Rafael Curty Teixeira

Escoamento de um fluido viscoplástico em canais de placas paralelas

PROJETO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Professor Orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes

Rio de Janeiro

Dezembro de 2006

Agradecimento

Agradeço ao meu orientador Paulo Roberto de Souza Mendes pela ajuda durante a realização dessa tarefa e principalmente pela confiança depositada.

Agradeço a equipe do laboratório de Mecânica dos fluidos (Flávio Marchesini, Deivid Santos), que sempre estiveram dispostos a me ajudar em todas as etapas do projeto.

Agradeço a minha família pelo suporte e apoio dado durante essa jornada.

Agradeço aos meus amigos de faculdade e aos amigos de longa data pela ajuda e pela amizade, que sempre estiveram presentes nos momentos difíceis que atravessei.

Resumo:

Apresentamos aqui, uma análise numérica do escoamento de um fluido viscoplástico em canais de placas paralelas. Para representar o comportamento mecânico do fluido, utilizamos uma função viscosidade recentemente proposta por de Souza Mendes & Dutra [1]. Analisamos o efeito do parâmetro reológico Jump Number (J) na vazão adimensional e os efeitos da Tensão na parede adimensional, nos perfis de velocidade e de viscosidade adimensionais.

Palavra Chave:

Jump Number,
Escoamento Viscoplástico;
Perfis velocidade viscosidade;
Placas paralelas;

Sumário:

Índice de Figuras
Índice de Tabelas
Índice de Letras

1. Introdução.....1

1.1 – Motivação.....1
1.2 – Objetivo.....2

2. Outros Trabalhos.....2

3. Equacionamento.....3

4. Validação Numérica.....08

5. Resultados.....08

6. Conclusão.....11

7. Bibliografia.....13

8. Anexos.....14

8.1 – Linhas de Comando MatLab.....14
8.2 – Experimento.....19
8.3 – Tabela.....22

Índice de Figuras

Figura 01 – Modelo Plástico Bingham.....03

Figura 02 – Curva Tensão vs. Gamma_ponto do fluido.....04

Figura 03 – Modelo de Placas Paralelas.....05

Figuras 04 – Vazão adimensional vs. Tensão na parede adimensional.....09

Figuras 05 – Vazão adimensional vs. Tensão na parede adimensional.....09

Figuras 06 – Velocidade adimensional vs. Distancia do eixo de simetria a placa adimensional.....10

Figuras 07 – Viscosidade adimensional vs. Distancia do eixo de simetria a placa adimensional.....11

Figuras 08 – Gráfico Tabela de Erro na Vazão vs. Queda de pressão.....19

Figuras 09 – Reservatório com prateleira e placas.....19

Figuras 10 – Prateleira Inox 20

Figuras 11 – Placas paralelas instaladas na prateleira 21

Lista de Tabelas

Tabela 01 – Tabela de Erro da Vazão.....17

Tabela 02 - Tabela de Viabilidade do Projeto.....22

Lista de Símbolos

τ_{yx} - Tensão cisalhante de y para x;

τ_0 - Tensão Limite de escoamento;

τ_y - Tensão cisalhante em y;

τ_w - Tensão na parede da placa;

τ_w^* - Tensão na parede adimensional;

$\frac{du}{dy} = \dot{\gamma}$ - Taxa de deformação;

$\dot{\gamma}_0$ - Taxa de deformação característica limite inferior;

$\dot{\gamma}^*$ - Taxa de deformação adimensional;

$\dot{\gamma}_1$ - Taxa de deformação característica limite superior;

K - índice de consistência;

n - Índice de Power Law;

h - Distancia entre o eixo de simetria e a superfície da placa;

μ_p - Viscosidade plástica;

η_0 - Viscosidade máxima;

L - Comprimento das placas;

J - Jump Number;

Δx - Elemento infinitesimal de x;

Δy - Elemento infinitesimal de y;

Δz - Elemento infinitesimal de z;

y^* - Distancia entre placa e eixo de simetria adimensional;

W - Largura da placa;

Q - Vazão;

Q^* - Vazão adimensional;

u - Velocidade do fluido;

ΔP - Variação de Pressão;

1. Introdução:

1.1 Motivação

A indústria do petróleo é, certamente, a mais fantástica atividade produtiva em toda a existência dos seres humanos. Conhecimento empírico, ciência, tecnologia, engenharia são ferramentas essenciais, críticas para o desempenho das empresas petrolíferas.

Mobilizam-se somas astronômicas de capital e de recursos humanos para sustentar as operações de exploração e produção de óleo e gás. Deter reservas de óleo e gás e dominar tecnologias para produzi-las é, igualmente, fator crítico de desenvolvimento para países periféricos ou emergentes.

Muitas operações nesse ramo, como completação, perfuração, cimentação, entre outras utilizam fluidos não newtonianos, ou seja, fluidos nos quais a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Na realidade, a maioria destes fluidos se enquadra na categoria de **viscoplásticos**. Estes fluidos se comportam como um líquido extremamente viscoso até que uma tensão mínima seja excedida, a **tensão limite de escoamento**. A partir dessa tensão a viscosidade cai dramaticamente.

Exemplos de fluidos viscoplásticos encontrados na indústra do petróleo são inúmeros. Dentre estes podem-se citar certos petróleos, fluidos de perfuração, pastas de cimento, a as emulsões que às vezes se formam durante a produção.

Neste trabalho fazemos uma análise numérica do escoamento de um líquido viscoplástico em canais de placas paralelas. Para essa análise ser mais generalista, adimensionalizamos as equações que regem esta situação física. Variamos parâmetros como a vazão e as propriedades reológicas. Para representar o comportamento mecânico do fluido, utilizamos uma função viscosidade recentemente proposta, a qual se diferencia das demais pelo aparecimento de uma propriedade reológica adimensional chamada Jump Number (J). O parâmetro J caracteriza a existência de uma viscosidade alta e constante (mas finita) abaixo da tensão limite de escoamento, em contraste com as funções tradicionais, que prevêem uma viscosidade infinita nesta faixa. O presente trabalho analisa o efeito deste comportamento mecânico na relação

entre vazão e pressão, e nos perfis de velocidade e viscosidade para o escoamento em estudo.

1.2 Objetivo

Avaliar mecanicamente a influência do Jump Number para a relação entre vazão e pressão, e nos perfis de velocidade e viscosidade em um escoamento em um canal de placas paralelas de um fluidos viscoplasticos, através do software MatLab.

2. Outros Trabalhos:

Podemos encontrar na literatura, alguns trabalhos sobre materiais viscoplásticos e sobre escoamento de fluidos viscoplásticos. Podemos citar aqui, o pesquisador Barnes [2,3] por ter estudado este tipo de comportamento dos fluidos.

Barnes fez uma compreensiva revisão sobre materiais com tensão limite de escoamento, introduzindo o conceito de tensão limite de escoamento aparente para descrever a existência de escoamento antes da tensão limite de escoamento.

Os trabalhos até então apresentados, mencionavam uma viscosidade infinita para esta faixa de tensões baixas, o que corresponde a uma ausência de escoamento nessa faixa.

Foi proposto por de Souza Mendes & Dutra[1] um parâmetro adimensional J (Jump Number) que caracteriza a existência de uma viscosidade alta e constante (mas finita) abaixo da tensão limite de escoamento. E em contraste com as funções viscosidade tradicionais anteriormente comentadas, esse modelo prevê escoamento à tensões abaixo da tensão limite.

Através desta nova função viscosidade pode-se quantificar com maior precisão como a vazão, o perfil de velocidade e a viscosidade variam com o parâmetro adimensional Jump Number e a tensão na parede adimensional, para uma solução aquosa de Carbopol.

3. Equacionamento:

Fluido é uma matéria que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão cisalhante. Na ausência desta, não há deformação. Os fluidos podem ser classificados, de uma forma geral, de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação.

Um elemento infinitesimal do fluido quando submetido a uma tensão de cisalhamento, sofre uma taxa de deformação dada por du/dy (taxa deformação ou gama ponto). Os fluidos nos quais a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação são considerados fluidos não-newtonianos.

No nosso caso, utilizamos os parâmetros reológicos de uma solução aquosa de Carbopol 0,17%. Ele é classificado como um fluido não-newtoniano o qual há um limite ou valor de tensão abaixo da qual a solução de carbopol comporta-se como um sólido. Sendo mais claro, a nossa definição de fluido é válida apenas para materiais que cedem com um valor de tensão igual a zero.

Livros acadêmicos como, por exemplo, Introdução a Mecânica dos Fluidos dos autores Robert W. Fox e Alan T. McDonald[4] recomenda utilizar a seguinte curva de tensão de cisalhamento vs taxa deformação para fluidos viscoplásticos:

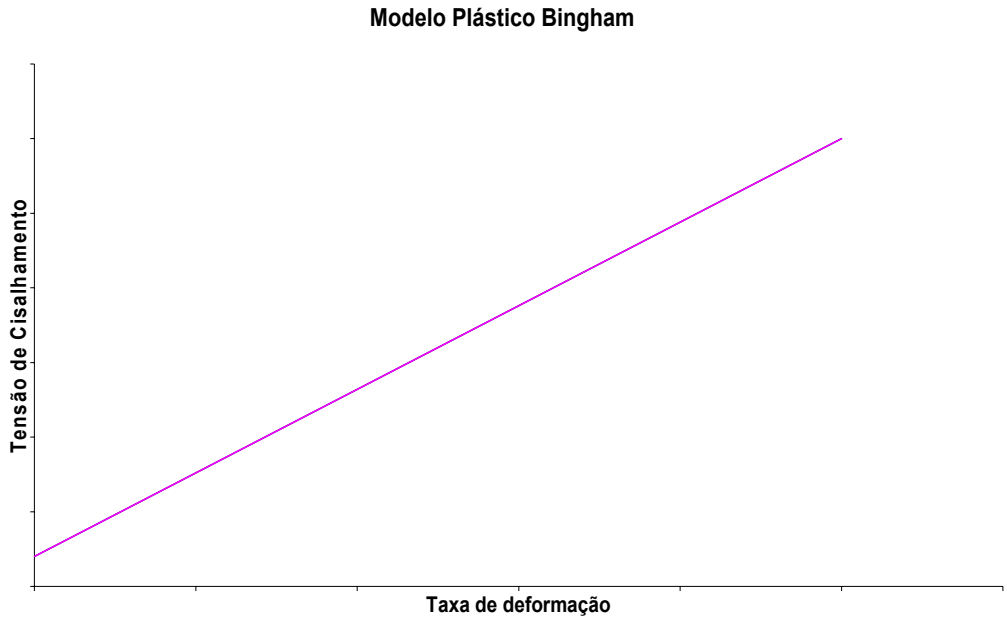

Figura-01 - τ x $\dot{\gamma}$

Essa figura é obtida através da seguinte equação abaixo:

$$\tau_{yx} = \tau_y + \mu_p \frac{du}{dy} \tag{1}$$

Como foi estudada e comprovada por Paulo de Souza Mendes, a equação acima não representa bem um fluido viscoplástico. Sendo proposta a seguinte equação abaixo que representa de uma maneira mais realística este tipo de fluido:

$$\tau_{yx} = \gamma . \left(1 - \exp\left(- \frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau_0} \right) \right) \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} \right) \tag{2}$$

Abaixo segue o gráfico que representa tal fluido:

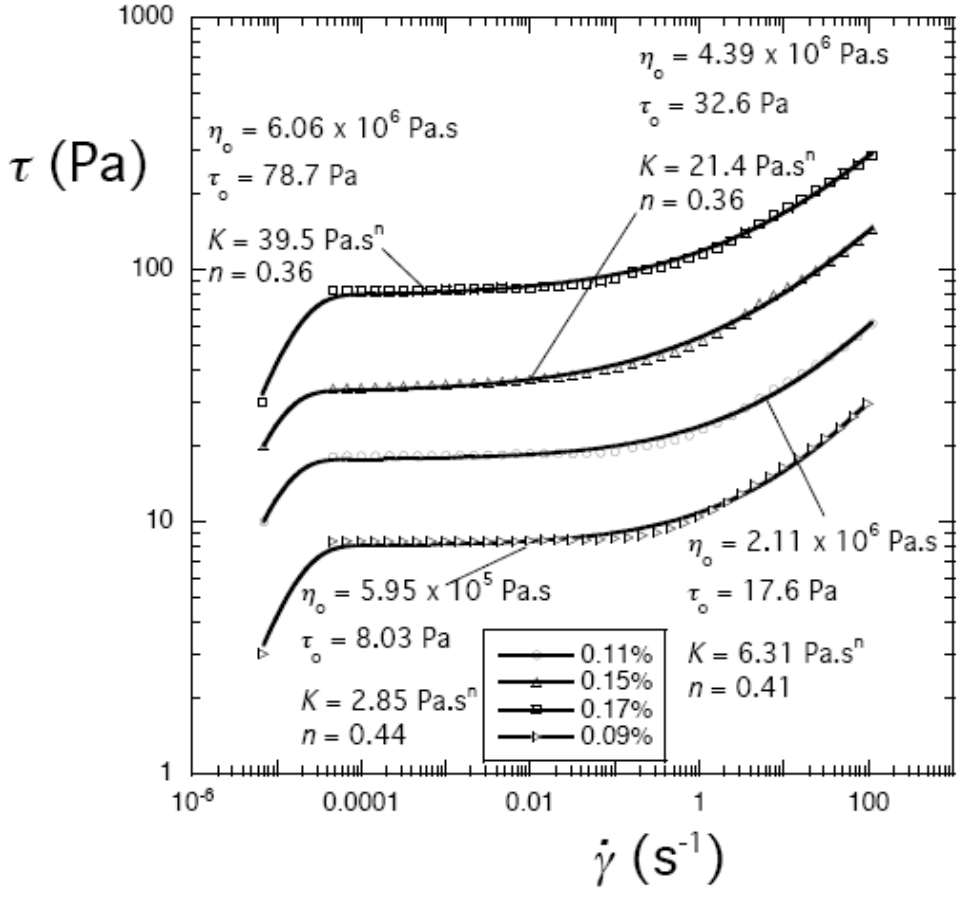

Figura-02 - τ x $\dot{\gamma}$

Para o caso em estudo, escoamento em placas paralelas utilizando um fluido viscoplástico, foi utilizado um programa em Matlab 7.0 devido ao fato da função de viscosidade ser totalmente não linear fazendo com que a solução analítica fosse impossível.

No programa, consideramos o escoamento laminar completamente desenvolvido entre placas paralelas infinitas. As placas estão separadas por uma distancia a, conforme mostrado na figura-03. Elas são consideradas infinitas na direção z, sem variação de qualquer propriedade do fluido nesta direção. Também se admite o escoamento como permanente e incompressível. Em função do não deslizamento nas paredes superior e inferior, podemos dizer que a velocidade na diteção x para estes dois pontos é 0 (zero). As condições de fronteira são:

Em y= -h/2 u=0

Em y= h/2 u=0

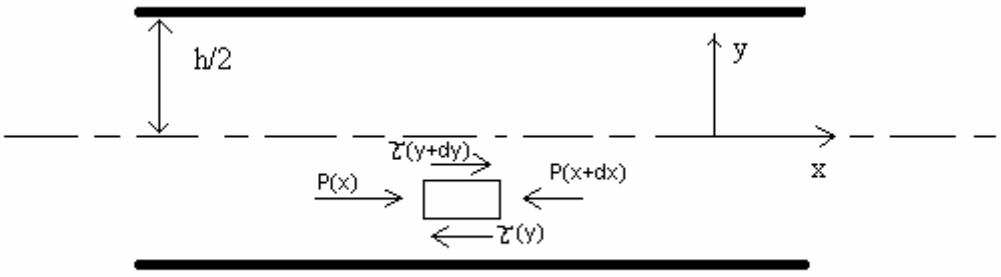

Figura-03 – Modelagem de escoamento entre placas paralelas.

Uma vez que o escoamento é completamente desenvolvido, a velocidade não pode variar com x; então depende apenas de y, de modo que u=u(y). Além disso, não há componente de velocidade na direção y nem na z (v=w=0).

Para a nossa análise, selecionamos um volume de controle diferencial de tamanho dV=dxdydz, e aplicamos a componente x da equação da quantidade de movimento.

Equação básica:

$$0 = p(x)\Delta y\Delta z - p(x+\Delta x)\Delta y\Delta z - \tau_{yx}(y)\Delta x\Delta z + \tau_{yx}(y+\Delta y)\Delta y\Delta z \qquad (3)$$

$$0 = -\frac{dp}{dx}\Delta x\Delta y + \frac{d\tau_{yx}}{dy}\Delta x\Delta y \tag{4}$$

$$\frac{d\tau_{yx}}{dy} = \frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{L} \tag{5}$$

$$\int_0^{\tau_{yx}} d\tau_{yx} = \frac{\Delta p}{L}\int_0^{y} d\,y \tag{6}$$

$$\tau(y) = -\tau_{yx}(y) = \frac{\Delta p}{L}y \tag{7}$$

$$\tau_w = \tau\left(H/2\right) = \frac{\Delta p}{L}\cdot\frac{H}{2} \tag{8}$$

logo, $$\tau = \tau_w \frac{2y}{H} \tag{9}$$

Iremos aqui, adimensionalizar nossa equação para poder gerar resultados que sejam apliáveis para uma ampla variedade de casos.

Parâmetros para a adimensionalização;

$$\tau^* = \frac{\tau}{\tau_0} \tag{10}$$

$$y^* = \frac{2y}{H} \tag{11}$$

Assim temos: $$\tau^* = \tau_w{}^* \cdot y^* \tag{12}$$

Apresentamos aqui, o modelo constitutivo para a função Viscosidade (de Souza Mendes & Dutra, 2004)

$$\tau = \left[1 - \exp\left(-\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau_0}\right)\right]\left(\tau_0 + K\dot{\gamma}^{n}\right) \tag{13}$$

Para a adimensionalização da função viscosidade teremos:

$$\dot{\gamma}_0 = \frac{\tau_0}{\eta_0} \tag{14}$$

$$\dot{\gamma}_1 = \left(\frac{\tau_0}{K}\right)^{1/n} \tag{15}$$

$$\dot{\gamma}^* = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} = \left(\frac{K\dot{\gamma}^n}{\tau_0}\right)^{1/n} \tag{16}$$

$$\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau_0} = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \cdot \frac{\dot{\gamma}_1}{\dot{\gamma}_0} = \dot{\gamma}^* \left(\frac{\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_0}{\dot{\gamma}_0} + 1\right) = (J+1)\dot{\gamma}^* \tag{17}$$

onde: $$J = \frac{\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_0}{\dot{\gamma}_0} \quad \text{(Jump Number)} \tag{18}$$

$$\boxed{\tau^* = \left\{1 - \exp\left[-(J+1)\dot{\gamma}^*\right]\right\}\left(1 + \dot{\gamma}^{*n}\right)} \tag{19}$$

Para a vazão, teremos as seguintes equações:

$$Q = 2\int_0^{H/2} uW dy \tag{20}$$

$$= W\int_0^{H/2} u^* \dot{\gamma}_1 \frac{H}{2} 2dy \tag{21}$$

$$= \frac{W\dot{\gamma}_1}{2} H^2 \int_0^1 u^* d\frac{2y}{H} \tag{22}$$

como, $$\overline{u} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{WH} = \frac{W\dot{\gamma}_1}{2} H^2 \int_0^1 u^* dy^* \tag{23}$$

Logo, $$\boxed{Q^* = \frac{Q}{\dot{\gamma}_1 \cdot \left(\frac{H}{2}\right) HW}} \tag{24}$$

Com os parâmetros adimensionais descritos acima, implementamos um programa, no MatLab, utilizando uma malha de 400 pontos para rodarmos alguns casos específicos para nossa análise de dados posterior.

4. Validação Numérica:

Para a validação do programa, utilizamos um fluido newtoniano com viscosidade de 1 Pa.s, obtemos assim a de curva vazão vs perda de carga e comparou-se com o gráfico gerado a partir da seguinte equação (25) descrita abaixo:

$$Q = \frac{h^3 . \Delta P . W}{12 . \mu . L} \tag{25}$$

Obtivemos erros praticamente desprezíveis na ordem de 0,000001% validando assim o programa, como podemos comprovar com o gráfico demonstrado no final do anexo1.

O passo seguinte realizado foi à obtenção da curva de vazão vs perda de carga em placas paralelas, através do MatLab, sem considerar o fenômeno de deslizamento para os parâmetros reológicos do fluido em que utilizamos para a análise numérica.

5. Resultados:

Foram rodados alguns casos no programa MatLab para nossa analise de dados. Obtivemos então, gráficos com nosso modelo numérico para avaliar como se comporta o J nas curvas de vazão vs. tensão na parede adimensional, como também de que maneira a Tensão na parede adimensional influi nos perfis de velocidade e viscosidade.

Primeiramente iremos apresentar o gráfico de vazão vs. tensão na parede para dois valores de n (índice de Potência), que é um parâmetro reológico do fluido que estamos utilizando.

Para cada valor de n, iremos construir três curvas com três diferentes valores de J.

Para n=1, teremos as seguintes curvas:

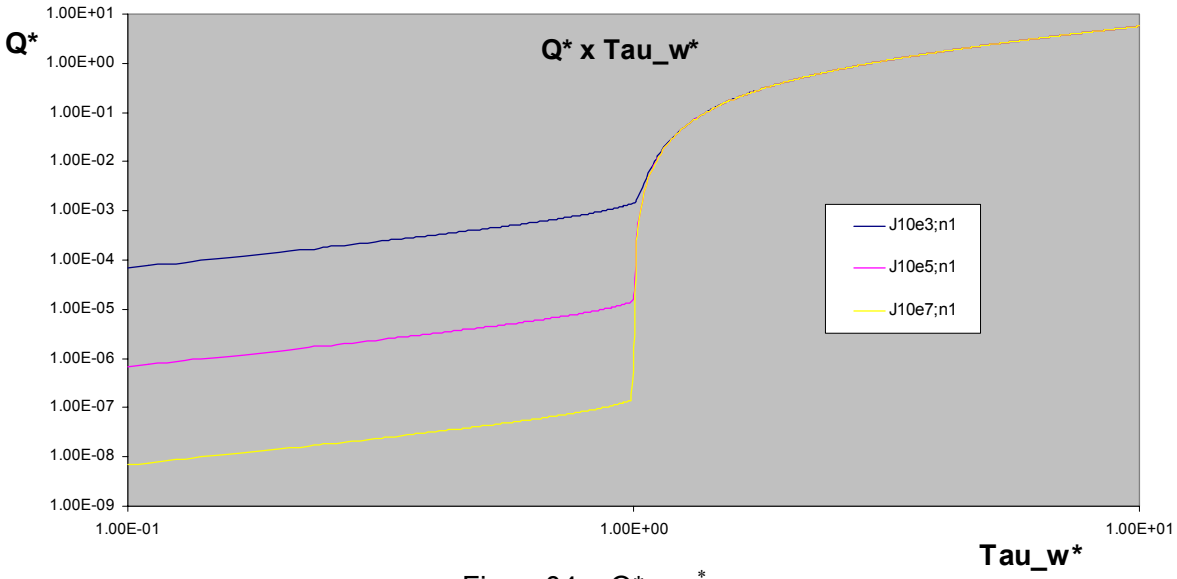

Figura04 – Q* x τ_w^*

Para n=0.5, teremos as seguintes curvas:

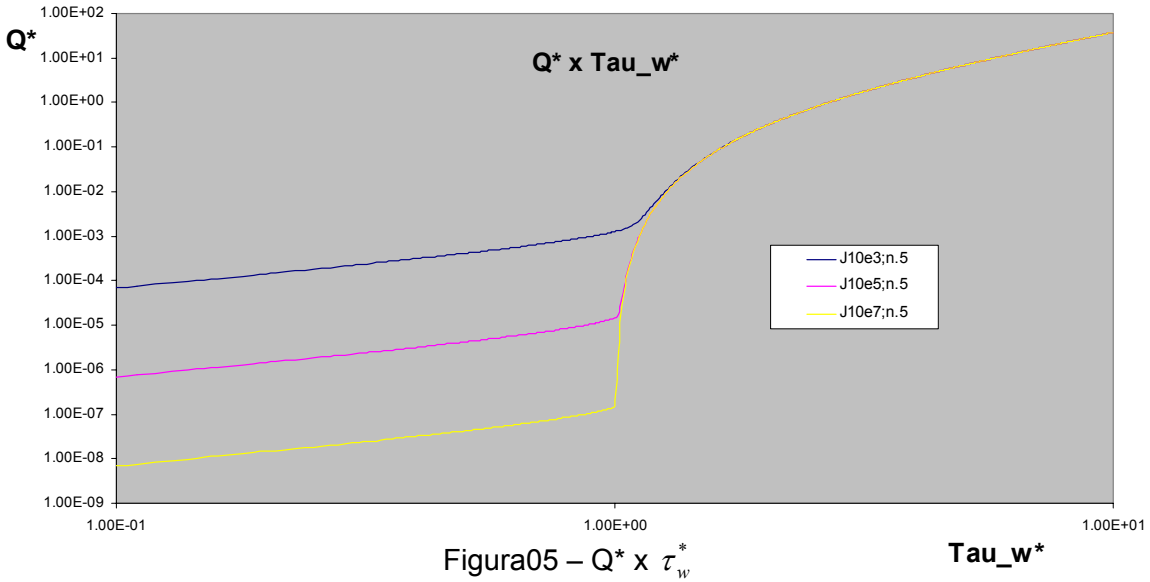

Figura05 – Q* x τ_w^*

Como podemos perceber, pode-se comprovar nos dois casos, que existe uma variação da viscosidade antes da tensão limite de escoamento, além disto, esta varia de acordo com o parâmetro adimensional Jump Number.

Também é nítido, que o J é inversamente proporcional à vazão adimensional. Uma vez que ao aumentarmos o Jump Number percebemos uma queda na vazão.

Vamos agora analisar o perfil de velocidade;

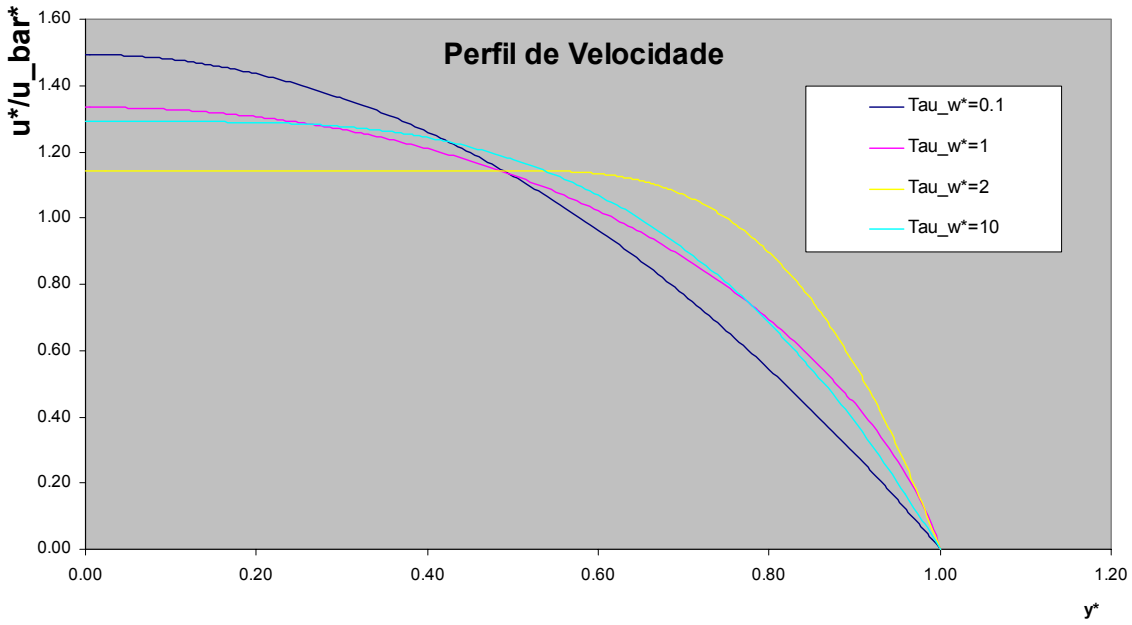

Figura06 - $\frac{u^*}{\overline{u}^*}$ x y*

Podemos perceber neste caso, que existe comportamentos diferente para valores diferentes de tensões na parede adimensional.

Primeiramente o escoamento se comporta de maneira Newtoniana para valores de tau_w*<1. Tendo sua velocidade se comportando como uma hipérbole.

Já para valores próximos a 2, ocorre o Plug Flow que se caracteriza pelo escoamento do fluido como um bloco rígido, só havendo escoamento por cisalhamento nas áreas próximas à parede.

Finalmente para tau_w*>>2, observa-se o comportamento típico do fluido Power Law, que segue a equação de potência mostrada a seguir.

$$\tau = K \dot{\gamma}^{n} \qquad (26)$$

Ao analisar o perfil da viscosidade ao longo do volume de controle, obtivemos o seguinte gráfico:

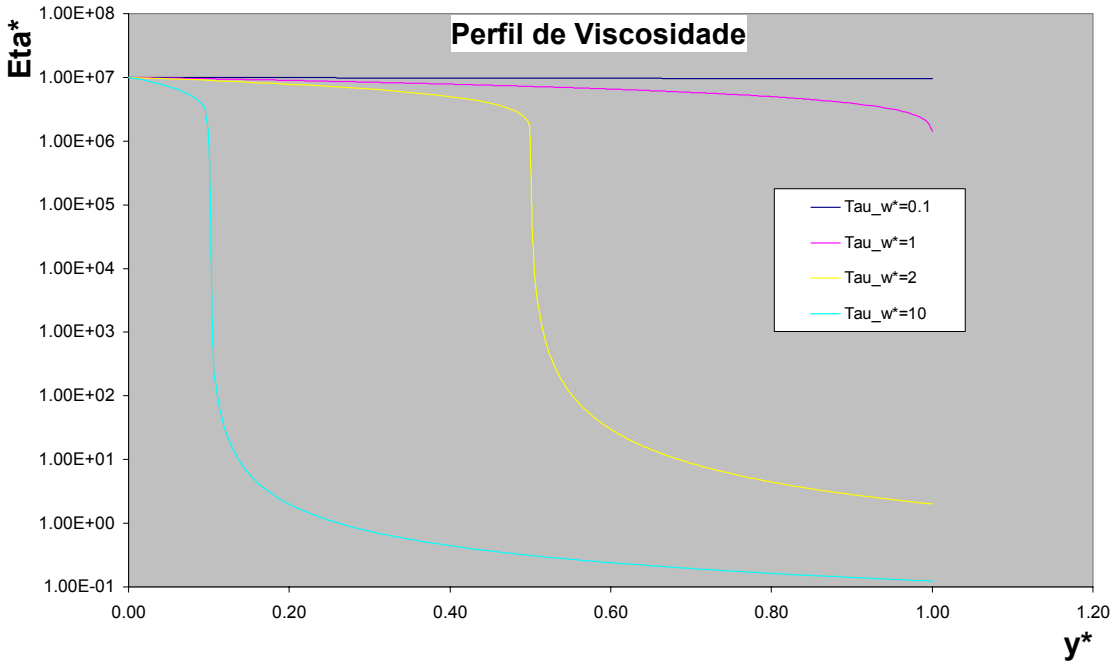

Figura07 – η^* x y*

Da mesma maneira que percebemos no perfil de velocidade, temos aqui três faixas distintas para tau_w*. No caso de tau_w*<1, temos um comportamento Newtoniano com alta viscosidade, pois não há variação da viscosidade ao longo de y*.

Para valores próximos a 2, a viscosidade varia bastante com y*. Temos um patamar constante seguido de uma queda abrupta na viscosidade. Já para o caso de tau_w*>>2, a viscosidade é alta somente em uma pequena região em torno do plano de simetria, não há um patamar onde a viscosidade mantém-se constante.

6. Conclusão:

Nós estudamos o caso de um escoamento de um fluido viscoplástico através de um canal de placas paralelas. Fazendo um balanço da quantidade de movimento conseguimos obter expressões que caracterizavam o escoamento

desejado. Também utilizamos a função viscosidade (13), de de Souza Mendes & Dutra, 2004 para representar o comportamento mecânico do fluido.

Utilizando o método da adimensionalização, foi possível fazer com que as equações e os resultados obtidos sejam aplicáveis para outros casos posteriores. Após a adimensionalização das equações, as implementamos no MatLab, utilizando um malha para avaliar os comportamentos desses pontos com mudanças nos parâmetros reológicos do fluido. Com isso obtivemos soluções numéricas da vazão, velocidade, viscosidade.

Pode-se observar com os resultados, que existe uma variação da viscosidade antes da tensão limite de escoamento e que para tensões adimensionais baixas na parede, o *Jump Number* varia inversamente com a vazão, para um mesmo valor de *n*. Já para valores altos de tau_w*, o escoamento não é influenciado.

Também foi visto que o perfil de velocidade pode ter três características difentes, a saber, Newtoniana, Plug Flow e Power Law. Na faixa de tau_w*< 1, o fluido se comporta como newtoniano, apresentando taxa de deformação proporcional à tensão, enquanto que para tau_w*~2 há um comportamento típico de Plug Flow. Já quando temos tau_*>> 2, temos um comportamento com características Power Law.

Na faixa intermediária 1 < tau_w < 2 ocorrem transições interessantes tanto nos perfis de velocidade e de viscosidade, como também nas curvas de vazão x tau_w. Os comportamentos observados estão em consonância com o modelo constitutivo utilizado, o qual por sua vez representa de maneira apropriada o comportamento mecânico observado experimentalmente em materiais viscoplásticos.

7. Bibliografia:

[1] P.R. de Souza Mendes, E.S.S. Dutra, Viscosity function for yield-stress liquids, Appl. Rheol. 14 (6) (2004) 296–302.

[2] H.A. Barnes, A brief history of the yield stress, Appl. Rheol. 9 (1999)

[3] H.A. Barnes, The yield stress–a review, J. Non-Newtonian Fluid Mech.

[4] Robert W. Fox e Alan T. McDonald

8. Anexos:

8.1 – Linhas de comando MatLab:

Função principal

```
clc;
clear;
close all;
format short e

global tau_zero eta_zero K n tau_w f H

%input

tau_w=1.;  % na parede%
tauend=10.; % limite final%
   dtau=0.001*(tauend-tau_w); %passo do tau%
%
%
% %carbopol 0.17%
%
eta_zero=1.7e6;            % □ínima□ros do reometro %
tau_zero =77.358;          % □ínima□ros do reometro %
K=24.455;                  % □ínima□ros do reometro %
%K=1              % □ínima□ros do reometro %
n=0.36822;      % □ínima□ros do reometro %
H=0.001;         %folga das placas%
W=0.01;          %largura%

% output  = zeros(100,4);
j=1;         %contador ( iniciando com 1)%

while tau_w<tauend

tau_w_ad=tau_w/tau_zero;                %tau_zaro=□ínima □ínima para inicio
escoamento%
y_zero=H/2./tau_w_ad;       %folga para alcançar tau_zero %
```

```
% mesh
Np = 200;
if tau_w_ad <=1

   for i=2:Np+1
      dy(i) = H/2./Np;
   end

else

   for i=2:Np/10+1
      dy(i) = 0.9*y_zero/(Np/10);
   end
   for i=Np/10+2:Np+1
      dy(i)=(H/2.-0.9*y_zero)/(9*Np/10);
   end

end

y  = zeros(1,Np+1);

for i=2:Np+1
   y(i)=y(i-1)+dy(i);
end

%initialization of variables
gamdot = zeros(1,Np+1);
dudy = zeros(1,Np+1);
f = 0;

%obtaining the shear rate and viscosity at each transversal position
for i=2:Np+1
   f = y(i);
   argmax = 1;
   while viscauxplates(argmax) < 0
      argmax = 2*argmax;
```

```
        end
        gamdot(i) = fzero(@viscauxplates,[0 argmax]);
        eta(i)                                                    =(1-exp(-
(eta_zero/tau_zero)*gamdot(i)))*(tau_zero+K*gamdot(i)^n)/gamdot(i);
        dudy(i)=-gamdot(i);

    end

    %viscosity at tube axis
    eta(1)=eta_zero;

    u=zeros(1,Np+1);

    %%integrating the shear rate to get axial velocity (trapezoidal rule)
     for i=1:Np
         u(Np-i+1)=u(Np-i+2)-(dudy(Np-i+1)+dudy(Np-i+2))*dy(Np-i+2)/2;
     end



    %average velocity (trapezoidal rule)
    del_uy = zeros(1,Np+1);

    for i=2:Np+1
        del_u(i)=((u(i)+u(i-1))/2)*dy(i);
    end

    usum=sum(del_u);

    u_bar=(2/(H))*usum;

    mdot=1000*u_bar*H*W;
    eta_w=eta(Np+1);
    gamdot_w=gamdot(Np+1);



    Q=W*u_bar*H;
    DpL=2.*tau_w/H;
    Qteo=W*H^3*DpL/12./K;
```

```
erro=(Q-Qteo)/Qteo;

%    output(j,1)=mdot;
%    output(j,1)=u_bar;
%    output(j,2)=tau_w;
%    output(j,3)=tau_w_ad;
%    output(j,3)=gamdot_w;
%    output(j,4)=eta_w;
   output(j,1)=Q;
%    output(j,2)=erro;
   output(j,2)=DpL;
 %   output(j,4)=Qteo;

tau_w=tau_w+dtau ;
j=j+1;
end

save C:\MATLAB7\work\teste2.xls –tabs –ascii output;
%save C:\Desktop\carb017.xls –tabs –ascii output;
```

Função auxiliar

```
function y = viscauxplates(x)

global tau_zero eta_zero K n tau_w f H

y = (1-exp(-(eta_zero/tau_zero)*x))*(tau_zero+K*(x^n)) – tau_w*2.*f/H;
%y = K*x – tau_w*2.*f/H;
```

Validação do programa

Tabela01- Erro vazão

Q	Erro	DPL	Qteo
1.67E-09	-6.25E-06	2.00E+03	1.67E-09
1.68E-09	-6.25E-06	2.02E+03	1.68E-09
1.70E-09	-6.25E-06	2.04E+03	1.70E-09

1.71E-09	-6.25E-06	2.05E+03	1.71E-09
1.73E-09	-6.25E-06	2.07E+03	1.73E-09
1.74E-09	-6.25E-06	2.09E+03	1.74E-09
1.76E-09	-6.25E-06	2.11E+03	1.76E-09
1.77E-09	-6.25E-06	2.13E+03	1.77E-09
1.79E-09	-6.25E-06	2.14E+03	1.79E-09
1.80E-09	-6.25E-06	2.16E+03	1.80E-09
1.82E-09	-6.25E-06	2.18E+03	1.82E-09
1.83E-09	-6.25E-06	2.20E+03	1.83E-09
1.85E-09	-6.25E-06	2.22E+03	1.85E-09
1.86E-09	-6.25E-06	2.23E+03	1.86E-09
1.88E-09	-6.25E-06	2.25E+03	1.88E-09
1.89E-09	-6.25E-06	2.27E+03	1.89E-09
1.91E-09	-6.25E-06	2.29E+03	1.91E-09
1.92E-09	-6.25E-06	2.31E+03	1.92E-09
1.94E-09	-6.25E-06	2.32E+03	1.94E-09

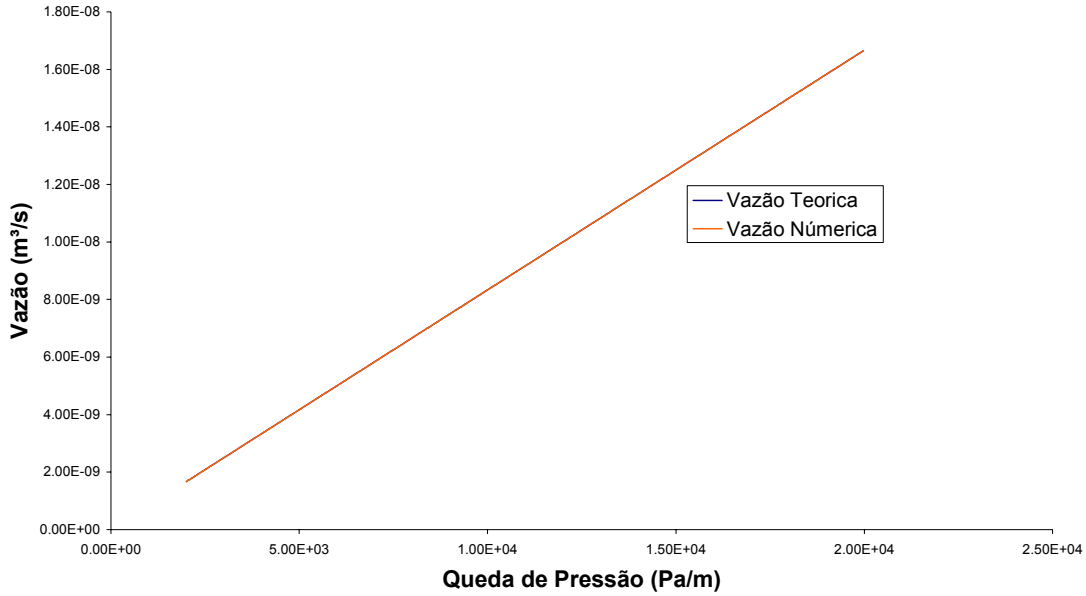

Figura-08 – Vazão vs. Queda de Pressão

8.2 - Experimento

Com o intuito de comparar os dados obtidos numericamente com dados experimentais, foi construido um experimento como se segue:

Primeiramente foi construído um equipamento (figura-05) para escoar o fluido sobre pressão e assim obter a curva de Pressão x Vazão, assim podemos analisar a perda de carga. Com isso, seria possível a comparação dos valores experimentais com os valores das análises numéricas já feitas anteriormente.

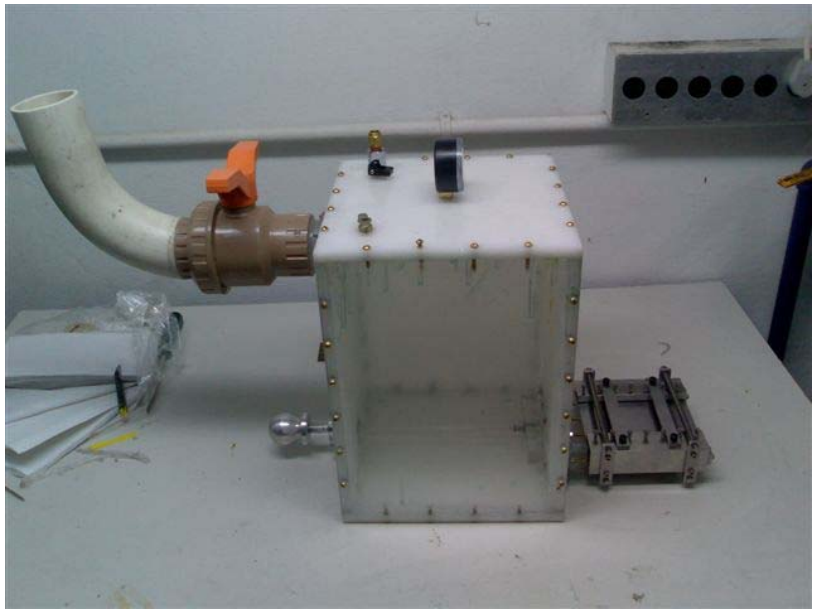

Figura-09: Reservatório com prateleira e placas.

O equipamento que foi construído, apesar de sua simplicidade, é de total importância para esta avaliação e consiste em 3 partes:

Reservatório pressurizado: caixa de acrílico (30cmx20cmx1cm) parafusada, com tampa instrumentada (manômetro, válvula de alívio e válvula de entrada de ar) onde pressurizamos o fluido para escoa-lo por entre as placas paralelas. Também foi construído um bocal para reentrada de carbopol, caso se queira realizar mais de um teste consecutivo.

Prateleira Inox: é a parte apoiada numa bancada, onde prendemos duas placas, de forma que fiquem paralelas e espassadas de 1mm. Tais placas receberam o escoamento do fluido que será analisado. (Figura-06)

Figura-10. Prateleira Inox

Placas: Placas de Aço Inox (100mmx300mmx5mm) utilizada para direcionar o fluido numa superfície plana e conhecida para modelagem e equacionamento.(Figura-07)

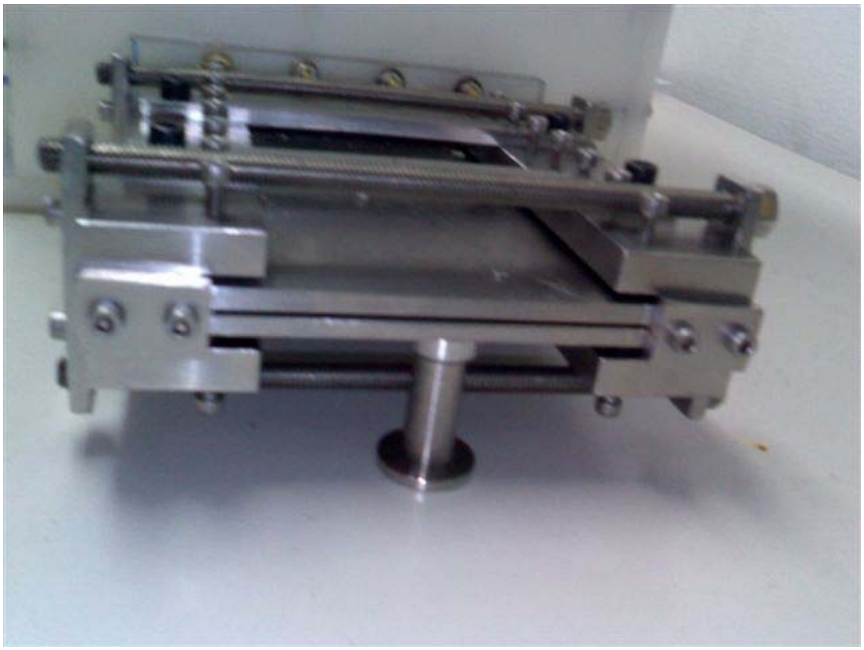

Figura-11. Placas paralelas instaladas na prateleira

O fluido que adotamos para nosso procedimento experimental, foi um fluido viscoplástico chamado carbopol. Neste experimento, utilizamos soluções de Carbopol em água na concentração de 0,17%.

Para avaliarmos uma primeira estimativa e assim começarmos a determinar as características de trabalho, tais como pressões de trabalho, tempo de experimento, volume de fluido, dimensões da placa, entre outros, foi feita uma pequena tabela no Excel (Anexo 2), com a equação de Vazão em volume para placas paralelas e fluido Newtoniano $\frac{Q}{l} = \frac{a^3 \Delta p}{12 \mu L}$ de onde fizemos alguns testes para nossas possibilidades de construção e de teste. Desta forma os seguintes procedimentos foram estabelecidos:

- Cada experimento terá o tempo de 15 minutos;

- Foi estabelecido uma pressão máxima de 3 Bar para nosso experimento. Iremos decrescer 0.5 Bar até a pressão de 0.5 bar para assim obtermos um total de 6 pontos;

- Iremos utilizar um cronômetro digital para tomar os tempos para a vazão de cada experimento;

- Utilizar um béquer para receber o fluido que já estiver saindo das placas paralelas. Este ainda será pesado numa balança digital para medirmos o peso.

Com a densidade do carbopol (998 Kg/m^3), iremos obter o volume do fluido naquela etapa;

- A pressão dentro do reservatório de carbopol, será mantida através de uma linha de ar (PUC) e controlada por um manômetro analógico e uma válvula de alivio;

- O espassamento entre as placas foi definido como sendo de 1 mm, assim poderíamos quantificar com maior precisão o quão importante era esse parâmetro no nosso estudo;

Porém, quando estávamos na fase de testes, ocorreram alguns problemas em relação a vazamentos e conseqüentemente com a pressurização do reservatório, de forma a impossibilitar, uma vez que seria necessário uma nova fabricação do reservatório, a obtenção dos dados.

8.3 – Tabela do Procedimento Experimental:

Tabela02

Q= (a^3 * ∆p * W) / (12 * η * L)				
W (m)	0,1		Q (ml/s)	9E-05
L (m)	0,4		A (m2)	0,0003
a (m)	0,003		v (m/s)	0,3125
∆p (Pa)	100000		V (ml3)	0,1688
η (Pa . s)	0,6		Ŷ	104,17
t (s)	1800			