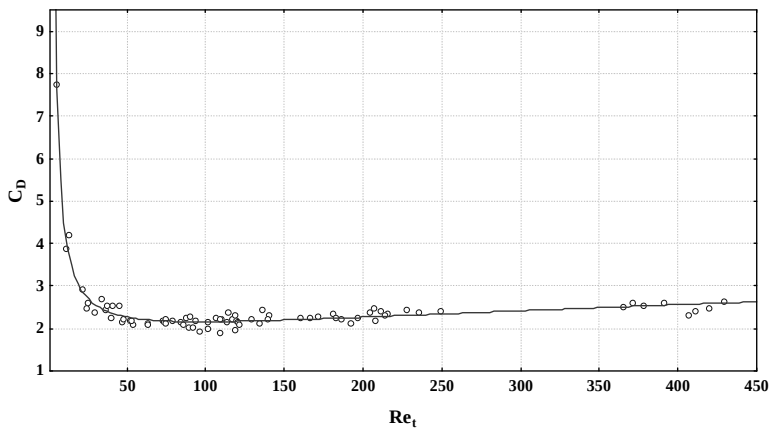


## **ANEXO G**

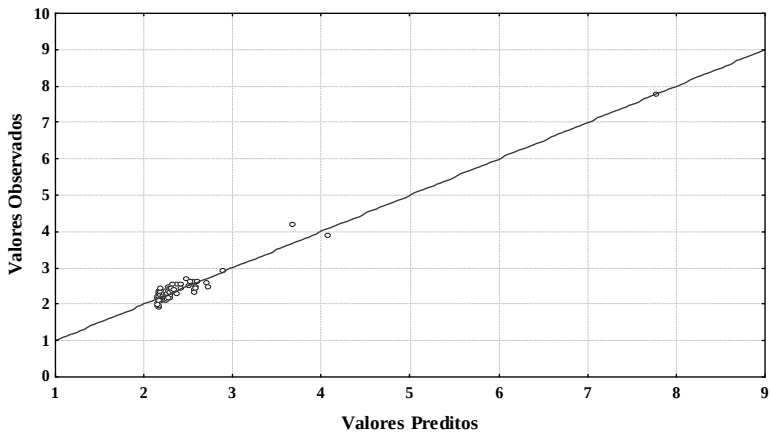
**Verificações estatísticas do ajuste das correlações encontradas na  
literatura para a ascensão de bolhas de nitrogênio em fluidos  
Newtonianos**

# Correlações para previsão do coeficiente de arraste ( $C_D$ ) com base em $d_{eq}$

KHAN; RICHARDSON (1987)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

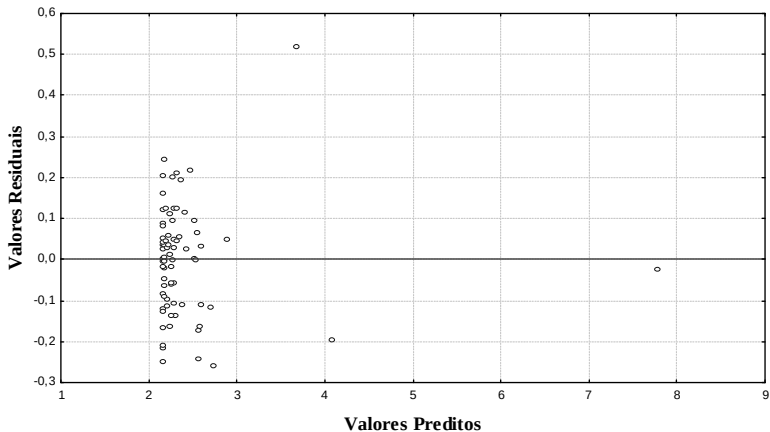
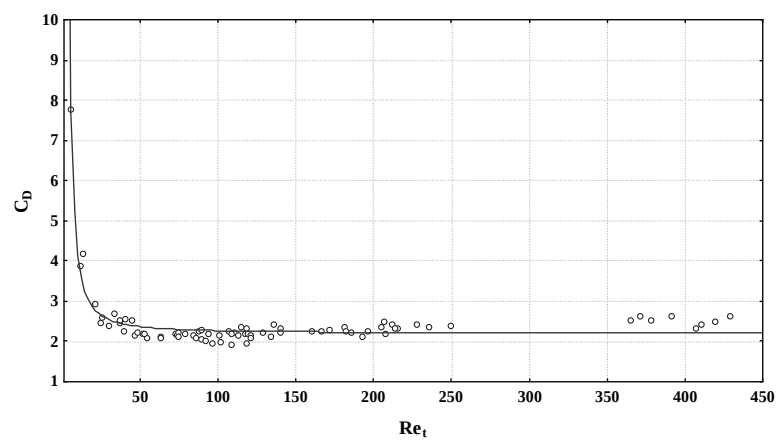
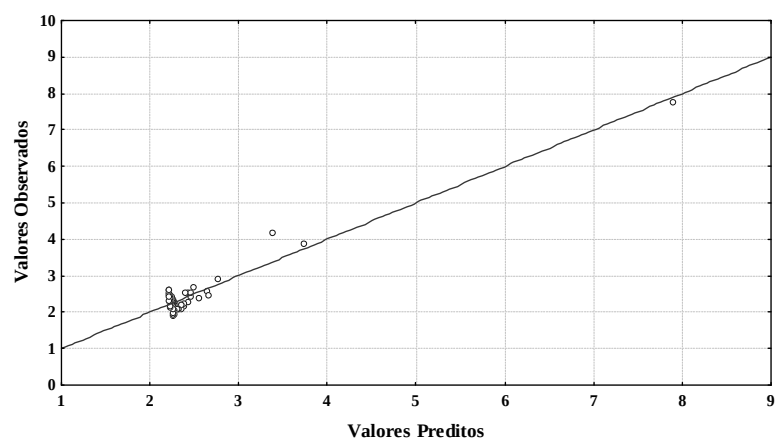


Gráfico de resíduos.

MORSI; ALEXANDER (1972)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

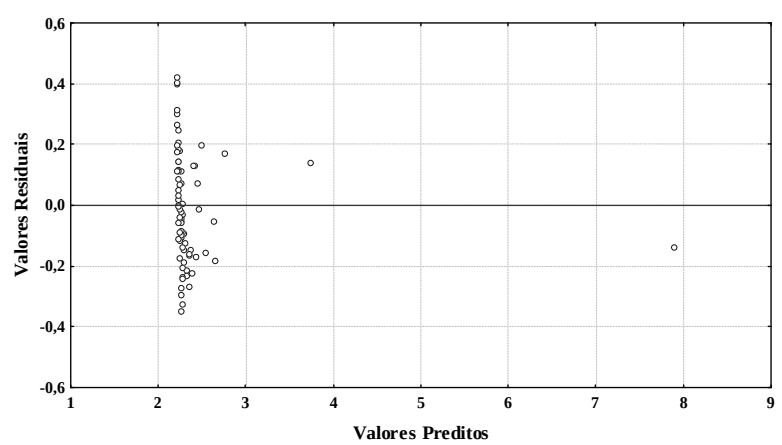
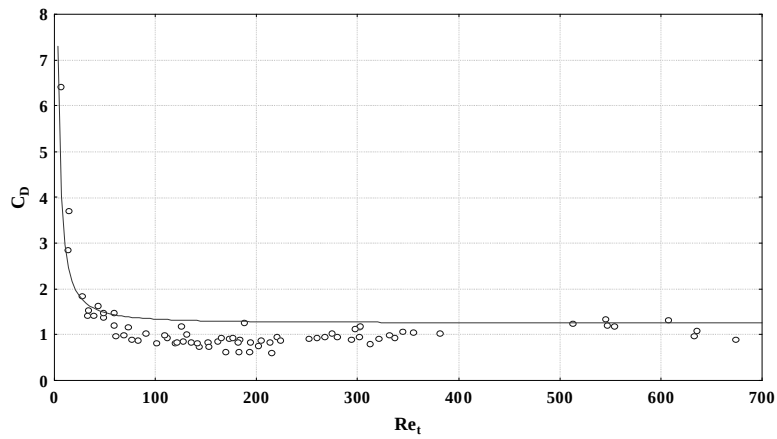
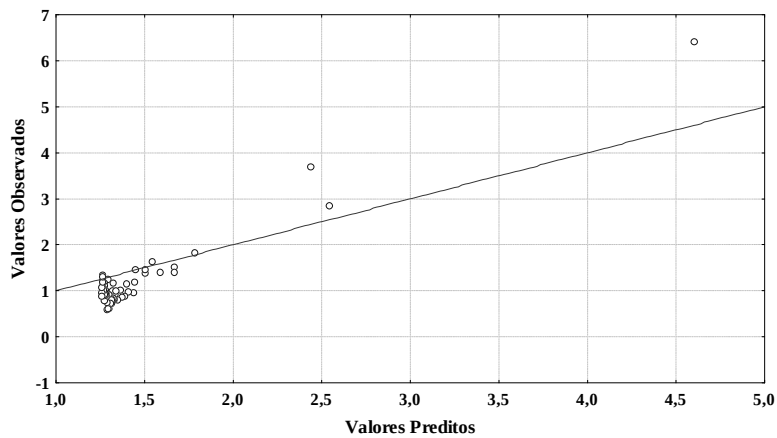


Gráfico de resíduos.

## COELHO; MASSARANI (1996) – Modificada



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

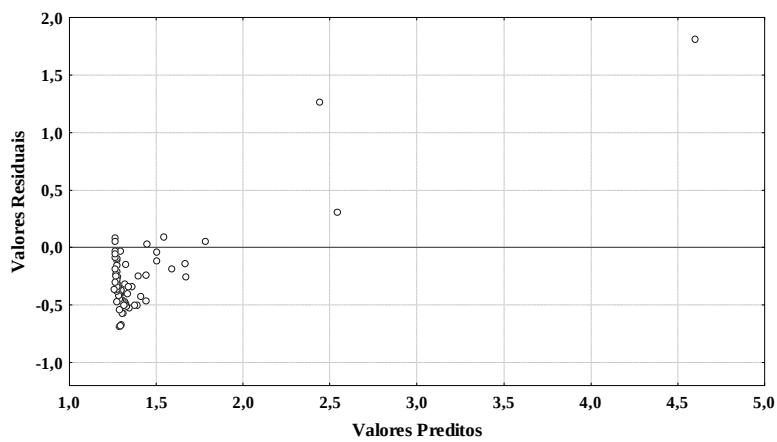
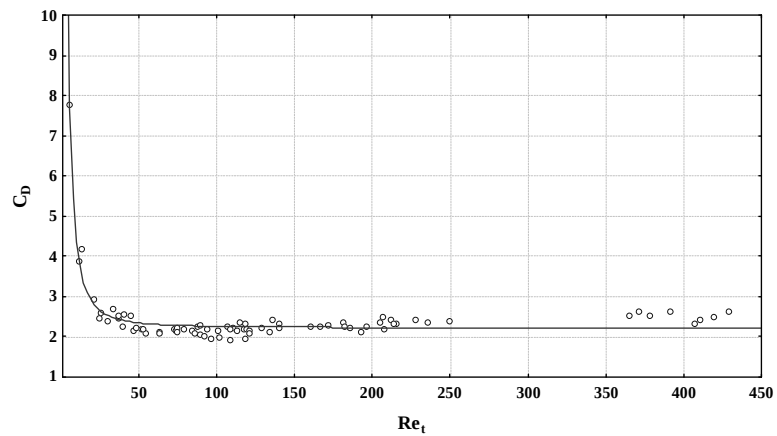


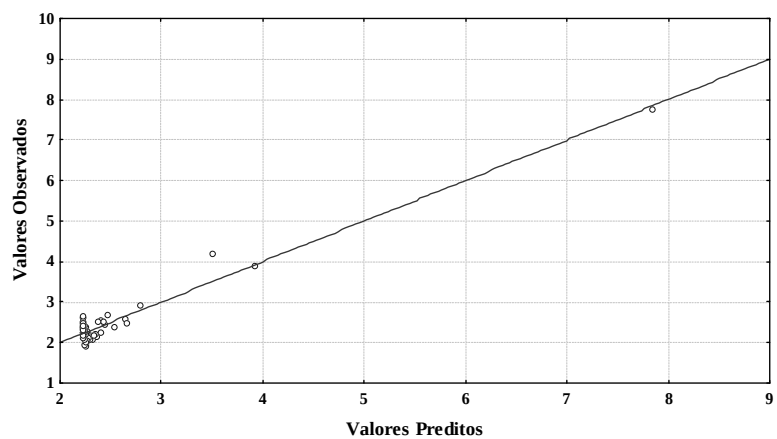
Gráfico de resíduos.

## Outras Correlações

**Equação 1 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + (2,6)^B \right]^C$



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

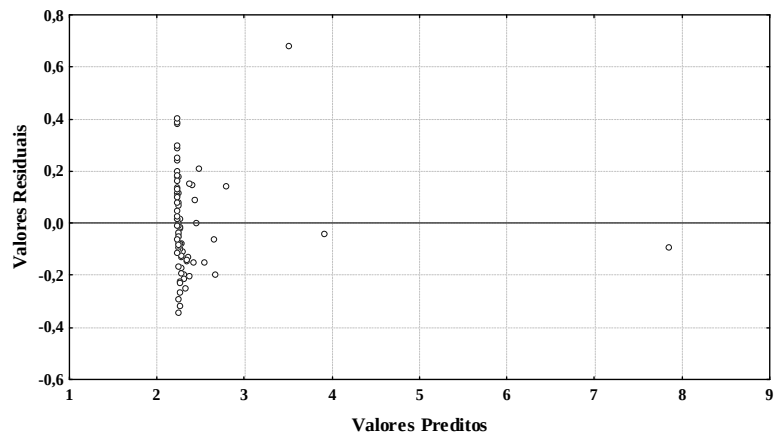
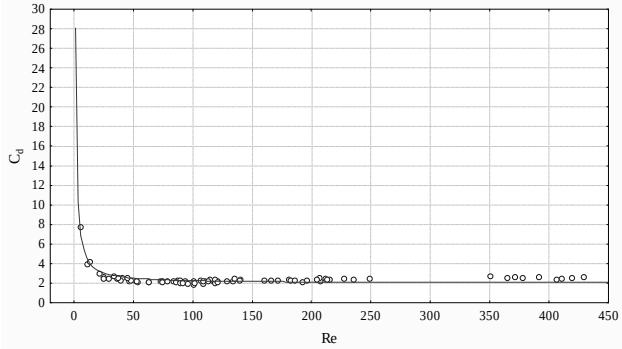


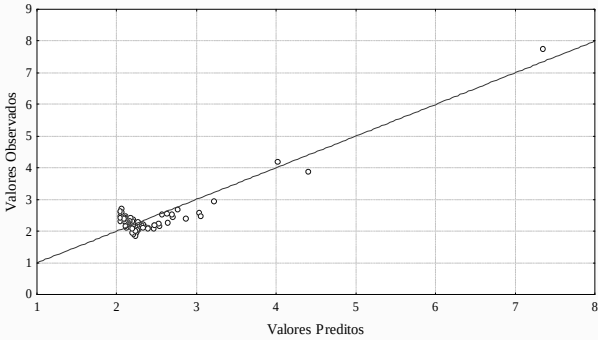
Gráfico de resíduos.

Equação 2:  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^n + (A)^n \right]^{\frac{1}{n}}$

|                    | n      | A      |
|--------------------|--------|--------|
| Parâmetro          | 1,049  | 1,871  |
| Desvio padrão      | 0,013  | 0,046  |
| t(77)              | 79,253 | 40,540 |
| p-level            | 0,000  | 0,000  |
| r <sup>2</sup> (%) | 83,62  |        |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

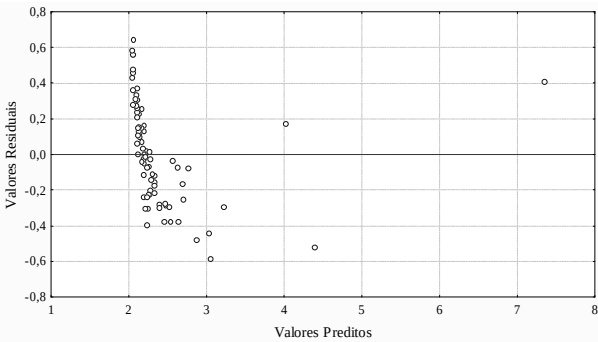
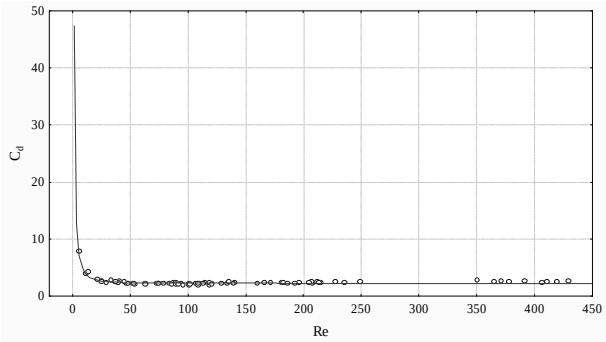


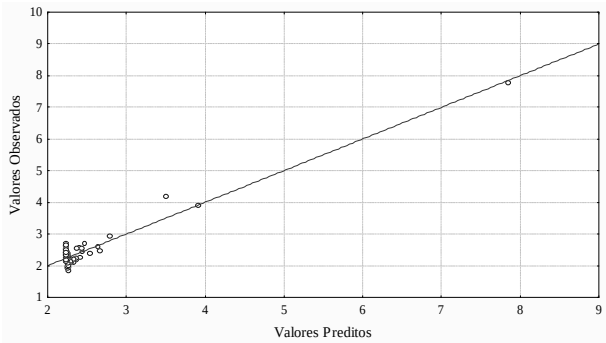
Gráfico de resíduos.

**Equação 3 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + (1,87)^B \right]^C$

|                    | A      | B       | C      |
|--------------------|--------|---------|--------|
| Parâmetro          | 1,902  | 1,864   | 0,686  |
| Desvio padrão      | 0,186  | 0,174   | 0,056  |
| t(76)              | 10,236 | 10,6812 | 12,330 |
| p-level            | 0,000  | 0,000   | 0,000  |
| r <sup>2</sup> (%) | 92     |         |        |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

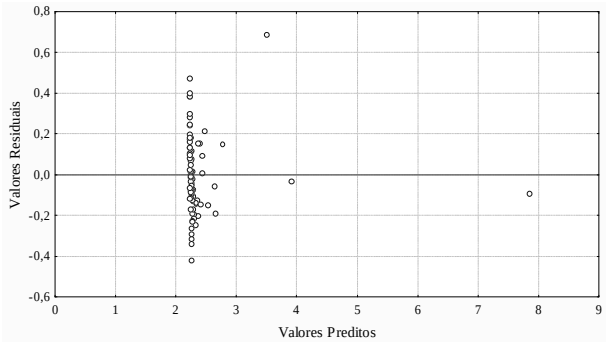
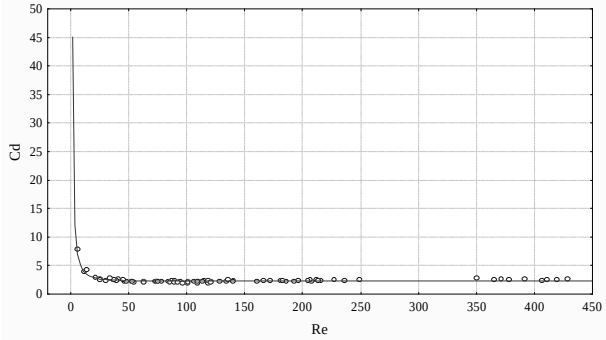


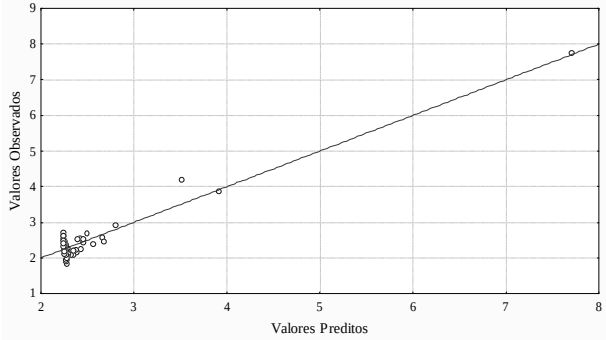
Gráfico de resíduos.

Equação 4 :  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + (1,87)^A \right]^B$

|                    | A      | B      |
|--------------------|--------|--------|
| Parâmetro          | 1,858  | 0,693  |
| Desvio padrão      | 0,164  | 0,052  |
| t(77)              | 11,299 | 13,280 |
| p-level            | 0,000  | 0,000  |
| r <sup>2</sup> (%) | 91,90  |        |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

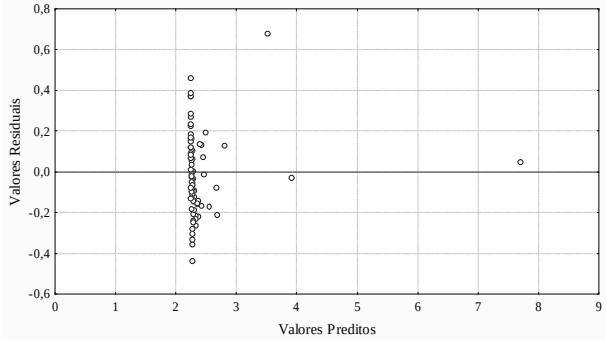
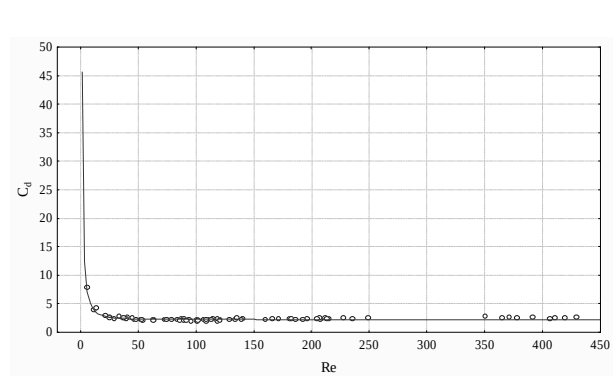


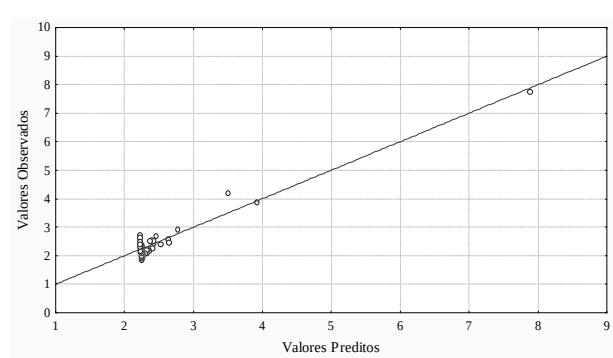
Gráfico de resíduos.

Equação 5 :  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + B Re^C) + (2,6)^A \right]^D$

|               | A     | B      | C     | D     |
|---------------|-------|--------|-------|-------|
| Parâmetro     | 3,922 | 24,067 | 0,235 | 0,216 |
| Desvio padrão | 1,431 | 17,839 | 0,408 | 0,078 |
| t(73)         | 2,740 | 1,349  | 0,577 | 2,773 |
| p-level       | 0,007 | 0,181  | 0,565 | 0,007 |
| r²(%)         | 93,99 |        |       |       |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

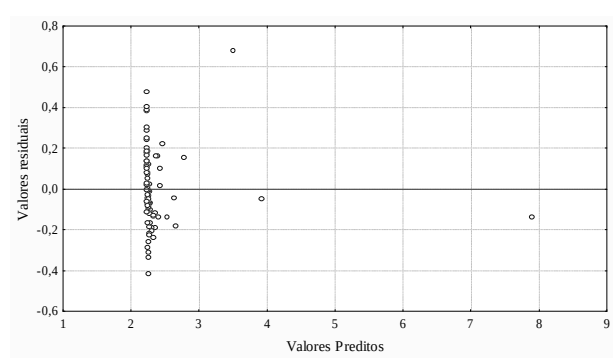
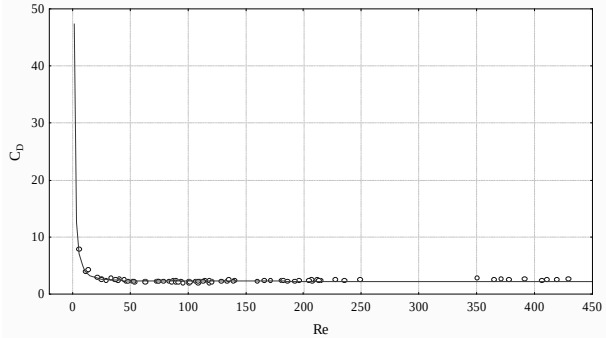


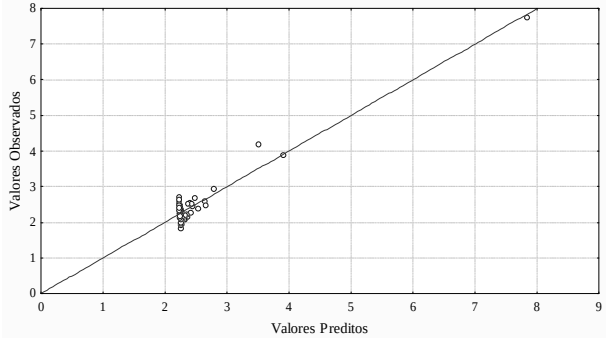
Gráfico de resíduos.

**Equação 6 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + B Re^A) + (2,6)^A \right]^C$

|                    | A      | B      | C      |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Parâmetro          | 1,885  | -0,007 | 0,691  |
| Desvio padrão      | 0,137  | 0,002  | 0,041  |
| t(74)              | 13,784 | -4,055 | 16,719 |
| p-level            | 0,000  | 0,000  | 0,000  |
| r <sup>2</sup> (%) | 92,98  |        |        |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

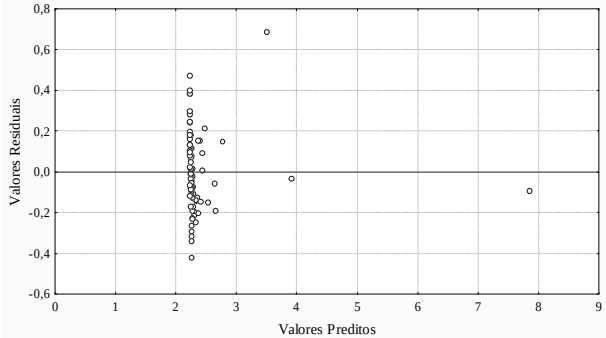
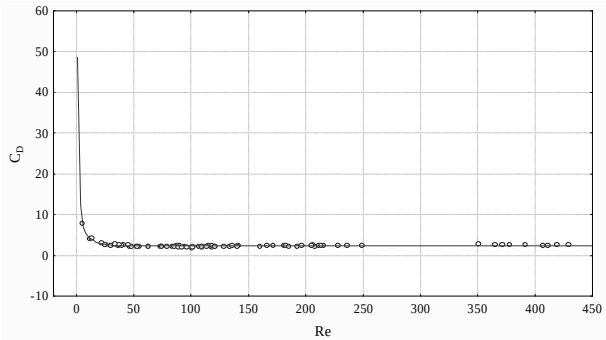


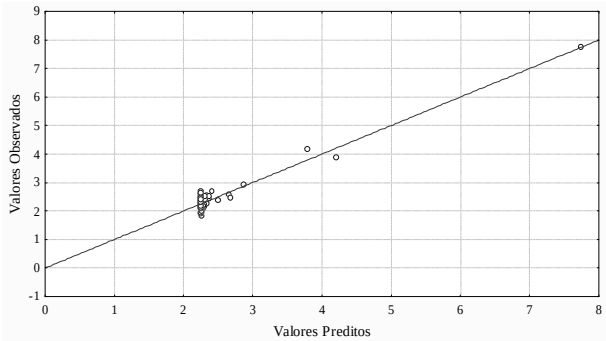
Gráfico de resíduos.

**Equação 7 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + B Re^C) + (2,6)^D \right]^E$

|                      | A     | B      | C     | D     | E     |
|----------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| <b>Parâmetro</b>     | 8,454 | 0,0005 | 4,279 | 5,439 | 0,156 |
| <b>Desvio padrão</b> | 2,313 | 0,0018 | 1,566 | 1,364 | 0,038 |
| <b>t(74)</b>         | 3,656 | 0,296  | 2,732 | 3,986 | 4,025 |
| <b>p-level</b>       | 0,000 | 0,768  | 0,008 | 0,000 | 0,000 |
| <b>r<sup>2</sup></b> | 94,13 |        |       |       |       |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

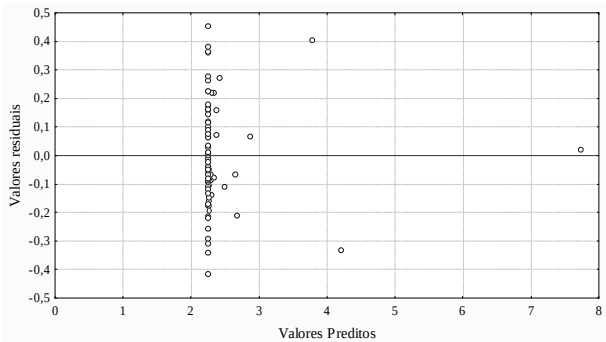
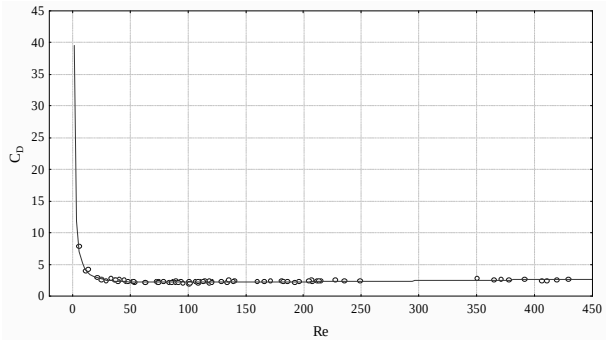


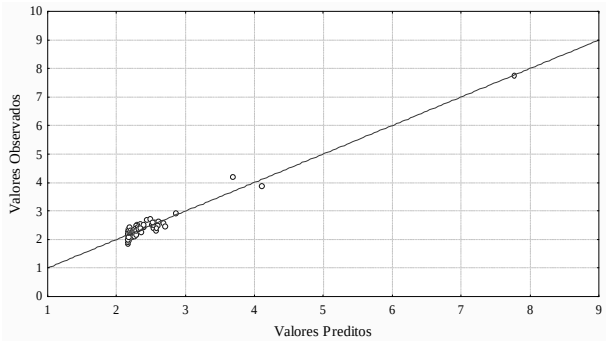
Gráfico de resíduos.

**Equação 8 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + (BRe^C) + 2,6 \right]^D$

|                    | A      | B      | C     | D      |
|--------------------|--------|--------|-------|--------|
| Parâmetro          | 1,677  | 0,0002 | 1,423 | 0,765  |
| Desvio padrão      | 0,033  | 0,0002 | 0,181 | 0,009  |
| t(75)              | 50,728 | 0,918  | 7,877 | 80,768 |
| p-level            | 0,000  | 0,361  | 0,000 | 0,000  |
| r <sup>2</sup> (%) | 96,04  |        |       |        |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

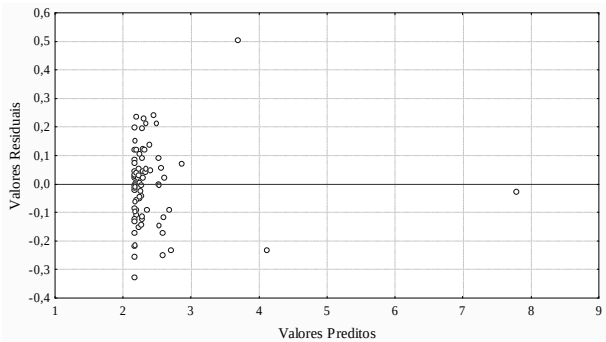
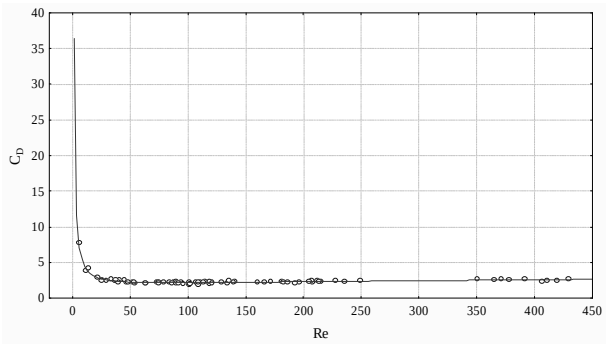


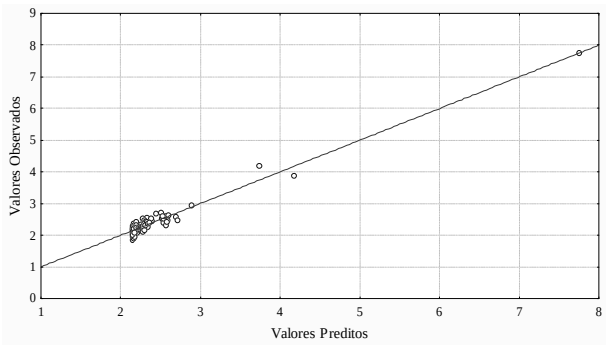
Gráfico de resíduos.

Equação 9 :  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + B Re^C \right]^D$

|                    | A     | B     | C      | D      |
|--------------------|-------|-------|--------|--------|
| Parâmetro          | 0,924 | 0,654 | 0,186  | 1,297  |
| Desvio padrão      | 0,101 | 0,112 | 0,018  | 0,119  |
| t(75)              | 9,141 | 5,858 | 10,487 | 10,909 |
| p-level            | 0,000 | 0,000 | 0,000  | 0,000  |
| r <sup>2</sup> (%) | 96,32 |       |        |        |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

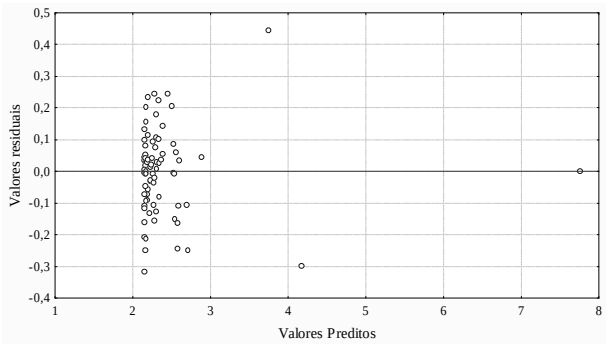


Gráfico de resíduos.

$$\textbf{Equação 10 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right) (1 + A Re^B) + C^D \right]^E$$

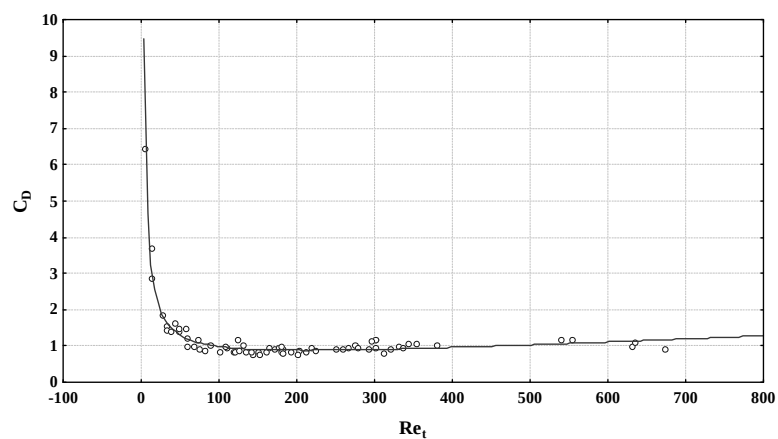
$$\textbf{Equação 11 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right) (1 + A Re^B) + C \right]^D$$

$$\textbf{Equação 12 : } C_D = \left[ \left( \frac{A}{Re} \right)^B + C^D \right]^E$$

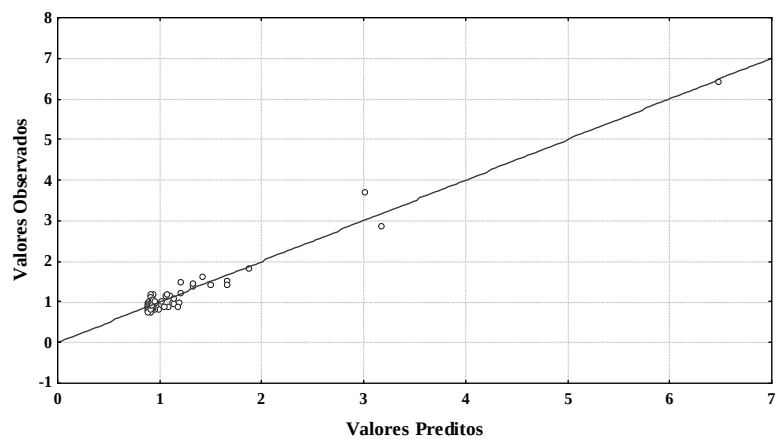
As Equações 10, 11 e 12 acima apresentam matriz mal condicionada, não sendo possível obter os valores de DP, t-student e nível de significância. A obtenção dos parâmetros destas equações dependem dos valores de chute inicial e também do método de estimação utilizado e ainda apresentam coeficiente de correlação quadrática não satisfatórios.

## Correlação para previsão de $C_D$ com base em *aspect ratio* e $Re$ no diâmetro projetado sobre o plano horizontal

KHAN; RICHARDSON (1987)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

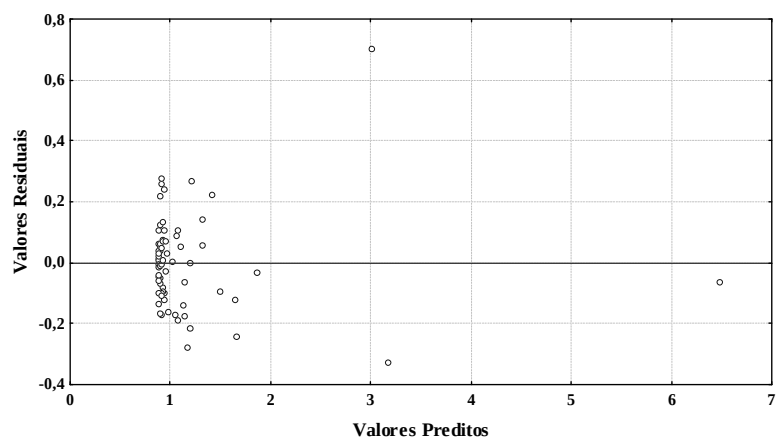
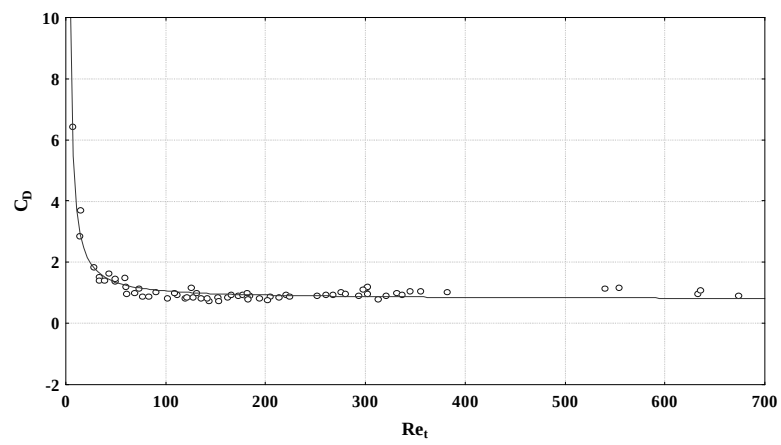
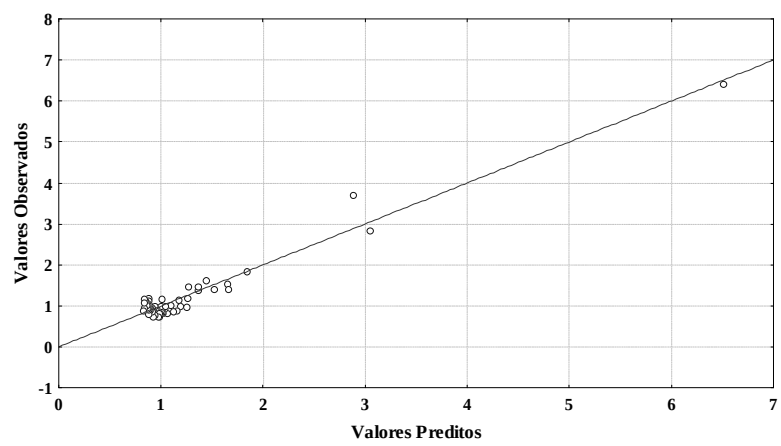


Gráfico de resíduos.

## MORSI; ALEXANDER (1972)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

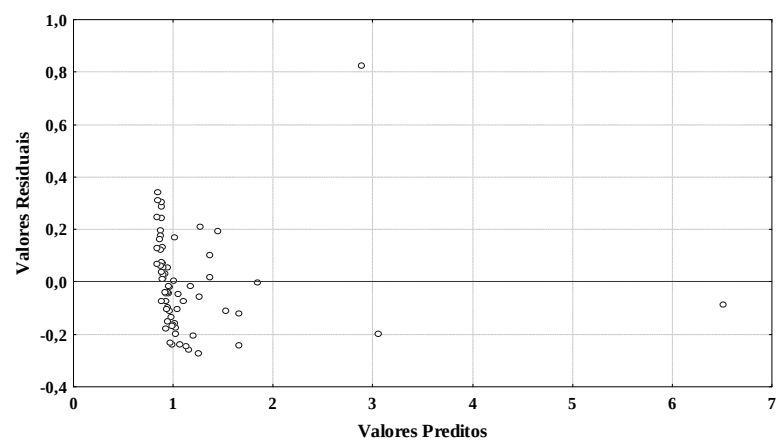
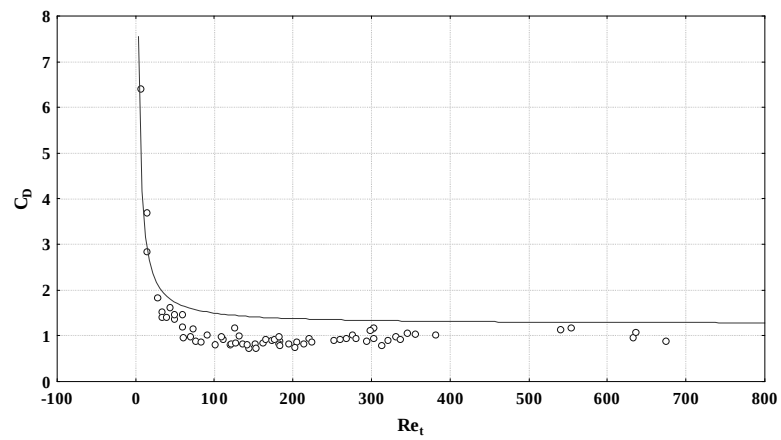
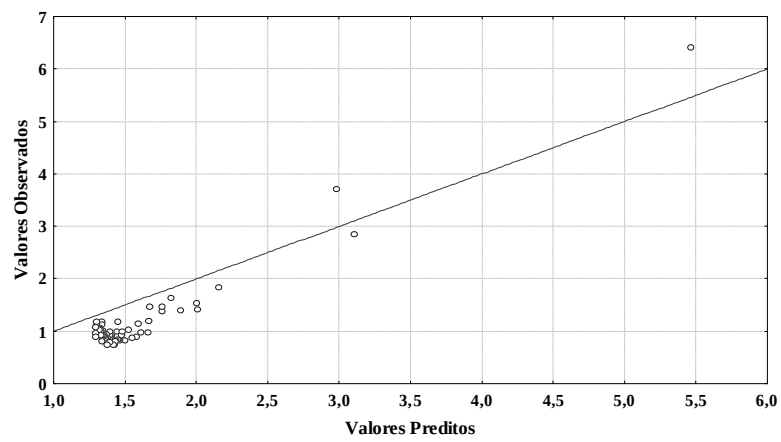


Gráfico de resíduos.

## COELHO; MASSARANI (1996) – Modificada



Função ajustada aos valores experimentais



Valores Preditos vs Valores Observados

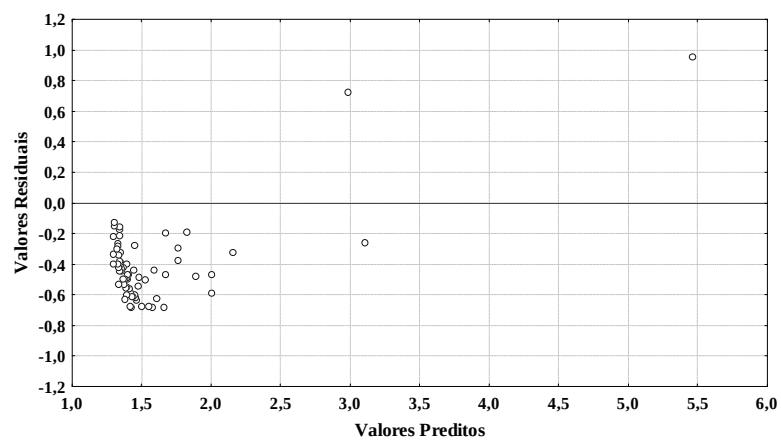
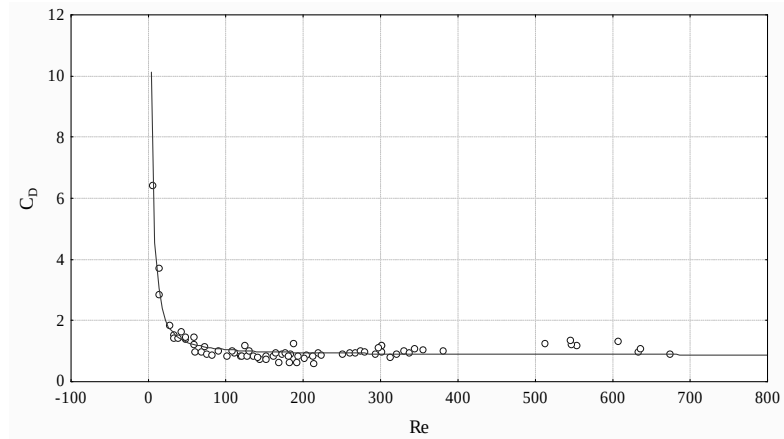


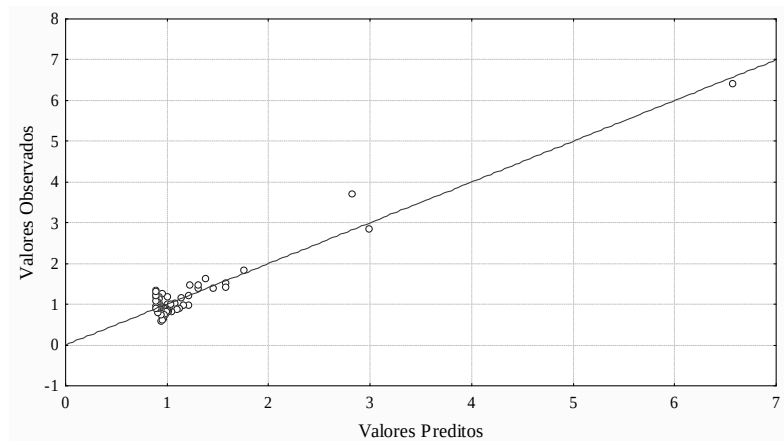
Gráfico de resíduos

## Outras Correlações

**Equação 1 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + 1,25^B \right]^C$



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

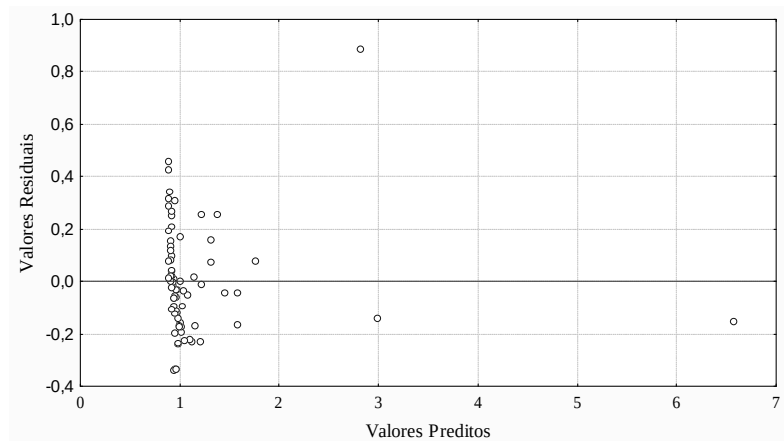
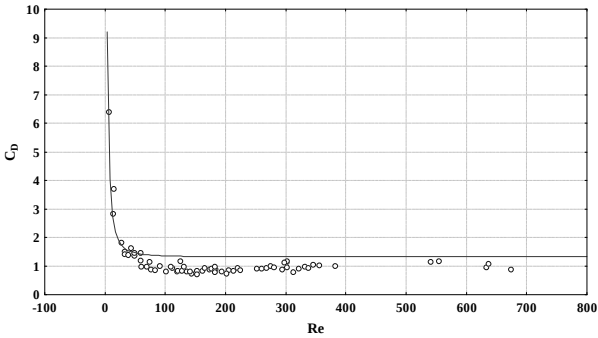


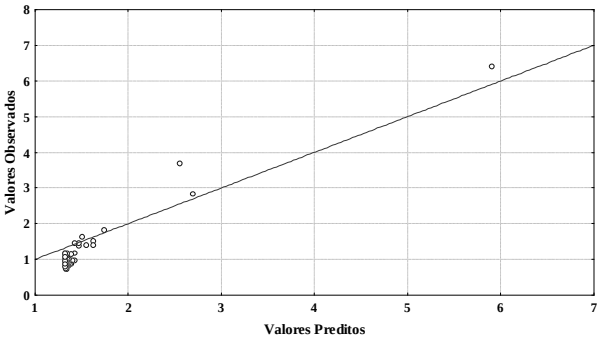
Gráfico de resíduos.

**Equação 2 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + 1,25^A \right]^B$

|                         | A     | B     |
|-------------------------|-------|-------|
| <b>Parâmetro</b>        | 1,847 | 0,662 |
| <b>Desvio padrão</b>    | 0,304 | 0,093 |
| <b>t(71)</b>            | 6,069 | 7,117 |
| <b>p-level</b>          | 0,000 | 0,000 |
| <b>r<sup>2</sup>(%)</b> | 73,31 |       |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

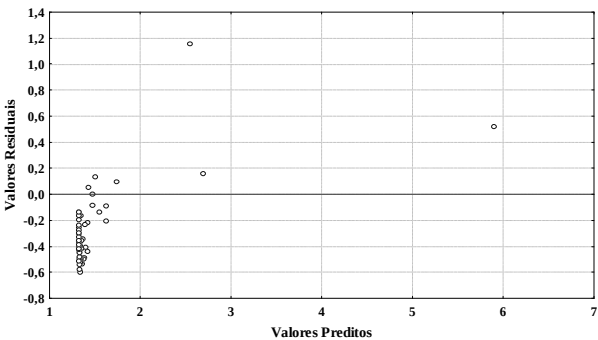
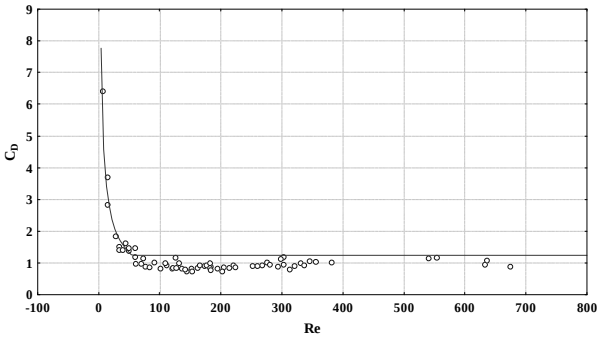


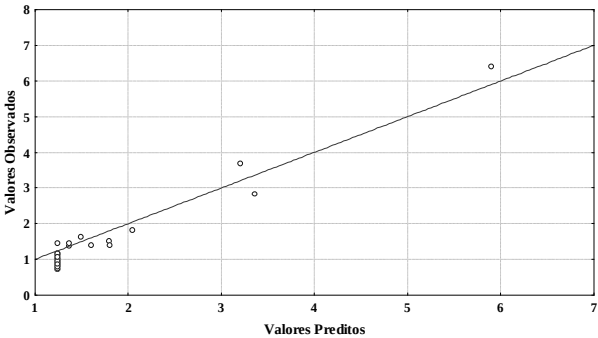
Gráfico de resíduos.

**Equação 3 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + B Re^C) + 1,25^A \right]^D$

|                         | A       | B     | C      | D     |
|-------------------------|---------|-------|--------|-------|
| <b>Parâmetro</b>        | 283,501 | 1,198 | 75,169 | 0,003 |
| <b>Desvio padrão</b>    | 177,795 | 5,473 | 47,229 | 0,002 |
| <b>t(69)</b>            | 1,595   | 0,219 | 1,596  | 1,601 |
| <b>p-level</b>          | 0,116   | 0,827 | 0,006  | 0,114 |
| <b>r<sup>2</sup>(%)</b> | 87,73   |       |        |       |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

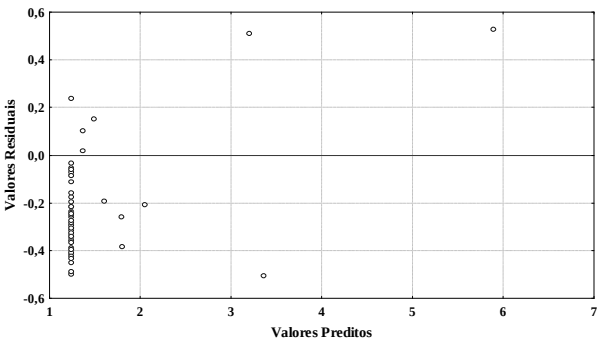
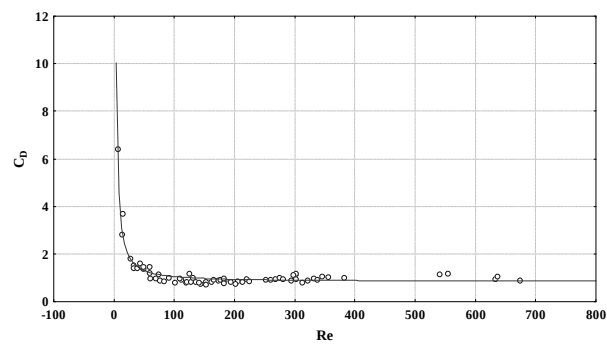


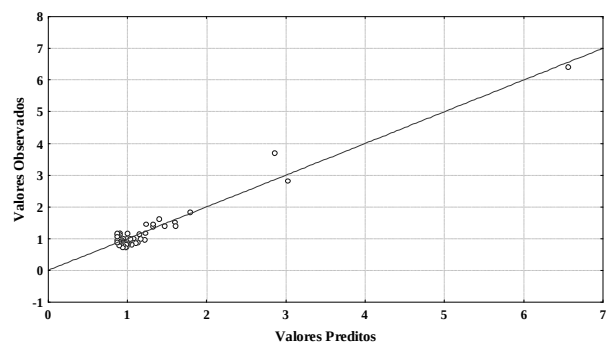
Gráfico de resíduos.

**Equação 4 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + B Re^A) + 1,25^A \right]^C$

|                    | A      | B      | C      |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Parâmetro          | 1,146  | -0,012 | 1,071  |
| Desvio padrão      | 0,092  | 0,003  | 0,067  |
| t(70)              | 12,356 | -3,462 | 15,894 |
| p-level            | 0,000  | 0,000  | 0,000  |
| r <sup>2</sup> (%) | 94,75  |        |        |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

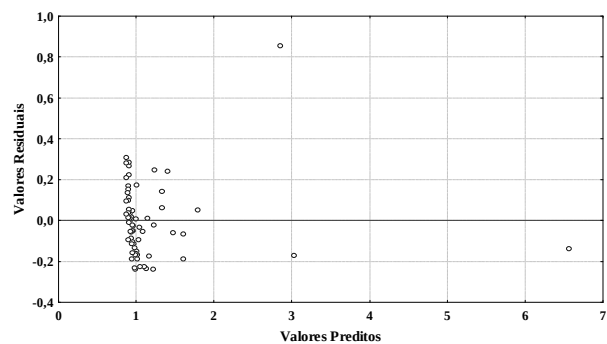
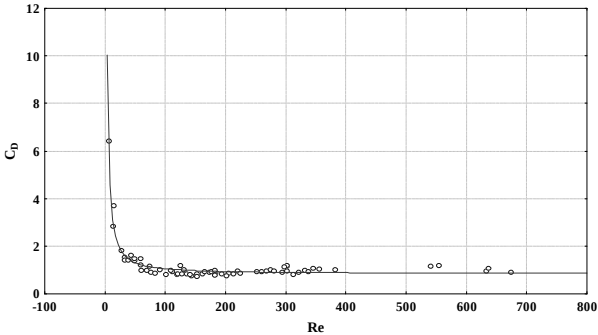


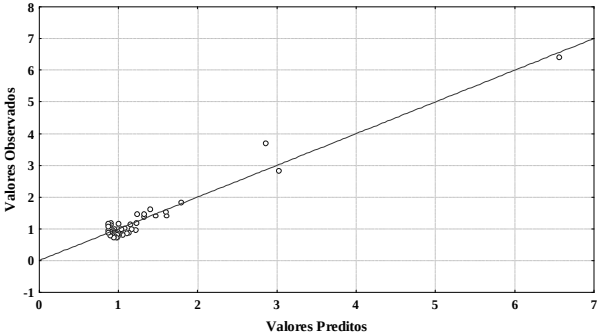
Gráfico de resíduos.

**Equação 5:**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + B Re^C + 1,25 \right]^D$

|                         | A     | B      | C      | D     |
|-------------------------|-------|--------|--------|-------|
| <b>Parâmetro</b>        | 0,809 | -1,308 | -0,191 | 1,535 |
| <b>Desvio padrão</b>    | 0,185 | 0,536  | 0,057  | 0,394 |
| <b>t(69)</b>            | 4,357 | -2,439 | -3,304 | 3,890 |
| <b>p-level</b>          | 0,000 | 0,017  | 0,002  | 0,000 |
| <b>r<sup>2</sup>(%)</b> | 95,13 |        |        |       |



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

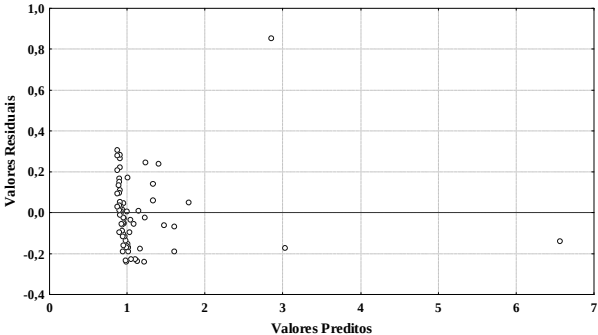


Gráfico de resíduos.

$$\text{Equação 6 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + B Re^C \right]^D$$

|                         | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Parâmetro</b>        | 0,352    | 0,085    | 0,331    | 3,225    |
| <b>Desvio padrão</b>    | 0,183    | 0,063    | 0,075    | 1,575    |
| <b>t(69)</b>            | 1,922    | 1,343    | 4,432    | 2,048    |
| <b>p-level</b>          | 0,059    | 0,184    | 0,000    | 0,048    |
| <b>r<sup>2</sup>(%)</b> | 96,15    |          |          |          |

$$\text{Equação 7 : } C_D = \left[ \left( \frac{A}{Re} \right)^B + C^D \right]^E$$

|                         | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Parâmetro</b>        | 61,002   | 3,907    | 0,916    | 4,000    | 0,204    |
| <b>Desvio padrão</b>    | 6,230    | 1,779    | 0,936    | 46,879   | 0,100    |
| <b>t(68)</b>            | 9,791    | 2,195    | 0,978    | 0,085    | 2,024    |
| <b>p-level</b>          | 0,000    | 0,032    | 0,332    | 0,932    | 0,047    |
| <b>r<sup>2</sup>(%)</b> | 96,041   |          |          |          |          |

$$\text{Equação 8 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + B Re^C) + 1,25^D \right]^E$$

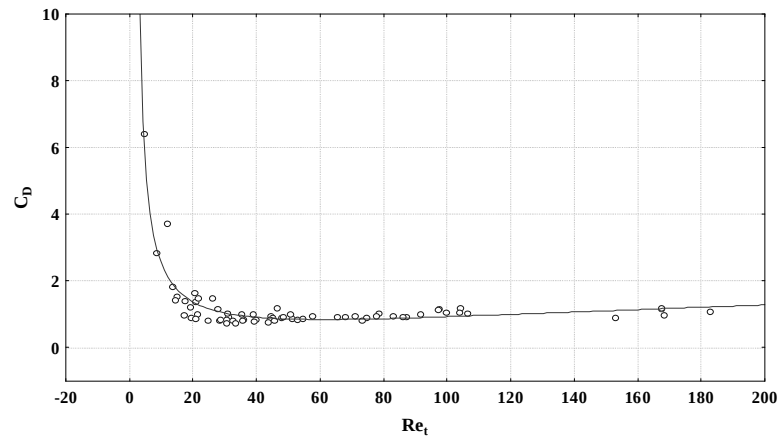
$$\text{Equação 9 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right) (1 + A Re^B) + C^D \right]^E$$

$$\text{Equação 10 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right) (1 + A Re^B) + C \right]^D$$

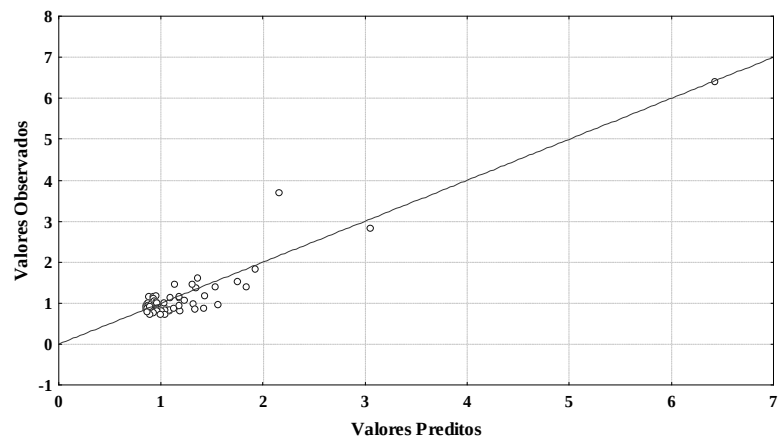
As Equações 8, 9 e 10 acima apresentam matriz mal condicionada, não sendo possível obter os valores de DP, t-student e nível de significância.

# Correlações para previsão do coeficiente de arraste ( $C_D$ ) com base no *aspect ratio*

HAIDER; LEVENSPIEL (1989)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

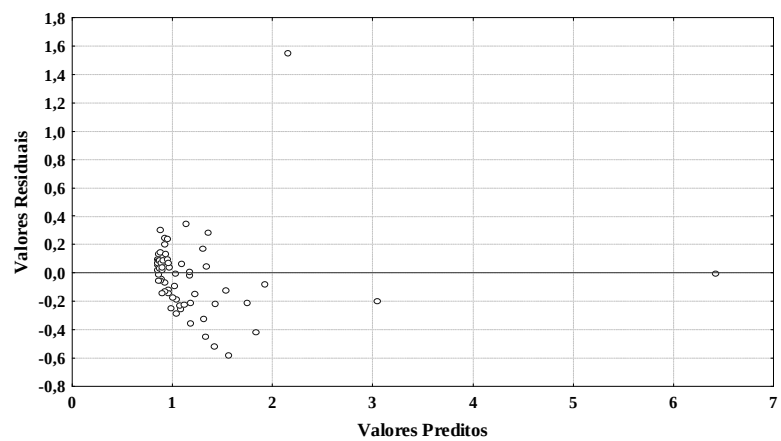
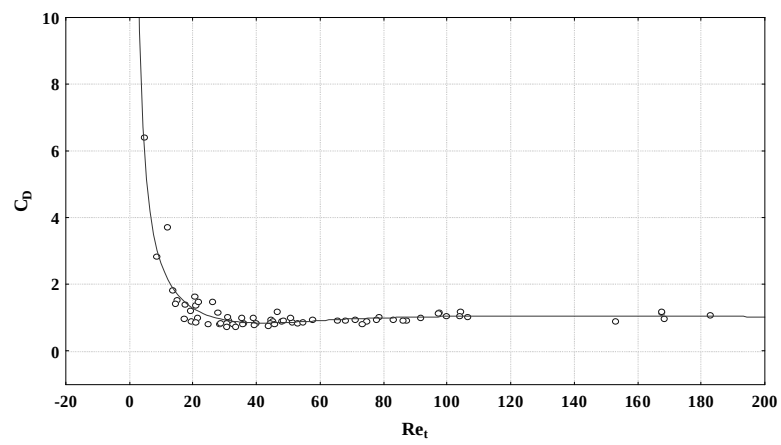
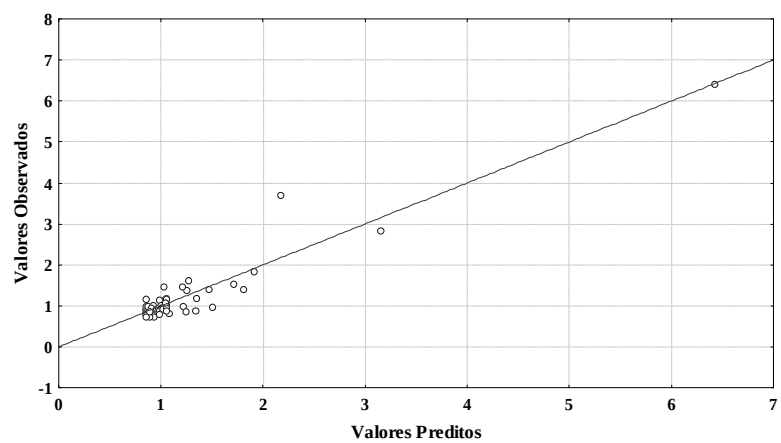


Gráfico de resíduos.

## TURTON; LEVENSPIEL (1986)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

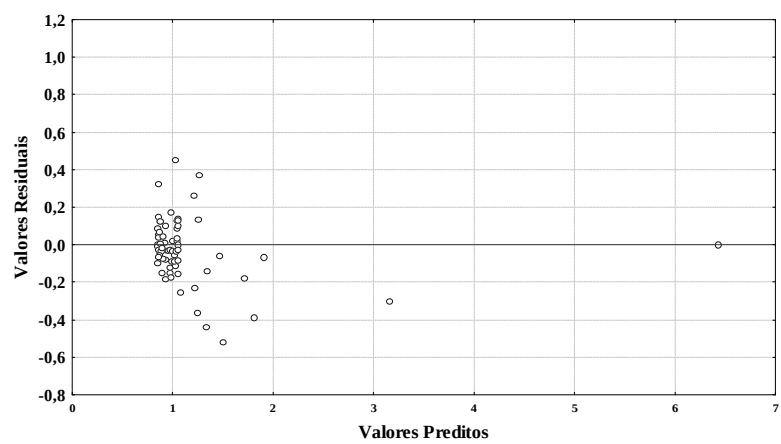
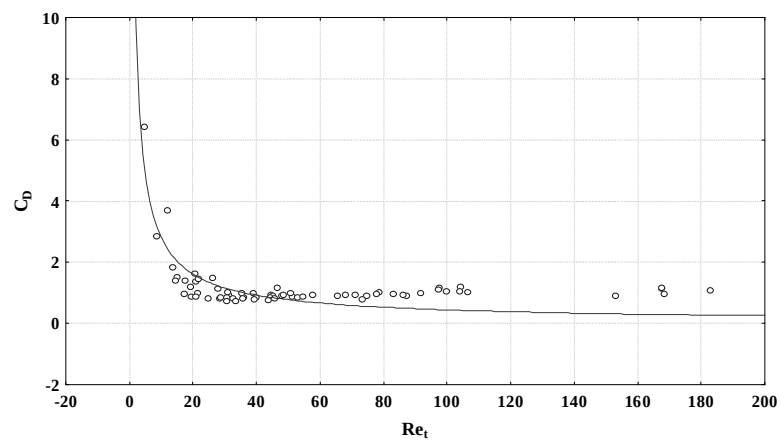
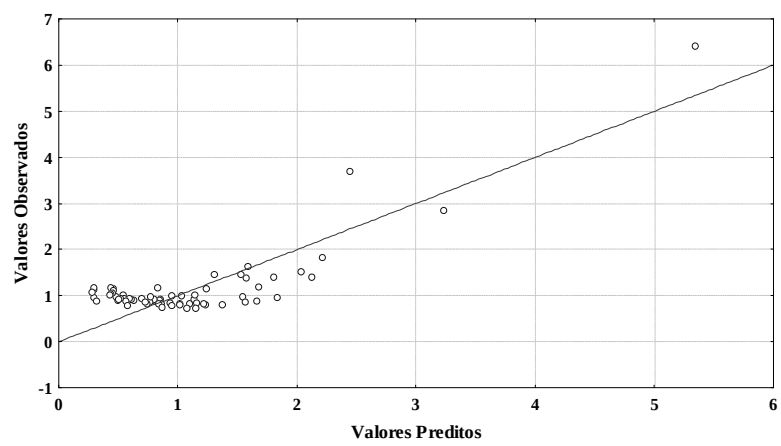


Gráfico de resíduos.

## KHAN; RICHARDSON (1987)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

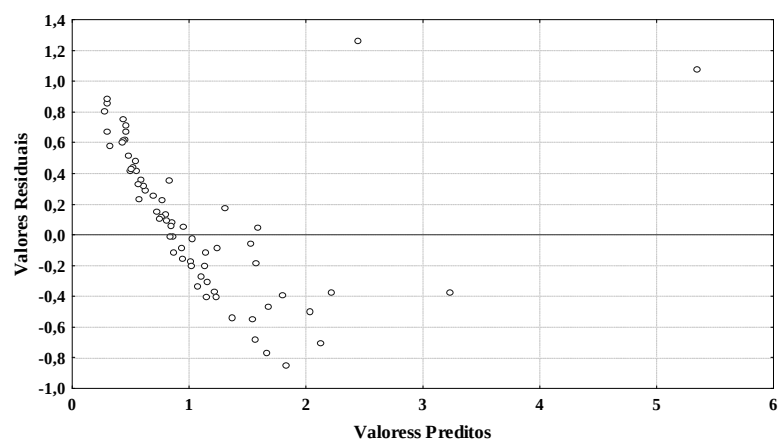
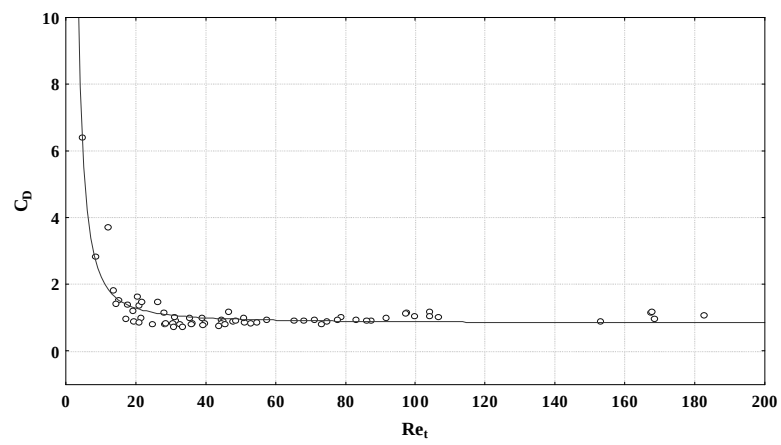
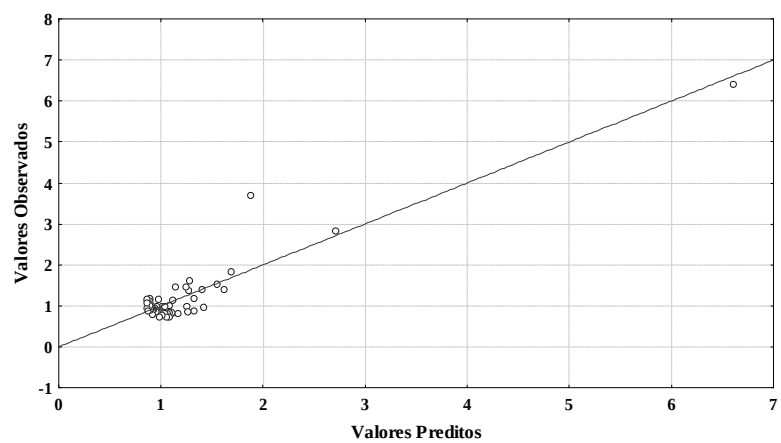


Gráfico de resíduos.

## MORSI; ALEXANDER (1972).



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

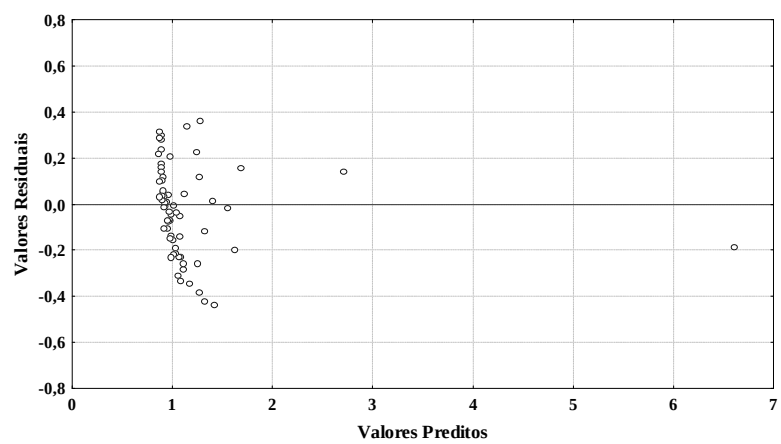
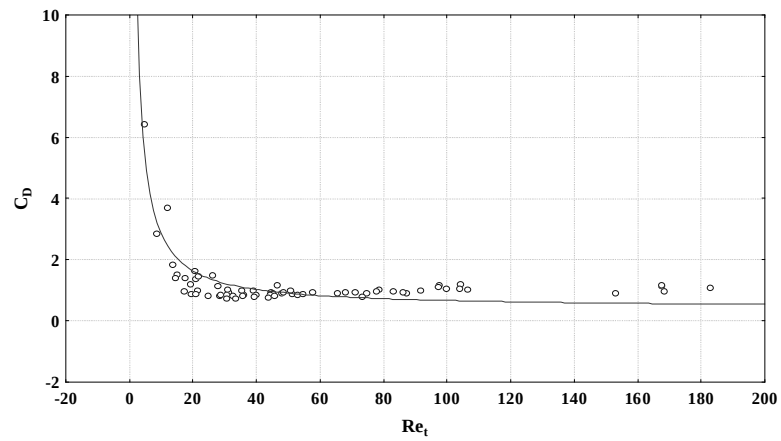
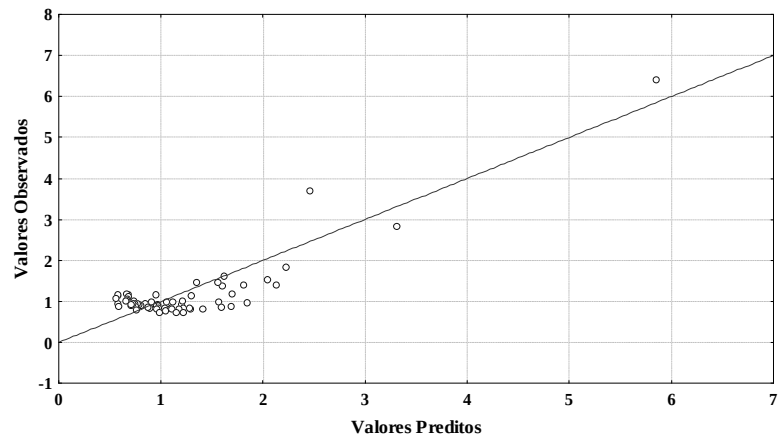


Gráfico de resíduos.

## COELHO; MASSARANI (1996)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

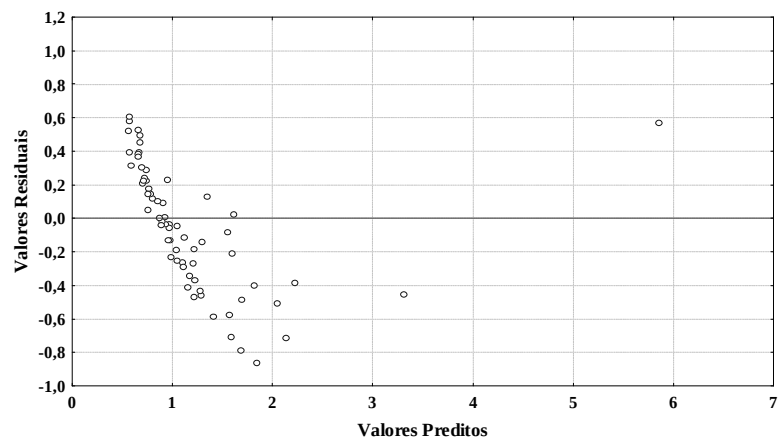


Gráfico de resíduos.

**Modificações na expressão de COELHO; MASSARANI (1996)**

**Equação 1:**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re_t} \right)^n + 1,33^n \right]^{1/n}$

|                         | <b>n</b> |
|-------------------------|----------|
| <b>Parâmetro</b>        | 0,556    |
| <b>Desvio padrão</b>    | 0,116    |
| <b>t(72)</b>            | 4,765    |
| <b>p-level</b>          | 0,000    |
| <b>r<sup>2</sup>(%)</b> | 9,19     |

**Equação 2:**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re_t} \right)^A + 1,33^B \right]^C$

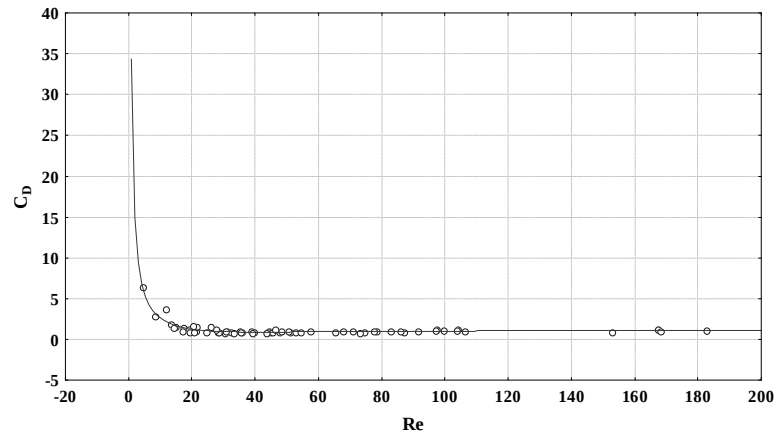
|                         | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| <b>Parâmetro</b>        | 11,863   | -2,101   | 0,094    |
| <b>Desvio padrão</b>    | 15,416   | 2,824    | 0,122    |
| <b>t(69)</b>            | 0,769    | -0,744   | 0,769    |
| <b>p-level</b>          | 0,444    | 0,459    | 0,444    |
| <b>r<sup>2</sup>(%)</b> | 89,26    |          |          |

**Equação 3:**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re_t} \right)^A + 1,33^A \right]^B$

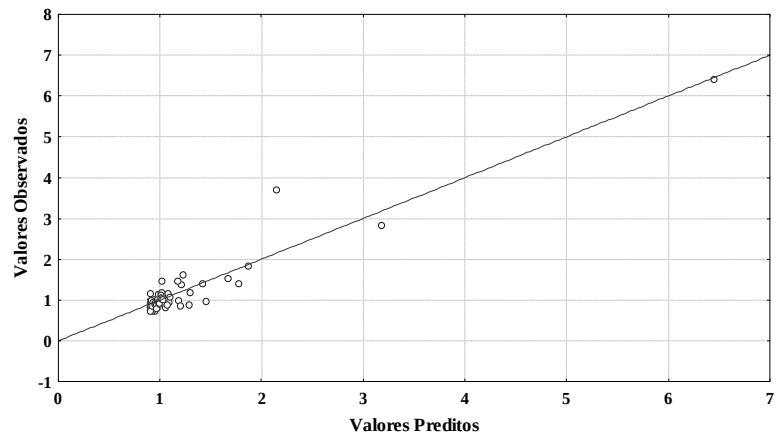
|                         | <b>A</b> | <b>B</b> |
|-------------------------|----------|----------|
| <b>Parâmetro</b>        | 113,042  | 0,009    |
| <b>Desvio padrão</b>    | 339,315  | 0,027    |
| <b>t(71)</b>            | 0,331    | 0,333    |
| <b>p-level</b>          | 0,740    | 0,740    |
| <b>r<sup>2</sup>(%)</b> | 68,00    |          |

## Outras Correlações

**Equação 1 :**  $C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + B Re^C) + 1,33^A \right]^D$



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

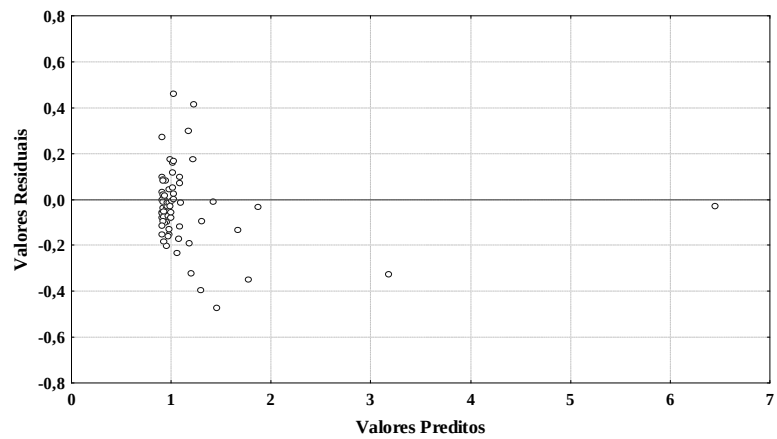


Gráfico de resíduos.

$$\textbf{Equação 2 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + BRe^C) + 1,33^D \right]^E$$

$$\textbf{Equação 3 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A (1 + BRe^A) + 1,33^A \right]^C$$

$$\textbf{Equação 4 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right) (1 + ARe^B) + C^D \right]^E$$

$$\textbf{Equação 5 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right) (1 + ARe^B) + C \right]^D$$

$$\textbf{Equação 6 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + BRe^C + 1,33 \right]^D$$

$$\textbf{Equação 7 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + BRe^C \right]^D$$

$$\textbf{Equação 8 : } C_D = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^A + C^D \right]^E$$

As Equações listadas acima apresentam matriz mal condicionada, não sendo possível obter os valores de DP, *t-student* e nível de significância e algumas apresentaram também coeficientes de correlação não satisfatórios.

## **ANEXO H**

### **Dados experimentais da ascensão de esferas em fluidos não-Newtonianos**

| HEC – Condição 2            |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------|-----------|-------|-------|-----------------|----------------|
| $\rho=0,999 \text{ g/cm}^3$ |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
| Esfera                      | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $d_{\text{médio}}$<br>(cm) | $v_{\text{média}}$<br>(cm/s) | Desvio<br>padrão | T<br>(°C) | K     | n     | Re <sub>t</sub> | C <sub>D</sub> |
| Polipropileno               |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
| 5                           | 0,819                            | 0,989                      | 7,698                        | ± 1,001          | 26        | 0,228 | 0,91  | 40,125          | 3,929          |
| 16                          | 0,234                            | 2,797                      | 61,349                       | ± 0,236          | 26        | 0,228 | 0,91  | 991,730         | 0,740          |
| 18                          | 0,219                            | 2,819                      | 62,879                       | ± 0,449          | 26        | 0,228 | 0,91  | 1027,042        | 0,727          |
| 19                          | 0,207                            | 3,872                      | 73,653                       | ± 0,277          | 26        | 1,660 | 0,91  | 332,978         | 0,739          |
| 21                          | 0,164                            | 3,848                      | 60,200                       | ± 1,133          | 26        | 0,228 | 0,91  | 1300,034        | 1,160          |
| 4B                          | 0,925                            | 1,775                      | 6,132                        | ± 0,339          | 26        | 0,228 | 0,91  | 53,320          | 4,569          |
| Isopor <sup>®</sup>         |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
| 2A                          | 0,330                            | 3,445                      | 60,261                       | ± 1,010          | 26        | 1,660 | 0,775 | 237,861         | 0,775          |
| V                           | 0,069                            | 3,433                      | 66,948                       | ± 0,915          | 26        | 1,660 | 0,775 | 269,857         | 0,929          |
| A1                          | 0,461                            | 3,436                      | 51,376                       | ± 0,395          | 26        | 1,660 | 0,775 | 195,245         | 0,940          |
| A2                          | 0,324                            | 3,436                      | 50,266                       | ± 0,698          | 26        | 1,660 | 0,775 | 190,090         | 1,218          |
| 3A                          | 0,361                            | 3,492                      | 56,097                       | ± 0,494          | 26        | 1,660 | 0,775 | 220,187         | 0,933          |
| 5A                          | 0,463                            | 3,480                      | 54,490                       | ± 0,946          | 26        | 1,660 | 0,775 | 211,919         | 0,793          |

|                |       |       |        |             |    |       |       |          |       |
|----------------|-------|-------|--------|-------------|----|-------|-------|----------|-------|
| 2T             | 0,189 | 3,466 | 67,479 | $\pm 0,256$ | 26 | 1,660 | 0,775 | 274,509  | 0,813 |
| 4A             | 0,274 | 2,370 | 47,317 | $\pm 1,135$ | 26 | 0,228 | 0,91  | 643,310  | 0,972 |
| V              | 0,080 | 2,475 | 54,011 | $\pm 1,807$ | 26 | 0,228 | 0,91  | 726,336  | 1,128 |
| 3T             | 0,225 | 2,487 | 47,476 | $\pm 0,900$ | 26 | 0,228 | 0,91  | 674,609  | 1,140 |
| 4T             | 0,201 | 3,439 | 62,645 | $\pm 0,128$ | 26 | 0,228 | 0,91  | 1225,717 | 0,915 |
| V              | 0,069 | 3,433 | 76,097 | $\pm 0,000$ | 26 | 0,228 | 0,91  | 1512,810 | 0,727 |
| 3M             | 0,252 | 3,457 | 72,327 | $\pm 1,110$ | 26 | 0,228 | 0,91  | 1440,405 | 0,646 |
| <b>Madeira</b> |       |       |        |             |    |       |       |          |       |
| 4              | 0,482 | 2,376 | 27,091 | $\pm 1,470$ | 26 | 0,228 | 0,91  | 351,090  | 2,189 |

| HEC – Condição 3            |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------|-----------|-------|-------|-----------------|----------------|
| $\rho=0,999 \text{ g/cm}^3$ |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
| Esfera                      | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $d_{\text{médio}}$<br>(cm) | $v_{\text{média}}$<br>(cm/s) | Desvio<br>padrão | T<br>(°C) | K     | n     | Re <sub>t</sub> | C <sub>D</sub> |
| Isopor®                     |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
| 4T                          | 0,166                            | 2,500                      | 56,419                       | ± 0,111          | 25        | 0,657 | 0,860 | 331,782         | 0,856          |
| 1 A                         | 0,496                            | 2,450                      | 44,094                       | ± 0,522          | 25        | 0,657 | 0,860 | 246,193         | 0,829          |
| Madeira                     |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
| 4                           | 0,482                            | 2,376                      | 30,840                       | ± 0,964          | 26        | 0,406 | 0,91  | 227,088         | 1,689          |
| 3                           | 0,685                            | 2,379                      | 25,573                       | ± 0,832          | 25        | 0,657 | 0,860 | 128,994         | 1,494          |
| Polipropileno               |                                  |                            |                              |                  |           |       |       |                 |                |
| 5                           | 0,819                            | 0,989                      | 9,495                        | ± 0,667          | 25        | 0,657 | 0,860 | 19,598          | 2,583          |
| 19                          | 0,207                            | 3,872                      | 72,653                       | ± 0,765          | 26        | 0,406 | 0,91  | 901,212         | 0,760          |

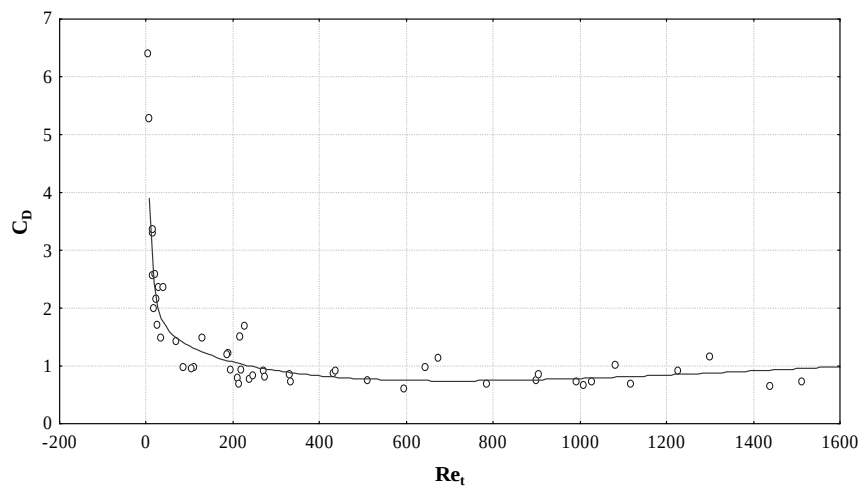
| HEC - Condição 4            |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------|-----------|-------|------|-----------------|----------------|
| $\rho=0,999 \text{ g/cm}^3$ |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
| Esfera                      | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $d_{\text{médio}}$<br>(cm) | $v_{\text{média}}$<br>(cm/s) | Desvio<br>padrão | T<br>(°C) | K     | n    | Re <sub>t</sub> | C <sub>D</sub> |
| Isopor®                     |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
| 4T                          | 0,132                            | 2,500                      | 57,112                       | ± 1,769          | 26        | 0,529 | 0,85 | 431,117         | 0,869          |
| 3 A                         | 0,367                            | 2,440                      | 40,053                       | ± 2,662          | 26        | 0,529 | 0,85 | 280,216         | 1,257          |
| V                           | 0,263                            | 1,493                      | 45,642                       | ± 0,133          | 26        | 0,529 | 0,85 | 214,946         | 0,690          |
| Polipropileno               |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
| 19                          | 0,207                            | 3,872                      | 76,844                       | ± 0,000          | 26,5      | 0,397 | 0,90 | 1009,457        | 0,679          |
| 21                          | 0,164                            | 3,848                      | 69,910                       | ± 3,660          | 26,5      | 0,397 | 0,90 | 904,648         | 0,86           |
| 16                          | 0,234                            | 2,797                      | 61,023                       | ± 1,554          | 26        | 0,529 | 0,85 | 511,819         | 0,752          |
| 17                          | 0,209                            | 2,815                      | 69,333                       | ± 1,981          | 26        | 0,529 | 0,85 | 596,002         | 0,605          |
| 5                           | 0,819                            | 0,989                      | 12,474                       | ± 0,347          | 26        | 0,529 | 0,85 | 34,075          | 1,496          |
| Madeira                     |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
| 3                           | 0,685                            | 2,384                      | 28,467                       | ± 1,987          | 26        | 0,529 | 0,85 | 1,208           | 185,914        |
| 4                           | 0,482                            | 2,376                      | 32,697                       | ± 0,035          | 26        | 0,529 | 0,85 | 0,869           | 217,402        |

| HEC - Condição 5            |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------|-----------|-------|------|-----------------|----------------|
| $\rho=0,999 \text{ g/cm}^3$ |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
| Esfera                      | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $d_{\text{médio}}$<br>(cm) | $v_{\text{média}}$<br>(cm/s) | Desvio<br>padrão | T<br>(°C) | K     | n    | Re <sub>t</sub> | C <sub>D</sub> |
| Polipropileno               |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
| 16                          | 0,234                            | 2,797                      | 63,322                       | ± 0,295          | 27        | 0,255 | 0,96 | 786,080         | 0,698          |
| 21                          | 0,164                            | 3,848                      | 34,116                       | ± 1,097          | 27        | 0,255 | 0,96 | 1081,673        | 1,022          |
| Madeira                     |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
| 3                           | 0,685                            | 2,384                      | 27,780                       | ± 0,440          | 0,27      | 0,255 | 0,96 | 286,234         | 1,269          |
| 4                           | 0,482                            | 2,376                      | 41,936                       | ± 0,885          | 27        | 0,255 | 0,96 | 437,853         | 0,914          |
| Isopor <sup>®</sup>         |                                  |                            |                              |                  |           |       |      |                 |                |
| 2T                          | 0,184                            | 3,466                      | 72,964                       | ± 0,720          | 27        | 0,255 | 0,96 | 1119,164        | 0,694          |

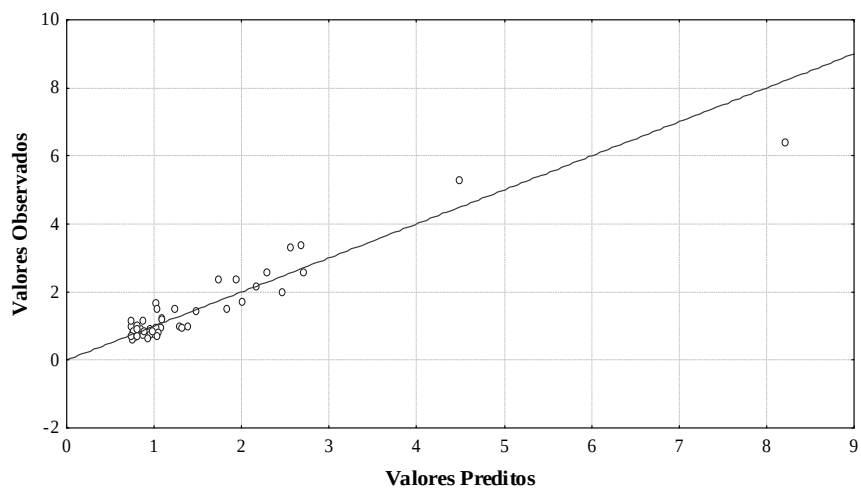
## **ANEXO I**

**Verificações estatísticas do ajuste das correlações encontradas na  
literatura para a ascensão de esferas leves em fluidos não-  
Newtonianos**

### Correlação de TURTON; LEVENSPIEL (1986)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

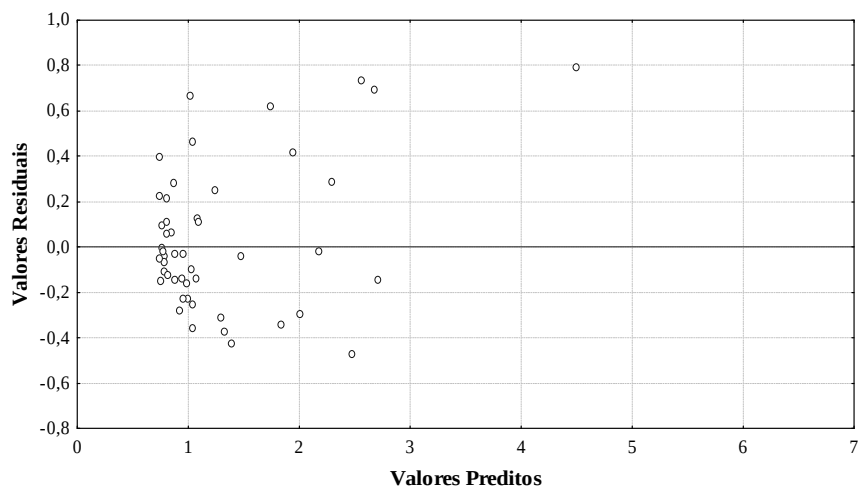
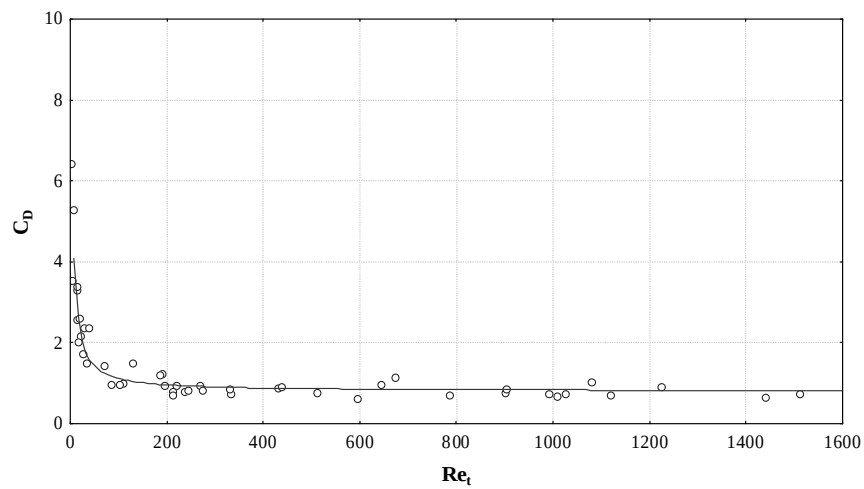
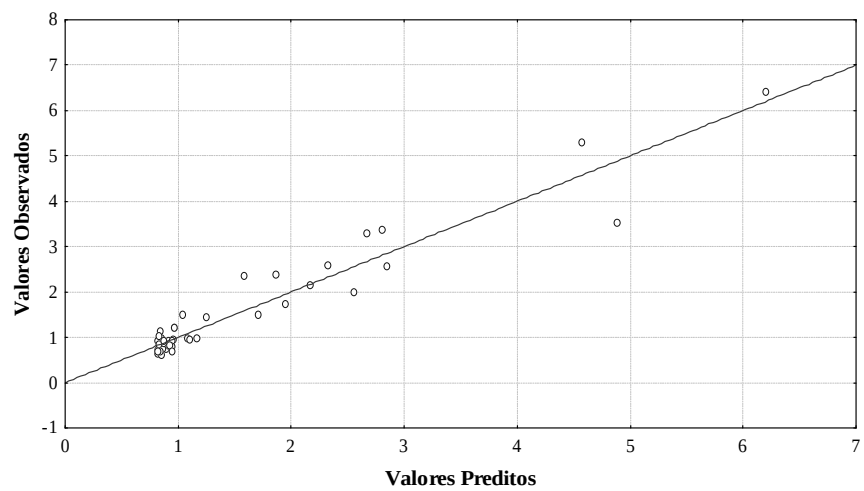


Gráfico de resíduos.

### Correlação de MORSI; ALEXANDER (1972)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

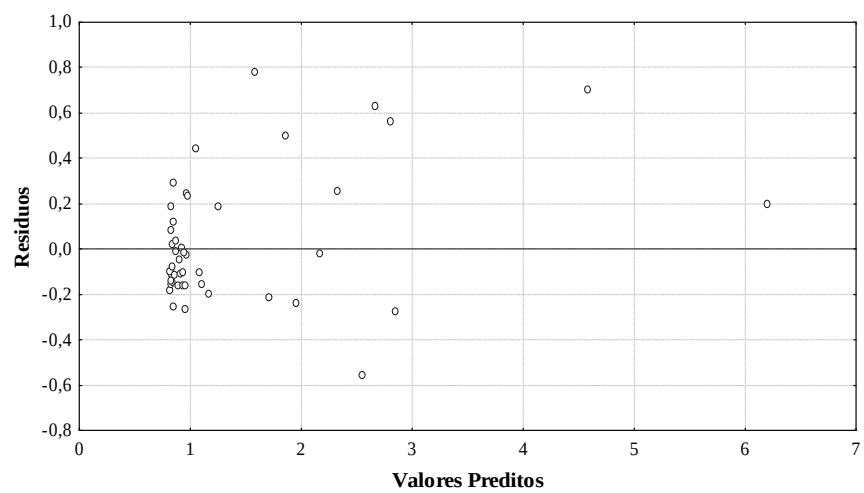
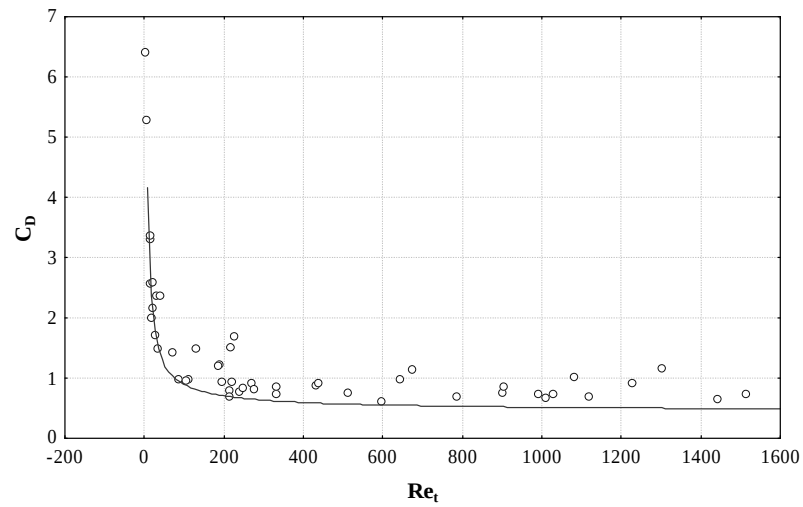
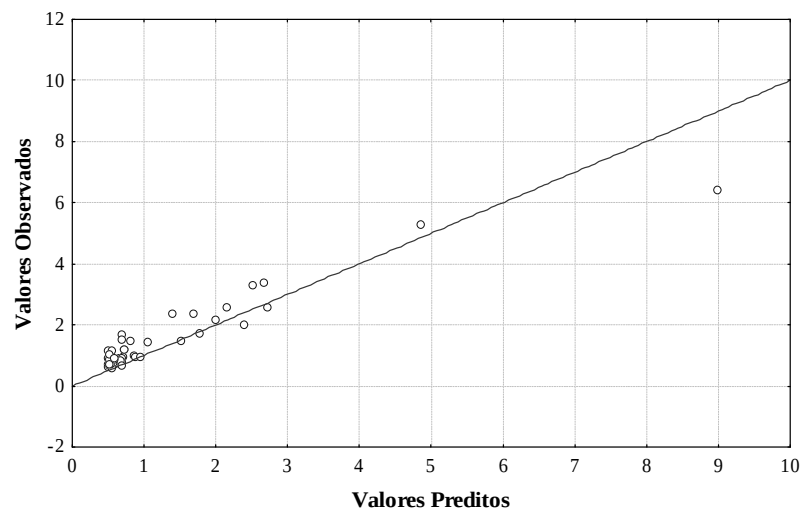


Gráfico de resíduos.

### Correlação de COELHO; MASSARANI (1996)



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

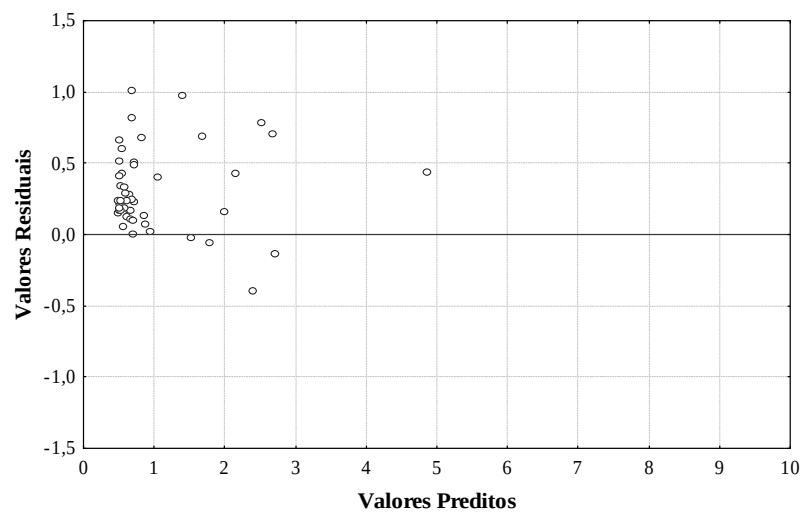
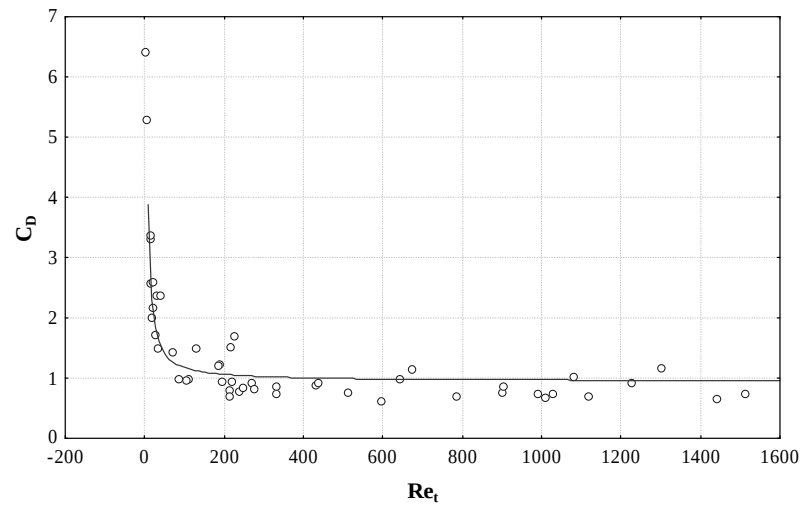
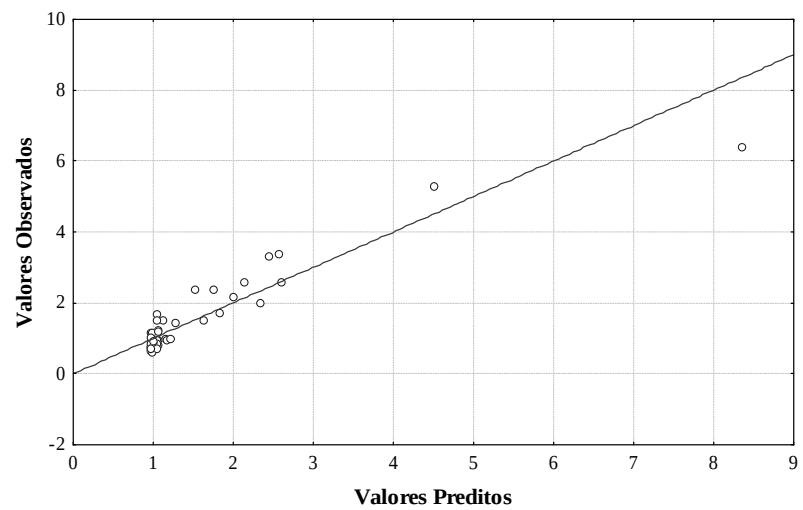


Gráfico de resíduos.

### Correlação de COELHO; MASSARANI (1996) – Modificada



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

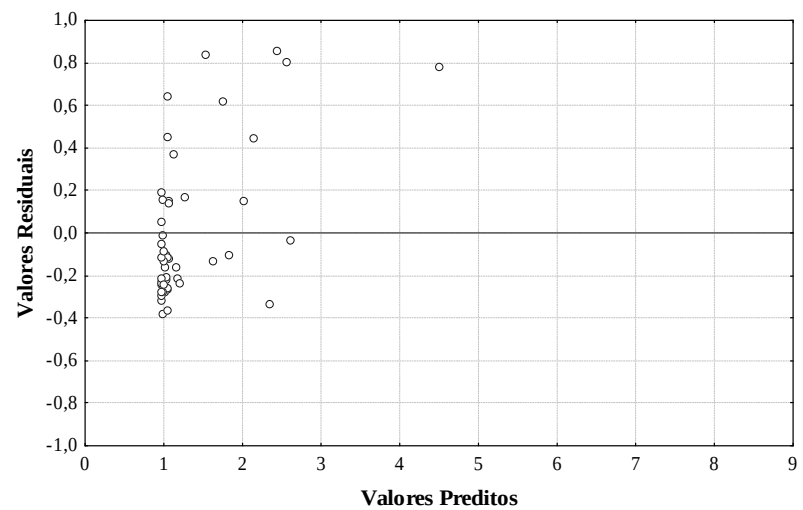
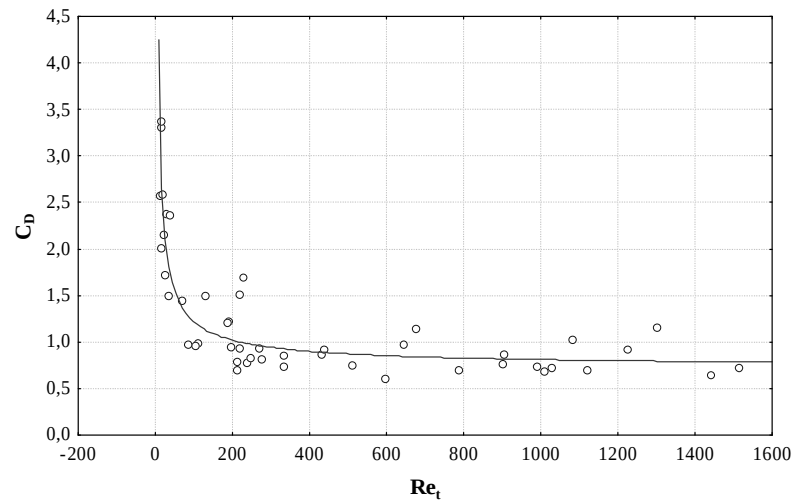
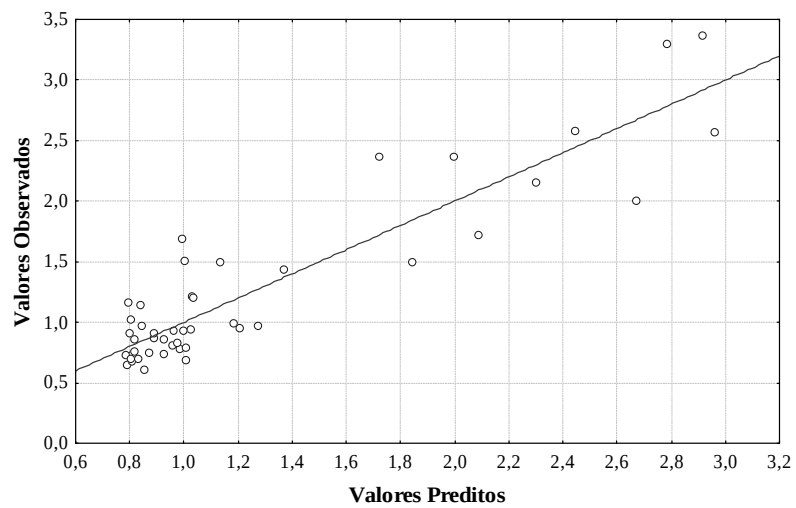


Gráfico de resíduos.

**Correlação similar a de COELHO; MASSARANI (1996) – com 3 parâmetros de ajuste**



Função ajustada aos valores experimentais.



Valores Preditos vs Valores Observados.

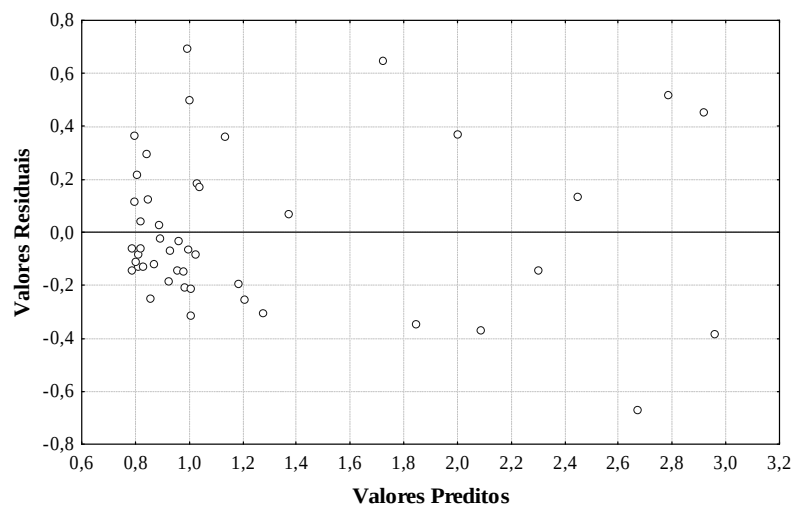
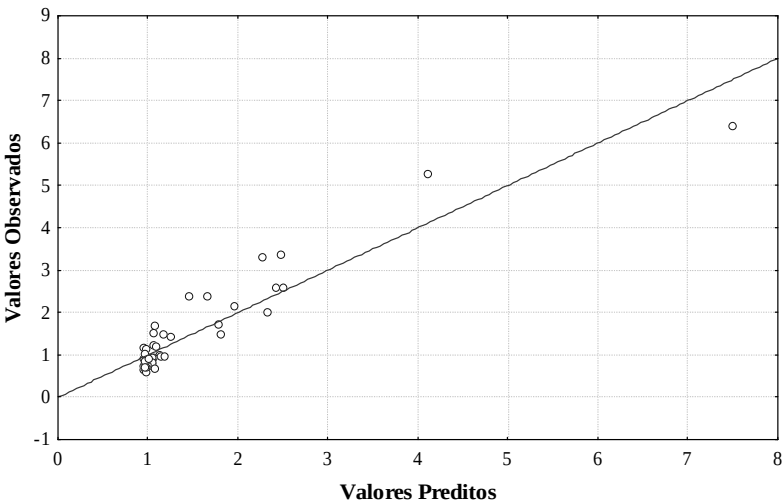


Gráfico de resíduos.

**Correlação de MATJASIC;GLASNOVIC (2001)**



Valores Preditos vs Valores Observados.

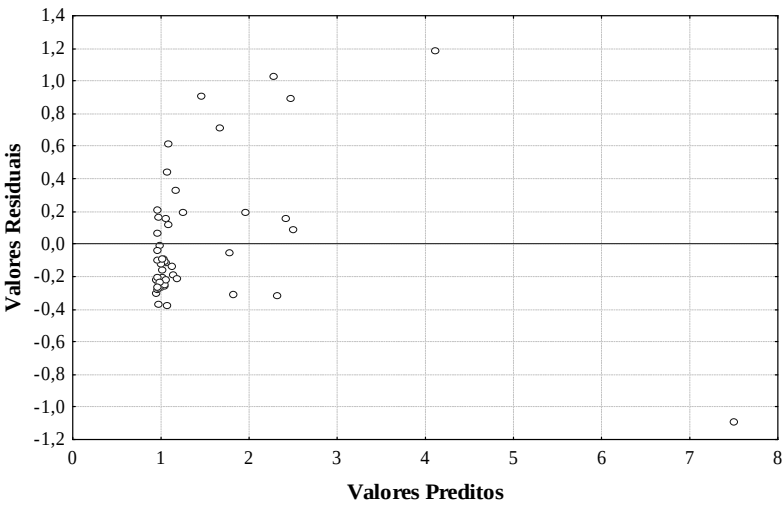


Gráfico de resíduos.

## **ANEXO J**

### **Dados experimentais de bolhas de nitrogênio em fluidos não Newtonianos**

| Carbopol – Condição 2       |                           |                  |                       |                  |                        |                  |           |       |      |       |                   |                     |         |                     |
|-----------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------------------|------------------|-----------|-------|------|-------|-------------------|---------------------|---------|---------------------|
| $\rho=0,999 \text{ g/cm}^3$ |                           |                  |                       |                  |                        |                  |           |       |      |       |                   |                     |         |                     |
|                             |                           |                  |                       |                  |                        |                  |           |       |      |       | $d_{eq}$ em ambos | <i>aspect ratio</i> | $d_h$   | <i>aspect ratio</i> |
| Nº<br>bolhas                | $d_{eq}$<br>médio<br>(cm) | Desvio<br>padrão | $v_{média}$<br>(cm/s) | Desvio<br>padrão | $d_h$<br>médio<br>(cm) | Desvio<br>padrão | T<br>(°C) | K     | n    | $C_D$ | $Re_t$            | $C_D$               | $Re_t$  | $Re_t$              |
| 6                           | 0,721                     | ± 0,000          | 23,740                | ± 0,970          | 0,854                  | ± 0,000          | 27        | 1,768 | 0,60 | 1,670 | 39,131            | 1,190               | 43,314  | 31,937              |
| 10                          | 1,161                     | ± 0,000          | 18,443                | ± 0,134          | 1,512                  | ± 0,000          | 27        | 1,768 | 0,60 | 4,455 | 36,572            | 2,627               | 42,853  | 26,637              |
| 20                          | 1,367                     | ± 0,000          | 25,374                | ± 1,731          | 1,952                  | ± 0,000          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,771 | 66,557            | 1,359               | 82,417  | 43,405              |
| 30                          | 1,388                     | ± 0,000          | 26,499                | ± 1,966          | 2,005                  | ± 0,000          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,580 | 67,614            | 1,236               | 84,309  | 43,488              |
| 40                          | 1,746                     | ± 0,000          | 27,961                | ± 0,000          | 2,462                  | ± 0,000          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,915 | 83,653            | 1,466               | 102,809 | 55,385              |
| 60                          | 1,858                     | ± 0,044          | 32,580                | ± 0,713          | 2,679                  | ± 0,018          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,285 | 107,558           | 1,099               | 133,967 | 69,331              |
| 70                          | 1,889                     | ± 0,000          | 33,676                | ± 0,955          | 2,923                  | ± 0,036          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,174 | 113,781           | 0,908               | 147,853 | 67,384              |
| 80                          | 1,916                     | ± 0,018          | 31,889                | ± 0,150          | 3,035                  | ± 0,015          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,459 | 106,321           | 0,980               | 140,112 | 61,221              |
| 90                          | 1,944                     | ± 0,024          | 32,091                | ± 0,187          | 2,984                  | ± 0,112          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,464 | 108,203           | 1,046               | 139,926 | 64,701              |
| 100                         | 2,010                     | ± 0,000          | 32,813                | ± 0,847          | 3,147                  | ± 0,000          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,437 | 113,885           | 0,994               | 149,034 | 66,500              |
| 110                         | 2,118                     | ± 0,029          | 33,324                | ± 0,537          | 3,171                  | ± 0,034          | 27        | 1,768 | 0,60 | 2,490 | 120,088           | 1,111               | 152,989 | 73,990              |

|       |       |         |        |         |       |         |    |       |      |       |         |       |         |         |
|-------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|----|-------|------|-------|---------|-------|---------|---------|
| 120   | 2,139 | ± 0,000 | 33,712 | ± 0,416 | 3,488 | ± 0,000 | 27 | 1,768 | 0,60 | 2,457 | 122,774 | 0,924 | 164,637 | 68,276  |
| 132   | 2,264 | ± 0,000 | 34,612 | ± 0,691 | 3,537 | ± 0,000 | 27 | 1,768 | 0,60 | 2,532 | 129,411 | 1,037 | 169,132 | 75,763  |
| 140   | 2,230 | ± 0,000 | 35,192 | ± 1,090 | 3,585 | ± 0,000 | 27 | 1,768 | 0,60 | 2,350 | 133,687 | 0,909 | 177,745 | 75,6225 |
| 150   | 2,318 | ± 0,000 | 35,722 | ± 0,846 | 3,707 | ± 0,000 | 27 | 1,768 | 0,60 | 2,371 | 139,721 | 0,927 | 185,185 | 79,537  |
| 160   | 2,351 | ± 0,000 | 37,340 | ± 0,382 | 3,829 | ± 0,000 | 27 | 1,768 | 0,60 | 2,201 | 149,927 | 0,829 | 200,899 | 83,499  |
| 170   | 2,392 | ± 0,000 | 35,427 | ± 0,375 | 3,701 | ± 0,084 | 27 | 1,768 | 0,60 | 2,488 | 140,737 | 1,039 | 182,870 | 83,356  |
| 180   | 2,516 | ± 0,000 | 37,352 | ± 0,997 | 3,829 | ± 0,000 | 26 | 2,206 | 0,65 | 2,354 | 109,407 | 1,016 | 143,744 | 63,381  |
| 190   | 2,500 | ± 0,000 | 37,218 | ± 0,154 | 4,024 | ± 0,000 | 26 | 2,206 | 0,65 | 2,356 | 108,427 | 0,909 | 147,742 | 58,399  |
| 200   | 2,446 | ± 0,000 | 35,819 | ± 0,014 | 4,293 | ± 0,000 | 26 | 2,206 | 0,65 | 2,479 | 101,782 | 0,805 | 145,511 | 49,799  |
| 220   | 2,536 | ± 0,097 | 37,565 | ± 0,008 | 4,317 | ± 0,034 | 26 | 2,206 | 0,65 | 2,349 | 110,904 | 0,810 | 156,598 | 55,625  |
| 230   | 2,756 | ± 0,000 | 38,688 | ± 1,167 | 4,512 | ± 0,000 | 26 | 2,206 | 0,65 | 2,403 | 121,722 | 0,987 | 167,697 | 64,129  |
| 240   | 2,817 | ± 0,000 | 37,264 | ± 0,159 | 4,550 | ± 0,000 | 26 | 2,206 | 0,65 | 2,648 | 117,371 | 1,015 | 160,291 | 62,932  |
| 250   | 2,964 | ± 0,000 | 40,134 | ± 0,187 | 4,561 | ± 0,000 | 26 | 2,206 | 0,65 | 2,402 | 134,098 | 1,014 | 177,456 | 76,575  |
| 260   | 2,980 | ± 0,100 | 38,291 | ± 0,332 | 4,804 | ± 0,206 | 26 | 0,877 | 0,60 | 2,653 | 126,294 | 1,021 | 172,259 | 67,886  |
| 270   | 2,606 | ± 0,000 | 36,672 | ± 0,238 | 4,386 | ± 0,000 | 28 | 0,877 | 0,60 | 2,529 | 313,487 | 0,893 | 428,426 | 167,844 |
| 280   | 2,811 | ± 0,000 | 35,537 | ± 1,038 | 4,434 | ± 0,000 | 28 | 0,877 | 0,60 | 2,905 | 313,932 | 1,168 | 412,664 | 181,683 |
| 290   | 2,877 | ± 0,000 | 34,992 | ± 0,529 | 4,530 | ± 0,000 | 28 | 0,877 | 0,60 | 3,067 | 311,520 | 1,237 | 409,054 | 180,674 |
| 300   | 2,800 | ± 0,000 | 34,501 | ± 1,729 | 4,530 | ± 0,000 | 28 | 0,877 | 0,60 | 3,070 | 300,487 | 1,173 | 401,041 | 168,693 |
| cheio | 4,319 | ± 0,041 | 41,094 | ± 0,843 | 5,952 | ± 0,000 | 28 | 0,877 | 0,60 | 3,338 | 497,835 | 1,758 | 603,467 | 38,805  |

| Carbopol – Condição 3       |                           |                  |                       |                  |                        |                  |           |       |      |       |         |                     |         |                     |
|-----------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------------------|------------------|-----------|-------|------|-------|---------|---------------------|---------|---------------------|
| $\rho=0,999 \text{ g/cm}^3$ |                           |                  |                       |                  |                        |                  |           |       |      |       |         |                     |         |                     |
| $d_{eq}$ em ambos           |                           |                  |                       |                  |                        |                  |           |       |      |       |         | <i>aspect ratio</i> | $d_h$   | <i>aspect ratio</i> |
| Nº<br>bolhas                | $d_{eq}$<br>médio<br>(cm) | Desvio<br>padrão | $v_{média}$<br>(cm/s) | Desvio<br>padrão | $d_h$<br>médio<br>(cm) | Desvio<br>padrão | T<br>(°C) | K     | n    | $C_D$ | $Re_t$  | $C_D$               | $Re_t$  | $Re_t$              |
| 6                           | 0,710                     | ± 0,000          | 23,713                | ± 0,525          | 0,886                  | ± 0,000          | 27,5      | 0,307 | 0,86 | 1,648 | 89,535  | 1,058               | 108,319 | 61,175              |
| 10                          | 0,764                     | ± 0,000          | 22,327                | ± 0,86           | 1,045                  | ± 0,000          | 27,5      | 0,307 | 0,86 | 2,001 | 89,034  | 1,069               | 116,556 | 51,951              |
| 20                          | 0,804                     | ± 0,000          | 25,290                | ± 0,263          | 1,068                  | ± 0,000          | 27,5      | 0,307 | 0,86 | 1,641 | 107,228 | 0,930               | 136,886 | 65,797              |
| 40                          | 1,786                     | ± 0,000          | 27,526                | ± 0,621          | 2,758                  | ± 0,000          | 28        | 0,307 | 0,86 | 3,077 | 234,613 | 1,290               | 340,914 | 111,113             |
| 50                          | 1,879                     | ± 0,000          | 28,083                | ± 0,819          | 2,822                  | ± 0,000          | 28        | 0,307 | 0,86 | 3,110 | 250,744 | 1,379               | 355,739 | 124,574             |
| 60                          | 1,889                     | ± 0,000          | 285,353               | ± 0,559          | 3,045                  | ± 0,000          | 28        | 0,307 | 0,86 | 3,067 | 254,653 | 1,173               | 383,950 | 112,021             |
| 70                          | 1,853                     | ± 0,000          | 30,019                | ± 2,270          | 3,085                  | ± 0,000          | 28        | 0,307 | 0,86 | 2,684 | 267,320 | 0,968               | 414,398 | 111,239             |
| 240                         | 2,846                     | ± 0,000          | 38,343                | ± 0,794          | 4,722                  | ± 0,000          | 27        | 0,307 | 0,86 | 2,527 | 511,059 | 0,918               | 789,909 | 213,924             |
| 250                         | 3,149                     | ± 0,000          | 37,221                | ± 0,356          | 4,324                  | ± 0,000          | 27        | 0,307 | 0,86 | 2,967 | 538,957 | 1,574               | 707,925 | 312,383             |
| 260                         | 3,206                     | ± 0,000          | 37,744                | ± 0,986          | 4,405                  | ± 0,000          | 27        | 0,307 | 0,86 | 2,938 | 556,112 | 1,556               | 730,848 | 321,983             |
| 280                         | 2,983                     | ± 0,000          | 39,839                | ± 0,258          | 4,734                  | ± 0,000          | 27        | 0,307 | 0,86 | 2,453 | 555,879 | 0,974               | 826,942 | 351,184             |

|       |       |             |        |             |       |             |    |       |      |       |         |       |          |         |
|-------|-------|-------------|--------|-------------|-------|-------------|----|-------|------|-------|---------|-------|----------|---------|
| 290   | 3,036 | $\pm 0,000$ | 40,587 | $\pm 0,437$ | 5,044 | $\pm 0,000$ | 27 | 0,307 | 0,86 | 2,406 | 576,458 | 0,872 | 892,020  | 240,743 |
| 300   | 2,781 | $\pm 0,000$ | 36,956 | $\pm 1,068$ | 5,000 | $\pm 0,000$ | 27 | 0,307 | 0,86 | 2,658 | 480,398 | 0,822 | 795,613  | 175,154 |
| cheio | 4,002 | $\pm 0,000$ | 45,462 | $\pm 1,566$ | 6,630 | $\pm 0,000$ | 27 | 0,307 | 0,86 | 2,528 | 831,964 | 0,921 | 1284,246 | 349,155 |