



Avaliação da Esfericidade como um Fator de Forma na Interação Partícula-Fluido

Luciana Vila Real Mendes

Thainá Menezes de Melo

Projeto de Final de Curso

Orientador:

Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

Janeiro de 2011

AVALIAÇÃO DA ESFERICIDADE COMO UM FATOR DE FORMA NA INTERAÇÃO PARTÍCULA-FLUIDO

Luciana Vila Real Mendes

Thainá Menezes de Melo

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Prof. Amaro Gomes Barreto Jr, D. Sc., UFRJ

Prof. Luiz Fernando Lopes R. Silva, D. Sc., UFRJ

Diogo Caetano Bacha de Holanda, Eng.,
PAM Membranas Seletivas Ltda.

Orientado por:

Prof. Ricardo Pires Peçanha, Ph. D., UFRJ

Rio de Janeiro, RJ - Brasil
Janeiro de 2011

Mendes, Luciana Vila Real.

Melo, Thainá Menezes

Avaliação da esfericidade como um fator de forma na interação partícula-fluido/Luciana Vila Real Mendes, Thainá Menezes de Melo. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2011.

x, 67 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011

Orientador: Ricardo Pires Peçanha

1. Forma de partícula. 2. Esfericidade. 3. Interação Partícula-Fluido 4. Monografia. (Graduação EQ/UFRJ). 5. Ricardo Pires Peçanha. I. Avaliação da esfericidade como um fator de forma na interação partícula Fluido.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaríamos de agradecer ao professor R. P. Peçanha, pela excelente orientação prestada, e principalmente por transmitir sua motivação ao longo de todas as etapas, fazendo com que o projeto fosse de extremo aprendizado acadêmico e pessoal.

Gostaríamos de agradecer também a todas as pessoas que de alguma maneira participaram da realização do projeto, contribuindo para a solução dos imprevistos inerentes às rotinas experimentais e principalmente contribuindo com soluções técnicas.

E finalmente, gostaríamos de agradecer a toda a equipe da Escola de Química da UFRJ, por fornecer a estrutura para o desenvolvimento de tal trabalho e por fornecer a base acadêmica que tanto nos acrescentou ao longo de todo o período de graduação.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

AValiação DA ESFERICIDADE COMO UM FATOR DE FORMA NA INTERAÇÃO PARTÍCULA-FLUIDO

Luciana Vila Real Mendes
Thainá Menezes de Melo

Janeiro, 2011

Orientador: Prof. Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

A interação partícula-fluido é uma característica comum a diversas operações unitárias da engenharia química. O projeto, a avaliação e a operação de equipamentos onde tais sistemas ocorrem dependem fundamentalmente do conhecimento da força de arraste que o fluido exerce sobre cada partícula presente. Dentre outras variáveis, a força de arraste depende da forma da partícula, e por isso têm grande importância os chamados “fatores de forma” que em última análise visam quantificar o formato individual de partículas.

Dentre os fatores de forma mais utilizados na engenharia química encontra-se a esfericidade, originalmente introduzida por Wadell (1932), alvo do presente estudo. Com o objetivo de avaliar a eficácia da esfericidade como um fator de forma, realizou-se testes de quedas de partículas em fluidos newtonianos nos quais eram obtidas suas velocidades terminais. Foram ensaiadas partículas de mesma esfericidade e mesmo diâmetro característico (diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula), para as quais correlações da literatura baseadas na esfericidade das partículas, preveriam uma única velocidade terminal. Assim, foi possível avaliar a consistência da esfericidade na discriminação dos efeitos da forma das partículas sobre a interação partícula - fluido, no caso representada por velocidades terminais discrepantes.

Palavras-chave: forma de partícula, esfericidade, interação partícula-fluido.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS	3
II.1. CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS.....	3
II.1.1. <i>Tamanho de partícula</i>	3
II.2. FORMA DA PARTÍCULA	5
II.3. FATORES DE FORMA	8
II.4.1. <i>Esfericidade e o diagrama $C_D \times Re$</i>	14
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	16
III.1. EQUIPAMENTO	16
III.2. PARTÍCULAS	18
III.2.1. <i>Confecção</i>	18
III.2.2. <i>Determinação da massa específica das partículas</i>	20
III.2.3. <i>Caracterização e classificação</i>	21
III.3. LÍQUIDOS	27
III.4. METODOLOGIA	29
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
CAPÍTULO V - CONCLUSÃO E SUGESTÕES	38
V.1. CONCLUSÕES.....	38
V.2. SUGESTÕES	39
V.2.1. ÍNDICE DE CONVEXIDADE, ICON.	39
V.2.2. IEC – ÍNDICE DA ESFERA CIRCUNSCRITA.....	41
V.2.3. FEC – FATOR ESFERA CIRCUNSCRITA	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APÊNDICE A – TABELAS RELATIVAS AOS ENSAIOS COM ÁGUA DESTILADA	48
APÊNDICE B – TABELAS RELATIVAS AOS ENSAIOS COM GLICERINA BI-DESTILADA	53
APÊNDICE C – TABELAS RELATIVAS AOS ENSAIOS COM ÓLEO MINERAL GRAU TÉCNICO	61

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA II.1 DIFERENTES MODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS.....	5
FIGURA II.2 SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA, DIFERENTES FORMAS.	5
FIGURA II.3 – ARREDONDAMENTO. FORMA E TEXTURA DE SUPERFÍCIE.....	6
FIGURA II.4 – IMAGEM DE SOFTWARE PARA DETERMINAÇÃO DA CIRCULARIDADE	9
FIGURA II.5 – ELONGAÇÃO DE ALGUMAS FIGURAS PLANAS.....	10
FIGURA II.6 - DIAGRAMA $C_D \times RE$	15
FIGURA III.1– DESENHO ESQUEMÁTICO DA CUBA DE ENSAIOS	17
FIGURA III.2 – FOTO DA CUBA DE ENSAIOS.....	17
FIGURA III.3 – DETALHE DA PENEIRA	18
FIGURA III.4 – CORTE PARA CONFECÇÃO DE NOVA PARTÍCULA	19
FIGURA III.5 – COLAGEM PARA CONFECÇÃO DE NOVA PARTÍCULA.....	19
FIGURA III.6 – PARTÍCULAS DO GRUPO A	22
FIGURA III.7 – PARTÍCULAS DO GRUPO B	22
FIGURA III.8 – PARTÍCULAS DO GRUPO C	23
FIGURA III.9 – PARTÍCULAS DO GRUPO D.....	23
FIGURA III.10 – PARTÍCULAS DO GRUPO E	23
FIGURA III.11 – PARTÍCULAS DO GRUPO F.....	24
FIGURA III.12 – PARTÍCULAS DO GRUPO G	24
FIGURA III.13 – PARTÍCULAS DO GRUPO H.....	24
FIGURA III.14 – PARTÍCULAS DO GRUPO I.....	24
FIGURA III.15 – PARTÍCULAS DO GRUPO J	25
FIGURA III.16 – PARTÍCULAS DO GRUPO K.....	25
FIGURA III.17 – PARTÍCULAS DO GRUPO L	25

FIGURA III.18 – PARTÍCULAS DO GRUPO M	26
FIGURA III.19 – PARTÍCULAS DO GRUPO N	26
FIGURA III.20 – PARTÍCULAS DO GRUPO O	26
FIGURA III.21 – PARTÍCULAS DO GRUPO P.....	27
FIGURA III.22 – PARTÍCULAS DO GRUPO Q.....	27
FIGURA IV.1 – $C_D \times RE_p$ DOS EXPERIMENTOS COM ÁGUA DESTILADA.	32
FIGURA IV.2 – $C_D \times RE_p$ DOS EXPERIMENTOS COM GLICEROL.	33
FIGURA IV.3 – $C_D \times RE_p$ DOS EXPERIMENTOS COM ÓLEO MINERAL	34
FIGURA IV.4 – $C_D \times RE_p$: RESULTADO GLOBAL.....	36
FIGURA V.1 – PARALELEPÍPEDO DE LADOS X, Y E Z, SEGUIDO DE SUA TRANSFORMAÇÃO.....	40
FIGURA V.2 – ESFERA CIRCUNSCRITA AO CUBO DE ARESTA “A”.....	41
FIGURA V.3 – REPRESENTAÇÃO DAS PARTÍCULAS H2, H4 E H6	42
FIGURA V.4 – RAIOS DAS ESFERAS CIRCUNSCRITAS ÀS PARTÍCULAS H2, H4 E H6	42
FIGURA V.5 – $C_D \times RE_p$ DAS PARTÍCULAS H2, H4 E H6.....	43

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA II.1 – ESFERICIDADE DOS POLIEDROS REGULARES	11
TABELA II.2 – ESFERICIDADE DE SÓLIDOS DE ROVOLIÇÃO	12
TABELA III.1 – DENSIDADE RELATIVA DOS SÓLIDOS UTILIZADOS.....	20
TABELA III.2 – CLASSIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS	21
TABELA III.3 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS ESTUDADOS NAS CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	28
TABELA III.4 – VISCOSIDADE DO GLICEROL	28
TABELA V.1 – IEC DAS PARTÍCULAS H2, H4 E H6	43
TABELA V.2 – <i>FEC DAS PARTÍCULAS H2, H4 E H6</i>	44
<i>TABELA A.I – DADOS EXPERIMENTAIS PARA OS EXPERIMENTOS COM ÁGUA DESTILADA</i>	<i>49</i>
<i>TABELA A.II – C_D E Re_p PARA OS EXPERIMENTOS COM ÁGUA DESTILADA.....</i>	<i>52</i>
<i>TABELA B.I – DADOS EXPERIMENTAIS PARA OS EXPERIMENTOS COM GLICERINA BI-DESTILADA</i>	<i>54</i>
<i>TABELA B.II – C_D E Re_p PARA OS EXPERIMENTOS COM GLICERINA BI-DESTILADA.....</i>	<i>59</i>
<i>TABELA C.I – DADOS EXPERIMENTAIS PARA OS EXPERIMENTOS COM ÓLEO MINERAL GRAU TÉCNICO ...</i>	<i>62</i>
<i>TABELA C.II – C_D E Re_p PARA OS EXPERIMENTOS COM ÓLEO MINERAL GRAU TÉCNICO</i>	<i>68</i>

NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

Símbolo	Descrição	Dimensão
A	Área característica da partícula	L^2
b, b	Intensidade do campo de forças	LT^{-2}
C_D	Coefficiente de arraste	adimensional
D_i	Diâmetro interno do vaso de testes	L
d_p	Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula	L
d_s	Diâmetro da esfera de mesma área superficial que a partícula	L
$f_D, \mathbf{f_D}$	Força de arraste	MLT^{-2}
g	Aceleração do campo gravitacional	LT^{-2}
H	Altura do vaso de testes	L
R	Raio da partícula esférica	L
Re_p	Número de Reynolds de partícula,	adimensional
U, U	Velocidade do fluido	LT^{-1}
V	Volume da partícula	L^3
v, v	Velocidade da partícula	LT^{-1}
v_t	Velocidade terminal da partícula	LT^{-1}

LETRAS GREGAS

Símbolo	Descrição	Dimensão
μ	Viscosidade do fluido	$ML^{-1}S^{-1}$
ϕ	Esfericidade da partícula	adimensional
ρ	Densidade do fluido	ML^{-3}
ρ_s	Densidade do sólido	ML^{-3}

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Partículas sólidas estão presentes em diversas operações unitárias da engenharia química. Dessas, um extenso grupo envolve partículas e fluidos em contato. Podemos citar a separação sólido-sólido por elutriação, a separação sólido-gás com câmaras de poeira e ciclones, a separação sólido-líquido com centrífugas, hidrociclones, filtros e sedimentadores bem como o uso de leitos fixos, fluidizados e de jorro para promover o contato entre partículas e fluidos.

Tanto o projeto quanto a avaliação e a operação dos equipamentos envolvidos nessas operações unitárias depende do conhecimento da força de arraste que fluido exerce sobre as partículas. A força de arraste por sua vez depende tanto de características do fluido (tais como densidade e viscosidade), quanto de características das partículas (tais como tamanho e forma) e, sobretudo de características do sistema partícula-fluido (tais como aceleração e velocidade relativas).

A maneira mais comum de se quantificar os efeitos da forma da partícula sobre a força de arraste é através do fator de forma esfericidade, originalmente introduzido por Wadell (1932), então um professor de geologia da universidade de Chicago. Embora a literatura registre o uso de outros fatores de forma, até mais fáceis de serem calculados que a esfericidade é notório, inclusive, em livros-texto clássicos de operações unitárias (p. ex., McCabe, Smith and Harriot, 2001), que a esfericidade é o fator de forma mais usado na prática.

Entretanto a esfericidade tem algumas limitações, como por exemplo, no caso de partículas apresentando reentrâncias (ou concavidades) superficiais com dimensões comparáveis ao próprio tamanho de partícula. De fato tais limitações da esfericidade constituem a principal motivação para a realização deste trabalho.

Objetiva-se assim neste trabalho estudar os efeitos da forma da partícula sobre a interação partícula-fluido, utilizando tanto partículas não-reentrantes (ou convexas) quanto partículas reentrantes (ou não-convexas) com base em experimentos em escala de bancada.

A estratégia foi a de confeccionar partículas de mesmo volume (vale dizer com o mesmo diâmetro de esfera equivalente baseado em volume) e a mesma área superficial (vale dizer com a mesma esfericidade) para diferentes materiais e, posteriormente, estudar a queda dessas partículas em vários fluidos, sob a ação do campo gravitacional terrestre. Em princípio, para um dado sólido (densidade conhecida) e para um dado fluido (densidade e viscosidade conhecidas), tais partículas deveriam atingir a mesma velocidade terminal. Eventuais discrepâncias nas velocidades terminais medidas sinalizariam a inadequação da esfericidade para discriminar os efeitos da forma das partículas sobre a força de arraste nesses experimentos.

Foram ensaiadas partículas de alumínio (baixas esfericidades) e de borrachas escolares (médias esfericidades) de diversos tipos, caindo em água destilada, glicerina bi-destilada e óleo mineral grau técnico.

Os testes foram realizados em tanque de acrílico (300 x 300 x 1000 mm) especialmente construído para essa finalidade. O equipamento pertence ao Laboratório de Sistemas Particulados, parte integrante do Laboratório de Engenharia Química (LADEQ) do Departamento de Engenharia Química, Escola de Química / UFRJ.

CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS

II.1. CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS

Os parâmetros comumente utilizados na caracterização de partículas sólidas individuais são seu tamanho, sua forma e sua densidade.

Quanto à densidade das partículas, deve-se ressaltar que partículas obtidas a partir de sólidos homogêneos têm a mesma densidade do material que as constitui. Já partículas obtidas a partir da moagem de material heterogêneo poderão ter densidades distintas, em vários graus, dependendo principalmente do tamanho de partícula considerado.

II.1.1. Tamanho de partícula

No que diz respeito a processos industriais envolvendo sólidos particulados, a característica marcante das partículas é a não uniformidade de tamanhos. Como na prática as partículas em geral têm formatos irregulares, a definição de tamanho de partícula tem que ser feita com muito cuidado. Uma simplificação radical comumente usada é supor que as partículas são esferas. Outra maneira de se obter o tamanho de partícula baseia-se na comparação de alguma característica mensurável da partícula com a mesma característica de uma esfera hipotética. Nesse caso o tamanho da partícula é definido como sendo igual ao diâmetro da esfera que tem aquela mesma característica que ela. Fala-se então do diâmetro equivalente da partícula. Diversos tipos de diâmetros equivalentes são usados, dentre os quais podemos citar:

- d_p – Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula;
- d_s – Diâmetro da esfera de mesma área superficial que a partícula;
- d_{sv} – Diâmetro da esfera de mesma área superficial por unidade de volume que a partícula.
- d_a – Diâmetro da esfera de mesma área projetada da partícula;

- d_{vf} – Diâmetro de queda livre. Diâmetro da esfera que tendo a mesma densidade que a partícula sedimenta com a mesma velocidade da partícula em fluidos de mesma densidade e viscosidade.
- d_{Stk} – Diâmetro de Stokes. Diâmetro de queda livre para uma partícula na região de escoamento laminar.
- $d_{\#}$ - Diâmetro de Peneira. Diâmetro da esfera que passa sem folga pela malha de uma peneira.

Além dos diâmetros equivalentes acima citados, existem formas mais sofisticadas para a determinação do tamanho de partícula com formas irregulares, como, por exemplo, a microscopia, que vem sendo largamente utilizada na caracterização de partículas individuais.

Diâmetros estatísticos também têm sido largamente utilizados. Eles baseiam-se no fato de que, embora cada partícula possua um número muito grande de dimensões lineares, apenas um valor médio dessas dimensões têm significado estatístico. A referida dimensão linear é determinada sobre uma projeção plana da partícula, idealmente na configuração de estabilidade máxima, para uma direção arbitrária fixa.

Dentre os exemplos deste tipo de caracterização pode-se citar o diâmetro de Martin, que define o tamanho de uma partícula irregular como o comprimento da linha que atravessa o maior corte transversal da partícula e o diâmetro de Feret, definido como a distância entre pontos extremos do contorno da partícula. Em ambos os casos o tamanho de partícula é perpendicular à direção arbitrária.

A Figura II.1 em (a) ilustra as dimensões largura e comprimento da partícula. Em (b) mostra as definições para os diâmetros de Feret e Martin acima citados enquanto em (c) é mostrado o diâmetro da esfera com mesma área projetada da partícula.

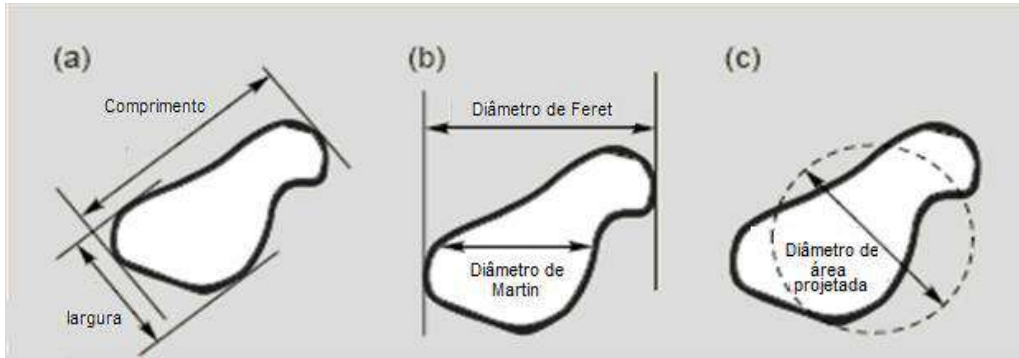


Figura II.1 Diferentes modos de caracterização do tamanho de partículas

(http://intranet.nitrkl.ac.in/GroupEmailfiles/NWKMXOXF_2323.ppt)

II.2. FORMA DA PARTÍCULA

A forma da partícula afeta diversos parâmetros operacionais ligados ao desempenho de equipamentos que processam materiais particulados. Certas propriedades como a fluidez de pós, grau de empacotamento, interação com fluidos e outras são fortemente dependentes da forma das partículas. Embora a quantificação da forma da partícula seja de extrema importância para o cálculo de tais parâmetros, poucos trabalhos estão disponíveis na literatura sobre o assunto.

A Figura II.2 abaixo apresenta algumas partículas de granulação grossa, com diferentes formas.

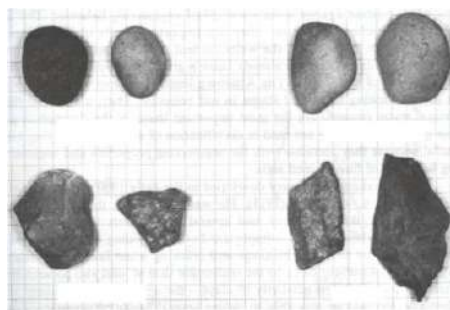


Figura II.2 Solos de granulação grossa, diferentes formas.

(http://intranet.nitrkl.ac.in/GroupEmailfiles/NWKMXOXF_2323.ppt)

Várias tentativas foram feitas a fim de determinar com precisão a forma de partículas. Alguns métodos medem a forma de modo geral, enquanto outros se concentram em recursos como a angulosidade contra arredondamento, e outros ainda sobre os diferentes tipos de texturas e outras diferenças sutis, como as mostradas no trabalho de Barrett (1980). Na

Figura II.3 encontram-se esquematizadas as definições acima citadas.

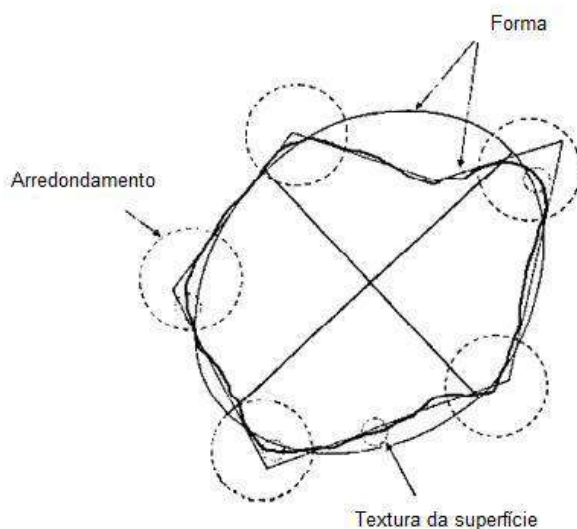


Figura II.3 – Arredondamento. Forma e textura de superfície

(Barrett, 1980)

O uso de relações numéricas na classificação de formas de partícula é largamente explorado. As combinações adimensionais entre dimensões da partícula são denominadas fatores de formas. Já relações entre dimensões da partícula e seu volume ou área superficial são denominados coeficientes de forma.

Mendel *et al.* (1972) definiu o grau de agudeza das arestas e cantos da partícula, independentemente de sua forma, ou seja, da curvatura média e dos cantos e arestas.

Segundo Kenitiro (1973), a esfericidade tenta expressar numericamente o grau de aproximação de forma de uma partícula qualquer, em relação à de esfera perfeita.

A análise da forma tem melhorado muito nos últimos anos e as aplicações padrão podem incluir medidas como a relação entre a razão de aspecto (razão entre a largura e o comprimento da partícula) e o arredondamento. Geralmente a forma é dada como a relação entre o quadrado do perímetro da partícula e sua área, que é diferente da definição de Wadell (1932). Isto pode eliminar a subjetividade inerente aos métodos gráficos, no entanto, permanece ainda a ausência, no quesito clareza, quanto ao uso de termos não-padronizados.

Na tecnologia do pó, vários fatores de forma têm sido sugeridos na caracterização da forma da partícula, embora com sucesso limitado. Heywood (1954) sugeriu uma forma de coeficiente " F / k ", que utilizou medidas de razão entre área superficial e volume e colocou as partículas em categorias como "angular tetraédricas", "sub-angulares" e "arredondadas". Este método pode não distinguir, no entanto, as formas complexas ou conjuntos de formas. Staniforth e Rees (1981) sugeriram um parâmetro adicional para determinar ângulos reentrantes " e / n ", onde o número de projeções apontando para baixo em uma coleção de partículas é dividido pelo número de partículas. No entanto, ele só poderia caracterizar com sucesso formas altamente estilizadas. Poczeck (1997) sugeriu o uso de um fator de forma "NS", que envolve medidas de desvio-padrão a partir em forma de matriz. Este método é limitado por sua incapacidade de definir formas irregulares e distinguir o arredondamento relativo.

A análise fractal (Vallejo, 1995) tem sido apresentada como uma possível alternativa aos métodos anteriores. Esta técnica tem a vantagem de possuir objetividade na análise computacional que é usada para determinar os parâmetros fractais. No entanto, ela permite um maior foco na medição da textura em detrimento da morfologia da partícula, e talvez precise ser usada em combinação com outros parâmetros para definir totalmente a forma da partícula.

Segundo R. Escudié (2005), a esfericidade isoladamente não é suficiente como fator de forma para se obter uma correlação quantitativa única na transição entre os padrões de classificação para sistemas diferentes. Segundo ele, a classificação por forma das partículas, parece exigir uma maior diferença de densidade reduzida do que no caso da esfera, provavelmente devido à maior instabilidade gerada pelas partículas não-isométricas.

No estudo de Mora (1999), um total de 46 amostras de rocha foi obtido a partir de cinco fontes provenientes de três tipos de rochas diferentes. Elas foram analisadas pelo seu método proposto de quantificação de forma e foram correlacionados com a medida tradicional de quina, com a esperança de identificar parâmetros de forma que possam ser usados como medidas diretas de inclinação. Vários foram os parâmetros de forma encontrados com o objetivo de se obter uma boa correlação com a medida tradicional de angulosidade, mas entre eles, apenas a relação da convexidade e a relação de plenitude podem ser utilizados como medidas de inclinação.

II.3. FATORES DE FORMA

A seguir encontram-se os principais fatores de forma utilizados na área de sistemas particulados.

- Circularidade: Razão entre o perímetro da esfera de mesma área projetada que a partícula e o perímetro da área projetada da partícula na sua condição de estabilidade máxima. Embora não seja muito utilizada, sua determinação é simples, pois a medição é feita por *software*.

A Figura II.4 mostra os parâmetros envolvidos no cálculo da circularidade.

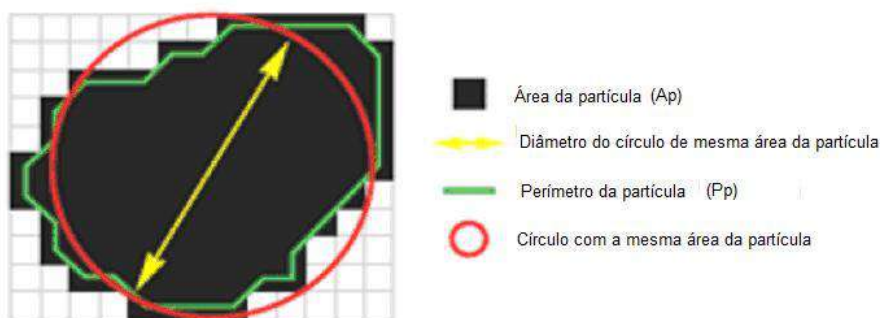


Figura II.4 – Imagem de software para determinação da circularidade

(http://intranet.nitrkl.ac.in/GroupEmailfiles/NWKMXOXF_2323.ppt)

- **Convexidade:** é a medida da rugosidade da superfície da partícula e é calculada através da razão entre o perímetro convexo global, que consiste na menor linha que circula a partícula de modo a torná-la convexa e perímetro real da partícula em sua posição mais estável.
- **Elongação:** Sendo o comprimento a maior dimensão de uma projeção e a largura a maior dimensão perpendicular ao comprimento. Define-se a alongação como sendo:

$$Elongação = 1 - \frac{largura}{comprimento} \quad (II.1)$$

Assim, uma forma simétrica (esfera ou cubo) em relação a todos os eixos que passam pelo centro de simetria (baricentro) tem alongação zero. Sólidos que se afastam desta simetria de eixos têm alongação maior que zero. Outras configurações afastam-se do valor zero. A alongação de algumas figuras planas é mostrada na Figura II.5.

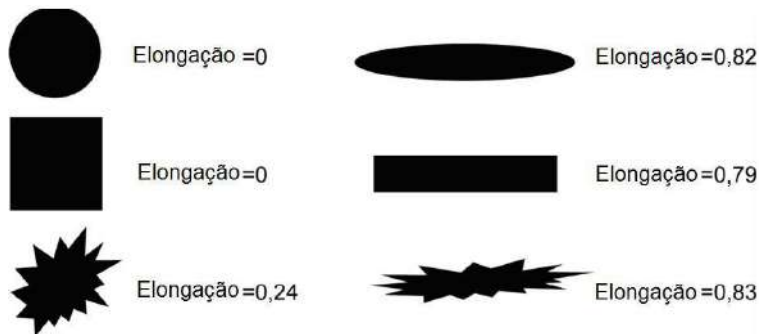


Figura II.5 – Elongação de algumas figuras planas

(http://intranet.nitrkl.ac.in/GroupEmailfiles/NWKMXOXF_2323.ppt)






A forma mais usual de quantificar a forma de uma partícula e também alvo dos estudos deste trabalho é a esfericidade.

- **Esfericidade:** É definida como a razão entre a área superficial da esfera de mesmo volume da partícula e a área superficial da partícula. A esfericidade varia de 0 a 1, já que para um dado volume, a esfera é o sólido geométrico que menor área superficial exhibe. Assim a área superficial da partícula (denominador) é sempre maior (ou igual no caso de partículas esféricas) que a área superficial da esfera de mesmo volume que ela (numerador).

A esfericidade é o fator de forma mais comumente utilizado na área de sistemas particulados e sua adequação na quantificação dos efeitos da forma da partícula sobre a interação partícula-fluido é o objetivo central deste trabalho.

A Tabela II.1 mostra as expressões do volume e da área superficial dos cinco poliedros regulares (sólidos platônicos) necessárias ao cálculo da esfericidade, bem como o valor de suas esfericidades.

Tabela II.1 – Esfericidade dos poliedros regulares

Nome	Figura	Volume	Área	Esfericidade
Sólidos Platônicos				
tetraedro		$\frac{\sqrt{2}}{12} s^3$	$\sqrt{3} s^2$	$\left(\frac{\pi}{6\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.671$
cubo		s^3	$6 s^2$	$\left(\frac{\pi}{6}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.806$
octaedro		$\frac{1}{3}\sqrt{2} s^3$	$2\sqrt{3} s^2$	$\left(\frac{\pi}{3\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.846$
dodecaedro		$\frac{1}{4}(15 + 7\sqrt{5}) s^3$	$3\sqrt{25 + 10\sqrt{5}} s^2$	$\left(\frac{(15 + 7\sqrt{5})^2 \pi}{12(25 + 10\sqrt{5})^{\frac{3}{2}}}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.910$
icosaedro		$\frac{5}{12}(3 + \sqrt{5}) s^3$	$5\sqrt{3} s^2$	$\left(\frac{(3 + \sqrt{5})^2 \pi}{60\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.939$

(http://www.bookrags.com/wiki/Sphericity#Sphericity_of_common_objects)

A Tabela II.2 mostra as expressões do volume e da área superficial de alguns sólidos de revolução necessárias ao cálculo da esfericidade, bem como o valor de suas esfericidades.

Tabela II.2 – Esfericidade de sólidos de revolução

Formas de revolução				
cone ideal ($h = 2\sqrt{2}r$)		$\frac{1}{3}\pi r^2 h$ $= \frac{2\sqrt{2}}{3}\pi r^3$	$\pi r(r + \sqrt{r^2 + h^2})$ $= 4\pi r^2$	$\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.794$
semi esfera		$\frac{2}{3}\pi r^3$	$3\pi r^2$	$\left(\frac{16}{27}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.840$
cilindro ideal ($h = 2r$)		$\pi r^2 h = 2\pi r^3$	$2\pi r(r + h) = 6\pi r^2$	$\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.874$
toróide ideal ($R = r$)		$2\pi^2 Rr^2 = 2\pi^2 r^3$	$4\pi^2 Rr = 4\pi^2 r^2$	$\left(\frac{9}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.894$
esfera		$\frac{4}{3}\pi r^3$	$4\pi r^2$	1

(http://www.bookrags.com/wiki/Sphericity#Sphericity_of_common_objects)

Segundo Wadell (1932), a esfericidade pode ser estimada através da expressão empírica abaixo.

$$\phi = \left(\frac{V_{particula}}{V_{esfera}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{(II.2)}$$

onde $V_{particula}$ é o volume da partícula e V_{esfera} é o volume da esfera circunscrita à partícula.

De fato, a esfericidade nada mais é do que um terceiro grupo adimensional a ser considerado na correlação de dados experimentais de interação sólido-fluido. Assim, a partir da velocidade terminal de partículas em sistemas bem caracterizados, pode-se correlacionar coeficiente de arraste (C_D), número de Reynolds de partícula (Re_p) e a esfericidade (ϕ).

Tal esquema é clássico e foi usado consistentemente por Pettyjohn e Christiansen (1948), naquele que continua sendo o trabalho mais confiável nessa área, disponível na

literatura. Os referidos autores ensaiaram partículas isométricas e de geometria simples: esferas (esfericidade igual a 1,0), cubos-octaedros (esfericidade igual a 0,0906), octaedros (esfericidade igual a 0,845), cubos (esfericidade igual a 0,806) e tetraedros (esfericidade igual a 0,670).

II.4. INTERAÇÃO FLUIDO-PARTÍCULA E VELOCIDADE TERMINAL

A interação sólido-fluido é determinante para o projeto, avaliação e operação de diversos equipamentos típicos de indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas e de alimentos. Aí se enquadram, dentre outros, os equipamentos para a separação sólido-fluido (como ciclones, hidrociclones e sedimentadores) bem como aqueles onde se promove o contato sólido-fluido (como leitos fixos, fluidizados e de jorro).

A análise dimensional da interação sólido-fluido conduz aos grupos adimensionais Número de Reynolds de Partícula, Re_p e Coeficiente de Arraste, C_D .

$$Re_p = \frac{d_p \cdot \|U - v\| \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{II.3})$$

$$C_D = \frac{f_D}{\frac{A}{2} \cdot \rho \cdot \|U - v\|^2} \quad (\text{II.4})$$

Nessas equações, d_p é o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula, ρ é a densidade do fluido, v é a velocidade da partícula, μ é a viscosidade do fluido e A é a área da seção transversal da partícula, dada por $\pi d_p^2/4$. A força de arraste, f_D , tem a direção e sentido de $U-v$.

No caso particular da interação sólido-fluido onde v é constante em relação a um referencial suficientemente inercial para o problema, a 2ª lei de Newton aplicada à partícula permite escrever:

$$C_D(U - v) = -\frac{2V(\rho_s - \rho)}{A\rho\|U - v\|}b \quad (\text{II.5})$$

onde V é o volume da partícula e b é a intensidade de um campo externo de forças, sempre presente nas situações práticas de interesse.

Se particularizarmos mais ainda essa última equação para o caso da queda de partículas em fluidos estacionários ($U=0$) sob a ação do campo gravitacional terrestre ($b=g$) com velocidade terminal ($v = v_t$) e considerando $V = \pi d_p^3/6$ e $A = \pi d_p^2/4$, tem-se a Equação (II.5),

$$C_D = \frac{4d_p(\rho_s - \rho)g}{3\rho v_t^2} \quad (\text{II.6})$$

Nesse caso, re-escrevemos o número de Reynolds de partícula conforme a equação abaixo.

$$\text{Re}_p = \frac{d_p v_t \rho}{\mu} \quad (\text{II.7})$$

A partícula em queda num fluido experimenta inicialmente uma fase acelerada, onde tanto sua velocidade quanto a força de arraste que o fluido exerce sobre ela aumentam. O peso e o empuxo são constantes. Nesse trecho da queda a aceleração da partícula diminui progressivamente com o tempo. O balanço de forças é alcançado então, ocasionando uma força resultante nula (gravidade = empuxo + arraste), fazendo com que a partícula experimente uma velocidade constante, conhecida como velocidade terminal.

II.4.1. Esfericidade e o diagrama C_D x Re

Como citado anteriormente, a forma da partícula afeta diretamente o coeficiente de arraste, C_D . A Figura II.6 apresenta o clássico diagrama log-log de C_D x Re_p tendo a esfericidade como parâmetro. Os dados experimentais referem-se a esferas, partículas isométricas (tetraedros, cubos etc.) e discos.

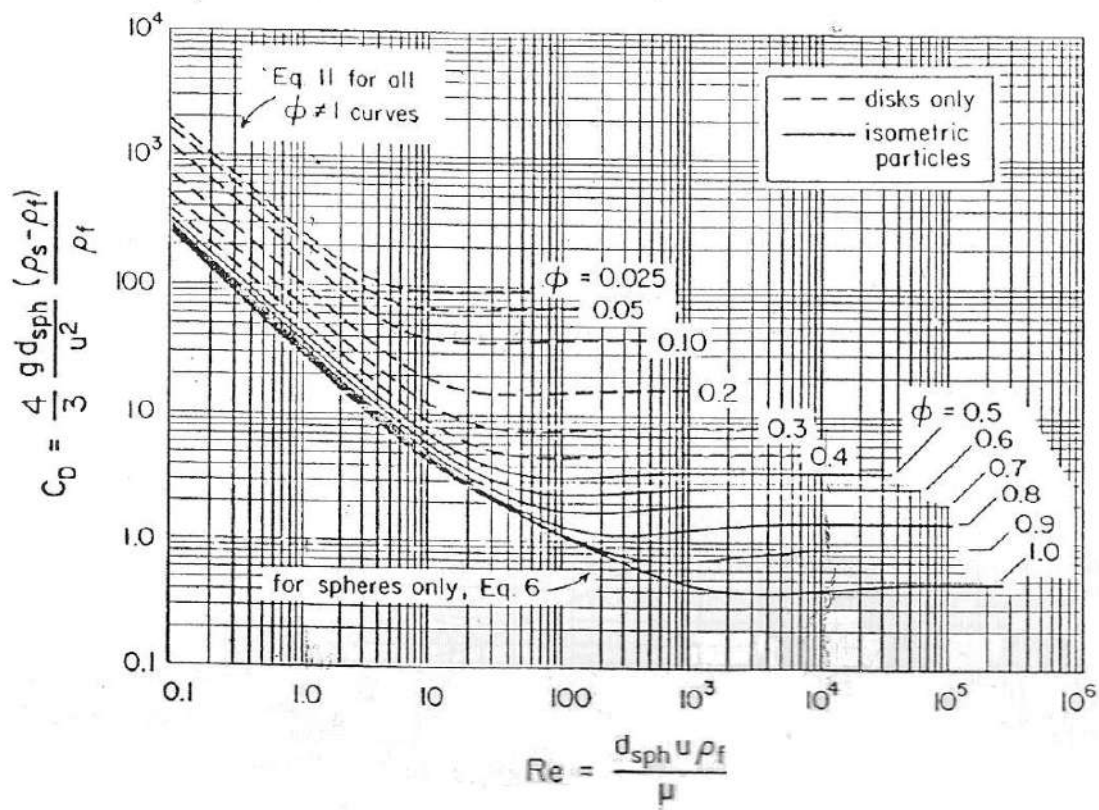


Figura II.6 - Diagrama $C_D \times Re$.

(Haider e Levenspiel, 1989)

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1. EQUIPAMENTO

A escolha do equipamento baseou-se em Silva e Peçanha (1996) que estudaram a interação de partículas sólidas não-isométricas e líquidos newtonianos no regime de transição. Os referidos autores utilizaram um vaso cilíndrico de acrílico com diâmetro interno de 24,5 cm e altura de 56,5 cm. Foram estudadas partículas cilíndricas (grafites de lapiseira e macarrão do tipo espaguete impermeabilizado por esmalte de unha) e prismas retos (laminado de vinil), caindo em água destilada e óleo diesel.

Para o presente trabalho foi confeccionada uma cuba de acrílico (Casa do Acrílico, Centro, Rio de Janeiro – RJ) usando-se chapas planas de 10 mm de espessura. A cuba, com forma de paralelepípedo tem dimensões 300 x 300 x 1000 mm e possui tampa para impedir a entrada de poeira e insetos. Estas dimensões foram escolhidas de modo a garantir o completo desenvolvimento da velocidade terminal das partículas, minimizar os efeitos de parede bem como possibilitar a medida da velocidade terminal em dois trechos consecutivos da queda.

A cuba é provida de torneira no fundo para drenagem do líquido. Além disso, é equipada com uma rede confeccionada com tela de nylon e armação quadrada de acrílico. Esta rede possui alças de fio de nylon e é posicionada no fundo da cuba para a recuperação das partículas testadas. O desenho esquemático da cuba, sua foto e a rede confeccionada em tela de nylon encontram-se respectivamente nas Figura III.1, Figura III.2 e Figura III.3.

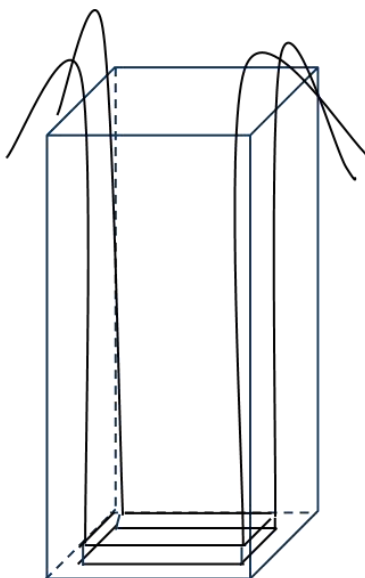


Figura III.1– Desenho esquemático da cuba de ensaios



Figura III.2 – Foto da cuba de ensaios



Figura III.3 – Detalhe da peneira

Para a determinação do tempo de queda das partículas foi utilizado um cronômetro digital da marca Technos, capaz de medir centésimos de segundo.

Além disto, utilizou-se uma pinça para imersão das partículas no fluido a fim de evitar turbulências na superfície e arraste de ar para o interior do líquido.

III.2. PARTÍCULAS

III.2.1. Confeção

As partículas para os ensaios foram confeccionadas artesanalmente a partir de materiais facilmente encontrados e de fácil manipulação, tais como borrachas escolares e latinhas de alumínio.

Foram feitos diversos conjuntos de partículas. Dentro de cada conjunto, as partículas foram confeccionadas com mesma área superficial e mesma massa, de modo a garantir a mesma esfericidade e o mesmo diâmetro característico de partícula. Uma técnica para conseguir isto é cortar a partícula em duas ou mais partes, sem perda de material, conforme mostra a Figura III.4.

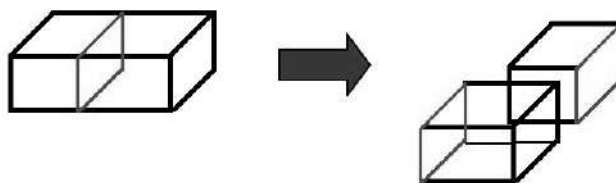


Figura III.4 – Corte para Confeção de nova partícula

Em seguida, deve-se unir novamente as partículas, colando as partes em posições diferentes da posição inicial. A atenção deve ser redobrada para que as duas áreas coladas sejam iguais às áreas geradas com o corte inicial, conforme mostra a Figura III.5. Somente assim temos a igualdade de área superficial e esfericidade das duas partículas.

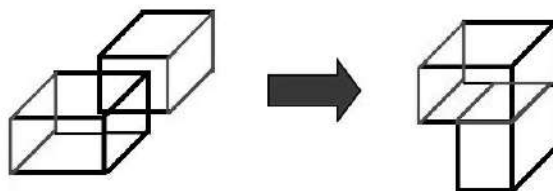


Figura III.5 – Colagem para Confeção de nova partícula

Para a confecção de partículas de borracha, as mesmas foram cortadas com estilete seguindo geometria previamente definida. Para os casos em que a geometria não pode ser obtida diretamente, utilizou-se de cola *Superbond* para a fixação necessária das partes.

Todas as partículas foram pesadas em balança semi-analítica e em caso de divergência de massa, as partículas de maior massa foram lixadas cuidadosamente até que houvesse igualdade de massa entre todas as partículas de um mesmo grupo. Esta medida foi tomada a fim de garantir que todas as partículas de um mesmo grupo tivessem o mesmo diâmetro característico (d_p). Os eventuais efeitos da cola sobre a densidade das partículas também foi quantificado tendo se mostrado totalmente desprezível.

As partículas de alumínio foram confeccionadas através do corte com tesoura comum, da superfície cilíndrica de latinhas comumente usadas para envasar bebidas. Estas

podiam então ser dobradas de diferentes maneiras dando lugar a partículas de diferentes formatos, mas com mesma esfericidade.

III.2.2. Determinação da massa específica das partículas

A massa específica dos materiais utilizados na confecção das partículas foi determinada através de ensaios de picnometria clássica. Essa técnica determina a densidade relativa (*specific gravity*) definida como a razão entre a massa específica do sólido e a de um líquido padrão. Na picnometria a densidade relativa é igual à razão entre massas de sólido e líquido que ocupam um mesmo volume. No caso de sólidos o padrão adotado é a água.

É fácil mostrar que a densidade do sólido em relação à água ($d_{\text{sólido/água}}$) é dada por (Equação III.1):

$$d_{\text{sólido/água}} = \frac{\rho_{\text{sólido}}}{\rho_{\text{água}}} = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (\text{III.1})$$

onde $\rho_{\text{sólido}}$ é a massa específica do sólido, $\rho_{\text{água}}$ é a massa específica da água, m_1 é a massa do picnômetro vazio, m_2 é a massa do picnômetro com o sólido, m_3 é a massa do picnômetro com sólido e água e m_4 é a massa do picnômetro com água. Essas massas foram medidas em balança semi-analítica.

A Tabela III.1 – Densidade relativa dos sólidos utilizados apresenta os resultados obtidos nos ensaios de picnometria.

Tabela III.1 – Densidade relativa dos sólidos utilizados

Material	$d_{\text{sólido/água}}$
Borracha Mercur 60	1,88
Borracha Mercur clean (Verde)	1,70
Alumínio (latinha)	2,44
Borracha vinílica Faber Castell	1,34
Borracha vinílica branca transparente	1,24
Borracha vinílica branca opaca BIC	1,43
Borracha vinílica azul escuro	1,70
Borracha vinílica neon Faber Castell	1,37

III.2.3. Caracterização e classificação

Todas as partículas confeccionadas tiveram suas esfericidades, densidade, massa e diâmetro característico (d_p) cuidadosamente determinados. A fim de facilitar a manipulação, cada grupo de partículas com estes parâmetros em comum era guardado em potes devidamente identificados.

A fim de organizar as partículas e favorecer a comparação entre partículas de grupos distintos, porém com mesma forma (partículas em escala), utilizou-se como nomenclatura para as partículas uma seqüência de uma letra e um número. A letra diferencia os grupos de partículas, enquanto os números diferenciam partículas pertencentes a um mesmo grupo. Vale ressaltar que partículas com a mesma forma, porém pertencentes a grupos diferentes têm o mesmo número de ordem no grupo. A Tabela III.2 lista todas as partículas ensaiadas neste trabalho.

Tabela III.2 – Classificação de partículas

ID	Material	ρ (g/cm ³)	Massa (g)	Comp. (cm)	Largura (cm)	Espessura (cm)	d_p (cm)	ϕ
A	Alumínio (latinha)	2,44	0,029	2,000	0,500	0,010	0,2832	0,12
B	Alumínio (latinha)	2,44	0,108	4,000	1,000	0,010	0,4390	0,07
C	Alumínio (latinha)	2,44	0,422	4,000	4,000	0,010	0,6915	0,05
D	Alumínio (latinha)	2,44	0,107	2,000	2,000	0,010	0,4377	0,07
E	Borracha Mercur branca	1,88	0,062	0,800	0,200	0,200	0,3980	0,69
F	Borracha Mercur branca	1,88	0,451	1,600	0,400	0,400	0,7712	0,65
G	Borracha Mercur branca	1,88	1,812	2,400	0,600	0,600	1,2260	0,73
H	Borracha Mercur Clean (verde)	1,70	6,574	4,000	1,000	1,000	1,9481	0,66
I	Borracha Faber Castell Vinil	1,34	6,213	2,150	2,175	2,025	2,0696	0,50
J	Borracha Faber Castell Neon	1,37	1,718	2,175	1,250	0,500	1,3384	0,63
K	Borracha Faber Castell Neon	1,37	3,650	2,150	1,250	1,050	1,7206	0,74
L	Borracha Branco opaco	1,43	6,895	5,025	1,150	1,075	2,0967	0,56
M	Borracha Branco opaco	1,43	5,172	4,000	1,150	1,075	1,9051	0,56
N	Borracha Branco opaco	1,43	1,667	2,175	1,150	0,450	1,3062	0,67
O	Borracha Faber Castell Neon	1,37	7,258	5,025	1,175	1,125	2,1636	0,57
P	Borracha roxa Faber Castell	1,70	3,644	1,700	1,125	1,050	1,6003	0,82
Q	Borracha Azul escuro	1,70	8,437	2,125	1,950	1,100	2,1170	0,82

As Figuras III.6 a III.22 correspondem a fotografias das partículas testadas neste trabalho sobre papel milimetrado.

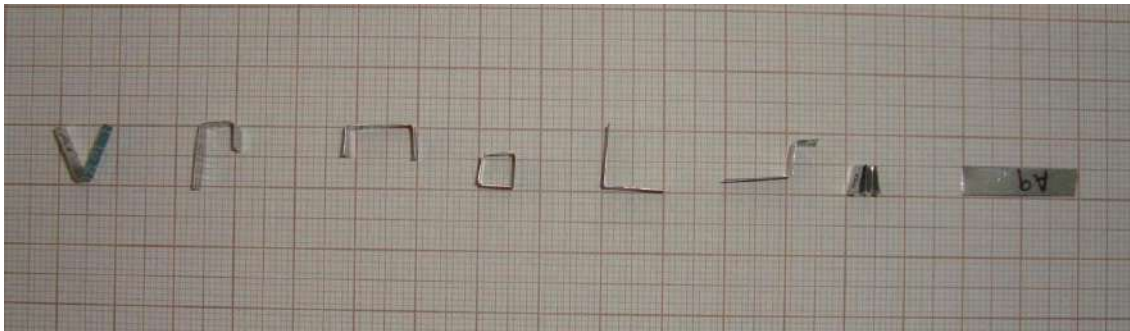


Figura III.6 – Partículas do grupo A

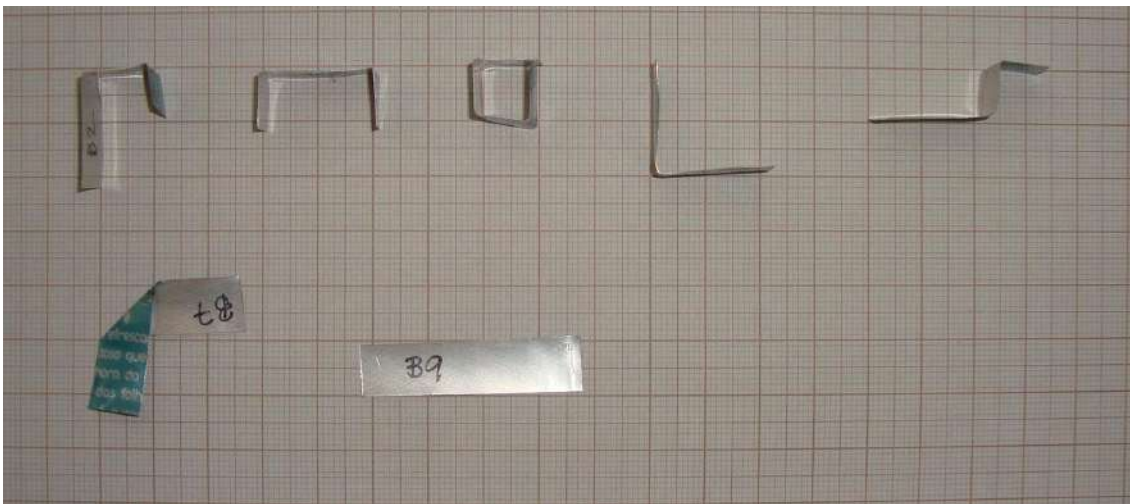


Figura III.7 – Partículas do grupo B

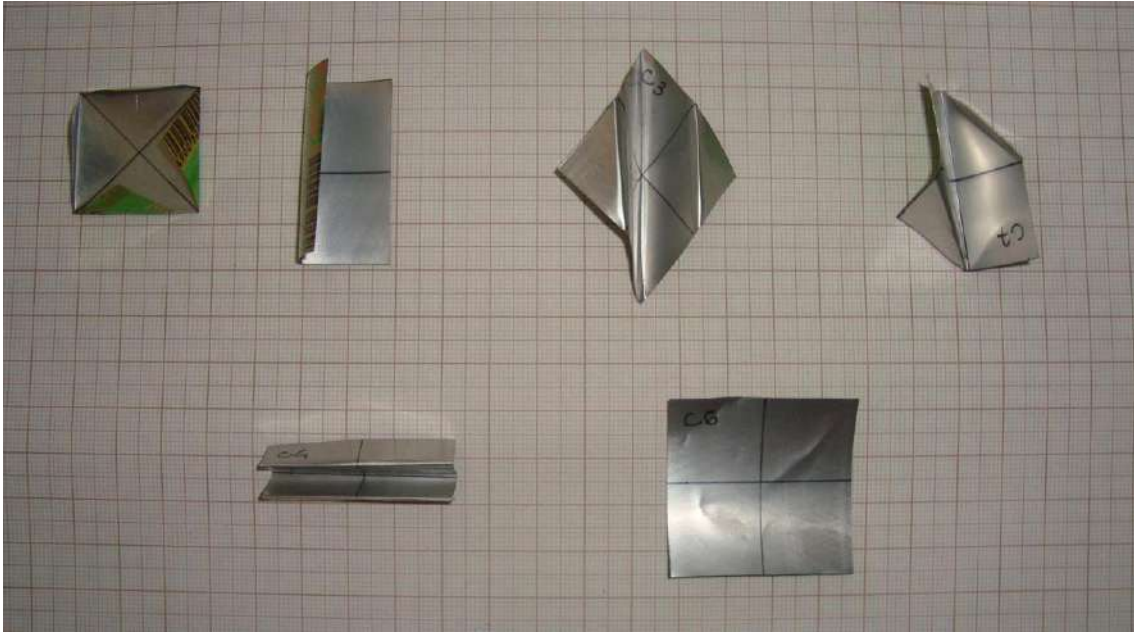


Figura III.8 – Partículas do grupo C

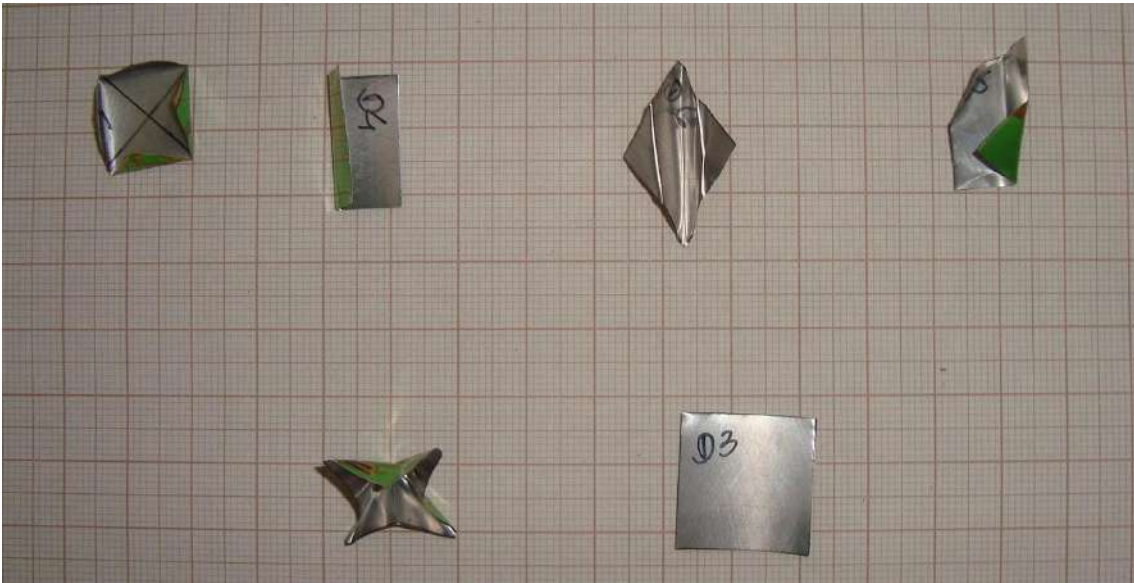


Figura III.9 – Partículas do grupo D

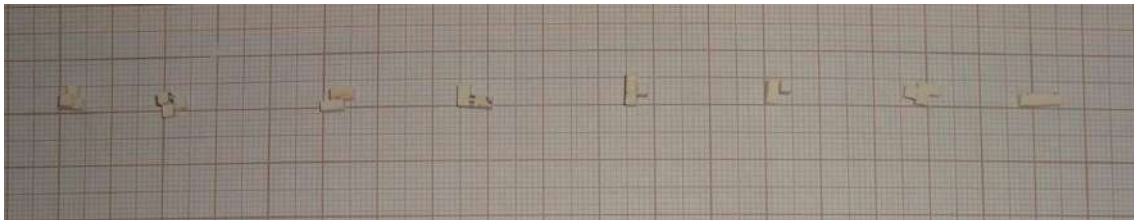


Figura III.10 – Partículas do grupo E

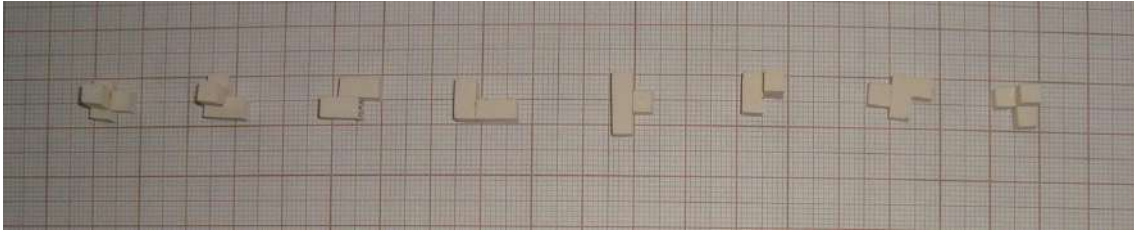


Figura III.11 – Partículas do grupo F

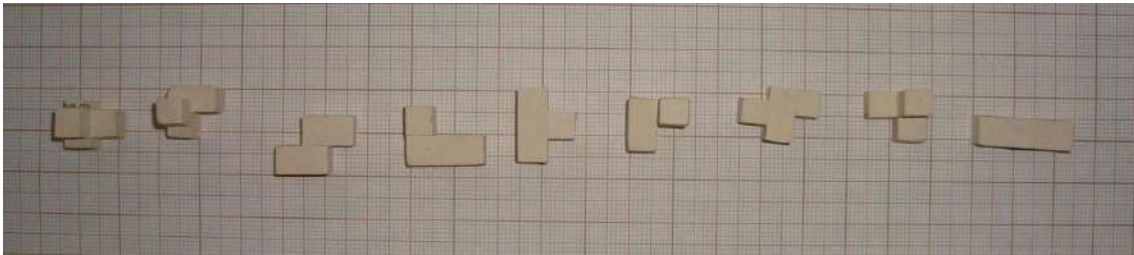


Figura III.12 – Partículas do grupo G

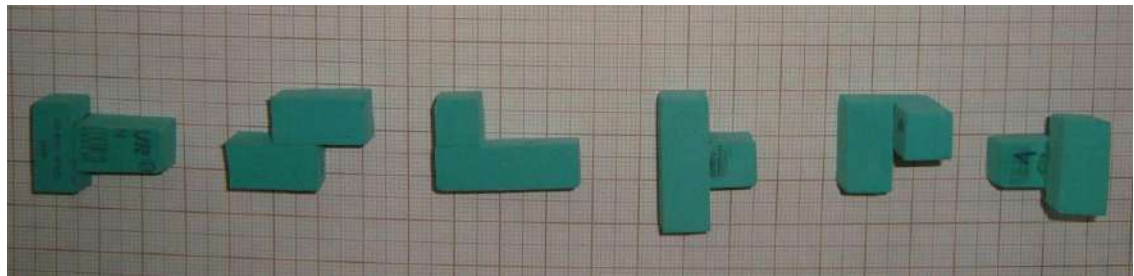


Figura III.13 – Partículas do grupo H

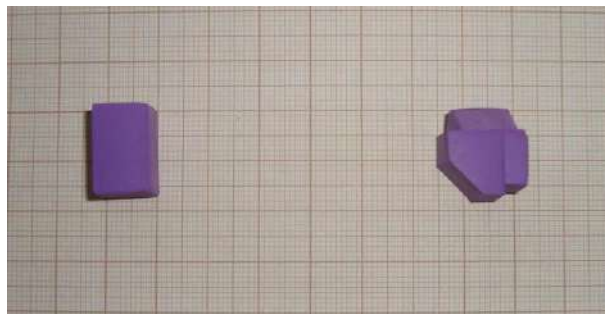


Figura III.14 – Partículas do grupo I

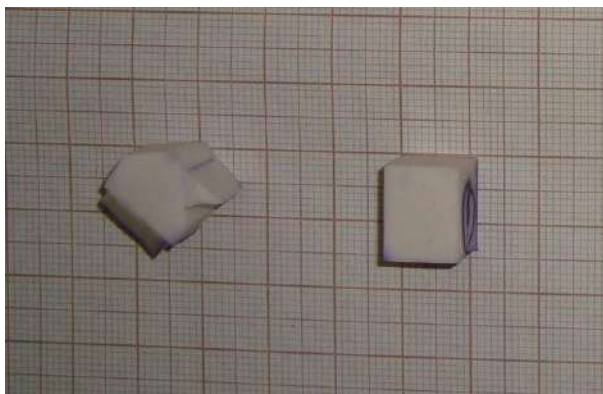


Figura III.15 – Partículas do grupo J

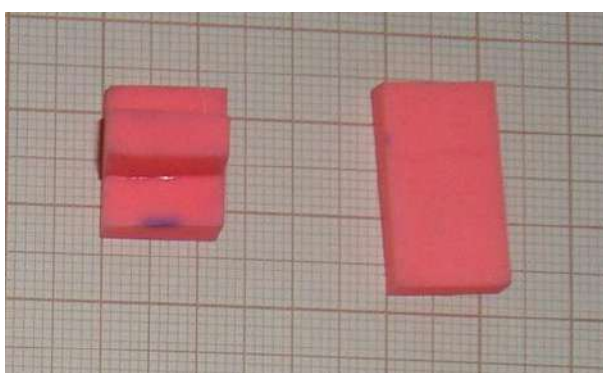


Figura III.16 – Partículas do grupo K

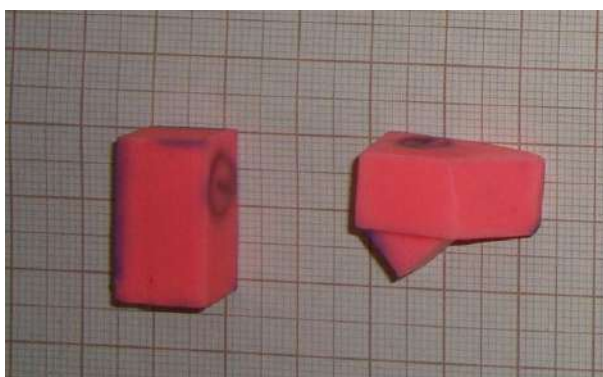


Figura III.17 – Partículas do grupo L

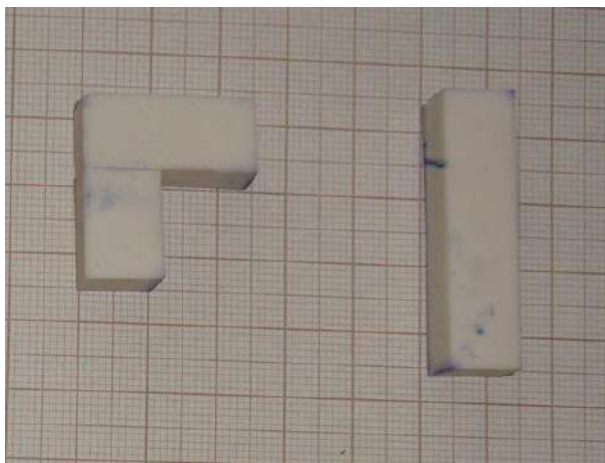


Figura III.18 – Partículas do grupo M

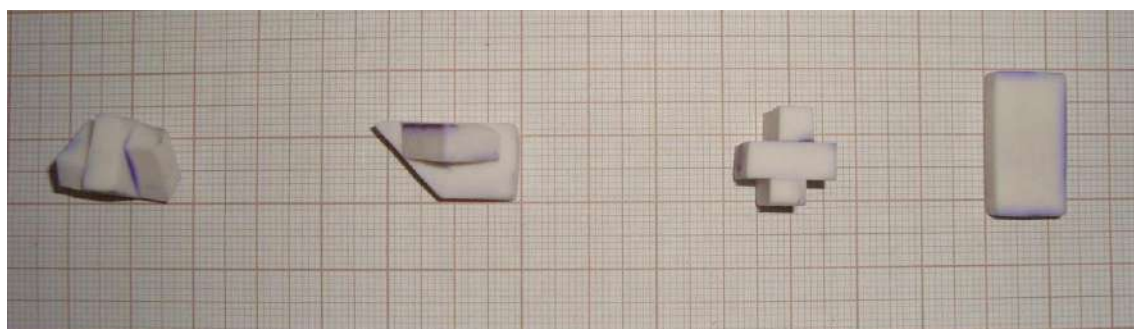


Figura III.19 – Partículas do grupo N

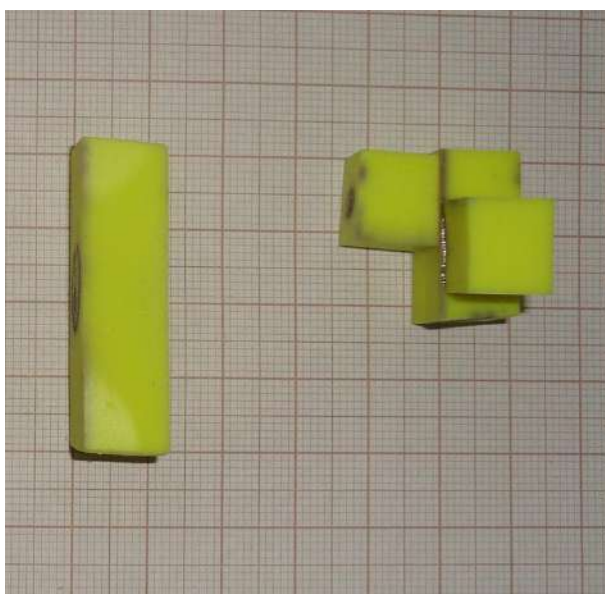


Figura III.20 – Partículas do grupo O

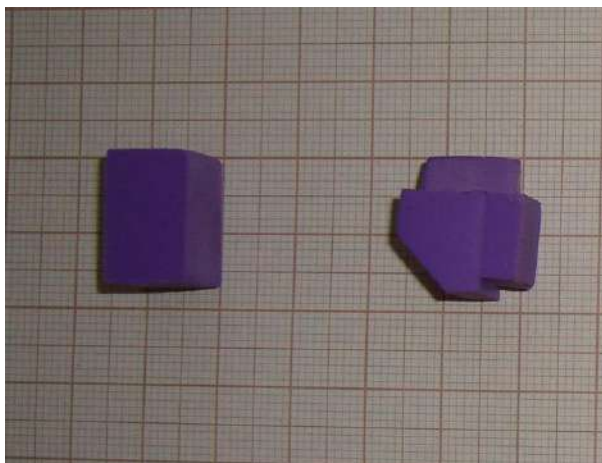


Figura III.21 – Partículas do grupo P

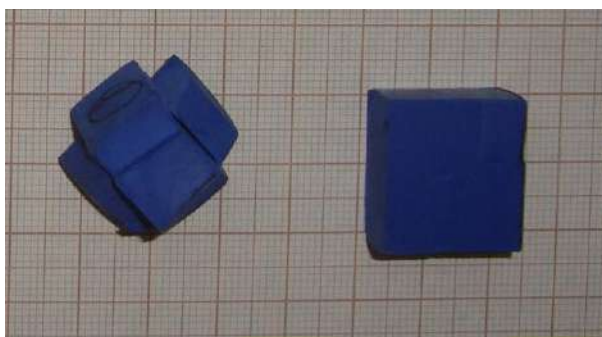


Figura III.22 – Partículas do grupo Q

III.3. LÍQUIDOS

Os líquidos testados neste trabalho foram água destilada (Laboratório de Engenharia Bioquímica, EQ/UFRJ), glicerina bi-destilada (Casa Wolff, Higienópolis, Rio de Janeiro - RJ) e óleo mineral grau técnico (Qbex, Duque de Caxias, Rio de Janeiro – RJ), todos fluidos newtonianos bem conhecidos. A escolha desses líquidos baseou-se principalmente na marcante diferença de viscosidades. As propriedades físicas relevantes desses líquidos são

dadas

na

Tabela III.3.

Tabela III.3 – Propriedades físicas dos fluidos estudados nas condições de ensaio

Fluido	Temperatura (°C)	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade (cP)
Água	25°C	997,045	0,8937
	25,5°C	996,915	0,8837
	27,5°C	996,374	0,8452
Glicerina	27,5°C	1104,282	872,3082
Óleo Mineral	26°C	934,929	16,600

As propriedades físicas da água foram facilmente obtidas em Perry *et al* (1950).

Para a glicerina, tentou-se obter a viscosidade por meios instrumentais, porém isto não foi possível, pois o elevado valor da mesma encontrava-se muito acima da faixa de leitura do viscosímetro. Desta forma, foi utilizada então a equação de *Guzman-Andrade* (Perry 5th Ed., 1950) para a determinação da viscosidade da glicerina.

$$\mu = A * e^{\frac{B}{T}} \quad \text{(III.2)}$$

onde μ é a viscosidade, T é a temperatura absoluta e A e B são coeficientes de proporcionalidade.

Utilizando valores experimentais obtidos para a glicerina, retirados do *Handbook of Chemistry and Physics* (1978), obtemos os dados presentes na Tabela III.4:

Tabela III.4 – Viscosidade do glicerol

Temperatura	Viscosidade
20°C	1490 cP
25°C	954 cP
30°C	629 cP

Através da substituição dos valores de temperatura e viscosidade na equação de Guzman-Andrade, é possível determinar os valores dos coeficientes A e B , a partir do sistema de equações como segue:

$$954 = A * e^{\frac{B}{275+30}} \quad \text{(III.3)}$$

$$629 = A.e^{\frac{B}{273+30}} \quad \text{(III.4)}$$

De (III.3) tem-se que:

$$A = \frac{954}{\frac{B}{298}}$$

Substituindo em (III.4):

$$629 = \frac{954}{\frac{B}{298}} .e^{\frac{B}{310}}$$

Logo:

$$B = 3206,6524 \text{ K}$$

$$A = 0,02024683 \text{ cP}$$

Para a temperatura de 27,5 °C temos:

$$\mu = 0,02024683 .e^{\frac{3206,6054}{273+27,5}}$$

$$\mu = 872,308192 \text{ cP}$$

A viscosidade do óleo mineral a temperatura ambiente (26 °C) foi determinada em viscosímetro sendo, para esta temperatura, 16,6 cP.

III.4. METODOLOGIA

O ensaio de determinação da velocidade terminal das partículas é bastante simples e encontra-se descrito a seguir. Este consiste em soltar a partícula do topo da cuba e medir o

intervalo de tempo necessário para a mesma percorrer dada distância vertical. Alguns cuidados devem ser tomados para que as medidas sejam feitas de forma correta.

Inicialmente deve-se garantir que a superfície da partícula esteja totalmente molhada pelo líquido. Para tanto, antes da realização do ensaio, as partículas são postas em contato com o fluido de teste para que a superfície da partícula fique totalmente molhada pelo fluido. Além disso, as partículas devem ser soltas já submersas no líquido. Isso evita a introdução de bolhas de ar no líquido, aparecimento de ondas superficiais e vórtices (turbulência).

A temperatura do experimento foi tomada periodicamente a fim de possibilitar a determinação exata das propriedades físicas relevantes do líquido (densidade e viscosidade), fundamentais para o cálculo dos grupos adimensionais que caracterizam tais sistemas (número de Reynolds e o coeficiente de arraste). Esta medição foi realizada com termômetro de mercúrio com precisão de 0,5 °C.

Garantiu-se que as partículas sob teste haviam atingido suas velocidades terminais da seguinte maneira. A parte central da cuba foi dividida em três regiões de 20 cm de altura e o intervalo de tempo que cada partícula levava para percorrer cada uma das regiões foi determinado. Em geral, a região superior apresentou intervalos de tempo ligeiramente maiores que nas duas inferiores, indicando que nesta região, a partícula ainda tinha aceleração, no caso, positiva (velocidade aumentando com o tempo). Portanto, para fins de registro de dados, foram considerados apenas os intervalos inferiores por apresentarem intervalos de tempo de queda muito próximos.

Uma vez determinado o intervalo de distância vertical ótimo para as medidas de tempo, realizaram-se os ensaios em triplicata para cada partícula.

Devido à grande massa das partículas de borracha e à baixa viscosidade da água destilada, neste fluido foram testadas apenas as partículas de alumínio. Estas, por sua vez, não foram testadas em glicerina. Em óleo mineral foram testadas as partículas de alumínio e apenas as menores de borracha (grupo E).

De posse da distância vertical percorrida por uma dada partícula (Δz) e do correspondente intervalo de tempo (Δt), calcula-se sua velocidade terminal conforme a segue:

$$v_t = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad \text{(III.5)}$$

onde v_t é a velocidade terminal da partícula, Δz é a distância vertical e Δt é o correspondente intervalo de tempo. Também se determinou a média aritmética das velocidades medidas (triplicata) bem como o desvio padrão da referida média. A partir destes valores, o coeficiente de arraste e o número de Reynolds da partícula foram calculados conforme segue abaixo.

Para o cálculo do coeficiente de arraste (C_D) das partículas, as seguintes restrições foram utilizadas: Fluido encontra-se em estado estacionário; único campo presente é o gravitacional terrestre e a velocidade da partícula é a velocidade terminal. Desta forma, o coeficiente de arraste foi obtido pela equação abaixo:

$$C_D = \frac{4d_p(\rho_s - \rho)g}{3\rho v_t^2} \quad \text{(III.6)}$$

O número de Reynolds da partícula (Re_p) foi calculado levando-se em consideração as mesmas restrições acima.

$$Re_p = \frac{d_p v_t \rho}{\mu} \quad \text{III.7}$$

A partir dos valores de Reynolds e do coeficiente de arraste obtido para cada partícula, plotou-se o gráfico $Re_p \times C_D$.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras IV.1, IV.2 e IV.3, correspondem, respectivamente, aos experimentos com água destilada, glicerol e óleo mineral grau técnico. As planilhas que geraram as figuras para cada fluido encontram-se, respectivamente, nos Apêndices A, B e C.

A Figura IV.1 abaixo apresenta os resultados dos experimento realizados a 26 °C utilizando água destilada.

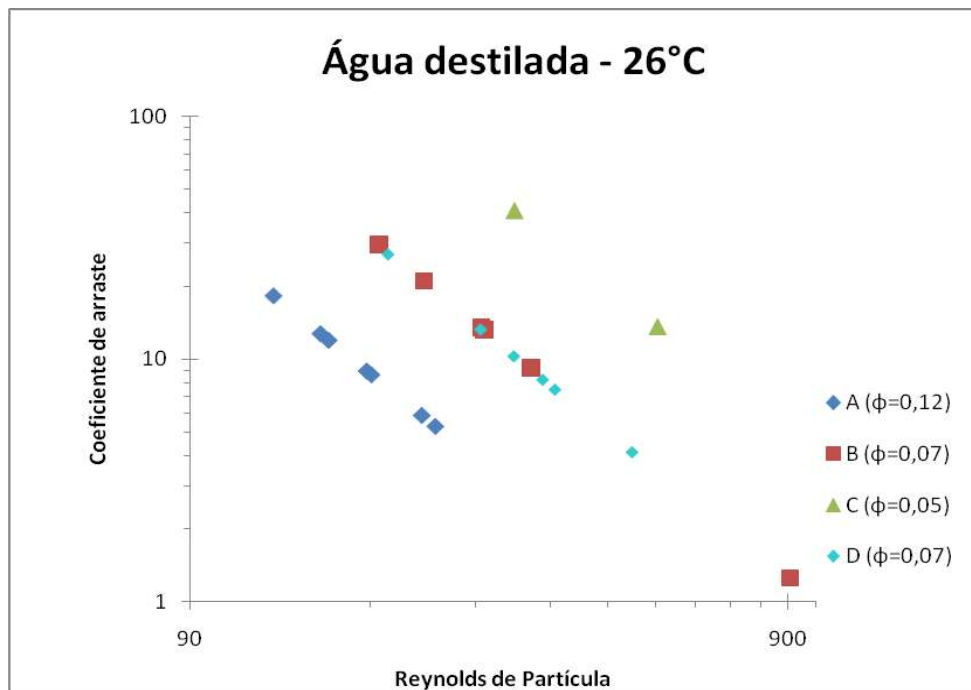


Figura IV.1 – C_D x Re_p dos experimentos com água destilada.

Para o ensaio com água destilada, apenas as partículas de alumínio puderam ser testadas uma vez que devido a massa elevada das partículas de borracha, as mesmas apresentaram velocidade de queda elevada em demasia, o que impossibilitou a medição do tempo de queda e conseqüentemente a determinação da velocidade terminal.

Desta forma, as partículas avaliadas apresentam baixa esfericidade, com valores entre 0,05 e 0,12. Com este ensaio, foi possível atingir números de Reynolds de partícula variando entre 100 e 900, enquanto os valores de coeficiente de arraste variaram de 1,25 a 41.

Este ensaio deixou clara a influência da forma das partículas na velocidade terminal, uma vez que, para partículas de mesma esfericidade e d_p foi obtida uma dispersão de pontos e não um único ponto, como esperado.

A Figura IV.2 abaixo apresenta os resultados dos experimento realizados a 28 °C utilizando glicerina bi-destilada.

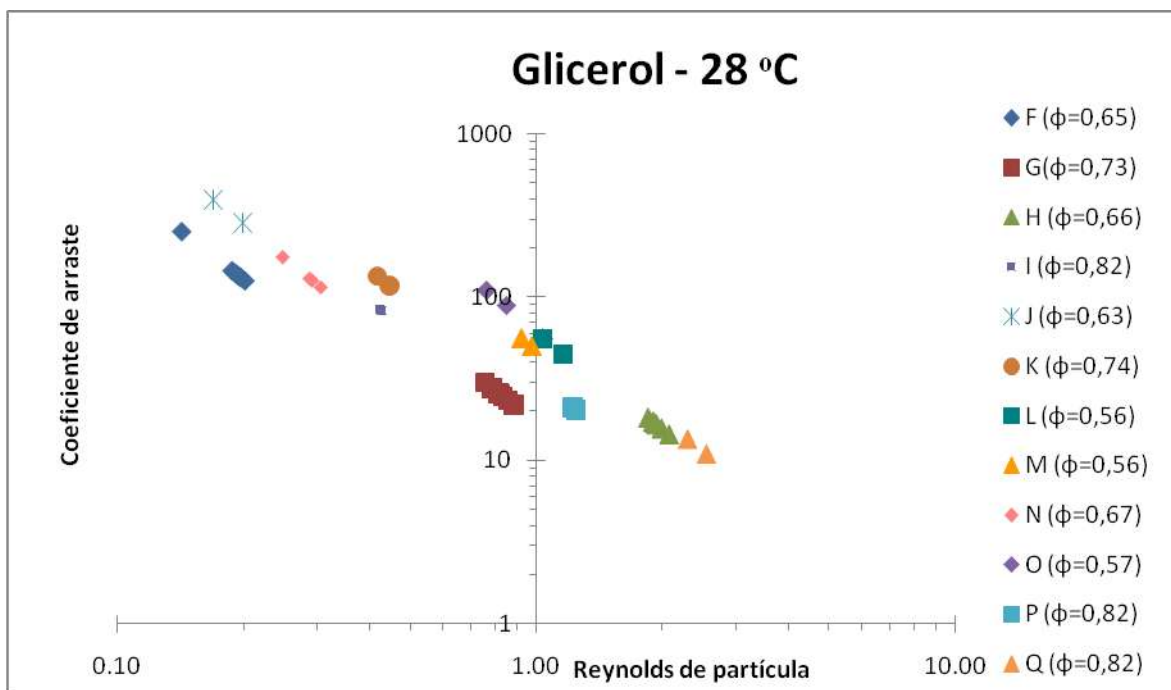


Figura IV.2 – C_D x Re_P dos experimentos com glicerol.

Faixas de Reynolds mais baixas foram estudadas através do ensaio que utilizou glicerol como fluido devido a sua elevada viscosidade (825 cP) na temperatura do ensaio (27,5 °C). Desta forma, para este ensaio, obteve-se Reynolds desde 0,4 até 2,55. Já os valores de coeficiente de arraste variaram de 10,99 a 395,12.

A viscosidade do fluido em questão possibilitou o ensaio de partículas de borracha, que possuem maior massa. Além disto, estas partículas apresentam valores de esfericidade de médio a elevados (0,56 a 0,82).

Assim como o ensaio com água destilada, observou-se dispersão dos pontos relativos a cada partícula, porém foi notado que esta dispersão foi moderada em relação ao ensaio anterior. Observou-se que o nível de dispersão está relacionado à própria esfericidade das partículas.

A Figura IV.3 abaixo apresenta os resultados dos experimento realizados a 26 °C utilizando óleo mineral grau técnico.

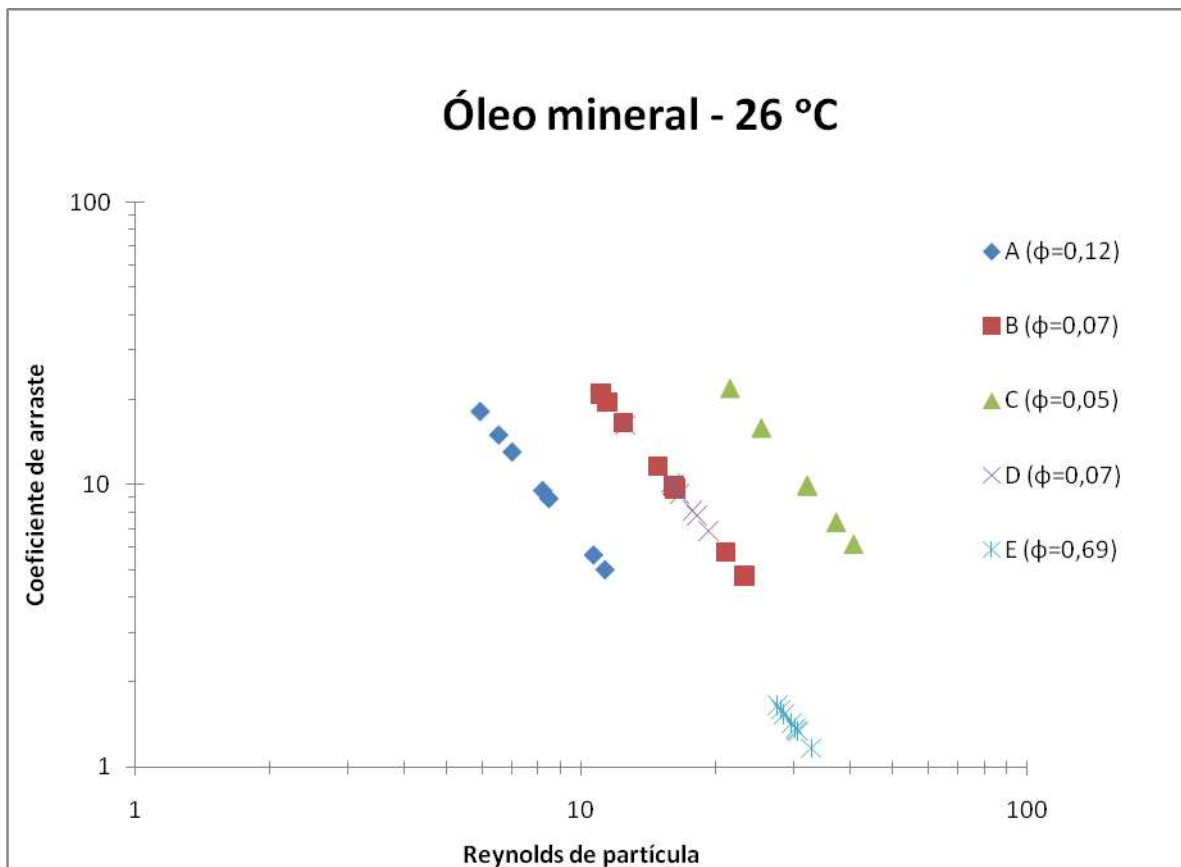


Figura IV.3 – $C_D \times Re_p$ dos experimentos com óleo mineral

O ensaio com óleo mineral permitiu novamente o estudo de partículas de alumínio (baixa esfericidade) e a comparação com um tipo de partícula confeccionado com borracha (partículas E, esfericidade 0,69). Tais partículas de baixa esfericidade, por estarem em contato com um fluido muito mais viscoso, apresentaram uma queda consideravelmente mais retilínea, ao passo que nos ensaios em água destilada, algumas partículas apresentavam desvios freqüentes nas suas trajetórias. As demais partículas de borracha não foram ensaiadas por apresentarem velocidade de queda muito elevada, impossibilitando a correta mensuração do intervalo de tempo.

A faixa de número de Reynolds atingida foi de 5,93 a 40,89 enquanto os valores de coeficiente de arraste variaram de 1,16 a 21,99.

Este ensaio possibilitou a comparação entre a dispersão de pontos entre partículas de baixa esfericidade e esfericidades superiores, reforçando a observação realizada nos experimentos anteriores. As partículas do grupo E ($\phi = 0,69$) mostraram-se bastante agrupadas ao serem comparadas com os demais grupos de partículas: A ($\phi = 0,12$), B ($\phi = 0,07$), C ($\phi = 0,05$) e D ($\phi = 0,07$).

Provavelmente isto ocorre devido às alterações de forma realizadas nas partículas de alumínio que são muito mais significativas do que as realizadas nas partículas de borracha, uma vez que, por serem planas, qualquer alteração em seu formato altera consideravelmente sua velocidade terminal.

Uma comparação dos resultados de todos os ensaios realizados, nos três fluidos utilizados, É apresentada na Figura IV.4 a seguir.

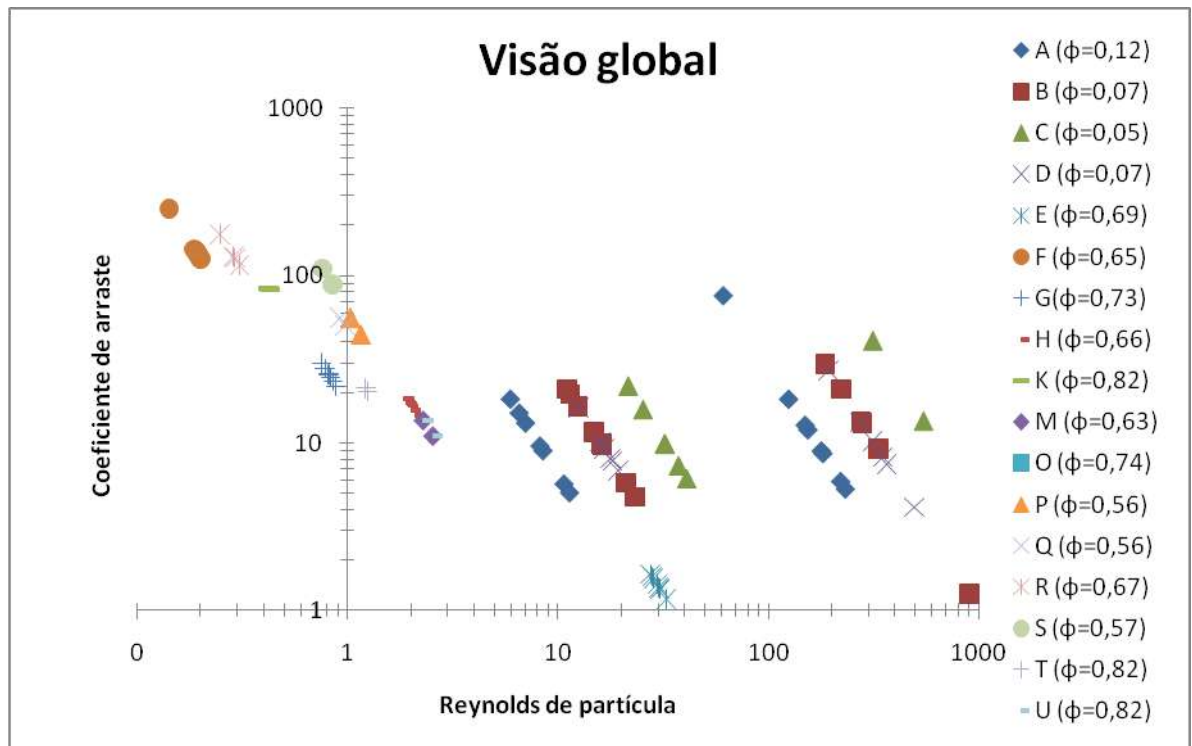


Figura IV.4 – C_D x Re_p : Resultado global

O conjunto de ensaios realizado cobriu de forma homogênea desde números de Reynolds muito baixos, próximos a 0,1 até praticamente 1000. Bem como os coeficientes de arraste obtidos passam por valores próximos de 1 e atingem valores próximos a 400. Sendo que os resultados dos ensaios realizados em glicerina bi-destilada encontram-se em baixos Reynolds, seguidos pelos resultados obtidos com óleo mineral grau técnico, enquanto os valores mais elevados foram obtidos utilizando-se água destilada.

De um modo geral, observou-se que as partículas de alumínio, de menor esfericidade (grupos A, B, C e D) foram as que mais apresentaram diferenças em suas velocidades terminais, mesmo possuindo a mesma esfericidade. Esse fato pode ser observado tanto nos resultados experimentais da água destilada quanto os resultados experimentais do óleo mineral.

As partículas de maior esfericidade, feitas em sua maioria de material borracha, também apresentaram variações quanto às velocidades terminais de partículas de mesma

esfericidade, embora tais efeitos possam ser observados em menor intensidade quando comparado às partículas de alumínio. Para as correlações $C_D \times Re_P$, ϕ comumente encontradas na literatura, partículas de mesma esfericidade, mesmo material e mesmo diâmetro d_p , deveriam apresentar a mesma velocidade terminal nos testes realizados neste trabalho. No entanto ficou claro que isso não acontece. Observou-se marcante dispersão de pontos experimentais no clássico de $C_D \times Re_P$, ϕ , mostrando que para as partículas testadas neste trabalho a esfericidade não discrimina bem o efeito da forma da partícula sobre a força de arraste exercida pelo fluido.

CAPÍTULO V - CONCLUSÃO E SUGESTÕES

V.1. CONCLUSÕES

As conclusões que se seguem baseiam-se exclusivamente nos experimentos realizados neste trabalho e estão restritas às condições e materiais empregados e sujeitos às incertezas das medidas efetuadas.

Observou-se ao longo dos experimentos que partículas que possuíam a mesma esfericidade (ϕ) e mesmo diâmetro característico (d_p), porém com formatos diferentes, ao serem submetidas ao ensaio proposto de queda em fluido newtoniano, apresentaram velocidades terminais diferentes. Previsões de velocidade terminal baseadas em correlações que usam a esfericidade das partículas levam a um único valor de velocidade terminal, em desacordo com os dados obtidos neste trabalho.

Tal resultado sugere fortemente que a esfericidade, embora amplamente utilizada, deve ser usada com cautela, pois pode não discriminar diferentes formas de partículas, sobretudo com partículas marcadamente reentrantes.

As sugestões que serão apresentadas a seguir podem ser classificadas em dois tipos: sugestões experimentais e sugestões quanto o prosseguimento do trabalho.

Quanto à parte experimental, sugere-se o uso de diluições do glicerol com água a fim de explorar diversas viscosidades. Por este fluido apresentar viscosidade elevada (825 cP, nas condições de ensaio), uma grande faixa de viscosidades, e conseqüente, uma ampla faixa de Reynolds pode ser explorada.

Sugere-se também a utilização de outros fluidos newtonianos, de diferentes viscosidades e densidades, podendo assim, abranger uma maior variedade de partículas ensaiadas.

Além disto, o uso de partículas usinadas diminuiria os erros experimentais relacionados à determinação das dimensões e volume das partículas, garantindo um valor

de esfericidade mais preciso. Seria possível também a confecção de partículas com materiais diversos, como acrílico, policarbonato, PVC, metais etc, enriquecendo assim os resultados do estudo.

Quanto à escolha de geometria de partículas, sugere-se o estudo de geometrias com esfericidades não abordadas neste trabalho (0,2 – 0,5) a fim de verificar o comportamento das mesmas.

Uma segunda etapa do trabalho, certamente envolve a definição e validação de um novo fator de forma que discrimine adequadamente os efeitos da forma da partícula sobre a interação partícula-fluido.

Aqui sugerimos três fatores de forma: Índice de Convexidade (ICON), Índice da esfera circunscrita (IEC) e Fator da esfera circunscrita (FEC). Sugere-se que tais fatores sejam amplamente testados para diferentes partículas, e que possam, desta maneira, ter sua eficácia melhor avaliada.

V.2. SUGESTÕES

V.2.1. Índice de convexidade, ICON.

O índice de convexidade consiste na razão entre o menor volume sólido que, acrescentado a partícula a torna convexa e o volume sólido da partícula.

$$ICON = \frac{\text{menor volume de sólido que acrescentado à partícula a tornaria convexa}}{\text{volume de sólido na partícula}} \quad (\text{V.1})$$

Como exemplo, ilustramos o seguinte sólido de geometria conhecida, na Figura V.1, apresentada a seguir:

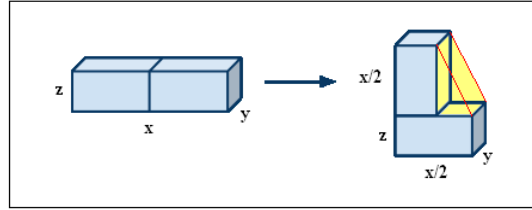


Figura V.1 – Paralelepípedo de lados x, y e z, seguido de sua transformação.

Caso 1: Paralelepípedo de lados x, y e z:

$$V = x.y.z \quad (V.2)$$

$$ICON = \frac{0}{x.y.z} = 0$$

Caso 2: Sólido descrito na figura 5.1, gerado após corte e realocação das partes resultantes:

Seu volume é dado por:

$$V = \frac{x}{2}.y.z + \frac{x}{2}.y.z \Rightarrow V = \left(\frac{x}{2} + \frac{x}{2}\right).y.z \Rightarrow V = x.y.z$$

Ou seja, é o volume do paralelepípedo que o gerou.

Calculando seu *ICON* :

O volume do menor sólido que acrescentado à partícula a tornaria convexa é o volume do prisma amarelo descrito na Figura V.1 – Paralelepípedo de lados x, y e z, seguido de sua transformação..

O volume do sólido amarelo (V_A) subtendido na partícula reconstruída é a metade do volume de outro paralelepípedo de altura x/2, largura (x/2) – z e profundidade y:

$$V_A = \frac{x}{2} \left(\frac{x}{2} - z \right) \frac{y}{2}$$

$$ICON = \frac{V_A}{xyz} = \frac{x}{2} \left(\frac{x}{2} - z \right) \frac{y}{2} \frac{1}{xyz}$$

Dividindo-se pelo volume da figura, o ICON fica

$$ICON = \frac{V_A}{xyz} = \frac{x}{2} \left(\frac{x}{2} - z \right) \frac{y}{2} \frac{1}{xyz}$$

$$ICON = \frac{V_A}{xyz} = \left(\frac{x}{2} - z \right) \frac{1}{4z}$$

$$ICON = \frac{x}{8z} - \frac{1}{4}$$

V.2.2. IEC – Índice da esfera circunscrita

$$IEC = \frac{\text{volume da partícula}}{\text{volume da esfera circunscrita à partícula}} \quad (\text{V.3})$$

Exemplo: Cubo de aresta “a”, ilustrado na Figura V.2.

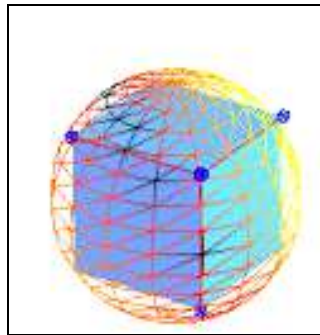


Figura V.2 – Esfera circunscrita ao cubo de aresta “a”.

O diâmetro da esfera que circunscribe a partícula, d , é dado por:

$$d = \sqrt{a^2 + a^2} = a\sqrt{3}$$

Neste caso, o IEC é dado por:

$$IEC = \frac{a^3}{\frac{\pi d^3}{6}} = 0,368$$

Para partículas convexas o valor desse fator de forma dá diferente de zero. Para um dado volume de partícula, quanto mais reentrante for ela, menor será o valor desse fator de forma. Para partículas esféricas ele é igual a 1.

Cálculo do IEC para as partículas H2, H6 e H4

As partículas H2, H4 e H6 são representadas na Figura V.3:

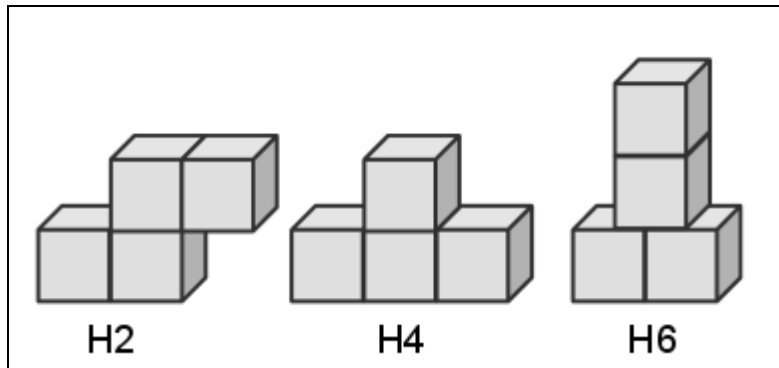


Figura V.3 – Representação das partículas H2, H4 e H6

Traçando seus respectivos raios das esferas circunscritas (representados na Figura V.4), é possível calcular tais valores.

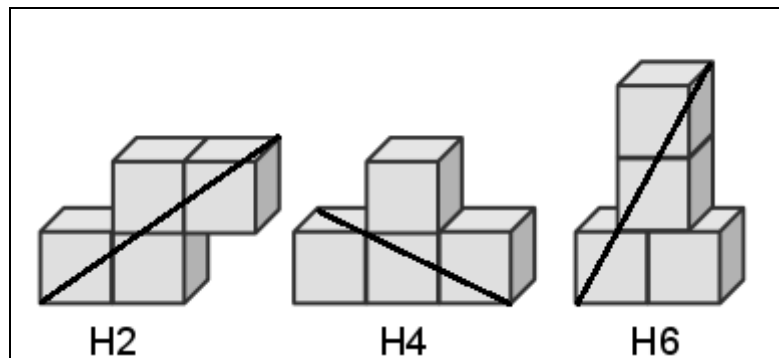


Figura V.4 – Raios das esferas circunscritas às partículas H2, H4 e H6

Calculando-se os valores dos raios das esferas circunscritas através do teorema de Pitágoras, pode-se calcular o volume da esfera circunscrita que é dado por:

$$V = \frac{\pi d^3}{6} \quad (\text{V.4})$$

O volume das três partículas é igual e correspondem a 4 cm³.

Calcula-se então os fatores de forma para as três partículas, conforme expresso na Tabela V.1:

Tabela V.1 – IEC das partículas H2, H4 e H6

	Diâmetro da esfera (cm)	Volume da esfera (cm³)	IEC
H2	3,74	27,43	0,15
H4	3,32	19,10	0,21
H6	3,50	22,45	0,18

Analisando o gráfico $C_D \times Re_p$ (Figura V.5) que contém estas partículas, pode-se sugerir a tendência que quanto maior o *IEC*, maior seria a velocidade terminal das partículas e com isso menor seria seu coeficiente de arraste C_D , assim como maior seria seu valor de Re_p .

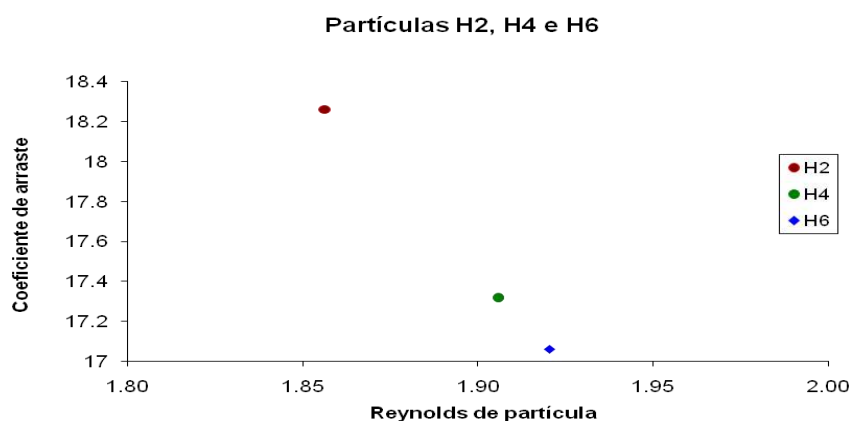


Figura V.5 – $C_D \times Re_p$ das partículas H2, H4 e H6

V.2.3. FEC – Fator esfera circunscrita

$$FEC = \frac{\text{volume da esfera circunscrita à partícula} - \text{volume da partícula}}{\text{volume da partícula}} \quad (\text{V.5})$$

Exemplo: Cubo de aresta “a”, ilustrado na figura 5.2.

O diâmetro da esfera que circunscribe a partícula, d , é dado por:

$$d = \sqrt{a^2 + a^2} = a\sqrt{2}$$

Neste caso, o FEC é dado por:

$$FEC = \frac{\frac{\pi d^3}{6} - a^3}{a^3} = 1,72$$

Pode-se facilmente demonstrar que o FEC de partículas esféricas é igual a zero.

Calculando o FEC das partículas H2, H6 e H4

Traçando seus respectivos raios das esferas circunscritas, ilustrados na figura 5.4 e calculando os valores dos raios das esferas circunscritas através do teorema de Pitágoras, calcula-se o volume da esfera circunscrita que é dado pela Equação V.4

Calculamos então os fatores de forma para as três partículas, obtemos os seguintes resultados, expressos na Tabela V.2:

Tabela V.2 – FEC das partículas H2, H4 e H6

	Diâmetro da esfera (cm)	Volume da esfera (cm³)	FEC
H2	3,74	27,43	5,86
H4	3,32	19,10	3,78
H6	3,50	22,45	4,61

Analisando o gráfico $C_D \times Re_p$ (Figura V.1) que contém estas partículas, poderíamos sugerir a tendência que quanto maior o *FEC*, menor seria a velocidade terminal das partículas e com isso maior seria seu coeficiente de arraste C_D e menor seria seu Re_p .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, T.; **Particle size measurement**, Powder Technology Series. 3ª ed. 1981.
- BARRETT, P. J.; **The shape of rock particles, a critical review**, Sedimentology, Vol 27, p. 291-303. 1980
- ESCUDIÉ, A. R.; EPSTEIN, N., GRACEA, J. R.; BIA, H.T.; **Effect of a particle shape on liquid-fluidized beds of binary (and ternary) solids**. 2005.
- HEYWOOD, H. (1954). **Particle shape coefficients**. J. Imperial College Chemical Society, Vol. 8, p. 25-33
- KENITIRO, S. **Introdução à sedimentologia**. Edgard Blucher, Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1973
- MASSARANI, G. **Fluidodinâmica de Sistemas Particulados**, E-papers editora. 2002.
- McCABE, J.C. SMITH & P. HARRIOTT, **Unit Operations of Chemical Engineering**, McGraw-Hill, 6th Ed., New York. 2001.
- MENDES, J.C.; BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. **Estratigrafia e sedimentologia; geologia estrutural, aerofotogeometria**. Instituto nacional do livro, Brasília. 1972.
- MORA, C.F.; KWAN, A.K.H. **Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing**. 1999.
- PERRY, J. H.; **Chemical Engineers Handbook**, McGraw-Hill Books Company. 3ª ed. New York, 1950.
- PERRY, J. H.; **Chemical Engineers Handbook**, McGraw-Hill Books Company. 3ª ed. New York, 1973.
- PETTYJOHN, E.S E CHRISTIANSEN, E. B. **Effect of Particle Shape as Free-Setting Rates of Isometric Particles**, Chemical Engineering Progress, Vol. 43, p. 157-172. 1948.
- POCZECK, F. **A shape factor to assess the shape of particles using image analysis**. Powder Technology, Vol. 93, p. 47-53. 1997

SILVA, D. R., PEÇANHA, R. P. **Hidrodinâmica de partículas sólidas não-isométricas no regime de transição.** XXIV ENEMP. 1996.

STANIFORTH, J. N., AND REES, J. E. **Shape classification of re-entrant particles”. 1. The shape factor, shah.** Powder Technology, Vol. 28((1)), p. 3-8. 1981.

VALLEJO, L. E. (1995). **Fractal analysis of granular materials.** Geotechnique, Vol. 45(1), p. 159-163.

WADELL, H. **Sphericity and roundness of particles.** Journal of Geology, Vol. 41. p. 310-331. 1932.

WEAST, R .C. **Handbook of chemistry and physics.** Cleveland. CRC Press, 1978.

http://intranet.nitrkl.ac.in/GroupEmailfiles/NWKMXOXF_2323.ppt. Acesso em 10/12/2010.

http://www.bookrags.com/wiki/Sphericity#Sphericity_of_common_objects Acesso em 08/12/2010.

**APÊNDICE A – TABELAS RELATIVAS AOS ENSAIOS COM
ÁGUA DESTILADA**

Tabela A.I – Dados experimentais para os experimentos com água destilada

T (°C)	Partícula		1º teste	2º teste	3º teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	A1	t1	3,42	3,85	2,79	3,35	0,44	5,96	6,72
		t2	3,51	2,87	2,57	2,98	0,39		
		t3	3,25	3,00	2,67	2,97	0,24		
27,5	A2	t1	4,35	3,71	3,87	3,98	0,27	7,10	5,64
		t2	3,58	3,42	3,84	3,61	0,17		
		t3	3,22	3,38	3,85	3,48	0,27		
27,5	A3	t1	4,83	4,33	4,59	4,58	0,20	6,97	5,74
		t2	3,55	3,12	3,34	3,34	0,18		
		t3	3,84	3,39	3,67	3,63	0,19		
27,5	A4	t1	3,03	3,50	3,77	3,43	0,31	5,75	6,96
		t2	2,87	2,79	3,00	2,89	0,09		
		t3	2,63	3,08	2,87	2,86	0,18		
27,5	A5	t1	5,09	4,85	4,75	4,90	0,14	8,21	4,87
		t2	4,10	4,13	4,18	4,14	0,03		
		t3	4,05	4,09	4,09	4,08	0,02		
27,5	A6	t1	4,97	5,18	5,10	5,08	0,09	8,47	4,72
		t2	4,36	4,22	4,39	4,32	0,07		
		t3	4,13	4,22	4,10	4,15	0,05		
27,5	A8	t1	3,21		3,11	3,16	0,05	5,46	7,33
		t2	3,09		2,46	2,78	0,32		
		t3	2,87		2,49	2,68	0,19		
27,5	A9	t1	5,62	5,96	5,64	5,74	0,16	10,14	3,94
		t2	5,10	5,23	5,07	5,13	0,07		
		t3	4,90	5,19	4,94	5,01	0,13		
25,5	B3	t1	3,71	4,29	4,16	4,05	0,25	6,93	5,77
		t2	3,46	3,41	3,46	3,44	0,02		
		t3	3,47	3,47	3,51	3,48	0,02		
25,5	B4	t3	3,13	3,12	3,34	3,20	0,10	5,72	6,99
		t1	2,96	2,83	2,92	2,90	0,05		
		t2	2,79	2,96	2,70	2,82	0,11		

T (°C)	Partícula		1º teste	2º teste	3º teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
25,5	B5	t1	3,98	4,07	3,85	3,97	0,09	6,85	5,84
		t2	3,30	3,54	3,43	3,42	0,10		
		t3	3,37	3,47	3,45	3,43	0,04		
25,5	B6	t1	4,71	4,93	4,82	4,82	0,09	8,64	4,63
		t1	4,43	4,31	4,47	4,40	0,07		
		t2	4,05	4,35	4,30	4,23	0,13		
25,5	B7	t3	1,95	1,34	1,67	1,65	0,25	2,11	18,93
		t1	0,94	1,02	1,11	1,02	0,07		
		t2	1,11	1,10	1,06	1,09	0,02		
25,5	B9	t3	5,97	5,68	6,09	5,91	0,17	10,27	3,89
		t1	4,90	4,98	5,31	5,06	0,18		
		t2	5,66	4,90	5,06	5,21	0,33		
25	C1	t1	3,78	2,98	2,99	3,25	0,37	5,52	7,25
		t2	2,75	2,71	2,76	2,74	0,02		
		t3	2,75	2,84	2,75	2,78	0,04		
25	C2	t1	5,90	5,21	5,56	5,56	0,28	9,60	4,07
		t2	4,85	4,82	4,89	4,85	0,03		
		t3	4,81	4,46	4,98	4,75	0,22		
25	D1	t1	3,34	2,59	3,47	3,13	0,39	5,17	7,74
		t2	2,58	2,58	2,60	2,59	0,01		
		t3	2,54	2,70	2,50	2,58	0,09		
25	D2	t1	2,12	1,84	2,64	2,20	0,33	3,84	10,43
		t2	1,78	1,74	1,81	1,78	0,03		
		t3	1,82	1,86	2,50	2,06	0,31		
25	D3	t1	5,06	5,96	5,56	5,53	0,37	9,83	4,07
		t2	4,73	4,82	5,07	4,87	0,14		
		t3	4,80	5,06	5,02	4,96	0,11		
25	D4	t1	3,28	3,40	3,81	3,50	0,23	6,05	6,61
		t2	3,20	2,88	3,00	3,03	0,13		
		t3	2,92	3,00	3,16	3,03	0,10		

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
25	D5	t1	3,34	3,38	3,73	3,48	0,18	5,42	7,38
		t2	2,67	2,79	2,58	2,68	0,09		
		t3	2,83	2,67	2,71	2,74	0,07		
25	D6	t1	3,80	3,05	3,37	3,41	0,31	6,88	5,81
		t2	3,71	3,46	3,20	3,46	0,21		
		t3	3,12	3,41	3,74	3,42	0,25		

Tabela A.II – C_D e Re_p para os experimentos com água destilada

T (°C)	Partícula	Vt (cm/s)	ρ (líquido) (kg/m ³)	ρ (sólido) (kg/m ³)	μ (cP)	Rep	CD
27,5	A1	6,72	996,37	2431,15	0,8453	60,78	76,03
27,5	A2	5,64	996,37	2431,15	0,8453	177,60	8,91
27,5	A3	5,74	996,37	2431,15	0,8453	180,83	8,59
27,5	A4	6,96	996,37	2431,15	0,8453	219,32	5,84
27,5	A5	4,87	996,37	2431,15	0,8453	153,45	11,93
27,5	A6	4,72	996,37	2431,15	0,8453	148,75	12,70
27,5	A8	7,33	996,37	2431,15	0,8453	231,05	5,26
27,5	A9	3,94	996,37	2431,15	0,8453	124,26	18,19
25,5	B3	5,77	996,92	2432,47	0,8837	276,42	13,47
25,5	B4	6,99	996,92	2432,47	0,8837	334,74	9,18
25,5	B5	5,84	996,92	2432,47	0,8837	279,38	13,18
25,5	B6	4,63	996,92	2432,47	0,8837	221,69	20,94
25,5	B7	18,93	996,92	2432,47	0,8837	906,01	1,25
25,5	B9	3,89	996,92	2432,47	0,8837	186,44	29,60
25	C1	7,25	997,05	2432,79	0,8937	544,52	13,58
25	C2	4,07	997,05	2432,79	0,8937	312,99	41,09
25	D1	7,74	997,05	2432,79	0,8937	366,49	7,49
25	D2	10,43	997,05	2432,79	0,8937	493,53	4,13
25	D3	4,07	997,05	2432,79	0,8937	192,56	27,14
25	D4	6,61	997,05	2432,79	0,8937	312,81	10,29
25	D5	7,38	997,05	2432,79	0,8937	349,57	8,24
25	D6	5,81	997,05	2432,79	0,8937	275,22	13,29

**APÊNDICE B – TABELAS RELATIVAS AOS ENSAIOS COM
GLICERINA BI-DESTILADA**

Tabela B.I – Dados experimentais para os experimentos com glicerina bi-destilada

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	F1	t1	10,52	10,67	10,46	10,55	0,09	20,74	1,93
		t2	10,07	9,99	9,79	9,95	0,12		
		t3	10,92	10,75	10,69	10,79	0,10		
27,5	F2	t1	10,21	10,34	10,70	10,42	0,21	20,36	1,96
		t2	10,34	9,82	10,08	10,08	0,21		
		t3	10,44	10,12	10,28	10,28	0,13		
27,5	F3	t1	11,29	11,31	11,58	11,39	0,13	21,28	1,88
		t2	10,45	10,83	10,74	10,67	0,16		
		t3	10,58	10,54	10,71	10,61	0,07		
27,5	F4	t1	11,50	10,90	10,92	11,11	0,28	20,27	1,97
		t2	10,03	10,12	9,94	10,03	0,07		
		t3	10,40	10,11	10,21	10,24	0,12		
27,5	F5	t1	11,28	10,12	10,13	10,51	0,54	19,84	2,02
		t2	9,86	9,70	9,91	9,82	0,09		
		t3	10,03	10,03	9,99	10,02	0,02		
27,5	F6	t1	10,27	10,83	10,81	10,64	0,26	20,54	1,95
		t2	10,15	9,82	9,95	9,97	0,14		
		t3	10,71	10,66	10,32	10,56	0,17		
27,5	F7	t1	10,94	11,15	10,77	10,95	0,16	20,94	1,91
		t2	10,37	10,49	10,45	10,44	0,05		
		t3	10,40	10,42	10,70	10,51	0,14		
27,5	F8	t1	14,34	14,50	14,25	14,36	0,10	28,01	1,43
		t2	13,79	13,77	13,78	13,78	0,01		
		t3	14,24	14,16	14,28	14,23	0,05		
27,5	G1	t1	3,86		4,30	4,08	0,22	7,18	5,57
		t2	3,51		3,62	3,57	0,06		
		t3	3,71		3,51	3,61	0,10		
27,5	G2	t3	3,81	3,70	3,92	3,81	0,09	6,99	5,73
		t1	3,34	3,63	3,38	3,45	0,13		
		t2	3,67	3,43	3,51	3,54	0,10		

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	G3	t1	4,37	3,91	3,69	3,99	0,28	7,33	5,45
		t2	4,09	3,64	3,56	3,76	0,23		
		t3	3,46	3,66	3,59	3,57	0,08		
27,5	G4	t1	4,77	4,34	4,22	4,44	0,24	7,35	5,44
		t1	3,63	3,62	3,75	3,67	0,06		
		t2	3,68	3,72	3,66	3,69	0,02		
27,5	G5	t3	4,12	4,28	4,18	4,19	0,07	7,31	5,47
		t1	3,76	3,59	3,60	3,65	0,08		
		t2	3,63	3,64	3,72	3,66	0,04		
27,5	G6	t3	3,97	3,90	3,68	3,85	0,12	6,76	5,92
		t1	3,34	3,38	3,43	3,38	0,04		
		t2	3,34	3,37	3,42	3,38	0,03		
27,5	G7	t1	4,68	3,77	4,68	4,38	0,43	7,63	5,24
		t2	3,63	3,80	3,85	3,76	0,09		
		t3	3,76	3,88	3,97	3,87	0,09		
27,5	G8	t1	4,96	4,62	5,06	4,88	0,19	7,92	5,05
		t2	3,97	3,80	3,97	3,91	0,08		
		t3	4,10	4,01	3,92	4,01	0,07		
27,5	H1	t1	3,10	2,75	3,29	3,05	0,22	4,99	8,02
		t2	2,37	2,42	2,37	2,39	0,02		
		t3	2,45	2,53	2,82	2,60	0,16		
27,5	H2	t1	2,80	3,09	2,94	2,94	0,12	5,37	7,45
		t2	2,62	2,62	2,62	2,62	0,00		
		t3	2,75	2,75	2,75	2,75	0,00		
27,5	H3	t1	2,89	3,30	3,13	3,11	0,17	4,78	8,36
		t2	2,28	2,32	2,36	2,32	0,03		
		t3	2,42	2,42	2,55	2,46	0,06		
27,5	H4	t1	3,03	3,17	3,08	3,09	0,06	5,23	7,65
		t2	2,54	2,54	2,56	2,55	0,01		
		t3	2,71	2,66	2,68	2,68	0,02		

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	H5	t1	3,46	3,40	3,04	3,30	0,19	5,13	7,80
		t2	2,80	2,53	2,58	2,64	0,12		
		t3	2,32	2,63	2,53	2,49	0,13		
27,5	H6	t1	3,08	2,93	3,05	3,02	0,06	5,19	7,71
		t2	2,58	2,54	2,56	2,56	0,02		
		t3	2,62	2,62	2,65	2,63	0,01		
27,5	K1	t1	9,23	8,70	8,31	8,75	0,38	17,21	2,32
		t2	8,39	8,64	8,47	8,50	0,10		
		t3	9,06	8,44	8,64	8,71	0,26		
27,5	K2	t1	8,93	9,10	9,21	9,08	0,12	17,03	2,35
		t2	8,35	8,34	8,31	8,33	0,02		
		t3	8,64	8,52	8,93	8,70	0,17		
27,5	M1	t1	22,31	21,80	20,43	21,51	0,79	41,13	0,97
		t2	20,64	20,09	20,10	20,28	0,26		
		t3	21,23	20,64	20,68	20,85	0,27		
27,5	M2	t1	18,72	18,71	18,06	18,50	0,31	34,96	1,14
		t2	16,85	17,07	17,31	17,08	0,19		
		t3	18,03	17,77	17,86	17,89	0,11		
27,5	N1	t1	17,38	16,65	15,95	16,66	0,58	32,96	1,21
		t2	16,64	15,97	16,43	16,35	0,28		
		t3	16,68	16,26	16,90	16,61	0,27		
27,5	N2	t1	16,54	16,21	15,25	16,00	0,55	31,33	1,28
		t2	15,29	15,42	15,04	15,25	0,16		
		t3	16,22	16,39	15,63	16,08	0,33		
27,5	O1	t1	11,00	10,59	10,84	10,81	0,17	21,23	1,88
		t2	10,62	10,79	10,28	10,56	0,21		
		t3	10,57	10,32	11,12	10,67	0,33		
27,5	O2	t1	10,51	10,02	9,78	10,10	0,30	19,84	2,02
		t2	9,77	9,85	9,82	9,81	0,03		
		t3	9,94	9,99	10,16	10,03	0,09		

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	P1	t1	6,35	6,62	5,78	6,25	0,35	11,12	3,60
		t2	5,61	5,10	5,64	5,45	0,25		
		t3	5,70	5,62	5,70	5,67	0,04		
27,5	P2	t1	5,02	4,86	5,26	5,05	0,16	9,96	4,02
		t2	4,85	4,76	4,97	4,86	0,09		
		t3	5,08	5,10	5,11	5,10	0,01		
27,5	Q1	t1	6,94	6,30	6,94	6,73	0,30	11,60	3,45
		t2	5,87	5,31	5,87	5,68	0,26		
		t3	6,32	5,36	6,07	5,92	0,41		
27,5	Q2	t1	6,98	6,96	6,59	6,84	0,18	10,98	3,64
		t2	5,19	5,41	5,49	5,36	0,13		
		t3	5,56	5,64	5,65	5,62	0,04		
27,5	R1	t1	11,76	11,87	12,06	11,90	0,12	22,66	1,77
		t2	11,04	11,00	11,38	11,14	0,17		
		t3	11,51	11,29	11,75	11,52	0,19		
27,5	R2	t1	11,59	10,91	11,31	11,27	0,28	21,30	1,88
		t2	10,67	10,74	10,49	10,63	0,11		
		t3	10,91	10,54	10,54	10,66	0,17		
27,5	R3	t1	11,86	12,50	11,22	11,86	0,52	22,34	1,79
		t2	11,59	11,50	10,49	11,19	0,50		
		t3	11,46	11,67	10,30	11,14	0,60		
27,5	R4	t1	14,09	14,01	14,66	14,25	0,29	26,32	1,52
		t2	13,02	13,02	12,77	12,94	0,12		
		t3	13,06	13,31	13,78	13,38	0,30		
27,5	S1	t1	8,11	7,90	8,22	8,08	0,13	15,50	2,58
		t2	7,59	7,38	7,50	7,49	0,09		
		t3	8,10	7,92	8,01	8,01	0,07		
27,5	S2	t1	7,68	6,69	7,24	7,20	0,40	13,88	2,88
		t2	6,91	6,66	7,00	6,86	0,14		
		t3	6,96	7,05	7,05	7,02	0,04		

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	V_t (cm/s)
27,5	T1	t1	3,99	3,28	4,07	3,78	0,36	6,49	6,17
		t2	3,26	3,13	3,46	3,28	0,14		
		t3	3,20	3,33	3,08	3,20	0,10		
27,5	T2	t1	3,13	2,90	3,23	3,09	0,14	6,36	6,29
		t2	3,15	3,13	3,17	3,15	0,02		
		t3	3,21	3,16	3,25	3,21	0,04		
27,5	U1	t1	2,86	2,57	2,95	2,79	0,16	4,53	8,82
		t2	2,21	2,21	2,38	2,27	0,08		
		t3	2,24	2,28	2,28	2,27	0,02		
27,5	U2	t1	2,48	2,37	2,96	2,60	0,26	4,08	9,81
		t2	2,04	2,03	1,99	2,02	0,02		
		t3	2,11	2,03	2,03	2,06	0,04		

Tabela B.II – C_D e Re_p para os experimentos com glicernia bi-destilada

T (°C)	Partícula	V_t (cm/s)	ρ (líquido) (kg/m ³)	ρ (sólido) (kg/m ³)	μ (cP)	Rep	CD
27,5	F1	1,93	1103,68	2074,92	872,3082	0,19	136,94
27,5	F2	1,96	1103,68	2074,92	872,3082	0,20	132,01
27,5	F3	1,88	1103,68	2074,92	872,3082	0,19	144,26
27,5	F4	1,97	1103,68	2074,92	872,3082	0,20	130,85
27,5	F5	2,02	1103,68	2074,92	872,3082	0,20	125,36
27,5	F6	1,95	1103,68	2074,92	872,3082	0,19	134,31
27,5	F7	1,91	1103,68	2074,92	872,3082	0,19	139,69
27,5	F8	1,43	1103,68	2074,92	872,3082	0,14	249,80
27,5	G1	5,57	1103,68	2074,92	872,3082	0,83	24,59
27,5	G2	5,73	1103,68	2074,92	872,3082	0,86	23,32
27,5	G3	5,45	1103,68	2074,92	872,3082	0,82	25,69
27,5	G4	5,44	1103,68	2074,92	872,3082	0,81	25,83
27,5	G5	5,47	1103,68	2074,92	872,3082	0,82	25,55
27,5	G6	5,92	1103,68	2074,92	872,3082	0,88	21,83
27,5	G7	5,24	1103,68	2074,92	872,3082	0,78	27,81
27,5	G8	5,05	1103,68	2074,92	872,3082	0,75	29,99
27,5	H1	8,02	1103,68	1876,26	872,3082	2,00	15,75
27,5	H2	7,45	1103,68	1876,26	872,3082	1,86	18,26
27,5	H3	8,36	1103,68	1876,26	872,3082	2,08	14,49
27,5	H4	7,65	1103,68	1876,26	872,3082	1,91	17,32
27,5	H5	7,80	1103,68	1876,26	872,3082	1,94	16,67
27,5	H6	7,71	1103,68	1876,26	872,3082	1,92	17,06
27,5	K1	2,32	1103,68	1578,27	872,3082	0,42	84,21
27,5	K2	2,35	1103,68	1578,27	872,3082	0,43	82,42
27,5	M1	0,97	1103,68	1512,05	872,3082	0,17	395,12
27,5	M2	1,14	1103,68	1512,05	872,3082	0,20	285,57
27,5	N1	1,21	1103,68	1512,05	872,3082	0,21	251,42

T (°C)	Partícula	Vt (cm/s)	ρ (liquid) (kg/m ³)	ρ (sólido) (kg/m ³)	μ (cP)	Rep	CD
27,5	N2	1,28	1103,68	1512,05	872,3082	0,22	227,17
27,5	O1	1,88	1103,68	1512,05	872,3082	0,42	134,35
27,5	O2	2,02	1103,68	1512,05	872,3082	0,45	117,34
27,5	P1	3,60	1103,68	1578,27	872,3082	1,04	55,74
27,5	P2	4,02	1103,68	1578,27	872,3082	1,16	44,66
27,5	Q1	3,45	1103,68	1578,27	872,3082	0,92	56,18
27,5	Q2	3,64	1103,68	1578,27	872,3082	0,97	50,34
27,5	R1	1,77	1103,68	1578,27	872,3082	0,29	130,86
27,5	R2	1,88	1103,68	1578,27	872,3082	0,31	115,62
27,5	R3	1,79	1103,68	1578,27	872,3082	0,29	127,19
27,5	R4	1,52	1103,68	1578,27	872,3082	0,25	176,60
27,5	S1	2,58	1103,68	1578,27	872,3082	0,76	110,68
27,5	S2	2,88	1103,68	1578,27	872,3082	0,85	88,71
27,5	T1	6,17	1103,68	1876,26	872,3082	1,22	21,18
27,5	T2	6,29	1103,68	1876,26	872,3082	1,25	20,34
27,5	U1	8,82	1103,68	1876,26	872,3082	2,30	13,59
27,5	U2	9,81	1103,68	1876,26	872,3082	2,55	10,99

**APÊNDICE C – TABELAS RELATIVAS AOS ENSAIOS COM
ÓLEO MINERAL GRAU TÉCNICO**

Tabela C.I – Dados experimentais para os experimentos com óleo mineral grau técnico

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	A2	t1	10,52	10,67	10,46	10,55	0,09	20,74	1,93
		t2	10,07	9,99	9,79	9,95	0,12		
		t3	10,92	10,75	10,69	10,79	0,10		
27,5	A3	t1	10,21	10,34	10,70	10,42	0,21	20,36	1,96
		t2	10,34	9,82	10,08	10,08	0,21		
		t3	10,44	10,12	10,28	10,28	0,13		
27,5	A4	t1	11,29	11,31	11,58	11,39	0,13	21,28	1,88
		t2	10,45	10,83	10,74	10,67	0,16		
		t3	10,58	10,54	10,71	10,61	0,07		
27,5	A5	t1	11,50	10,90	10,92	11,11	0,28	20,27	1,97
		t2	10,03	10,12	9,94	10,03	0,07		
		t3	10,40	10,11	10,21	10,24	0,12		
27,5	A6	t1	11,28	10,12	10,13	10,51	0,54	19,84	2,02
		t2	9,86	9,70	9,91	9,82	0,09		
		t3	10,03	10,03	9,99	10,02	0,02		
27,5	A8	t1	10,27	10,83	10,81	10,64	0,26	20,54	1,95
		t2	10,15	9,82	9,95	9,97	0,14		
		t3	10,71	10,66	10,32	10,56	0,17		
27,5	A9	t1	10,94	11,15	10,77	10,95	0,16	20,94	1,91
		t2	10,37	10,49	10,45	10,44	0,05		
		t3	10,40	10,42	10,70	10,51	0,14		
27,5	B1	t1	14,34	14,50	14,25	14,36	0,10	28,01	1,43
		t2	13,79	13,77	13,78	13,78	0,01		
		t3	14,24	14,16	14,28	14,23	0,05		
27,5	B3	t1	3,86		4,30	4,08	0,22	7,18	5,57
		t2	3,51		3,62	3,57	0,06		
		t3	3,71		3,51	3,61	0,10		
27,5	B4	t3	3,81	3,70	3,92	3,81	0,09	6,99	5,73
		t1	3,34	3,63	3,38	3,45	0,13		
		t2	3,67	3,43	3,51	3,54	0,10		

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	B5	t1	4,37	3,91	3,69	3,99	0,28	7,33	5,45
		t2	4,09	3,64	3,56	3,76	0,23		
		t3	3,46	3,66	3,59	3,57	0,08		
27,5	B6	t1	4,77	4,34	4,22	4,44	0,24	7,35	5,44
		t1	3,63	3,62	3,75	3,67	0,06		
		t2	3,68	3,72	3,66	3,69	0,02		
27,5	B7	t3	4,12	4,28	4,18	4,19	0,07	7,31	5,47
		t1	3,76	3,59	3,60	3,65	0,08		
		t2	3,63	3,64	3,72	3,66	0,04		
27,5	B8	t3	3,97	3,90	3,68	3,85	0,12	6,76	5,92
		t1	3,34	3,38	3,43	3,38	0,04		
		t2	3,34	3,37	3,42	3,38	0,03		
27,5	B9	t1	4,68	3,77	4,68	4,38	0,43	7,63	5,24
		t2	3,63	3,80	3,85	3,76	0,09		
		t3	3,76	3,88	3,97	3,87	0,09		
27,5	C1	t1	4,96	4,62	5,06	4,88	0,19	7,92	5,05
		t2	3,97	3,80	3,97	3,91	0,08		
		t3	4,10	4,01	3,92	4,01	0,07		
27,5	C2	t1	3,10	2,75	3,29	3,05	0,22	4,99	8,02
		t2	2,37	2,42	2,37	2,39	0,02		
		t3	2,45	2,53	2,82	2,60	0,16		
27,5	C3	t1	2,80	3,09	2,94	2,94	0,12	5,37	7,45
		t2	2,62	2,62	2,62	2,62	0,00		
		t3	2,75	2,75	2,75	2,75	0,00		
27,5	C4	t1	2,89	3,30	3,13	3,11	0,17	4,78	8,36
		t2	2,28	2,32	2,36	2,32	0,03		
		t3	2,42	2,42	2,55	2,46	0,06		
27,5	C5	t1	3,03	3,17	3,08	3,09	0,06	5,23	7,65
		t2	2,54	2,54	2,56	2,55	0,01		
		t3	2,71	2,66	2,68	2,68	0,02		

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	C6	t1	3,46	3,40	3,04	3,30	0,19	5,13	7,80
		t2	2,80	2,53	2,58	2,64	0,12		
		t3	2,32	2,63	2,53	2,49	0,13		
27,5	D1	t1	3,08	2,93	3,05	3,02	0,06	5,19	7,71
		t2	2,58	2,54	2,56	2,56	0,02		
		t3	2,62	2,62	2,65	2,63	0,01		
27,5	D2	t1	9,23	8,70	8,31	8,75	0,38	17,21	2,32
		t2	8,39	8,64	8,47	8,50	0,10		
		t3	9,06	8,44	8,64	8,71	0,26		
27,5	D3	t1	8,93	9,10	9,21	9,08	0,12	17,03	2,35
		t2	8,35	8,34	8,31	8,33	0,02		
		t3	8,64	8,52	8,93	8,70	0,17		
27,5	D4	t1	22,31	21,80	20,43	21,51	0,79	41,13	0,97
		t2	20,64	20,09	20,10	20,28	0,26		
		t3	21,23	20,64	20,68	20,85	0,27		
27,5	D5	t1	18,72	18,71	18,06	18,50	0,31	34,96	1,14
		t2	16,85	17,07	17,31	17,08	0,19		
		t3	18,03	17,77	17,86	17,89	0,11		
27,5	D6	t1	17,38	16,65	15,95	16,66	0,58	32,96	1,21
		t2	16,64	15,97	16,43	16,35	0,28		
		t3	16,68	16,26	16,90	16,61	0,27		
27,5	D7	t1	16,54	16,21	15,25	16,00	0,55	31,33	1,28
		t2	15,29	15,42	15,04	15,25	0,16		
		t3	16,22	16,39	15,63	16,08	0,33		
27,5	E1	t1	11,00	10,59	10,84	10,81	0,17	21,23	1,88
		t2	10,62	10,79	10,28	10,56	0,21		
		t3	10,57	10,32	11,12	10,67	0,33		
27,5	E2	t1	10,51	10,02	9,78	10,10	0,30	19,84	2,02
		t2	9,77	9,85	9,82	9,81	0,03		
		t3	9,94	9,99	10,16	10,03	0,09		

T (°C)	Partícula		1° teste	2° teste	3° teste	Δt médio(s)	Desvdap	$\Delta t^*(s)$	Vt (cm/s)
27,5	E3	t1	6,35	6,62	5,78	6,25	0,35	11,12	3,60
		t2	5,61	5,10	5,64	5,45	0,25		
		t3	5,70	5,62	5,70	5,67	0,04		
27,5	E4	t1	5,02	4,86	5,26	5,05	0,16	9,96	4,02
		t2	4,85	4,76	4,97	4,86	0,09		
		t3	5,08	5,10	5,11	5,10	0,01		
27,5	E5	t1	6,94	6,30	6,94	6,73	0,30	11,60	3,45
		t2	5,87	5,31	5,87	5,68	0,26		
		t3	6,32	5,36	6,07	5,92	0,41		
27,5	E6	t1	6,98	6,96	6,59	6,84	0,18	10,98	3,64
		t2	5,19	5,41	5,49	5,36	0,13		
		t3	5,56	5,64	5,65	5,62	0,04		
27,5	E7	t1	11,76	11,87	12,06	11,90	0,12	22,66	1,77
		t2	11,04	11,00	11,38	11,14	0,17		
		t3	11,51	11,29	11,75	11,52	0,19		
27,5	E8	t1	11,59	10,91	11,31	11,27	0,28	21,30	1,88
		t2	10,67	10,74	10,49	10,63	0,11		
		t3	10,91	10,54	10,54	10,66	0,17		

Tabela C.II – C_D e Re_p para os experimentos com óleo mineral grau técnico

T (°C)	Partícula	V _t (cm/s)	ρ (líquido) (kg/m ³)	ρ (sólido) (kg/m ³)	μ (cP)	Rep	CD
27,5	A2	1,93	1103,68	2074,92	872,3082	0,19	136,94
27,5	A3	1,96	1103,68	2074,92	872,3082	0,20	132,01
27,5	A4	1,88	1103,68	2074,92	872,3082	0,19	144,26
27,5	A5	1,97	1103,68	2074,92	872,3082	0,20	130,85
27,5	A6	2,02	1103,68	2074,92	872,3082	0,20	125,36
27,5	A8	1,95	1103,68	2074,92	872,3082	0,19	134,31
27,5	A9	1,91	1103,68	2074,92	872,3082	0,19	139,69
27,5	B1	1,43	1103,68	2074,92	872,3082	0,14	249,80
27,5	B3	5,57	1103,68	2074,92	872,3082	0,83	24,59
27,5	B4	5,73	1103,68	2074,92	872,3082	0,86	23,32
27,5	B5	5,45	1103,68	2074,92	872,3082	0,82	25,69
27,5	B6	5,44	1103,68	2074,92	872,3082	0,81	25,83
27,5	B7	5,47	1103,68	2074,92	872,3082	0,82	25,55
27,5	B8	5,92	1103,68	2074,92	872,3082	0,88	21,83
27,5	B9	5,24	1103,68	2074,92	872,3082	0,78	27,81
27,5	C1	5,05	1103,68	2074,92	872,3082	0,75	29,99
27,5	C2	8,02	1103,68	1876,26	872,3082	2,00	15,75
27,5	C3	7,45	1103,68	1876,26	872,3082	1,86	18,26
27,5	C4	8,36	1103,68	1876,26	872,3082	2,08	14,49
27,5	C5	7,65	1103,68	1876,26	872,3082	1,91	17,32
27,5	C6	7,80	1103,68	1876,26	872,3082	1,94	16,67
27,5	D1	7,71	1103,68	1876,26	872,3082	1,92	17,06
27,5	D2	2,32	1103,68	1578,27	872,3082	0,42	84,21
27,5	D3	2,35	1103,68	1578,27	872,3082	0,43	82,42
27,5	D4	0,97	1103,68	1512,05	872,3082	0,17	395,12
27,5	D5	1,14	1103,68	1512,05	872,3082	0,20	285,57
27,5	D6	1,21	1103,68	1512,05	872,3082	0,21	251,42

T (°C)	Partícula	Vt (cm/s)	ρ (liquid) (kg/m ³)	ρ (sólido) (kg/m ³)	μ (cP)	Rep	CD
27,5	D7	1,28	1103,68	1512,05	872,3082	0,22	227,17
27,5	E1	1,88	1103,68	1512,05	872,3082	0,42	134,35
27,5	E2	2,02	1103,68	1512,05	872,3082	0,45	117,34
27,5	E3	3,60	1103,68	1578,27	872,3082	1,04	55,74
27,5	E4	4,02	1103,68	1578,27	872,3082	1,16	44,66
27,5	E5	3,45	1103,68	1578,27	872,3082	0,92	56,18
27,5	E6	3,64	1103,68	1578,27	872,3082	0,97	50,34
27,5	E7	1,77	1103,68	1578,27	872,3082	0,29	130,86
27,5	E8	1,88	1103,68	1578,27	872,3082	0,31	115,62