	3	2	2
8	8	8	8	7	7	5	3	2
2	2	2	2	1	1	1	1	1
6	6	6	5	5	4	4	3	3
2	2	2	2	2	2	2	2	1
6	6	6	5	5	2	2	1	1
2	2	2	2	2	2	1	0	0
4	3	3	3	1	0	0	0	0
4	4	3	3	2	1	0	0	0

**Continuação da Tabela C.4**

4	4	4	3	2	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	1	1	1
4	4	4	3	2	2	2	2	2
7	7	7	7	7	6	4	3	3
5	5	5	4	4	3	3	3	3
5	5	5	4	4	3	3	3	2
4	4	4	3	3	3	3	2	2
2	2	2	2	1	0	0	0	0
7	7	7	7	6	4	2	2	1
4	4	4	2	2	2	2	1	1
$\Sigma = 96$	$\Sigma = 95$	$\Sigma = 94$	$\Sigma = 84$	$\Sigma = 74$	$\Sigma = 57$	$\Sigma = 47$	$\Sigma = 35$	$\Sigma = 30$
100%	98,96%	97,92%	87,5%	77,08%	59,37%	48,96%	36,46%	31,25%

**Tabela C.5** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
700,9728	28,6800	116,3625	14,3400	12351,9502
696,0224	28,2251	108,1785	14,1126	11773,5541
576,2234	25,3454	94,8063	12,6727	8525,0490
561,3723	25,6787	91,9596	12,8394	8865,8397
493,0571	24,2056	99,7136	12,1028	7425,8717
534,6403	24,8802	89,0471	12,4401	8064,1800
501,9678	24,6946	89,1856	12,3473	7885,0760
695,0323	28,9070	102,3806	14,4535	12647,5989
483,1564	24,0653	86,5343	12,0326	7297,4756
711,8636	28,4773	100,9472	14,2386	12091,9116
$\Sigma = 5954,31$	$\Sigma = 263,16$	$\Sigma = 979,12$	$\Sigma = 131,58$	$\Sigma = 96928,51$
<b>Média = 595,43</b>	<b>Média = 26,32</b>	<b>Média = 97,91</b>	<b>Média = 13,16</b>	<b>Média = 9692,85</b>



**Tabela C.6** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>1000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
2	2	1	1	1	0	0	0	0
2	2	2	1	1	1	1	1	0
5	5	5	5	4	2	1	1	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0	0	0
5	5	3	2	1	0	0	0	0
3	3	3	3	1	0	0	0	0
3	3	3	2	2	0	0	0	0
2	2	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
2	2	2	2	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	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	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	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 39</math></b>	<b><math>\Sigma = 39</math></b>	<b><math>\Sigma = 31</math></b>	<b><math>\Sigma = 23</math></b>	<b><math>\Sigma = 14</math></b>	<b><math>\Sigma = 6</math></b>	<b><math>\Sigma = 3</math></b>	<b><math>\Sigma = 3</math></b>	<b><math>\Sigma = 2</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>79,49%</b>	<b>58,97%</b>	<b>35,9%</b>	<b>15,38%</b>	<b>7,69%</b>	<b>7,69%</b>	<b>5,13%</b>

**Tabela C.7** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
101,9776764	10,88314819	35,96281433	5,441574097	674,9370463
99,99752808	10,03783607	37,29504776	5,018918037	529,5658061
162,3722229	14,30812168	51,10005951	7,154060841	1533,725056
208,9057159	15,1610899	60,74194336	7,580544949	1824,697624
199,9950562	15,24226665	51,65284348	7,621133327	1854,164677
116,8287964	11,11355591	37,98419952	5,556777954	718,718384
163,3622894	13,76040936	44,53552246	6,880204678	1364,249173
224,7469177	16,68962479	71,72823334	8,344812393	2434,105272
204,9454193	15,0422287	53,93298721	7,521114349	1782,116946
176,2332611	14,38074207	65,64836121	7,190371037	1557,196895
145,5409546	12,8350687	44,20188522	6,417534351	1107,118814
211,875946	15,02133179	56,67335129	7,510665894	1774,70002
125,7394638	11,68542194	39,35166168	5,842710972	835,473798
116,8287964	10,94922161	40,78611755	5,474610806	687,304798
133,6600647	12,22010326	39,60354614	6,110051632	955,4858622
173,2630463	13,74176502	44,71356201	6,870882511	1358,711315
192,0744629	14,79885197	48,01636887	7,399425983	1697,00732
147,5211029	13,60126686	46,44810104	6,80063343	1317,460864
218,8064728	15,65460968	50,6998291	7,82730484	2008,752217
126,729538	11,67755985	40,28827667	5,838779926	833,7885821
168,3126678	13,81438923	47,07062149	6,907194614	1380,367428
176,2332611	14,44699955	59,60992813	7,223499775	1578,819987
116,8287964	11,11355591	37,98419952	5,556777955	718,7183843
163,3622894	13,76040936	44,53552246	6,88020468	1364,249175
224,7469177	16,68962479	71,72823334	8,344812395	2434,105274
204,9454193	15,0422287	53,93298721	7,521114349	1782,116946
176,2332611	14,38074207	65,64836121	7,190371037	1557,196895
145,5409546	12,8350687	44,20188522	6,417534351	1107,118814
211,875946	15,02133179	56,67335129	7,510665894	1774,70002
125,7394638	11,68542194	39,35166168	5,842710972	835,473798
116,8287964	10,94922161	40,78611755	5,474610806	687,304798
133,6600647	12,22010326	39,60354614	6,11005163	955,4858613
173,2630463	13,74176502	44,71356201	6,87088251	1358,711314
192,0744629	14,79885197	48,01636887	7,399425985	1697,007321
147,5211029	13,60126686	46,44810104	6,80063343	1317,460863
218,8064728	15,65460968	50,6998291	7,82730484	2008,752217
126,729538	11,67755985	40,28827667	5,838779926	833,7885821
168,3126678	13,81438923	47,07062149	6,907194614	1380,367428
176,2332611	14,44699955	59,60992813	7,223499775	1578,819987

**Continuação da Tabela C.7**

156,431778	12,99763298	46,03591537	6,49881649	1149,720953
197,024826	14,74203014	51,03985596	7,371015072	1677,534739
100,9876022	10,59984875	34,9162178	5,299924374	623,5892826
157,4218445	13,49003601	46,31074905	6,745018005	1285,401981
229,6972809	15,74304199	78,24160767	7,871520996	2042,986983
233,6575928	16,34064484	57,75291443	8,170322418	2284,584416
221,7766876	16,95849419	59,60713959	8,479247093	2553,650737
172,2729645	13,39096928	49,44072342	6,695484638	1257,290629
158,4119263	13,69820499	42,57130051	6,849102497	1345,83129
187,1240845	14,64089966	55,90812302	7,320449829	1643,247312
140,5905762	12,49950218	47,01755905	6,249751091	1022,534072
171,2828979	14,24326801	47,15528488	7,121634007	1512,96394
206,9255676	15,34636307	52,96949387	7,673181534	1892,413527
231,6774292	16,27280426	53,22833633	8,13640213	2256,248026
219,7965393	15,75006771	57,11851501	7,875033855	2045,723403
104,9478989	10,58670425	36,56119537	5,293352127	621,272286
128,7096863	11,90571022	40,91357803	5,95285511	883,6200491
182,1737061	14,82744694	50,06694794	7,413723469	1706,863429
235,6377411	16,70036888	61,61541748	8,350184441	2438,80923
229,6972809	16,16314888	53,90861511	8,08157444	2210,943058
146,5310211	12,79411697	40,86993027	6,397058487	1096,555428
226,727066	16,53401375	54,35608292	8,267006874	2366,652646
114,8486404	11,51947308	42,81783295	5,759736538	800,3823075
183,1637878	14,63083553	49,77936935	7,315417767	1639,860946
219,7965393	16,52091789	53,61758423	8,260458946	2361,033538
199,0049744	14,82719326	52,30515671	7,41359663	1706,775824
156,431778	13,49579525	45,31317902	6,747897625	1287,048996
233,6575928	16,54517746	53,58274078	8,27258873	2371,449752
142,5707245	12,5471096	42,1485672	6,273554802	1034,262344
156,431778	13,33567619	44,84518433	6,667838097	1241,780292
141,580658	12,96873856	45,08650208	6,484369278	1142,070315
93,06700134	10,13603592	32,48311996	5,06801796	545,260529
232,667511	16,45950317	54,38091278	8,229751587	2334,800641
242,5682526	16,16814613	60,58446884	8,084073067	2212,994402
228,7072144	16,07731628	53,02765656	8,038658142	2175,906876
236,6278076	16,52093315	57,47309494	8,260466576	2361,04008
244,5484009	16,64892387	56,34553528	8,324461937	2416,340541
174,2531128	14,21418667	59,17990875	7,107093334	1503,715518
134,6501312	12,25627899	42,5724678	6,128139496	963,9967125
191,0843811	15,25603104	52,39250565	7,628015518	1859,192371
146,5310211	12,74345207	41,16491318	6,371726036	1083,579818

**Continuação da Tabela C.7**

218,8064728	15,92883205	58,81827545	7,964416027	2116,17431
159,4019928	13,50110531	60,61832428	6,750552654	1288,568802
89,10670471	10,11688995	31,59159279	5,058444977	542,1765327
<b><math>\Sigma = 14397,66</math></b>	<b><math>\Sigma = 1157,14</math></b>	<b><math>\Sigma = 4107,07</math></b>	<b><math>\Sigma = 578,57</math></b>	<b><math>\Sigma = 124106,69</math></b>
<b>Média = 173,47</b>	<b>Média = 13,94</b>	<b>Média = 49,48</b>	<b>Média = 6,97</b>	<b>Média = 1495,26</b>

**Tabela C.8** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 - 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
<b>2000 rpm</b>								
5	5	5	5	5	5	5	5	4
3	3	3	3	3	3	2	2	2
6	6	6	6	6	5	5	5	4
4	4	4	3	3	3	3	3	3
8	8	8	8	8	7	7	7	7
3	3	3	3	3	3	2	2	2
4	4	4	4	4	4	3	3	3
3	3	3	3	2	2	2	2	2
6	6	6	6	6	6	6	5	5
8	8	8	8	7	7	6	6	5
9	9	8	7	6	6	6	6	6
6	6	6	6	6	6	6	5	5
3	3	3	3	3	3	2	2	2
<b><math>\Sigma = 68</math></b>	<b><math>\Sigma = 68</math></b>	<b><math>\Sigma = 67</math></b>	<b><math>\Sigma = 65</math></b>	<b><math>\Sigma = 62</math></b>	<b><math>\Sigma = 60</math></b>	<b><math>\Sigma = 55</math></b>	<b><math>\Sigma = 53</math></b>	<b><math>\Sigma = 50</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>98,53%</b>	<b>97,01%</b>	<b>95,38%</b>	<b>96,77%</b>	<b>91,67%</b>	<b>96,36%</b>	<b>94,34%</b>

**Tabela C.9** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
234,6476593	17,08449936	57,73076248	8,54224968	2610,997214
282,1712341	18,60239029	66,15357971	9,301195145	3370,589733
351,4764404	20,14999008	82,63476563	10,07499504	4283,750302
301,9727173	19,48552895	65,81064606	9,742764473	3873,79145
277,2208557	19,49352837	69,72605133	9,746764183	3878,564347
437,6129456	23,10289383	82,37063599	11,55144691	6456,524224
424,7419739	22,42510033	76,63678741	11,21255016	5904,767772
477,2159119	23,90574646	90,97371674	11,95287323	7153,302078
379,1985474	21,2356739	84,88379669	10,61783695	5014,1553
452,4640503	23,20015526	100,092865	11,60007763	6538,412431
243,5583344	17,34871674	63,38116837	8,674358368	2734,020119
392,069519	21,57584381	70,0165863	10,78792191	5258,998011
327,7146606	19,44085884	62,65463257	9,72042942	3847,210758
311,8734741	19,15224075	74,15377808	9,576120377	3678,395436
<b><math>\Sigma = 4893,94</math></b>	<b><math>\Sigma = 286,20</math></b>	<b><math>\Sigma = 1047,22</math></b>	<b><math>\Sigma = 143,10</math></b>	<b><math>\Sigma = 64603,48</math></b>
<b>Média = 349,57</b>	<b>Média = 20,44</b>	Média = 74,80	<b>Média = 10,22</b>	<b>Média = 4614,53</b>

**Tabela C.10** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Pres s-on	Spin -off							
	1000 rpm	3000 rpm	5000 rpm	7000 rpm	9000 rpm	11000 rpm	13000 rpm	14000 rpm
2000 rpm	4	3	2	2	2	1	1	1
4	4	3	2	2	1	1	1	0
3	3	2	2	2	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1	1	1
4	4	4	3	3	1	1	1	1
2	2	2	1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	3	3	2	1
3	3	3	2	2	1	1	1	1
3	3	3	2	2	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1	0	0
2	2	2	1	1	1	1	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0	0
5	5	5	4	4	3	3	2	2
3	3	3	3	3	2	1	1	1
<b><math>\Sigma = 38</math></b>	<b><math>\Sigma = 38</math></b>	<b><math>\Sigma = 36</math></b>	<b><math>\Sigma = 27</math></b>	<b><math>\Sigma = 27</math></b>	<b><math>\Sigma = 18</math></b>	<b><math>\Sigma = 16</math></b>	<b><math>\Sigma = 12</math></b>	<b><math>\Sigma = 10</math></b>
<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>94,74 %</b>	<b>71,05 %</b>	<b>71,05 %</b>	<b>47,37 %</b>	<b>42,10 %</b>	<b>31,58 %</b>	<b>26,32 %</b>

**Tabela C.11** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
603,9454346	26,3907795	96,19985962	13,19538975	9624,015015
536,6203613	24,8019104	96,922966	12,4009552	7988,3124
679,1911011	27,86838913	103,8150558	13,93419456	11332,74811
516,8189087	24,78178596	88,91622162	12,39089298	7968,882864
746,5161743	29,76143837	140,109787	14,88071918	13802,61545
538,6005249	24,97375107	89,90734863	12,48687553	8155,507159
635,6278687	27,41228676	95,29123688	13,70614338	10785,37964
652,4591064	27,41970634	134,4207001	13,70985317	10794,13973
581,1737671	26,73355103	124,9319077	13,36677551	10003,90567
490,0868835	24,19257545	86,41423798	12,09628773	7413,8868
491,0769653	24,15831757	88,95845795	12,07915878	7382,436081
661,369751	27,69617844	107,9664383	13,84808922	11123,95398
605,9255981	26,61945152	94,68180084	13,30972576	9876,360787
662,3598633	27,92410851	114,942627	13,96205425	11400,85937
740,5757446	30,22419357	106,7277603	15,11209679	14456,52142
511,8685303	24,54174805	85,0819931	12,27087402	7739,557257
500,9776917	24,29430962	82,08117676	12,14715481	7507,810873
518,7990723	24,45329475	89,43888855	12,22664738	7656,173845
522,7593384	24,92122841	83,11904144	12,4606142	8104,159403
554,4417114	26,15697861	97,4052124	13,0784893	9370,491465
514,8387451	24,19070435	87,47080994	12,09535217	7412,166712
637,6079712	27,3829689	93,0329895	13,69148445	10750,81126
595,03479	26,34896469	89,49942017	13,17448235	9578,341221
500,9776917	24,24298477	84,52954865	12,12149239	7460,327689
597,0149536	27,01944923	105,0270691	13,50972462	10328,30642
<b><math>\Sigma = 14596,67</math></b>	<b><math>\Sigma = 654,51</math></b>	<b><math>\Sigma = 2466,89</math></b>	<b><math>\Sigma = 327,26</math></b>	<b><math>\Sigma = 238017,67</math></b>
<b>Média = 583,87</b>	<b>Média = 26,18</b>	<b>Média = 98,68</b>	<b>Média = 13,09</b>	<b>Média = 9520,71</b>

**Tabela C.12** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>2000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
2	2	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	2	0	0	0	0
1	1	1	0	0	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
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	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	2	1	1	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
<b><math>\Sigma = 22</math></b>	<b><math>\Sigma = 22</math></b>	<b><math>\Sigma = 20</math></b>	<b><math>\Sigma = 12</math></b>	<b><math>\Sigma = 7</math></b>	<b><math>\Sigma = 4</math></b>	<b><math>\Sigma = 3</math></b>	<b><math>\Sigma = 1</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>90,91%</b>	<b>54,55%</b>	<b>31,82%</b>	<b>18,18%</b>	<b>13,64%</b>	<b>4,55%</b>	<b>0%</b>

**Tabela C.13** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 – 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
152,4714813	14,50330257	46,40943146	7,251651287	1474,226685
192,0744629	14,47321987	49,46216965	7,236609936	1853,290622
212,8660278	15,21829891	60,44091034	7,609149456	2159,639227
221,7766876	16,07559776	52,67131805	8,037798882	2376,795216
138,6104279	12,12512589	47,5189743	6,062562943	1120,445924
138,6104279	12,68997574	40,82537842	6,344987869	1172,641978
100,9876022	10,0406599	35,06929016	5,020329952	675,9881124
141,580658	12,75452614	45,27042389	6,377263069	1203,862802
144,5508728	12,77281952	42,11182022	6,38640976	1230,881473
107,9181213	10,87124062	37,22845459	5,435620308	782,1359092
181,1836395	14,31692791	57,16056442	7,158463955	1729,328737
188,114151	14,93902206	66,02910614	7,469511032	1873,494302
222,7667694	16,52721405	58,97457504	8,263607025	2454,476054
105,937973	10,86869526	35,14786148	5,43434763	767,6050301
185,1439362	14,34043121	50,36690521	7,170215607	1770,029254
169,3027496	14,31185246	50,60774231	7,155926228	1615,357315
199,0049744	15,2728405	50,70571136	7,63642025	2026,247488
173,2630463	14,10865307	49,53973389	7,054326534	1629,67214
198,0149078	15,83862019	54,38141632	7,919310093	2090,855278
141,580658	13,37957001	44,21833801	6,689785004	1262,858883
191,0843811	14,99191666	49,44018173	7,495958328	1909,814077
129,6997681	11,99874496	43,39685822	5,999372482	1037,489626
213,8560944	15,07479572	66,76742554	7,537397861	2149,224624
152,4714813	13,94458866	49,47884369	6,972294331	1417,434726
173,2630463	15,09723186	49,0907135	7,548615932	1743,861589
167,3225861	14,81105614	49,06760406	7,405528069	1652,149477
141,580658	12,97909164	44,00850296	6,489545822	1225,05889
158,4119263	13,36320686	44,30364227	6,681603432	1411,260894
217,816391	16,09900856	57,45779037	8,04950428	2337,751962
214,8461761	16,95821762	54,21892548	8,47910881	2428,938807
184,1538544	15,26751709	53,40530777	7,633758545	1874,381413
149,5012512	13,01049709	45,79325867	6,505248547	1296,72373
121,7791672	11,73927212	40,14121628	5,869636059	953,0658545
186,1340027	15,31906796	60,73329926	7,659533978	1900,932957
147,5211029	12,60495567	42,82925034	6,302477837	1239,664642
199,9950562	14,89897251	57,90527344	7,449486256	1986,480563
206,9255676	16,43896103	52,96488953	8,219480515	2267,760895
141,580658	11,91892719	41,47592163	5,959463596	1124,993036
102,9677505	10,67918396	40,84664154	5,33959198	733,0743667



**Continuação da Tabela C.13**

154,4516296	13,27875042	44,03278732	6,63937521	1367,283095
165,3424377	13,617589	45,546978	6,808794498	1501,043574
147,5211029	13,02458668	43,2987175	6,512293339	1280,934261
195,0446777	14,20071888	84,38536072	7,10035944	1846,516425
119,7990189	12,92605019	41,05064774	6,463025093	1032,352087
107,9181213	10,33433247	46,68479156	5,167166233	743,50783
171,2828979	14,49584389	47,56700897	7,247921944	1655,260099
182,1737061	14,7806778	51,1730423	7,390338898	1795,100568
185,1439362	14,33805466	47,68298721	7,169027328	1769,735917
210,8858643	15,4958086	51,58648682	7,747904301	2178,56466
119,7990189	11,24085617	36,68637848	5,620428085	897,7623603
139,6005096	12,85821724	40,49687958	6,42910862	1196,675786
98,01737976	10,23563194	33,45120621	5,117815971	668,8465488
106,9280472	10,82591152	36,20663071	5,412955761	771,729052
167,3225861	13,62918091	49,32384109	6,814590454	1520,313197
138,6104279	12,8487978	55,76689529	6,424398899	1187,31824
120,789093	11,71618271	38,5811882	5,858091354	943,4580553
245,5384827	16,91238785	55,99431992	8,456193924	2768,428034
126,729538	11,85405445	40,92317581	5,927027225	1001,505896
150,491333	14,29484844	45,29887772	7,147424221	1434,167198
112,8684921	11,55871391	36,90853119	5,779356956	869,7430735
249,4987793	16,94765663	71,39738464	8,473828316	2818,946428
139,6005096	12,41734028	45,66318893	6,208670139	1155,644688
152,4714813	13,45294952	43,8075676	6,726474762	1367,460761
180,1935577	13,97612953	54,91078186	6,988064766	1678,939003
202,965271	14,92775917	53,78542709	7,463879585	2019,87779
98,01737976	10,01071358	33,72915649	5,005356789	654,1492763
173,2630463	14,5731163	46,74410248	7,286558151	1683,321683
103,9578247	10,67580032	40,26111984	5,337900162	739,8886524
139,6005096	12,78598499	41,46417618	6,392992496	1189,953348
<b><math>\Sigma = 11122,50</math></b>	<b><math>\Sigma = 936,86</math></b>	<b><math>\Sigma = 3321,88</math></b>	<b><math>\Sigma = 468,43</math></b>	<b><math>\Sigma = 103698,32</math></b>
<b>Média = 161,20</b>	<b>Média = 13,58</b>	<b>Média = 48,14</b>	<b>Média = 6,79</b>	<b>Média = 1502,87</b>

**Tabela C.14** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 10 - 17  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>10000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
4	4	4	4	4	4	3	2	1
4	4	4	3	3	3	3	3	2
7	7	7	6	6	5	5	4	3
6	6	6	5	5	4	4	3	2
5	5	5	5	4	4	3	3	3
6	6	6	5	5	5	4	4	4
5	5	5	4	4	3	2	2	1
7	7	7	7	6	6	5	4	2
6	6	6	6	5	5	4	3	2
9	9	9	8	7	7	6	5	4
3	3	3	3	3	2	1	1	1
3	3	3	3	2	2	2	1	0
3	3	3	3	3	2	2	2	1
4	4	4	4	3	3	2	2	2
7	7	7	7	6	6	5	5	4
<b><math>\Sigma = 79</math></b>	<b><math>\Sigma = 79</math></b>	<b><math>\Sigma = 79</math></b>	<b><math>\Sigma = 73</math></b>	<b><math>\Sigma = 66</math></b>	<b><math>\Sigma = 61</math></b>	<b><math>\Sigma = 51</math></b>	<b><math>\Sigma = 44</math></b>	<b><math>\Sigma = 32</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>92,41%</b>	<b>83,54%</b>	<b>77,22%</b>	<b>64,56%</b>	<b>55,70%</b>	<b>40,51%</b>

**Tabela C.15** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 17 - 24  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Área (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Perímetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Raio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Volume (<math>\mu\text{m}^3</math>)</b>
303,9528809	19,14690018	95,47130585	9,573450089	3879,836979
391,0794373	21,46327591	79,09358215	10,73163795	5595,897243
283,1613159	18,50061035	69,31871796	9,250305176	3492,438115
395,0397339	21,5648098	74,20768738	10,7824049	5679,304483
269,3002625	17,96810532	57,5519104	8,984052658	3225,876985
249,4987793	18,20802116	61,77649689	9,104010582	3028,586036
326,7245789	19,09291267	85,93268585	9,546456337	4158,749235
308,9032593	18,7533741	75,96098328	9,37668705	3861,985588
366,3275757	20,51538467	71,00495148	10,25769234	5010,234088
267,3201294	17,52137566	58,68875504	8,760687828	3122,544272
296,0322876	18,33636093	66,99935913	9,168180466	3618,769915
272,2704773	17,81694412	63,23656845	8,908472061	3234,018587
453,4541321	23,50476646	77,81118011	11,75238323	7105,555651
299,9925842	18,65859413	86,92935944	9,329297066	3731,626581



**Continuação da Tabela C.16**

5	5	5	5	4	4	4	3	3
2	2	2	2	2	2	1	1	0
8	8	8	8	7	7	5	4	4
1	1	1	1	1	1	0	0	0
<b><math>\Sigma = 42</math></b>	<b><math>\Sigma = 42</math></b>	<b><math>\Sigma = 42</math></b>	<b><math>\Sigma = 41</math></b>	<b><math>\Sigma = 35</math></b>	<b><math>\Sigma = 32</math></b>	<b><math>\Sigma = 27</math></b>	<b><math>\Sigma = 18</math></b>	<b><math>\Sigma = 16</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>97,62%</b>	<b>83,33%</b>	<b>76,19%</b>	<b>64,29%</b>	<b>42,86%</b>	<b>38,10%</b>

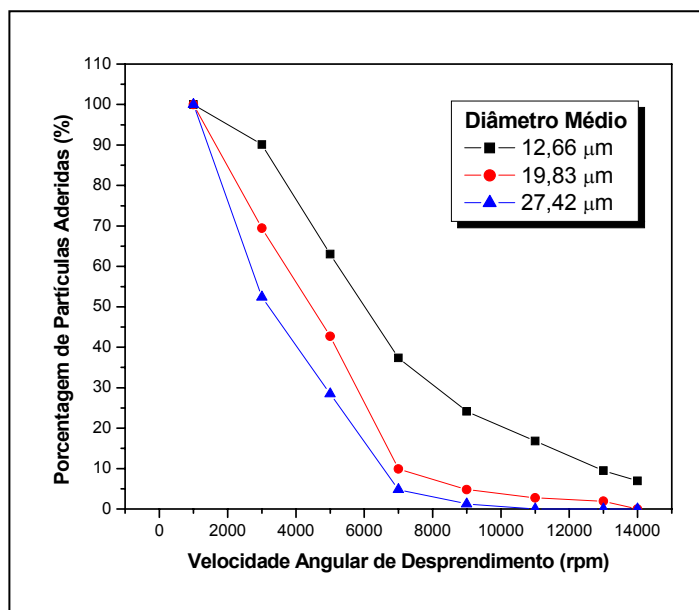
**Tabela C.17** – Resultados obtidos do Analisador de Imagens (Image-Pro Plus 3.0) para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

Área ( $\mu\text{m}^2$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	Perímetro ( $\mu\text{m}$ )	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Volume ( $\mu\text{m}^3$ )
522,7593384	24,95334435	92,81082153	12,47667217	8696,395853
521,7692871	25,08041573	94,51280975	12,54020786	8724,127089
610,8759766	26,92721939	114,486618	13,4636097	10966,12763
506,9181519	24,55363846	88,78713226	12,27681923	8297,790019
737,6055298	30,30092812	149,4866791	15,15046406	14900,08809
710,8734741	29,91682243	108,026268	14,95841122	14178,05033
546,5211182	24,54365158	91,21046448	12,27182579	8942,415937
474,245697	24,05592728	80,70918274	12,02796364	7605,613333
659,3896484	27,87677193	105,6135101	13,93838596	12254,43656
511,8685303	24,35076523	80,51725006	12,17538261	8309,593606
607,9057617	26,36602211	106,2126541	13,18301105	10685,37117
598,0050049	26,37065506	94,83641815	13,18532753	10513,18914
664,3400269	28,05191994	99,28826141	14,02595997	12424,00883
693,0521851	28,76849174	100,7127914	14,38424587	13292,04404
698,9926147	28,20275879	103,3138428	14,10137939	13142,34674
633,6477051	27,36994171	92,85166168	13,68497086	11561,93384
707,9032593	29,13123131	100,7872238	14,56561565	13748,06239
749,4863892	29,45548439	104,8877563	14,7277422	14717,65642
687,1116943	28,48948288	103,1304245	14,24474144	13050,30457
688,1018066	28,23636818	103,590683	14,11818409	12952,9973
586,1240845	25,72627258	102,4893723	12,86313629	10052,52531
750,4765015	30,78407288	112,4833679	15,39203644	15401,81554
518,7990723	24,65019608	86,43625641	12,32509804	8525,665903
<b><math>\Sigma = 14386,77</math></b>	<b><math>\Sigma = 624,16</math></b>	<b><math>\Sigma = 2317,18</math></b>	<b><math>\Sigma = 312,08</math></b>	<b><math>\Sigma = 262942,56</math></b>
<b>Média = 25,51</b>	<b>Média = 27,14</b>	<b>Média = 100,75</b>	<b>Média = 13,57</b>	<b>Média = 11432,29</b>

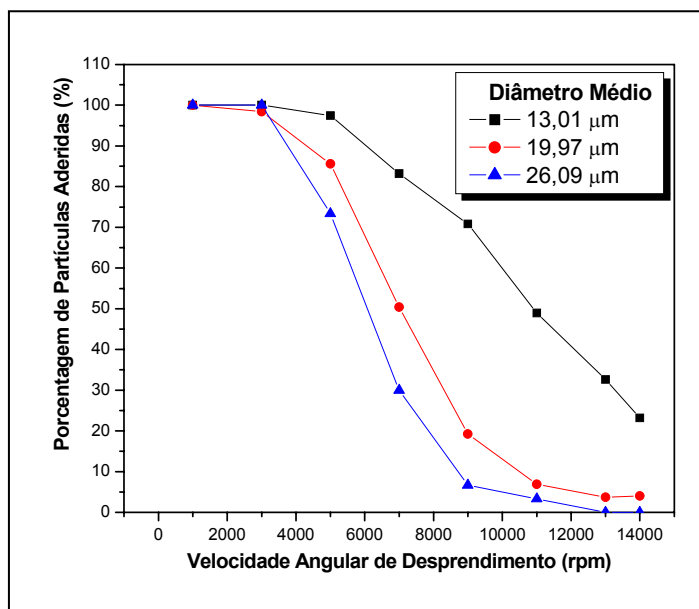
**Tabela C.18** – Resultados experimentais obtidos com a Centrífuga para o Polvilho Doce na faixa de diâmetro de 24 - 31  $\mu\text{m}$  ( $\rho = 1491 \text{ kg/m}^3$ ).

<b>Press-on</b>	<b>Spin-off</b>							
<b>10000 rpm</b>	<b>1000 rpm</b>	<b>3000 rpm</b>	<b>5000 rpm</b>	<b>7000 rpm</b>	<b>9000 rpm</b>	<b>11000 rpm</b>	<b>13000 rpm</b>	<b>14000 rpm</b>
1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	2	2	1	2	2	1	1	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	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	1	0	0
2	2	2	2	2	2	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	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
<b><math>\Sigma = 17</math></b>	<b><math>\Sigma = 17</math></b>	<b><math>\Sigma = 17</math></b>	<b><math>\Sigma = 16</math></b>	<b><math>\Sigma = 14</math></b>	<b><math>\Sigma = 12</math></b>	<b><math>\Sigma = 6</math></b>	<b><math>\Sigma = 3</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>
<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>94,12%</b>	<b>82,35%</b>	<b>70,59%</b>	<b>35,29%</b>	<b>17,65%</b>	<b>0%</b>

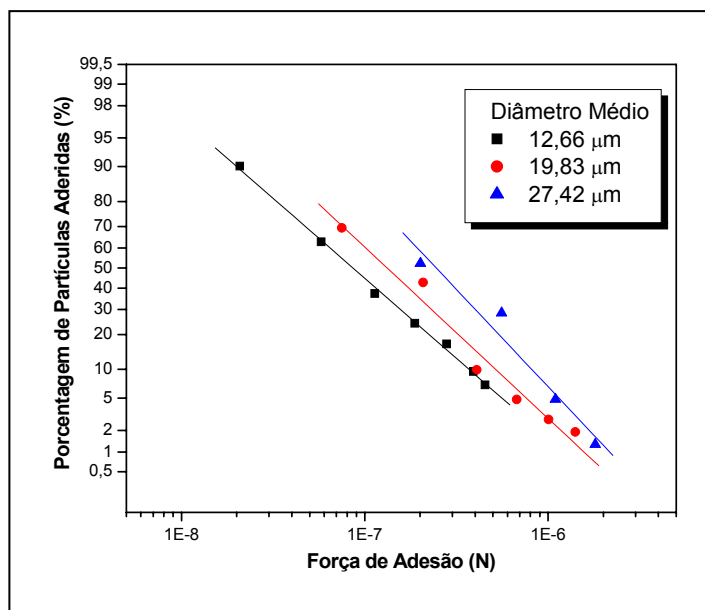
**ANEXO D**



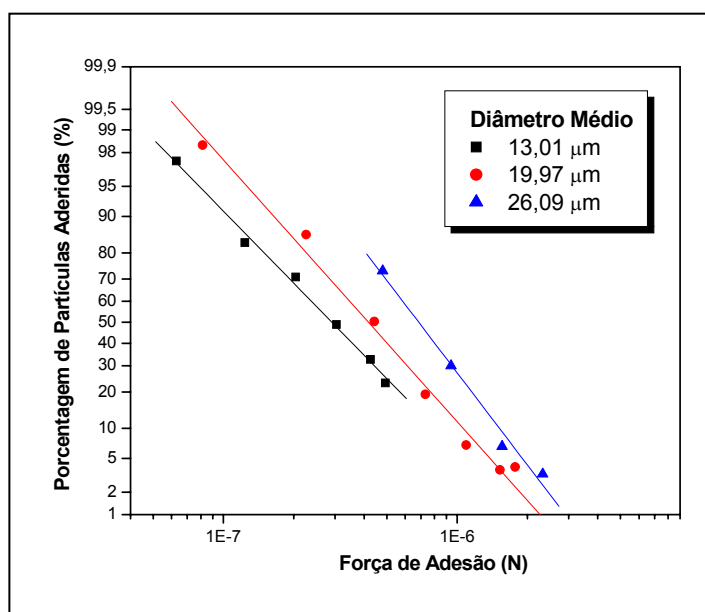
**Figura D.1** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.



**Figura D.2** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

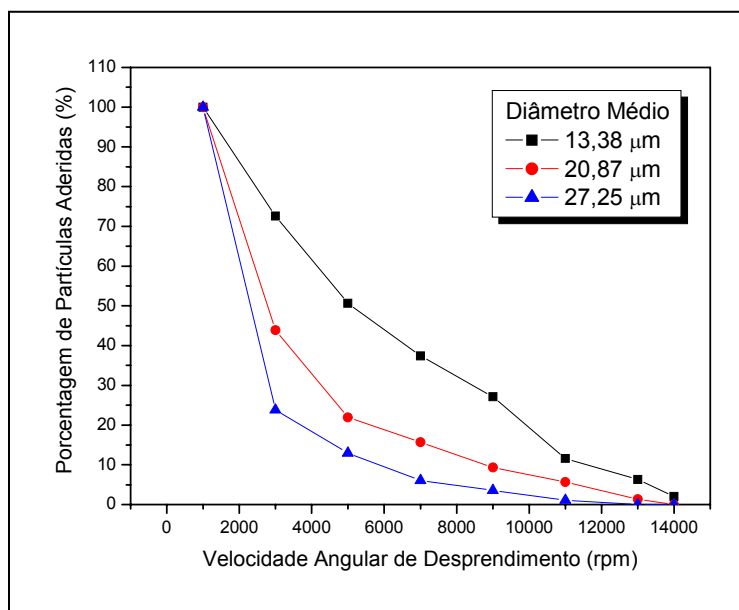


**Figura D.3** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.

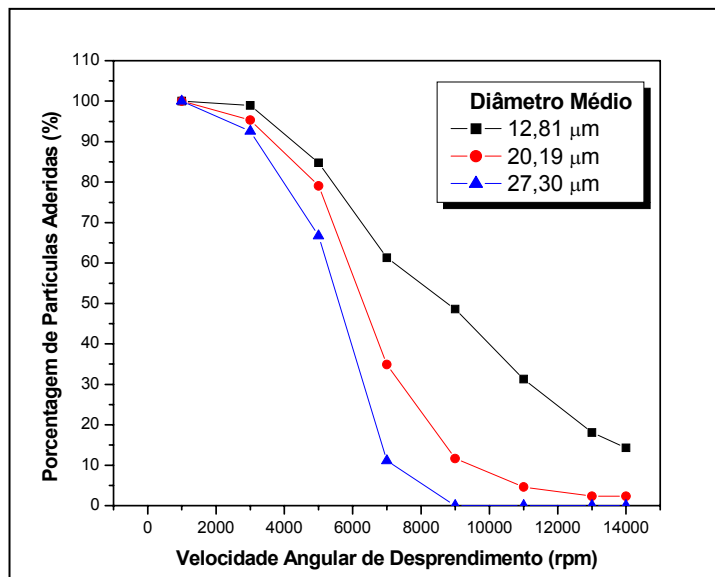


**Figura D.4** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o concentrado fosfático após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.

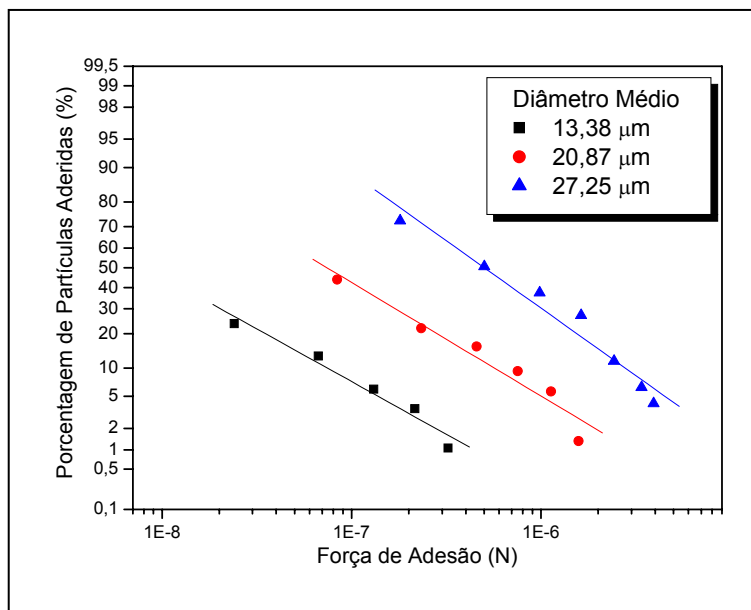




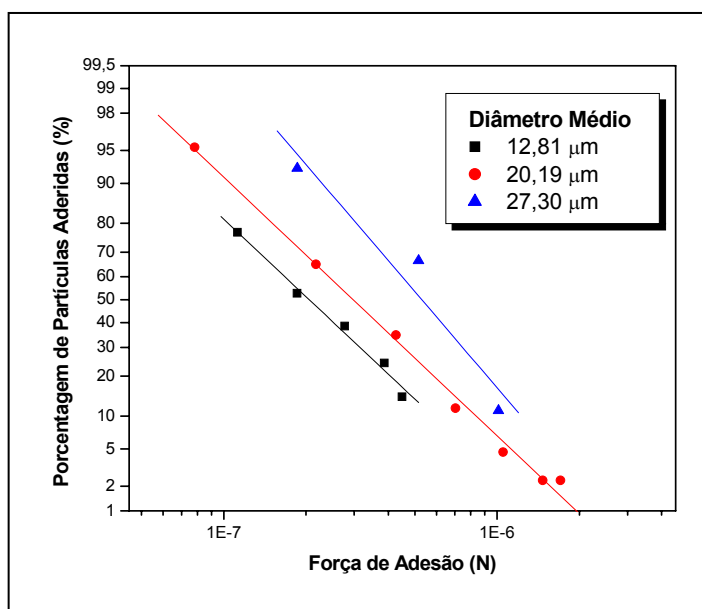
**Figura D.5** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.



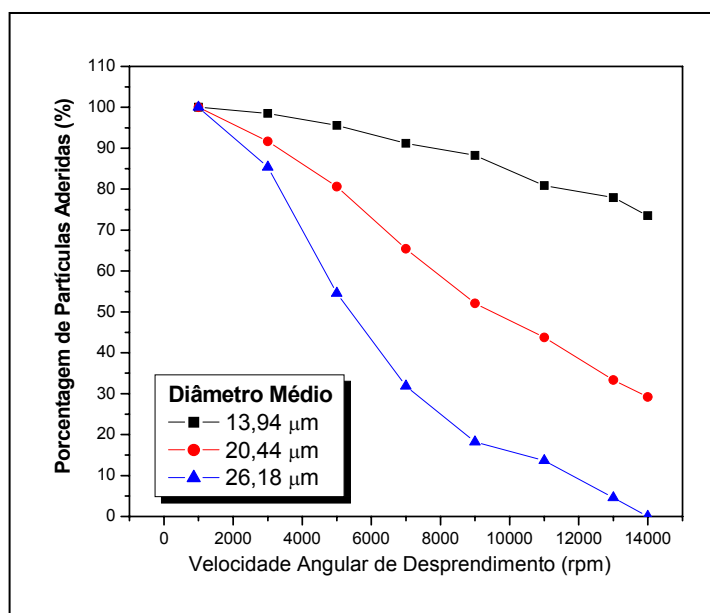
**Figura D.6** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.



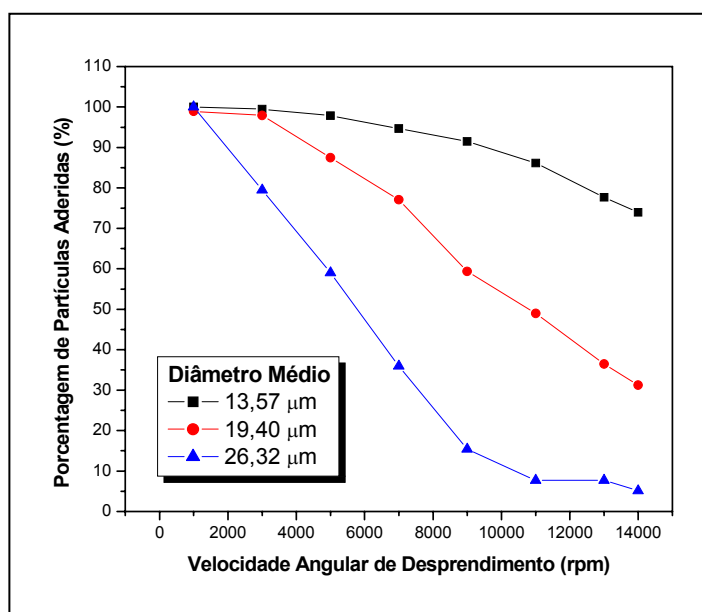
**Figura D.7** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.



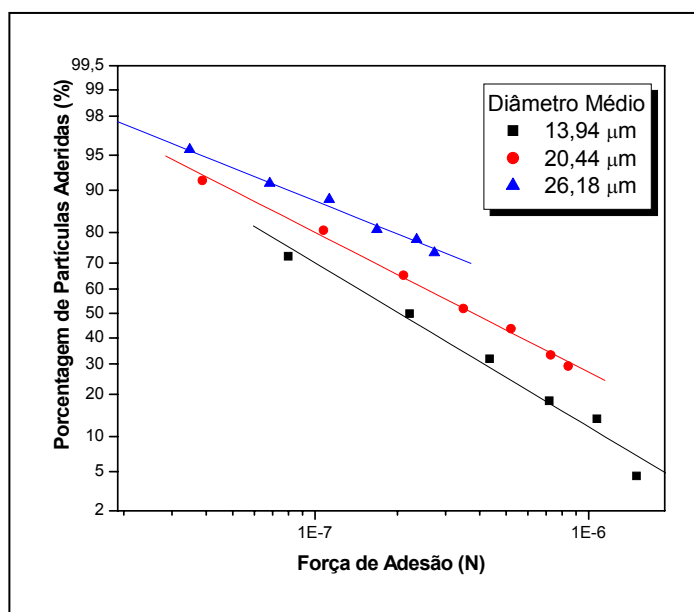
**Figura D.8** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o calcário dolomítico após a aplicação da força centrífuga de compressão de 10000 rpm.



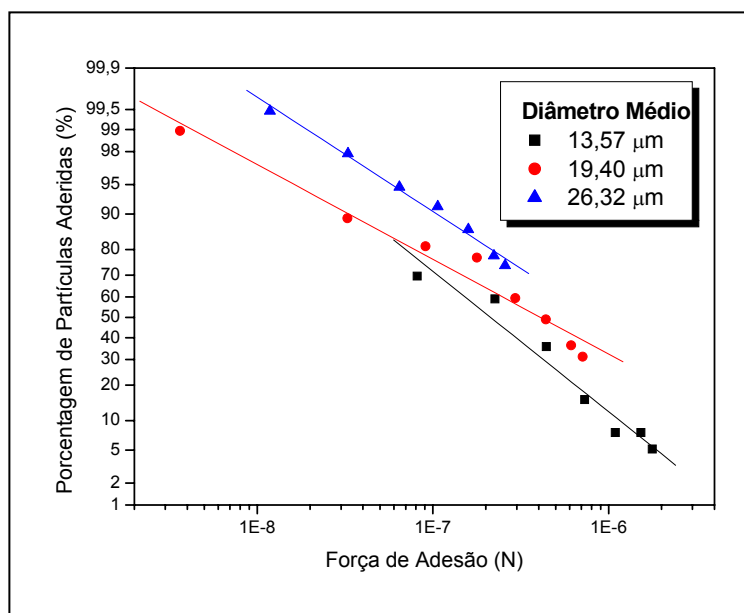
**Figura D.9** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.



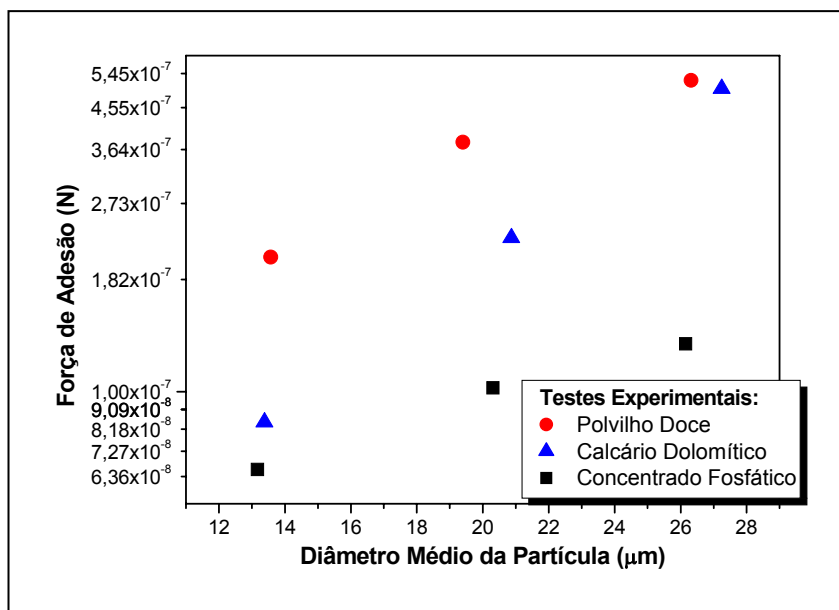
**Figura D.10** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da velocidade angular de desprendimento das partículas do polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.



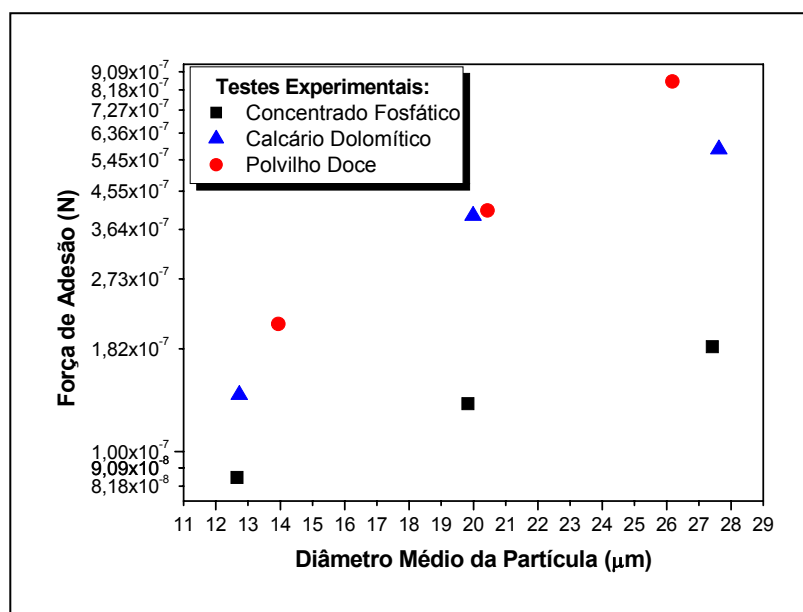
**Figura D.11** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 1000 rpm.



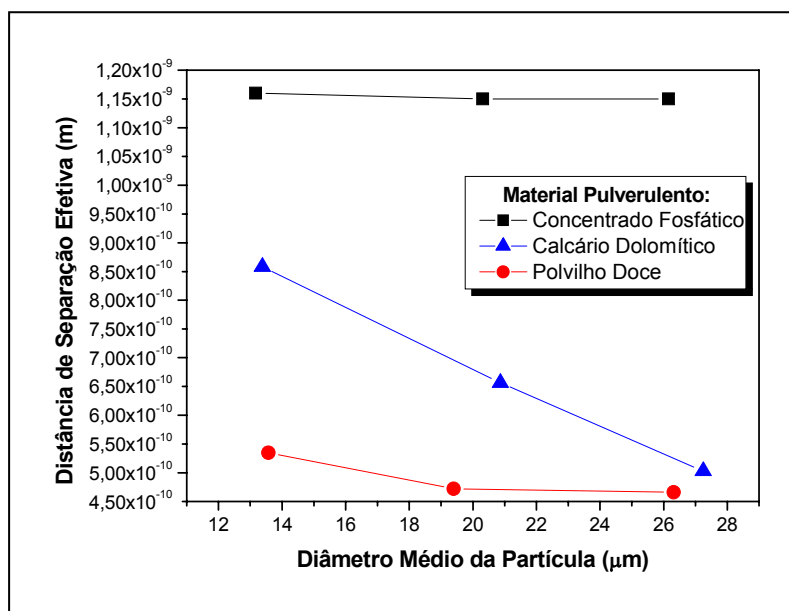
**Figura D.12** - Porcentagem de partículas aderidas na superfície dos discos em função da força de adesão para o polvilho doce após a aplicação da força centrífuga de compressão de 2000 rpm.



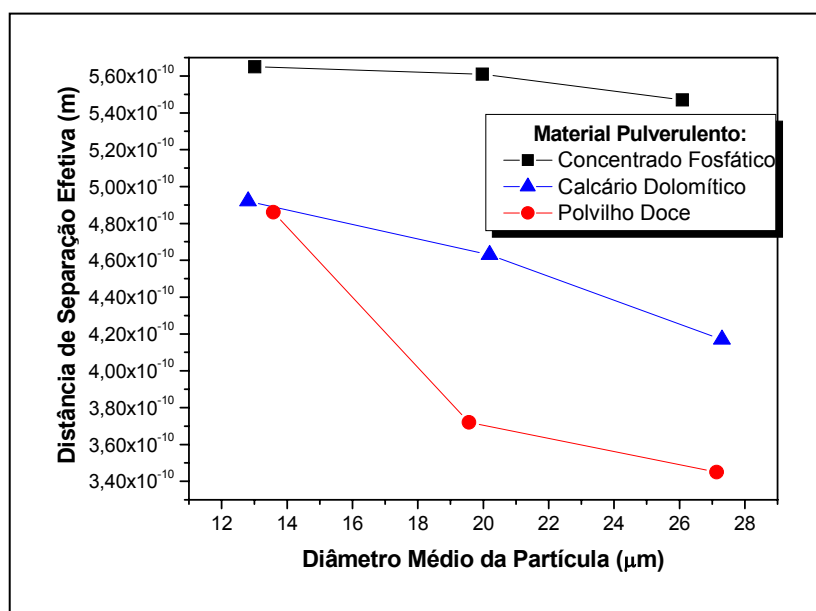
**Figura D.13** – Força de Adesão em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 1000 rpm.



**Figura D.14** – Força de Adesão em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 2000 rpm.



**Figura D.15** - Distância de Separação Efetiva em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 1000 rpm.



**Figura D.16** - Distância de Separação Efetiva em função do diâmetro médio da partícula para os três materiais pulverulentos após aplicada a força de compressão de 10000 rpm.