

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

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA FORÇA DE ADESÃO ENTRE
PARTÍCULAS E MEIOS FILTRANTES CONSTITUIDOS DE
CELULOSE**

PATRICIA BRÍGIDA FAUSTINO

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª MÔNICA LOPES AGUIAR

SÃO CARLOS

2010

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

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA FORÇA DE ADESÃO ENTRE
PARTÍCULAS E MEIOS FILTRANTES CONSTITUIDOS DE
CELULOSE

PATRÍCIA BRÍGIDA FAUSTINO

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química da Universidade
Federal São Carlos para a obtenção
do título de mestre em Engenharia
Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a MÔNICA LOPES AGUIAR

SÃO CARLOS

2010

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

F268de

Faustino, Patrícia Brígida.

Determinação experimental da força de adesão entre partículas e meios filtrantes constituídos de celulose / Patrícia Brígida Faustino. -- São Carlos : UFSCar, 2010. 97 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2010.

1. Ar - poluição. 2. Força de adesão. 3. Técnica centrífuga. I. Título.

CDD: 628.53 (20ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **PATRICIA BRIGIDA FAUSTINO** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 07 DE MAIO DE 2010.

BANCA EXAMINADORA:



Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, UFSCar



Giancarlo Richard Salazar Banda
UNIT



José Antonio Silveira Gonçalves
UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço

Primeiramente a Deus por colocar em minha vida pessoas tão especiais que estão sempre ao meu lado, prontos para compartilharem comigo os momentos bons e ruins.

Aos meus pais, Ailton e Sirley, que incondicionalmente me ajudam, são meu suporte, sem eles eu não teria chegado até aqui.

Aos familiares que estão sempre na torcida por mim.

À professora Mônica pela orientação e ajuda no decorrer deste trabalho.

Ao Marcos Felicetti, que mesmo à distância tentava me ajudar como podia.

Ao Marcos (técnico) pela prestatividade.

Aos amigos que de alguma forma estiveram ao meu lado, deram apoio e força em todos os momentos, com gestos, palavras ou orações: Simone, Vádila, João Victor, Guilherme, Cecília, Maribel, Néstor, Adriano, Adans.

Às minhas queridas amigas distantes, Isabela e Cris, que sempre estiveram torcendo por mim, a Isabela que com suas palavras de força me ajudou a superar dificuldades e a Cris, pelas palavras, orações e pelas madrugadas acordadas comigo me ajudando.

NOMENCLATURA

ω : velocidade angular da centrífuga

Φ : valor de circularidade da partícula, [-]

A: área da partícula, [L²]

a_0 : raio início do contato sem a deformação, [L]

D: media harmônica dos diâmetros das duas esferas, [L]

d_p : o diâmetro da partícula, [L]

E , E_i : coeficiente de elasticidade da esfera, [ML⁻¹t⁻²]

F: força mecânica de adesão, [ML⁻¹t⁻²]

F_{ad} : Força de adesão; [ML⁻¹t⁻²]

F_c : Força de Capilaridade, [ML⁻¹t⁻²]

F_{es} : Força eletrostática, [ML⁻¹t⁻²]

F_{vdw} : Força de Van der Waals; [ML⁻¹t⁻²]

H: constante de Hamacker, [-]

K : o módulo de Young, [ML⁻¹t⁻²]

m : a relação da região anular e o raio de contato, [-]

m: massa das partículas, [M]

RH: umidade relativa do ar, [-]

r_p : raio da partícula, [L]

r: distância entre a superfície do substrato e o eixo de rotação, [L]

s: área da deformação entre duas esferas em contato, [L²]

V_p : volume da partícula, [L³]

W : o trabalho de adesão no contato das superfícies, [ML⁻¹t⁻²]

x: distância do centro do círculo, [L]

z_0 : distância de separação entre as duas superfícies, [L]

γ = tensão superficial do líquido, [MT⁻²]

γ_{sl} = energia livre interfacial sólido-líquido, [ML⁻¹t⁻²]

δ : deformação na esfera, [L]

ν , ν_i : coeficientes de Poisson da superfície plana, [-]

ρ_p : densidade da partícula, [Mt⁻³]

σ_g desvio padrão geométrico, [-]

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Conceito de adesão e fatores que a determinam.....	2
2.2 Forças envolvidas na Adesão entre Partículas e um Substrato.....	3
2.2.1 As forças de Van der Waals	4
2.2.2 As forças eletrostáticas	5
2.2.3 As forças de capilaridade.....	6
2.3 Adesão teórica	7
2.4 A Influência da rugosidade das superfícies sobre a força de adesão.....	8
2.5 Propriedades Mecânicas das Superfícies.....	9
2.6 Propriedades da partícula.....	10
2.6.1 Tamanho das partículas	10
2.6.2 Forma das partículas	11
2.7 Métodos para a Medição da Força de Adesão.....	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3.1 Equipamentos	16
3.1.1 Microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos).....	16
3.1.2 Equipamentos para a análise de imagens	17
3.1.3 Outros equipamentos utilizados nos experimentos	18
3.2 Material Pulverulento	19

3.3 Substratos.....	21
3.4 Metodologia.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 Ensaio com o filtro de papel de celulose regenerada.....	31
4.1.1 Efeito da velocidade angular de compressão no desprendimento das partículas	31
4.1.2 Determinação da força de adesão	33
4.2 Ensaio com a membrana de éster de celulose	36
4.2.1 Efeito da velocidade angular de compressão no desprendimento das partículas	36
4.2.2 Determinação da força de adesão	38
4.3 Cálculo da Distância de separação Efetiva (z_0) entre a superfície da partícula e a superfície do substrato	47
4.4 Ajuste de uma equação para os resultados experimentais da força de adesão para o concentrado fosfático.....	50
5 CONCLUSÕES	55
SUGESTÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
Apêndice A.....	63
Apêndice B.....	66
Apêndice C	73

RESUMO

Neste trabalho investigou-se a influência do tamanho das partículas, da velocidade de compressão e do material constituinte do substrato sobre a força de adesão partícula substrato. Para tal finalidade aplicou-se a técnica centrífuga para as velocidades de compressão (*press-on*) de 500, 1000 e 1500 rpm e velocidades de desprendimento (*spin-off*) de 500 a 14000 rpm. Utilizou-se, nos experimentos, uma microcentrífuga (MA – 860, Marconi Equipamentos), cuja velocidade máxima de rotação era de 14000 rpm. A velocidade centrífuga promovia a compressão (*press-on*) e o desprendimento (*spin-off*) das partículas sobre a superfície do substrato. No cabeçote da microcentrífuga foram instalados dois tubos, construídos em alumínio, para contenção dos adaptadores, também construídos em alumínio. A finalidade dos adaptadores era de sustentar o substrato contendo as partículas do material pulverulento. Após a aplicação da compressão e de cada descompressão, as superfícies dos substratos contendo as partículas foram fotografadas e cada imagem gerada foi analisada em um programa de análise de imagens (Image-Pro Plus 6.0), a fim de se obter a contagem das partículas aderidas e desprendidas. Na investigação da influência da força de adesão partícula substrato aplicando a técnica centrífuga, foi utilizado como material pulverulento o concentrado fosfático ($\rho_p=3,18 \text{ g.cm}^{-3}$). As faixas de diâmetro estudadas para o material pulverulento foram de 9 – 22; 22,1 – 40; 40,1 – 54 e 54,1 – 77 μm . Como substratos foram utilizados um filtro de papel de celulose e uma membrana filtrante de éster de celulose. Com o auxílio da centrífuga, as partículas de concentrado fosfático eram pressionadas sobre as superfícies do filtro de papel e da membrana individualmente, em velocidades centrífugas de compressão específicas e na sequência era determinado o perfil da adesão. Constatou-se que a força de adesão aumentou com o acréscimo da velocidade de rotação da centrífuga aplicada na compressão e com o aumento do tamanho das partículas do material pulverulento. Também se averiguou que a força de adesão entre as partículas de concentrado fosfático e o filtro de papel foi maior do que com a membrana, concluindo-se que o arranjo estrutural dos meios filtrantes influenciou no processo de desprendimento das partículas, consequentemente influenciando no valor da força de adesão.

ABSTRACT

The influence of particle size, compression velocity, and of the material constituting the substrate on adhesion force between particle and substrate was investigated in this study. The centrifuge technique was applied for compression velocities (*press-on*) of 500, 1000, and 1500 rpm and detachment velocity (*spin-off*) of 500 to 14000 rpm. A microcentrifuge (MA – 860, Marconi Equipamentos) of maximum rotational velocity of 1400 rpm was used during trials. The velocity of the centrifuge promoted the compression (*press-on*) and the detachment (*spin-off*) of particles on the surface of the substrate. Two tubes made of aluminum were placed in the rotor of the microcentrifuge to hold the adapters also made of aluminum. The adapters worked as supports for the substrate containing the particles of the particulate matter. After compression and after each decompression, pictures of the surface of the substrate containing the particles were taken and each image was analyzed in an image analysis program (Image-Pro Plus 6.0) in order to count adhered and detached particles. When it comes to evaluating the influence of particle-substrate adhesion force by using the centrifuge technique, phosphate concentrate ($\rho_p=3.18 \text{ g.cm}^{-3}$) was used as particulate matter. The diameter ranges studied for the particulate matter were of 9 – 22; 22,1 – 40; 40,1 – 54 and 54,1 – 77 μm . A cellulose filter paper and a cellulose ester membrane were used as substrate. The phosphate concentrate particles were pressed against the surface of the paper filter and of the membrane individually with help of the centrifuge at specific compression centrifuge velocities and, afterwards, the adhesion profile was determined. It was observed that the adhesion force increased with an increase in rotational velocity of the centrifuge applied in the compression and with an increase in particle size of the particulate matter. It was also verified that the adhesion force between the phosphate concentrate particles and the paper filter was higher than that of the membrane, which led to the conclusion that the structural arrangement of filter media had an influence on the detachment process of particles, consequently influencing on adhesion force value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Adesão e Auto-adesão.....	2
Figura 2.2: Diagrama representativo da Força de Van der Waals.....	4
Figura 2.3: Perfil real da superfície microscópica de dois corpos (a) e (b) no momento do contato.....	4
Figura 2.4: Estado de Saturação de Líquidos: (a) Estado Pendular; (b) Estado Funicular; (c) Estado Capilar (Banda, 2002).....	7
Figura 2.5: (a) desprendimento das partículas na técnica centrífuga, (b) análises das imagens das superfícies, no começo e depois de cada rotação. (Fonte: Felicetti, 2004).....	14
Figura 3.1: Microcentrífuga: (a) aberta e (b) fechada.....	17
Figura 3.2: Diagrama esquemático do porta amostra em formato de tubo, construído em alumínio. (Adaptação de Banda, 2002).....	17
Figura 3.3: Equipamentos utilizados para aquisição e análise das imagens.....	18
Figura 3.4: Dispensador de pó.....	19
Figura 3.5: Imagens do concentrado fosfático com ampliação em (a) de 200x e em (b) de 1200x obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura – FEG - (DQ - UFSCar).....	20
Figura 3.6: Distribuição granulométrica do concentrado fosfático.....	21
Figura 3.7: Fotografias obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura – FEG – (DQ – UFSCar) para a membrana filtrante de éster de celulose (a.1 e a.2) em (a.1) 5000x e em (a.2) de 7000x.....	22
Figura 3.8: Fotografias obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura – FEG - (DQ - UFSCar) para o filtro de papel de celulose (b.1 e b.2), em (b.1) 5000x e em (b.2) 7000x.....	23

- Figura 3.9:** Imagens topográficas das superfícies da (a) membrana e do (b) filtro de papel, obtidas no microscópio de força atômica (DEMa - UFSCar).....24
- Figura 3.10:** Filtro marcado em quadrantes colado na superfície do disco de aço.....25
- Figura 3.11:** Partículas aderidas na membrana após serem aplicadas velocidades de: compressão de (a) 500 rpm e desprendimento de (b) 3000 rpm e (c) 14000 rpm.....28
- Figura 3.12:** Partículas aderidas no filtro de papel após serem aplicadas velocidades de: compressão de (a) 500 rpm e desprendimento de (b) 5000 rpm e (c) 9000 rpm.....28
- Figura 4.1 (a):** Porcentagem de partículas aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.....32
- Figura 4.1 (b):** Porcentagem de partículas aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.....32
- Figura 4.1 (c):** Porcentagem de partículas aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1500 rpm.....33
- Figura 4.2 (a):** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.....34
- Figura 4.2 (b):** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.....35

- Figura 4.2 (c):** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1500 rpm.....35
- Figura 4.3 (a):** Porcentagem de partículas aderidas na superfície da membrana em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.....37
- Figura 4.3 (b):** Porcentagem de partículas aderidas na superfície da membrana em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.....37
- Figura 4.3 (c):** Porcentagem de partículas aderidas na superfície da membrana em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1500 rpm.....38
- Figura 4.4 (a):** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana filtrante em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.....39
- Figura 4.4 (b):** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana filtrante em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.....39
- Figura 4.5 (a):** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão investigadas.....42
- Figura 4.5 (b):** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm em função da força de adesão das

partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão investigadas.....	42
Figura 4.5 (c): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel, na faixa de diâmetro de 40,1 - 54 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão investigadas.....	43
Figura 4.6 (a): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão investigadas.....	43
Figura 4.6 (b): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão investigadas.....	44
Figura 4.6 (c): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, na faixa de diâmetro de 40,1 - 54 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão investigadas.....	44
Figura 4.6 (d): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão investigadas.....	45

- Figura 4.7 (a):** Força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de concentrado fosfático, para o filtro de papel e a membrana, após aplicadas as forças de compressão de 500 rpm.....46
- Figura 4.7 (b):** Força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de concentrado fosfático, para o filtro de papel e a membrana, após aplicadas as forças de compressão de 1000 rpm.....46
- Figura 4.8 (a):** Distância de separação efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície da membrana de éster de celulose e o filtro de papel de celulose, em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.....49
- Figura 4.8 (b):** Distância de separação efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície da membrana de éster de celulose e o filtro de papel de celulose, em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.....49
- Figura 4.9 :** Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.....51
- Figura 4.10:** Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.....52
- Figura 4.11:** Força de adesão em função da velocidade angular de compressão para o concentrado fosfático, para a faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm após a aplicação das velocidades de compressão de 500, 100 e 1500 rpm para o filtro de papel.....53
- Figura 4.12:** Força de adesão em função do diâmetro médio de partículas de concentrado fosfático quando submetidos a uma velocidade de compressão (press-on) de 1000 rpm, sobre o Filtro de papel, a Membrana, o Aço, o PVC e o Teflon.....54

- Figura A.1:** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de A.1(a) 500, (b) 1000 e (c) 1500 rpm.....64
- Figura A.2:** Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana filtrante em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de A.2(a) 500 e (b) 1000 rpm.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Substratos, velocidades angulares de compressão e as faixas de diâmetro de partículas de concentrado fosfático utilizados nos experimentos.....	27
Tabela 3.2: Velocidades de descompressão utilizadas nos experimentos para cada velocidade de compressão.....	28
Tabela 4.1: Resultado final da força de adesão para os testes realizados com concentrado fosfático.....	41
Tabela 4.2: Valores de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a membrana de éster de celulose e entre o filtro de papel de celulose.....	48
Tabela B1 : Valores em porcentagem dos desvios padrões para o filtro de papel, com velocidade de compressão de 500 rpm.....	67
Tabela B2: Valores em porcentagem dos desvios padrões para o filtro de papel, com velocidade de compressão de 1000 rpm.....	68
Tabela B3: Valores em porcentagem dos desvios padrões para o filtro de papel, com velocidade de compressão de 1500 rpm.....	69
Tabela B4 : Valores em porcentagem dos desvios padrões para a membrana, com velocidade de compressão de 500 rpm.....	70
Tabela B5: Valores em porcentagem dos desvios padrões para a membrana, com velocidade de compressão de 1000 rpm.....	71
Tabela B6 : Valores em porcentagem dos desvios padrões para a membrana, com velocidade de compressão de 1500 rpm.....	72
Tabela C1: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm . Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato filtro de papel.	74

Tabela C2: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato filtro de papel.....75

Tabela C3 : Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato filtro de papel.76

Tabela C4: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato filtro de papel.77

Tabela C5: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm .

Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato filtro de papel.....78

Tabela C6: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm .

Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato filtro de papel.....79

Tabela C7: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm .

Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato filtro de papel.....80

Tabela C8: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm .

Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato filtro de papel.....81

Tabela C9: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm .

Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato filtro de papel.....82

Tabela C10: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm .

Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato filtro de papel.....83

Tabela C11: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm .

Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato filtro de papel.....84

Tabela C12: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm .

Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato filtro de papel.....85

Tabela C13: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato membrana.....86

Tabela C14: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato membrana.87

Tabela C15 : Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm . Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato membrana.....88

Tabela C16: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm . Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato membrana.....89

Tabela C17: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm . Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato membrana.....90

Tabela C18: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 µm. Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato membrana.....	91
Tabela C19: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 µm. Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato membrana.....	92
Tabela C20: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 µm. Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato membrana.....	93
Tabela C21: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 µm. Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato membrana.....	94
Tabela C22: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 µm. Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato membrana.....	95
Tabela C23: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 µm. Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato membrana.....	96
Tabela C24: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 µm. Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato membrana.....	97

1 INTRODUÇÃO

A adesão de partículas em superfícies é um parâmetro de grande interesse às comunidades científicas e tecnológicas. Ela pode ser explicada como a atração entre dois corpos com superfícies de contato comuns, e produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares que atuam a curta distância.

O estudo da adesão é muito importante para diversos processos industriais. Em processos de filtração, por exemplo, a adesão entre partícula-partícula e partícula-filtro ocasiona um aumento na espessura de uma torta e eleva a resistência do aglomerado. Isso requer uma maior energia para limpeza do filtro, causando um desgaste mais acelerado do tecido e aumentando o custo do processo (Silva *et al.*, 1999). Desta forma, o estudo da força de adesão pode colaborar com o processo de limpeza de filtros.

Sabe-se que é imprescindível para a indústria que os filtros tenham o maior tempo possível de vida útil e que o seu processo de limpeza seja economicamente viável, então o estudo da força de adesão entre partículas e meios filtrantes torna-se importante para uma limpeza de filtros mais eficiente, sem gastos excessivos.

Alguns métodos diferentes, como por exemplo, a Microscopia de Força Atômica e a Separação por Campo Elétrico, foram desenvolvidas para medir a força de adesão entre partículas e superfícies (Lodge, 1983). Dentre esses métodos a técnica centrífuga vem sendo utilizada pela vantagem de poder determinar a força de adesão de um grupo grande de partículas reais de formas regulares e irregulares em superfícies lisas e rugosas. Para este método, a força de adesão é igual em grandeza, mas com sinal oposto, à força centrífuga requerida para se obter o desprendimento das partículas do substrato (Banda, 2002; Felicetti, 2008).

Assim, este estudo tem como objetivo determinar experimentalmente a força de adesão do concentrado fosfático, material pulverulento, sobre os meios filtrantes membrana de éster de celulose e filtro de papel de celulose, utilizando-se a técnica centrífuga para diferentes velocidades de compressão e de desprendimento. O estudo e a determinação da força de adesão entre partículas e meios filtrantes merece especial atenção pois pode auxiliar no dimensionamento de equipamentos, na escolha de tipos de filtros e de componentes para misturas de pós, assim como, nas condições em que os processos devem ocorrer, influenciando conseqüentemente na economia dos processos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma breve análise dos estudos mais importantes encontrados na literatura, em se tratando de força de adesão, como definições de adesão, técnicas para se medir a força de adesão, forças envolvidas na adesão entre partículas e substratos e características e propriedades que influenciam na adesão entre dois corpos.

2.1 Conceito de adesão e fatores que a determinam

Quando dois materiais ou corpos ficam unidos por um contato entre suas superfícies, denomina-se adesão, sendo esse termo subdividido em outros dois, a adesão e a auto-adesão. A interação entre duas fases ou dois corpos diferentes e muito próximos denomina-se de adesão. A interação entre dois corpos semelhantes como por exemplo duas partículas, denomina-se de auto-adesão (Zimon, 1982). A Figura 2.1 ilustra os termos adesão e auto-adesão.

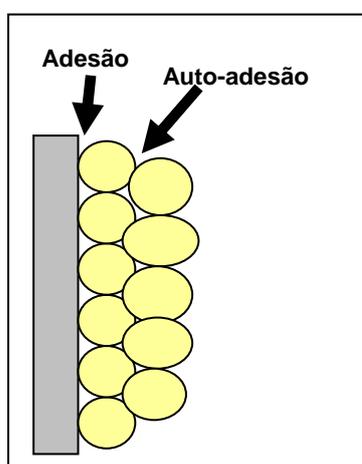


Figura 2.1: Adesão e Auto-adesão

O contato entre os corpos pode ser provocado por forças mecânicas ou forças interfaciais e vários são os fatores que podem influenciar a adesão, como por exemplo as forças que a determinam, o número de partículas aderidas, as propriedades do meio, as alterações das partículas ao decorrer do desprendimento e a direção da força de desprendimento (Banda, 2002).

A força mecânica pode ser gerada pelas propriedades mecânicas da região interfacial e das massas dos corpos distintos. Uma força aplicada no sentido de unir dois corpos pode causar travamentos mecânicos em suas superfícies e originar a adesão mecânica (Wu, 1982).

As forças interfaciais podem decorrer das forças de Van der Waals, das reações químicas nas interfaces, ou da atração eletrostática.

Quando há um equilíbrio de energia nas interfaces, chamamos de adesão termodinâmica. Essa energia nas interfaces pode ser proveniente de força adesiva ideal, trabalho de adesão ou calor de umedecimento.

Quando ocorre uma reação química entre duas interfaces surge a chamada adesão química.

Existem dois modos em que a adesão pode ser classificada que são a adesão estática que é medida pela força com que os corpos resistem até o início do desprendimento e a adesão cinética que é medida pela interação entre as partículas e a superfície no decorrer do desprendimento. Considerando-se que a adesão cinética é menor que a adesão estática, para se obter o desprendimento das partículas, a força de adesão estática deve ser primeiramente vencida (Derjaquin *et al.* 1978).

2.2 Forças envolvidas na Adesão entre Partículas e um Substrato

Stewart (1986) definiu que a resultante da força de adesão é a somatória de várias forças, como mostra a equação:

$$F_{ad} = F_{vdw} + F_{es} + F_c \quad (2.1)$$

em que F_{ad} é a Força total de adesão, F_{vdw} é a Força de Van der Waals, F_{es} é a Força eletrostática e F_c é a Força de Capilaridade.

As propriedades físicas e químicas dos materiais e as condições operacionais durante os processos podem influenciar para que uma ou mais destas forças tenha maior efeito no resultado da força de adesão (Podczek *et al.*, 1996).

2.2.1 As forças de Van der Waals

A força de Van der Waals surge quando o movimento aleatório dos elétrons em um determinado material forma áreas transitórias de cargas concentradas denominadas dipolos (Rumpf, 1977). Estes dipolos induzem, no material adjacente, dipolos complementares, ou seja, dipolos com cargas de sinais opostos. Essa indução entre dipolos produz forças atrativas entre os dois materiais em questão, o que pode ser ilustrado pela Figura 2.2. O aumento da distância que separa as superfícies dos dois materiais provoca a diminuição da força de Van der Waals, sendo que o efeito dessa força se anula para uma maior distância de separação (Krupp, 1967).

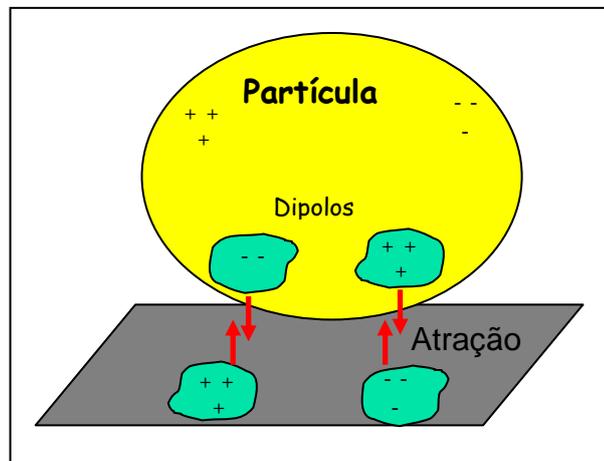


Figura 2.2: Diagrama representativo da Força de Van der Waals.

Sabe-se que a maioria dos materiais possui superfície irregular, e essa irregularidade é denominada de rugosidade. Quando dois corpos se aproximam um do outro, o primeiro contato entre suas superfícies ocorre na rugosidade. A Figura 2.3 apresenta este contato entre as superfícies de dois corpos sob um nível microscópico.

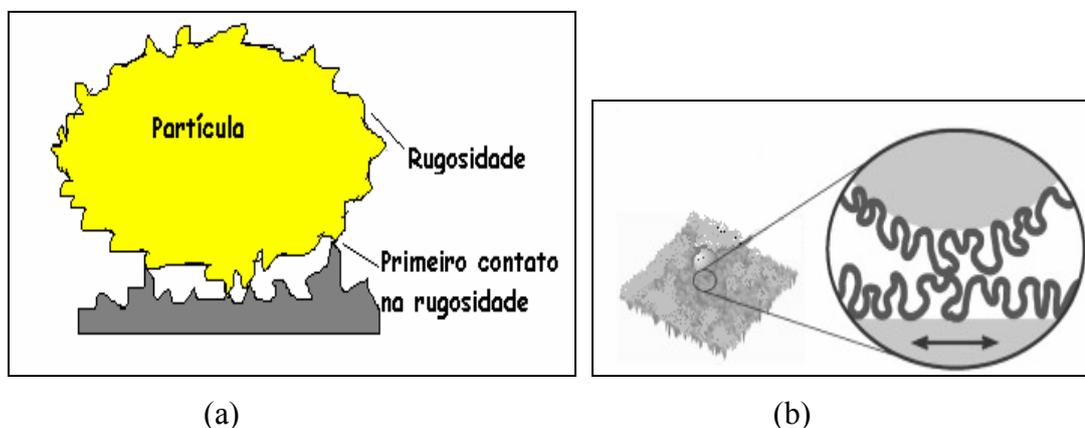


Figura 2.3: Perfil real da superfície microscópica de dois corpos (a) e (b) no momento do contato.

Hamacker (1937) demonstrou que a Força de Van der Waals entre duas partículas esféricas de diâmetros diferentes, d_1 e d_2 , é representada pela equação:

$$F_{vdw} = \frac{H}{12 \cdot z_0^2} \cdot \left[\frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \right] \quad (2.2)$$

em que F_{vdw} é a Força der Waals, H é a constante de Hamacker, que é influenciada pelas características do material estudado e seu valor encontra-se no intervalo entre 10^{-20} e 10^{-19} Joules, e z_0 é a distância de separação entre as duas superfícies. Schubert (1981) propôs que para partículas esféricas lisas o valor de z_0 fosse de $4 \cdot 10^{-10}$ metros, e sugeriu que para partículas reais este valor seria de $4 \cdot 10^{-10}$ m $< z_0 < 4 \cdot 10^{-8}$ m

Para duas partículas esféricas com diâmetros iguais, d_p ($d_1=d_2$), a equação (4) simplifica-se para:

$$F_{vdw} = \frac{H \cdot d_p}{24 \cdot z_0^2} \quad (2.3)$$

Quando o diâmetro de uma das partículas em contato é bem maior que o diâmetro da outra, $d_2 \gg d_1$, a equação representa-se como:

$$F_{vdw} = \frac{H \cdot d_p}{12 \cdot z_0^2} \quad (2.4)$$

Lam *et al.* (1993) afirmou que as forças de Van der Waals são aplicadas no sentido de compressão das partículas, aumentando a superfície de contato e diminuindo a distância de separação entre as superfícies.

2.2.2 As forças eletrostáticas

Durante os processos operacionais a agitação entre as partículas pode provocar atritos ou choques entre elas. Isso faz com surjam cargas elétricas nessas partículas resultando em forças eletrostáticas (Derjaguin *et al.* 1968 e 1978). As forças eletrostáticas podem surgir também pela aplicação de um campo elétrico externo ao sistema.

As forças eletrostáticas podem contribuir para uma melhor eficiência de filtração, pois auxilia no processo de formação de tortas menos compactas. Isso deve ao fato de que as forças eletrostáticas facilitam a deposição e a aglomeração das partículas nos filtros, oferecendo assim menor resistência ao escoamento do gás através do filtro.

As forças eletrostáticas são menores para materiais não condutores e maiores para materiais condutores.

Rumpf (1977) afirmou que as forças elétricas apresentam valores até dez vezes menores do que as forças de Van der Waals e que sua função principal é a de proporcionar o contato das partículas para que então as outras forças, como Van der Waals e capilaridade, possam atuar.

2.2.3 As forças de capilaridade

Quando a umidade relativa do ar encontra-se acima de 65%, surge também uma umidade entre corpos muito próximos. Essa umidade entre os corpos causa a formação de pontes líquidas que provocam o aparecimento de uma força denominada força de capilaridade. Materiais porosos e que absorvem água com significante facilidade mantêm umidade inserida em seus poros nos quais também são formadas pontes líquidas.

As pontes líquidas são o resultado principalmente da tensão superficial do líquido, e apresenta diferentes estados que dependem da quantidade de líquido presente na ligação.

Existem três estados de ponte líquida que são: o pendular, o capilar e o funicular.

A Figura 2.4 ilustra os estados de pontes líquidas. Quando existe a presença de uma pequena quantidade de líquido originam-se pontes líquidas entre as partículas, Figura 2.4 (a), denominado estado pendular. Aumentando-se a quantidade de líquido formam-se além de pontes líquidas, o preenchimento dos poros com este líquido, Figura 2.4 (b), chamado estado funicular e aumentando-se ainda mais a quantidade de líquido obtém-se o estado capilar, em que há preenchimento total de todos os poros, como pode ser visto na Figura 2.4(c).

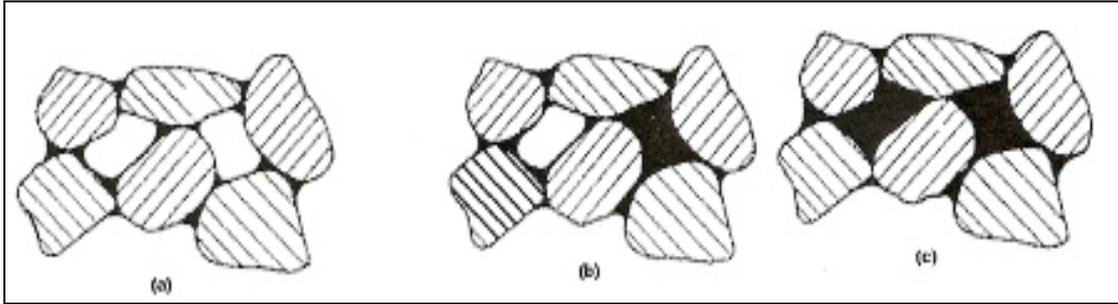


Figura 2.4: Estado de Saturação de Líquidos: (a) Estado Pendular; (b) Estado Funicular; (c) Estado Capilar (Banda, 2002)

A diminuição da umidade relativa do ar provoca a diminuição do efeito das forças de capilaridade, sendo que quando a umidade relativa do ar é inferior a 50%, tal efeito de força pode ser até mesmo anulado (Zimon, 1982).

Rennie *et al.* (1998) afirmou que em superfícies lisas a força de capilaridade pode ser até 50 vezes maior que as Força de Van der Waals e em superfícies rugosas o efeito é reduzido chegando a ser até mesmo eliminado.

O'Brien e Hermann (1973) desenvolveram uma equação para calcular as forças de capilaridade:

$$F_c = 2.\pi.r_p.\gamma.(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (2.5)$$

em que F_c é a força de capilaridade, r_p é o raio da partícula, γ é a tensão superficial do líquido condensado e θ_1 e θ_2 são os ângulos de contato entre os dois corpos em contato e o líquido.

Posteriormente Fischer e Israelachvili (1981) propuseram uma outra equação para calcular a força de capilaridade que leva em consideração energia livre interfacial sólido-líquido:

$$F = 4.\pi.\gamma.\cos \theta + 4.\pi.r_p.\gamma_{sl} \quad (2.6)$$

em que γ é a tensão superficial do líquido condensado, θ é o ângulo de contato entre a partícula aderida e o líquido, r_p é o raio da partícula e γ_{sl} é a energia livre interfacial sólido-líquido.

2.3 Adesão teórica

O termo adesão pode ser também definido como a força F necessária para separar duas partículas iguais (Felicetti, 2002).

A adesão teórica para partículas esféricas rígidas pode ser expressa pela equação (Bradley, 1932 apud Derjaguin, 1975):

$$F_{adesão} = \frac{\pi W d_p}{2} \quad (2.7)$$

em que d_p é o diâmetro da partícula e W é o trabalho de adesão, para separar dois corpos e pode ser obtido pela equação:

$$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (2.8)$$

em que W_{12} é o trabalho de adesão entre o material 1 e o material 2, γ_1 e γ_2 são as tensões superficiais dos materiais 1 e 2 respectivamente e γ_{12} é a média harmônica das tensões superficiais (Ahrens *et al.*, 2005).

Para partículas esféricas lisas e elásticas a força de adesão representa-se sob a forma da equação (Kendal, 1994):

$$F_{adesão} = \frac{3\pi W d_p}{8} \quad (2.9)$$

Neste caso o trabalho de adesão (W) pode ser medido pelo tamanho da mancha que a deformação elástica causa após o contato.

De acordo com as duas equações de força de adesão teórica expostas anteriormente, conclui-se que a força de adesão aumenta com o aumento do diâmetro das partículas. Experimentalmente observou-se que sobre um corpo maior a força que terá maior domínio é a força gravitacional, e um corpo menor é dominado pela força de adesão (Kendall e Stainton, 2001).

2.4 A Influência da rugosidade das superfícies sobre a força de adesão

A rugosidade presente nas superfícies dos materiais tem o efeito de diminuir a força de adesão entre os corpos em contato. Quando uma superfície não é perfeitamente lisa, mas tem rugosidades, a distância entre as duas esferas contatadas é a distância (z_0) mais o raio das rugosidades,

(R). Então a força de Van der Waals (F) entre duas esferas pode ser representada pela equação (Felicetti, 2008):

$$F = \frac{H \cdot d \cdot p}{12(z_0 + R)^2} \quad (2.10)$$

em que d_p é o diâmetro da partícula, R é o raio da rugosidade e H é a constante de Hamaker.

Considerando-se uma partícula muito pequena, desprezando-se seu raio R a força de Van der Waals entre a esfera pequena e uma esfera maior é:

$$F = \frac{H \cdot d \cdot p}{12z_0^2} \quad (2.11)$$

Xie (1997) afirmou que, para partículas dentro da faixa de tamanho (10 – 100 μm), a força total de Van der Waals (F) é a mesma força de quando se trata de partículas lisas, se as rugosidades tiverem tamanhos menores que 0,01 μm . Porém, se as rugosidades forem maiores que 0,1 μm , o efeito da rugosidade entre os dois corpos em contato começa a dominar e então o diâmetro usado na equação para o cálculo da força de Van der Waals será o tamanho das superfícies das rugosidades.

2.5 Propriedades Mecânicas das Superfícies

O efeito da deformação sobre a força de adesão é normalmente tratado usando-se 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) utilizou 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 (Xie, 1997 apud Felicetti, 2008).

Para uma deformação totalmente elástica sob uma força de compressão F , a área da deformação, s , é dada pela equação, descrita por Hertz:

$$s = 1,63 \left(\frac{F \cdot D}{K} \right)^{2/3} \quad (2.12)$$

em que K é a dureza de contato entre duas esferas e D é a media harmônica dos diâmetros das duas esferas.

Corn (1961) propôs que para materiais duros com superfícies limpas, baseando-se em medidas diretas de partículas de vidro e quartzo ($>20\mu\text{m}$) a 25°C , a equação que melhor representa a força de adesão é:

$$F_{\text{adesão}} = 0,063 \cdot d_p [1 + 0,009 (\%RH)] \quad (2.13)$$

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

2.6 Propriedades da partícula

Algumas propriedades das partículas como tamanho; forma; densidade; área superficial da partícula são importantes para estudos a respeito de materiais particulados em diversos ramos tecnológicos.

2.6.1 Tamanho das partículas

Para Svarovsky (1990) ao se determinar o tamanho de uma partícula, antes do método ser selecionado deve-se definir qual será o parâmetro que a define.

O parâmetro que define o tamanho de uma partícula esférica homogênea é seu diâmetro. Uma partícula cúbica é definida pela dimensão de sua aresta. Partículas irregulares são definidas pela área projetada e pela área superficial (Allen, 1990).

Por meio de análises microscópicas é possível observar e medir partículas individualmente. Pode-se obter o valor do diâmetro médio a partir da área projetada da

partícula. Esse número representa o tamanho da partícula, sendo possível também determinar a área superficial média da partícula.

O Microscópio ótico e o microscópio eletrônico são aparelhos que podem ser citados como formas de se medir o tamanho de partículas.

2.6.2 Forma das partículas

A forma das partículas se faz necessária para descrever o comportamento das partículas em diversos processos experimentais e industriais (Hawkins 1990).

Vários métodos são propostos para analisar a forma das partículas, como a descrição verbal, o uso de diversos coeficientes e fatores de forma, curvatura, descrição por meio de formas sólidas, funções matemáticas como a série de Fourier, dimensões fractais entre outros (Svarovsky, 1990).

Alguns termos qualitativos, como esférica, regular, irregular, arredondada, quadrada, são usados para definir a forma de uma partícula. No entanto são termos inadequados para determinar o fator de forma da partícula. O fator de forma é a relação adimensional entre várias medidas de uma partícula, que pode ser utilizado em equações que necessitem desse parâmetro (Allen, 1990 apud Azevedo, 2009). Torna-se necessário então medir e definir o formato quantitativamente. Como na descrição do tamanho de uma partícula, o formato também pode ser determinado por um número, superfície ou volume.

Um parâmetro quantitativo é a circularidade, que determina numericamente o quanto o formato de uma partícula se aproxima de um círculo perfeito.

O valor de circularidade (Φ) da partícula pode ser definido pela equação:

$$\Phi = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2} \quad (2.14)$$

em que (A) é a área da partícula e (P) é o perímetro. A circularidade tem seu valor variando entre 0 e 1, sendo que um círculo perfeito tem circularidade igual a 1 (Azevedo, 2009).

Boskovic *et al.* (2005) realizou experimentos com nano partículas esféricas e cúbicas, com o intuito de se estudar a influência da forma na eficiência do processo de filtração. Os resultados dos experimentos demonstraram que para as partículas cúbicas a eficiência de filtração foi menor do que para partículas esféricas, e essa diferença aumentou

com o aumento do tamanho das partículas. Isso se deve ao movimento das partículas ao longo da superfície das fibras do filtro, em que as partículas esféricas depois de tocarem a fibra deslizam ou rolam e já as partículas cúbicas apenas deslizam ou “tombam”. As partículas cúbicas podem então tocar a fibra com as laterais ou com as arestas, o que muda a superfícies de contato entre a fibra e a partícula significativamente, e aumenta a possibilidade da partícula não ficar retida na fibra.

2.7 Métodos para a Medição da Força de Adesão

Variedades de técnicas, como microscopia de força atômica, separação por campo elétrico e técnica centrífuga, foram desenvolvidas devido às necessidades em se medir a força de adesão.

A microscopia de força atômica (MFA) é um método comum usado nos campos da ciência, contudo este método tem suas limitações quando se investiga a aderência de partículas que apresentam tamanhos polidispersos sobre uma superfície. Portanto, a estimativa de um valor representativo da força de adesão deve estar baseada em uma avaliação estatística que observa, pelo menos, algumas centenas de partículas. Utilizando a técnica de microscopia de força atômica (MFA), levaria vários anos para executar um experimento confiável desta magnitude. A técnica de MFA pode medir com precisão a adesão de uma única partícula. Consequentemente, a técnica para medir a força de adesão entre partículas e uma superfície deve permitir a investigação de muitas partículas ao mesmo tempo.

A 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. Foi usada desde os anos cinquenta para medir a adesão de partículas e uma superfície (Mizes *et al.*, 2000).

Nesse aspecto a técnica centrífuga oferece muitas vantagens, dentre elas a possibilidade de estabelecer várias condições operacionais nos testes, como umidade, temperatura e pressão, estendendo-se assim as potencialidades experimentais desta técnica (Zimon, 1982).

A seguir apresenta-se um detalhamento da técnica centrífuga, uma vez que esta será empregada nesse estudo.

A técnica centrífuga

A força centrífuga tem linha de ação radial e aponta sempre do centro para o exterior da trajetória circular descrita pelo corpo no referencial fixo do laboratório e é empregada, no caso

deste trabalho, para consolidar ou remover as partículas de um material pulverulento sobre a superfície de um substrato.

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

$$F_{\text{centrífuga}} = - F_{\text{adesão}} \quad (2.15)$$

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

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

Böhme *et al.*, (1962) e Krupp (1967) desenvolveram uma técnica centrífuga para determinar a força de adesão de partículas esféricas. Um tubo foi especialmente construído e adaptado junto ao cabeçote do rotor da centrífuga com a finalidade de acomodar os substratos (discos de prova) contendo o material pulverulento paralelo ao eixo de rotação da centrífuga. O substrato foi colocado com a superfície empoeirada em direção ao eixo de rotação de forma que durante a centrifugação, as partículas fossem forçadas sobre a superfície do substrato pela força centrífuga. Este processo de centrifugação foi realizado a um tempo de rotação de 1 min antes de iniciar a desaceleração. Experiências preliminares tinham estabelecido que 1 min fosse suficiente para obter uma diferenciação entre os materiais nas propriedades de adesão, embora o trabalho adicional estabelecesse a ocorrência de um efeito de tempo significativo. A técnica centrífuga usada para as experiências foi descrita em detalhes por Lam e Newton (1991). Lam e Newton (1993) demonstraram a influência da duração da pressão de contato, à máxima velocidade da centrífuga, na força de adesão, a máxima velocidade centrífuga foi alcançada por aumento crescente da velocidade do rotor e os dois mantiveram exatamente por 1 min.

Piantino (2003) confirmou experimentalmente que a variação no tempo utilizado no desprendimento das partículas sobre o substrato não interferiu no valor da força de adesão. Desta forma, para facilitar a aquisição dos resultados experimentais, atribui-se a utilização do tempo de 1 min.

A técnica centrífuga descrita por Podczeczek 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.

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

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

A Figura 2.5 ilustra bem o efeito da aplicação das forças centrífugas *press-on* e *spin-off* sobre a superfície do substrato contendo o material pulverulento. As partículas são depositadas na superfície do substrato e levadas a uma centrífuga. Conforme mostra a Figura 2.5(a), a superfície é rotacionada a velocidades crescentes, e a cada aumento da velocidade rotacional o número de partículas que permanecem sob a superfície do substrato é fotografado na mesma área da superfície onde as partículas foram depositadas. Assim podem-se analisar as mesmas partículas que permaneceram na superfície do substrato após cada aumento da velocidade rotacional até que, a força gerada seja suficiente, ou não, para remover aquela partícula. Três microfotografias de um experimento típico são mostradas na Figura 2.5 (b) (Felicetti, 2004).

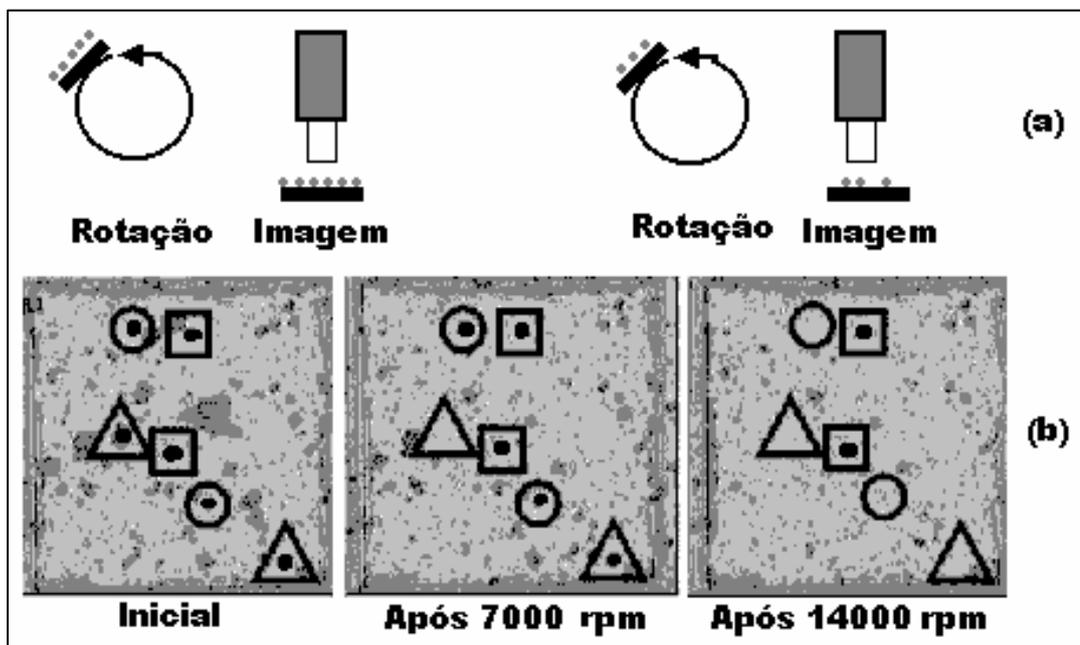


Figura 2.5: (a) desprendimento das partículas na técnica centrífuga, (b) análises das imagens das superfícies, no começo e depois de cada rotação. (Fonte: Felicetti, 2004).

A Figura 2.5 ilustra o que acontece a seis partículas em diferentes situações de adesão. Por exemplo, uma partícula fracamente aderida está presente dentro do triângulo. Esta partícula foi removida da superfície após a aplicação da velocidade angular de 7000 rpm. Uma partícula fortemente aderida está mostrada dentro do círculo e permanece aderida sobre a aplicação da força centrífuga de 7000 rpm, mas esta partícula foi removida entre 7000 e 14000 rpm. A partícula dentro do quadrado está fortemente aderida e não foi removida da superfície do substrato após a aplicação da força centrífuga de 14000 rpm de rotação. A força de remoção para cada partícula é claramente identificável na imagem. Um software de análise de imagens foi usado para fotografar a posição e o tamanho de cada partícula na imagem. Este mesmo software localizou a mesma partícula por imagens subsequentes para identificar cada aumento da velocidade rotacional onde a partícula era removida.

Como descrito anteriormente, a técnica centrífuga possui vantagens sobre as outras técnicas, quando se deseja determinar a força de adesão de materiais pulverulentos polidispersos. Sendo por isto a técnica que será utilizada neste estudo. Outra motivação para a aplicação da técnica centrífuga deve-se ao trabalho realizado por Banda (2002), que determinou a força de adesão de materiais pulverulentos sobre uma superfície aplicando uma velocidade de compressão constante (1000 rpm), e Felicetti (2004) que variou a velocidade de compressão e Felicetti (2008) que investigou a influência do tamanho das partículas do material pulverulento orgânico e inorgânico sobre a força de adesão dessas partículas e um substrato construído de diferentes materiais: PVC, Teflon® e vidro, aplicando a técnica centrífuga.

Apresentada a revisão bibliográfica, a seguir serão descritos os materiais e métodos, que serão utilizados neste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos e a metodologia utilizados para a realização dos experimentos.

3.1 Equipamentos

O sistema experimental era formado por uma microcentrífuga, por equipamentos que possibilitavam a análise das imagens e por outros equipamentos utilizados para a obtenção das condições necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

3.1.1 Microcentrífuga (*MA – 860, Marconi Equipamentos*)

A microcentrífuga, apresentada na Figura 3.1, continha um sistema de seleção de tempo de aceleração e desaceleração e atingia a velocidade de até 14000 rpm. Também possuía um dispositivo de partida lenta e de aceleração e desaceleração moderada, que foram características muito importantes para o desenvolvimento deste trabalho, pois evitava que as partículas fossem desprendidas da superfície dos substratos, no início e no final de cada teste, devido a um arranque brusco.

No cabeçote da microcentrífuga foram instalados dois tubos construídos em alumínio, como mostra a Figura 3.2, nos quais foram colocados adaptadores, do mesmo material, cuja finalidade era de sustentar os substratos contendo o material pulverulento distribuído em sua superfície. Os tubos e os adaptadores foram construídos em alumínio, por se tratar de um material leve e resistente, não apresentando grande inércia às velocidades de rotação da microcentrífuga.

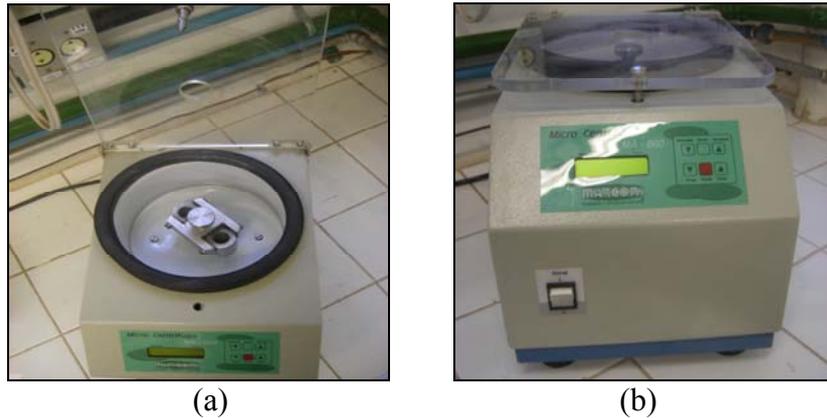


Figura 3.1: Microcentrífuga: (a) aberta e (b) fechada

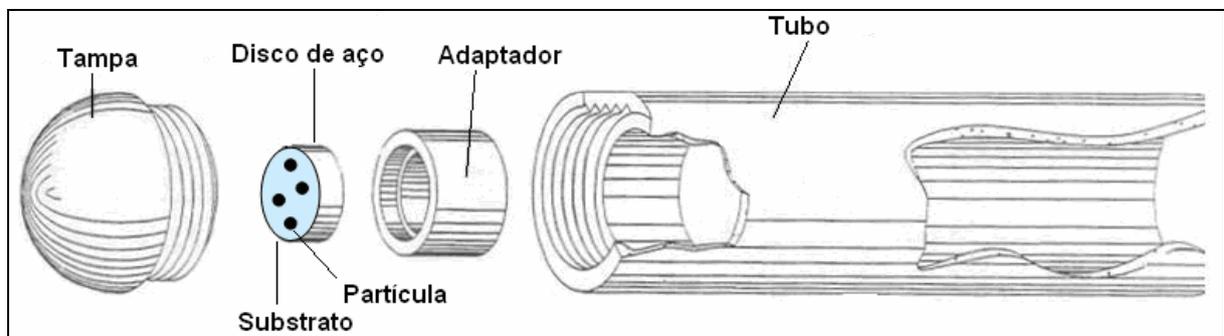


Figura 3.2: Diagrama esquemático do porta amostra em formato de tubo, construído em alumínio (Adaptação de Banda, 2002)

3.1.2 Equipamentos para a análise de imagens

Para aquisição e análise das imagens foram utilizados os seguintes aparelhos:

Microscópio óptico (*Olympus BX60*)

O microscópio óptico era conectado a uma câmera de vídeo colorida (*CCD-Iris – Sony Co. Japan*). Esta câmera era capaz de aumentar em 10 vezes a ampliação da imagem captada pelo microscópio, promovendo uma análise mais confiável das partículas sobre a superfície.

Analizador de Imagens Image-Pro Plus 6.0

O programa de análise de imagens, instalado no microcomputador, permitiu fazer a contagem do número de partículas distribuídas na superfície dos substratos, e determinar o diâmetro médio e a área das mesmas.

A Figura 3.3 apresenta o sistema utilizado para análise das imagens.

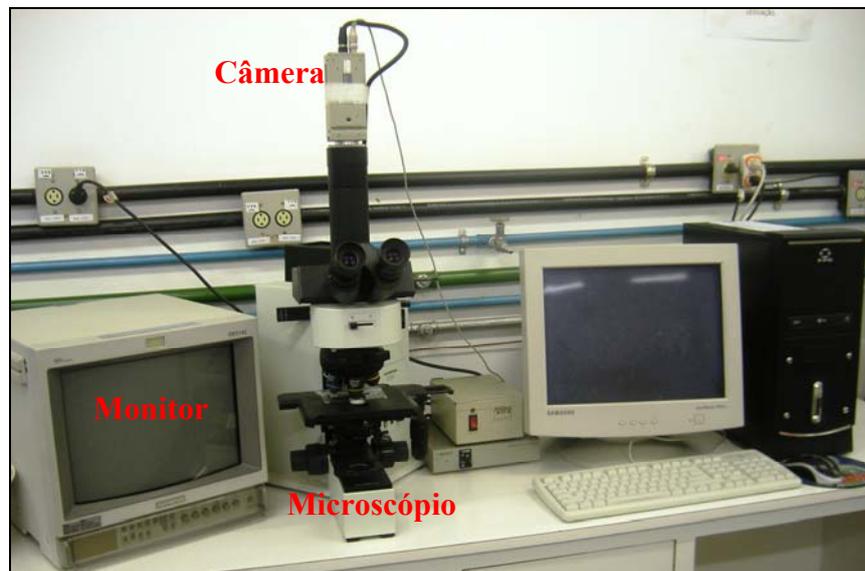


Figura 3.3: Equipamentos utilizados para aquisição e análise das imagens

3.1.3 Outros equipamentos utilizados nos experimentos

Abaixo se encontram listados os demais equipamentos utilizados para caracterização e preparação dos materiais e também do ambiente de laboratório para que fossem obtidas as condições necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

- Um Picnômetro digital de Hélio com precisão de $\pm 0,06 \text{ g.cm}^{-3}$ foi utilizado para determinar a densidade do concentrado fosfático. Foram efetuadas três medidas de densidade do material.
- Uma estufa de secagem e esterilização, onde o material pulverulento era colocado durante 24 horas.
- Um dessecador que continha esferas de sílica, para evitar a absorção de umidade pelo material, onde este era armazenado depois de retirado da estufa. Como se pretendia determinar a força de adesão de pós secos, em que a força predominante era a Força de Van der Waals, era necessário esse procedimento de controle de umidade nas partículas.
- Um Dispensador de pó (*Galai PD – 10, vacuum gage*), apresentado na Figura 3.4, que utiliza o vácuo para dispersar as partículas sobre a superfície do substrato evitando a aglomeração das partículas e consequentemente evitando a ocorrência de erros na contagem das partículas pelo analisador de imagens.

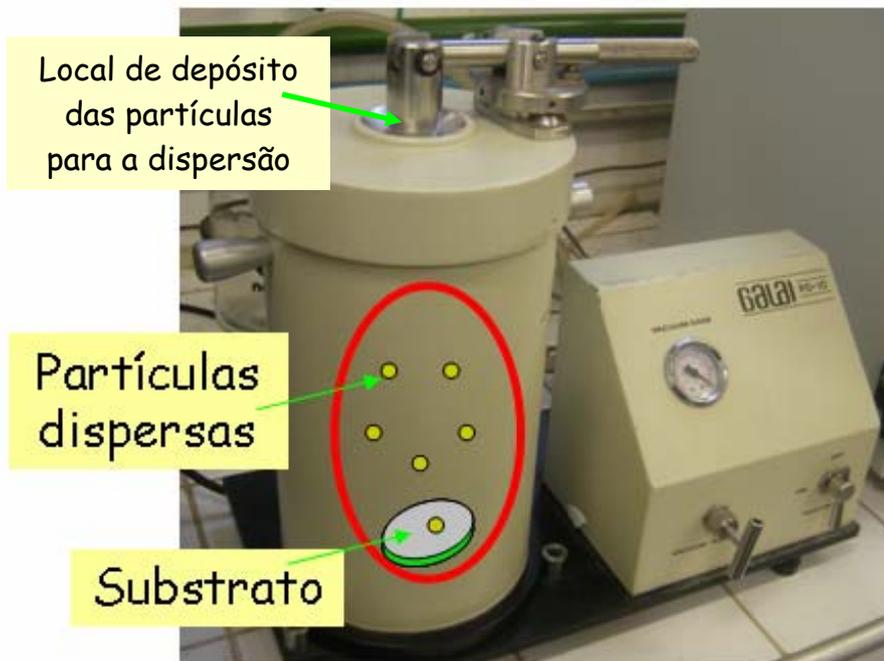
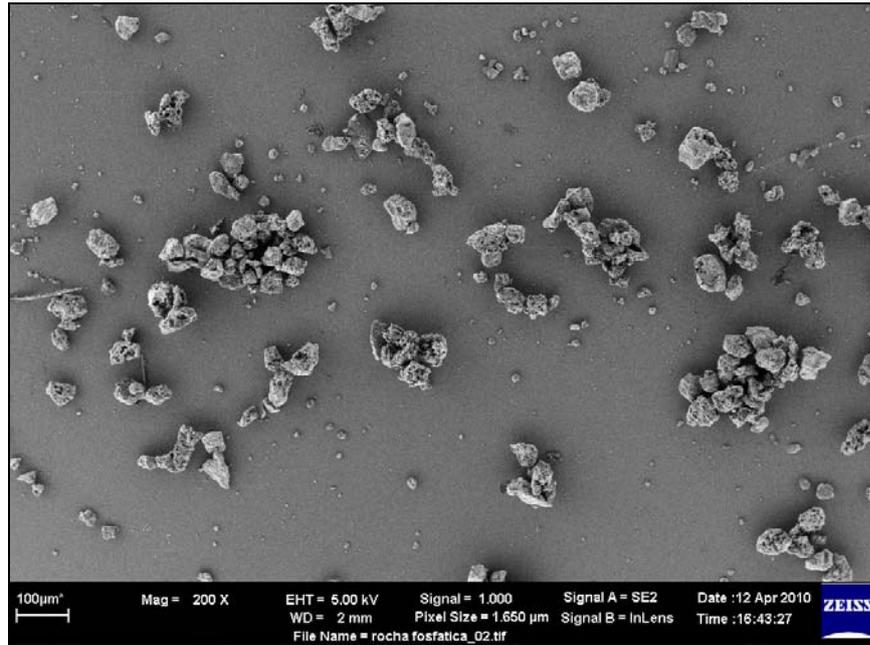


Figura 3.4: Dispensador de pó

- Um desumidificador e um ar condicionado foram utilizados para se extrair a umidade do ar do laboratório onde eram realizados os experimentos, mantendo-a abaixo de 50%, para diminuir a influência da força de capilaridade existente quando a umidade relativa do ar está acima de 50%. Sendo eliminado o efeito a força de capilaridade a força que influenciaria na adesão seria a Força de Van der Waals, que era a de interesse neste trabalho. O aparelho desumidificador ficava localizado dentro do laboratório, e toda a água absorvida por ele era coletada em um recipiente do próprio aparelho. A umidade relativa do laboratório era medida por um termo-higrômetro digital (*Minipa MTH-1360*).

3.2 Material Pulverulento

Nos experimentos foi utilizado como material pulverulento o concentrado fosfático (*Fosfértil S.A., Patos de Minas, MG*) que é um material inorgânico constituído principalmente de Cálcio (Ca), Flúor (F), Fósforo (P) e Oxigênio (O). A densidade do concentrado fosfático foi de $3,18 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,06$, medida no Picnômetro digital de Hélio (*Micrometrics AccuPyc 1330*). A Figura 3.5 (a) e (b) apresenta a imagem microscópica do concentrado fosfático, obtida no microscópio eletrônico de varredura – FEG, com ampliação em (a) de 200 vezes e em (b) de 1200 vezes respectivamente.



(a)



(b)

Figura 3.5: Imagens do concentrado fosfático com ampliação em (a) de 200x e em (b) de 1200x obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura – FEG – (DQ – UFSCar).

Percebe-se ainda na Figura 3.5 que as partículas de concentrado fosfático possuem formato bastante irregular e distante de um círculo. O valor do formato da partícula, denominado circularidade (Φ), indica o quanto o formato da partícula projetada se aproxima de um círculo perfeito. Esse parâmetro tem seu valor variando entre 0 e 1, sendo que um círculo perfeito tem

circularidade igual a 1. A circularidade obtida para o concentrado fosfático foi de 0,57, estimada através da equação (2.33) (Malvern instruments, 2005 apud Azevedo, 2009):

$$\Phi = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2} \quad (2.33)$$

em que A e P são a área e o perímetro da partícula respectivamente.

A distribuição granulométrica do concentrado fosfático foi obtida pelo analisador Malvern Mastersize Microplus MAF 5001 no DEQ-UFSCar e está apresentada na Figura 3.6. Observa-se nesta figura que o concentrado fosfático possui uma larga faixa de distribuição granulométrica, que varia de próximo de 10,0 a próximo de 100,0 μm .

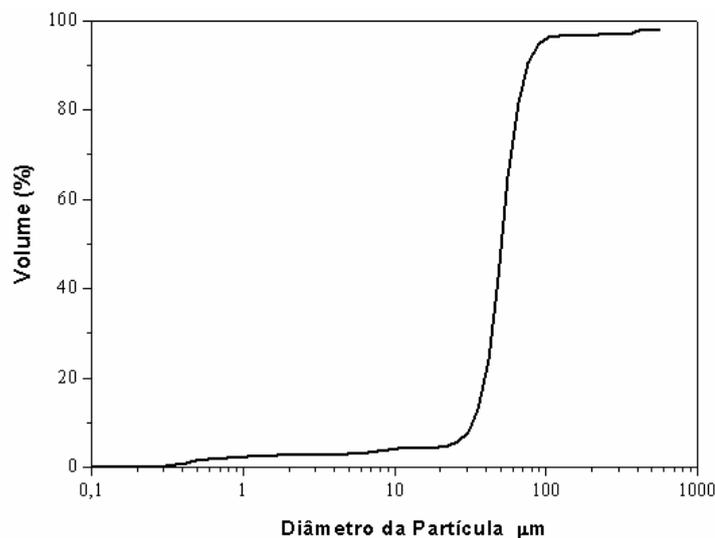
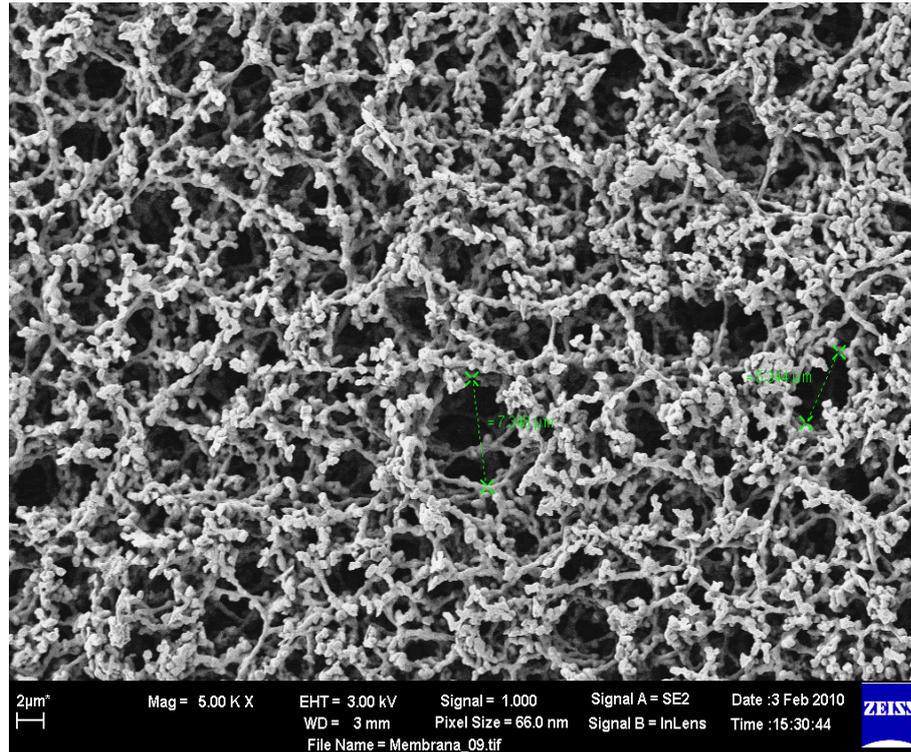


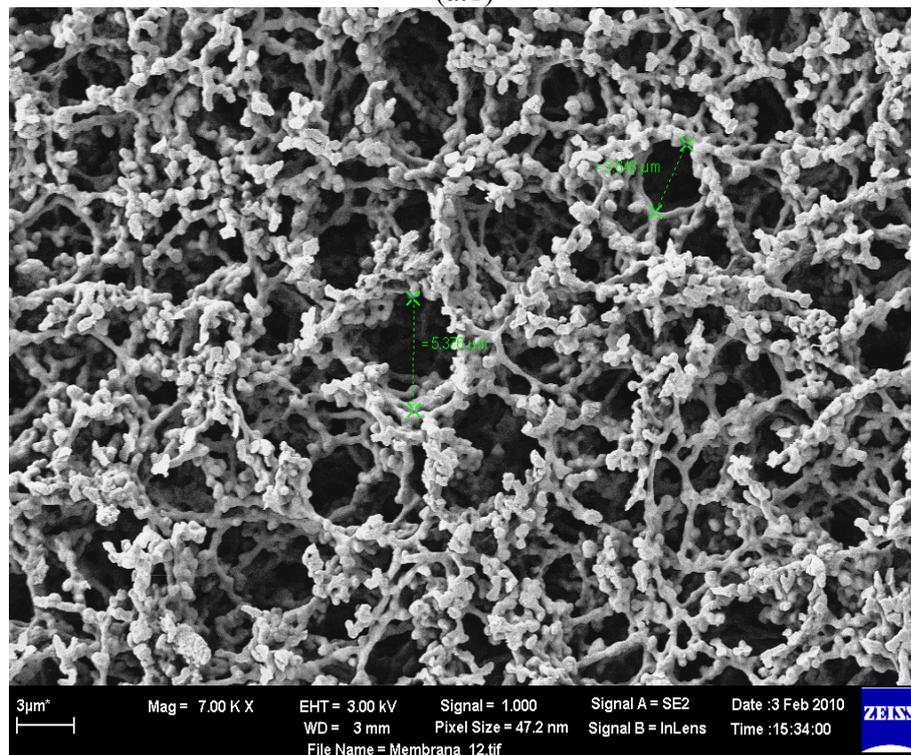
Figura 3.6: Distribuição granulométrica do concentrado fosfático.

3.3 Substratos

Os materiais utilizados como substratos foram uma membrana de éster de celulose, da marca *Shleicher & Shuell – Filtration Life Science*, utilizada em processos de monitoramento de material particulado, e um filtro de papel de celulose regenerada, que é produzida pela reação da celulose, extraída da polpa de madeira, com anidrido acético e ácido acético, da marca *Frama*, este filtro é utilizado em processos de separação de partículas suspensas em meio líquido. As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam fotografias dos dois meios filtrantes utilizados nos experimentos.

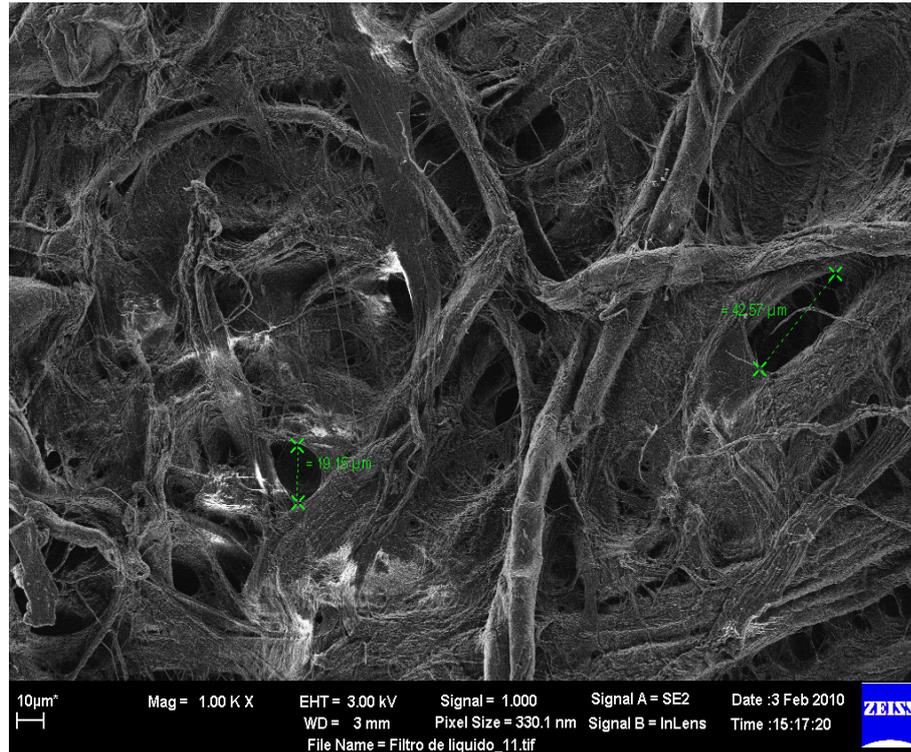


(a.1)

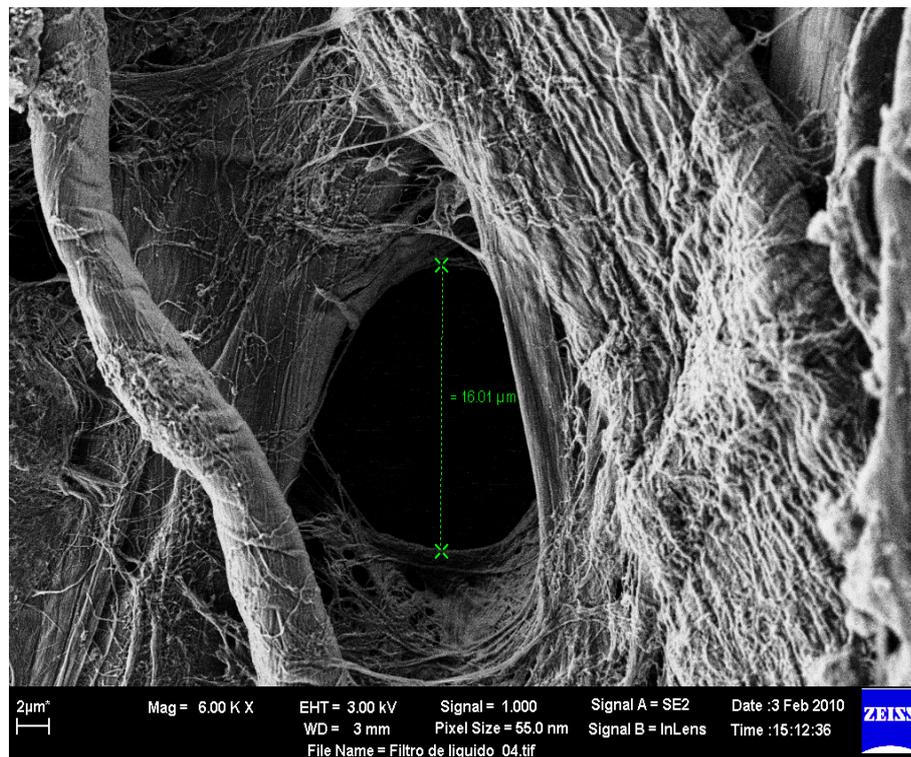


(a.2)

Figura 3.7: Fotografias obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura – FEG – (DQ – UFSCar) para a membrana filtrante de éster de celulose (a.1 e a.2) em (a.1) 5000x e em (a.2) de 7000x.



(b.1)



(b.2)

Figura 3.8: Fotografias obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura – FEG – (DQ – UFSCar) para o filtro de papel de celulose (b.1 e b.2), em (b.1) 5000x e em (b.2) 7000x.

Os poros dos dois meios filtrantes não apresentam valores constantes de seus tamanhos. Alguns desses poros foram medidos e seus valores estão representados na Figura 3.7 (a.1), 7,35 e 5,34 μm ; na Figura 3.7 (a.2), 5,38 e 3,65 μm ; na Figura 3.8 (b.1), 19,15 e 42,57 μm e na Figura 3.8 (b.2), 16,01 μm .

Os dois meios filtrantes apresentam superfícies não rígidas e bastante irregulares. Essas características os diferenciam de substratos já utilizados em estudos anteriores, como o aço inoxidável (Banda, 2002; Felicetti, 2004; Felicetti 2008), o PVC, o vidro e o Teflon[®] (Felicetti, 2008), que possuíam superfícies polidas e rígidas.

As Figuras 3.9 (a) e (b) apresentam imagens topográficas das superfícies da membrana e do filtro de papel. Essas imagens foram feitas no microscópio de força atômica – DEMa – UFSCar. Os valores de rugosidade encontrados para a membrana e para o filtro de papel foram de 344,83 nm e 18,99 nm respectivamente. Estes são valores de altura máxima de rugosidade. Maiores valores de rugosidade implicam em maiores picos de rugosidades, assim as regiões de contato entre as superfícies dos corpos são menores, e eles ficam aderidos uns aos outros com uma intensidade de força mais fraca.

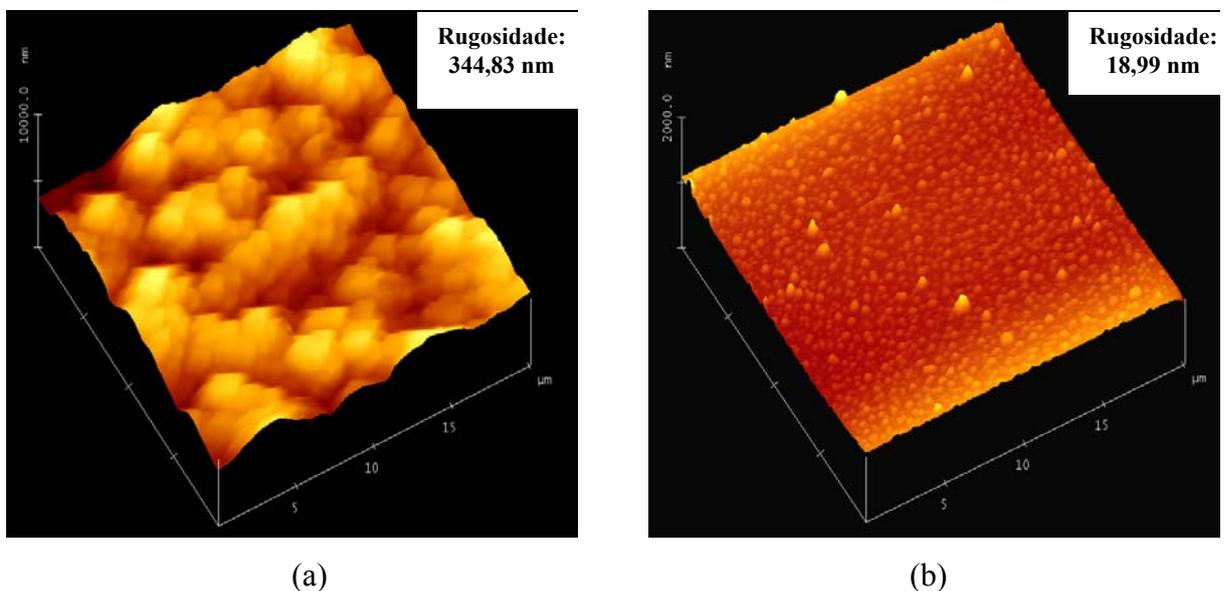


Figura 3.9: Imagens topográficas das superfícies da (a) membrana e do (b) filtro de papel, obtidas no microscópio de força atômica (DEMa – UFSCar).

3.4 Metodologia

A determinação da força de adesão foi realizada utilizando-se a técnica centrífuga. A técnica centrífuga é definida se baseando no princípio de que a força é o resultado da velocidade angular de uma partícula de massa determinada a uma distância determinada do eixo de rotação.

A umidade relativa do ar dentro do laboratório era monitorada e mantida abaixo de 50%, pois acima desse valor a força capilar influencia a força de adesão (Zimon, 1982). Para isso, utilizou-se um aparelho desumidificador e um aparelho de ar condicionado. A temperatura do laboratório foi mantida entre 18 e 19°C e a umidade foi de 40% (± 2). A umidade relativa do ar e a temperatura do ambiente eram medidas utilizando-se um termo-higrômetro digital (Minipa MTH-1360).

Os materiais pulverulentos eram, inicialmente, armazenados em dessecadores com sílica gel, com o intuito de evitar absorção de umidade do ambiente enquanto não estavam sendo utilizados nos experimentos, mantendo-se então uma baixa umidade. Considera-se que, para pós secos, as forças predominantes na determinação da força de adesão são as forças de Van der Waals.

Os meios filtrantes empregados, por serem finos e leves, necessitaram ser adaptados ao sistema experimental. Primeiramente, foram cortados em um tamanho de aproximadamente 14 mm de diâmetro e marcados em quadrantes que serviam como referência na localização de uma determinada partícula ou de uma determinada área do substrato, ao se utilizar o analisador de imagens. A seguir foram colados na superfície do disco de aço inoxidável. O disco de aço servia como suporte para que os dois meios filtrantes pudessem ser levados à microcentrífuga durante os experimentos. A Figura 3.10 apresenta um meio filtrante marcado em quadrantes já adaptado à superfície de um disco de aço.

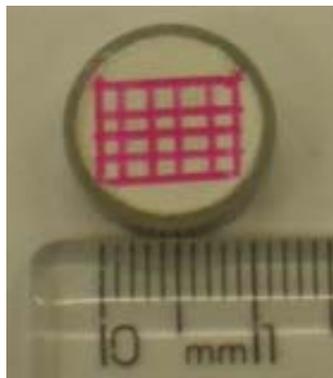


Figura 3.10: Filtro marcado em quadrantes colado na superfície do disco de aço.

Antes de cada corrida experimental as partículas foram dispersas na superfície do substrato usando-se um dispersor de pó (Galai PD-10). Este sistema utilizava o vácuo para dispersar as partículas de pó sobre a superfície do substrato evitando-se a aglomeração das partículas de concentrado fosfático na superfície do substrato, e conseqüentemente minimizando-se a ocorrência de erros na contagem das partículas,

Para a dispersão das partículas, primeiramente era feito vácuo dentro do dispersor, representado pela Figura 3.4, onde já se encontrava o substrato onde deveriam ser depositadas as partículas. Quando a pressão interna encontrava-se em aproximadamente 0,55 bar, cerca de 0,02g de concentrado fosfático era depositado em um local específico na superfície superior do dispersor. Uma válvula era aberta e o pó era sugado pelo vácuo para dentro do dispersor, sendo então disperso sobre a superfície do substrato.

Após as partículas serem dispersas na superfície do substrato, este era retirado de dentro do dispersor e colocado manualmente no porta amostra em formato de um tubo de alumínio, que está representado pela Figura 3.2. Estes tubos foram construídos para inclinar os substratos a 90°, quando a microcentrífuga era acionada. No lado oposto ao que foi colocado o porta amostra contendo o material em estudo, era colocado outro porta amostra com o intuito de evitar a trepidação da centrífuga por um desequilíbrio de pesos.

O substrato foi orientado de forma que a superfície contendo o material pulverulento estivesse posicionada, nos tubos adaptados à centrífuga, para dentro da trajetória circular do movimento de rotação da centrífuga, de forma que a força aplicasse uma pressão sobre as partículas contra a superfície., ou seja, estava sendo aplicada a força centrífuga de compressão, *press-on*.

As velocidades angulares de compressão e as faixas de diâmetro utilizadas para cada substrato utilizado estão representados na Tabela 3.1. Devido à limitação do microscópio utilizou-se, no estudo, como valor mínimo de diâmetro de partícula 9 µm. As velocidades de compressão foram escolhidas levando-se em consideração testes preliminares onde se verificou que 1500 rpm seria a velocidade máxima em que se poderia ter resultados significativos utilizando os materiais deste estudo . Escolheram-se então três valores, sendo um valor menor, um mediano e um maior.

Tabela 3.1: Substratos, velocidades angulares de compressão e as faixas de diâmetro de partículas de concentrado fosfático utilizados nos experimentos

Substrato	Material Pulverulento	Faixas de diâmetro (µm)	Velocidades de compressão (rpm)
Membrana Filtrante de éster de celulose	Concentrado Fosfático	9,0 – 22,0	500; 1000; 1500
Filtro de papel de celulose Regenerada		22,1 – 40,0 40,1 – 54,0 54,1 – 77,0	

Após as partículas serem consolidadas contra a superfície do substrato, estes eram levados a um microscópio óptico.

Para a contagem das partículas era utilizado o analisador de imagens. Em seguida os substratos, contendo as partículas aderidas, eram levados novamente à centrífuga, aplicando-se a velocidade angular de desprendimento, *spin-off*, para separação entre o material particulado e a superfície do substrato. Para a aplicação da velocidade de desprendimento, o substrato era orientado de forma que a superfície com o material pulverulento estivesse posicionada para fora da trajetória circular do movimento de rotação da centrífuga, em que a força cria uma pressão sobre as partículas no sentido contrário ao descrito na força *press-on*, e então as partículas são forçadas a se soltarem da superfície..

As velocidades angulares de desprendimento das partículas usadas nas corridas experimentais estão representadas na Tabela 3.2:

Após a aplicação da força *spin-off*, o número de partículas que permaneciam aderidas sobre a superfície era determinado. Como ilustração, as Figuras 3.11 e 3.12 apresentam imagens das partículas aderidas em meios filtrantes após a velocidade de compressão e algumas velocidades de descompressão.

Tabela 3.2: Velocidades de descompressão utilizadas nos experimentos para cada velocidade de compressão

Substratos	Velocidades de compressão (rpm)	Velocidades de descompressão (rpm)
Membrana filtrante de éster de celulose	500	500 a 14000
	1000	1000 a 14000
	1500	1500 a 14000
Filtro de papel de celulose	500	500 a 14000
	1000	1000 a 14000
	1500	1500 a 14000



(a)

(b)

(c)

Figura 3.11: Partículas aderidas na membrana após serem aplicadas velocidades de: compressão de (a) 500 rpm e desprendimento de (b) 3000 rpm e (c) 14000 rpm.



(a)

(b)

(c)

Figura 3.12: Partículas aderidas no filtro de papel após serem aplicadas velocidades de: compressão de (a) 500 rpm e desprendimento de (b) 5000 rpm e (c) 9000 rpm

Uma distribuição da força de adesão foi obtida aumentando-se a força spin-off consecutivamente após cada contagem.

Os valores de força de adesão foram calculados usando-se a equação (2.34):

$$F_{\text{centrífuga}} = F_{\text{adesão}} \quad (2.34)$$

sendo a $F_{\text{centrífuga}}$ calculada a partir da equação:

$$F_{\text{centrífuga}} = M \cdot \omega^2 \cdot r \quad (3.1)$$

em que ω é a velocidade angular, r é a distância entre o eixo de rotação da centrífuga e a superfície do substrato e seu valor é de 0,57 m e M é a massa média de partícula que foi obtida pela equação:

$$M = \rho_p \cdot V_p \quad (3.2)$$

sendo a densidade da partícula (ρ_p) obtida pelo picnômetro e o volume da partícula (V_p) calculado através da equação:

$$V_p = \frac{4 \cdot A \cdot r_p}{3} \quad (3.3)$$

em que A e r_p são a área projetada da e o raio da partícula, ambos determinados pelo software de análises de imagens Image-Pro Plus 6.0. Foi utilizada uma calibração compatível com a lente do microscópio óptico para se aferir o software.

A equação (3.3) foi examinada por Banda (2002) em se tratando de partículas de formatos irregulares com valores de esfericidade muito distantes ao de uma esfera, como é o caso do concentrado fosfático, que tem valor de circularidade igual a 0,57.

Os resultados de Força de adesão para cada material foram representados por gráficos e para cada curva de porcentagem de partículas aderidas em função da força de adesão determinou-se a força de adesão média (mediana geométrica) e o desvio padrão geométrico. A mediana geométrica é obtida graficamente e representa a força de adesão média com que as partículas estão presas ao substrato. Essa força é definida no ponto em que

há probabilidade de 50% das partículas permanecerem aderidas ao substrato após o desprendimento.

O desvio padrão geométrico calcula a medida numérica da dispersão mínima e máxima da força de adesão da partícula na seção linear do plano logaritmo-probabilidade (Zimon, 1982; Lam *et al.*, 1991).

O desvio padrão geométrico, σ_g , foi calculado utilizando-se a equação:

$$\sigma_g = \frac{\text{mediana geométrica de adesão}}{\text{força de adesão para 16\% de partículas}} \quad (3.4)$$

Na equação (3.4), o valor da força, que equivale a 16% de probabilidade de partículas que permanecem aderidas ao substrato foi determinado graficamente.

Finalizando-se a metodologia serão apresentados os resultados obtidos nos experimentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Depois de desenvolvida a metodologia, descrita no item 3.4, e obtidos os dados experimentais, foram determinados os valores de força de adesão para as partículas de concentrado fosfático quando aderidas ao filtro de papel de celulose regenerada e à membrana de éster de celulose.

4.1 Ensaio com o filtro de papel de celulose regenerada

4.1.1 Efeito da velocidade angular de compressão no desprendimento das partículas

Os gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas no filtro de papel, em função das velocidades angulares de desprendimento, após a aplicação das velocidades centrífugas de compressão de 500, 1000 e 1500 rpm, estão representados nas Figuras 4.1 (a), (b) e (c), respectivamente. A faixa de diâmetro indicada nos gráficos foi obtida pelo programa Image Pro-Plus 6.0.

Os testes foram feitos em triplicata, os gráficos das Figuras 4.1 (a), (b) e (c) representam a média dos três experimentos e os valores do desvio padrão se encontram no Apêndice B.

As curvas da Figura 4.1 indicam que, com o aumento da velocidade angular de descompressão, a porcentagem de partículas aderidas na superfície do filtro diminui para as três velocidades centrífugas de compressão investigadas. Contudo, o aumento da velocidade da centrífuga durante a compressão provoca o não desprendimento total das partículas ao se aplicar a velocidade angular máxima de desprendimento de 14000 rpm.

Percebe-se ainda, na Figura 4.1 (a), (b) e (c), que o aumento da velocidade de compressão tem influência no processo de desprendimento das partículas, sendo que quanto maior for a velocidade de compressão, mais fortemente as partículas ficam aderidas sobre as fibras do filtro.

Os valores de desvio padrão relacionados à média dos três experimentos realizados estão representados nas tabelas do Apêndice B.

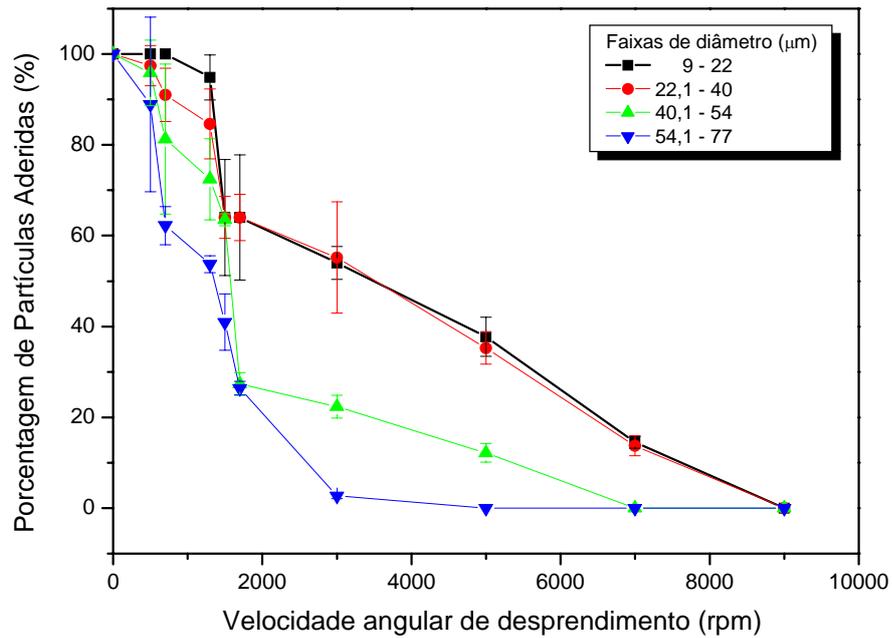


Figura 4.1 (a): Porcentagem de partículas aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm

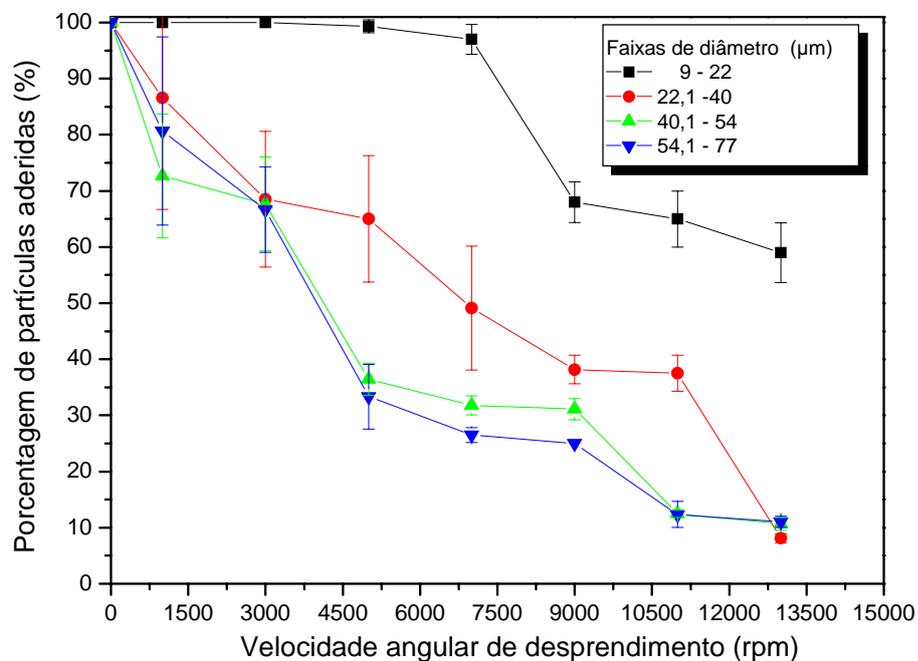


Figura 4.1 (b): Porcentagem de partículas aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm

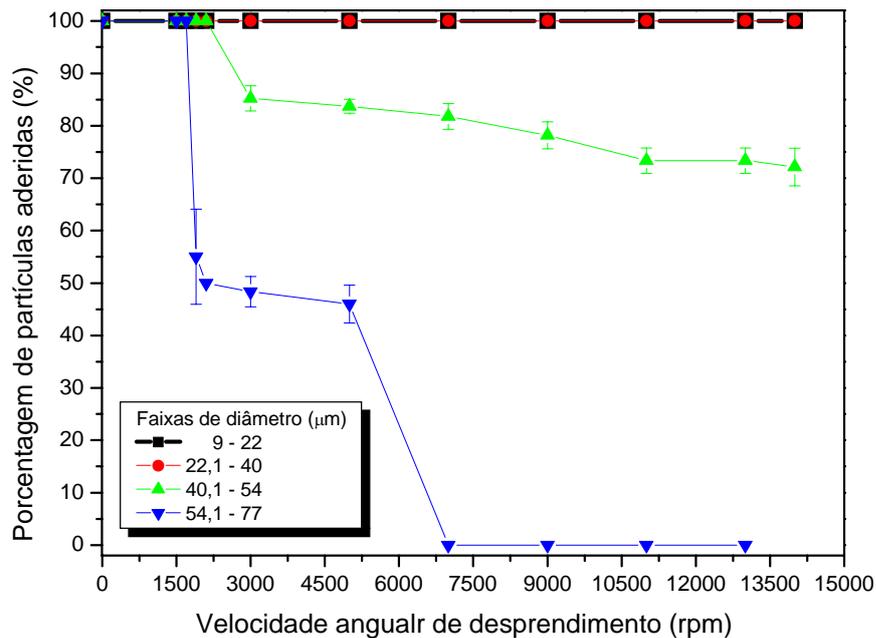


Figura 4.1 (c): Porcentagem de partículas aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1500 rpm.

Na Figura 4.1 (a), em que a velocidade de compressão aplicada foi menor, foi possível obter o desprendimento contínuo das partículas, em que as porcentagens de partículas aderidas ficaram próximas de zero em todas as faixas de diâmetro estudadas. Já na Figura 4.1 (b), percebe-se que com o aumento da velocidade de compressão uma maior porcentagem de partículas continuou aderida ao meio filtrante. Continuou observando o mesmo efeito do aumento da velocidade de compressão sobre o desprendimento das partículas na Figura 4.1(c).

4.1.2 Determinação da força de adesão

Os resultados obtidos da distribuição de partículas aderidas em relação à força de adesão, relativos a um teste experimental, foram representados por gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel, em função da força de adesão. Os gráficos foram construídos para as faixas de diâmetro de partículas de concentrado fosfático, após a aplicação das velocidades angulares de compressão de 500, 1000 e 1500 rpm e estão representados pela Figura 4.2 (a), (b) e (c) respectivamente.

As curvas obtidas apresentaram comportamento linear, nestas coordenadas, indicando que os resultados obedeceram a uma distribuição log-normal.

Observa-se, na Figura 4.2 (a) a (c), que a força de adesão entre as partículas de concentrado fosfático e o filtro de papel aumentou com o aumento do diâmetro médio das partículas.

Utilizando-se a mesma metodologia experimental com a qual foram construídos os gráficos da Figura 4.2 foram construídos também os gráficos das Figuras A.1 (a) a (c), que estão apresentadas no Apêndice A. Essas figuras representam repetições experimentais, dos testes com a rocha fosfática para as velocidades de 500, 1000 e 1500 rpm, com o propósito de se confirmarem os resultados encontrados. Foi possível constatar, em todas as figuras do apêndice, o mesmo comportamento observado na Figura 4.2.

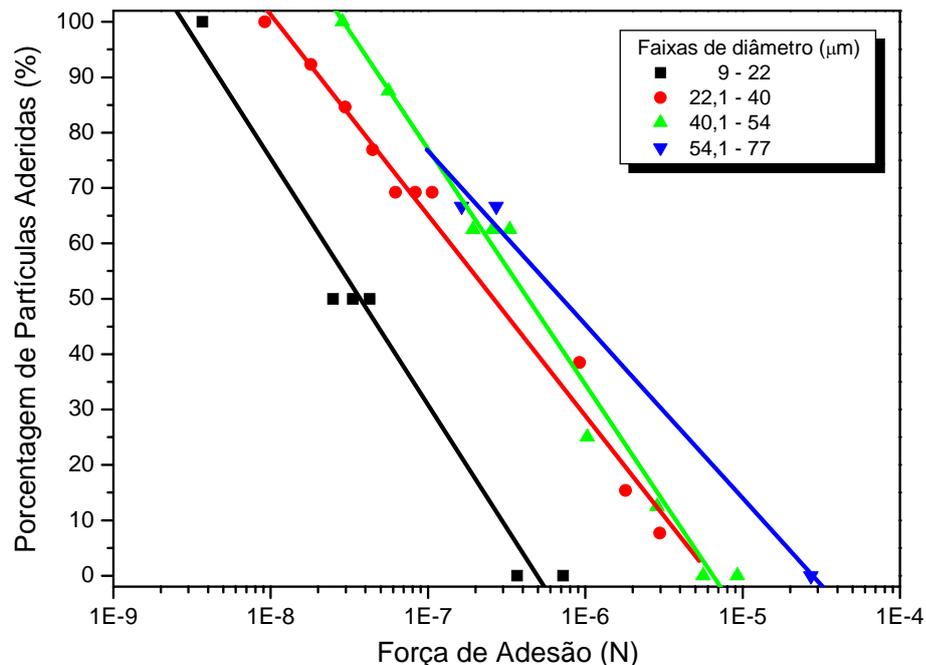


Figura 4.2 (a): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.

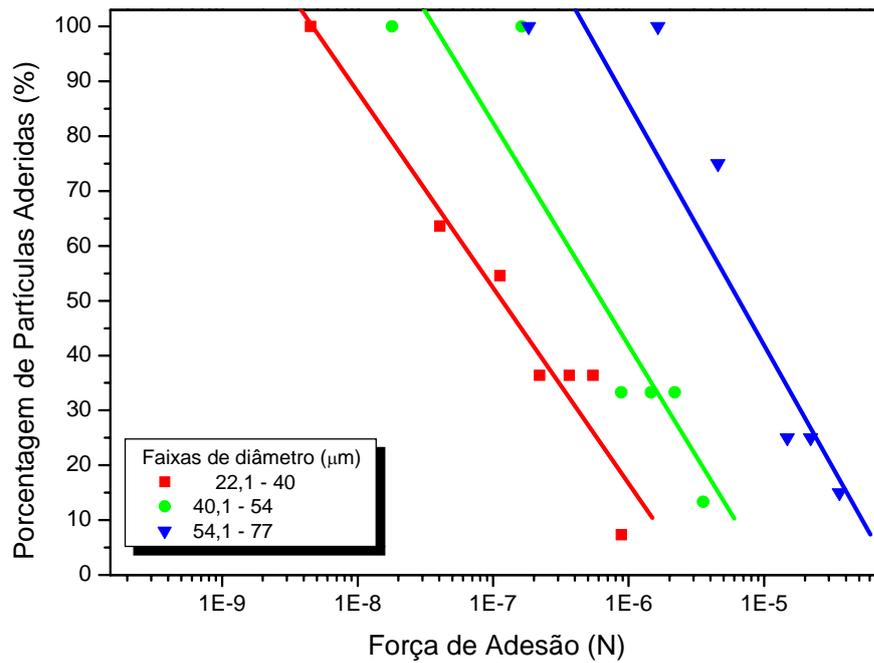


Figura 4.2 (b): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.

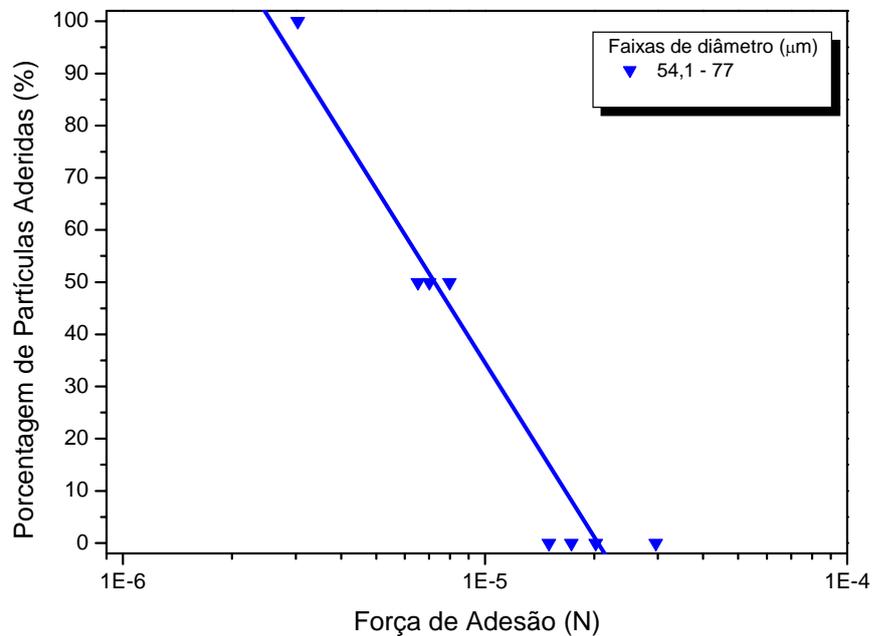


Figura 4.2 (c): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel de celulose em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1500 rpm.

4.2 Ensaio com a membrana de éster de celulose

4.2.1 Efeito da velocidade angular de compressão no desprendimento das partículas

Assim como foi feito para o filtro de papel, realizou-se o mesmo procedimento experimental para a membrana, e os gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na membrana filtrante, em função das velocidades angulares de desprendimento, após a aplicação das velocidades centrífugas de compressão de 500, 1000 e 1500 rpm estão apresentados na Figura 4.3 (a) a (c).

Os testes foram feitos em triplicata, os gráficos das Figuras 4.3 (a) a (c) representam a média dos três experimentos e os valores do desvios padrões encontram no Apêndice B.

Verificou-se na Figura 4.3 (a) a (c) o mesmo comportamento observado na Figura 4.2 (a) a (c), em que com o aumento da velocidade de compressão houve uma diminuição na porcentagem de partículas aderidas. Observou-se novamente que o aumento da velocidade centrífuga de compressão provoca o não desprendimento total das partículas ao se aplicar a velocidade angular máxima de desprendimento de 14000 rpm.

Para a velocidade de compressão de 500 rpm, cujo gráfico está representado pela Figura 4.3 (a), as partículas de menor diâmetro apresentaram uma maior dificuldade em se soltarem, quando aplicadas velocidades de desprendimento menores, comparando-se às partículas de diâmetros maiores.

Para a velocidade de compressão de 1000 rpm, Figura 4.3 (b), todas as partículas aderiram-se com maior intensidade comparando-se ao processo quando foi aplicada a velocidade de compressão de 500 rpm. Pôde-se perceber, na Figura 4.3 (b), que para se desprender aproximadamente a mesma porcentagem de partículas que na Figura 4.3 (a), foram necessárias velocidades angulares de descompressão maiores em cada faixa de diâmetro.

O aumento da velocidade de compressão para 1500 rpm, Figura 4.3 (c), fez com que as partículas ficassem presas à membrana com tal grandeza que não foi possível desprenderem nem até 50% das partículas, mesmo aplicando a máxima velocidade de descompressão da centrífuga (14000 rpm). Sugere-se que seria necessário a utilização de uma centrífuga com a velocidade de rotação superior a 14000 rpm, para se promover um maior desprendimento de partículas após a aplicação da compressão de 1500 rpm

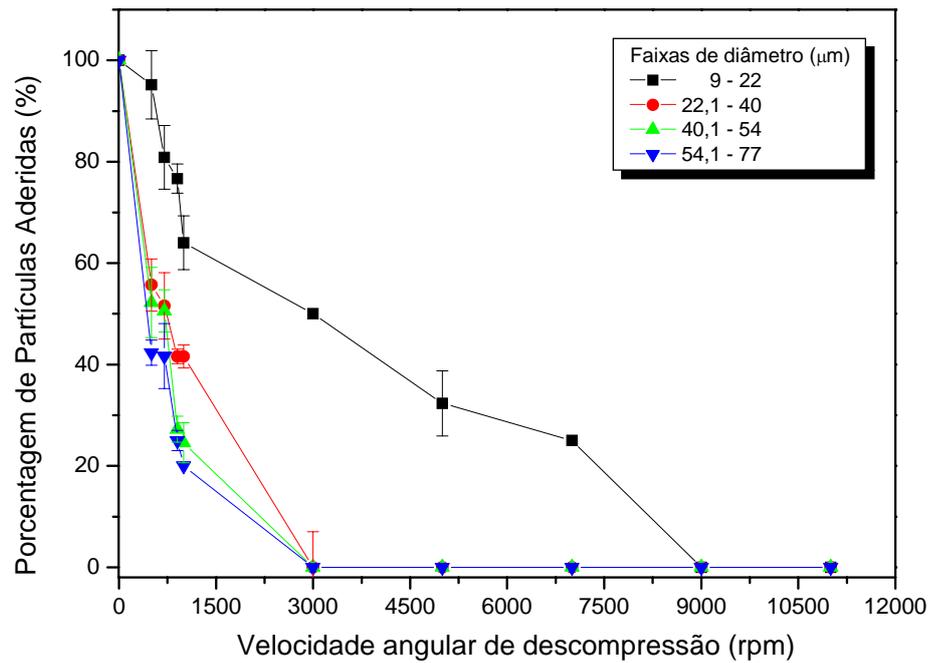


Figura 4.3 (a): Porcentagem de partículas aderidas na superfície da membrana em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.

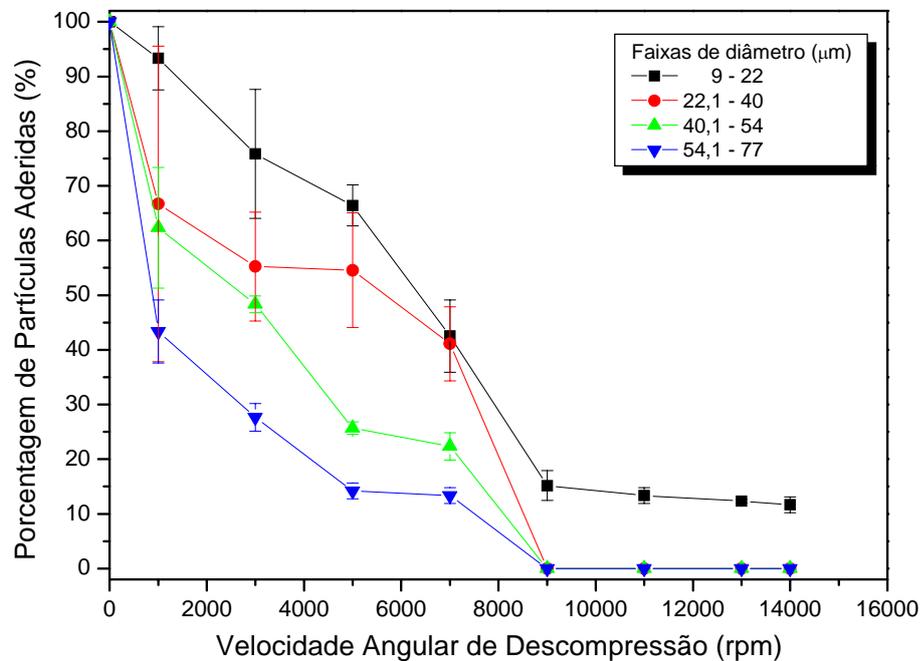


Figura 4.3 (b): Porcentagem de partículas aderidas na superfície da membrana em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.

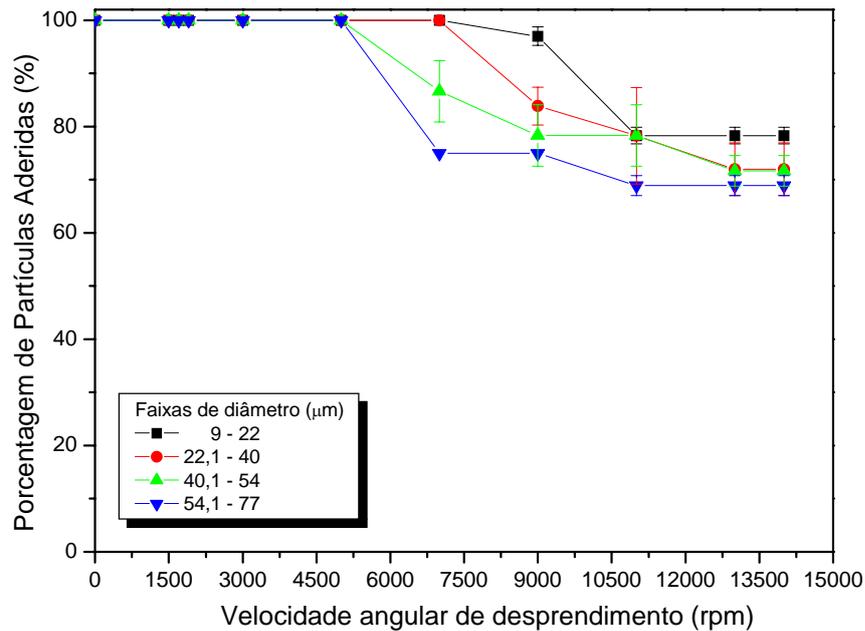


Figura 4.3 (c): Porcentagem de partículas aderidas na superfície da membrana em função da velocidade angular de desprendimento das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1500 rpm.

4.2.2 Determinação da força de adesão

Os resultados obtidos da distribuição de partículas aderidas em relação à força de adesão foram representados por gráficos de porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, em função da força de adesão. Os gráficos foram construídos para as faixas de diâmetro de partículas de concentrado fosfático, após a aplicação das forças de compressão de 500 e 1000 rpm. A Figura 4.4 (a) e (b) apresenta os gráficos de força adesão para o concentrado fosfático aderido à membrana.

As curvas obtidas apresentaram comportamento linear, nestas coordenadas, indicando que os resultados obedeceram a uma distribuição log-normal.

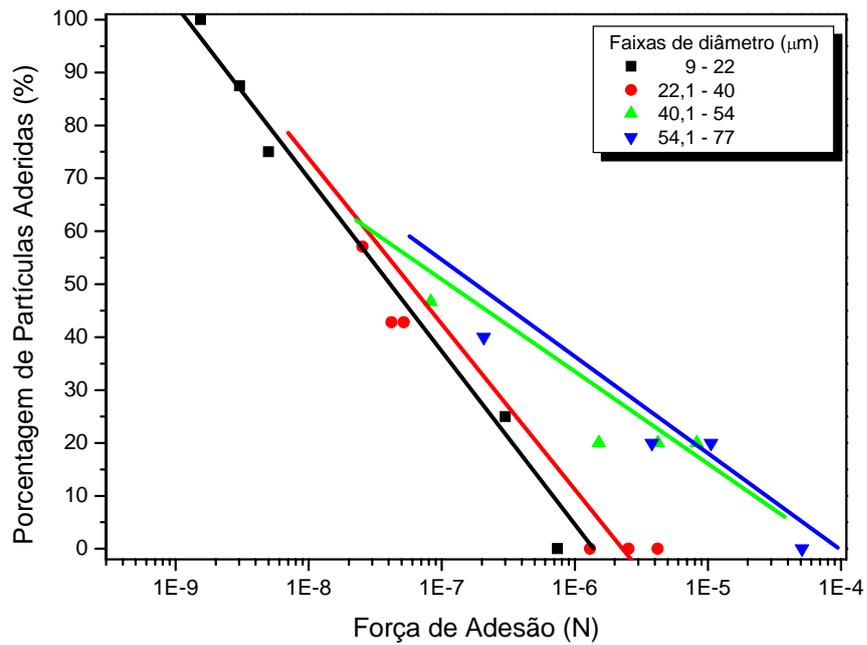


Figura 4.4 (a): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana filtrante em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.

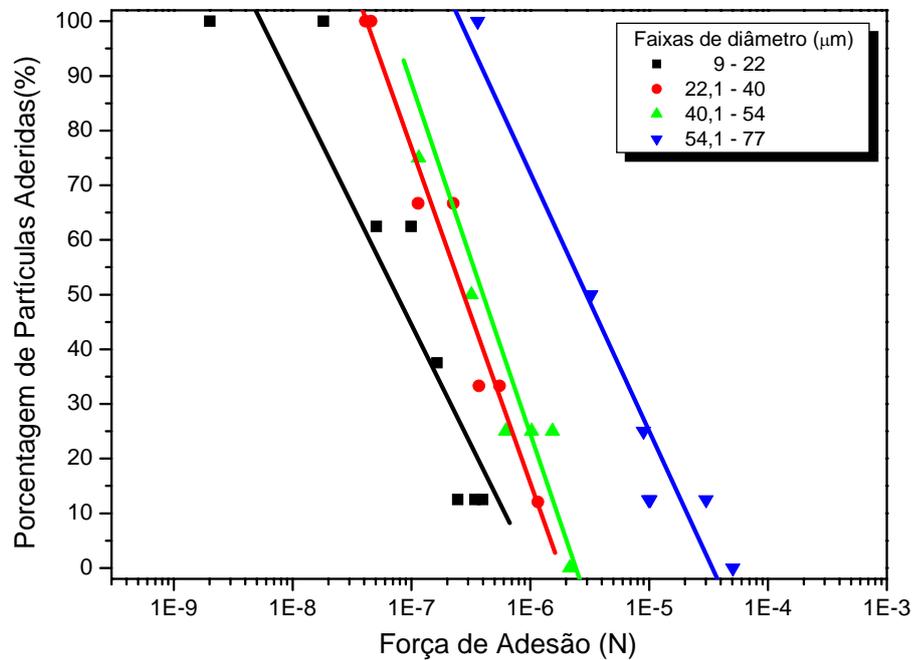


Figura 4.4 (b): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana filtrante em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.

Observa-se, na Figura 4.4 (a) e (b), que a força de adesão entre as partículas de concentrado fosfático e a membrana aumentou com o aumento do diâmetro médio das partículas.

O apêndice A apresenta as Figuras A.2 (a) e (b) das repetições experimentais, dos testes com a membrana filtrante para as velocidades de 500 e 1000 rpm. Constatou-se em todas as figuras o mesmo comportamento observado na Figura 4.4.

Banda (2002) e Felicetti (2004; 2008) obtiveram resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho, em que foram utilizados o filtro e a membrana como substratos. Eles realizaram pesquisas no DEQ – UFSCar, utilizando a técnica centrífuga, em que a centrífuga atingia a velocidade de 14000 rpm, o material pulverulento era o concentrado fosfático e os substratos eram o aço inoxidável – Banda (2002) e Felicetti (2004; 2008) e o PVC, o Teflon[®] e o Vidro – Felicetti (2008), verificando também que o valor da força de adesão aumenta com o aumento do diâmetro médio das partículas.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da mediana geométrica da força de adesão, e seus respectivos desvios padrões geométricos, para o concentrado fosfático após a aplicação das forças press-on de 500, 1000 e 1500 rpm. Nessa tabela, verifica-se que a força de adesão aumenta com o aumento do tamanho das partículas, demonstrando variação diretamente proporcional da força de adesão com o diâmetro das partículas. Nota-se também, que os desvios padrões foram baixos, indicando que os resultados obtidos com a microcentrífuga foram satisfatórios.

Tabela 4.1: Resultado final da força de adesão para os testes realizados com concentrado fosfático.

Substrato	Velocidade angular de compressão (rpm)	Diâmetro médio das partículas (μm)	Mediana Geométrica da Força de Adesão (N)	Desvio padrão Geométrico
Membrana de éster de celulose	500	17,75	$3,95 \times 10^{-8}$	0,08
		26,02	$5,85 \times 10^{-8}$	0,08
		48,01	$1,07 \times 10^{-7}$	0,01
		72,32	$1,76 \times 10^{-7}$	0,01
	1000	12,35	$7,21 \times 10^{-8}$	0,16
		34,34	$2,70 \times 10^{-7}$	0,26
		48,22	$4,15 \times 10^{-7}$	0,30
		69,94	$6,50 \times 10^{-7}$	0,25
Filtro de papel de celulose regenerada	500	16,05	$3,70 \times 10^{-8}$	0,17
		35,00	$3,18 \times 10^{-7}$	0,15
		46,09	$4,29 \times 10^{-7}$	0,16
		61,81	$6,98 \times 10^{-7}$	0,08
	1000	15,45	$1,42 \times 10^{-7}$	0,13
		24,71	$6,16 \times 10^{-7}$	0,13
		50,50	$1,66 \times 10^{-6}$	0,11
	1500	60,01	$7,30 \times 10^{-6}$	0,50

As Figuras 4.5 (a) - (c) e 4.6 (a) - (d) apresentam gráficos de porcentagem de partículas aderidas no filtro de papel e na membrana respectivamente, nas faixas de diâmetro 9 – 22; 22,1 – 40; 40,1 – 54 e 54,1 – 77 μm , em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das velocidades centrífugas press-on de 500, 1000 e 1500 rpm. Verifica-se, nas figuras, que a força de adesão aumenta com o aumento da força de compressão (press-on) aplicada.

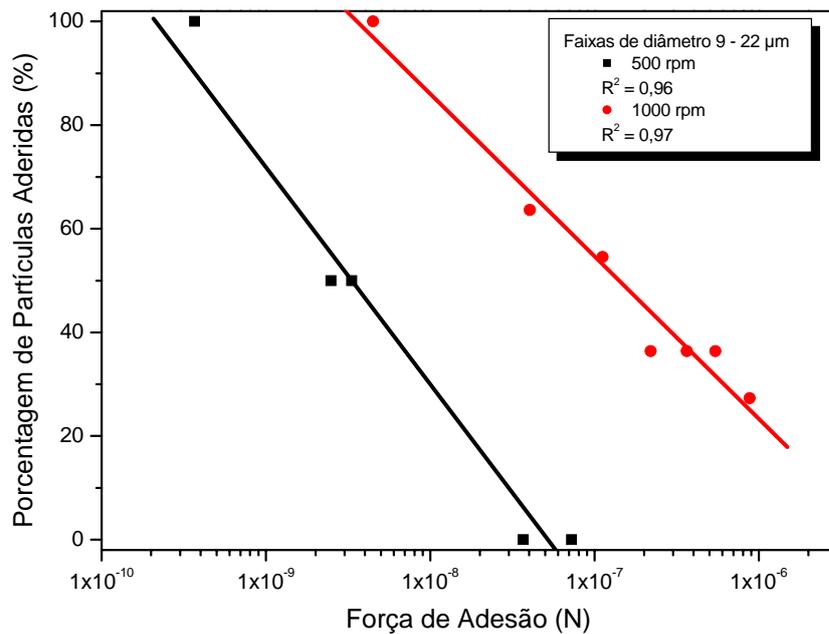


Figura 4.5 (a): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das velocidades de compressão.

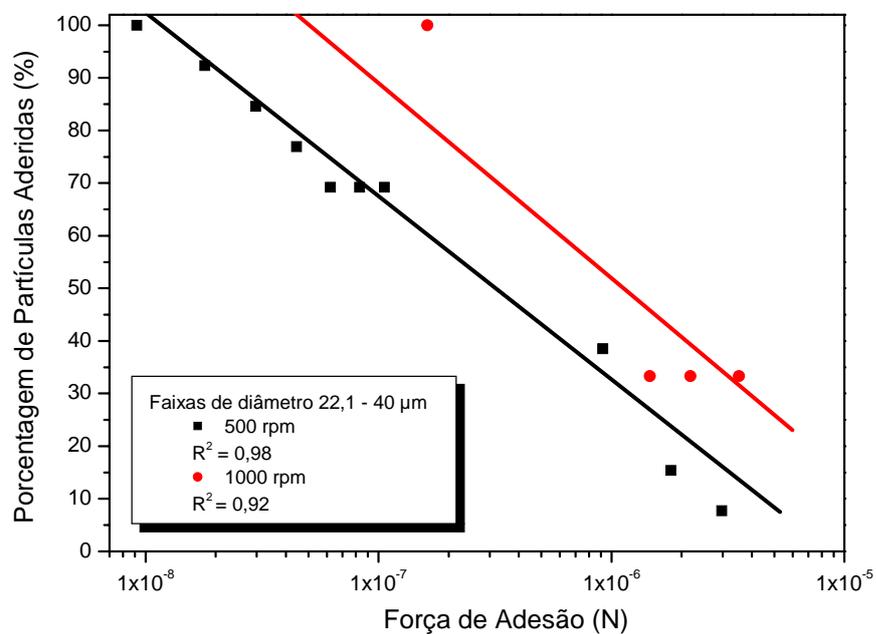


Figura 4.5 (b): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das velocidades de compressão.

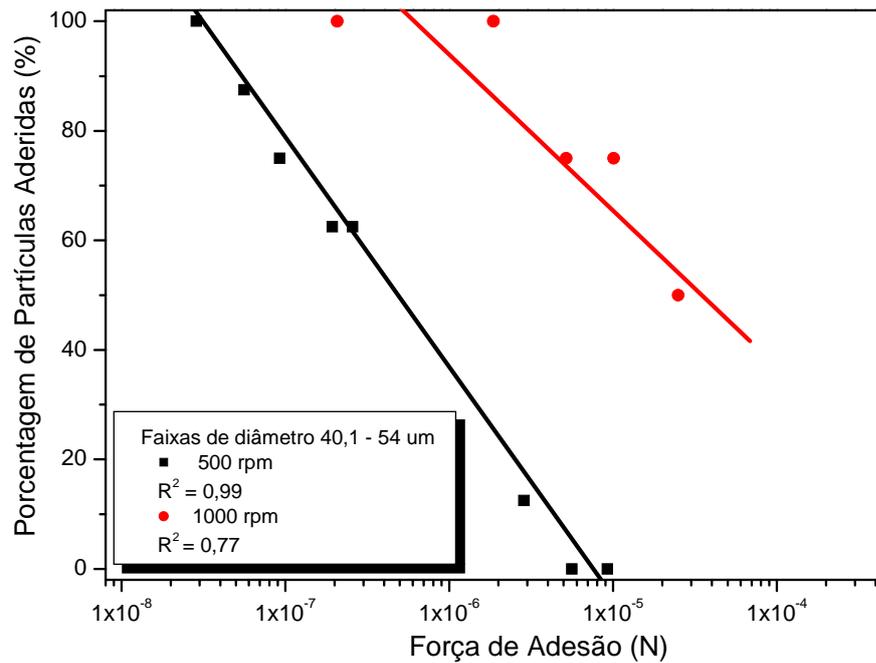


Figura 4.5 (c): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel, na faixa de diâmetro de (c) 40,1 – 54 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das velocidades de compressão.

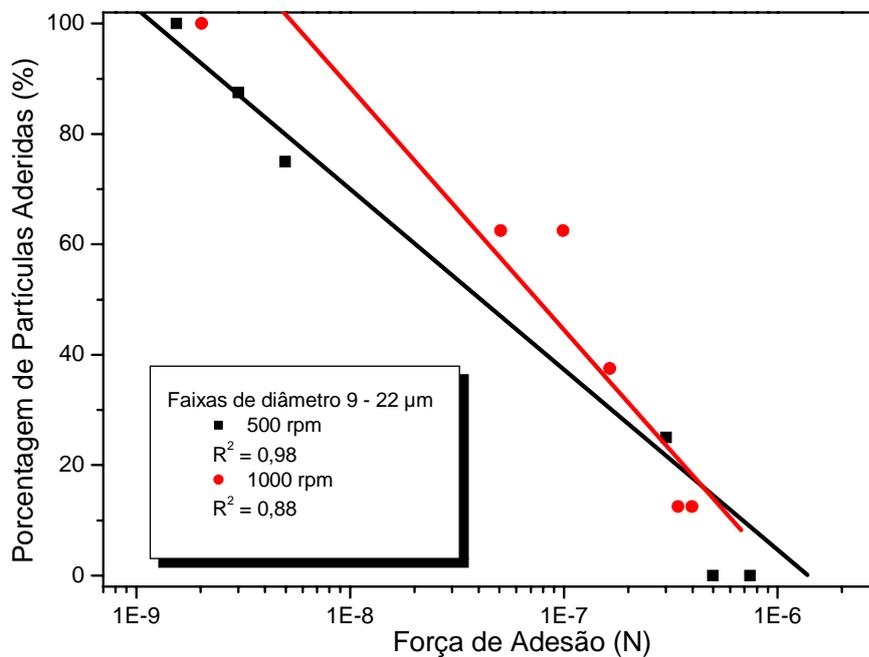


Figura 4.6 (a): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão.

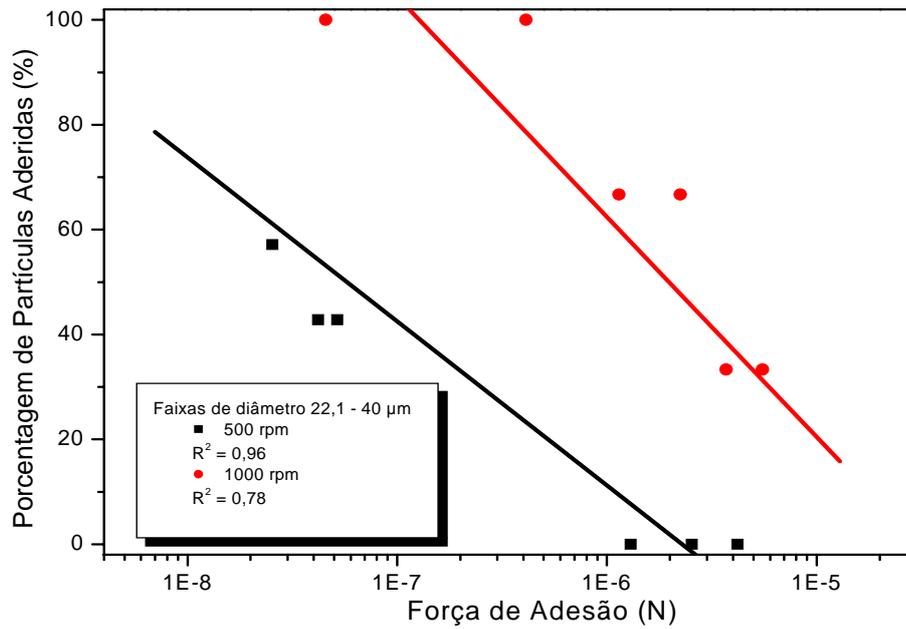


Figura 4.6 (b): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 µm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão.

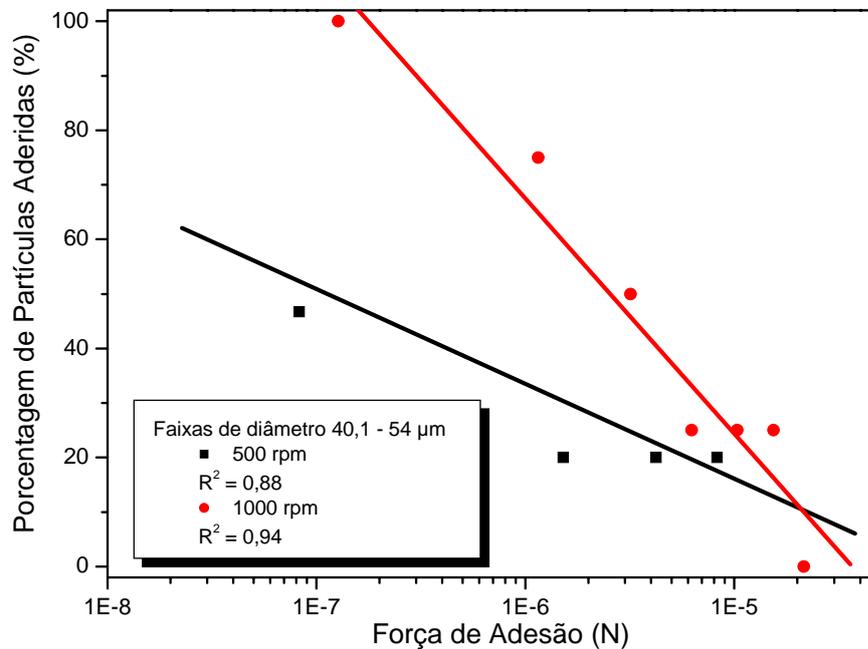


Figura 4.6 (c): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 µm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão.

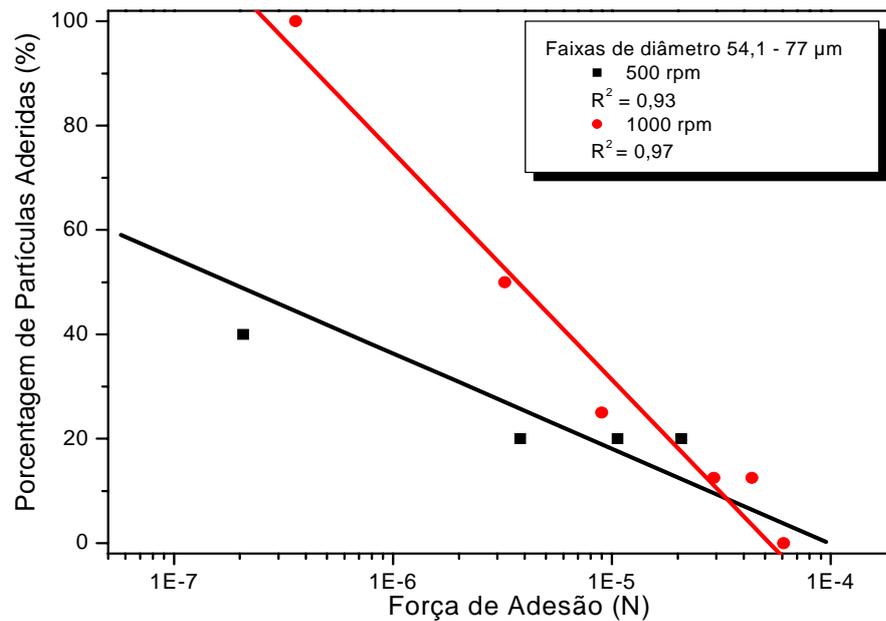


Figura 4.6 (d): Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm em função da força de adesão das partículas de concentrado fosfático após a aplicação de compressão.

As Figuras 4.7 (a) e (b) apresentam gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático, para os dois substratos (filtro de papel e membrana) e para as velocidades centrífugas de compressão de 500 e 1000 rpm respectivamente. Não foi possível construir o gráfico de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas quando aplicada a velocidade de 1500 rpm, pois não obteve-se desprendimento de partículas suficientes para se calcularem valores de forças de adesão. A velocidade máxima de rotação da centrífuga é limitada em 14000 rpm, valor este que não proporcionou o desprendimento de partículas necessário, quando aplicada a velocidade de compressão de 1500 rpm.

Percebe-se que, para uma mesma velocidade angular de compressão aplicada, e uma mesma faixa de diâmetro de partícula, a força de adesão entre as partículas de concentrado fosfático e o filtro de papel mostrou-se maior do que quando comparado com a força na membrana. Isso pode ser justificado pelo fato do filtro de papel apresentar uma menor rugosidade de superfície (18,99 nm) do que a membrana (344,83 nm). Sabe-se que a força de Van der Waals, responsável pela adesão da partícula ao substrato, aumenta com o aumento na área de contato entre eles. Portanto, quanto menos rugosa é a superfície, maior

será o contato entre as superfícies envolvidas, maiores as forças de Van de Waals e consequentemente maior a força de adesão.

A força de adesão depende também do diâmetro da partícula, sendo que quanto maior o diâmetro, maior o valor da força de adesão.

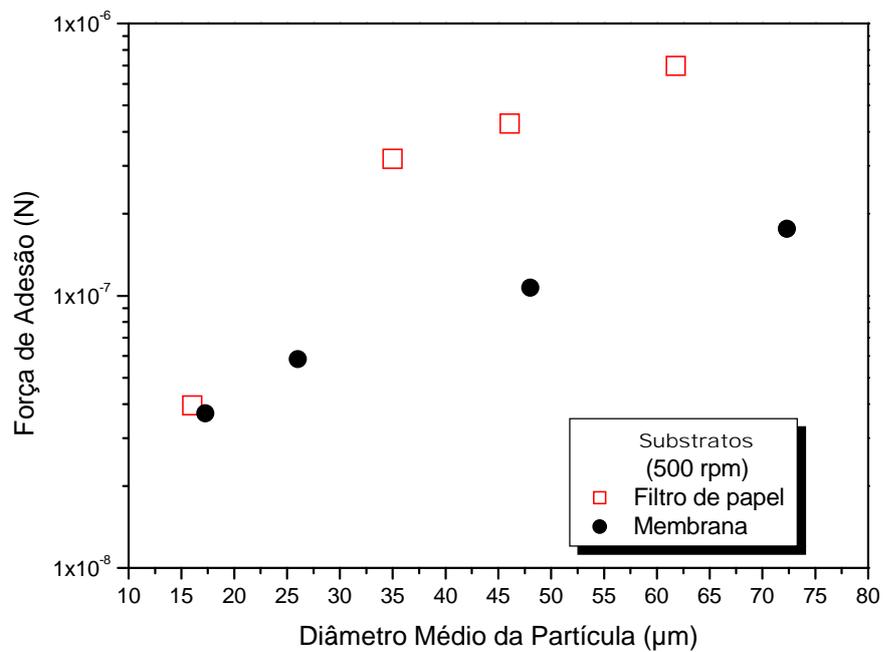


Figura 4.7 (a): Força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de concentrado fosfático, para o filtro de papel e a membrana, após aplicadas as forças de compressão de: 500 rpm.

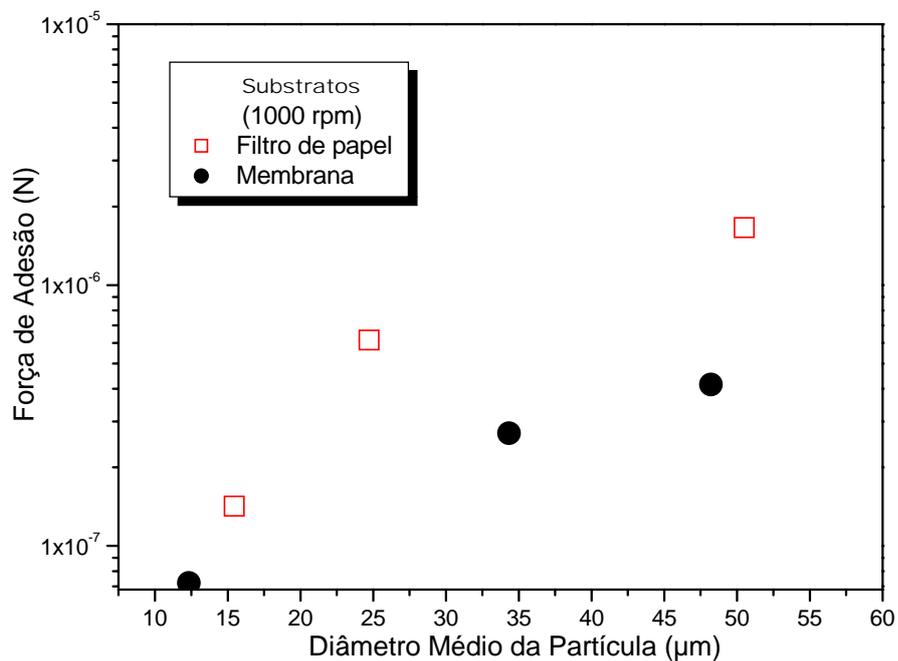


Figura 4.7 (b): Força de adesão em função do diâmetro médio da partícula de concentrado fosfático, para o filtro de papel e a membrana, após aplicadas as forças de compressão de: 1000 rpm.

4.3 Cálculo da Distância de separação Efetiva (z_0) entre a superfície da partícula e a superfície do substrato

A distância de separação efetiva (z_0) entre a partícula e o substrato foi obtida a partir dos valores de força de adesão obtidos para o concentrado fosfático sobre a membrana de éster de celulose e sobre o filtro de papel de celulose.

Considerou-se que o concentrado fosfático estava insento de umidade, devido ao controle da umidade relativa do ar do laboratório. Sendo assim, a força responsável pela adesão seria a força de Van der Waals, portanto calculou-se a distância de separação efetiva pela equação que é um rearranjo da equação 2.4:

$$z_0 = \sqrt{\frac{H \cdot d_p}{12 \cdot F_{adesão}}} \quad (4.2)$$

A constante de Hamaker (H) deriva da interação de Van der Waals entre dois corpos. Ela está relacionada às propriedades do material e ignora a influência de um meio entre os dois corpos que estão interagindo (Hamaker, 1937).

O valor da constante de Hamaker (H) utilizado neste trabalho para o concentrado fosfático foi de 8×10^{-20} J (Silva et al., 1999 apud Felicetti, 2008).

Os valores calculados para distância de separação efetiva (z_0) entre as partículas de concentrado fosfático e a membrana de éster de celulose e entre o filtro de papel de celulose, obtidos pela equação 4.2 estão representados na Tabela 4.2.

A Tabela 4.2 mostra que os valores obtidos para a distância de separação efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e as superfícies dos substratos estão dentro do intervalo de valores (4×10^{-10} a 4×10^{-8}) propostos por Shubert (1981).

Tabela 4.2: Valores de separação efetiva entre as superfícies das partículas de concentrado fosfático e a membrana de éster de celulose e entre o filtro de papel de celulose

Substrato	Velocidade angular de compressão (rpm)	Diâmetro médio das partículas (10^{-6}m)	Distância de Separação Efetiva ($\times 10^{-9}\text{m}$)
Membrana	500	17,75	1,74
		26,02	1,72
		48,01	1,70
		72,32	1,65
	1000	12,35	1,06
		34,34	0,92
		48,22	0,88
		69,94	0,84
Filtro de papel de celulose	500	16,05	1,7
		35,00	0,86
		46,09	0,84
		61,81	0,76
	1000	15,45	0,85
		24,71	0,51
		50,50	0,45

As Figuras 4.8 (a) e (b) apresentam gráficos de distância de separação efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície da membrana de éster de celulose e o filtro de papel de celulose, respectivamente, em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação das velocidades centrífugas de compressão de 500 rpm e 1000 rpm.

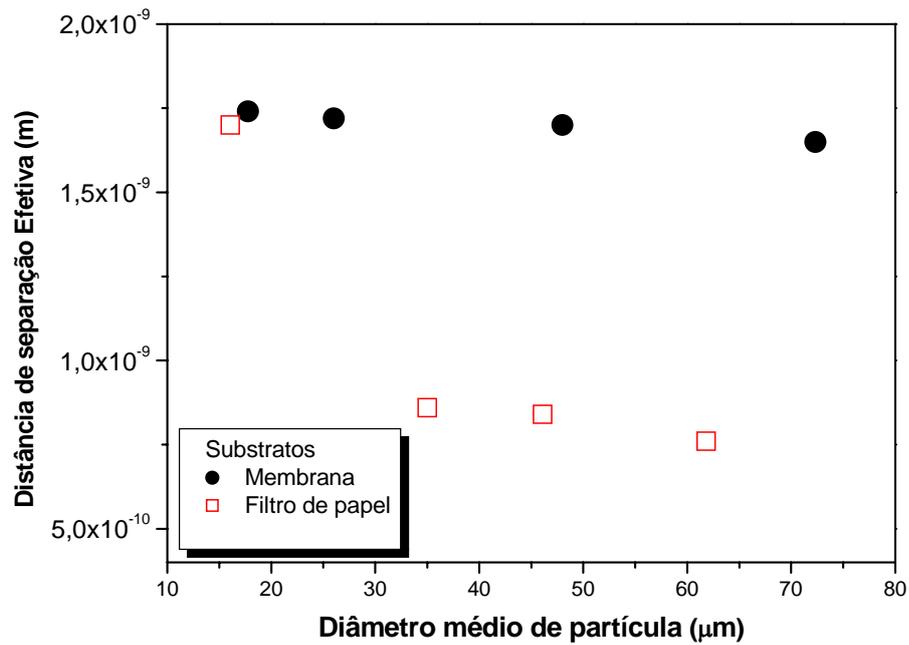


Figura 4.8 (a): Distância de separação efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície da membrana de éster de celulose e o filtro de papel de celulose, em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm.

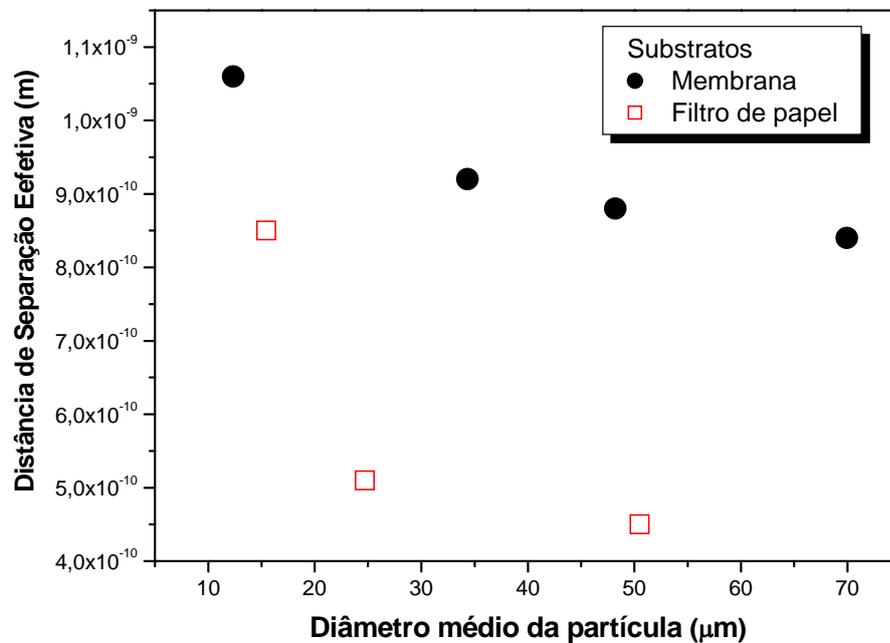


Figura 4.8 (b): Distância de separação efetiva entre as partículas de concentrado fosfático e a superfície da membrana de éster de celulose e o filtro de papel de celulose, em função do diâmetro médio das partículas, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.

Observa-se nas Figuras 4.8 (a) e (b) que os valores de distância de separação efetiva para o concentrado fosfático para os dois meios filtrantes utilizados como substratos diminuíram com o aumento do diâmetro das partículas. Os valores de distância de separação efetiva (z_0) foram maiores quando o substrato utilizado foi a membrana do que quando utilizou-se o filtro de papel. Atribui-se isso novamente ao fato da membrana apresentar um maior valor de rugosidade de sua superfície, 344,83 nm, do que o filtro, 18,99 nm, que pode ser confirmado pela Figura 3.8. Os picos das rugosidades aumentam a distância de separação entre dois corpos que iniciam um contato.

Felicetti, (2008) investigou a distância de separação efetiva entre o concentrado fosfático e substratos construídos de aço inoxidável, de PVC, de Teflon e de Vidro, e observou-se maiores valores de z_0 entre as superfícies de partículas de concentrado fosfático e a superfície do substrato de construído de Teflon, seguida do PVC, do aço inoxidável e por último do vidro. Os valores de rugosidade desses materiais são de 130,63, 77,02, 47,86 e 1,57 nm respectivamente.

4.4 Ajuste de uma equação para os resultados experimentais da força de adesão para o concentrado fosfático

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho foram utilizados para o fim de se estimar uma equação que melhor representasse de forma geral a força de adesão entre as partículas de concentrado fosfático e os dois meios filtrantes, membrana de éster de celulose e filtro de papel utilizados como substratos. Para isso deveriam ser levadas em consideração as várias influências sobre a força de adesão entre dois corpos como, por exemplo: o formato da partícula, a rugosidade da superfície, o tamanho da partícula, a umidade relativa do ar e as propriedades físico-químicas dos materiais envolvidos (Felicetti, 2002).

Seguiu-se a metodologia de Felicetti, (2008), que representou a equação 2.13 pela equação:

$$F_{adesão} = k \cdot d_p \quad (4.4)$$

em que k é uma constante, cujo valor está embutido a umidade relativa do ar e as características químicas e físicas dos materiais pulverulentos. A umidade relativa do ar dentro do laboratório foi mantida em 40% ($\pm 2\%$).

A equação 4.4 foi a equação linear que representou os resultados experimentais para o concentrado fosfático.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam gráficos de força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático após a aplicação das velocidades centrífugas de compressão de 500 e 1000 rpm respectivamente, para os dois substratos investigados neste trabalho.

A equação obtida pela regressão pode ser utilizada em estudos em que a faixa de valores de diâmetro de partículas encontre-se entre 9 e 80 μm .

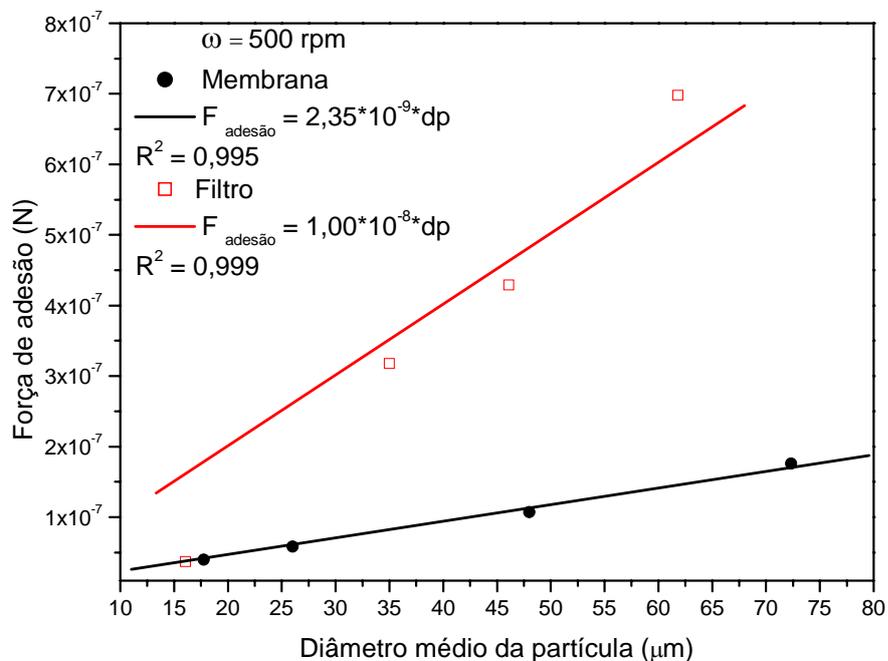


Figura 4.9 : Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 500 rpm

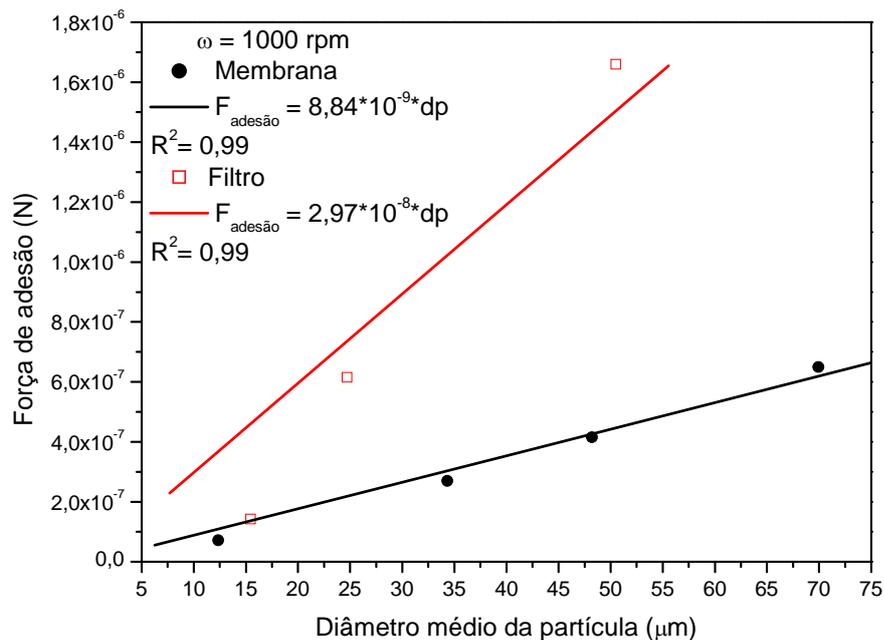


Figura 4.10: Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de 1000 rpm.

Observa-se nas Figuras 4.9 e 4.10 que a força de adesão, para o filtro e para a membrana, aumenta linearmente com o diâmetro médio da partícula do material pulverulento e com a velocidade angular de compressão. O valor do coeficiente de correlação linear para as quatro equações foi de 0,99, e a equação 4.4, que relaciona a força de adesão com o diâmetro médio da partícula apresentou um bom ajuste.

Verificou-se que a variação da força de adesão com o diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático foi semelhante à equação proposta por Corn (1961)

A Figura 4.11 apresenta o gráfico de força de adesão em função da velocidade angular de compressão, para o concentrado fosfático, para a faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm , após a aplicação das velocidades de compressão de 500, 1000 e 1500 rpm, para o filtro de papel.

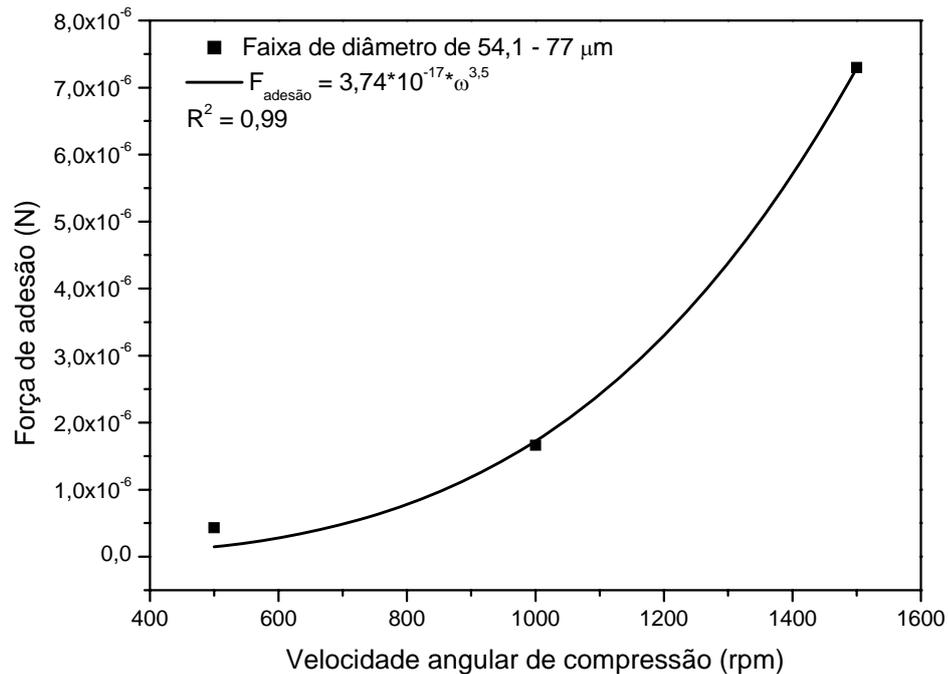


Figura 4.11: Força de adesão em função da velocidade angular de compressão, para o concentrado fosfático, para a faixa de diâmetro de 54,1 – 77 µm, após a aplicação das velocidades de compressão de 500, 1000 e 1500 rpm, para o filtro de papel.

Observa-se no gráfico da Figura 4.11 que a força de adesão aumenta de forma não linear com o aumento da velocidade angular de compressão sobre as partículas de concentrado fosfático. Com base nos resultados, a equação que melhor se ajustou aos resultados experimentais foi a equação:

$$F_{adesão} = k \cdot \omega^{k_1} \quad (4.5)$$

em que o valor do expoente k_1 foi de 3,5, para a faixa de diâmetro de 54,1-77 µm, e o valor do coeficiente de correlação linear foi de 0,99.

Felicetti (2008), estudando a força de adesão para o concentrado fosfático aço inoxidável, PVC, Teflon e vidro, encontrou comportamento semelhante ao deste trabalho para a força de adesão em função do diâmetro médio das partículas e em função da velocidade angular de compressão.

A Figura 4.12 apresenta um gráfico comparando o comportamento da força de adesão em função do diâmetro médio das partículas de concentrado fosfático, quando aderido

a alguns dos substratos utilizados por de Felicetti (2008), Aço, PVC e Teflon e quando aderidos ao filtro de papel e à membrana, substratos utilizados neste trabalho.

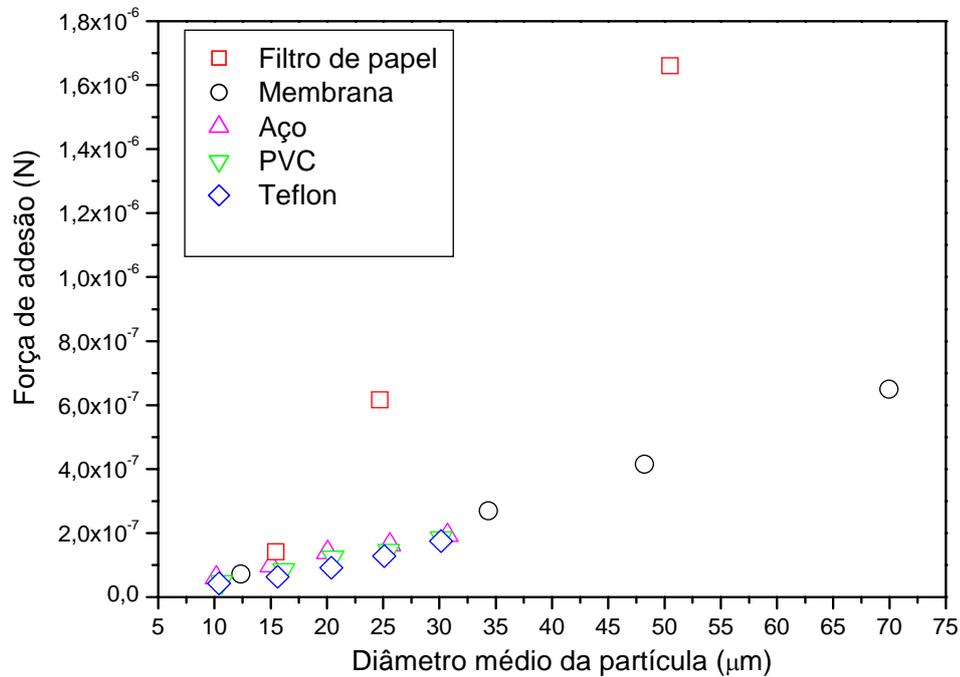


Figura 4.12: Força de adesão em função do diâmetro médio de partículas de concentrado fosfático quando submetidos a uma velocidade de compressão (press-on) de 1000 rpm, sobre o Filtro de papel, a Membrana, o Aço, o PVC e o Teflon.

Pode-se perceber na Figura 4.12 que a força de adesão tem comportamento semelhante para os cinco substratos diferentes, aumentando de forma linear com o diâmetro médio das partículas.

Nestes estudos sobre a força de adesão, em que ao materiais utilizados como substratos eram compostos de celulose, obteve-se bons resultados utilizando-se a centrífuga confirmando-se então a validade da técnica.

5 CONCLUSÕES

Utilizou-se a técnica centrífuga para a investigação do tamanho das partículas de concentrado fosfático e das características estruturais dos dois meios filtrantes utilizados como substratos, o filtro de papel de celulose e a membrana filtrante de éster de celulose, sobre a força de adesão partícula-substrato em diferentes velocidades de compressão e desprendimento.

A partir dos resultados obtidos com os experimentos as principais conclusões desse trabalho foram:

- A força de adesão entre o concentrado fosfático e os dois meios filtrantes utilizados como substratos apresentou um comportamento linear com o diâmetro das partículas.
- A força de adesão entre o concentrado fosfático e os dois meios filtrantes aumentou com o aumento da velocidade angular de compressão.
- A força de adesão entre o concentrado fosfático e o filtro de papel de celulose apresentou maior grandeza em relação à força de adesão entre este material particulado e a membrana filtrante de éster de celulose, quando se aplicou a mesma velocidade de compressão.
- Quanto menos rugosa é a superfície do substrato, maior é o valor da força de adesão, sendo que quando se aderiu o concentrado fosfático, o filtro de papel com menor valor de rugosidade do que a membrana apresentou maiores valores de força de adesão
- Os valores de distância de separação efetiva (z_0) entre o concentrado fosfático e o filtro de papel foram menores do que os valores encontrados entre o concentrado fosfático e a membrana, isso pode ser atribuído novamente ao fato de o filtro de papel apresentar menor rugosidade de superfície do que a membrana.
- Os valores de z_0 entre o concentrado fosfático e os dois meios filtrantes apresentaram valores decrescentes com o aumento do diâmetro das partículas.

- Todos os valores de distância de separação efetiva entre o concentrado fosfático e os dois meios filtrantes encontram-se dentro da faixa de valores sugeridos por Shubert (1981).

Conclui-se finalmente que a aplicação velocidade angular de compressão nas partículas de concentrado fosfático sobre o filtro de papel de celulose e sobre a membrana de éster de celulose influenciaram diretamente na força de adesão partícula-substrato, validando a técnica centrífuga utilizada neste trabalho.

Ao ser aplicar uma velocidade de compressão no material pulverulento sobre o substrato acarreta-se uma diminuição da distância entre a rugosidade das superfícies partícula-substrato, reduzindo a distância de separação efetiva entre a superfície das partículas, aumentando portanto, a força de adesão entre esses

A centrífuga utilizada não foi adequada para os testes em que foram aplicadas maiores compressões.

SUGESTÕES

Para continuidade deste trabalho sugere-se:

- Utilizar materiais pulverulentos com propriedades diferentes, sujeito a alterações diferentes quando comprimido.
- Utilizar materiais pulverulentos com distribuição granulométrica distinta à da utilizada neste trabalho.
- Estudar a adesão do concentrado fosfático em outros tipos de meios filtrantes como substratos.
- Estudar o comportamento da força de adesão ao se aplicar velocidades de compressão menores do que as utilizadas neste trabalho.
- Utilizar uma centrífuga com velocidade de compressão superior a 14000 rpm, para estudar o comportamento da adesão ao se aplicar maiores velocidades de compressão.
- Estudar a influência da composição química dos substratos no comportamento da força de adesão.
- Utilizar outros substratos para o estudo da força de adesão.
- Formular experimentos relacionando velocidades típicas de filtração com o *press-on* real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, F., PATTERSON, T., MUELLER, S. and HOJJATIE, B., “Investigation of paper dryer picking, web transfer quality issues using a new web adhesion and drying simulator”. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.22, n°2, p.217 – 225, 2005.
- ALLEN, T. Particle size measurement. 4^a ed. London: Chapman and Hall. 1990.
- AZEVEDO, S. G. R., “Estudo da influência do formato da partículas na operação de filtração de gases”. São Carlos, UFSCar, 2009, (Dissertação de Mestrado).
- BANDA, G. R. S., Desenvolvimento de uma metodologia experimental, para determinar a força de adesão entre partículas e uma superfície plana, utilizando a técnica centrífuga. São Carlos, UFSCar, 2002, (Dissertação de Mestrado).
- BÖEHME, G., KRUPP, H., RABENHORST, H. and SANDSTEDTE G., “Adhesion measurements involving small particles”. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 40a, p.252-259, 1962.
- BOSKOVIC, L., ALTMAN, I. S., AGRANOVSKI, I. E., BRADDOCK, R. D., MYOJO, T., CHOI, M., Influence of Particle Shape on Filtration Processes. *Aerosol Science and Technology*, volume 39, p.1184 – 1190, 2005.
- DAHNEKE, B., “Influence of flattening on adhesion of particles”. *Journal of Colloid and Interface Science*, v40, n.1, p.1, 1972.

- DERJAGUIN, B. V., MULLER V. M., TOPOROV Y.P., “Effect of contact deformations on the adhesion of particles”. *Journal of Colloid Interface Science*, 1978.
- 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, 1978.
- FELICETTI, M. A., *Determinação da Força de Adesão entre Partículas e uma Superfície Aplicando a Técnica Centrífuga*. São Carlos, UFSCar, 2004, (Dissertação de Mestrado).
- FELICETTI, M. A., *Investigação da Influência do Tamanho das Partículas de Materiais Pulverulentos sobre a Força de Adesão em Diferentes substratos aplicando a Técnica Centrífuga*. São Carlos, UFSCar, 2008, (Tese de doutorado).
- 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 and Surfaces.*, v.3, p. 303 – 319, 1981.
- HAWKINS, A, E. Characterizing the single particle. In RHODES, M. *Principles of powder technology*. Ed. John Wiley & Sons Ltd. P 9 – 31, 1990.
- HAMAKER, H. C., “The London – Van der Waals attraction between spherical particles”. *Physica 4(10)*, 1058–1072, 1937.
- KENDALL, K., “Adhesion: molecules and mechanics”. *Science*, v.263, p.1720 – 1725, 1994.

- KENDALL, K., STAINTON, C., “Adhesion and aggregation of fine particles”. *Powder Technology*, v.121, p.223-229, 2001.
- KRUPP, H., “Particle adhesion theory and experiment”, *Colloid Interface Science*, vol. 1, n.2, p.111-239, 1967.
- LAM, K. K., NEWTON, J. M., “Investigation of applied compression on the adhesion of powders to a substrate surface”. *Powder Technology*, v.65, p. 167-175. 1991.
- LAM, K. K., NEWTON, J. M., “The influence of the time of application of contact pressure on particle adhesion to a substrate surface”. *Powder Technology*, v.76, p. 149-154. 1993.
- LODGE, K. B., “Techniques for the measurement of forces between solids”, *Colloid Interface Science*, v.19,p.27,1983.
- MAUGIS, D., “On the contact and adhesion of rough surfaces”. *Journal of Adhesion Science and Technology*., v.10, p.161 – 175, 1992.
- MIZES, H., OTT, M., EKLUND, E., HAYS, D., “Small particle adhesion: measurement and control”. *Colloids and Surfaces*, v.165, p. 11 – 23, 2000.
- O'BRIEN, W. J. and HERMANN, J. J., “Strength of liquid bridges between dissimilar materials”. *Journal of Adhesion*, v.5, p.91-103, 1973.
- PIANTINO, F. “Determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície plana e técnica centrífuga.” São Carlos, UFSCar, 2003, (Monografia).

- PODCZECK, F., NEWTON, J.M., “Development of an ultracentrifuge technique to determine the adhesion and friction properties between particles and surfaces”. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, v.84, n.9, p. 1067 – 1071, 1995.
- 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., “Particles Adhesion”. In: Sastra, K.V.S. (ed.) *agglomeration 77*, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, p.97-129, 1977.
- SHUBERT, H., “Principles of Agglomeration”. *International Chemical Engineering.*, Vol.21, n.3, p.363-371, 1981.
- SILVA, C. R. N., NEGRINI, V. S., AGUIAR, M. L., COURY, J. R., “Influence of gas velocity on cake formation and detachment”, *Powder Technology*, v.101, n.2, p. 165-172, 1999.
- STEWART, P. J. “Particles interaction in pharmaceutical systems”. *Pharmaceutical Interaction.*, v.7, p.146-149, 1986.
- SVAROVSKY, L. Characterization of powders. In RHODES, M. *Principles of powder technology*. Ed. John Wiley & Sons Ltd. P. 35-68, 1990.
- WU, S., *Polymer Interface and Adhesion*; Dekker, New York, 1982.
- ZIMON A. D., “The adhesion of dust and powders”, *Adhesion of Dust and Powders*, Consultants Bureau, New York, p.109-125, 1982.

XIE, H.Y., "The role of Interparticle forces in the fluidization of fine particles". Powder Technology, v.94, p.99 – 108, 1997.

Apêndice A

Gráficos de réplicas experimentais para confirmação dos resultados de Força de adesão em função do diâmetro médio das partículas.

Para a comprovação dos resultados encontrados para a Força de adesão em função dos diâmetros médios das partículas de concentrado fosfático sobre a superfície do filtro de papel de celulose e da membrana de éster de celulose, para as velocidades de compressão de 500, 1000 e 1500 rpm, foram feitas réplicas experimentais cujos os gráficos estão representados pelas Figuras A.1 (a) a (c) e A.2 (a) e (b).

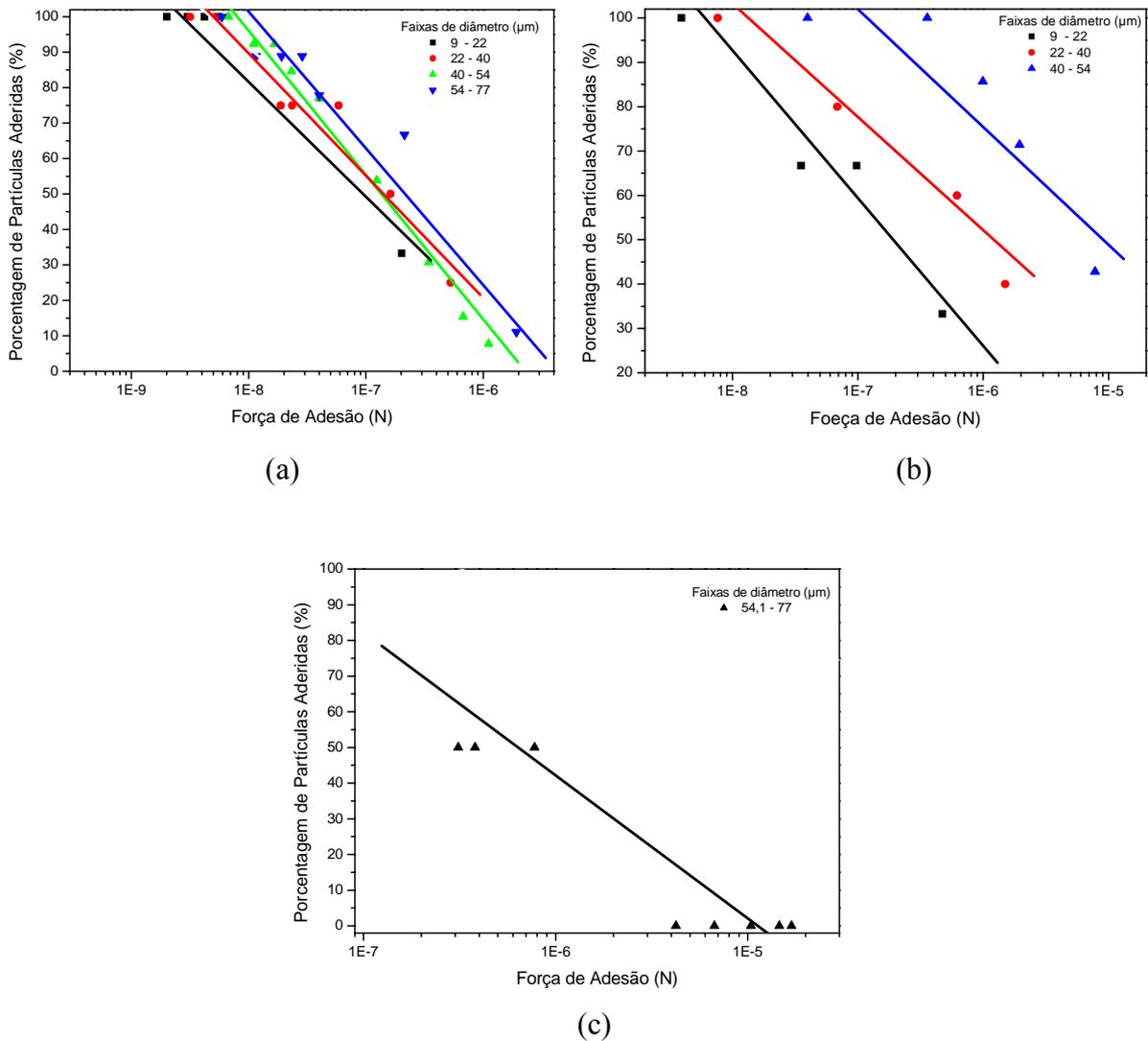
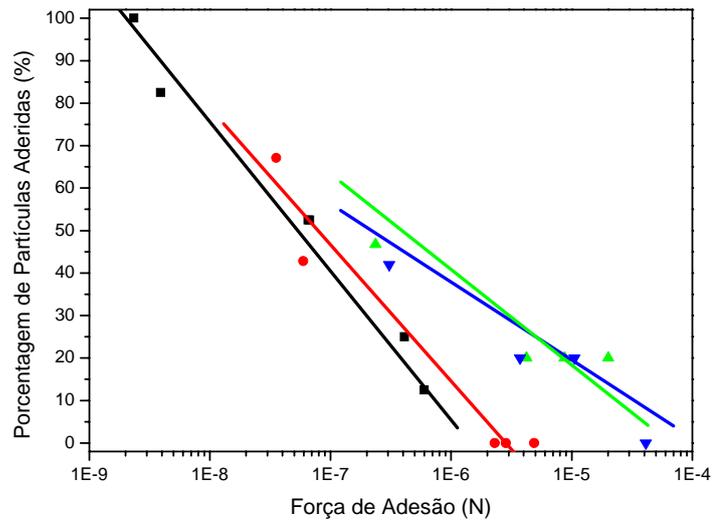
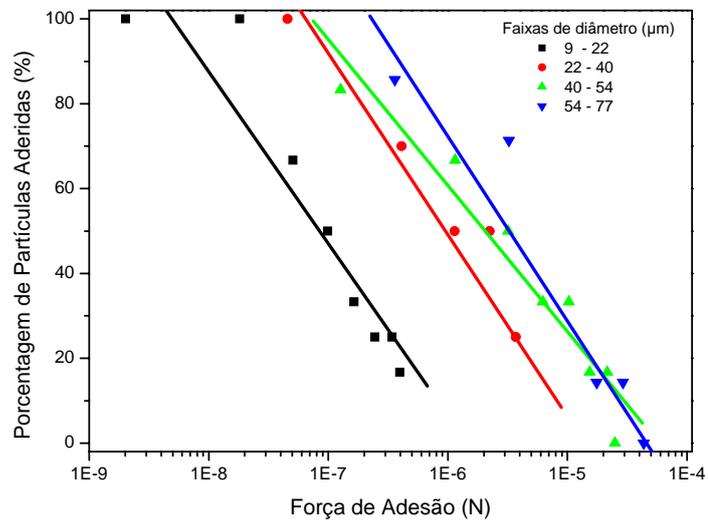


Figura A.1: Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície do filtro de papel em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de A.1(a) 500, (b) 1000 e (c) 1500 rpm.



(a)



(b)

Figura A.2: Porcentagem de partículas de concentrado fosfático aderidas na superfície da membrana filtrante em função da força de adesão, após a aplicação da velocidade centrífuga de compressão de A.2(a) 500 e (b) 1000 rpm.

Apêndice B

Tabelas com valores de desvio padrão relacionados à média dos três experimentos realizados.

Tabela B1 : Valores em porcentagem dos desvios padrões para o filtro de papel, com velocidade de compressão de 500 rpm

Faixa de diâmetro (µm)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 1) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 2) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 3) (%)	Porcentagem de desvio (%)
9,0 - 22,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	90,1	94,5	5,23
	50	67	75	19,95
	50	67	73	19,20
	50	55	57	6,68
	35	35,5	42,75	11,49
	15	15,4	13	8,89
0	0	0	0,00	
22,1 - 40,0	100	100	100	0,00
	92,3	100	100	4,56
	84,6	96,15	92,3	6,46
	76,9	92,3	84,6	9,10
	69,2	60	64	7,16
	69,2	59	64	7,96
	69,2	46,4	50	22,21
	38,5	35,75	31,5	10,00
	15,4	11,2	14,65	16,29
0	0	0	0,00	
40,1 - 54,0	100	100	100	0,00
	87,5	100	100	7,53
	62,5	87,5	93,75	20,35
	62,5	79,8	75	12,33
	62,5	63	65	2,08
	25	30	27	9,21
	25	20	22	11,27
	12,5	10	14	0,00
	0	0	0	0,00
0	0	0	0,00	
54,1 - 77,0	100	100	100	0,00
	66,7	100	100	21,63
	66,7	58,3	61,65	6,80
	52,18	53,2	55,8	3,47
	48	38,7	36,2	15,18
	25	26,2	28	5,72
	3	3	2	21,65
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
0	0	0	0,00	

Tabela B2: Valores em porcentagem dos desvios padrões para o filtro de papel, com velocidade de compressão de 1000 rpm

Faixa de diâmetro (µm)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 1) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 2) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 3) (%)	Porcentagem de desvio (%)
9,0 - 22,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	98	100	1,16
	100	96	95	2,73
	65	67	72	5,30
	60	70	65	7,69
	55	57	65	8,97
22,1 - 40,0	100	100	100	0,00
	63,64	98	98	22,92
	54,54	75	76	17,68
	52	71	72	17,34
	36,4	56	55	22,47
	36,4	41,1	37	6,70
	36,4	41,1	35	8,52
	7,3	8	9	10,55
40,1 - 54,0	100	100	100	0,00
	60	78	80	15,16
	58	72	73	12,39
	33,33	37	39	7,89
	33,33	30	32	5,27
	33,33	30	30	6,18
	13,33	12	12,23	5,68
	10	12	10	10,83
54,1 - 77,0	100	100	100	0,00
	100	72	70	20,79
	75	60	65	11,46
	40	30	30	17,32
	25	27,5	27	4,99
	25	25	25	0,00
	15	11	11	18,72
	10	11,1	12	9,08

Tabela B3: Valores em porcentagem dos desvios padrões para o filtro de papel, com velocidade de compressão de 1500 rpm

Faixa de diâmetro (µm)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 1) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 2) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 3) (%)	Porcentagem de desvio (%)
9,0 - 22,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
22,1 - 40,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
40,1 - 54,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	85,71	87	83	2,40
	83,2	83	85	1,32
	81,4	80	84	2,48
	78,5	80	76	2,59
	71,43	73,6	75	2,45
	71,43	73,6	75	2,45
71,43	70	75	3,57	
54,1 - 77,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	50	55	60	9,09
	50	50	50	0,00
	50	45	50	5,97
	50	45	43	7,84
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00

Tabela B4 : Valores em porcentagem dos desvios padrões para a membrana, com velocidade de compressão de 500 rpm

Faixa de diâmetro (µm)	Porcentagem m de partículas aderidas (Teste 1) (%)	Porcentagem m de partículas aderidas (Teste 2) (%)	Porcentagem m de partículas aderidas (Teste 3) (%)	Porcentagem de desvio (%)
9,0 - 22,0	100	100	100	0,00
	87,5	100	98	7,06
	75	87,5	80	7,78
	75	75	80	3,77
	70	60	62	8,27
	50	50	50	0,00
	25	37	35	19,88
	25	25	25	0,00
	0	0	0	0,00
22,1 - 40,0	100	100	100	0,00
	57,1	60	50	9,24
	42,8	55	57	14,90
	42,8	42	40	3,47
	42,8	39	43	5,42
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
40,1 - 54,0	100	100	100	0,00
	46,7	50	60	13,26
	50	46,7	55	8,26
	25	26,7	30	9,34
	20	26,7	27	16,11
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
54,1 - 77,0	100	100	100	0,00
	40	42	45	5,94
	50	37	38	17,36
	27	23	25	8,00
	20	20	20	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00

Tabela B5: Valores em porcentagem dos desvios padrões para a membrana, com velocidade de compressão de 1000 rpm

Faixa de diâmetro (µm)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 1) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 2) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 3) (%)	Porcentagem de desvio (%)
9,0 - 22,0	100	100	100	0,00
	100	90	90	6,18
	62,5	80	85	15,57
	62,5	66,7	70	5,66
	37,5	40	50	15,56
	12,5	15	18	18,15
	12,5	12,5	15	10,82
	12,5	12,5	12	2,34
22,1 - 40,0	100	100	100	0,00
	100	50	50	43,30
	66,7	49	50	18,00
	66,7	48	49	19,27
	33,3	45	45	16,43
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
40,1 - 54,0	100	100	100	0,00
	75	57	55	17,67
	50	47	48	3,16
	25	27	25	4,49
	25	20	22	11,26
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
54,1 - 77,0	100	100	100	0,00
	50	40	40	13,32
	25	28	30	9,09
	12,5	15	15	10,18
	12,5	12,5	15	10,82
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00
	0	0	0	0,00

Tabela B6 : Valores em porcentagem dos desvios padrões para a membrana, com velocidade de compressão de 1500 rpm

Faixa de diâmetro (µm)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 1) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 2) (%)	Porcentagem de partículas aderidas (Teste 3) (%)	Porcentagem de desvio (%)
9,0 - 22,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	98	95	98	1,79
	80	76,9	78	2,01
	80	76,9	78	2,01
	80	76,9	78	2,01
22,1 - 40,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	80	84,61	87	4,24
	70	76,9	88	11,60
	67	76,9	72	6,88
	67	76,9	72	6,88
40,1 - 54,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	90	80	90	6,66
	75	75	85	7,37
	75	75	85	7,37
	70	75	70	4,03
	70	75	70	4,03
54,1 - 77,0	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	100	100	100	0,00
	75	75	75	0,00
	75	75	75	0,00
	70	66,7	70	2,77
	70	66,7	70	2,77
	70	66,7	70	2,77

Apêndice C

Tabelas com valores obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0).

Tabela C1: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato filtro de papel.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
21,31046	265,216	10,65523	122,3619	
16,55843	314,03	8,279216	90,77255	
12,37283	333,17	6,186417	116,6877	
10,85659	52,39266	5,428295	64,33737	
19,88574	96,2863	9,942868	39,78972	
14,55574	2,126303	7,277868	57,45732	
15,91574	2,126303	7,957868	29,57872	
12,95574	33,5283	6,477868	79,96972	
13,91574	22,8173	6,957868	63,80272	
19,22574	186,4026	9,612868	49,06772	
17,82574	93,76854	8,912868	39,74822	
11,96505	82,43954	5,982523	69,3373	
16,62275	133,7675	8,311373	64,13272	
14,9877	78,43954	7,493848	59,42599	
18,77899	73,76854	9,389493	74,42604	
20,10741	142,7724	10,0537	64,25728	
20,11188	33,76744	10,05594	89,46455	
12,1079	83,76854	5,982518	94,35725	
10,1079	35,43963	4,982521	77,12595	
20,83201	130,7725	10,34457	94,46575	
321,00	2196,8	160,28	1440,56	Somatória (Σ)
16,05	109,84	8,01	72,02	Média

Tabela C2: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato filtro de papel.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
25,6936	108,9132	12,8468	150,5697	
31,6932	211,4549	15,8466	190,6582	
30,6128	200,3953	15,3064	203,6853	
23,7929	120,8314	11,89645	156,7763	
34,1942256	80,3657	17,09711	102,3659	
28,0947756	78,32564	14,04739	206,3564	
26,8573256	156,3254	13,42866	103,4569	
25,4618256	109,365	12,73091	109,3654	
36,8527056	196,3254	18,42635	152,6398	
39,9544256	136,3548	19,97721	175,369	
38,3504256	98,03659	19,17521	146,3598	
36,9295456	157,3698	18,46477	128,9346	
37,8369456	302,1364	18,91847	178,2369	
39,6295456	169,8631	19,81477	206,3589	
38,0397211	198,3654	19,01986	230,1456	
39,1840911	196,3254	19,59205	213,0565	
39,3398911	123,0659	19,66995	153,6894	
36,0709911	97,02365	18,0355	146,359	
39,9766211	200,3654	19,98831	148,952	
37,2655311	110,3365	18,63277	132,0457	
36,0766696	102,369	18,03833	148,3697	
37,9895601	160,3654	18,99478	196,3569	
36,9895601	100,2564	18,49478	102,365	
39,0620911	535,48	19,53105	186,3256	
39,0510511	435,48	19,52553	150,364	
875,00	4385,49	437,50	4019,16	Somatória (Σ)
35,00	175,41	17,50	160,76	Média

Tabela C3 : Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato filtro de papel.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
51,64822	300,4976	25,82411	339,0742	
51,54403	682,896	25,77202	333,7358	
47,45005	573,983	23,72503	263,4825	
49,52785	373,983	24,76392	234,6032	
49,52847	284,61	24,76424	300,6643	
49,40939	872,695	24,7047	301,1392	
46,47285	155,0358	23,23642	256,9416	
49,17897	550,5758	24,58949	239,6635	
47,6705	189,3015	23,83525	213,1344	
44,42904	196,3254	22,21452	437,5355	
41,9804	98,36	20,9902	253,8369	
40,9824	123,0659	20,4912	292,026	
48,9803	196,3254	24,49015	313,4948	
42,2823	100,3654	21,14115	197,8146	
41,9804	97,02365	20,9902	190,6582	
45,2823	50,3365	22,64115	304,7175	
42,28239	102,369	21,14119	238,378	
41,19368	160,3654	20,59684	235,7496	
42,99359	57,61126	21,49679	146,0667	
41,2823	134,9844	20,64115	96,57855	
46,25314	167,3549	23,12657	76,06657	
49,30373	157,3603	24,65186	68,3256	
48,41373	160,8451	24,20686	72,0693	
1060,07	5786,27	530,03	5405,75	Somatória (Σ)
46,09	251,46	23,04	235,03	Média

Tabela C4: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato filtro de papel.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
55,64822	300,4976	27,82411	339,5693	
58,40939	282,896	29,2047	437,5543	
54,17897	573,983	27,08949	353,8369	
60,16099	373,983	30,08049	581,3662	
68,60486	384,61	34,30243	346,963	
63,67677	472,695	31,83839	402,256	
57,67355	155,0358	28,83678	536,1236	
73,58477	550,5758	36,79239	456,3256	
66,67356	189,3015	33,33678	486,3256	
59,38043	196,3254	29,69022	362,365	
70,37152	402,3606	35,18576	396,3256	
58,58377	243,0659	29,29189	306,3245	
66,36023	196,3254	33,18012	437,5355	
59,3735	200,3654	29,68675	396,3256	
63,37137	397,0237	31,68569	403,653	
62,58347	350,3365	31,29174	400,3562	
69,37347	302,369	34,68674	402,365	
56,60477	382,2616	28,30239	356,9632	
53,56243	389,251	26,78122	326,359	
58,47347	456,8805	29,23674	389,3256	
61,36044	479,5074	30,68022	399,365	
1298,01	7279,65	649,00	8517,58	Somatória (Σ)
61,81	346,65	30,90	405,59	Média

Tabela C5: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm .

Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato filtro de papel.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
18,88504	321,6899	9,442522	98,40365	
11,53224	91,91142	5,766118	106,56	
12,99154	164,6746	6,495771	42,5204	
12,95001	172,3339	6,475006	64,52165	
21,45949	402,1124	10,72974	69,58189	
15,4038	52,39266	7,7019	105,8957	
14,1695	96,2863	7,08475	72,34943	
13,16975	141,7125	6,584877	63,37529	
14,72791	147,7125	7,363953	71,20308	
11,73284	142,1145	5,866422	72,34943	
13,42136	121,4035	6,710679	73,49578	
18,73136	434,9888	9,365679	109,3654	
17,33136	142,3547	8,665679	152,6398	
11,47067	131,0257	5,735334	175,369	
16,12837	182,3537	8,064184	146,3598	
14,49332	157,0257	7,246659	128,9346	
18,28461	352,3547	9,142304	178,2369	
19,61303	391,3585	9,806514	206,3589	
19,6175	372,3536	9,808749	230,1456	
10,36221	212,3547	5,181107	213,0565	
19,39136	444,0258	9,695679	153,6894	
14,06136	179,3587	7,030679	132,0457	
15,42136	204,9512	7,710679	148,3697	
355,35	5058,85	177,67	2814,82	Somatória (Σ)
15,45	219,95	7,72	122,38	Média

Tabela C6: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm .

Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato filtro de papel

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
23,41334	640,3464	11,70667	118,8065	
22,01784	593,386	11,00892	124,715	
33,40872	680,3464	16,70436	167,9894	
34,59574	682,3864	17,29787	245,4952	
35,74011	680,3464	17,87005	228,406	
36,53264	684,3864	18,26632	164,3016	
33,82155	594,3575	16,91077	147,3953	
32,63269	586,39	16,31634	163,7193	
34,54558	644,3864	17,27279	211,7065	
33,54558	584,2774	16,77279	117,7146	
35,61811	1019,501	17,80905	201,6752	
35,60707	919,501	17,80353	165,7136	
22,24964	592,9342	11,12482	165,9192	
28,21595	695,4759	14,10797	206,0078	
27,24514	684,4163	13,62257	219,0349	
20,32595	604,8524	10,16297	172,1258	
30,75024	564,3867	15,37512	117,7155	
24,65079	562,3467	12,3254	221,706	
23,41334	640,3464	11,70667	118,8065	
568,33	12654,37	284,16	3278,95	Somatória (Σ)
24,71	550,19	12,35	142,56	Média

Tabela C7: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm .

Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato filtro de papel

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
53,493	1227,861	26,7465	339,0741	
53,38882	1610,259	26,69441	333,7357	
55,29484	1501,346	27,64742	263,4824	
55,37263	1301,346	27,68631	234,6031	
53,37325	1211,973	26,68663	300,6643	
53,25418	1800,058	26,62709	301,1391	
48,31763	1082,399	24,15881	256,9415	
53,02376	1123,688	26,51188	313,4948	
50,51528	1027,728	25,25764	197,8145	
52,27382	1062,347	26,13691	96,57849	
45,82518	1094,718	22,91259	76,06651	
52,82718	1084,723	26,41359	68,32554	
55,82508	1088,208	27,91254	72,06924	
44,12708	977,6996	22,06354	304,7175	
43,82518	1029,732	21,91259	238,3779	
47,12708	1087,728	23,56354	235,7495	
44,12717	984,9743	22,06359	146,0666	
48,03846	1062,347	24,01923	96,57849	
51,83837	1037,7	25,91919	163,7193	
43,12708	1029,732	21,56354	211,7065	
52,09792	1087,728	26,04896	117,7146	
50,14851	1027,619	25,07426	201,6752	
53,25851	1462,843	26,62926	165,7136	
1160,5	27004,76	580,25	3875,47	Somatória (Σ)
50,50	1174,12	25,22	168,49	Média

Tabela C8: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm .

Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato filtro de papel

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
68,96574	3100,6	34,48287	339,5693	
69,72692	3082,998	34,86346	437,5543	
67,4965	3374,085	33,74825	353,8369	
63,47851	3174,085	31,73926	581,3662	
61,92238	3184,712	30,96119	346,963	
66,9943	3272,797	33,49715	402,256	
69,99108	2955,138	34,99554	536,1236	
66,9023	3350,678	33,45115	456,3256	
69,99109	2989,404	34,99554	486,3256	
62,69796	2996,428	31,34898	362,365	
66,68905	3202,463	33,34452	396,3256	
65,9013	3043,168	32,95065	306,3245	
69,67776	2996,428	34,83888	437,5355	
68,69103	3000,468	34,34551	396,3256	
66,6889	3197,126	33,34445	403,653	
65,901	3150,439	32,9505	400,3562	
68,691	3102,471	34,3455	402,365	
69,9223	3182,364	34,96115	356,9632	
66,7996	3189,353	33,43998	326,359	
62,791	3256,983	34,8955	389,3256	
1347	62802,19	673,5	8118,21	Somatória (Σ)
60,00	2730,53	29,28	352,96	Média

Tabela C9: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm .

Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato filtro de papel

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
21,44331	600,8299	10,72165	178,0562	
10,0905	371,0514	5,045249	186,2126	
16,5498	443,8146	8,274902	122,173	
16,50827	451,4739	8,254137	144,1742	
20,01775	681,2524	10,00888	149,2345	
18,96206	331,5327	9,481031	185,5483	
20,72776	375,4263	10,36388	152,002	
16,72802	420,8525	8,364008	143,0279	
18,28617	426,8525	9,143085	150,8557	
15,29111	421,2545	7,645553	152,002	
16,96962	400,5435	8,484811	153,1484	
21,28962	714,1288	10,64481	189,018	
21,88962	421,4947	10,94481	232,2924	
15,02893	410,1657	7,514465	255,0216	
19,68663	461,4937	9,843315	226,0124	
19,05158	436,1657	9,52579	208,5872	
21,84287	631,4947	10,92144	257,8895	
21,07129	670,4985	10,53565	286,0115	
20,17576	651,4936	10,08788	309,7982	
16,92048	491,4947	8,460238	292,7091	
20,04962	723,1658	10,02481	233,342	
11,61962	458,4987	9,309811	211,6983	
18,97962	484,0912	9,489811	228,0223	
421,18	11479,07	213,09	4646,83	Somatória (Σ)
17,95	499,09	9,26	202,03	Média

Tabela C10: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm .

Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato filtro de papel

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
40,01423	1531,984	20,45712	132,0088	
40,01873	1485,023	20,25937	137,9173	
40,00961	1571,984	20,45481	181,1917	
40,00966	1574,024	20,95483	258,6975	
40,09241	1571,984	20,4962	241,6084	
40,03353	1576,024	20,51676	177,504	
40,32244	1485,995	20,16122	160,5976	
40,02567	1478,027	20,46783	176,9216	
39,04647	1536,024	19,52323	224,9088	
39,90465	1475,915	19,95232	130,9169	
39,99912	1911,138	19,99956	214,8775	
40,00796	1811,138	20,05398	178,9159	
36,97505	1484,572	18,48753	179,1216	
32,97168	1587,113	16,48584	219,2102	
30,00603	1576,054	20,87302	232,2373	
39,82683	1496,49	19,91342	185,3282	
40,00113	1456,024	20,12557	130,9178	
40,05168	1453,984	20,47584	234,9083	
40,01423	1531,984	20,95712	132,0088	
761,23	29595,48	380,61	3529,79	Somatória (Σ)
33,09	1286,76	16,54	153,46	Média

Tabela C11: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm .

Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato filtro de papel

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
45,14648	1602,831	22,57324	434,9966	
45,04229	1985,229	22,52115	429,6582	
46,94831	1876,316	23,47416	359,4049	
47,02611	1676,316	23,51305	330,5256	
45,02673	1586,943	22,51336	396,5868	
44,90765	2175,028	22,45383	397,0616	
39,97111	1457,369	19,98555	352,864	
44,67723	1498,658	22,33862	409,4172	
42,16876	1402,698	21,08438	293,737	
43,92729	1437,317	21,96365	192,501	
37,47866	1469,688	18,73933	171,989	
44,48066	1459,693	22,24033	164,248	
47,47856	1463,178	23,73928	167,9917	
35,78056	1352,67	17,89028	400,64	
35,47866	1404,702	17,73933	334,3004	
38,78056	1462,698	19,39028	331,672	
35,78065	1359,944	17,89032	241,9891	
39,69194	1437,317	19,84597	192,501	
43,49185	1412,67	21,74592	155,916	
34,78056	1404,702	17,39028	132,0088	
43,7514	1462,698	21,8757	88,13159	
41,80199	1402,589	20,90099	157,5639	
44,91199	1837,813	22,45599	160,5976	
968,53	35629,07	484,26	6296,30	Somatória (Σ)
42,11	1549,09	21,05	273,75	Média

Tabela C12: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm .

Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato filtro de papel

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
59,62574	2064,369	29,81287	348,2214	
60,38691	2046,768	30,19346	446,2065	
58,1565	2337,855	29,07825	362,489	
54,13851	2137,855	27,06925	590,0183	
52,58238	2148,482	26,29119	355,6151	
57,6543	2236,567	28,82715	410,9081	
60,65108	1918,908	30,32554	544,7757	
57,5623	2314,448	28,78115	464,9777	
60,65109	1953,173	30,32554	494,9777	
53,35796	1960,197	26,67898	371,0171	
57,34905	2166,232	28,67452	404,9777	
56,5613	2006,938	28,28065	314,9766	
60,33776	1960,197	30,16888	446,1876	
59,35103	1964,237	29,67551	404,9777	
57,3489	2160,896	28,67445	412,3051	
56,561	2114,208	28,2805	409,0083	
59,351	2066,241	29,6755	411,0171	
60,5823	2146,133	30,29115	365,6153	
57,53996	2153,123	28,76998	335,0111	
60,451	2220,752	30,2255	397,9777	
1160,2	42077,58	580,1	8291,26	Somatória (Σ)
60,01	1829,46	29,00	360,48	Média

Tabela C13: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato membrana.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
17,98669	478,7346	8,993344	120,3483	
13,80109	497,8746	6,900544	146,2635	
12,28485	217,0973	6,142423	93,91316	
21,31399	260,9909	10,657	69,3655	
15,98399	166,8309	7,991996	87,0331	
17,34399	166,8309	8,671996	59,1545	
14,38399	198,2329	7,191996	109,5455	
15,34399	187,5219	7,671996	93,3785	
20,65399	351,1072	10,327	78,6435	
19,25399	258,4731	9,626996	69,324	
13,3933	247,1441	6,69665	98,91309	
18,051	298,4721	9,0255	93,7085	
16,41595	243,1441	8,207975	89,00177	
20,20724	238,4731	10,10362	104,0018	
20,53566	307,4769	10,26783	93,83306	
19,54013	198,472	9,770065	119,0403	
16,58615	248,4731	5,982518	123,933	
293,78	4565,35	144,22	1649,40	Somatória (Σ)
17,75	268,55	8,48	97,02	Média

Tabela C14: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm .

Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato membrana.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
28,9991	957,9233	14,4568	188,1288	
24,0091	1060,465	17,4566	228,2173	
23,9983	1049,405	16,9164	241,2444	
22,099	969,8415	13,50645	194,3354	
27,4142	929,3759	18,70711	139,925	
23,0315	927,3358	15,65739	243,9155	
26,0773	1005,336	15,03866	141,016	
28,6818	958,3752	14,34091	146,9245	
22,1004	947,0468	20,78521	183,9189	
29,8495	1018,873	21,42477	243,918	
26,0041	1045,336	21,20205	250,6156	
25,9291	946,0338	19,6455	183,9181	
24,2967	951,3792	19,64833	185,9288	
26,2096	1009,376	20,60478	233,916	
29,0028	1384,49	21,14105	223,8847	
29,0271	1284,49	21,13553	187,9231	
416,72	25610,75	477,75	4958,14	Somatória (Σ)
26,02	1024,43	19,11	198,32	Média

Tabela C15 : Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm . Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato membrana.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
53,56822	2425,021	26,78411	331,0536	
53,46403	2807,419	26,73202	325,7152	
49,37005	2698,506	24,68503	255,4619	
51,44785	2498,506	25,72392	226,5826	
51,44847	2409,133	25,72424	292,6438	
51,32939	2997,218	25,6647	293,1186	
48,39285	2279,559	24,19642	248,921	
51,09897	2675,099	25,54949	231,6429	
49,5905	2313,825	24,79525	205,1138	
46,34904	2320,848	23,17452	429,5149	
43,9004	2222,883	21,9502	245,8163	
42,9024	2247,589	21,4512	284,0054	
50,9003	2320,848	25,45015	305,4742	
44,2023	2224,888	22,10115	189,794	
43,9004	2221,547	21,9502	182,6376	
47,2023	2174,86	23,60115	296,697	
44,20239	2226,892	22,10119	230,3574	
43,11368	2284,888	21,55684	227,729	
44,91359	2182,134	22,45679	138,0461	
43,2023	2259,507	21,60115	88,55798	
48,17314	2291,878	24,08657	68,046	
51,22373	2281,883	25,61186	60,30503	
50,33373	2285,368	25,16686	64,04873	
1104,23	54650,3	552,11	5221,28	Somatória (Σ)
48,01	2376,1	24,00	227,01	Média

Tabela C16: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm . Velocidade angular de compressão de 500 rpm e substrato membrana.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
76,53917	4379,378	38,26958	324,2957	
71,30035	4361,776	35,65017	422,2807	
77,06993	4652,863	38,53496	338,5633	
73,05194	4452,863	36,52597	566,0926	
71,49581	4463,49	35,7479	331,6894	
76,56773	4551,575	38,28386	386,9824	
73,56451	4233,916	36,78225	520,85	
76,75726	4629,456	38,37863	441,052	
69,56452	4268,182	34,78226	471,052	
62,27139	4275,205	31,13569	347,0914	
73,26248	4481,241	36,63124	381,052	
71,47473	4321,946	35,73736	291,0509	
69,25119	4275,205	34,62559	422,2618	
72,26446	4279,245	36,13223	381,052	
66,92623	4475,904	33,46312	388,3794	
75,47443	4429,217	37,73721	385,0826	
72,26443	4381,249	36,13221	387,0914	
76,94957	4461,142	38,47479	341,6896	
66,94534	4468,131	33,47267	311,0854	
71,64426	4535,761	35,82213	374,052	
74,25139	4558,387	37,12569	384,0914	
1518,89	92936,13	759,44	8196,83	Somatória (Σ)
72,32	4425,53	36,16	390,32	Média

Tabela C17: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm . Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato membrana.

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
15,78504	355,4299	7,892522	112,2767	
8,432236	125,6514	4,216118	120,4331	
9,891542	198,4146	4,945771	56,39349	
9,850011	206,0739	4,925006	78,39474	
18,35949	435,8524	9,179744	83,45499	
12,3038	86,13266	6,1519	119,7688	
11,0695	130,0263	5,53475	86,22252	
10,06975	175,4525	5,034877	77,24839	
10,62791	181,4525	5,313953	85,07618	
9,632844	175,8545	4,816422	86,22253	
10,32136	155,1435	5,160679	87,36888	
14,63136	468,7288	7,315679	123,2385	
14,23136	176,0947	7,115679	166,5129	
9,370668	164,7657	4,685334	189,2421	
13,02837	216,0937	6,514184	160,2329	
10,39332	190,7657	5,196659	142,8077	
15,18461	386,0947	7,592304	192,11	
16,51303	425,0985	8,256514	220,232	
16,05175	406,0936	8,025875	244,0187	
9,262214	246,0947	4,631107	226,9296	
16,02914	477,7658	8,014568	167,5625	
11,06136	213,0987	5,530679	145,9188	
12,03214	238,6912	6,016068	162,2428	
284,13	5834,87	142,06	3133,90	Somatória (Σ)
12,35	253,69	6,17	136,25	Média

Tabela C18: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm . Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato membrana

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
34,63451	702,2157	17,31725	148,6123	
33,23901	655,2553	16,6195	154,5208	
39,62989	742,2157	19,81494	197,7952	
24,8169	744,2557	12,40845	275,301	
26,96127	742,2157	13,48064	258,2118	
37,7538	746,2557	18,8769	194,1074	
35,04271	656,2268	17,52136	177,201	
33,85385	648,2593	16,92693	193,5251	
25,76674	706,2557	12,88337	241,5123	
34,76674	646,1467	17,38337	147,5204	
26,83927	1081,37	13,41964	231,481	
36,82823	981,3703	18,41412	195,5194	
33,47081	654,8035	16,7354	195,725	
39,43711	757,3452	19,71856	235,8136	
38,46631	746,2856	19,23315	248,8407	
33,54711	666,7217	16,77355	201,9316	
39,5912	626,256	19,7956	147,5212	
35,87196	624,2159	17,93598	251,5118	
34,63451	702,2157	17,31725	148,6123	
32,8498	61,87109	16,4249	29,80588	
40,01575	61,87109	20,00788	29,80588	
40,04779	61,87109	20,0239	29,80588	
31,90047	61,87109	15,95024	29,80588	
789,96	14077,37	394,98	3964,48	Somatória (Σ)
34,34	612,05	17,17	172,36	Média

Tabela C19: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm . Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato membrana

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
51,25648	978,9767	25,62824	369,94	
51,15229	1361,375	25,57615	364,6016	
53,05831	1252,462	26,52916	294,3483	
53,13611	1052,462	26,56805	265,469	
51,13673	963,0891	25,56837	331,5302	
51,01765	1551,174	25,50883	332,0051	
46,08111	833,5149	23,04055	287,8075	
50,78723	874,8045	25,39362	344,3607	
48,27876	778,8445	24,13938	228,6804	
50,0373	813,4634	25,01865	127,4444	
43,58866	845,8339	21,79433	106,9324	
50,59066	835,8393	25,29533	99,19147	
53,58856	839,3242	26,79428	102,9352	
41,89056	728,8156	20,94528	335,5834	
41,58866	780,8481	20,79433	269,2438	
44,89056	838,8445	22,44528	266,6154	
41,89065	736,0903	20,94532	176,9325	
45,80194	813,4634	22,90097	127,4444	
49,60185	788,8155	24,80092	30,86582	
40,89056	780,848	20,44528	30,86582	
49,8614	838,8444	24,9307	30,86582	
47,91199	778,7354	23,95599	30,86582	
51,02199	1213,959	25,51099	30,86582	
1109,06	21280,43	554,53	4585,39	Somatória (Σ)
48,22	925,23	24,11	199,36	Média

Tabela C20: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm . Velocidade angular de compressão de 1000 rpm e substrato membrana

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
71,38817	2493,307	35,69408	238,9723	
72,14935	2475,705	36,07467	336,9574	
69,91893	2766,792	34,95946	253,2399	
65,90094	2566,792	32,95047	480,7692	
74,34481	2577,419	37,17241	246,366	
69,41673	2665,504	34,70836	301,659	
72,41351	2347,845	36,20675	435,5266	
69,32473	2743,385	34,66236	355,7286	
72,41352	2382,111	36,20676	385,7286	
75,12039	2389,135	37,56019	261,768	
69,11148	2595,17	34,55574	295,7286	
68,32373	2435,875	34,16186	205,7275	
72,10019	2389,135	36,05009	336,9385	
71,11346	2393,175	35,55673	295,7286	
69,11133	2589,833	34,55566	303,056	
68,32343	2543,146	34,16171	299,7592	
71,11343	2495,178	35,55671	301,768	
72,34473	2575,071	36,17236	256,3662	
69,30239	2582,06	34,65119	225,762	
72,21343	2649,69	36,10671	288,7286	
62,42244	1607,874	31,21122	100,5973	
63,29817	1306,295	31,64909	159,2387	
67,45073	2677,419	33,72536	200,571	
1608,62	56247,91	804,31	6566,68	Somatória (Σ)
69,94	2445,56	34,97	285,50	Média

Tabela C21: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 9 – 22 μm . Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato membrana

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
21,37374	417,6799	10,68687	158,0567	
10,02093	187,9014	5,010466	166,2131	
16,48024	260,6646	8,240119	102,1735	
16,43871	268,3239	8,219354	124,1747	
19,94818	498,1024	9,974092	129,235	
18,8925	148,3827	9,446248	165,5488	
20,6582	192,2763	10,3291	132,0025	
16,65845	237,7025	8,329225	123,0284	
18,2166	243,7025	9,108302	130,8562	
15,22154	238,1045	7,61077	132,0025	
16,90006	217,3935	8,450028	133,1489	
21,22006	530,9788	10,61003	169,0185	
21,82006	238,3447	10,91003	212,2929	
14,95936	227,0157	7,479682	235,0221	
19,61706	278,3437	9,808532	206,0129	
18,98201	253,0157	9,491007	188,5877	
21,7733	448,3447	10,88665	237,89	
21,00172	487,3485	10,50086	266,012	
20,10619	468,3436	10,0531	289,7987	
16,85091	308,3447	8,425455	272,7096	
19,98006	540,0158	9,990028	213,3425	
18,55006	275,3487	9,275028	191,6988	
18,91006	300,9412	9,455028	208,0228	
424,58	7266,62	212,29	4186,84	Somatória (Σ)
18,46	315,94	9,23	182,03	Média

Tabela C22: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 22,1 – 40 μm . Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato membrana

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
39,94943	948,5706	19,97472	191,203	
39,55393	901,6102	19,77697	197,1115	
39,94481	988,5706	19,97241	240,3859	
40,04487	990,6106	20,47243	317,8917	
40,02761	988,5706	20,01381	300,8025	
40,06873	992,6106	20,03436	236,6981	
39,35764	902,5817	19,67882	219,7918	
39,97087	894,6142	19,98544	236,1158	
38,08167	952,6106	19,04083	284,103	
38,93985	892,5016	19,46993	190,1111	
39,03432	1327,725	19,51716	274,0717	
39,14316	1227,725	19,57158	238,1101	
36,01026	901,1584	18,00513	238,3157	
32,00689	1003,7	16,00344	278,4043	
40,08124	992,6405	20,39062	291,4314	
38,86204	913,0766	19,43102	244,5223	
39,28633	872,6109	19,64317	190,112	
39,98688	870,5709	19,99344	294,1025	
40,04943	948,5706	20,47472	191,203	
742,90	18510,63	371,45	4654,48	Somatória (Σ)
32,30	804,81	16,15	202,36	Média

Tabela C23: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 40,1 – 54 μm . Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato membrana

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
51,53648	1996,641	25,76824	429,6363	
51,43229	2379,039	25,71615	424,2979	
53,33831	2270,126	26,66916	354,0446	
53,41611	2070,126	26,70805	325,1653	
51,41673	1980,753	25,70837	391,2265	
51,29765	2568,838	25,64883	391,7014	
46,36111	1851,179	23,18055	347,5038	
51,06723	1892,468	25,53362	404,057	
48,55876	1796,508	24,27938	288,3767	
50,3173	1831,127	25,15865	187,1407	
43,86866	1863,498	21,93433	166,6287	
50,87066	1853,503	25,43533	158,8878	
53,86856	1856,988	26,93428	162,6315	
42,17056	1746,48	21,08528	395,2797	
41,86866	1798,512	20,93433	328,9401	
45,17056	1856,508	22,58528	326,3117	
42,17065	1753,754	21,08532	236,6288	
46,08194	1831,127	23,04097	187,1407	
49,88185	1806,48	24,94092	150,5557	
41,17056	1798,512	20,58528	126,6486	
50,1414	1856,508	25,0707	82,77133	
48,19199	1796,399	24,09599	152,2036	
51,30199	2231,623	25,65099	155,2374	
1115,50	44686,70	557,75	6173,01	Somatória (Σ)
48,50	1942,90	24,25	268,39	Média

Tabela C24: Resultados obtidos do Analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0) para o concentrado fosfático, na faixa de diâmetro de 54,1 – 77 μm . Velocidade angular de compressão de 1500 rpm e substrato membrana

Diâmetro médio (μm)	Área (μm^2)	Raio (μm)	Perímetro (μm)	
64,81574	2900,235	32,40787	278,6871	
65,57692	2882,634	32,78846	376,6722	
63,3465	3173,721	31,67325	292,9547	
59,32851	2973,721	29,66426	520,484	
57,77238	2984,348	28,88619	286,0808	
62,8443	3072,433	31,42215	341,3738	
65,84108	2754,774	32,92054	475,2414	
62,7523	3150,314	31,37615	395,4434	
65,84109	2789,039	32,92054	425,4434	
58,54796	2796,063	29,27398	301,4828	
62,53905	3002,098	31,26952	335,4434	
61,7513	2842,804	30,87565	245,4423	
65,52776	2796,063	32,76388	376,6533	
64,54103	2800,103	32,27051	335,4434	
62,5389	2996,762	31,26945	342,7708	
61,751	2950,074	30,8755	339,474	
64,541	2902,107	32,2705	341,4828	
65,7723	2981,999	32,88615	296,081	
62,72996	2988,989	31,36498	265,4768	
65,641	3056,618	32,8205	328,4434	
1264,00	58794,90	632,00	6900,57	Somatória (Σ)
63,20	2556,30	31,60	300,02	Média