



Projeto de Final de Curso

Caracterização da Forma de Partículas com  
Vistas à Interação Partícula-Fluido

Alunos:

João Monnerat Araújo R. de Almeida

Pedro Nothaft Romano

Yuri Carvalho

Orientador:

Prof. Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

Junho de 2013

# **CARACTERIZAÇÃO DA FORMA DE PARTÍCULAS COM VISTAS À INTERAÇÃO PARTÍCULA-FLUIDO**

*João Monnerat Araújo R. de Almeida*

*Pedro Nothaft Romano*

*Yuri Carvalho*

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.<sup>a</sup> Heloísa Lajas Sanches, D.Sc., UFRJ

---

Prof. Nei Pereira Jr., Ph. D., UFRJ

---

Thainá Menezes de Melo, M.Sc., COPPE/UFRJ

Orientado por:

---

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

Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
Junho de 2013

Almeida, João Monnerat Araújo Ribeiro

Carvalho, Yuri

Romano, Pedro Nothaft

Caracterização da Forma de Partículas com Vistas à Interação Partícula-Fluido/João Monnerat Araújo R. de Almeida, Pedro Nothaft Romano, Yuri Carvalho. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2013.

x, 83 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013

Orientador: Ricardo Pires Peçanha

1. Fatores de forma 2. Forma de partícula. 3. Esfericidade. 4. Interação Partícula-Fluido 5. Velocidade terminal 6. Monografia. (Graduação EQ/UFRJ). 7. Ricardo Pires Peçanha. I. Caracterização da Forma de Partículas com Vistas à Interação Partícula-Fluido.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao professor Ricardo Pires Peçanha pela orientação, incentivo e apoio durante todas as etapas da elaboração do projeto, contribuindo de forma incomensurável para nosso desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Gostaríamos de agradecer à professora Verônica Maria de Araújo Calado por ceder o viscosímetro, sem o qual o trabalho não poderia ter sido concluído.

Gostaríamos de agradecer à toda equipe da Escola de Química da UFRJ por ter construído um sólido conhecimento acadêmico ao longo de todo o período de graduação.

Finalmente, gostaríamos de agradecer às nossas Famílias por todo o esforço, compreensão e apoio necessários para alcançarmos mais essa etapa na vida.

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.

## **CARACTERIZAÇÃO DA FORMA DE PARTÍCULAS COM VISTAS À INTERAÇÃO PARTÍCULA-FLUIDO**

João Monnerat Araújo R. de Almeida  
Pedro Nothaft Romano  
Yuri Carvalho

Junho, 2013

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

A interação partícula-fluido está presente em diversos processos da engenharia química que envolvem sistemas particulados. Tal fenômeno está diretamente ligado à força de arraste que o fluido exerce sobre a partícula que, dentre outros fatores, depende da forma da partícula. Daí a relevância dos chamados fatores de forma para descrever as características morfológicas das partículas. Devido à importância dos fenômenos partícula-fluido nas operações unitárias, existem na literatura algumas correlações empíricas para estimar a velocidade terminal de partículas, utilizando como parâmetros fatores de forma e características da partícula e do fluido.

A esfericidade é um fator de forma largamente utilizado área de engenharia química e tem ampla difusão na literatura. Um dos objetivos do presente trabalho foi avaliar a qualidade da esfericidade como um fator de forma descritivo da interação partícula-fluido. Dessa forma, partículas de mesma densidade, esfericidade e diâmetro característico tiveram suas velocidades terminais determinadas em diversos líquidos. Baseando-se em correlações presentes na literatura, que utilizam como parâmetro a esfericidade, tais partículas (de mesma densidade, esfericidade e diâmetro característico) deveriam apresentar a mesma velocidade terminal. Além de avaliar a esfericidade, o presente trabalho propõe e avalia uma outra abordagem com relação ao uso de fatores de forma na descrição da interação partícula-fluido. A partir dessa nova abordagem foram desenvolvidas novas correlações simples para o cálculo de velocidades terminais, utilizando novos fatores de forma que junto com a esfericidade descrevem melhor o fenômeno da interação partícula-fluido.

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

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II – FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>3</b>
II.1 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS .....	3
II.1.1 <i>Tamanho de Partícula</i> .....	3
II.1.2 <i>Importância da Forma</i> .....	7
II.1.3 <i>Fatores de Forma</i> .....	8
II.2 INTERAÇÃO PARTÍCULA-FLUIDO.....	11
<b>CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>14</b>
III.1 EQUIPAMENTOS .....	14
III.2 LÍQUIDOS TESTADOS .....	17
III.3 PARTÍCULAS TESTADAS .....	18
III.3.1 <i>Confecção das Partículas</i> .....	18
III.3.2 <i>Determinação da densidade relativa das partículas</i> .....	21
III.3.3 <i>Caracterização e classificação das partículas</i> .....	22
III.4 CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA $C_D$ E $RE_p$ .....	31
<b>CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
IV.1 – DIAGRAMAS $C_D$ X $RE_p$ .....	34
IV.2 – NOVAS CORRELAÇÕES PARA $C_D$ E $RE_p$ .....	39
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	<b>45</b>
V.1 – CONCLUSÕES .....	45
V.2 – SUGESTÕES .....	46
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>47</b>
<b>APÊNDICE A – DADOS PARA ENSAIOS COM ÁGUA DESTILADA</b> .....	<b>48</b>
<b>APÊNDICE B – DADOS PARA ENSAIOS COM SOLUÇÃO DE GLICERINA</b> .....	<b>57</b>
<b>APÊNDICE C – DADOS PARA ENSAIOS COM ÓLEO MINERAL</b> .....	<b>66</b>
<b>APÊNDICE D – DADOS CORRELACIONADOS PARA ÁGUA DESTILADA</b> .....	<b>75</b>
<b>APÊNDICE E – DADOS CORRELACIONADOS PARA SOLUÇÃO DE GLICERINA</b> .....	<b>78</b>
<b>APÊNDICE F – DADOS CORRELACIONADOS PARA ÓLEO MINERAL</b> .....	<b>81</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA II.1 – DIÂMETRO DA ÁREA PROJETADA.....	5
FIGURA II.2 – DIÂMETRO DE FERET.....	6
FIGURA II.3 – DIÂMETRO DE MARTIN.....	6
FIGURA II.4 - PARTÍCULAS DE MESMA FAIXA GRANULOMÉTRICA, FORMAS DIFERENTES....	8
FIGURA II.5 – PARTÍCULA NÃO REENTRANTE (A) E PARTÍCULA REENTRANTE (B) .....	9
FIGURA II.6 – PARTÍCULAS CÔNCAVAS E CONVEXAS.....	10
FIGURA II.7 – PARTÍCULA COM ESFERA CIRCUNSCRITA .....	10
FIGURA II.8 – FORÇAS ATUANTES NA INTERAÇÃO PARTÍCULA-FLUIDO.....	11
FIGURA II.9 – CORRELAÇÃO $C_D$ , $Re_p$ E $\Phi$ (HAIDER E LEVENSPIEL) .....	13
FIGURA III.1 – CUBA UTILIZADA NOS ENSAIOS .....	15
FIGURA III.2 – PARTÍCULA CRUZANDO LINHA AUXILIAR .....	16
FIGURA III.3 – EXEMPLO DO PROCEDIMENTO DE CONFECÇÃO DE PARTÍCULAS.....	19
FIGURA III.4 – EXEMPLO DE DESENHO UTILIZANDO O <i>SKETCHUP</i> .....	19
FIGURA III.5 – PARTÍCULAS REENTRANTES E NÃO REENTRANTES.....	20
FIGURA III.6 – EXEMPLO DE MEDIDA DA MAIOR DIMENSÃO DA PARTÍCULA ATRAVÉS DO <i>SKETCHUP</i> .....	20
FIGURA III.7 – PARTÍCULAS DO GRUPO A .....	22
FIGURA III.8 – PARTÍCULAS DO GRUPO B .....	23
FIGURA III.9 – PARTÍCULAS DO GRUPO C .....	23
FIGURA III.10 – PARTÍCULAS DO GRUPO D.....	24
FIGURA III.11 – PARTÍCULAS DO GRUPO E .....	24
FIGURA III.12 – PARTÍCULAS DO GRUPO F.....	25
FIGURA III.13 – PARTÍCULAS DO GRUPO G .....	25
FIGURA III.14 – PARTÍCULAS DO GRUPO I.....	26
FIGURA III.15 – PARTÍCULAS DO GRUPO J .....	26

FIGURA III.16 – PARTÍCULAS DO GRUPO K .....	27
FIGURA III.17 – PARTÍCULAS DO GRUPO L .....	27
FIGURA III.18 – PARTÍCULAS DO GRUPO M .....	28
FIGURA III.19 – PARTÍCULAS DO GRUPO N .....	28
FIGURA IV.1 – $C_D$ X $Re_p$ ÁGUA .....	34
FIGURA IV.2 – $C_D$ X $Re_p$ GLICERINA.....	36
FIGURA IV.3 – $C_D$ X $Re_p$ ÓLEO .....	37
FIGURA IV.4 – $C_D$ X $Re_p$ VISÃO GERAL .....	38
FIGURA IV.5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS X CORRELAÇÕES DE COELHO E MASSARANI .....	40
FIGURA IV.6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS X CORRELAÇÕES DE COELHO E MASSARANI (AMPLIAÇÃO).....	40
FIGURA IV.7 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS X NOVA CORRELAÇÃO .....	42
FIGURA IV.8 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS X NOVA CORRELAÇÃO (AMPLIAÇÃO) .....	42
FIGURA IV.9 – VISÃO GERAL DOS DADOS EXPERIMENTAIS E DAS CORRELAÇÕES. ....	43
FIGURA IV.10 – VISÃO GERAL DOS DADOS EXPERIMENTAIS E DAS CORRELAÇÕES. (AMPLIAÇÃO).....	44



## LISTA DE TABELAS

TABELA III.1 – PROPRIEDADES DOS FLUIDOS TESTADOS .....	18
TABELA III.2 – DENSIDADE RELATIVA DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	21
TABELA III.3 – CARACTERÍSTICAS DAS PARTÍCULAS .....	29
TABELA III.4 – CORRELAÇÕES DE COELHO & MASSARANI (1996) COM BASE NOS DADOS DE PETTYJOHN & CHRISTIANSEN (1948) .....	32
TABELA A.1 – VELOCIDADES TERMINAIS PARA OS ENSAIOS COM ÁGUA DESTILADA .....	49
TABELA A.2 – CÁLCULO DE $C_D$ E $Re_p$ PARA A ÁGUA DESTILADA.....	55
TABELA B.1 – VELOCIDADES TERMINAIS PARA OS ENSAIOS COM SOLUÇÃO DE GLICERINA .....	58
TABELA B.2 – CÁLCULO DE $C_D$ E $Re_p$ PARA A SOLUÇÃO DE GLICERINA .....	64
TABELA C.1 – VELOCIDADES TERMINAIS PARA OS ENSAIOS COM ÓLEO MINERAL .....	67
TABELA C.2 – CÁLCULO DE $C_D$ E $Re_p$ PARA O ÓLEO MINERAL .....	73
TABELA D.1 – DADOS CORRELACIONADOS PARA ÁGUA DESTILADA.....	76
TABELA E.1 – DADOS CORRELACIONADOS PARA SOLUÇÃO DE GLICERINA .....	79
TABELA F.1 – DADOS CORRELACIONADOS PARA ÓLEO MINERAL .....	82

## NOMENCLATURA

### LETRAS LATINAS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Dimensão</b>
$A_p$	Área Projetada da Partícula	$L^2$
$C_D$	Coeficiente de Arraste	Adimensional
$d_{\#}$	Diâmetro de Peneira	L
$d_a$	Diâmetro de Área Projetada	L
$d_C$	Diâmetro de Perímetro	L
$d_D$	Diâmetro de Arrasto	L
$d_F$	Diâmetro de Ferret	L
$d_M$	Diâmetro de Martin	L
$d_p$	Diâmetro de Volume	L
$d_{ql}$	Diâmetro de Queda Livre	L
$d_s$	Diâmetro de Superfície	L
$d_{st}$	Diâmetro de Stokes	L
$d_{sv}$	Diâmetro de Superfície-Volume ou de Sauter	L
$F_a$	Força de Arraste	$MLT^{-2}$
$F_c$	Força de Campo	$MLT^{-2}$
$F_e$	Força de Empuxo	$MLT^{-2}$
ICON	Índice de Convexidade	Adimensional

IEC	Índice da Esfera Circunscrita	Adimensional
$m_{fdes}$	Massa de Fluido Deslocado	M
$m_p$	Massa da Partícula	M
$Re_p$	Reynolds de Partícula	Adimensional
$S_p$	Área Superficial da Partícula	$L^2$
$v_f$	Velocidade do Fluido	$LT^{-1}$
$V_{fdes}$	Volume de Fluido Deslocado	$L^3$
$V_p$	Volume da Partícula	$L^3$
$v_p$	Velocidade da Partícula	$LT^{-1}$
$v_t$	Velocidade Terminal	$LT^{-1}$

### LETRAS GREGAS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Dimensão</b>
$\mu$	Viscosidade do Fluido	$ML^{-1}T^{-1}$
$\phi$	Esfericidade	Adimensional
$\rho_f$	Densidade do Fluido	$ML^{-3}$
$\rho_p$	Densidade da Partícula	$ML^{-3}$

# CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Na indústria, inúmeros processos envolvem a interação entre partículas sólidas e fluidos. Como exemplos é possível citar: os processos de separação sólido-gás, sólido-sólido, sólido-líquido e fluidização. O projeto, a avaliação e a simulação de equipamentos onde ocorrem tais interações partícula-fluido dependem fundamentalmente da força de arraste que o fluido exerce sobre a partícula. Dessa forma, para projetar, simular ou avaliar um equipamento desses é necessário saber calcular ou estimar essa força de arraste com base em características do fluido e da partícula.

Em processos envolvendo partículas sólidas, a caracterização das partículas é uma das etapas iniciais e de maior importância para uma operação eficiente. Esta caracterização não se restringe somente a parâmetros inerentes as partículas como densidade, tamanho e forma. Faz-se necessário também conhecer o comportamento dinâmico da partícula na interação com o fluido como, por exemplo, a velocidade terminal e o coeficiente de arraste.

Dada a importância de conhecer os comportamentos dinâmicos como velocidade terminal e coeficiente de arraste, faz-se necessário estimar esses parâmetros a partir de dados mais simples. Existem na literatura diversas correlações empíricas utilizadas de forma a prever a velocidade terminal de partículas a partir de características tanto do fluido como da partícula como, por exemplo, a densidade do fluido, a densidade da partícula, a viscosidade do fluido, o diâmetro característico da partícula e sua forma.

A caracterização da forma de partículas é muitas vezes uma tarefa subjetiva e complexa e, portanto, faz-se necessário o uso dos chamados fatores de forma, dentre os quais a esfericidade proposta por Wadell (1932) recebe notório destaque sendo largamente utilizada e difundida.

O presente trabalho pretende avaliar a eficácia da esfericidade como fator de forma na interação partícula-fluido, incluindo na análise partículas que apresentem reentrâncias, onde acredita-se que tal fator de forma apresente limitações. Além disso, o trabalho tem como objetivo apresentar uma abordagem simples e eficaz de como tratar

o problema de caracterização da forma de partículas, apresentando novas correlações empíricas para predição da velocidade terminal baseadas nas correlações presentes na literatura e em outros fatores de forma além da esfericidade.

Para tanto, foram confeccionados diversos grupos de partículas, onde partículas do mesmo grupo são constituídas do mesmo material, possuem mesmo diâmetro característico e mesma esfericidade e, portanto, deveriam apresentar mesma velocidade terminal de acordo com as correlações mais utilizadas. Foram realizados 1.155 ensaios em três fluidos diferentes em uma cuba de acrílico feita sob encomenda.

# CAPÍTULO II – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## II.1 Caracterização de Partículas

A caracterização completa de uma dada partícula requer a medição e a definição de características da partícula como: tamanho, forma, densidade e morfologia de superfície. Como as partículas de interesse normalmente possuem formas irregulares e são diferentes na sua morfologia de superfície, existem diversas maneiras e técnicas para a caracterização das mesmas (Wen-Ching Yang, 2003). Algumas das técnicas mais comumente utilizadas serão apresentadas a seguir.

### II.1.1 Tamanho de Partícula

O tamanho de partícula pode ser descrito por uma ou mais dimensões lineares definidas apropriadamente de forma a caracterizar uma partícula individual (Wen-Ching Yang, 2003). Diversos tipos de diâmetros equivalentes serão apresentados a seguir:

- Diâmetro de Volume ( $d_p$ ):

É definido como o diâmetro da esfera que possui o mesmo volume que a partícula. Pode ser representado pela equação II.1.

$$d_p = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad (\text{II.1})$$

onde  $V_p$  é o volume da partícula.

- Diâmetro de Superfície ( $d_s$ ):

É definido como o diâmetro da esfera que possui a mesma área superficial da partícula. Pode ser representado pela equação II.2.

$$d_s = \left( \frac{S_p}{\pi} \right)^{1/2} \quad (\text{II.2})$$

onde  $S_p$  é a área superficial da partícula.

- Diâmetro de Superfície-Volume ou de Sauter ( $d_{sv}$ ):

É definido como o diâmetro da esfera que possui a mesma razão entre área superficial e volume que a partícula. Pode ser representado pela equação II.3.

$$d_{sv} = \frac{6V_p}{S_p} \quad (\text{II.3})$$

- Diâmetro de Peneira ( $d_{\#}$ ):

É definido como a menor abertura quadrada em uma peneira que permite a passagem da partícula.

- Diâmetro de Stokes ( $d_{stk}$ ):

É definido como o diâmetro de queda livre da partícula no regime de Stokes. Pode ser representado pela equação II.4.

$$d_{stk} = \sqrt{\frac{18\mu v_t}{(\rho_p - \rho_f)g}} \quad (\text{II.4})$$

Onde  $v_t$  é a velocidade terminal da partícula,  $\mu$  é a viscosidade do fluido e  $\rho_p$  e  $\rho_f$  são as densidades da partícula e do fluido, respectivamente.

- Diâmetro de Queda Livre ( $d_{ql}$ ):

É definido como o diâmetro da esfera que possui a mesma densidade e mesma velocidade terminal que a partícula em um fluido de mesma densidade e viscosidade. Na região onde a lei de Stokes é válida o diâmetro de queda livre é igual ao diâmetro de Stokes.

- Diâmetro de Arrasto ( $d_D$ ):

É definido como o diâmetro da esfera que possui a mesma resistência ao movimento que a partícula em um fluido de mesma densidade e viscosidade, onde ambas movem-se a uma mesma velocidade.

- Diâmetro do Perímetro ( $d_c$ ):

É definido como o diâmetro de um círculo que possui o mesmo perímetro que a projeção da partícula em um plano.

- Diâmetro da Área Projetada ( $d_a$ ):

É definido como o diâmetro da esfera que possui a mesma área projetada que a partícula quando vista em uma direção perpendicular ao plano de maior estabilidade da partícula. Um exemplo encontra-se na Figura II.1.



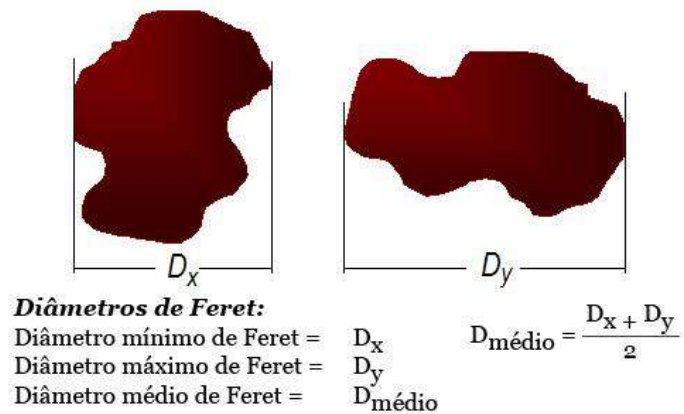
**Figura II.1 – Diâmetro da Área Projetada**

Fonte: [http://www.ctb.com.pt/?page\\_id=3592](http://www.ctb.com.pt/?page_id=3592)

- Diâmetro de Feret ( $d_F$ ):

É um diâmetro estatístico que representa o valor médio da distância entre duas linhas paralelas tangentes à projeção da partícula. Um exemplo encontra-se na Figura II.2.



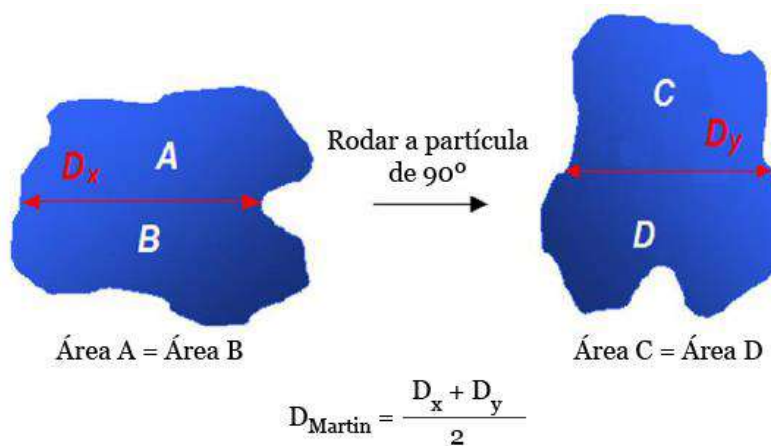


**Figura II.2 – Diâmetro de Feret**

Fonte: [http://www.ctb.com.pt/?page\\_id=3592](http://www.ctb.com.pt/?page_id=3592)

- Diâmetro de Martin ( $d_M$ ):

Trata-se também de um diâmetro estatístico que representa a média do comprimento de duas cordas tiradas em duas direções da projeção da partícula, tiradas no ponto em que as áreas da projeção, para um lado e para o outro da corda são iguais. O procedimento é descrito na Figura II.3.



**Figura II.3 – Diâmetro de Martin**

Fonte: [http://www.ctb.com.pt/?page\\_id=3592](http://www.ctb.com.pt/?page_id=3592)

### *II.1.2 Importância da Forma*

É importante quantificar a forma das partículas pois ela está intimamente relacionada com a força de arraste que o fluido exerce sobre ela. Embora seja de suma importância conhecer o comportamento das partículas em um sistema para estudar os fenômenos decorrentes das interações partícula – fluido, existem poucos trabalhos publicados na literatura que abordem sobre a influência da forma nos sistemas particulados.

O problema da utilização da forma como fator determinante no comportamento de sistemas particulados está justamente na subjetividade do que seria a forma em termos paramétricos. Vários parâmetros foram estudados na literatura como uma maneira de descrever a forma: perímetros, áreas, volumes, comprimentos, etc. Nos estudos anteriores realizados no assunto, buscou-se um fator adimensional que correlacionasse parâmetros de forma e que discriminasse bem a interação partícula-fluido, ou seja, partículas com mesmo fator de forma teriam a mesma velocidade terminal de queda, o que significa mesmo Reynolds de partícula e mesmo coeficiente de arraste. Diversos parâmetros sobre a forma de partículas foram levados em consideração na busca de um fator, porém o fator de forma mais utilizado nas correlações entre o número de Reynolds e o coeficiente de arraste é a esfericidade de Wadell (1932). Nos estudos de Mendel (1972), por exemplo, foi abordada a diferenciação de partículas por suas quinas e arestas como denunciadores de um modelo de forma.

A Figura II.4 mostra partículas que estão na mesma faixa granulométrica, porém com formas diferentes.



**Figura II.4- Partículas de mesma faixa granulométrica, formas diferentes.**

Fonte: <http://thumbs.dreamstime.com/z/parede-de-tijolo-da-pedra-da-forma-irregular-16494633.jpg>

### *II.1.3 Fatores de Forma*

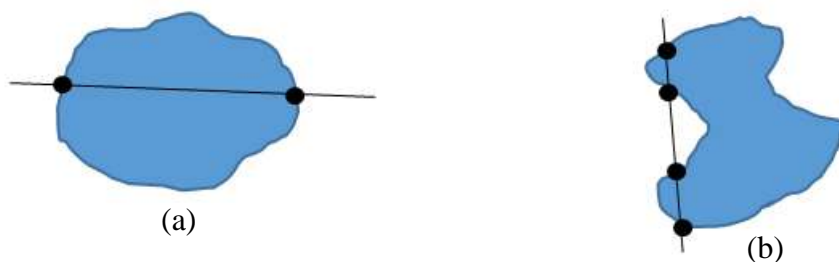
Na procura por fatores de forma que pudessem descrever bem as influências da forma na interação partícula-fluido, foram desenvolvidos diversos fatores considerando diferentes indicadores de reentrâncias, aproximação de esferas, quinas, etc. Entre vários fatores de forma podemos citar:

- Elongação: A razão entre o comprimento e a largura de uma partícula, sendo o comprimento a maior medida da partícula e a largura a maior medida perpendicular ao comprimento.
- Circularidade: A razão entre o perímetro da esfera de mesma área projetada que a partícula em sua configuração mais estável e o perímetro da área da partícula.
- Esfericidade: Significa o quanto a forma da partícula é similar à forma de uma esfera através de uma relação com a área superficial esférica. Para dado volume, a esfera é o sólido geométrico com menor área superficial e é normalmente relacionada com condições ótimas de escoamento. A lei de Stokes refere-se ao arraste sobre uma partícula esférica movendo-se relativamente a um fluido em baixas velocidades caracterizando regimes laminares, baixos números de Reynolds. Calcula-se a esfericidade como sendo a razão entre a área superficial da esfera de mesmo volume que a partícula e a área superficial da partícula, por isso, seu valor varia de 0 a 1. A esfericidade foi desenvolvida pelo geólogo Wadell (1932) e é o fator de forma mais

conhecido e utilizado até hoje. A esfericidade está presente na literatura nas correlações entre o coeficiente de arraste e Reynolds de partícula.

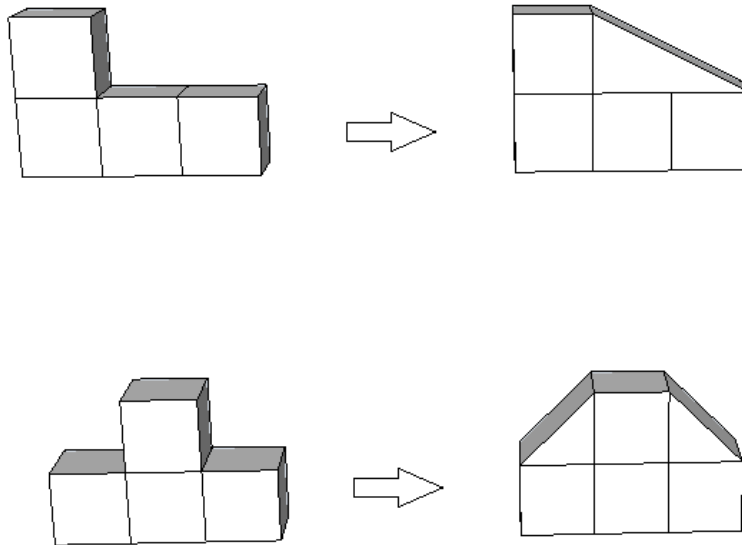
Os fatores de forma ICON e IEC apresentados a seguir, foram introduzidos em projeto de final de curso defendido recentemente no âmbito da Escola de Química/UFRJ (Mendes e Melo, 2011).

- ICON: O índice de convexidade é a razão entre o menor volume acrescentado à partícula que a torna convexa e o volume da partícula. Partículas convexas, ou não reentrantes, possuem ICON igual a zero. Uma partícula é dita côncava ou reentrante, ICON diferente de zero, se ela pode ser transpassada pela mesma reta mais de uma vez. Exemplos de partículas convexas e côncavas encontram-se na Figura II.5 a seguir.



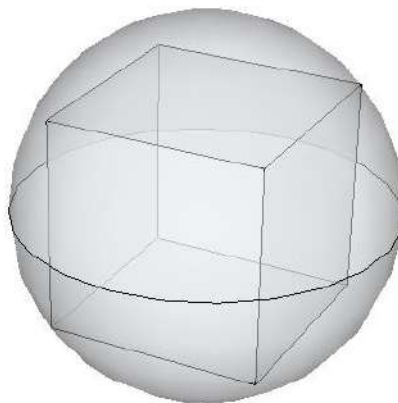
**Figura II.5 – Partícula não reentrante (a) e partícula reentrante (b)**

A figura II.6 a seguir ilustra o procedimento para tornar uma partícula côncava em convexa.



**Figura II.6 – Partículas Côncavas e Convexas**

- IEC: O índice da esfera circunscrita é a razão entre o volume da esfera que circunscribe a partícula e o volume da partícula. Por isso, para partículas muito convexas, o valor de IEC é alto, já para partículas reentrantes, o valor de IEC se torna baixo. O valor de IEC para partículas esféricas é, por definição, igual a 1. Um exemplo de uma partícula com a esfera circunscrita encontra-se na Figura II.7.



**Figura II.7 – Partícula com esfera circunscrita**

## II.2 Interação Partícula-Fluido

Através da análise das forças que atuam em uma partícula sólida em movimento num fluido, identificam-se três forças atuando na partícula: as forças de campo, de arraste e de empuxo. As forças atuantes, suas direções e sentidos estão representados na Figura II.8.



Figura II.8 – Forças atuantes na interação partícula-fluido

A força do campo gravitacional é dada por

$$F_c = m_p \cdot a = \rho_p V_p g \quad (\text{II.5})$$

onde  $\rho_p$  é a densidade da partícula,  $V_p$  é o volume da partícula e  $g$  é a aceleração da gravidade.

A força de empuxo é dada por

$$F_e = m_{fdes} \cdot a = \rho_f V_{fdes} g = \rho_f V_p g \quad (\text{II.6.})$$

onde  $\rho_f$  é a densidade do fluido,  $V_{fdes}$  é o volume do fluido deslocado e  $m_{fdes}$  é a massa de fluido deslocado.

A força de arraste é dada pela equação II.7.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_f A_p C_D (v_f - v_p)^2 \quad (\text{II.7})$$

onde  $A_p$  é uma característica da partícula,  $C_d$  é o coeficiente de arraste,  $v_f$  é a velocidade do fluido e  $v_p$  é a velocidade da partícula.

A força resultante sobre a partícula pode ser descrita por

$$F_r = F_c - F_a - F_e = \rho_p V_p g - \frac{1}{2} \rho_f A_p C_D (v_f - v_p)^2 - \rho_f V_p g \quad (\text{II.8})$$

Considerando-se que a partícula esteja em movimento uniforme (sem aceleração), ou seja, em velocidade terminal, e que a velocidade do fluido é zero, a equação II.8 se reduz a:

$$0 = -\frac{1}{2} \rho_f A_p C_D (-v_t)^2 - (\rho_f - \rho_p) V_p g \quad (\text{II.9})$$

Rearranjando, tem-se:

$$C_D = \frac{2(\rho_p - \rho_f) V_p g}{\rho_f A_p v_t^2} \quad (\text{II.10})$$

Considerando-se que  $A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2$  e que  $V_p = \frac{\pi}{6} d_p^3$ :

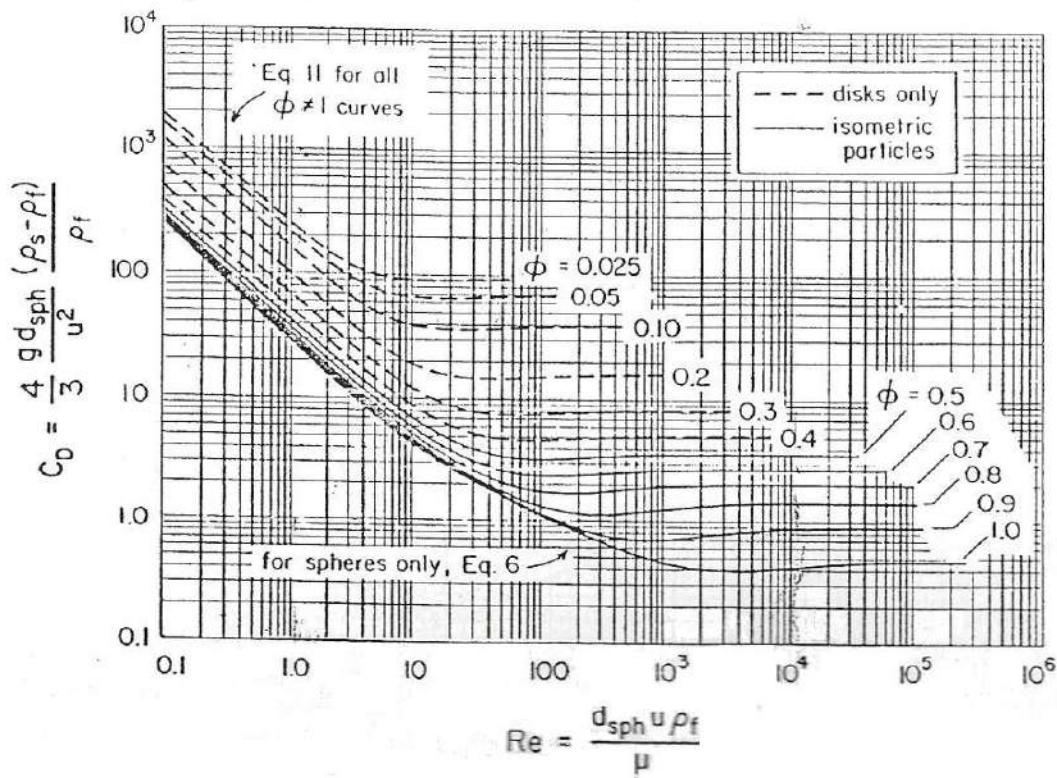
$$C_D = \frac{4(\rho_p - \rho_f) d_p g}{3 \rho_f v_t^2} \quad (\text{II.11})$$

Sabe-se que o coeficiente de arraste é função do número de Reynolds da partícula que é dado pela seguinte equação (no caso em que  $v_p = v_t$  e  $v_f = 0$ ):

$$Re_p = \frac{d_p v_t \rho_f}{\mu} \quad (\text{II.12})$$

onde  $\mu$  é a viscosidade do fluido.

As Figuras II.9 e II.10 representam o diagrama  $C_D \times Re_p$  em escala log-log para diferentes esfericidades e formatos de partícula ( $d_{sph} = d_p, u = v_t$ ).



**Figura II.9 – Correlação  $C_D$ ,  $Re_p$  e  $\phi$  (Haider e Levenspiel)**

Fonte: Haider e Levenspiel, 1989.



## **CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS**

### **III.1 Equipamentos**

Para a realização dos experimentos, utilizou-se uma cuba de acrílico feita sob encomenda (Casa do Acrílico, Rio de Janeiro – RJ). A cuba possui formato de um paralelepípedo e tem como dimensões 30 cm de largura, 30 cm de comprimento e 100 cm de altura. Além disso, a mesma possui uma tampa constituída do mesmo material, de forma a impedir o depósito de poeira e a entrada de contaminantes no fluido. Introduziu-se uma torneira na parte inferior da cuba, de forma a possibilitar a drenagem do líquido. O aparato conta também com uma tela afixada em um molde quadrado de acrílico com linhas de nylon presas nas extremidades, permitindo a inserção e a retirada da tela do interior da cuba. As partículas testadas, ao atingirem o fundo da cuba ficam retidas na tela o que permite o seu posterior recolhimento sem a necessidade de esvaziar a cuba. A foto do aparato utilizado encontra-se na Figura III.1.



**Figura III.1 – Cuba utilizada nos ensaios**

Utilizou-se também uma pinça com o intuito de realizar a imersão das partículas no fluido sem causar turbulências e a inserção de bolhas de ar. Para auxiliar a aferição dos tempos de queda das partículas, foram traçadas sobre o acrílico nove linhas horizontais com espaçamento de 10 cm entre as mesmas na parte frontal e nove na parte traseira da cuba, permitindo ao operador alinhar a visão às linhas frontal e traseira, evitando assim possíveis efeitos de paralaxe, sobre as medidas. Além disso, foi utilizado um termômetro de mercúrio com precisão de  $0,5^{\circ}\text{C}$  para o monitoramento da temperatura do fluido durante os testes, possibilitando a determinação da densidade e

viscosidade do fluido, elementos essenciais para o cálculo do número de Reynolds ( $Re_p$ ) e coeficiente de arraste ( $C_D$ ).

Utilizou-se uma câmera digital de alta definição (Nikon D5100) com capacidade de filmar trinta quadros por segundo para registrar a queda das partículas no fluido. Em seguida, foi feita a análise dos vídeos no software específico *Windows Movie Maker* que realiza a reprodução da filmagem quadro a quadro, permitindo ao operador determinar o tempo de queda entre duas linhas auxiliares consecutivas com precisão de  $1/30$  s, ou seja, o tempo que a partícula leva para percorrer uma distância de 10 cm. O método apresentado quando comparado com a medição do tempo de queda das partículas utilizando simplesmente um cronômetro manual, permite reduzir drasticamente os erros inerentes à dificuldade do operador em determinar o tempo exato que a partícula cruza a linha auxiliar em velocidade real e ao seu tempo de resposta. Um exemplo da técnica utilizada encontra-se na figura III.2.



**Figura III.2 – Partícula cruzando linha auxiliar**

As análises das filmagens permitiram concluir que as partículas encontravam-se em velocidade terminal na faixa compreendida entre as linhas auxiliares três e sete. A partir dessa conclusão, os valores de velocidade compreendidos entre essa faixa nos cinco experimentos foram adicionados no software *Statistica 7* onde foi utilizada a

função “*Recode Outliers*” para retirar possíveis *outliers* e em seguida a função “*Basic Statistics*” para obter-se a média e o desvio padrão dos dados experimentais.

O resumo do procedimento geral para determinação da velocidade terminal das partículas é descrito a seguir. Primeiramente submerge-se a partícula no fluido com auxílio da pinça, com cuidado para não inserir bolhas de ar e causar turbulências. Em seguida, a partícula é liberada e o operador acompanha a queda com a filmadora até a mesma chegar ao fundo da cuba. A partícula é então recolhida com o auxílio da rede e o ensaio é repetido cinco vezes para cada partícula. A próxima etapa é a análise dos vídeos no computador de forma a determinar o intervalo de tempo que a partícula leva pra percorrer a distância entre as linhas auxiliares. Em seguida, os dados são lançados no *Statistica 7* e, finalmente obtém-se os valores de velocidade terminal para cada partícula em cada fluido.

### **III.2 Líquidos testados**

Os líquidos testados no presente trabalho foram água destilada (LADEQ/UFRJ), solução aquosa de glicerina bi-destilada (Casa Wolff, Higienópolis, Rio de Janeiro - RJ) e óleo mineral grau técnico (Qbex, Duque de Caxias, Rio de Janeiro – RJ).

As densidades dos fluidos na temperatura dos ensaios foram obtidas com o auxílio de um balão volumétrico. As viscosidades foram medidas em viscosímetro. A Tabela III.1 contém os dados obtidos para as temperaturas dos testes realizados.

**Tabela III.1 – Propriedades dos fluidos testados**

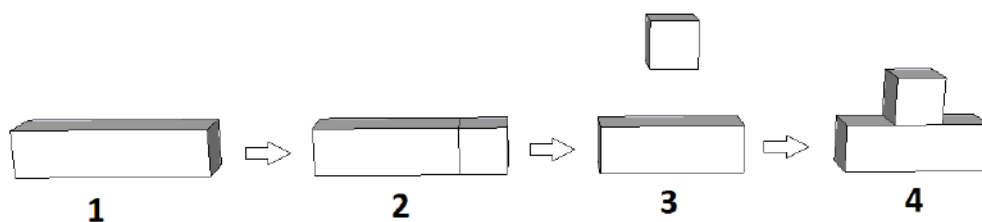
Fluido	Temperatura ( <sup>o</sup> C)	Viscosidade (cP)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Solução Glicerina	25,5	8,50	1,15
Óleo	27,5	14,00	0,85
Água	25,5	0,88	1,00

### **III.3 Partículas testadas**

#### *III.3.1 Confeção das Partículas*

Para a confecção das partículas a serem testadas, utilizaram-se diferentes tipos de borrachas escolares, alumínio e também foram encomendadas partículas usinadas de acrílico confeccionadas pelo mesmo fabricante da cuba. As partículas foram subdivididas em treze grupos, onde, em cada grupo, todas possuíam mesma massa, volume e área superficial, ou seja, mesma esfericidade. No total, foram confeccionadas 77 partículas que foram testadas em ensaios em quintuplicata em três líquidos, totalizando 1.155 ensaios.

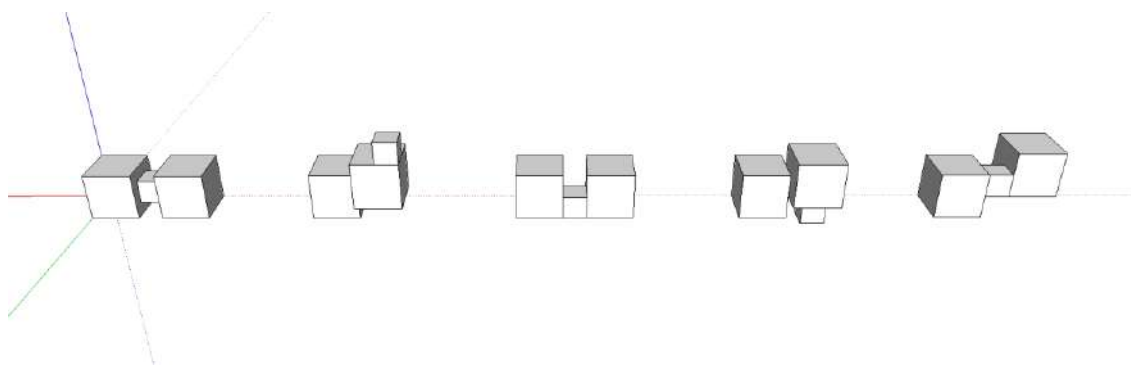
De forma a criar grupos com a mesma esfericidade, utilizou-se um estilete para cortar a borracha em uma ou mais partes que foram coladas com *Superbonder* em posições diferentes da inicial de forma a manter a mesma área superficial e, portanto a mesma esfericidade. O procedimento pode ser melhor visualizado na figura III.3.



**Figura III.3 – Exemplo do procedimento de confecção de partículas**

Deve-se ressaltar que o uso de estilete afiado faz com que as perdas referentes ao corte sejam totalmente desprezíveis, o que pôde ser comprovado através da pesagem das partículas, em balança analítica, antes e após o corte, onde as mesmas apresentaram praticamente a mesma massa. Da mesma forma, a massa de cola adicionada para unir as partes da borracha mostrou-se totalmente desprezível. Após a confecção das partículas, todas foram pesadas em balança analítica e eventuais discordâncias entre as massas foram corrigidas lixando-as cuidadosamente até que todas as partículas de um mesmo grupo apresentassem mesma massa.

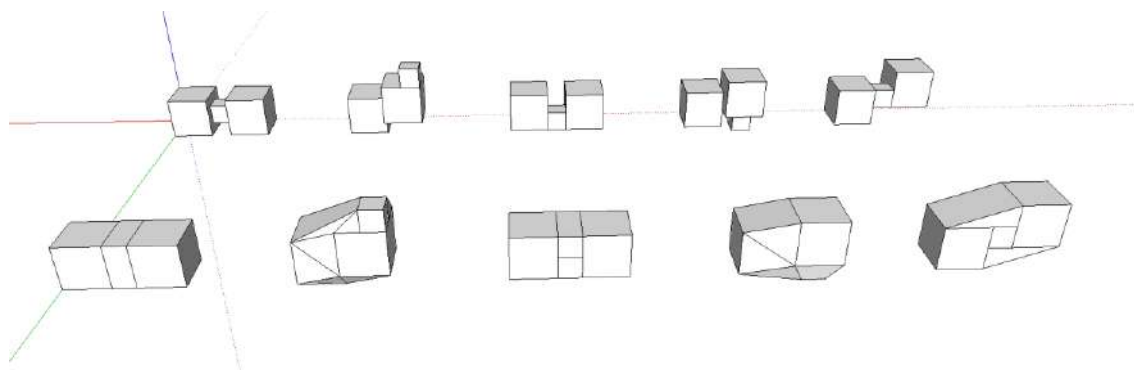
Com o intuito de facilitar o cálculo dos fatores de forma, a visualização e confecção das partículas, todos os grupos foram desenhados no software *SketchUp 8*, conforme ilustrado na figura III.4.



**Figura III.4 – Exemplo de desenho utilizando o *SketchUp***

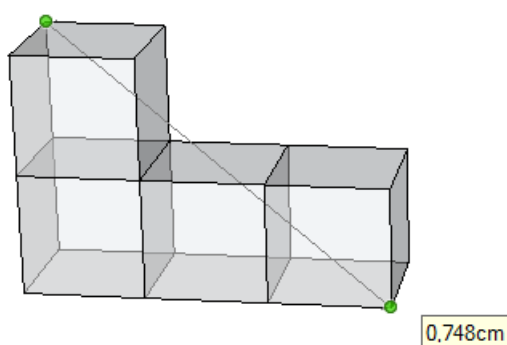
O software possui em seu portfólio uma função para calcular o volume de qualquer sólido desenhado, o que se mostrou particularmente útil para a determinação

dos volumes dos sólidos côncavos e convexos de forma a calcular o índice de convexidade (ICON). Além disso, o programa se mostrou extremamente funcional para a visualização e desenho dos sólidos convexos, conforme ilustrado na figura III.5.



**Figura III.5 – Partículas reentrantes e não reentrantes**

Outra função que foi largamente utilizada no programa, foi a função “*Tape Measure Tool*” que permite medir a distância entre dois pontos e, dessa forma, auxiliou na determinação da maior dimensão da partícula para posterior cálculo do índice da esfera circunscrita (IEC), apresentado anteriormente. Um exemplo do procedimento realizado encontra-se na figura III.6.



**Figura III.6 – Exemplo de medida da maior dimensão da partícula através do *SketchUp***

### III.3.2 Determinação da densidade relativa das partículas

A densidade relativa dos materiais constituintes das partículas foi determinada através de um picnômetro utilizando-se como padrão a água. O processo de enchimento do picnômetro foi realizado escorrendo-se lentamente o líquido pela parede do mesmo, de forma a evitar a formação de bolhas de ar. Pode-se demonstrar que a densidade relativa dos sólidos é dada pela seguinte equação:

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

Onde  $\rho_{\text{sólido}}$  é a densidade do sólido,  $\rho_{\text{água}}$  é a densidade 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.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela III.2.

**Tabela III.2 – Densidade relativa dos materiais utilizados**

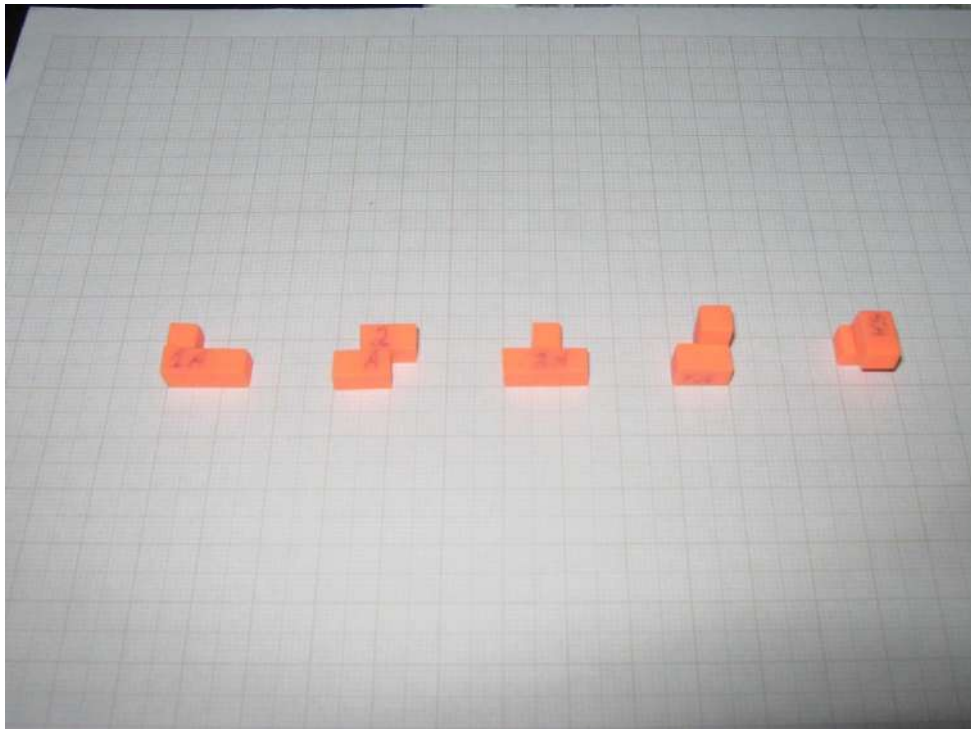
Material	$\rho_{\text{sólido/água}}$
Acrílico	1,19
Alumínio	2,44
Borracha Cinza Redonda	1,32
Borracha Laranja	1,44
Borracha Mercur Branca	1,88
Borracha Mercur Verde	1,70
Borracha Preta	1,17



### *III.3.3 Caracterização e classificação das partículas*

Com o auxílio do software *SketchUp 8*, determinou-se para todas as partículas o valor dos fatores de forma utilizados no presente trabalho (Esfericidade, ICON e IEC). Além disso, com os dados obtidos através da pesagem das partículas em balança analítica e da determinação da densidade relativa com a técnica de picnometria, foi possível construir a tabela III.3 que descreve as “características” de cada partícula. As partículas foram subdivididas em grupos, representados por letras, e numeradas para diferenciação entre as partículas pertencentes ao mesmo grupo.

As fotografias de todas as partículas testadas no presente trabalho encontram-se nas figuras III.7 a III.19.



**Figura III.7 – Partículas do grupo A**

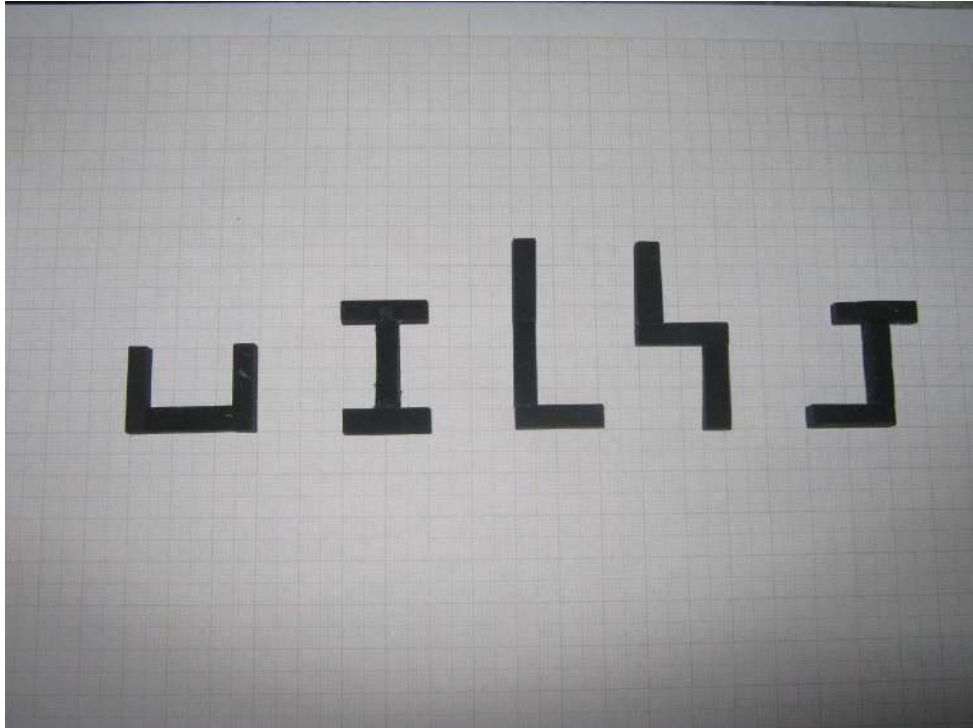


Figura III.8 – Partículas do grupo B

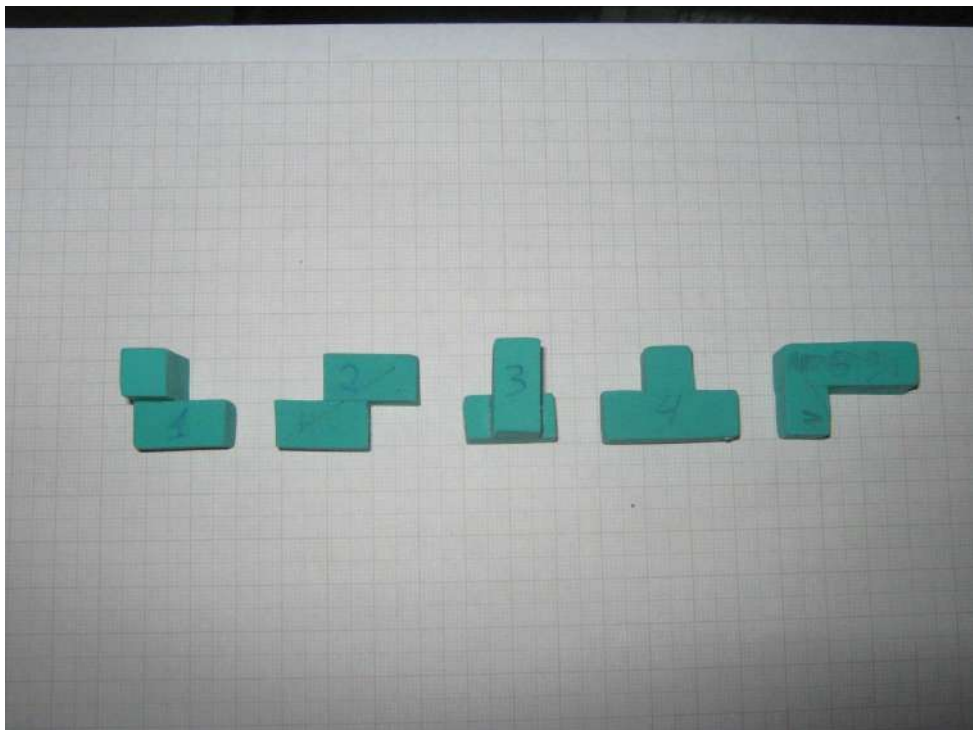
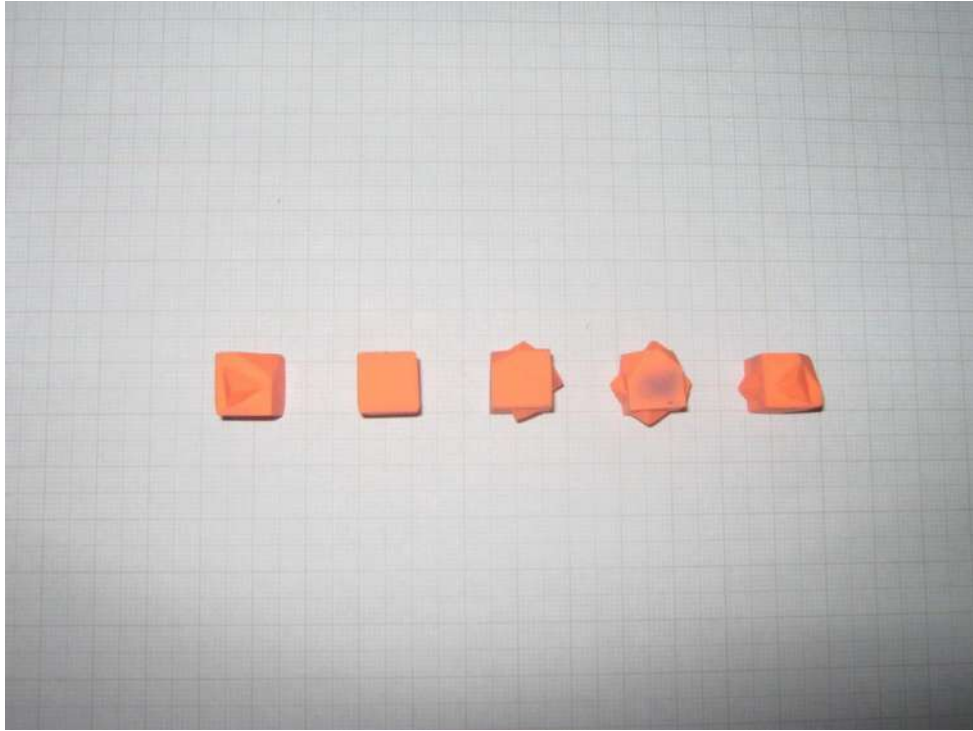


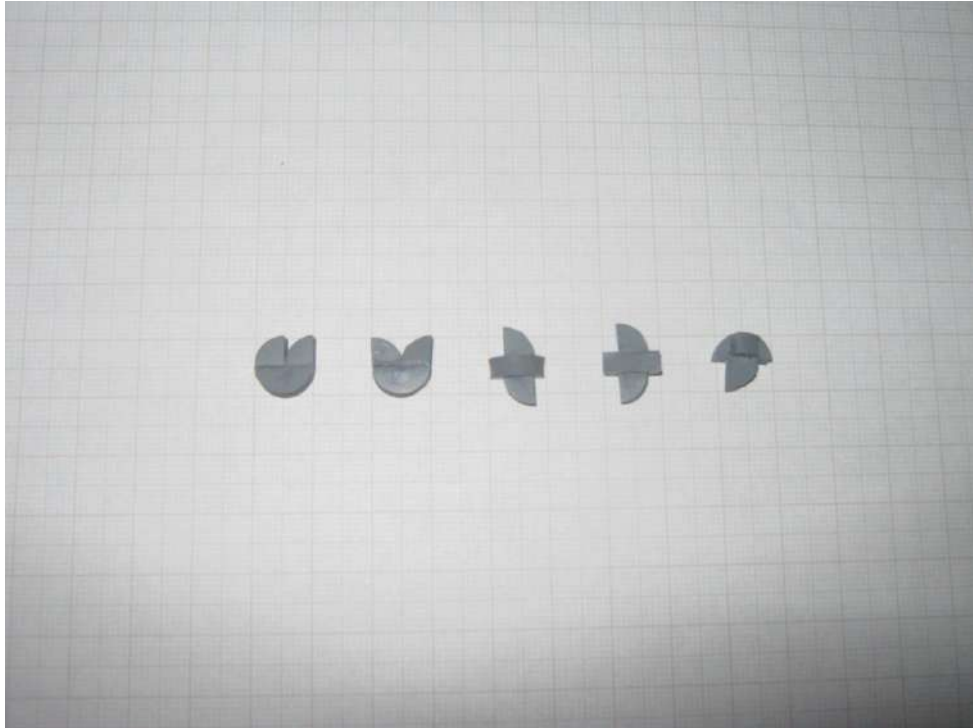
Figura III.9 – Partículas do grupo C



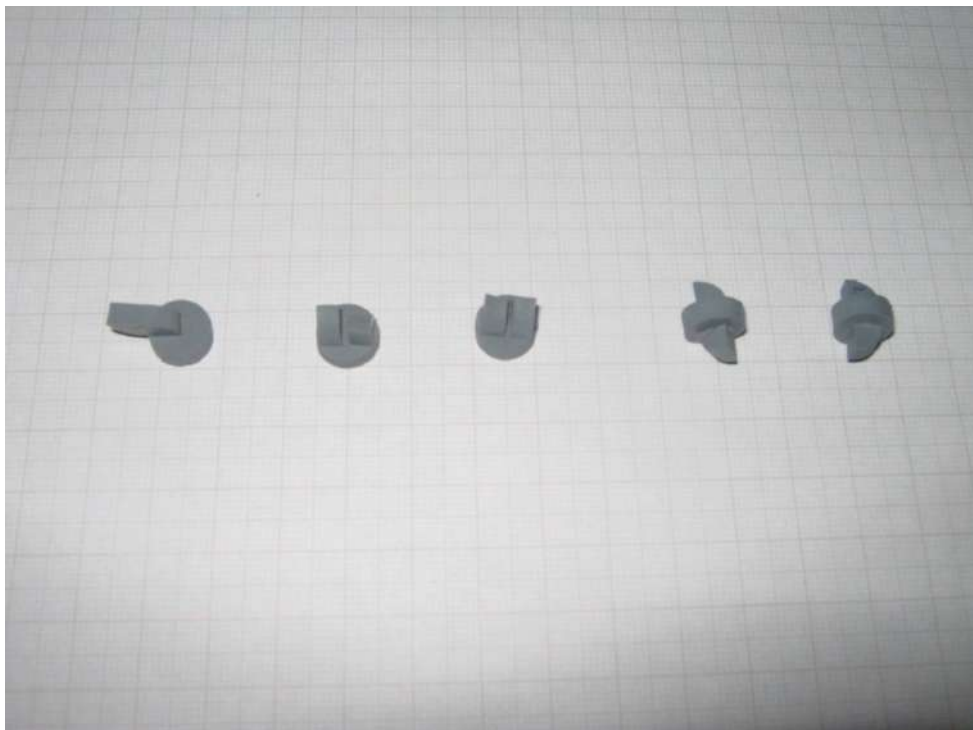
**Figura III.10 – Partículas do grupo D**



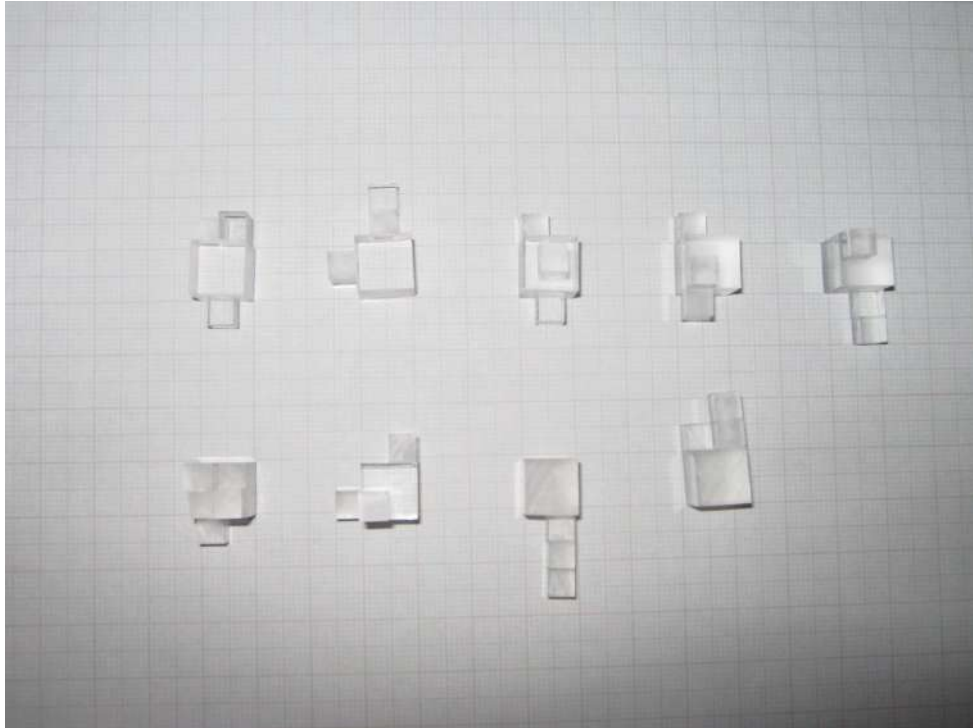
**Figura III.11 – Partículas do grupo E**



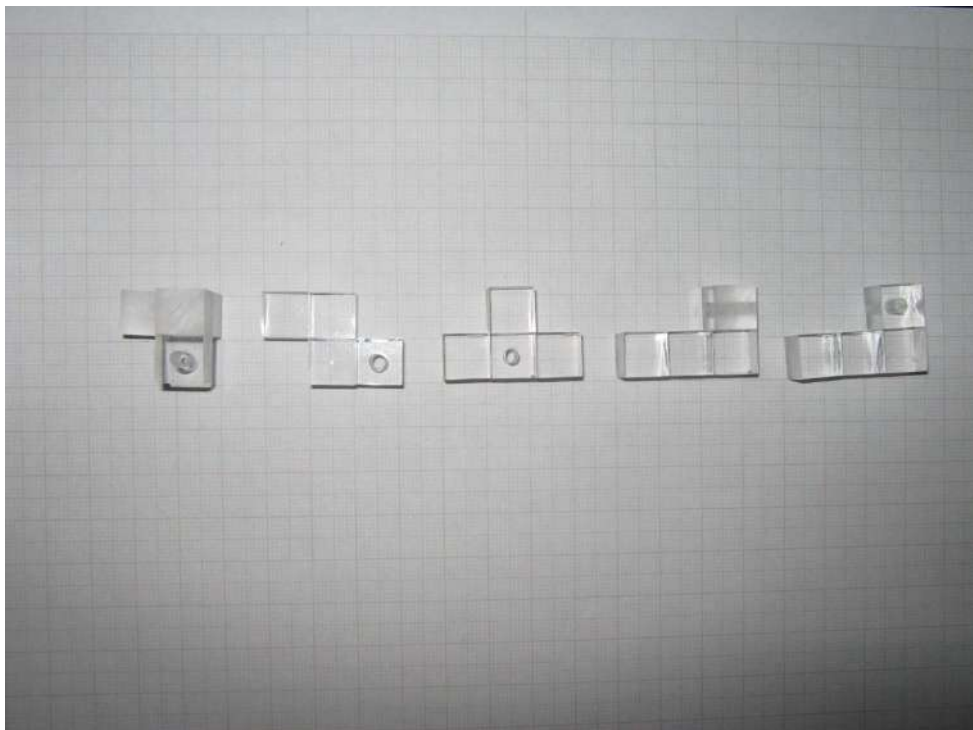
**Figura III.12 – Partículas do grupo F**



**Figura III.13 – Partículas do grupo G**

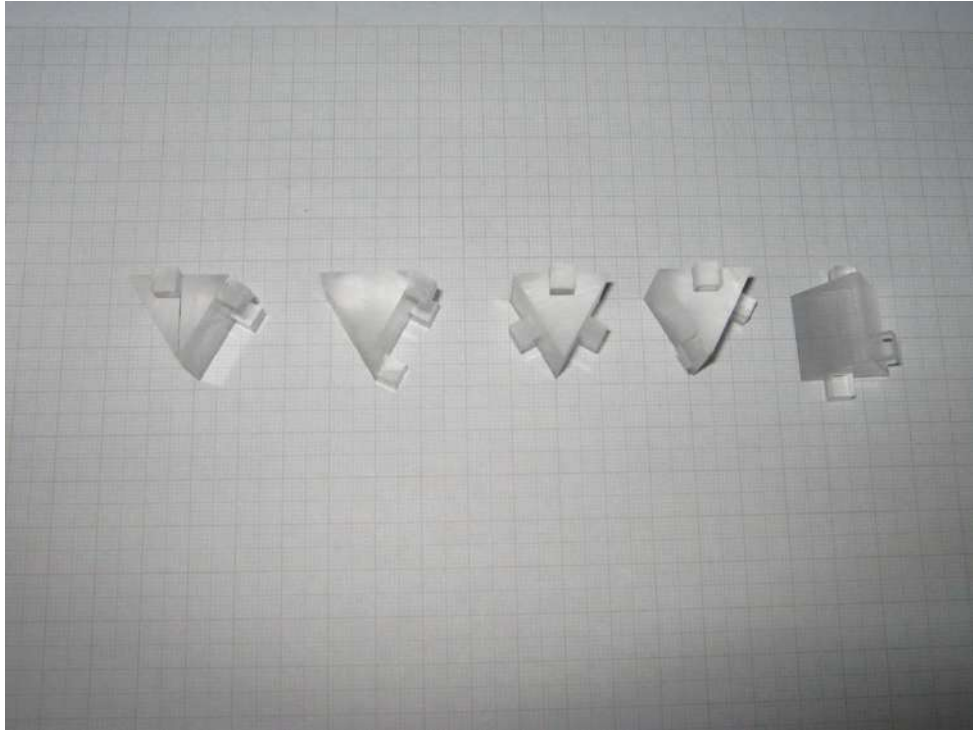


**Figura III.14 – Partículas do grupo I**

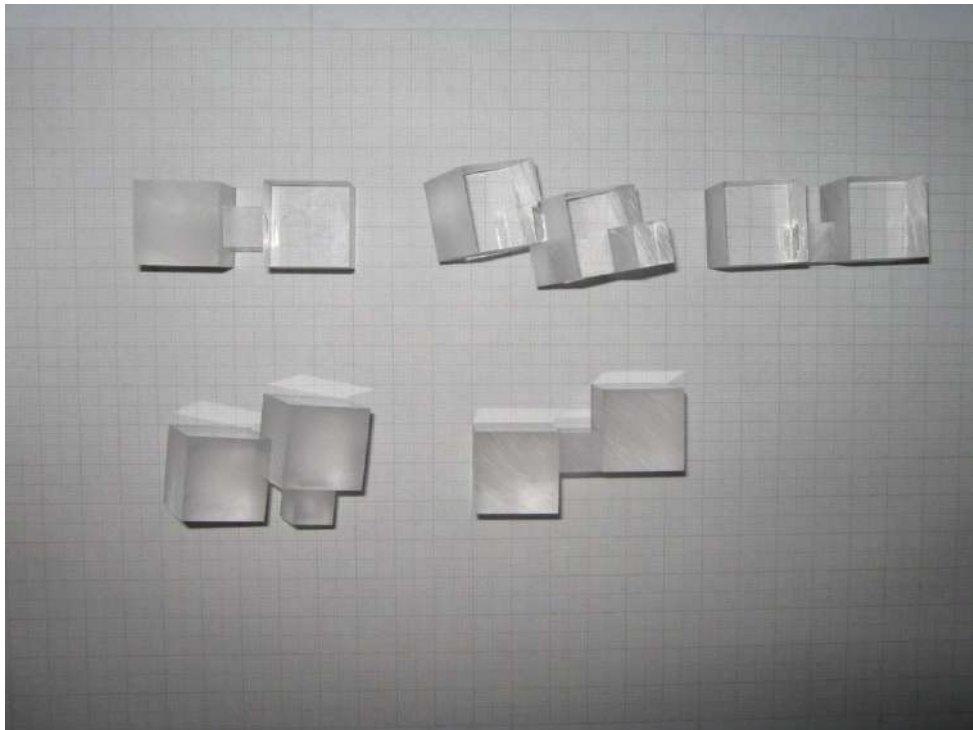


**Figura III.15 – Partículas do grupo J**

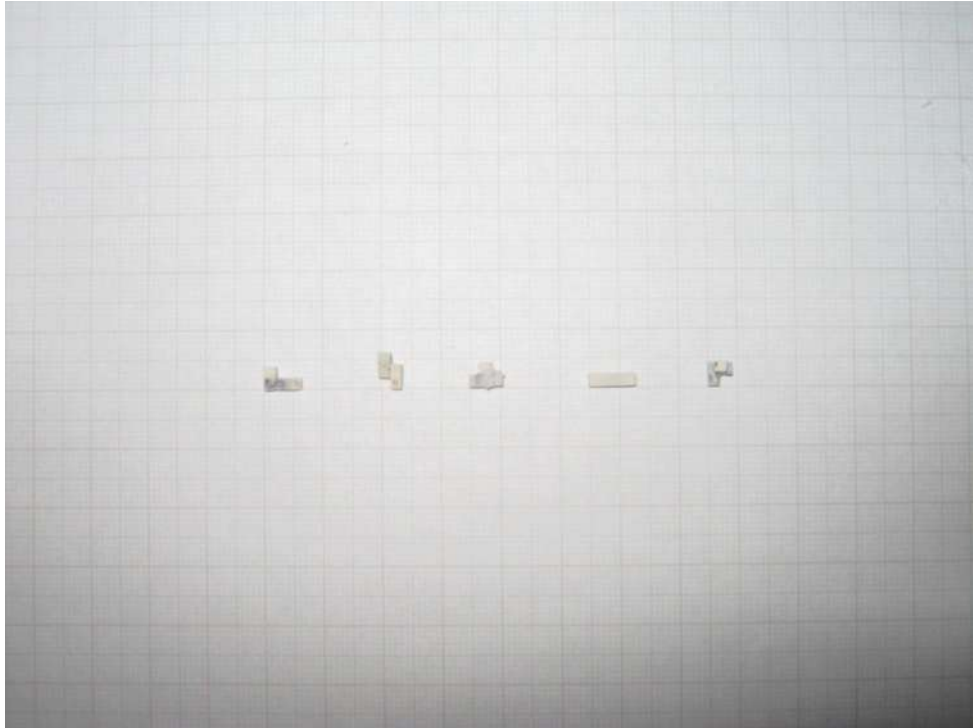




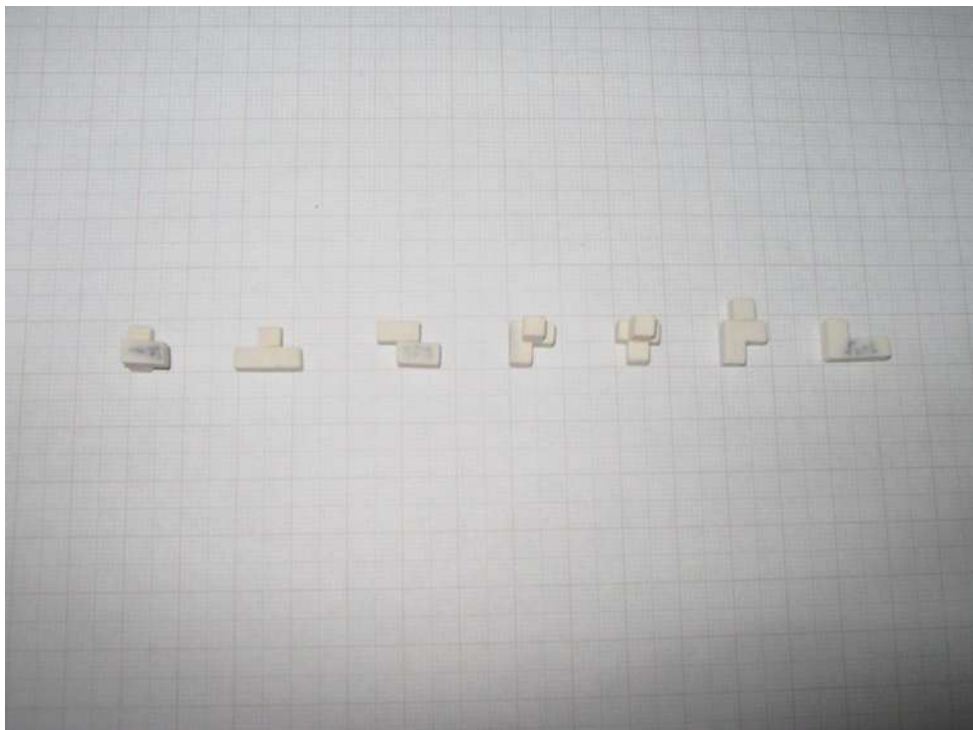
**Figura III.16 – Partículas do grupo K**



**Figura III.17 – Partículas do grupo L**



**Figura III.18 – Partículas do grupo M**



**Figura III.19 – Partículas do grupo N**

**Tabela III.3 – Características das Partículas**

Grupo	Partícula	Área superficial Partícula (cm <sup>2</sup> )	Volume da Partícula (cm <sup>3</sup> )	d <sub>p</sub> (cm)	Área superficial da Esfera (cm <sup>2</sup> )	Esfericidade	Volume do sólido Convexo (cm <sup>3</sup> )	ICON	Maior dimensão (cm)	Volume da esfera circunscrita (cm <sup>3</sup> )	IEC
A	1	4,5	0,5	0,9847	3,0465	<b>0,6770</b>	0,625	<b>0,2500</b>	1,871	3,43	<b>0,1458</b>
	2						0,625	<b>0,2500</b>	1,871	3,43	<b>0,1458</b>
	3						0,625	<b>0,2500</b>	1,658	2,39	<b>0,2095</b>
	4						0,708	<b>0,4160</b>	1,732	2,72	<b>0,1838</b>
	5						0,708	<b>0,4160</b>	1,601	2,15	<b>0,2327</b>
B	1 (U)	12,5	1,5	1,4202	6,3369	<b>0,5070</b>	3,000	<b>1,0000</b>	3,640	25,25	<b>0,0594</b>
	2 (H)						3,000	<b>1,0000</b>	3,640	25,25	<b>0,0594</b>
	3 (L)						3,000	<b>1,0000</b>	4,637	52,20	<b>0,0287</b>
	4 (S)						3,375	<b>1,2500</b>	4,950	63,51	<b>0,0236</b>
	5 (J)						3,188	<b>1,1253</b>	4,100	36,09	<b>0,0416</b>
C	1	18	4	1,9695	12,1859	<b>0,6770</b>	5,667	<b>0,4168</b>	3,464	21,76	<b>0,1838</b>
	2						5,000	<b>0,2500</b>	3,742	27,44	<b>0,1458</b>
	3						5,667	<b>0,4168</b>	3,202	17,19	<b>0,2327</b>
	4						5,000	<b>0,2500</b>	3,317	19,11	<b>0,2093</b>
	5						5,000	<b>0,2500</b>	3,742	27,44	<b>0,1458</b>
D	1	6	1	1,2407	4,8360	<b>0,8060</b>	1,060	<b>0,0600</b>	1,732	2,72	<b>0,3676</b>
	2						1,000	<b>0,0000</b>	1,732	2,72	<b>0,3676</b>
	3						1,130	<b>0,1300</b>	1,732	2,72	<b>0,3676</b>
	4						1,185	<b>0,1850</b>	1,536	1,90	<b>0,5270</b>
	5						1,123	<b>0,1230</b>	1,732	2,72	<b>0,3676</b>
E	1	12,2	0,12	0,6120	1,1765	<b>0,0964</b>	1,465	<b>11,2083</b>	2,501	8,19	<b>0,0147</b>
	2						3,007	<b>24,0583</b>	3,015	14,35	<b>0,0084</b>
	3						2,559	<b>20,3250</b>	3,606	24,55	<b>0,0049</b>
	4						2,240	<b>17,6667</b>	2,569	8,88	<b>0,0135</b>
	5						2,117	<b>16,6417</b>	3,606	24,55	<b>0,0049</b>
	6						1,444	<b>11,0333</b>	3,606	24,55	<b>0,0049</b>
	7						2,210	<b>17,4167</b>	2,929	13,16	<b>0,0091</b>
	8						2,194	<b>17,2833</b>	2,739	10,76	<b>0,0112</b>
	9						0,120	<b>0,0000</b>	3,606	24,55	<b>0,0049</b>
	10						0,593	<b>3,9417</b>	3,233	17,69	<b>0,0068</b>
F	1	2,56	0,22	0,7490	1,7624	<b>0,6884</b>	0,236	<b>0,0727</b>	1,141	0,78	<b>0,2829</b>
	2						0,252	<b>0,1455</b>	1,141	0,78	<b>0,2829</b>
	3						0,276	<b>0,2545</b>	1,374	1,36	<b>0,1620</b>
	4						0,276	<b>0,2545</b>	1,298	1,15	<b>0,1921</b>
	5						0,316	<b>0,4364</b>	1,131	0,76	<b>0,2904</b>



Grupo	Partícula	Área superficial Partícula (cm <sup>2</sup> )	Volume da Partícula (cm <sup>3</sup> )	d <sub>p</sub> (cm)	Área superficial da Esfera (cm <sup>2</sup> )	Esfericidade	Volume do sólido Convexo (cm <sup>3</sup> )	ICON	Maior dimensão (cm)	Volume da esfera circunscrita (cm <sup>3</sup> )	IEC
G	1	3,367	0,33	0,8574	2,3094	<b>0,6859</b>	0,463	<b>1,1045</b>	1,550	1,95	<b>0,1692</b>
	2						0,450	<b>1,0455</b>	1,205	0,92	<b>0,3602</b>
	3						0,398	<b>0,8091</b>	1,205	0,92	<b>0,3602</b>
	4						0,490	<b>1,2273</b>	1,374	1,36	<b>0,2430</b>
	5						0,490	<b>1,2273</b>	1,298	1,15	<b>0,2882</b>
I	1	9	1,38	1,3813	5,9943	<b>0,6660</b>	1,750	<b>0,2681</b>	2,264	6,08	<b>0,2271</b>
	2						2,020	<b>0,4638</b>	2,264	6,08	<b>0,2271</b>
	3						1,870	<b>0,3551</b>	2,598	9,18	<b>0,1503</b>
	4						1,980	<b>0,4348</b>	2,264	6,08	<b>0,2271</b>
	5						1,960	<b>0,4203</b>	2,291	6,30	<b>0,2192</b>
	6						1,960	<b>0,4203</b>	2,693	10,23	<b>0,1349</b>
	7						1,830	<b>0,3261</b>	2,179	5,42	<b>0,2547</b>
	8						2,040	<b>0,4783</b>	2,345	6,75	<b>0,2044</b>
	9						1,880	<b>0,3623</b>	2,739	10,76	<b>0,1283</b>
	10						1,750	<b>0,2681</b>	2,449	7,69	<b>0,1794</b>
J	1	18,8	3,93	1,9579	12,0433	<b>0,6406</b>	5,667	<b>0,4420</b>	3,464	21,76	<b>0,1806</b>
	2						5,000	<b>0,2723</b>	3,742	27,44	<b>0,1432</b>
	3						5,000	<b>0,2723</b>	3,317	19,11	<b>0,2057</b>
	4						5,000	<b>0,2723</b>	3,742	27,44	<b>0,1432</b>
	5						5,000	<b>0,2723</b>	3,742	27,44	<b>0,1432</b>
K	1	18,454	3,836	1,9422	11,8505	<b>0,6422</b>	5,320	<b>0,3869</b>	3,181	16,85	<b>0,2276</b>
	2						5,277	<b>0,3757</b>	3,159	16,51	<b>0,2324</b>
	3						5,700	<b>0,4859</b>	3,052	14,89	<b>0,2577</b>
	4						5,815	<b>0,5159</b>	3,238	17,78	<b>0,2158</b>
	5						5,425	<b>0,4142</b>	3,202	17,19	<b>0,2232</b>
L	1	50	17	3,1902	31,9730	<b>0,6395</b>	20,000	<b>0,1765</b>	5,745	99,26	<b>0,1713</b>
	2						27,167	<b>0,5980</b>	6,403	137,46	<b>0,1237</b>
	3						20,000	<b>0,1765</b>	5,745	99,26	<b>0,1713</b>
	4						25,667	<b>0,5098</b>	5,831	103,81	<b>0,1638</b>
	5						24,000	<b>0,4118</b>	6,164	122,65	<b>0,1386</b>
M	1	0,72	0,032	0,3939	0,4874	<b>0,6770</b>	0,040	<b>0,2500</b>	0,748	0,22	<b>0,1460</b>
	2						0,040	<b>0,2500</b>	0,748	0,22	<b>0,1460</b>
	3						0,040	<b>0,2500</b>	0,663	0,15	<b>0,2097</b>
	4						0,032	<b>0,0000</b>	0,849	0,32	<b>0,0999</b>
	5						0,045	<b>0,4063</b>	0,640	0,14	<b>0,2331</b>
N	1	2,88	0,256	0,7878	1,9497	<b>0,6770</b>	0,363	<b>0,4180</b>	1,386	1,39	<b>0,1836</b>
	2						0,320	<b>0,2500</b>	1,327	1,22	<b>0,2092</b>
	3						0,320	<b>0,2500</b>	1,497	1,76	<b>0,1457</b>
	4						0,363	<b>0,4180</b>	1,281	1,10	<b>0,2326</b>
	5						0,363	<b>0,4180</b>	1,200	0,90	<b>0,2829</b>
	6						0,320	<b>0,2500</b>	1,400	1,44	<b>0,1782</b>
	7						0,320	<b>0,2500</b>	1,497	1,76	<b>0,1457</b>

Com as velocidades terminais das partículas, as densidades das partículas e dos líquidos, as viscosidades dos fluidos e o  $d_p$ , calculou-se os valores de  $Re_p$  e  $C_D$  através das equações

$$C_D = \frac{4d_p(\rho_s - \rho)g}{3\rho v_t^2} \quad (\text{II.11})$$

$$Re_p = \frac{d_p v_t \rho}{\mu} \quad (\text{II.12})$$

Em seguida, com os valores de  $Re_p$  e  $C_D$  obtidos para cada partícula, representou-se a relação entre  $C_D$  e  $Re_p$  para cada fluido e depois para todos os fluidos em conjunto.

### **III.4 Correlações Empíricas para $C_D$ e $Re_p$**

Existem na literatura correlações para  $C_D$  e  $Re_p$  que permitem prever a velocidade terminal de partículas. A Tabela III.4 mostra correlações obtidas por Coelho & Massarani (1996) a partir dos dados experimentais de Pettyjohn & Christiansen (1948) para partículas isométricas, isto é, partículas esféricas ou na forma de poliedros regulares (tetraedro, cubo, octaedro, icosaedro e dodecaedro) (Massarani, 2002).

**Tabela III.4 – Correlações de Coelho & Massarani (1996) com base nos dados de Pettyjohn & Christiansen (1948)**

$$0,65 < \phi \leq 1 \text{ e } Re < 5 \times 10^4$$

Correlação	$n$	Valor Médio e Desvio Padrão
$c_D = \left[ \left( \frac{24}{K_1 Re} \right)^n + K_2^n \right]^{1/n}$	0,85	$\frac{(c_D)_{\text{exp}}}{(c_D)_{\text{cor}}} = 1,00 \pm 0,13$
$Re = \left[ \left( \frac{K_1 c_D Re^2}{24} \right)^{-n} + \left( \frac{c_D Re^2}{K_2} \right)^{-n/2} \right]^{-1/n}$	1,2	$\frac{(Re)_{\text{exp}}}{(Re)_{\text{cor}}} = 1,00 \pm 0,10$
$Re = \left[ \left( \frac{24}{K_1 (c_D / Re)} \right)^{n/2} + \left( \frac{K_2}{c_D / Re} \right)^n \right]^{1/n}$	1,3	$\frac{(Re)_{\text{exp}}}{(Re)_{\text{cor}}} = 1,00 \pm 0,14$

$$Re = \frac{D_P U \rho_F}{\mu}, \quad c_D Re^2 = \frac{4 \rho_F (\rho_S - \rho_F) b D_P^3}{3 \mu^2}, \quad c_D / Re = \frac{4 (\rho_S - \rho_F) \mu b}{3 \rho_F^2 U^3}$$

$$K_1 = 0,843 \log_{10}(\phi / 0,065), \quad K_2 = 5,31 - 4,88\phi$$

Fonte: Massarani, 2002.

Vale observar que tais correlações e a maioria das presentes na literatura, aplicam-se somente a partículas isométricas e preveem um mesmo valor de velocidade terminal para partículas que possuam a mesma esfericidade, mesmo  $d_p$ , e mesma densidade.

Dessa forma, baseando-se nas correlações obtidas por Coelho & Massarani e nos dados experimentais obtidos no presente trabalho, procurou-se obter novas correlações que pudessem ser utilizadas para estimar a velocidade terminal de partículas isométricas e também de partículas não isométricas com reentrâncias. Para tanto, fez-se o uso de mais dois fatores de forma além da esfericidade, o ICON e o IEC apresentados anteriormente.

Finalmente, foi resolvido um problema de otimização utilizando o *Solver* do programa *Microsoft Excel*, tendo como função objetivo o módulo da diferença relativa entre os valores de velocidade terminal obtidos experimentalmente e os valores previstos pelo novo modelo. Em seguida os resultados foram comparados com os previstos pelas correlações de Coelho & Massarani (1996) e com os resultados experimentais. A função objetivo encontra-se na equação III.2.

$$F.O. = \left| \frac{v_{texp} - v_{tmod}}{v_{texp}} \right| \quad (III.2)$$

# CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

## IV.1 – Diagramas $C_D$ x $Re_p$

Os gráficos  $C_D$  x  $Re_p$  para os ensaios com água destilada, solução aquosa de glicerina e óleo mineral encontram-se nas figuras IV.1, IV.2 e IV.3, respectivamente. Todas as tabelas contendo os dados de velocidade terminal e outros necessários para o cálculo de  $C_D$  e  $Re_p$  estão dispostas nos Apêndices A, B e C. Nos diagramas foi traçada, para fins de balizamento, a curva correspondente à esfera lisa de acordo com a recente correlação desenvolvida por Morrison (Michigan Technological University, 2012):

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{2,6\left(\frac{Re}{5,0}\right)}{1 + \left(\frac{Re}{5,0}\right)^{1,52}} + \frac{0,411\left(\frac{Re}{263.000}\right)^{-7,94}}{1 + \left(\frac{Re}{263.000}\right)^{-8,00}} + \left(\frac{Re^{0,80}}{461.000}\right)$$

A figura IV.1 a seguir representa os resultados para os experimentos realizados em água destilada a 25,5°C.

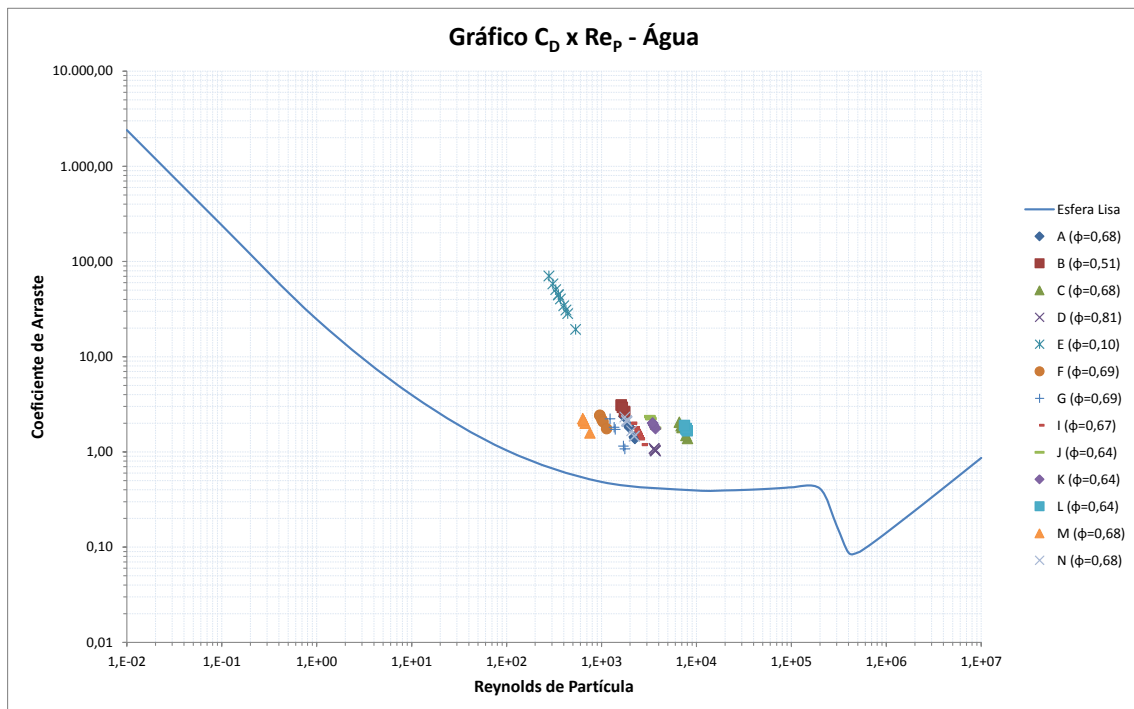


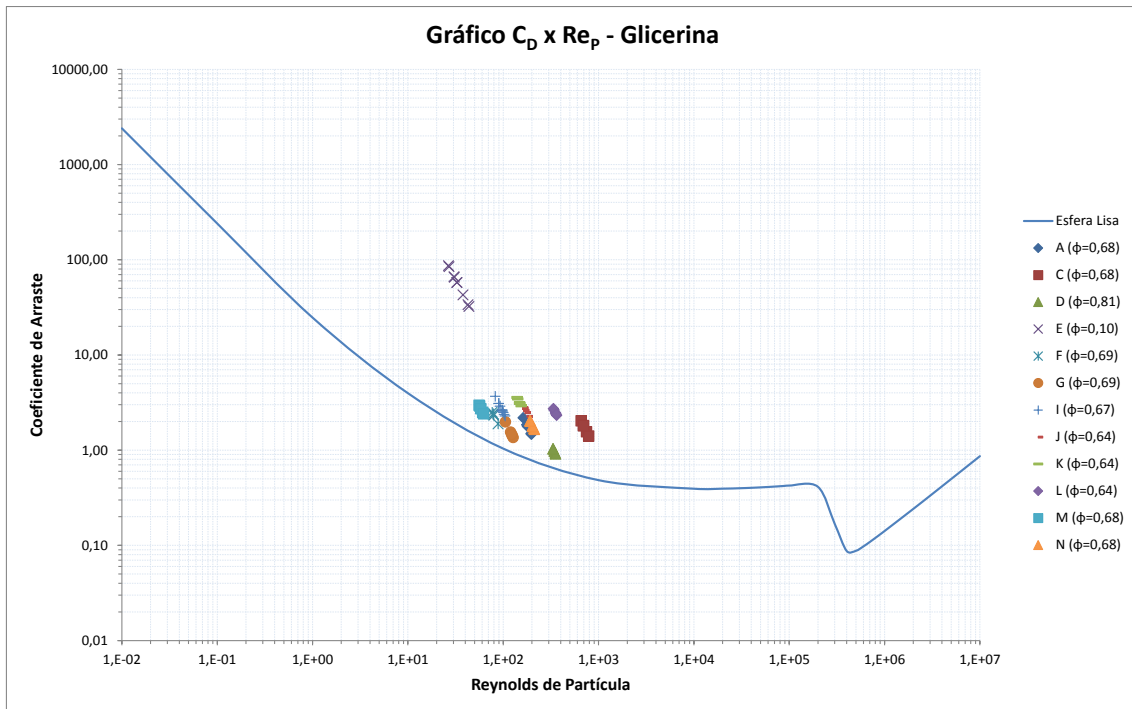
Figura IV.1 –  $C_D$  x  $Re_p$  Água

Todas as partículas foram avaliadas no ensaio utilizando água destilada, atingindo uma faixa de  $Re_p$  mais elevada, variando entre valores de 100 e 10000. Já os valores obtidos para  $C_D$  ficaram compreendidos em uma faixa entre 1 e 100.

Os resultados mostram notada dispersão entre os pontos correspondentes a partículas pertencentes ao mesmo grupo. Essa dispersão ocorreu porque partículas com mesma esfericidade, densidade e diâmetro característico atingiram velocidades terminais diferentes nos testes realizados. Esse resultado reforça a ideia de que a esfericidade sozinha não é um bom fator de forma quando se está interessado em interação partícula-fluido. Sendo assim, partículas com a mesma esfericidade não necessariamente irão interagir da mesma maneira com o fluido.

Outra observação interessante é que as partículas que apresentam menores valores de esfericidade como, por exemplo, o grupo E, apresentaram maior dispersão quando comparados com partículas que possuem valores mais elevados de esfericidade como, por exemplo, o grupo D.

A figura IV.2 representa os resultados para os experimentos realizados em solução aquosa de glicerina a 25,5°C.



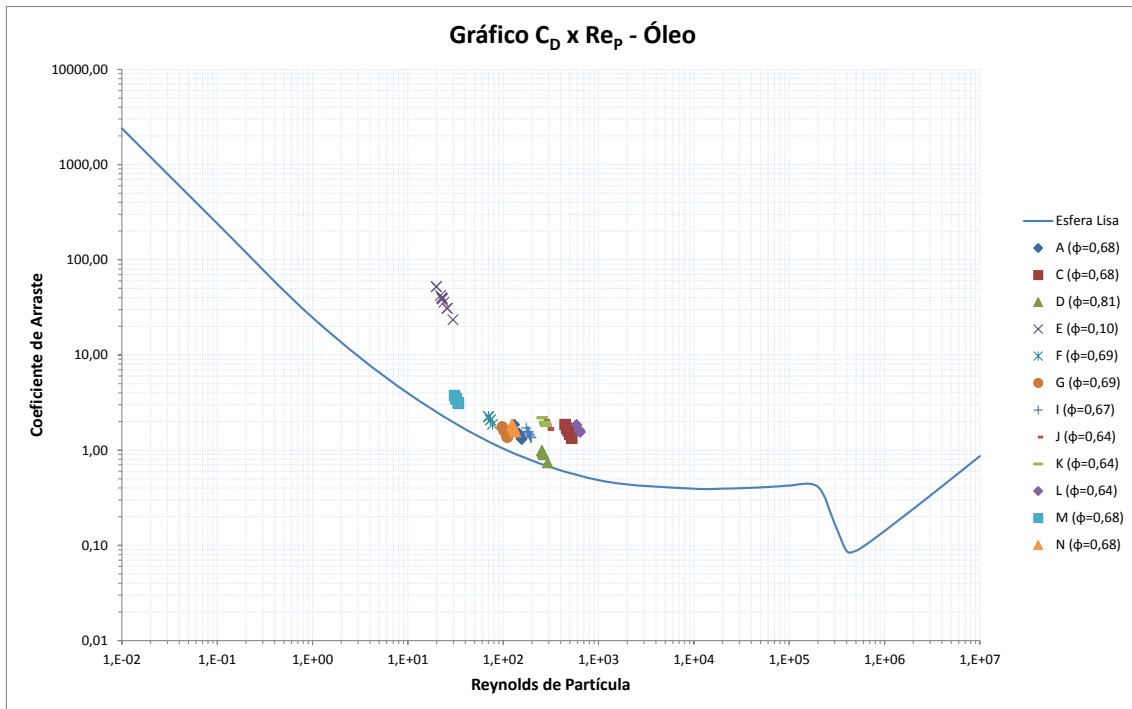
**Figura IV.2 –  $C_D$  x  $Re_p$  Glicerina**

Neste fluido foram analisadas todas as partículas excetuando-se o grupo B, pois este é constituído de um material que apresenta densidade muito próxima a do fluido impedindo a sua análise no mesmo.

No ensaio, foram atingidas faixas de valores de  $Re_p$  mais baixas que no ensaio com água destilada alcançando-se valores compreendidos entre 10 e 1000. A faixa de valores de  $C_D$  foi bastante próxima a do ensaio anterior.

Novamente foi observada a dispersão entre os pontos correspondentes a partículas do mesmo grupo, ratificando o grande desvio com relação ao comportamento previsto pelas correlações empíricas presentes na literatura que utilizam como fator de forma único a esfericidade.

A figura IV.3 a seguir representa os resultados para os experimentos realizados em óleo mineral a 27,5°C.



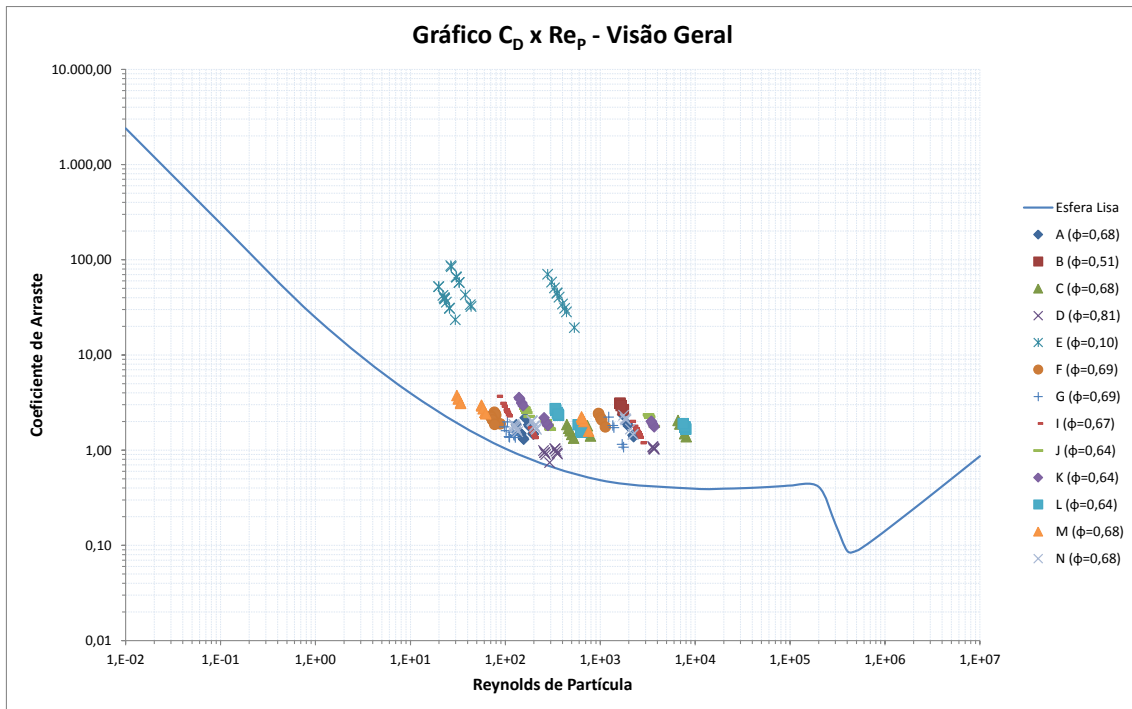
**Figura IV.3 –  $C_D$  x  $Re_p$  Óleo**

No ensaio utilizando-se óleo mineral, a faixa de valores de  $C_D$  e  $Re_p$  foi bastante semelhante à do ensaio com solução de glicerina. Mais uma vez foi observada uma maior dispersão dos pontos referentes a grupos de menor esfericidade quando comparados a grupos que apresentam maiores valores de esfericidade.

No referido ensaio, podemos observar novamente, valores de  $C_D$  e  $Re_p$  distintos para partículas do mesmo grupo, embora essa diferença seja ligeiramente mais sutil frente aos outros experimentos.

Uma visão geral com todos os dados experimentais obtidos pode ser encontrada na figura IV.4 a seguir.





**Figura IV.4 –  $C_D$  x  $Re_p$  Visão Geral**

Os experimentos realizados tiveram valores de  $Re_p$  compreendidos numa faixa entre 10 e 10000, enquanto os de  $C_D$  variaram de valores pouco abaixo de 1 até valores próximos a 100.

Com base nos resultados experimentais foi possível observar que partículas que possuem baixa esfericidade (grupo E) apresentam variações em seus valores de velocidades terminais mais marcantes quando comparadas com partículas de esfericidade mais elevada (grupo D). Entretanto, todos os grupos apresentaram dispersões significativas.

A partir das correlações envolvendo  $C_D$ ,  $Re_p$  e  $\phi$  largamente encontradas na literatura, os valores de velocidade terminal para partículas que possuem mesma esfericidade, mesmo  $d_p$  e que sejam constituídas do mesmo material deveriam ser iguais. Entretanto, ao analisarem-se os resultados obtidos, pode-se observar que isto não ocorre, indicando que, para as partículas analisadas no presente trabalho a esfericidade não é um bom fator de forma para determinação da velocidade terminal.

## IV.2 – Novas Correlações para $C_D$ e $Re_p$

A partir da resolução do problema de otimização, chegou-se às seguintes correlações baseadas nos dados experimentais do presente trabalho e nas correlações de Coelho & Massarani.

$$K1 = 0,111754 \log_{10} \left( \frac{IEC}{0,009} \right) \left( \frac{\rho_s}{\rho_l} \right)^{0,715811}$$

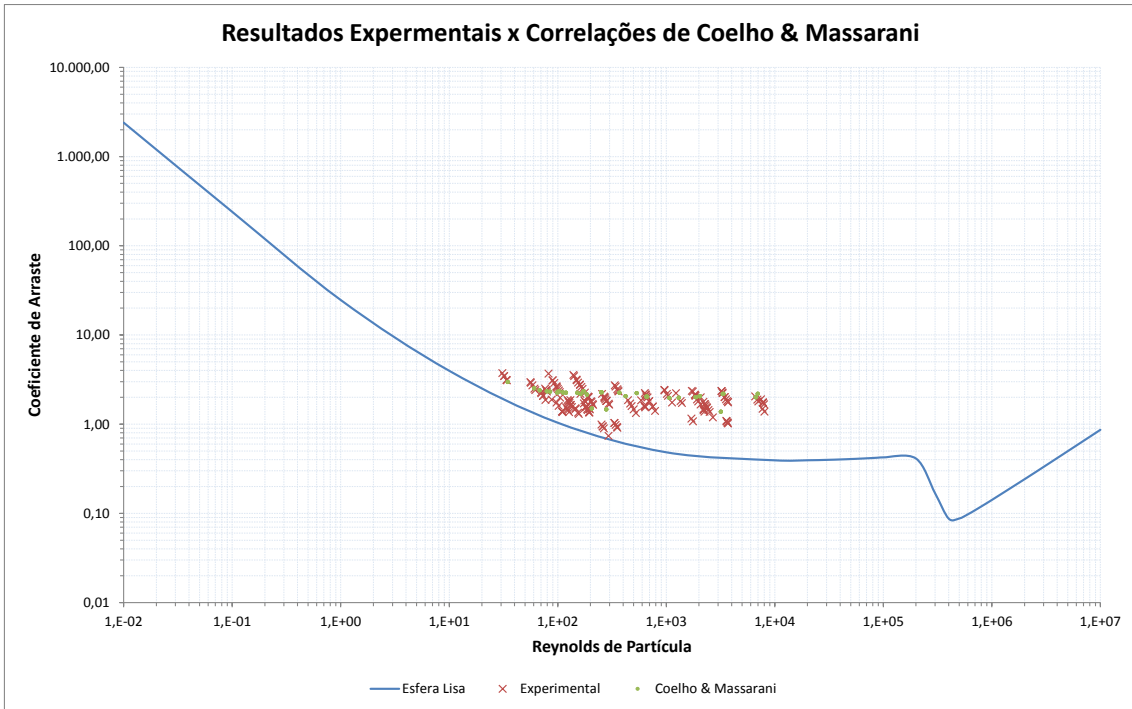
$$K2 = [10,15683 - 9,689551(\phi^{0,710244}) - 0,761911(1 + ICON^{0,931225})] \left( \frac{\rho_s}{\rho_l} \right)^{-0,22}$$

$$Re_p = \left[ \left( \frac{K1 C_D Re_p^2}{24} \right)^{-n} + \left( \frac{C_D Re_p^2}{K2} \right)^{\frac{-n}{2,01086496}} \right]^{\frac{-1}{n}}$$

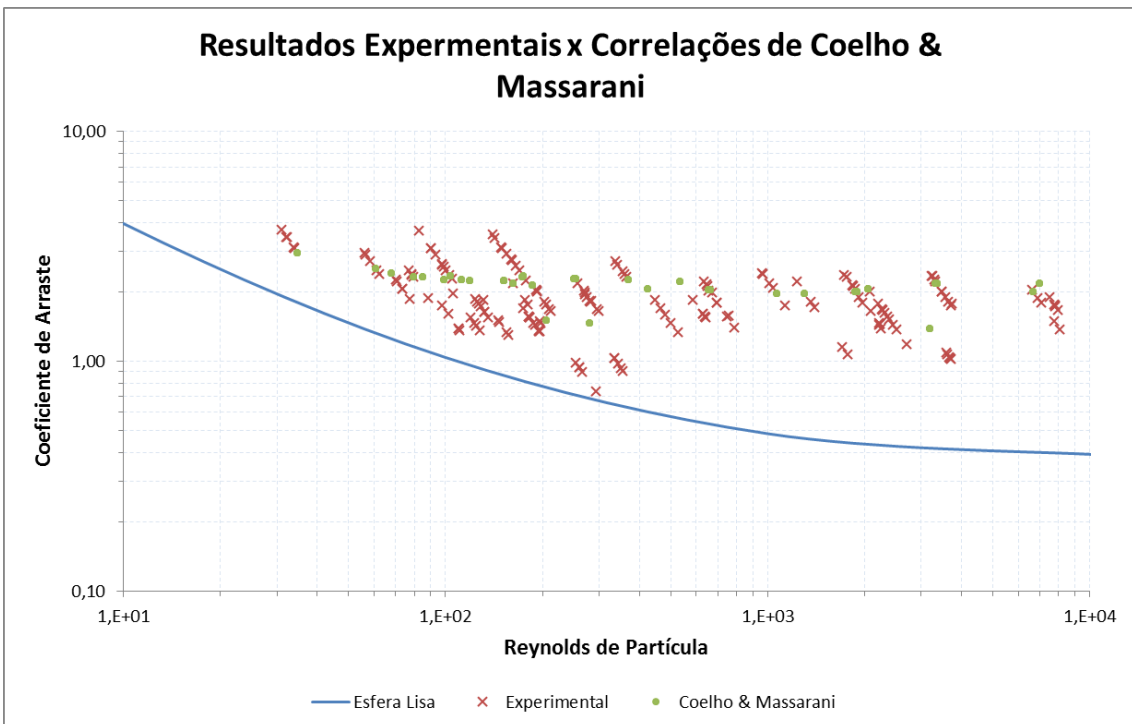
$$n = 2,82576$$

Vale lembrar que as correlações acima são válidas para valores de  $\phi \geq 0,64$ .

Após o cálculo do valor de  $Re_p$  da forma descrita acima, é fácil chegar aos valores de  $v_t$  e  $C_D$  através das equações descritas anteriormente. As figuras IV.5 e IV.6 a seguir mostram os gráficos de  $C_D$  x  $Re_p$  comparando os resultados obtidos experimentalmente com as correlações desenvolvidas por Coelho e Massarani (1996).



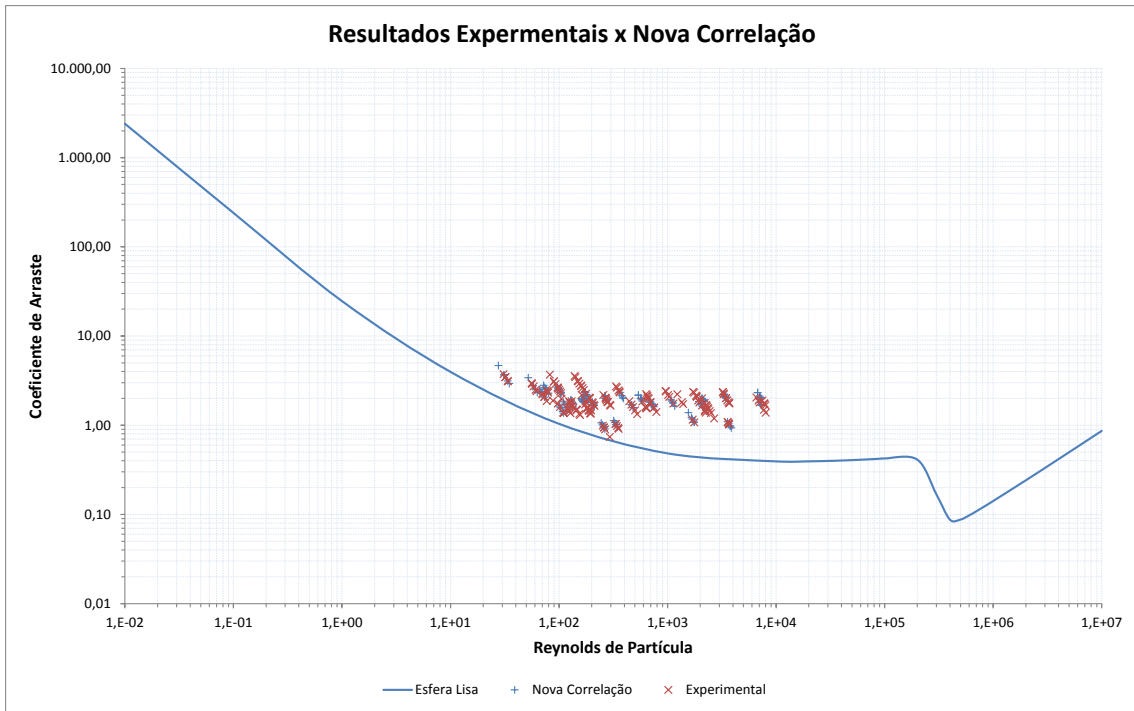
**Figura IV.5 – Resultados Experimentais x Correlações de Coelho e Massarani**



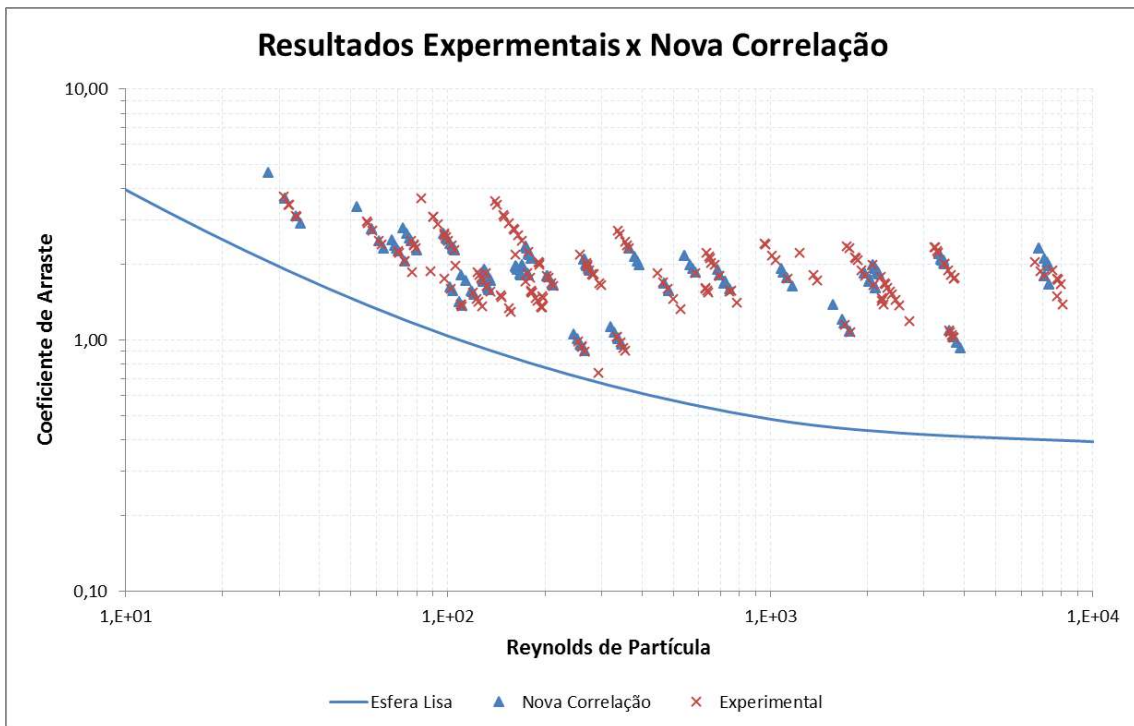
**Figura IV.6 - Resultados Experimentais x Correlações de Coelho e Massarani (Ampliação)**

Pode-se observar que as correlações desenvolvidas por Coelho & Massarani predizem uma mesma velocidade terminal e, portanto, um mesmo valor para  $C_D$  e  $Re_p$ , para partículas que possuem mesma esfericidade, mesmo  $d_p$  e mesma densidade. Comparando-se com os dados experimentais obtidos percebe-se que isso não é o que ocorre na prática, pois partículas que possuem mesma esfericidade, mesmo  $d_p$  e mesma densidade podem apresentar velocidades terminais diferentes, indicando que somente a esfericidade não é um bom fator de forma para determinação da velocidade terminal de partículas.

A nova correlação desenvolvida fez uso de 3 fatores de forma para descrever de forma mais fiel a interação partícula-fluido. Esses fatores são a esfericidade, o ICON e o IEC. As figuras IV.7 e IV.8 a seguir mostram os gráficos de  $C_D$  x  $Re_p$  comparando os resultados obtidos experimentalmente com as novas correlações desenvolvidas fazendo o uso dos 3 fatores de forma, conforme descrito anteriormente.



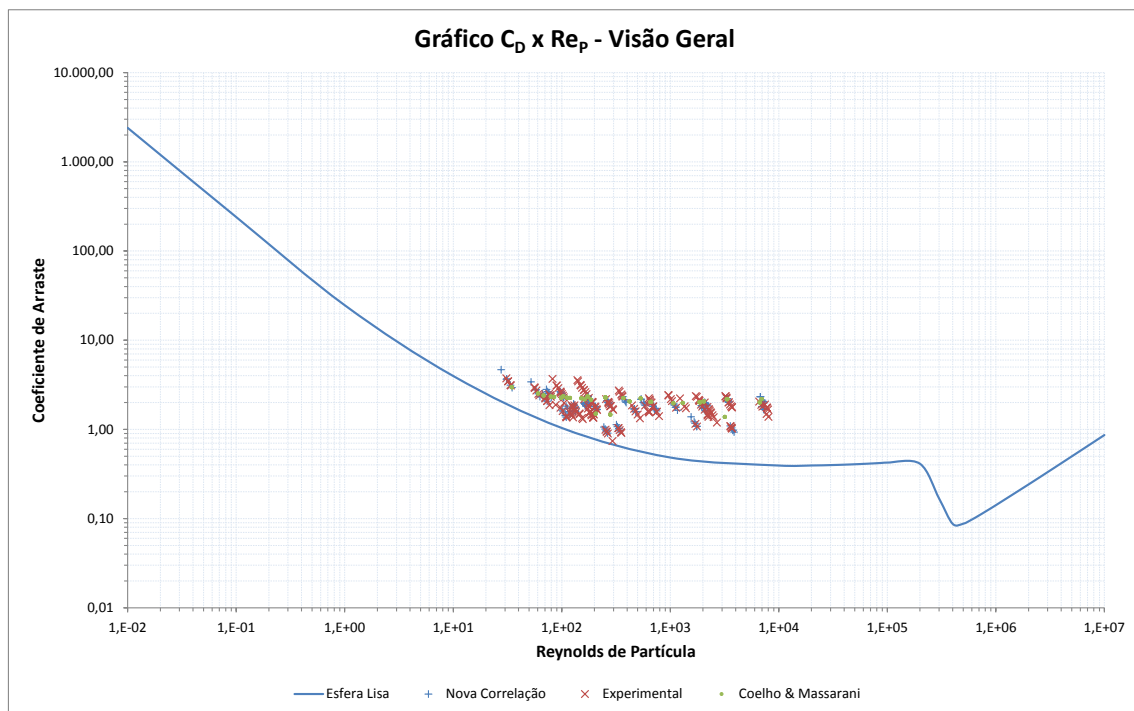
**Figura IV.7 - Resultados Experimentais x Nova Correlação**



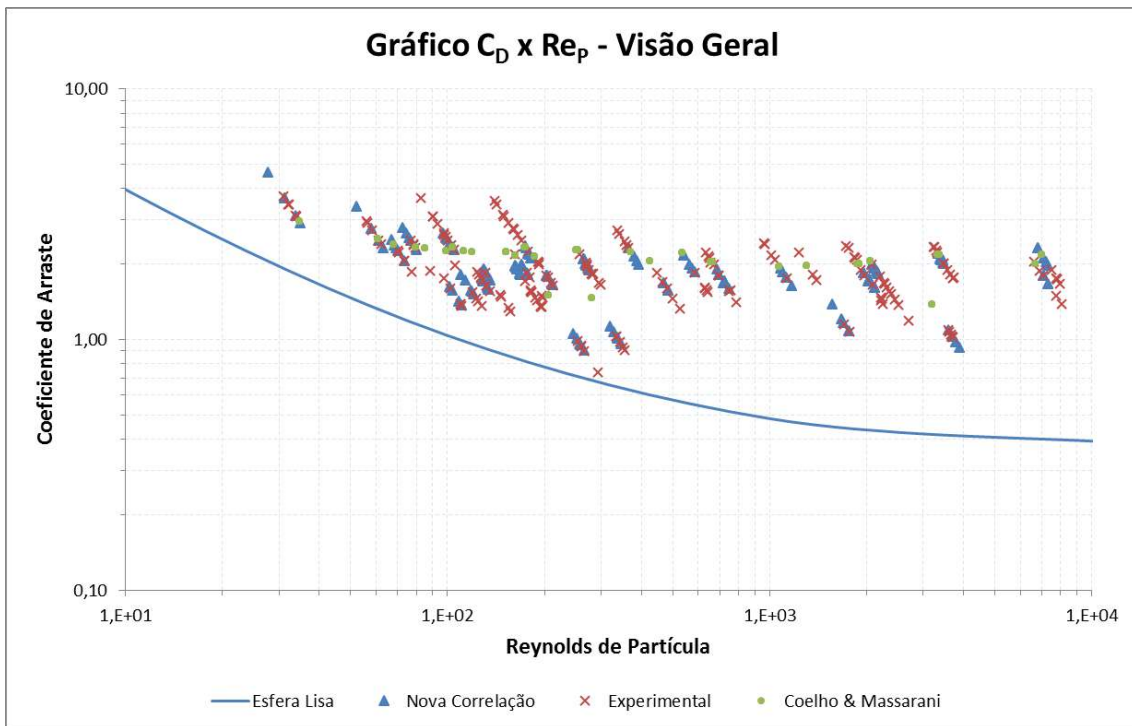
**Figura IV.8 - Resultados Experimentais x Nova Correlação (Ampliação)**

Pode-se observar que os valores obtidos com a nova correlação desenvolvida se ajustam aos dados experimentais de uma melhor forma que a correlação de Coelho & Massarani. Além disso, a correlação desenvolvida prevê valores de velocidade terminal diferentes para partículas de mesma esfericidade o que está de acordo com os dados experimentais.

As figuras IV.9 e IV.10 mostram uma visão geral dos resultados experimentais e das duas correlações.



**Figura IV.9 – Visão geral dos dados experimentais e das correlações.**



**Figura IV.10 – Visão geral dos dados experimentais e das correlações. (Ampliação)**

# CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

## V.1 – Conclusões

A partir dos resultados experimentais obtidos para a velocidade terminal das partículas testadas no presente trabalho, conclui-se que partículas que possuem mesma esfericidade, mesmo  $d_p$  e mesma densidade, porém formas diferentes, não necessariamente apresentam a mesma velocidade terminal, o que vai de encontro com o previsto por diversas correlações presentes na literatura.

Observou-se que a dificuldade da esfericidade em representar de forma fiel a forma da partícula e, portanto, em prever a sua velocidade terminal, é mais marcante em valores baixos de esfericidade. Entretanto, mesmo em valores altos, ou seja, próximos da unidade, tal fator de forma apresenta limitações. Partículas com reentrâncias significativas também apresentaram comportamentos mais desviados em relação aos esperados com base na esfericidade.

De forma a tentar prever de forma mais acurada o comportamento de partículas na interação partícula-fluido, utilizou-se outros dois fatores de forma em conjunto com a esfericidade, o ICON e o IEC. Obteve-se sucesso em construir uma nova correlação para predição da velocidade terminal que envolvesse esses três fatores com base nas correlações já existentes de Coelho e Massarani, que fazem uso somente da esfericidade.

Tal correlação apresentou resultados de predição de velocidade terminal significativamente mais condizentes com os resultados experimentais quando comparados com a correlação de Coelho e Massarani, inclusive predizendo velocidades terminais diferentes para partículas de mesma esfericidade o que está de acordo com os resultados experimentais.

A princípio, as correlações de Coelho e Massarani são válidas somente para partículas isométricas, porém como a literatura é escassa em relação a correlações apropriadas para partículas reentrantes, as mesmas acabam sendo utilizadas também para partículas não isométricas. No presente trabalho foram testadas tanto partículas



reentrantes quanto convexas e a correlação desenvolvida descreveu bem os resultados experimentais obtidos nas condições do presente trabalho.

A análise criteriosa dos resultados experimentais e o resultado melhor obtido com a correlação utilizando os três fatores de forma definidos anteriormente quando comparados com a esfericidade isolada, leva a crer que uma nova abordagem simples e que promete melhor resultado na caracterização da forma das partículas consiste em utilizar um novo fator de forma que fosse função da esfericidade, ICON e IEC .

## **V.2 – Sugestões**

Como uma continuação do presente trabalho recomenda-se a utilização de materiais e métodos mais elaborados. Tais modificações poderiam incluir a adição de um sistema de controle de temperatura com uma camisa de resfriamento/aquecimento ao redor da cuba de forma a manter as condições experimentais constantes e sob controle. Seria interessante instalar um sistema de sensores em diferentes regiões da cuba de forma a aumentar ainda mais a precisão das medidas referentes ao tempo de queda das partículas.

Além disso, a construção de uma nova cuba com dimensões um pouco maiores seria interessante no que tange a minimizar ainda mais os efeitos de parede e ao aumento da faixa de estudo do comportamento da velocidade de queda das partículas. A utilização de outros fluidos de diferentes viscosidades e densidades seria válida para aumentar a faixa de  $Re_p$  e  $C_D$  estudada.

No que se refere às partículas, propõe-se que seja realizado um planejamento experimental de forma a criar grupos de partículas com mesma esfericidade, ICON e IEC separadamente e com faixas desses índices bem distribuídas, de forma a facilitar o desenvolvimento de um novo fator de forma envolvendo tais índices.

Finalmente, acredita-se que ainda há espaço para a melhoria das correlações apresentadas testando outros parâmetros de ajuste que consigam representar de forma melhor ainda a interação partícula-fluido e suas características.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, T. **Particle Size Measurement**. 3. ed. Londres: Chapman & Hall, 1981.

CAETANO, M. J. L. **Ciência e Tecnologia da Borracha**. Disponível em: <[http://www.ctb.com.pt/?page\\_id=3592](http://www.ctb.com.pt/?page_id=3592)>. Acesso em: 15 maio 2013.

CHHABRA R. P.; AGARWAL L.; SINHA N. K. Drag on non-spherical particles: an evaluation of available methods. **Powder Technology**, n. 101, p. 288-295, 1999.

HAIDER, O. Levenspiel. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and non-spherical particles. **Powder Technology**, n.58, p. 63-70, 1989.

HÖLZER, A.; SOMMERFELD, M. New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles. **ScienceDirect: Powder Technology**, n. 184, p. 361-365, 2008.

LOTH, E. Drag of non-spherical solid particles of regular and irregular shape. **ScienceDirect: Powder Technology**, n. 182, p. 342-353, 2008.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2. ed. E-Papers, 2002.

MCCABE, W. L.; SMITH J.C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed. Singapura: McGraw-Hill, Inc., 1993.

MENDES, L. V. R.; MELO T. M. **Avaliação da esfericidade como um fator de forma na interação partícula-fluido**. Projeto Final – Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

MORRISON, F. A. **Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere**. Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI, 2013.

PERRY, J. H. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. 8. ed. EUA: McGraw-Hill, Inc., 2008.

PETTYJOHN, E. S.; CHRISTIANSEN, E. B. **Effect of Particle Shape as Free-Setting Rates of Isometric Particles**. Chemical Engineering Progress, Vol. 43, p. 157-172, 1948.

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

WEN-CHING YANG et al. **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems**. 1. ed. New York, Marcel Dekker Inc., 2003.

**APÊNDICE A – DADOS PARA ENSAIOS COM ÁGUA  
DESTILADA**

Tabela A.1 – Velocidades Terminais para os ensaios com água destilada

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
A1	1	17,5439	16,3934	17,0940	18,0180	17,5439	17,7693	0,7418
	2	18,1818	17,2414	17,6991	19,2308	17,6991		
	3	17,6991	17,3913	18,1818	19,2308	17,3913		
A2	1	17,6991	17,3913	17,8571	17,0940	16,6667	17,3131	0,4727
	2	17,6991	17,3913	16,6667	17,3913	16,8067		
	3	18,1818	17,3913	16,6667	17,6991	17,0940		
A3	1	15,7480	16,2602	15,6250	15,3846	15,5039	15,5041	0,3718
	2	15,3846	16,0000	14,9254	15,3846	15,6250		
	3	14,9254	15,8730	15,1515	15,2672	15,5039		
A4	1	21,2766	-	18,3486	19,4175	20,0000	19,8948	1,1438
	2	21,2766	-	19,2308	18,8679	20,0000		
	3	21,2766	-	21,2766	18,3486	19,4175		
A5	1	21,5054	20,6186	-	20,0000	20,8333	20,2616	0,7499
	2	20,6186	19,8020	-	19,4175	20,8333		
	3	21,0526	19,6078	-	19,0476	19,8020		
B1	1	10,9290	10,0000	10,3093	9,9502	9,5238	10,1013	0,1998
	2	11,1111	10,1523	10,5263	10,6383	9,8522		
	3	10,3627	10,5263	10,5820	10,7527	10,3093		
B2	1	10,0000	10,2564	10,1523	9,9502	10,2041	10,9071	0,7358
	2	10,4712	10,4167	10,0000	9,8039	10,0000		
	3	10,0000	10,2564	10,2041	10,0000	9,8039		
B3	1	10,1010	10,7527	12,5000	10,2041	12,9032	10,9442	0,8288
	2	10,9290	11,0497	10,7527	9,6618	10,9890		
	3	10,9290	10,8696	10,5263	11,2994	10,6952		
B4	1	10,1523	11,1111	9,5238	10,2041	9,6154	10,0835	0,4622
	2	10,3627	10,3627	10,2041	10,1523	9,5238		
	3	10,4712	10,0000	10,0000	10,3093	9,2593		
B5	1	10,0000	10,7527	12,5000	10,9890	11,6279	10,3684	0,4248
	2	10,2041	10,5263	11,1111	10,8108	11,7647		
	3	10,6952	10,5820	9,6618	10,7527	11,6279		
C1	1	35,0877	35,0877	36,3636	37,0370	-	36,2625	1,6091
	2	33,8983	36,3636	37,0370	35,0877	-		
	3	37,7358	40,0000	35,0877	36,3636	-		
C2	1	29,8507	30,3030	30,3030	28,9855	29,4118	29,7595	0,3529
	2	29,4118	29,8507	29,8507	29,8507	29,8507		
	3	31,7460	29,8507	29,4118	29,8507	29,8507		
C3	1	34,4828	37,0370	34,4828	36,3636	38,4615	34,9091	1,5858
	2	33,3333	35,7143	35,0877	35,0877	34,4828		
	3	33,8983	33,3333	35,7143	33,8983	32,2581		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
C4	1	29,4118	30,3030	31,7460	31,7460	31,7460	31,0880	1,0386
	2	29,8507	31,2500	31,7460	30,3030	31,2500		
	3	32,2581	30,3030	33,3333	30,3030	30,7692		
C5	1	28,5714	29,8507	31,7460	33,3333	32,7869	31,7566	1,9365
	2	28,5714	32,2581	31,7460	31,7460	31,2500		
	3	33,3333	35,7143	33,3333	29,8507	32,2581		
D1	1	26,3158	26,6667	26,3158	25,0000	25,3165	26,1605	0,8923
	2	26,3158	27,0270	25,3165	24,6914	26,3158		
	3	25,9740	26,3158	27,0270	25,6410	28,1690		
D2	1	26,6667	25,3165	25,3165	25,6410	25,0000	25,6195	0,8408
	2	26,3158	25,3165	26,3158	25,9740	25,0000		
	3	-	25,3165	27,3973	24,0964	25,0000		
D3	1	25,6410	26,3158	26,3158	26,6667	25,6410	25,8230	0,6791
	2	25,0000	25,6410	26,6667	25,6410	25,6410		
	3	25,3165	25,3165	-	24,6914	27,0270		
D4	1	27,0270	26,6667	25,3165	25,6410	27,3973	26,4906	0,5875
	2	26,3158	27,0270	25,9740	26,3158	27,3973		
	3	26,6667	26,3158	26,6667	26,3158	26,3158		
D5	1	27,0270	26,6667	25,9740	27,3973	-	26,3363	0,7664
	2	25,9740	27,0270	26,3158	27,3973	-		
	3	25,6410	25,6410	25,9740	25,0000	-		
E1	1	7,6923	7,7821	7,9051	7,7821	7,9051	7,7295	0,2120
	2	7,4074	7,6923	7,9681	7,8740	7,4627		
	3	7,6046	7,9681	8,0000	7,4906	7,4074		
E2	1	6,4516	-	6,5147	5,0891	-	5,3516	0,9099
	2	4,5147	-	4,5147	-	-		
	3	5,0891	-	5,0251	-	-		
E3	1	4,2827	4,3384	4,7962	4,2644	4,4346	4,4658	0,1624
	2	4,5455	4,5147	4,6620	4,3956	4,5558		
	3	4,5455	4,5351	4,1580	4,4444	4,5147		
E4	1	6,3898	6,2696	6,4516	6,2696	6,1538	6,3964	0,1638
	2	6,3091	6,5574	6,2500	6,6225	6,2696		
	3	6,3291	6,6667	6,3091	6,6667	6,4309		
E5	1	5,1282	4,8780	5,1546	5,0761	4,8544	5,0833	0,1028
	2	5,0505	5,1680	5,1813	4,9875	5,1282		
	3	5,1282	5,1813	5,1546	5,0761	5,1020		
E6	1	4,7962	-	-	-	-	4,7790	0,0242
	2	4,7619	-	-	-	-		
	3	-	-	-	-	-		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
E7	1	4,8193	5,1948	4,9140	5,0633	5,1020	5,1045	0,1335
	2	5,1282	5,1546	5,0633	5,2770	5,2910		
	3	5,0761	5,0505	5,0125	5,3050	5,1151		
E8	1	5,9524	6,1350	6,0241	5,9880	6,1728	6,1291	0,1051
	2	6,1350	6,2500	6,1538	5,9701	6,1350		
	3	6,2696	6,2696	6,2305	6,1350	6,1162		
E9	1	3,9604	4,0816	4,2194	4,0080	-	4,0593	0,0714
	2	3,9920	4,1237	4,0900	4,0241	-		
	3	4,0323	4,1068	4,0000	4,0733	-		
E10	1	5,9172	5,5556	5,9524	5,8824	5,7971	5,8162	0,1465
	2	5,7971	4,4543	5,7637	5,9524	5,7637		
	3	5,7971	5,6022	5,6497	6,0790	5,9172		
F1	1	11,1111	11,1111	11,8343	11,4943	11,2360	11,3693	0,2638
	2	11,1732	11,4286	11,5607	11,5607	11,3636		
	3	11,2994	10,8696	11,8343	11,2994	11,3636		
F2	1	10,9890	11,4286	11,7647	11,1732	11,9760	11,4400	0,2940
	2	11,6279	11,4943	11,4943	11,3636	11,1732		
	3	11,4943	10,9290	11,6279	11,7647	11,2994		
F3	1	12,5000	12,1212	11,5607	11,9048	12,1951	11,9901	0,3436
	2	12,4224	12,4224	11,9048	11,6279	11,9760		
	3	11,3636	12,3457	11,8343	11,9760	11,6959		
F4	1	11,6959	12,2699	12,6582	12,9032	11,7647	12,2839	0,6117
	2	11,9760	12,6582	12,5000	13,0719	11,1732		
	3	11,8343	12,5786	12,7389	13,0719	11,3636		
F5	1	13,1579	13,8889	13,5135	13,6986	13,7931	13,3803	0,2778
	2	13,2450	13,5135	13,5135	13,4228	13,3333		
	3	13,2450	12,9870	13,3333	13,0719	12,9870		
G1	1	12,5000	12,2699	12,6582	12,8205	12,7389	12,7081	0,3048
	2	13,0719	11,9760	12,7389	13,0719	12,5786		
	3	12,7389	12,8205	13,1579	12,8205	12,6582		
G2	1	13,8889	14,2857	13,7931	15,0376	13,6986	14,0616	0,3942
	2	13,7931	14,1844	13,4228	14,4928	13,9860		
	3	13,8889	14,4928	14,0845	13,8889	13,9860		
G3	1	14,2857	14,4928	14,2857	14,5985	14,8148	14,4354	0,2895
	2	14,1844	14,4928	14,2857	14,4928	15,0376		
	3	13,8889	14,3885	14,0845	14,4928	14,7059		
G4	1	16,6667	18,8679	17,3913	19,4175	18,6916	18,2744	1,1778
	2	16,6667	18,1818	17,5439	20,4082	19,4175		
	3	16,8067	17,5439	17,8571	19,6078	19,0476		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
G5	1	17,0940	17,6991	17,3913	18,5185	17,5439	17,6373	0,4587
	2	16,8067	17,6991	17,8571	18,5185	17,6991		
	3	17,3913	17,2414	17,5439	17,6991	17,8571		
I1	1	14,5985	13,6054	15,1515	14,5985	10,9890	14,1338	0,5639
	2	14,4928	13,3333	14,7059	13,9860	13,6054		
	3	14,2857	13,3333	14,2857	14,2857	13,6054		
I2	1	15,0376	16,6667	17,0940	16,2602	17,0940	16,1148	0,5941
	2	15,3846	16,0000	16,6667	16,1290	16,2602		
	3	15,6250	16,2602	15,7480	15,7480	15,7480		
I3	1	14,2857	13,6986	14,5985	13,6054	12,5000	13,3269	0,7985
	2	13,0719	13,3333	14,5985	12,9032	12,6582		
	3	11,9760	-	13,5135	12,5000	13,3333		
I4	1	14,5985	14,4928	14,7059	14,5985	14,5985	14,8335	0,2544
	2	14,9254	14,8148	15,2672	14,5985	14,9254		
	3	15,1515	14,8148	14,7059	15,0376	15,2672		
I5	1	14,5985	14,5985	15,6250	15,5039	15,0376	14,5956	0,5410
	2	14,4928	13,8889	15,1515	14,2857	14,2857		
	3	13,9860	14,9254	14,1844	14,0845	14,2857		
I6	1	14,2857	15,0376	14,5985	14,3885	14,7059	14,5226	0,3707
	2	14,5985	14,9254	14,2857	14,1844	15,0376		
	3	14,9254	14,2857	14,7059	13,9860	13,8889		
I7	1	14,9254	15,7480	14,7059	16,0000	16,1290	15,2973	0,6062
	2	15,2672	15,5039	14,4928	15,0376	15,3846		
	3	15,0376	15,8730	14,7059	14,3885	16,2602		
I8	1	15,7480	15,8730	15,6250	16,5289	14,9254	15,7078	0,6567
	2	15,1515	15,3846	16,0000	16,6667	15,3846		
	3	14,7059	14,8148	16,6667	16,3934	15,7480		
I9	1	18,8679	17,6991	15,7480	18,8679	16,5289	17,2831	0,8828
	2	18,0180	17,0940	16,1290	17,5439	17,0940		
	3	17,5439	16,6667	16,8067	17,5439	17,0940		
I10	1	14,5985	14,9254	17,0940	14,2857	15,3846	15,1060	1,2939
	2	14,2857	13,6986	17,0940	13,8889	17,2414		
	3	14,5985	14,1844	15,0376	13,6054	16,6667		
J1	1	16,9492	18,1818	16,1290	16,9492	17,6991	16,8490	0,7775
	2	15,8730	18,1818	16,2602	16,6667	16,6667		
	3	15,8730	17,5439	16,2602	16,2602	17,2414		
J2	1	-	14,7059	14,3885	14,5985	-	14,6391	0,2871
	2	-	14,2857	14,4928	15,0376	-		
	3	-	14,4928	14,5985	15,1515	-		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
J3	1	15,3846	15,7480	14,8148	15,3846	-	15,0478	0,4094
	2	14,9254	15,1515	14,3885	15,5039	-		
	3	14,5985	15,0376	14,5985	15,0376	-		
J4	1	13,9860	14,2857	13,6054	14,7059	-	14,6635	0,6863
	2	13,8889	14,2857	15,3846	15,0376	-		
	3	14,5985	15,3846	15,8730	14,9254	-		
J5	1	15,3846	14,5985	14,3885	14,4928	14,7059	14,9320	0,5994
	2	14,5985	14,2857	14,8148	16,1290	15,1515		
	3	14,5985	14,5985	14,7059	16,2602	15,2672		
K1	1	15,3846	15,7480	17,2414	16,1290	17,3913	16,8877	1,7885
	2	16,5289	15,8730	20,4082	19,0476	15,3846		
	3	15,3846	14,8148	18,8679	19,6078	15,5039		
K2	1	15,0376	15,5039	15,7480	16,5289	15,7480	16,6098	1,4166
	2	16,2602	18,0180	16,6667	15,6250	18,1818		
	3	17,5439	19,0476	15,1515	15,0376	19,0476		
K3	1	16,6667	16,2602	16,2602	14,7059	16,1290	16,2152	0,6583
	2	15,6250	16,2602	16,6667	16,1290	15,6250		
	3	15,8730	17,5439	16,2602	17,0940	16,1290		
K4	1	15,0376	15,2672	16,2602	16,5289	14,5985	15,7906	0,6640
	2	15,8730	15,3846	16,3934	17,0940	15,7480		
	3	16,2602	15,1515	15,3846	15,7480	16,1290		
K5	1	18,0180	15,2672	16,6667	15,7480	15,7480	15,7979	1,1413
	2	16,2602	14,5985	17,3913	14,7059	15,0376		
	3	16,5289	14,7059	17,0940	14,4928	14,7059		
L1	1	20,0000	24,0964	24,3902	20,8333	21,9780	21,7611	1,6528
	2	19,6078	23,2558	23,8095	21,5054	22,2222		
	3	20,2020	21,2766	22,9885	19,4175	20,8333		
L2	1	21,5054	22,9885	21,7391	25,3165	21,9780	22,2024	1,3985
	2	20,6186	23,8095	21,5054	22,2222	22,2222		
	3	20,8333	24,3902	21,2766	20,4082	22,2222		
L3	1	22,4719	21,0526	21,0526	22,4719	21,2766	21,6883	0,5289
	2	21,9780	21,7391	22,2222	21,2766	20,8333		
	3	21,9780	22,2222	21,5054	21,7391	21,5054		
L4	1	22,4719	21,2766	22,9885	21,7391	20,0000	21,6153	1,1974
	2	21,2766	20,2020	22,7273	23,2558	19,4175		
	3	22,2222	20,2020	22,4719	22,4719	21,5054		
L5	1	20,6186	21,5054	21,2766	20,0000	20,8333	20,8056	0,8243
	2	20,6186	20,8333	20,0000	20,6186	21,7391		
	3	20,6186	20,0000	19,4175	21,2766	22,7273		



Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
M1	1	-	13,6986	14,1844	14,3885	14,1844	14,2926	0,3259
	2	-	14,1844	14,3885	14,2857	14,7059		
	3	-	13,7931	14,7059	14,2857	14,7059		
M2	1	14,0845	14,7059	14,5985	15,0376	14,5985	14,6814	0,2605
	2	14,5985	14,4928	14,7059	14,7059	14,5985		
	3	14,8148	14,3885	14,9254	15,1515	14,8148		
M3	1	15,8730	15,5039	16,6667	16,2602	15,0376	15,1308	1,7669
	2	15,5039	15,3846	11,0497	16,5289	15,0376		
	3	15,8730	15,7480	10,9290	16,5289	15,0376		
M4	1	14,3885	16,0000	14,9254	14,4928	14,7059	14,5346	0,9499
	2	13,3333	15,7480	14,5985	13,7931	14,1844		
	3	13,6054	16,5289	14,2857	13,2450	14,1844		
M5	1	17,5439	-	17,0940	16,8067	16,9492	16,9955	0,4387
	2	17,2414	-	17,6991	16,3934	16,8067		
	3	16,6667	-	17,3913	16,2602	17,0940		
N1	1	23,8095	23,8095	24,0964	22,9885	23,8095	23,4348	1,1551
	2	22,4719	25,0000	24,0964	21,9780	23,2558		
	3	22,2222	23,8095	25,9740	22,2222	21,9780		
N2	1	21,2766	20,8333	21,2766	20,4082	20,4082	20,9705	0,6784
	2	21,2766	20,0000	21,5054	20,6186	20,6186		
	3	21,5054	21,5054	21,7391	19,6078	21,9780		
N3	1	20,0000	20,4082	20,4082	20,6186	21,5054	20,6576	0,4887
	2	20,4082	20,8333	20,2020	20,2020	21,0526		
	3	21,2766	20,2020	21,5054	20,4082	20,8333		
N4	1	24,3902	26,6667	25,3165	23,5294	24,3902	25,0565	0,9580
	2	25,3165	25,9740	25,6410	25,9740	23,8095		
	3	25,9740	25,0000	25,0000	29,4118	23,8095		
N5	1	25,6410	25,3165	25,0000	25,0000	24,3902	24,9038	0,8666
	2	25,0000	23,8095	25,3165	24,3902	25,9740		
	3	23,8095	23,8095	26,3158	23,8095	25,9740		
N6	1	19,6078	19,2308	-	20,4082	19,6078	19,8253	0,3890
	2	19,8020	19,4175	-	20,0000	19,8020		
	3	20,4082	20,0000	-	20,2020	19,4175		
N7	1	21,0526	20,0000	19,8020	21,7391	21,0526	20,7679	0,6827
	2	20,6186	19,8020	20,2020	21,2766	21,5054		
	3	20,8333	21,7391	21,2766	20,6186	20,0000		

Tabela A.2 – Cálculo de  $C_D$  e  $Re_p$  para a água destilada

Partícula	Vt (cm/s)	$\rho_{\text{líquido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{sólido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (Poise)	$C_D$	$Re_p$
A1	17,7693	0,997	1,437	0,0088	1,80	1974,00
A2	17,3131	0,997	1,437	0,0088	1,89	1923,32
A3	15,5041	0,997	1,437	0,0088	2,36	1722,36
A4	19,8948	0,997	1,437	0,0088	1,43	2210,12
A5	20,2616	0,997	1,437	0,0088	1,38	2250,87
B1	10,1013	0,997	1,166	0,0088	3,09	1618,43
B2	10,9071	0,997	1,166	0,0088	2,65	1747,54
B3	10,9442	0,997	1,166	0,0088	2,63	1753,48
B4	10,0835	0,997	1,166	0,0088	3,10	1615,58
B5	10,3684	0,997	1,166	0,0088	2,94	1661,22
C1	36,2625	0,997	1,700	0,0088	1,38	8056,84
C2	29,7595	0,997	1,700	0,0088	2,05	6612,00
C3	34,9091	0,997	1,700	0,0088	1,49	7756,13
C4	31,0880	0,997	1,700	0,0088	1,88	6907,16
C5	31,7566	0,997	1,700	0,0088	1,80	7055,73
D1	26,1605	0,997	1,437	0,0088	1,05	3661,57
D2	25,6195	0,997	1,437	0,0088	1,09	3585,84
D3	25,8230	0,997	1,437	0,0088	1,07	3614,32
D4	26,4906	0,997	1,437	0,0088	1,02	3707,77
D5	26,3363	0,997	1,437	0,0088	1,03	3686,16
E1	7,7295	0,997	2,440	0,0088	19,37	533,62
E2	5,3516	0,997	2,440	0,0088	40,42	369,46
E3	4,4658	0,997	2,440	0,0088	58,04	308,31
E4	6,3964	0,997	2,440	0,0088	28,29	441,58
E5	5,0833	0,997	2,440	0,0088	44,80	350,93
E6	4,7790	0,997	2,440	0,0088	50,68	329,93
E7	5,1045	0,997	2,440	0,0088	44,42	352,40
E8	6,1291	0,997	2,440	0,0088	30,81	423,14
E9	4,0593	0,997	2,440	0,0088	70,25	280,24
E10	5,8162	0,997	2,440	0,0088	34,22	401,53
F1	11,3693	0,997	1,316	0,0088	2,42	960,64
F2	11,4400	0,997	1,316	0,0088	2,39	966,62
F3	11,9901	0,997	1,316	0,0088	2,18	1013,09
F4	12,2839	0,997	1,316	0,0088	2,08	1037,92
F5	13,3803	0,997	1,316	0,0088	1,75	1130,56
G1	12,7081	0,997	1,316	0,0088	2,22	1229,15
G2	14,0616	0,997	1,316	0,0088	1,81	1360,07
G3	14,4354	0,997	1,316	0,0088	1,72	1396,22
G4	18,2744	0,997	1,316	0,0088	1,07	1767,54

Partícula	Vt (cm/s)	$\rho_{\text{líquido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{sólido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (Poise)	C <sub>D</sub>	Re <sub>p</sub>
G5	17,6373	0,997	1,316	0,0088	1,15	1705,92
I1	14,1338	0,997	1,193	0,0088	1,78	2202,45
I2	16,1148	0,997	1,193	0,0088	1,37	2511,15
I3	13,3269	0,997	1,193	0,0088	2,00	2076,71
I4	14,8335	0,997	1,193	0,0088	1,62	2311,48
I5	14,5956	0,997	1,193	0,0088	1,67	2274,41
I6	14,5226	0,997	1,193	0,0088	1,69	2263,04
I7	15,2973	0,997	1,193	0,0088	1,52	2383,75
I8	15,7078	0,997	1,193	0,0088	1,44	2447,72
I9	17,2831	0,997	1,193	0,0088	1,19	2693,19
I10	15,1060	0,997	1,193	0,0088	1,56	2353,94
J1	16,8490	0,997	1,193	0,0088	1,78	3721,57
J2	14,6391	0,997	1,193	0,0088	2,35	3233,44
J3	15,0478	0,997	1,193	0,0088	2,23	3323,72
J4	14,6635	0,997	1,193	0,0088	2,34	3238,82
J5	14,9320	0,997	1,193	0,0088	2,26	3298,14
K1	16,8877	0,997	1,193	0,0088	1,75	3700,14
K2	16,6098	0,997	1,193	0,0088	1,81	3639,23
K3	16,2152	0,997	1,193	0,0088	1,90	3552,78
K4	15,7906	0,997	1,193	0,0088	2,01	3459,75
K5	15,7979	0,997	1,193	0,0088	2,00	3461,36
L1	21,7611	0,997	1,193	0,0088	1,73	7831,61
L2	22,2024	0,997	1,193	0,0088	1,67	7990,43
L3	21,6883	0,997	1,193	0,0088	1,75	7805,42
L4	21,6153	0,997	1,193	0,0088	1,76	7779,12
L5	20,8056	0,997	1,193	0,0088	1,90	7487,72
M1	14,2926	0,997	1,880	0,0088	2,23	635,11
M2	14,6814	0,997	1,880	0,0088	2,12	652,39
M3	15,1308	0,997	1,880	0,0088	1,99	672,36
M4	14,5346	0,997	1,880	0,0088	2,16	645,86
M5	16,9955	0,997	1,880	0,0088	1,58	755,22
N1	23,4348	0,997	1,880	0,0088	1,66	2082,71
N2	20,9705	0,997	1,880	0,0088	2,07	1863,70
N3	20,6576	0,997	1,880	0,0088	2,14	1835,89
N4	25,0565	0,997	1,880	0,0088	1,45	2226,84
N5	24,9038	0,997	1,880	0,0088	1,47	2213,26
N6	19,8253	0,997	1,880	0,0088	2,32	1761,92
N7	20,7679	0,997	1,880	0,0088	2,11	1845,69

**APÊNDICE B – DADOS PARA ENSAIOS COM SOLUÇÃO  
DE GLICERINA**

**Tabela B.1 – Velocidades Terminais para os ensaios com solução de glicerina**

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
A1	1	13,6054	13,6986	13,6054	13,5135	13,7931	13,5274	0,1577
	2	13,6986	13,6054	13,6054	13,3333	13,3333		
	3	13,3333	13,3333	13,3333	13,6054	13,5135		
A2	1	13,1579	13,3333	13,1579	13,6054	13,9860	13,2538	0,3536
	2	12,5000	12,9870	13,3333	13,3333	13,3333		
	3	12,9870	12,9032	13,1579	13,6986	13,3333		
A3	1	12,2699	12,5000	12,2699	11,9760	12,0482	12,1805	0,2599
	2	12,5786	12,2699	11,9760	11,7647	11,9760		
	3	12,5000	12,1212	11,7647	12,2699	12,4224		
A4	1	15,2672	14,2857	14,8148	14,9254	14,8148	14,7447	0,3944
	2	15,3846	14,5985	14,7059	14,7059	15,0376		
	3	15,1515	13,8889	14,2857	14,5985	14,7059		
A5	1	15,7480	14,9254	14,3885	14,3885	14,2857	14,8795	0,6752
	2	15,8730	14,9254	14,0845	14,5985	15,0376		
	3	16,2602	14,5985	13,8889	15,1515	15,0376		
C1	1	29,4118	27,7778	27,7778	28,1690	29,4118	28,1701	0,9368
	2	28,9855	28,5714	26,3158	27,7778	28,9855		
	3	28,5714	31,7460	27,0270	27,0270	28,5714		
C2	1	24,3902	24,0964	25,6410	25,3165	25,6410	24,7065	0,6357
	2	23,8095	24,6914	24,6914	25,0000	25,0000		
	3	24,0964	24,0964	24,0964	24,3902	25,6410		
C3	1	29,8507	30,3030	29,4118	30,3030	29,8507	29,6998	0,9193
	2	29,8507	29,4118	28,5714	28,5714	30,7692		
	3	30,3030	29,4118	28,5714	28,5714	31,7460		
C4	1	25,0000	25,3165	25,9740	27,7778	26,6667	26,2010	1,1412
	2	25,0000	26,3158	25,0000	28,1690	27,0270		
	3	25,0000	25,0000	25,9740	27,3973	27,3973		
C5	1	26,6667	26,3158	25,6410	25,9740	28,5714	26,2001	0,4579
	2	27,0270	26,6667	25,9740	25,3165	26,3158		
	3	26,3158	25,9740	26,6667	25,9740	25,9740		
D1	1	21,2766	20,0000	20,0000	19,8020	19,0476	19,9081	0,5557
	2	19,6078	20,0000	20,6186	20,0000	19,4175		
	3	19,6078	19,4175	19,4175	20,4082	20,0000		
D2	1	20,6186	20,2020	21,9780	25,0000	21,7391	20,9502	0,9516
	2	21,9780	19,8020	21,5054	22,9885	20,2020		
	3	20,4082	19,8020	21,0526	20,6186	20,4082		
D3	1	20,6186	19,0476	22,2222	20,0000	20,6186	20,4370	1,1236
	2	20,0000	19,6078	22,2222	21,0526	20,6186		
	3	18,8679	19,2308	20,6186	22,2222	19,6078		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
D4	1	22,2222	20,6186	20,6186	22,2222	21,0526	21,1778	0,9188
	2	23,2558	20,2020	20,8333	20,6186	20,6186		
	3	20,8333	19,8020	21,9780	21,0526	21,7391		
D5	1	20,0000	-	20,6186	20,2020	22,2222	19,9202	0,4872
	2	19,4175	-	20,0000	19,4175	20,8333		
	3	19,6078	-	19,6078	19,4175	20,0000		
E1	1	4,5455	-	-	5,0000	-	-	-
	2	-	-	-	-	-		
	3	-	-	-	-	-		
E2	1	3,5088	-	3,9216	4,2553	4,2827	3,9545	0,2086
	2	3,8462	-	3,7453	3,9448	4,0816		
	3	4,0241	-	3,9216	3,9216	4,0000		
E3	1	3,2415	3,4130	3,3727	4,1322	4,0816	3,6852	0,2573
	2	3,5907	3,5524	3,4662	3,8986	3,7951		
	3	3,7736	3,7244	3,5651	3,8241	3,8462		
E4	1	4,6838	4,7170	5,0891	5,4201	6,5147	5,2820	0,5160
	2	4,9505	5,0505	4,8780	5,1414	6,1350		
	3	5,1680	5,2219	5,0761	5,3191	5,8651		
E5	1	3,3557	3,4247	3,6101	3,7037	4,6189	3,7152	0,2162
	2	3,7037	3,5907	3,5907	3,5842	4,1929		
	3	3,9448	3,8241	3,8241	3,7951	3,8685		
E6	1	2,9985	3,1250	3,1250	3,3333	3,8462	3,2677	0,1389
	2	3,3557	3,2787	3,2415	3,2787	3,4483		
	3	-	3,4483	-	3,3898	3,1898		
E7	1	4,0241	4,1152	4,4444	5,0891	5,2356	4,5868	0,3653
	2	4,4150	4,2194	4,3197	4,7281	5,0761		
	3	4,7281	4,3478	4,5767	4,6512	4,8309		
E8	1	3,3727	3,6232	3,6101	4,1322	4,6512	3,9514	0,3074
	2	3,7951	3,8241	3,8168	3,8911	4,2827		
	3	4,0241	3,9920	4,1152	4,0080	4,1322		
E9	1	2,7548	2,8818	3,1104	3,3727	3,6430	3,2266	0,2207
	2	3,1104	3,0769	3,1546	3,2787	3,3501		
	3	3,3670	3,2258	3,3333	3,3898	3,3501		
E10	1	4,6512	4,8426	5,0378	5,7143	5,6497	5,1750	0,3152
	2	5,0000	4,8780	4,9628	5,4054	5,4945		
	3	5,1680	5,0000	5,0891	5,2219	5,5096		
F1	1	7,6923	7,9365	8,0645	8,2988	8,4746	7,8655	0,3227
	2	7,4906	7,6628	7,7220	7,8431	8,2645		
	3	7,4349	7,6923	7,5758	7,6336	8,1967		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
F2	1	7,4074	7,5188	7,6046	8,0000	8,1967	7,5848	0,3022
	2	7,2202	7,4074	7,3801	7,7821	8,0000		
	3	7,2993	7,2993	7,3529	7,4906	7,8125		
F3	1	7,3260	7,3260	7,6046	7,8740	8,8106	7,7348	0,4877
	2	7,4349	7,3260	7,6336	7,6923	8,6957		
	3	7,4906	7,5758	7,4074	7,4906	8,3333		
F4	1	8,0972	8,2305	7,5758	7,4906	8,0972	7,7683	0,2943
	2	8,0000	8,0000	7,3801	7,5472	7,7519		
	3	8,0645	7,8125	7,3260	7,5472	7,6046		
F5	1	8,4034	8,6580	8,9286	9,2166	9,2166	8,7309	0,3070
	2	8,3333	8,6957	8,6580	8,9286	9,0909		
	3	8,3333	8,5106	8,5470	8,4746	8,9686		
G1	1	8,8106	8,8106	9,4340	10,0000	9,2166	9,1126	0,1965
	2	8,8889	9,0909	9,1743	9,4340	9,0909		
	3	9,0498	9,2166	9,0909	9,2593	9,0090		
G2	1	10,6383	10,5820	10,8108	11,8343	11,1111	10,7426	0,2741
	2	10,4167	10,4712	11,1732	11,1732	10,8696		
	3	10,3627	10,5820	10,5820	10,6952	10,9290		
G3	1	9,9502	10,4167	10,1523	10,6383	10,9290	10,3162	0,2787
	2	10,1523	10,3627	10,1010	10,4712	10,5820		
	3	10,1523	10,2041	9,8522	10,4167	10,3627		
G4	1	10,6952	10,8696	11,4286	11,9048	11,8343	10,9986	0,5101
	2	10,4167	10,6383	10,9290	11,3636	11,5607		
	3	10,3627	10,3627	10,7527	11,0497	10,8108		
G5	1	10,3627	10,4167	11,1111	11,6279	10,9890	10,6015	0,4305
	2	10,1523	10,3093	10,5263	11,0497	10,6952		
	3	10,1523	10,1523	10,2564	10,6952	10,5263		
I1	1	4,2553	4,2373	4,8426	5,0378	5,3619	4,4174	0,4561
	2	4,0000	3,9216	4,3197	4,5147	4,9505		
	3	3,9448	3,8610	4,1667	4,2283	4,6189		
I2	1	6,1162	5,3908	5,8309	6,1162	6,2500	5,4985	0,4347
	2	5,2632	5,0891	5,2632	5,4945	5,8824		
	3	5,0378	4,9383	5,0891	5,2219	5,4945		
I3	1	4,9628	5,3050	5,5556	5,8824	6,0060	5,2087	0,4387
	2	4,6948	4,8426	5,0761	5,4054	5,6818		
	3	4,6512	4,6948	4,8780	5,0891	5,4054		
I4	1	5,0505	5,3050	5,5096	6,0423	6,1728	5,2883	0,4798
	2	4,7847	4,8662	5,0378	5,5096	5,9347		
	3	4,7847	4,7281	4,9140	5,1282	5,5556		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
I5	1	4,6404	4,9628	4,9140	5,4348	5,8309	4,8179	0,4638
	2	4,3384	4,5455	4,5455	4,9505	5,4054		
	3	4,3573	4,3103	4,3478	4,6083	5,0761		
I6	1	4,7962	5,0000	5,4054	5,5096	5,9347	4,9801	0,4633
	2	4,4743	4,6083	4,7962	5,0378	5,5556		
	3	4,4150	4,4444	4,6189	4,8426	5,2632		
I7	1	5,0000	5,2632	5,4945	5,8140	6,1162	5,2377	0,4362
	2	4,6512	4,9261	5,1282	5,3619	5,7637		
	3	4,6512	4,7962	5,0000	5,0891	5,5096		
I8	1	4,5872	4,8426	5,1282	5,6022	5,8309	4,8229	0,4980
	2	4,3478	4,4444	4,5767	4,8780	5,4496		
	3	4,2827	4,2918	4,4053	4,5872	5,0891		
I9	1	5,6022	5,6657	6,0606	6,1162	6,3291	5,6082	0,4098
	2	5,2770	5,3191	5,5096	-	6,1162		
	3	5,0891	5,1282	5,3191	-	5,8824		
I10	1	-	5,3476	6,1920	5,9701	5,7143	5,3775	0,6879
	2	-	4,7619	5,8140	5,3476	-		
	3	-	4,3860	5,7637	-	-		
J1	1	6,0606	6,7114	7,2464	7,6923	7,6046	6,7251	0,6161
	2	5,7637	6,4103	6,6225	7,2202	7,0423		
	3	5,6497	6,3694	6,5147	6,8259	7,1429		
J2	1	5,5096	6,3091	6,5574	7,0423	6,8027	6,0871	0,5373
	2	5,2219	5,8140	6,0606	6,3291	6,5359		
	3	5,2493	5,6980	5,8651	6,0606	6,2500		
J3	1	5,1282	6,1728	6,2893	7,1942	7,4074	6,0629	0,7804
	2	4,8077	5,8824	5,7803	6,5789	6,8259		
	3	4,8077	5,7637	5,6657	6,2500	6,3898		
J4	1	5,7803	6,3898	6,6667	7,4074	6,6667	6,2453	0,4812
	2	5,7143	6,0606	6,1162	6,7568	6,3898		
	3	5,6497	5,8309	5,9347	6,3091	6,0060		
J5	1	-	6,1920	6,6225	7,0671	7,4627	6,4049	0,5209
	2	-	5,8824	6,0606	6,5147	6,8027		
	3	-	5,7971	5,8824	6,0606	6,5147		
K1	1	5,4795	6,0060	6,3898	6,3898	5,7637	5,6716	0,4691
	2	4,9751	5,5556	5,7143	6,1162	5,4945		
	3	5,1414	-	5,4795	5,9347	5,1813		
K2	1	5,6497	6,0606	6,3492	7,0671	5,7971	5,7165	0,3424
	2	5,2219	5,7143	5,8824	6,3091	5,5096		
	3	5,4054	5,5556	5,4795	5,7637	5,3333		



Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
K3	1	5,7637	5,9347	6,6007	6,8259	5,9347	5,8804	0,5368
	2	5,3619	5,6657	6,2696	6,8027	5,5556		
	3	5,1680	5,4054	5,5556	6,0423	5,3191		
K4	1	5,4945	5,8140	6,3291	6,0423	5,6022	5,4149	0,2219
	2	5,2219	5,4645	5,6497	-	5,3050		
	3	5,0891	5,2219	5,4795	-	5,2219		
K5	1	5,1151	5,6657	5,9524	6,5359	5,4496	5,3237	0,5034
	2	4,8780	5,2632	5,4054	5,8824	5,0761		
	3	4,7619	5,0378	-	5,3050	4,9140		
L1	1	7,8125	9,3897	10,3093	8,1967	8,8889	8,4495	0,7562
	2	7,6923	8,2305	9,3897	7,9051	8,4388		
	3	7,7821	8,0000	8,7336	8,1301	7,8431		
L2	1	8,4034	7,4074	8,9286	8,5837	9,0909	7,9424	0,7414
	2	7,4627	6,8966	8,2988	7,8740	8,8496		
	3	7,2202	6,9686	7,5188	7,2993	8,3333		
L3	1	7,9051	9,5238	8,4746	8,8496	10,1010	8,2139	0,9875
	2	7,3260	8,0000	7,2993	7,9051	9,8522		
	3	7,4906	7,6046	6,9930	7,2993	8,5837		
L4	1	7,4349	8,2305	8,8106	8,6957	8,6957	7,8013	0,5947
	2	6,9930	7,4074	8,0000	8,0000	7,6923		
	3	6,9686	7,5758	7,2464	7,5758	7,6923		
L5	1	-	8,0000	9,0498	8,2305	9,0909	8,3448	0,5324
	2	-	7,6046	8,3333	8,7719	8,8496		
	3	-	7,4074	8,1301	8,4388	8,2305		
M1	1	10,6952	10,8696	10,9290	10,8696	11,1111	10,5313	0,4218
	2	10,0000	10,1523	10,5263	10,5263	11,0497		
	3	9,8522	9,8039	10,5263	10,3627	10,6952		
M2	1	10,5263	10,8696	11,1111	11,1111	10,7527	10,6269	0,2911
	2	10,3627	10,5263	10,6952	10,8696	10,6952		
	3	10,1523	10,2041	10,3627	10,5263	10,6383		
M3	1	11,3636	11,7647	11,7647	12,1951	11,9760	11,4745	0,3692
	2	11,0497	11,3636	11,4286	11,6279	11,7647		
	3	10,8696	11,1111	11,1111	11,3636	11,3636		
M4	1	11,2360	11,1111	11,2994	11,3636	11,3636	10,9881	0,2872
	2	10,7527	10,8696	10,9290	10,9890	11,1732		
	3	10,3627	11,1111	10,6952	10,6952	10,8696		
M5	1	11,5607	12,0482	12,1951	12,5000	11,5607	11,6900	0,3970
	2	11,4943	11,5607	11,7647	12,2699	11,4286		
	3	11,1111	11,2994	11,4286	11,7647	11,3636		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
N1	1	19,4175	20,0000	20,0000	19,6078	20,0000	19,7421	0,3302
	2	20,0000	20,0000	19,6078	19,8020	20,0000		
	3	20,0000	20,0000	19,0476	19,4175	19,2308		
N2	1	17,6991	18,0180	18,1818	19,4175	18,6916	18,1159	0,6565
	2	17,2414	18,0180	18,0180	19,2308	18,1818		
	3	17,0940	17,8571	17,6991	18,6916	17,6991		
N3	1	18,1818	18,1818	18,6916	22,2222	19,2308	19,0582	1,4552
	2	18,1818	18,1818	18,3486	21,5054	19,2308		
	3	18,1818	17,6991	18,1818	21,5054	18,3486		
N4	1	20,8333	19,6078	19,8020	20,6186	20,0000	19,9695	0,8956
	2	21,0526	19,0476	19,4175	20,0000	19,6078		
	3	22,2222	19,0476	18,8679	20,0000	19,4175		
N5	1	20,0000	19,8020	20,2020	17,5439	20,0000	19,2669	0,9706
	2	19,4175	19,4175	19,6078	17,6991	20,0000		
	3	19,4175	19,6078	19,0476	17,2414	20,0000		
N6	1	17,2414	17,6991	17,8571	18,8679	18,1818	17,9449	0,5052
	2	17,5439	17,5439	17,6991	18,1818	18,8679		
	3	17,6991	17,6991	17,3913	18,5185	18,1818		
N7	1	18,1818	18,1818	18,1818	18,1818	17,8571	18,0318	0,2044
	2	18,1818	18,0180	18,1818	17,6991	17,6991		
	3	18,0180	18,1818	18,1818	17,2414	17,6991		

Tabela B.2 – Cálculo de  $C_D$  e  $Re_p$  para a solução de glicerina

Partícula	Vt (cm/s)	$\rho_{\text{líquido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{sólido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (Poise)	$C_D$	$Re_p$
A1	13,5274	1,148	1,437	0,0850	1,77	179,87
A2	13,2538	1,148	1,437	0,0850	1,85	176,23
A3	12,1805	1,148	1,437	0,0850	2,19	161,96
A4	14,7447	1,148	1,437	0,0850	1,49	196,05
A5	14,8795	1,148	1,437	0,0850	1,46	197,84
C1	28,1701	1,148	1,700	0,0850	1,56	749,13
C2	24,7065	1,148	1,700	0,0850	2,03	657,02
C3	29,6998	1,148	1,700	0,0850	1,40	789,81
C4	26,2010	1,148	1,700	0,0850	1,80	696,76
C5	26,2001	1,148	1,700	0,0850	1,80	696,74
D1	19,9081	1,148	1,437	0,0850	1,03	333,51
D2	20,9502	1,148	1,437	0,0850	0,93	350,97
D3	20,4370	1,148	1,437	0,0850	0,98	342,37
D4	21,1778	1,148	1,437	0,0850	0,91	354,78
D5	19,9202	1,148	1,437	0,0850	1,03	333,71
E1	-	1,148	2,440	0,0850	-	-
E2	3,9545	1,148	2,440	0,0850	57,58	32,68
E3	3,6852	1,148	2,440	0,0850	66,31	30,45
E4	5,2820	1,148	2,440	0,0850	32,28	43,65
E5	3,7152	1,148	2,440	0,0850	65,24	30,70
E6	3,2677	1,148	2,440	0,0850	84,33	27,00
E7	4,5868	1,148	2,440	0,0850	42,80	37,90
E8	3,9514	1,148	2,440	0,0850	57,67	32,65
E9	3,2266	1,148	2,440	0,0850	86,49	26,66
E10	5,1750	1,148	2,440	0,0850	33,62	42,76
F1	7,8655	1,148	1,316	0,0850	2,32	79,55
F2	7,5848	1,148	1,316	0,0850	2,50	76,71
F3	7,7348	1,148	1,316	0,0850	2,40	78,22
F4	7,7683	1,148	1,316	0,0850	2,38	78,56
F5	8,7309	1,148	1,316	0,0850	1,88	88,30
G1	9,1126	1,148	1,316	0,0850	1,98	105,49
G2	10,7426	1,148	1,316	0,0850	1,42	124,36
G3	10,3162	1,148	1,316	0,0850	1,54	119,43
G4	10,9986	1,148	1,316	0,0850	1,36	127,33
G5	10,6015	1,148	1,316	0,0850	1,46	122,73
I1	4,4174	1,148	1,193	0,0850	3,68	82,39
I2	5,4985	1,148	1,193	0,0850	2,38	102,55
I3	5,2087	1,148	1,193	0,0850	2,65	97,15
I4	5,2883	1,148	1,193	0,0850	2,57	98,63

Partícula	Vt (cm/s)	$\rho_{\text{líquido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{sólido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (Poise)	C <sub>D</sub>	Re <sub>p</sub>
I5	4,8179	1,148	1,193	0,0850	3,10	89,86
I6	4,9801	1,148	1,193	0,0850	2,90	92,89
I7	5,2377	1,148	1,193	0,0850	2,62	97,69
I8	4,8229	1,148	1,193	0,0850	3,09	89,95
I9	5,6082	1,148	1,193	0,0850	2,29	104,60
I10	5,3775	1,148	1,193	0,0850	2,49	100,30
J1	6,7251	1,148	1,193	0,0850	2,25	177,79
J2	6,0871	1,148	1,193	0,0850	2,75	160,92
J3	6,0629	1,148	1,193	0,0850	2,77	160,29
J4	6,2453	1,148	1,193	0,0850	2,61	165,11
J5	6,4049	1,148	1,193	0,0850	2,48	169,33
K1	5,6716	1,148	1,193	0,0850	3,14	148,74
K2	5,7165	1,148	1,193	0,0850	3,09	149,91
K3	5,8804	1,148	1,193	0,0850	2,92	154,21
K4	5,4149	1,148	1,193	0,0850	3,45	142,00
K5	5,3237	1,148	1,193	0,0850	3,57	139,61
L1	8,4495	1,148	1,193	0,0850	2,33	363,97
L2	7,9424	1,148	1,193	0,0850	2,63	342,12
L3	8,2139	1,148	1,193	0,0850	2,46	353,82
L4	7,8013	1,148	1,193	0,0850	2,73	336,04
L5	8,3448	1,148	1,193	0,0850	2,38	359,46
M1	10,5313	1,148	1,880	0,0850	2,96	56,01
M2	10,6269	1,148	1,880	0,0850	2,91	56,52
M3	11,4745	1,148	1,880	0,0850	2,49	61,03
M4	10,9881	1,148	1,880	0,0850	2,72	58,44
M5	11,6900	1,148	1,880	0,0850	2,40	62,17
N1	19,7421	1,148	1,880	0,0850	1,69	210,00
N2	18,1159	1,148	1,880	0,0850	2,00	192,70
N3	19,0582	1,148	1,880	0,0850	1,81	202,73
N4	19,9695	1,148	1,880	0,0850	1,65	212,42
N5	19,2669	1,148	1,880	0,0850	1,77	204,95
N6	17,9449	1,148	1,880	0,0850	2,04	190,88
N7	18,0318	1,148	1,880	0,0850	2,02	191,81

**APÊNDICE C – DADOS PARA ENSAIOS COM ÓLEO  
MINERAL**

**Tabela C.1 – Velocidades Terminais para os ensaios com óleo mineral**

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
A1	1	24,6914	24,3902	23,2558	23,2558	23,2558	24,4341	0,7934
	2	24,6914	24,0964	24,0964	24,6914	24,6914		
	3	24,3902	25,6410	24,3902	25,9740	25,0000		
A2	1	24,3902	25,0000	22,7273	24,6914	25,0000	24,6350	0,8010
	2	24,0964	25,0000	23,8095	24,0964	25,0000		
	3	24,3902	25,0000	24,6914	25,3165	26,3158		
A3	1	20,8333	22,4719	22,2222	22,2222	22,4719	22,0239	0,8129
	2	20,6186	22,7273	22,2222	21,5054	22,2222		
	3	20,6186	22,9885	22,9885	22,2222	-		
A4	1	25,9740	27,0270	23,5294	25,9740	25,0000	25,9049	1,3415
	2	25,3165	25,9740	23,8095	27,3973	26,6667		
	3	25,6410	25,9740	24,6914	28,5714	27,0270		
A5	1	27,3973	27,0270	27,7778	25,0000	24,6914	26,2923	1,9415
	2	27,3973	27,3973	28,9855	24,0964	23,5294		
	3	27,7778	27,3973	28,5714	23,5294	23,8095		
C1	1	43,4783	40,0000	42,5532	40,0000	42,5532	42,1366	1,6442
	2	42,5532	43,4783	43,4783	40,0000	40,0000		
	3	44,4444	42,5532	40,0000	43,4783	43,4783		
C2	1	39,2157	38,4615	35,7143	37,0370	37,7358	37,4336	1,0325
	2	37,7358	38,4615	37,0370	37,0370	37,7358		
	3	37,7358	37,7358	35,0877	37,7358	37,0370		
C3	1	48,7805	45,4545	41,6667	42,5532	44,4444	44,1611	2,2978
	2	46,5116	43,4783	41,6667	41,6667	43,4783		
	3	47,6190	46,5116	42,5532	43,4783	42,5532		
C4	1	44,4444	40,0000	47,6190	40,0000	43,4783	40,3704	1,9188
	2	41,6667	39,2157	40,0000	40,0000	41,6667		
	3	40,0000	39,2157	37,0370	38,4615	40,0000		
C5	1	41,6667	36,3636	40,0000	42,5532	40,0000	39,1419	2,3081
	2	38,4615	35,0877	38,4615	42,5532	39,2157		
	3	39,2157	35,0877	38,4615	40,0000	40,0000		
D1	1	33,8983	33,3333	33,3333	33,3333	33,3333	33,8292	1,3053
	2	35,0877	34,4828	33,8983	32,7869	35,7143		
	3	37,0370	32,7869	31,7460	33,3333	33,3333		
D2	1	37,7358	42,5532	43,4783	35,0877	40,0000	39,1455	3,4528
	2	36,3636	43,4783	42,5532	33,8983	38,4615		
	3	35,7143	42,5532	42,5532	35,7143	37,0370		
D3	1	35,7143	35,7143	34,4828	35,0877	33,3333	35,5050	1,2907
	2	36,3636	35,0877	37,0370	35,0877	33,3333		
	3	37,7358	35,7143	37,0370	36,3636	34,4828		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
D4	1	35,7143	35,7143	34,4828	33,8983	33,8983	34,6539	0,6660
	2	35,0877	34,4828	34,4828	33,8983	34,4828		
	3	34,4828	35,0877	34,4828	33,8983	35,7143		
D5	1	35,7143	33,3333	37,0370	32,7869	33,3333	34,6773	2,1037
	2	33,3333	35,0877	37,7358	33,8983	34,4828		
	3	31,7460	35,7143	39,2157	32,2581	34,4828		
E1	1	6,8966	7,0423	6,7568	6,8027	7,1429	7,0004	0,1771
	2	7,1174	7,2464	6,7340	6,8966	7,2202		
	3	6,9686	7,2464	6,8966	6,8966	7,1429		
E2	1	5,8824	5,9880	6,0606	6,0606	6,0060	5,9711	0,0769
	2	5,8824	6,0060	6,0606	6,0060	6,0060		
	3	5,8824	6,0060	6,0060	5,8824	5,8309		
E3	1	7,2993	5,8309	5,9524	5,8824	5,8824	6,1892	0,6659
	2	7,5758	5,8309	5,9524	5,7803	5,8309		
	3	7,5188	5,8824	5,9524	5,9524	5,7143		
E4	1	7,7821	8,1301	7,9681	8,0972	8,1967	8,0288	0,1631
	2	7,9051	8,3333	7,9051	8,0321	8,1633		
	3	7,6923	8,0972	8,0321	8,0972	8,0000		
E5	1	5,8824	5,9347	6,2500	6,3091	6,2893	6,1401	0,1825
	2	5,8824	6,0060	6,1920	6,3694	6,2500		
	3	5,8824	6,0060	6,1920	6,3898	6,2112		
E6	1	5,4054	5,3619	5,2632	5,4496	5,3476	5,3837	0,0574
	2	5,4054	5,3050	5,3476	5,4645	5,3619		
	3	5,4054	5,3476	5,4054	5,4201	5,4645		
E7	1	6,5147	6,6007	6,3694	6,3898	6,6007	6,4854	0,1474
	2	6,3898	6,5147	6,3091	6,3898	6,7114		
	3	6,4103	6,5789	6,3291	6,3694	6,8027		
E8	1	6,2305	6,3898	6,0060	6,3694	6,2500	6,2352	0,1493
	2	6,2500	6,3898	5,9347	6,3091	6,2500		
	3	6,3898	6,3091	6,0060	6,1350	6,3091		
E9	1	5,1813	5,4645	5,2632	5,3619	5,4496	5,3791	0,1247
	2	5,2219	5,5096	5,2632	5,4945	5,4496		
	3	5,3476	5,4054	5,2083	5,5096	5,5556		
E10	1	5,4054	7,4906	7,3260	15,0376	7,4906	6,9764	0,9737
	2	5,4054	7,5758	7,2993	7,7821	7,5758		
	3	5,3050	7,6046	7,5758	8,0972	7,6628		
F1	1	16,1290	16,2602	15,7480	16,2602	16,2602	16,2049	0,3285
	2	16,6667	15,8730	16,1290	15,7480	16,5289		
	3	16,6667	15,7480	16,6667	16,1290	16,2602		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
F2	1	15,3846	15,3846	15,5039	15,3846	15,5039	15,4880	0,3702
	2	15,5039	15,0376	15,3846	15,0376	16,1290		
	3	15,7480	14,9254	15,7480	15,3846	16,2602		
F3	1	15,5039	15,3846	15,7480	16,2602	15,8730	15,6335	0,3776
	2	15,3846	15,1515	16,1290	15,3846	15,7480		
	3	15,5039	15,0376	16,2602	15,3846	15,7480		
F4	1	16,6667	15,7480	16,1290	15,3846	16,6667	16,2055	0,5163
	2	16,6667	15,8730	16,6667	15,3846	16,8067		
	3	16,6667	15,7480	16,2602	15,7480	16,6667		
F5	1	17,6991	17,0940	17,0940	17,2414	16,9492	17,0804	0,3277
	2	17,0940	16,8067	16,8067	17,2414	16,9492		
	3	16,6667	16,5289	17,2414	17,0940	17,6991		
G1	1	18,1818	19,2308	18,1818	19,2308	18,8679	18,8552	0,4686
	2	18,6916	18,8679	18,1818	19,2308	19,4175		
	3	19,4175	18,8679	18,1818	19,0476	19,2308		
G2	1	21,2766	22,2222	20,0000	21,2766	20,2020	21,2113	0,7495
	2	21,7391	21,7391	20,8333	21,2766	20,2020		
	3	22,2222	22,2222	21,5054	20,8333	20,6186		
G3	1	20,0000	19,0476	18,8679	20,4082	20,8333	19,7125	0,7642
	2	19,6078	19,0476	19,0476	20,0000	20,8333		
	3	18,8679	18,8679	19,2308	20,4082	20,6186		
G4	1	21,5054	20,4082	21,2766	21,5054	21,0526	21,3844	0,6301
	2	22,9885	20,6186	21,7391	21,5054	21,2766		
	3	22,2222	20,8333	21,5054	21,2766	21,0526		
G5	1	20,8333	21,2766	20,6186	21,2766	21,5054	21,1984	0,5223
	2	20,2020	21,2766	21,0526	21,0526	21,9780		
	3	20,6186	21,0526	21,5054	21,5054	22,2222		
I1	1	22,2222	21,0526	21,5054	22,4719	21,9780	22,4466	1,1977
	2	23,8095	20,6186	22,2222	23,8095	21,5054		
	3	24,0964	22,2222	22,9885	24,6914	21,5054		
I2	1	22,2222	25,9740	22,2222	22,4719	22,2222	23,2897	1,5190
	2	21,5054	25,0000	22,9885	23,8095	22,2222		
	3	22,2222	26,3158	23,2558	24,6914	22,2222		
I3	1	22,9885	22,2222	20,6186	20,0000	22,2222	21,7281	1,2502
	2	23,8095	21,9780	21,2766	20,0000	23,2558		
	3	22,9885	20,8333	21,5054	20,0000	22,2222		
I4	1	20,0000	22,9885	23,8095	21,5054	20,8333	21,7688	1,3366
	2	20,2020	22,2222	22,9885	22,2222	20,0000		
	3	20,6186	23,2558	23,2558	22,2222	20,4082		



Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
I5	1	22,2222	24,0964	23,2558	22,9885	22,9885	23,3836	0,8873
	2	21,9780	23,8095	22,9885	22,9885	25,0000		
	3	20,0000	23,8095	22,9885	23,2558	25,0000		
I6	1	24,0964	20,6186	21,5054	23,8095	21,2766	21,8490	1,3622
	2	23,2558	20,8333	20,6186	22,2222	20,0000		
	3	22,9885	21,9780	21,2766	23,2558	20,0000		
I7	1	21,5054	22,9885	23,8095	21,0526	24,0964	23,4388	1,1649
	2	22,4719	24,0964	24,3902	22,2222	25,0000		
	3	24,0964	24,0964	24,6914	23,2558	23,8095		
I8	1	22,9885	22,9885	22,2222	23,8095	22,2222	22,7003	0,9889
	2	22,9885	22,9885	23,8095	20,6186	22,2222		
	3	23,2558	22,4719	24,0964	20,8333	22,9885		
I9	1	24,6914	21,2766	21,5054	22,2222	21,0526	21,8968	1,2245
	2	22,7273	22,2222	21,2766	21,5054	20,0000		
	3	21,5054	22,2222	22,9885	23,2558	20,0000		
I10	1	19,2308	20,0000	20,6186	21,5054	20,0000	20,8478	0,7980
	2	20,0000	21,5054	20,6186	21,2766	20,6186		
	3	20,8333	21,2766	21,5054	21,5054	22,2222		
J1	1	25,9740	24,0964	25,0000	25,9740	25,3165	25,2206	0,5333
	2	25,9740	25,0000	25,0000	25,9740	25,0000		
	3	25,0000	25,0000	25,0000	25,0000	25,0000		
J2	1	25,9740	27,3973	25,9740	24,6914	22,9885	24,9438	1,6993
	2	25,0000	27,3973	25,9740	25,0000	22,2222		
	3	24,0964	27,0270	24,0964	24,0964	22,2222		
J3	1	26,6667	22,2222	25,0000	23,8095	22,9885	22,7274	1,6248
	2	23,5294	22,7273	23,2558	20,8333	22,9885		
	3	21,7391	21,5054	20,8333	20,8333	21,9780		
J4	1	22,9885	25,9740	22,9885	25,0000	22,4719	22,9385	0,5192
	2	22,2222	23,8095	22,4719	23,8095	23,2558		
	3	22,9885	22,2222	23,2558	22,9885	22,7273		
J5	1	25,0000	25,0000	26,6667	25,3165	25,0000	23,9588	1,3783
	2	24,3902	23,2558	25,0000	23,5294	22,9885		
	3	24,0964	22,2222	22,4719	22,2222	22,2222		
K1	1	22,9885	24,0964	24,0964	23,8095	22,4719	23,4181	0,9336
	2	23,8095	23,8095	24,0964	22,2222	22,4719		
	3	23,8095	25,0000	22,9885	21,5054	24,0964		
K2	1	22,9885	24,0964	25,0000	26,3158	23,8095	23,8984	1,1536
	2	22,9885	22,2222	25,0000	25,0000	22,4719		
	3	23,2558	23,8095	25,0000	22,9885	23,5294		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
K3	1	23,2558	25,9740	24,0964	24,0964	22,9885	23,9693	1,3144
	2	25,0000	24,3902	22,9885	24,0964	22,2222		
	3	27,0270	24,0964	22,2222	24,0964	22,9885		
K4	1	22,9885	22,2222	23,2558	22,7273	22,4719	23,0644	1,2227
	2	22,2222	23,8095	22,9885	25,3165	21,7391		
	3	22,9885	24,0964	21,2766	25,6410	22,2222		
K5	1	21,5054	23,2558	22,7273	22,7273	21,7391	21,8574	0,7428
	2	22,2222	21,5054	21,2766	22,4719	20,6186		
	3	21,5054	21,2766	21,5054	22,4719	21,0526		
L1	1	35,7143	35,0877	35,7143	35,0877	33,3333	33,0051	1,9632
	2	32,7869	33,3333	34,4828	30,3030	33,3333		
	3	31,2500	31,7460	31,7460	29,4118	31,7460		
L2	1	31,2500	33,3333	33,3333	32,7869	31,7460	32,6004	0,9688
	2	31,2500	33,3333	33,3333	33,3333	31,7460		
	3	31,7460	33,3333	33,3333	33,8983	31,2500		
L3	1	29,8507	29,8507	31,7460	30,7692	30,3030	30,4276	1,0224
	2	28,5714	30,3030	31,2500	30,3030	31,7460		
	3	28,5714	29,8507	30,3030	31,2500	31,7460		
L4	1	35,0877	33,3333	33,3333	32,2581	31,7460	33,2853	0,9653
	2	32,2581	33,3333	33,8983	32,2581	33,8983		
	3	33,3333	33,3333	33,3333	32,7869	35,0877		
L5	1	36,3636	33,8983	31,7460	32,7869	36,3636	32,6783	1,9429
	2	33,3333	31,2500	31,2500	32,7869	33,8983		
	3	30,3030	29,8507	30,7692	32,7869	32,7869		
M1	1	13,5135	12,9870	12,5000	13,0719	12,9032	12,9767	0,3027
	2	13,3333	13,3333	12,7389	12,7389	12,5786		
	3	13,1579	13,2450	13,0719	12,7389	12,7389		
M2	1	13,5135	13,5135	12,9870	13,0719	14,2857	13,5024	0,5305
	2	13,3333	13,8889	13,0719	12,8205	14,2857		
	3	13,7931	13,7931	12,8205	13,0719	14,2857		
M3	1	14,4928	14,1844	14,1844	13,7931	14,5985	14,1738	0,2085
	2	14,0845	14,0845	13,9860	13,9860	14,3885		
	3	14,0845	14,2857	14,0845	14,0845	14,2857		
M4	1	13,6054	13,6986	13,6986	12,8205	13,1579	13,4643	0,2751
	2	13,6986	13,7931	13,5135	13,2450	13,2450		
	3	13,6986	13,6054	13,3333	13,6054	13,2450		
M5	1	14,5985	14,1844	14,7059	14,4928	13,3333	14,2597	0,5608
	2	14,3885	14,1844	14,9254	14,5985	13,1579		
	3	14,5985	14,3885	14,7059	14,3885	13,2450		

Partícula	Ponto	Vt (cm/s)					Vt Final (cm/s)	Desvio Padrão
		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
N1	1	28,1690	27,0270	27,7778	28,1690	27,3973	27,6820	0,4474
	2	27,7778	27,0270	28,1690	27,7778	27,3973		
	3	27,3973	27,3973	28,5714	27,3973	27,7778		
N2	1	27,0270	25,0000	27,3973	26,6667	27,0270	26,6105	0,6402
	2	27,0270	25,6410	27,0270	26,6667	26,3158		
	3	27,3973	26,6667	26,3158	26,6667	26,3158		
N3	1	26,3158	25,9740	26,6667	25,6410	25,9740	25,9850	0,5496
	2	26,6667	25,3165	26,3158	25,9740	25,0000		
	3	25,9740	26,3158	26,6667	25,9740	25,0000		
N4	1	25,9740	30,3030	25,3165	28,9855	28,5714	27,7056	1,5454
	2	26,3158	28,9855	25,6410	28,1690	28,5714		
	3	27,0270	29,4118	25,9740	28,1690	28,1690		
N5	1	28,5714	28,5714	25,9740	29,4118	28,9855	28,4278	1,1582
	2	28,1690	28,9855	26,6667	30,3030	28,9855		
	3	28,5714	28,5714	26,6667	29,4118	28,5714		
N6	1	28,9855	25,6410	29,4118	25,9740	25,9740	26,9597	1,9454
	2	28,5714	25,3165	29,8507	25,6410	25,0000		
	3	27,7778	25,3165	30,3030	25,3165	25,3165		
N7	1	27,0270	26,3158	26,3158	26,3158	27,7778	26,3692	0,3334
	2	26,3158	26,3158	26,3158	26,3158	26,3158		
	3	25,9740	25,9740	27,0270	26,6667	25,9740		

Tabela C.2 – Cálculo de  $C_D$  e  $Re_p$  para o óleo mineral

Partícula	Vt (cm/s)	$\rho_{\text{líquido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{sólido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (Poise)	$C_D$	$Re_p$
A1	24,4341	0,846	1,437	0,1400	1,51	145,39
A2	24,6350	0,846	1,437	0,1400	1,48	146,58
A3	22,0239	0,846	1,437	0,1400	1,85	131,05
A4	25,9049	0,846	1,437	0,1400	1,34	154,14
A5	26,2923	0,846	1,437	0,1400	1,30	156,45
C1	42,1366	0,846	1,700	0,1400	1,46	501,45
C2	37,4336	0,846	1,700	0,1400	1,85	445,48
C3	44,1611	0,846	1,700	0,1400	1,33	525,54
C4	40,3704	0,846	1,700	0,1400	1,59	480,43
C5	39,1419	0,846	1,700	0,1400	1,70	465,81
D1	33,8292	0,846	1,437	0,1400	0,99	253,61
D2	39,1455	0,846	1,437	0,1400	0,74	293,47
D3	35,5050	0,846	1,437	0,1400	0,90	266,18
D4	34,6539	0,846	1,437	0,1400	0,94	259,79
D5	34,6773	0,846	1,437	0,1400	0,94	259,97
E1	7,0004	0,846	2,440	0,1400	30,75	25,89
E2	5,9711	0,846	2,440	0,1400	42,26	22,08
E3	6,1892	0,846	2,440	0,1400	39,34	22,89
E4	8,0288	0,846	2,440	0,1400	23,38	29,69
E5	6,1401	0,846	2,440	0,1400	39,97	22,70
E6	5,3837	0,846	2,440	0,1400	51,99	19,91
E7	6,4854	0,846	2,440	0,1400	35,83	23,98
E8	6,2352	0,846	2,440	0,1400	38,76	23,06
E9	5,3791	0,846	2,440	0,1400	52,08	19,89
E10	6,9764	0,846	2,440	0,1400	30,96	25,80
F1	16,2049	0,846	1,316	0,1400	2,07	73,34
F2	15,4880	0,846	1,316	0,1400	2,27	70,09
F3	15,6335	0,846	1,316	0,1400	2,23	70,75
F4	16,2055	0,846	1,316	0,1400	2,07	73,34
F5	17,0804	0,846	1,316	0,1400	1,86	77,30
G1	18,8552	0,846	1,316	0,1400	1,75	97,68
G2	21,2113	0,846	1,316	0,1400	1,38	109,89
G3	19,7125	0,846	1,316	0,1400	1,60	102,12
G4	21,3844	0,846	1,316	0,1400	1,36	110,79
G5	21,1984	0,846	1,316	0,1400	1,39	109,82
I1	22,4466	0,846	1,193	0,1400	1,47	187,35
I2	23,2897	0,846	1,193	0,1400	1,37	194,39
I3	21,7281	0,846	1,193	0,1400	1,57	181,35
I4	21,7688	0,846	1,193	0,1400	1,56	181,69

Partícula	Vt (cm/s)	$\rho_{\text{líquido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{sólido}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (Poise)	C <sub>d</sub>	Re <sub>p</sub>
I5	23,3836	0,846	1,193	0,1400	1,36	195,17
I6	21,8490	0,846	1,193	0,1400	1,55	182,36
I7	23,4388	0,846	1,193	0,1400	1,35	195,63
I8	22,7003	0,846	1,193	0,1400	1,44	189,47
I9	21,8968	0,846	1,193	0,1400	1,55	182,76
I10	20,8478	0,846	1,193	0,1400	1,71	174,01
J1	25,2206	0,846	1,193	0,1400	1,65	298,38
J2	24,9438	0,846	1,193	0,1400	1,69	295,10
J3	22,7274	0,846	1,193	0,1400	2,03	268,88
J4	22,9385	0,846	1,193	0,1400	2,00	271,38
J5	23,9588	0,846	1,193	0,1400	1,83	283,45
K1	23,4181	0,846	1,193	0,1400	1,90	274,83
K2	23,8984	0,846	1,193	0,1400	1,82	280,46
K3	23,9693	0,846	1,193	0,1400	1,81	281,29
K4	23,0644	0,846	1,193	0,1400	1,96	270,67
K5	21,8574	0,846	1,193	0,1400	2,18	256,51
L1	33,0051	0,846	1,193	0,1400	1,57	636,22
L2	32,6004	0,846	1,193	0,1400	1,61	628,42
L3	30,4276	0,846	1,193	0,1400	1,85	586,54
L4	33,2853	0,846	1,193	0,1400	1,55	641,62
L5	32,6783	0,846	1,193	0,1400	1,60	629,92
M1	12,9767	0,846	1,880	0,1400	3,74	30,89
M2	13,5024	0,846	1,880	0,1400	3,45	32,14
M3	14,1738	0,846	1,880	0,1400	3,13	33,74
M4	13,4643	0,846	1,880	0,1400	3,47	32,05
M5	14,2597	0,846	1,880	0,1400	3,09	33,94
N1	27,6820	0,846	1,880	0,1400	1,64	131,77
N2	26,6105	0,846	1,880	0,1400	1,78	126,67
N3	25,9850	0,846	1,880	0,1400	1,86	123,69
N4	27,7056	0,846	1,880	0,1400	1,64	131,88
N5	28,4278	0,846	1,880	0,1400	1,56	135,32
N6	26,9597	0,846	1,880	0,1400	1,73	128,33
N7	26,3692	0,846	1,880	0,1400	1,81	125,52

**APÊNDICE D – DADOS CORRELACIONADOS PARA  
ÁGUA DESTILADA**

Tabela D.1 – Dados correlacionados para água destilada

Partícula	Experimental			Coelho & Massarani			Nova Correlação		
	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)
A1	1,80	1974,00	17,77	2,02	1864,49	16,78	1,84	1950,14	17,55
A2	1,89	1923,32	17,31	2,02	1864,49	16,78	1,84	1950,14	17,55
A3	2,36	1722,36	15,50	2,02	1864,49	16,78	1,84	1950,15	17,55
A4	1,43	2210,12	19,89	2,02	1864,49	16,78	1,72	2020,80	18,19
A5	1,38	2250,87	20,26	2,02	1864,49	16,78	1,72	2020,81	18,19
C1	1,38	8056,84	36,26	2,01	6679,24	30,06	1,68	7312,73	32,91
C2	2,05	6612,00	29,76	2,01	6679,24	30,06	1,80	7055,87	31,76
C3	1,49	7756,13	34,91	2,01	6679,24	30,06	1,68	7312,73	32,91
C4	1,88	6907,16	31,09	2,01	6679,24	30,06	1,80	7055,88	31,76
C5	1,80	7055,73	31,76	2,01	6679,24	30,06	1,80	7055,87	31,76
D1	1,05	3661,57	26,16	1,38	3184,84	22,75	1,03	3681,15	26,30
D2	1,09	3585,84	25,62	1,38	3184,84	22,75	1,09	3586,01	25,62
D3	1,07	3614,32	25,82	1,38	3184,84	22,75	0,98	3790,18	27,08
D4	1,02	3707,77	26,49	1,38	3184,84	22,75	0,93	3879,62	27,72
D5	1,03	3686,16	26,34	1,38	3184,84	22,75	0,98	3779,08	27,00
F1	2,42	960,64	11,37	1,97	1065,84	12,61	1,92	1078,39	12,76
F2	2,39	966,62	11,44	1,97	1065,84	12,61	1,86	1095,83	12,97
F3	2,18	1013,09	11,99	1,97	1065,84	12,61	1,78	1122,37	13,28
F4	2,08	1037,92	12,28	1,97	1065,84	12,61	1,78	1122,40	13,28
F5	1,75	1130,56	13,38	1,97	1065,84	12,61	1,63	1169,59	13,84
G1	2,22	1229,15	12,71	1,98	1302,56	13,47	1,17	1694,50	17,52
G2	1,81	1360,07	14,06	1,98	1302,56	13,47	1,21	1664,80	17,21
G3	1,72	1396,22	14,44	1,98	1302,56	13,47	1,38	1558,47	16,11
G4	1,07	1767,54	18,27	1,98	1302,56	13,47	1,08	1761,74	18,21
G5	1,15	1705,92	17,64	1,98	1302,56	13,47	1,08	1761,77	18,21
I1	1,78	2202,45	14,13	2,07	2043,43	13,11	2,00	2080,47	13,35
I2	1,37	2511,15	16,11	2,07	2043,43	13,11	1,84	2166,09	13,90
I3	2,00	2076,71	13,33	2,07	2043,43	13,11	1,93	2117,62	13,59
I4	1,62	2311,48	14,83	2,07	2043,43	13,11	1,86	2152,93	13,82
I5	1,67	2274,41	14,60	2,07	2043,43	13,11	1,87	2146,42	13,77
I6	1,69	2263,04	14,52	2,07	2043,43	13,11	1,87	2146,39	13,77
I7	1,52	2383,75	15,30	2,07	2043,43	13,11	1,95	2105,11	13,51
I8	1,44	2447,72	15,71	2,07	2043,43	13,11	1,83	2172,74	13,94
I9	1,19	2693,19	17,28	2,07	2043,43	13,11	1,92	2120,76	13,61
I10	1,56	2353,94	15,11	2,07	2043,43	13,11	2,00	2080,46	13,35
J1	1,78	3721,57	16,85	2,19	3352,23	15,18	2,07	3442,94	15,59
J2	2,35	3233,44	14,64	2,19	3352,23	15,18	2,21	3336,10	15,10
J3	2,23	3323,72	15,05	2,19	3352,23	15,18	2,21	3336,11	15,10
J4	2,34	3238,82	14,66	2,19	3352,23	15,18	2,21	3336,10	15,10
J5	2,26	3298,14	14,93	2,19	3352,23	15,18	2,21	3336,10	15,10

Partícula	Experimental			Coelho & Massarani			Nova Correlação		
	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)
K1	1,75	3700,14	16,89	2,18	3317,64	15,14	2,11	3376,92	15,41
K2	1,81	3639,23	16,61	2,18	3317,64	15,14	2,11	3369,83	15,38
K3	1,90	3552,78	16,22	2,18	3317,64	15,14	2,03	3441,01	15,71
K4	2,01	3459,75	15,79	2,18	3317,64	15,14	2,00	3460,94	15,80
K5	2,00	3461,36	15,80	2,18	3317,64	15,14	2,08	3394,37	15,49
L1	1,73	7831,61	21,76	2,19	6967,57	19,36	2,32	6777,57	18,83
L2	1,67	7990,43	22,20	2,19	6967,57	19,36	1,98	7332,47	20,37
L3	1,75	7805,42	21,69	2,19	6967,57	19,36	2,32	6777,57	18,83
L4	1,76	7779,12	21,62	2,19	6967,57	19,36	2,05	7208,53	20,03
L5	1,90	7487,72	20,81	2,19	6967,57	19,36	2,12	7076,32	19,66
M1	2,23	635,11	14,29	2,04	664,56	14,96	1,72	723,86	16,29
M2	2,12	652,39	14,68	2,04	664,56	14,96	1,72	723,86	16,29
M3	1,99	672,36	15,13	2,04	664,56	14,96	1,72	723,95	16,29
M4	2,16	645,86	14,53	2,04	664,56	14,96	1,91	685,99	15,44
M5	1,58	755,22	17,00	2,04	664,56	14,96	1,61	748,58	16,85
N1	1,66	2082,71	23,43	2,02	1890,33	21,27	1,62	2111,40	23,76
N2	2,07	1863,70	20,97	2,02	1890,33	21,27	1,74	2036,71	22,92
N3	2,14	1835,89	20,66	2,02	1890,33	21,27	1,74	2036,69	22,92
N4	1,45	2226,84	25,06	2,02	1890,33	21,27	1,62	2111,41	23,76
N5	1,47	2213,26	24,90	2,02	1890,33	21,27	1,62	2111,42	23,76
N6	2,32	1761,92	19,83	2,02	1890,33	21,27	1,74	2036,70	22,92
N7	2,11	1845,69	20,77	2,02	1890,33	21,27	1,74	2036,69	22,92



**APÊNDICE E – DADOS CORRELACIONADOS PARA  
SOLUÇÃO DE GLICERINA**

Tabela E.1 – Dados correlacionados para solução de glicerina

Partícula	Experimental			Coelho & Massarani			Nova Correlação		
	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)
A1	1,77	179,87	13,53	2,18	162,28	12,20	2,00	169,32	12,73
A2	1,85	176,23	13,25	2,18	162,28	12,20	2,00	169,32	12,73
A3	2,19	161,96	12,18	2,18	162,28	12,20	1,96	171,16	12,87
A4	1,49	196,05	14,74	2,18	162,28	12,20	1,85	176,21	13,25
A5	1,46	197,84	14,88	2,18	162,28	12,20	1,82	177,32	13,34
C1	1,56	749,13	28,17	2,04	655,43	24,65	1,69	720,43	27,09
C2	2,03	657,02	24,71	2,04	655,43	24,65	1,81	695,08	26,14
C3	1,40	789,81	29,70	2,04	655,43	24,65	1,69	720,51	27,09
C4	1,80	696,76	26,20	2,04	655,43	24,65	1,81	695,20	26,14
C5	1,80	696,74	26,20	2,04	655,43	24,65	1,81	695,08	26,14
D1	1,03	333,51	19,91	1,47	279,73	16,70	1,07	327,16	19,53
D2	0,93	350,97	20,95	1,47	279,73	16,70	1,13	319,04	19,04
D3	0,98	342,37	20,44	1,47	279,73	16,70	1,01	336,43	20,08
D4	0,91	354,78	21,18	1,47	279,73	16,70	0,96	345,34	20,61
D5	1,03	333,71	19,92	1,47	279,73	16,70	1,02	335,48	20,03
F1	2,32	79,55	7,87	2,34	79,29	7,84	2,55	75,89	7,50
F2	2,50	76,71	7,58	2,34	79,29	7,84	2,50	76,71	7,58
F3	2,40	78,22	7,73	2,34	79,29	7,84	2,79	72,50	7,17
F4	2,38	78,56	7,77	2,34	79,29	7,84	2,65	74,39	7,36
F5	1,88	88,30	8,73	2,34	79,29	7,84	2,28	80,22	7,93
G1	1,98	105,49	9,11	2,26	98,63	8,52	1,82	109,89	9,49
G2	1,42	124,36	10,74	2,26	98,63	8,52	1,57	118,59	10,24
G3	1,54	119,43	10,32	2,26	98,63	8,52	1,72	113,10	9,77
G4	1,36	127,33	11,00	2,26	98,63	8,52	1,58	118,18	10,21
G5	1,46	122,73	10,60	2,26	98,63	8,52	1,52	120,55	10,41
I1	3,68	82,39	4,42	2,35	103,20	5,53	2,43	101,54	5,44
I2	2,38	102,55	5,50	2,35	103,20	5,53	2,28	104,65	5,61
I3	2,65	97,15	5,21	2,35	103,20	5,53	2,56	98,91	5,30
I4	2,57	98,63	5,29	2,35	103,20	5,53	2,30	104,18	5,59
I5	3,10	89,86	4,82	2,35	103,20	5,53	2,33	103,65	5,56
I6	2,90	92,89	4,98	2,35	103,20	5,53	2,58	98,45	5,28
I7	2,62	97,69	5,24	2,35	103,20	5,53	2,34	103,31	5,54
I8	3,09	89,95	4,82	2,35	103,20	5,53	2,31	103,94	5,57
I9	2,29	104,60	5,61	2,35	103,20	5,53	2,66	97,03	5,20
I10	2,49	100,30	5,38	2,35	103,20	5,53	2,52	99,55	5,34
J1	2,25	177,79	6,73	2,34	174,36	6,60	2,20	180,06	6,81
J2	2,75	160,92	6,09	2,34	174,36	6,60	2,36	173,77	6,57
J3	2,77	160,29	6,06	2,34	174,36	6,60	2,32	175,39	6,63
J4	2,61	165,11	6,25	2,34	174,36	6,60	2,36	173,77	6,57
J5	2,48	169,33	6,40	2,34	174,36	6,60	2,36	173,77	6,57

Partícula	Experimental			Coelho & Massarani			Nova Correlação		
	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)
K1	3,14	148,74	5,67	2,34	172,47	6,58	2,21	177,49	6,77
K2	3,09	149,91	5,72	2,34	172,47	6,58	2,21	177,21	6,76
K3	2,92	154,21	5,88	2,34	172,47	6,58	2,12	181,07	6,90
K4	3,45	142,00	5,41	2,34	172,47	6,58	2,11	181,39	6,92
K5	3,57	139,61	5,32	2,34	172,47	6,58	2,19	178,27	6,80
L1	2,33	363,97	8,45	2,25	369,62	8,58	2,33	363,56	8,44
L2	2,63	342,12	7,94	2,25	369,62	8,58	2,00	392,35	9,11
L3	2,46	353,82	8,21	2,25	369,62	8,58	2,33	363,56	8,44
L4	2,73	336,04	7,80	2,25	369,62	8,58	2,06	386,36	8,97
L5	2,38	359,46	8,34	2,25	369,62	8,58	2,14	379,08	8,80
M1	2,96	56,01	10,53	2,53	60,60	11,39	2,78	57,85	10,88
M2	2,91	56,52	10,63	2,53	60,60	11,39	2,78	57,85	10,88
M3	2,49	61,03	11,47	2,53	60,60	11,39	2,49	61,08	11,48
M4	2,72	58,44	10,99	2,53	60,60	11,39	3,41	52,23	9,82
M5	2,40	62,17	11,69	2,53	60,60	11,39	2,33	63,15	11,87
N1	1,69	210,00	19,74	2,15	185,86	17,47	1,68	210,57	19,80
N2	2,00	192,70	18,12	2,15	185,86	17,47	1,79	203,73	19,15
N3	1,81	202,73	19,06	2,15	185,86	17,47	1,81	202,72	19,06
N4	1,65	212,42	19,97	2,15	185,86	17,47	1,67	211,18	19,85
N5	1,77	204,95	19,27	2,15	185,86	17,47	1,66	211,57	19,89
N6	2,04	190,88	17,94	2,15	185,86	17,47	1,80	203,33	19,12
N7	2,02	191,81	18,03	2,15	185,86	17,47	1,81	202,72	19,06

**APÊNDICE F – DADOS CORRELACIONADOS PARA  
ÓLEO MINERAL**

Tabela F.1 – Dados correlacionados para óleo mineral

Partícula	Experimental			Coelho & Massarani			Nova Correlação		
	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)
A1	1,51	145,39	24,43	2,25	118,91	19,98	1,91	128,99	21,68
A2	1,48	146,58	24,64	2,25	118,91	19,98	1,91	128,99	21,68
A3	1,85	131,05	22,02	2,25	118,91	19,98	1,86	130,85	21,99
A4	1,34	154,14	25,90	2,25	118,91	19,98	1,76	134,43	22,59
A5	1,30	156,45	26,29	2,25	118,91	19,98	1,73	135,55	22,78
C1	1,46	501,45	42,14	2,06	422,49	35,50	1,57	483,83	40,66
C2	1,85	445,48	37,43	2,06	422,49	35,50	1,69	466,76	39,22
C3	1,33	525,54	44,16	2,06	422,49	35,50	1,57	483,93	40,66
C4	1,59	480,43	40,37	2,06	422,49	35,50	1,69	466,94	39,24
C5	1,70	465,81	39,14	2,06	422,49	35,50	1,69	466,76	39,22
D1	0,99	253,61	33,83	1,50	205,77	27,45	1,01	251,18	33,50
D2	0,74	293,47	39,15	1,50	205,77	27,45	1,06	245,03	32,68
D3	0,90	266,18	35,51	1,50	205,77	27,45	0,95	258,18	34,44
D4	0,94	259,79	34,65	1,50	205,77	27,45	0,90	265,28	35,39
D5	0,94	259,97	34,68	1,50	205,77	27,45	0,96	257,47	34,34
F1	2,07	73,34	16,20	2,41	68,00	15,03	2,31	69,39	15,33
F2	2,27	70,09	15,49	2,41	68,00	15,03	2,26	70,17	15,50
F3	2,23	70,75	15,63	2,41	68,00	15,03	2,50	66,72	14,74
F4	2,07	73,34	16,21	2,41	68,00	15,03	2,38	68,35	15,10
F5	1,86	77,30	17,08	2,41	68,00	15,03	2,06	73,51	16,24
G1	1,75	97,68	18,86	2,32	84,86	16,38	1,63	101,11	19,52
G2	1,38	109,89	21,21	2,32	84,86	16,38	1,42	108,32	20,91
G3	1,60	102,12	19,71	2,32	84,86	16,38	1,57	103,14	19,91
G4	1,36	110,79	21,38	2,32	84,86	16,38	1,42	108,47	20,94
G5	1,39	109,82	21,20	2,32	84,86	16,38	1,37	110,48	21,33
I1	1,47	187,35	22,45	2,24	151,67	18,17	1,96	162,32	19,45
I2	1,37	194,39	23,29	2,24	151,67	18,17	1,82	168,54	20,19
I3	1,57	181,35	21,73	2,24	151,67	18,17	1,94	163,24	19,56
I4	1,56	181,69	21,77	2,24	151,67	18,17	1,84	167,59	20,08
I5	1,36	195,17	23,38	2,24	151,67	18,17	1,85	166,99	20,01
I6	1,55	182,36	21,85	2,24	151,67	18,17	1,91	164,58	19,72
I7	1,35	195,63	23,44	2,24	151,67	18,17	1,91	164,47	19,71
I8	1,44	189,47	22,70	2,24	151,67	18,17	1,82	168,61	20,20
I9	1,55	182,76	21,90	2,24	151,67	18,17	1,96	162,49	19,47
I10	1,71	174,01	20,85	2,24	151,67	18,17	1,98	161,46	19,34
J1	1,65	298,38	25,22	2,29	253,63	21,44	1,97	273,17	23,09
J2	1,69	295,10	24,94	2,29	253,63	21,44	2,10	264,45	22,35
J3	2,03	268,88	22,73	2,29	253,63	21,44	2,09	265,01	22,40
J4	2,00	271,38	22,94	2,29	253,63	21,44	2,10	264,45	22,35
J5	1,83	283,45	23,96	2,29	253,63	21,44	2,10	264,45	22,35

Partícula	Experimental			Coelho & Massarani			Nova Correlação		
	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)	$C_D$	$Re_p$	$v_t$ (cm/s)
K1	1,90	274,83	23,42	2,28	250,93	21,38	2,00	268,23	22,86
K2	1,82	280,46	23,90	2,28	250,93	21,38	2,00	267,70	22,81
K3	1,81	281,29	23,97	2,28	250,93	21,38	1,92	273,39	23,30
K4	1,96	270,67	23,06	2,28	250,93	21,38	1,90	274,73	23,41
K5	2,18	256,51	21,86	2,28	250,93	21,38	1,98	269,57	22,97
L1	1,57	636,22	33,01	2,23	533,88	27,70	2,18	540,75	28,05
L2	1,61	628,42	32,60	2,23	533,88	27,70	1,86	584,71	30,33
L3	1,85	586,54	30,43	2,23	533,88	27,70	2,18	540,75	28,05
L4	1,55	641,62	33,29	2,23	533,88	27,70	1,92	575,03	29,83
L5	1,60	629,92	32,68	2,23	533,88	27,70	2,00	564,42	29,28
M1	3,74	30,89	12,98	2,97	34,65	14,56	3,67	31,17	13,10
M2	3,45	32,14	13,50	2,97	34,65	14,56	3,67	31,17	13,10
M3	3,13	33,74	14,17	2,97	34,65	14,56	3,13	33,75	14,18
M4	3,47	32,05	13,46	2,97	34,65	14,56	4,66	27,64	11,61
M5	3,09	33,94	14,26	2,97	34,65	14,56	2,93	34,89	14,66
N1	1,64	131,77	27,68	2,27	112,14	23,56	1,62	132,68	27,87
N2	1,78	126,67	26,61	2,27	112,14	23,56	1,72	128,83	27,06
N3	1,86	123,69	25,98	2,27	112,14	23,56	1,76	127,44	26,77
N4	1,64	131,88	27,71	2,27	112,14	23,56	1,60	133,53	28,05
N5	1,56	135,32	28,43	2,27	112,14	23,56	1,59	134,08	28,17
N6	1,73	128,33	26,96	2,27	112,14	23,56	1,73	128,29	26,95
N7	1,81	125,52	26,37	2,27	112,14	23,56	1,76	127,44	26,77