



# Efeito do escorregamento dos fluidos nas superfícies de medição do reómetro sobre a viscosidade

**Frédéric Oliveira Dos Santos**

Relatório Final do Trabalho de Projecto apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia Industrial**

Outubro de 2012





# Efeito do escorregamento dos fluidos nas superfícies de medição do reómetro sobre a viscosidade

**Frédéric Oliveira Dos Santos**

Relatório Final do Trabalho de Projecto apresentado à  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de **Mestre em**  
**Engenharia Industrial**

**Orientador:**

Prof. Doutor Sérgio Manuel de Sousa Rosa



*"Des chercheurs qui cherchent, on en trouve.  
Mais des chercheurs qui trouvent, on en cherche."*

Autor: Charles De Gaulle



# Agradecimentos

Os meus primeiros agradecimentos vão direcionados a Escola Superior de Tecnologia e Gestão pelas condições que me foram disponibilizadas.

Gostaria também de agradecer:

Ao professor Sérgio Rosa pela orientação exercida ao longo deste trabalho permitindo o seu bom desenvolvimento e conseguindo assim concluir este trabalho de forma clara e objetiva.

Aos meus pais e familiares, que sempre me apoiaram na minha educação e incentivaram as minhas decisões.

A todos os Professores, colegas e amigos que estiveram presentes no decorrer deste trabalho pelas sugestões e caminhos a seguir.



# Resumo

Neste trabalho procedeu-se à investigação do efeito do escorregamento dos fluidos nas superfícies de medição do reómetro sobre a viscosidade. Foi necessário realizar medições da viscosidade de diferentes fluidos em superfícies lisas e rugosas para assim comparar resultados e concluir sobre o efeito da rugosidade e portanto do escorregamento.

Para ser possível realizar esta investigação foi necessário fabricar duas geometrias idênticas para o reómetro que apenas são diferentes em termos de rugosidade da superfície que fica em contacto com o fluido, ou seja, uma lisa e outra rugosa.

Realizaram-se vários testes de viscosidade em diferentes tipos de fluidos com as duas superfícies, para assim averiguar a existência de escorregamento. Foi possível verificar se existe ou não escorregamento pela comparação das curvas características da viscosidade obtida no reómetro e quantificar o erro obtido para diferentes fluidos.

**Palavras chave:** Reologia. Reómetro. Viscosidade. Rugosidade.



# Abstract

This work aimed to investigate the effect of fluid slippage on the measurement surfaces of the rheometer on the viscosity. It was necessary to perform viscosity measurements of fluids with different surfaces, smooth and rough, to be able to compare results and get conclusions of the effect of the roughness and therefore the slip.

To carry out this investigation was necessary to fabricate two identical geometries but different in terms of the roughness of the surface that is in contact with the fluid, one smooth and other rough.

Several tests were performed with different types of fluids in both surfaces, to investigate the existence of slippage. It was possible to verify whether there is slip by comparing the viscosity curves obtained from the rheometer measurements and quantify the error obtained for different fluids.

**Keywords:**Rheology. Rheometer. Viscosity. Roughness.



# Conteúdo

<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Estrutura do relatório . . . . .	1
<b>2 Reologia</b>	<b>3</b>
2.1 Introdução à reologia . . . . .	3
2.2 Lei básica . . . . .	5
2.3 Tensão de corte . . . . .	6
2.4 Taxa de deformação . . . . .	7
2.5 Viscosidade dinâmica . . . . .	7
2.6 Viscosidade cinemática . . . . .	8
2.7 Curvas de viscosidade e de escoamento . . . . .	8
2.8 Parâmetros de viscosidade . . . . .	9
2.9 Substâncias . . . . .	10
2.9.1 Líquidos Newtonianos . . . . .	10
2.9.2 Líquidos não-Newtonianos . . . . .	11
2.10 Condições de contorno . . . . .	12
2.10.1 Escoamento laminar . . . . .	12
2.10.2 Escoamento estacionário . . . . .	13

2.10.3	Sem deslizamento . . . . .	13
2.10.4	Amostras devem ser homogéneas . . . . .	13
2.10.5	Sem mudanças químicas ou físicas na amostra durante o teste . . . . .	13
2.10.6	Sem elasticidade . . . . .	13
2.11	Reometria/viscosimetria absoluta . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Tipos de reómetros e viscosímetros</b>	<b>17</b>
3.1	Reómetros e viscosímetros rotativos . . . . .	17
3.1.1	Comparação entre os diferentes reómetros . . . . .	17
3.1.2	Comparação entre reómetros CS e CR . . . . .	18
3.1.3	Equações . . . . .	19
3.1.4	Critério de qualidade . . . . .	21
3.1.5	Vantagens e desvantagens do sistema de medição cone-placa . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Metodologia utilizada</b>	<b>25</b>
4.1	Reómetro . . . . .	25
4.2	Adaptação ao reómetro rotativo . . . . .	26
4.3	Experiências de validação de resultados . . . . .	27
4.4	Fabricação das novas geometrias . . . . .	31
4.4.1	Ajustes das geometrias . . . . .	33
4.4.2	Execução da rugosidade . . . . .	35
4.5	Testes com geometria lisa e com rugosidade . . . . .	36
4.6	Discussão de resultados . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>41</b>
5.1	Conclusões . . . . .	41
5.2	Trabalhos futuros . . . . .	41
	<b>Bibliografia</b>	<b>43</b>
	<b>Anexos</b>	<b>i</b>

# Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros do teste . . . . .	27
4.2	Parâmetros do teste . . . . .	28
4.3	Parâmetros do teste . . . . .	30
4.4	Parâmetros de maquinagem . . . . .	33
4.5	Parâmetros dos testes sobre a glicerina, sabonete e óleo . . . . .	36



# Lista de Figuras

2.1	Vários tipos de escoamento[5] . . . . .	5
2.2	Escoamento entre duas placas paralelas [5] . . . . .	6
2.3	Curva de escoamento de um líquido Newtoniano [5] . . . . .	8
2.4	Curva de viscosidade de um líquido Newtoniano [5] . . . . .	9
2.5	Vários tipos de comportamento de escoamento [5] . . . . .	11
2.6	Comportamento de líquidos viscosos e elásticos [5] . . . . .	14
3.1	Tipos de reômetro rotativos[5] . . . . .	18
3.2	Sistema cone-placa com cone truncado [5] . . . . .	20
3.3	Testes de amostras viscosas e viscoelásticas em sistemas cone-placa [5] . . . . .	23
4.1	Reômetro rotativo utilizado . . . . .	25
4.2	Geometrias disponíveis . . . . .	26
4.3	Resultado do teste . . . . .	28
4.4	Resultado do teste . . . . .	29
4.5	Resultados dos testes com a geometria CP 1° / 55 mm e CP 4° / 40 mm . . . . .	30
4.6	Dimensões em milímetros da geometria CP 4°/40 mm . . . . .	31
4.7	Torno paralelo . . . . .	32
4.8	Movimentos de uma operação de torneamento . . . . .	32
4.9	Resultados dos testes de viscosidade . . . . .	34
4.10	Erros cometidos em comparação com a geometria original . . . . .	34
4.11	Furadora de bancada . . . . .	35
4.12	Geometrias CP 4°/40 mm maquinadas lisa e com rugosidade . . . . .	35

4.13 Resultados de viscosidade sobre glicerina . . . . .	37
4.14 Erros cometidos na glicerina . . . . .	37
4.15 Resultados de viscosidade sobre sabonete líquido . . . . .	38
4.16 Erros cometidos no sabonete líquido . . . . .	38
4.17 Resultados de viscosidade sobre óleo . . . . .	39
4.18 Erros cometidos no óleo . . . . .	39

# Lista de símbolos

$\tau$	Tensão de corte
$\eta$	Viscosidade dinâmica
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação
$V_{max}$	Velocidade máxima de escoamento
$F$	Força
$A$	Área



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Ao longo destes anos de estudo, constatei que uma das áreas que mais me atraía era a área de Mecânica dos Fluidos. Assim, depois de ter analisado várias propostas de dissertação, resolvi aceitar este projecto de investigação, também por se tratar de um tema novo que até à data ainda não tinha sido investigado.

### 1.2 Estrutura do relatório

Este relatório possui a seguinte estrutura: No primeiro capítulo, apresenta-se a motivação deste trabalho e a estrutura deste relatório; no Capítulo 2 apresenta-se uma revisão da literatura sobre reologia; no Capítulo 3 faz-se uma introdução aos reómetros existentes para assim perceber melhor o seu funcionamento; no Capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento da investigação e no final do capítulo serão apresentados os resultados dos testes acompanhados de discussão; no último capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como possíveis trabalhos de melhoramento e estratégias de investigação a seguir. Em anexos encontra-se o tutorial de iniciação ao reómetro e grande parte dos testes realizados ao longo deste trabalho.



## Capítulo 2

# Reologia

O termo reologia foi inventado em 1920 pelo Professor Eugene C. Bingham, professor da Lafayette College, que define o estudo da deformação de corpo sob a influência de tensões. Corpos, neste contexto, podem ser sólidos, líquidos ou gases. Esta definição foi aceita quando a Sociedade Americana de Reologia foi fundada em 1929. Avanços significativos têm sido feitos em bioreologia, em reologia do polímero e em reologia da suspensão. Houve também uma apreciação significativa da importância da reologia nas indústrias de processamento de químicos. Oportunidades existem, sem dúvida, para aplicações mais amplas de reologia nas indústrias biotecnológicas. Existem agora as sociedades nacionais de Reologia em muitos países. A Sociedade Britânica de Reologia, por exemplo, tem mais de 600 membros composta por cientistas de diferentes origens, incluindo matemáticos, físicos, engenheiros e físico-químicos [2] [5].

### 2.1 Introdução à reologia

A reologia descreve a deformação de um corpo sob a influência de tensões. Corpos, nestes contextos, podem ser sólidos, líquidos ou gases.

- Sólidos ideais se deformam elasticamente. A energia requerida para a deformação é completamente recuperada quando a tensão é removida.
- Fluidos ideais, tais como líquidos e gases, deformam-se irreversivelmente, eles escoam. A energia requerida para a deformação é dissipada sob forma de calor e não pode ser recuperada

pela remoção de tensão.

Os corpos reais não são nem sólidos ideais e nem fluidos ideais. Os sólidos reais também podem se deformar irreversivelmente sob a influência de forças de magnitude suficiente (eles escoam).

Um exemplo é o aço que pode ser forçado a escoar como no caso de chapas de aço quando pressionadas num molde para efetuar a estampagem de peças automóveis.

Somente alguns líquidos de importância técnica ou prática se aproximam dos líquidos com comportamento ideal. A grande maioria dos líquidos apresenta um comportamento reológico que os classifica numa região entre líquidos e os sólidos: eles são elásticos e viscosos e, por isso, podem ser chamados de viscoelásticos. Sólidos podem sofrer tensões diferentes das de corte, enquanto que a água somente pode sofrer tensões de corte.

Sólidos e líquidos reagem diferentemente quando deformados por tensões. No entanto, entre líquidos e gases, praticamente não há diferenças reológicas; os gases são fluidos com viscosidade muito baixa, como, por exemplo, a viscosidade do hidrogênio a 20 °C é um centésimo da viscosidade da água. Uma diferença marcante entre um líquido e um gás é que a viscosidade de um líquido diminui com o aumento da temperatura enquanto que a de um gás aumenta com o aumento da temperatura.

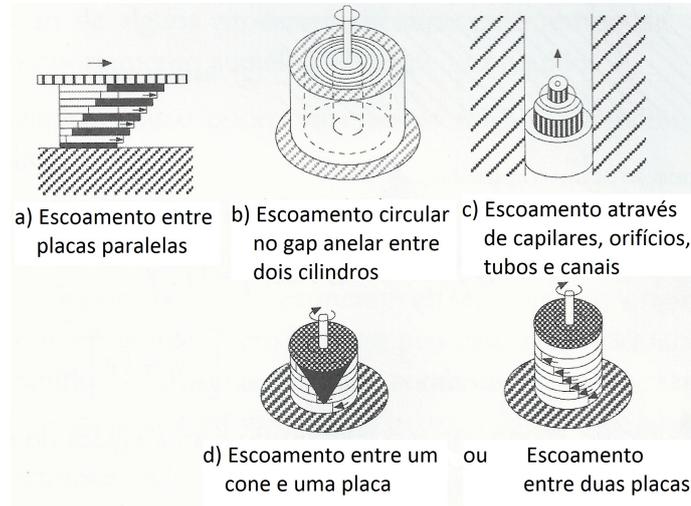
Os equipamentos que medem as propriedades viscoelásticas dos sólidos, semi sólidos e fluidos são chamados de "reômetros". Os equipamentos limitados apenas à medida do comportamento de escoamento fluxo viscoso são descritos como "viscosímetros".

O escoamento laminar devido as tensões de corte em líquidos pode ocorrer de quatro formas diferentes.

**Escoamento entre duas placas paralelas-** quando uma placa se move e outra fica estática. É criado um escoamento laminar em camadas, as quais lembram o deslocamento de um cartão individual em conjunto de cartões (carte de baralho). As condições permanecem similares quando a placa superior fica estática.

**Escoamento no espaço anelar entre dois cilindros coaxiais-** um dos dois cilindros não se move, enquanto o outro pode girar. Esse escoamento poder ser entendido como o deslocamento de camadas concêntricas situadas uma dentro das outras. Um escoamento deste tipo é realizado, por

exemplo, em rolamentos cilíndricos ou em reômetros rotacionais com cilindro coaxial como sistema de medição.



**Figura 2.1:** Vários tipos de escoamento[5]

**Escoamento através de orifícios, tubos ou capilares-** Uma diferença de pressão entre a entrada e a saída de um capilar força um líquido Newtoniano a assumir um perfil de velocidade parabólico. Este assemelha-se a um deslocamento telescópico de camadas líquidas, deslizando umas sobre as outras. Uma variação do escoamento capilar é o escoamento em canais com secção retangular. Se estes forem usados para reometria capilar, a largura do canal deve ser grande em comparação com a altura do canal para minimizar os efeitos laterais da parede.

**Escoamento entre suas placas paralelas ou entre um cone e uma placa de reómetro rotativos-** Quando um dos dois está parado, o outro gira. O escoamento neste modelo assemelha-se a uma espiral de moedas.[5]

## 2.2 Lei básica

A viscosidade dos líquidos requer uma definição dos parâmetros que estão envolvidos no seu escoamento. Então, devem-se encontrar condições adequadas de teste que permitam a medição das propriedades no escoamento. Issac Newton foi o primeiro a expressar a lei básica da viscosidade, descrevendo o comportamento do escoamento de um fluido ideal:

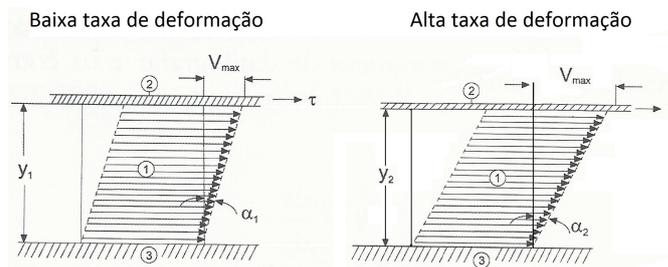
$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

$\tau$  = Tensão de corte

$\eta$  = Viscosidade dinâmica

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação

O modelo de placas paralelas auxilia na definição da tensão de corte e na taxa de deformação.



**Figura 2.2:** Escoamento entre duas placas paralelas [5]

1. Fluido sob tensão de corte
2. Placa em movimento
3. Placa estática

## 2.3 Tensão de corte

Uma força  $F$  é aplicada tangente a área  $A$ , sendo a interface entre a placa superior e o fluido abaixo, gera um escoamento na camada líquida. A velocidade de escoamento pode ser mantida com uma força constante é controlada pela resistência interna do fluido, ou seja, por sua viscosidade.

$$\tau = \frac{F[\text{newton}]}{A[\text{m}^2]} = [\text{Pascal}] \quad (2.2)$$

A unidade pascal tem substituído a unidade inicial  $\text{dyna}/\text{cm}^2$ , a qual era usada para tensões, especialmente na literatura científica.

$$1 \text{ Pa} = 10 \text{ dyna} / \text{cm}^2$$

## 2.4 Taxa de deformação

A tensão de corte ( $\tau$ ) conduz o fluido para um perfil de escoamento especial. A velocidade máxima de escoamento ( $V_{max}$ ) encontra-se na camada superior (figura 2.2).

A velocidade vai diminuindo ao longo que se atravessa o fluido que testado até chegar a zero ( $V_{min} = 0$ ) na camada ligada a placa estática. No escoamento laminar, uma camada infinitamente fina de fluido desliza sobre a outra, assim como ocorre com as cartas de um baralho. O gradiente de velocidade na amostra é chamado de taxa de deformação e é definido como uma diferencial (velocidade pela distância  $y$ ).[5]

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad (2.3)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{m/s}{m} = \frac{1}{s} = [s^{-1}]$$

## 2.5 Viscosidade dinâmica

Ao rearranjar a equação [2.1], a viscosidade dinâmica  $\eta$  é dada por:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.4)$$

$$\eta = \frac{N}{m^2} \cdot s = Pa \cdot s$$

A unidade de viscosidade dinâmica  $\eta$  é o "Pascal.segundo"[Pa.s]. A unidade "mili Pascal. segundo"[mPa.s] também é usada.

$$1 \text{ Pa.s} = 1000 \text{ mPa.s}$$

Vale a pena notar que, antigamente, era usada de "centipoise"[cP] para a viscosidade dinâmica  $\eta$  e actualmente é usada [m Pa.s].

$$1 \text{ mPa.s} = 1 \text{ cP}$$

## 2.6 Viscosidade cinemática

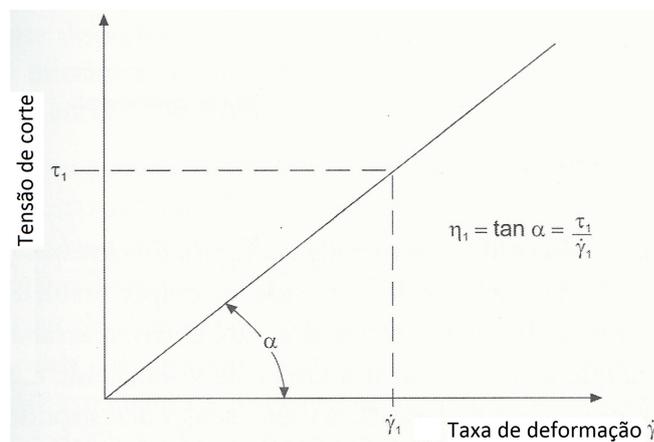
Quando os líquidos Newtonianos são analisados por viscosímetros capilares, a viscosidade é determinada com a unidade de viscosidade cinemática ( $\nu$ ). A força da gravidade age como uma força motriz neste caso. A densidade da amostra é um parâmetro necessário para converter viscosidade dinâmica ( $\eta$ ) em viscosidade cinemática ( $\nu$ ):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [mm^2/s] \quad (2.5)$$

## 2.7 Curvas de viscosidade e de escoamento

A correlação entre a tensão de corte e a taxa de deformação que define o comportamento de fluxo de um líquido é mostrada graficamente em um diagrama de ( $\tau$ ) na ordenada e ( $\dot{\gamma}$ ) na abcissa. Este diagrama é chamado de "curva de Escoamento".

O tipo mais simples de uma curva de escoamento é mostrado abaixo. A viscosidade na equação [2.1] é assumida como constante e independente de ( $\dot{\gamma}$ ).

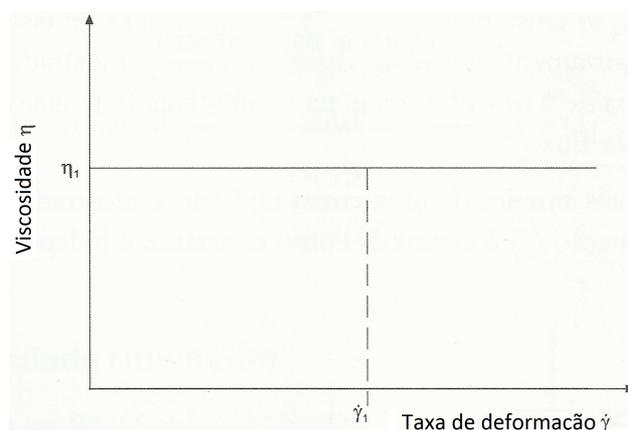


**Figura 2.3:** Curva de escoamento de um líquido Newtoniano [5]

Em matemática e física, é comum usar a abcissa para a variável livre e a ordenada para o resultado. Como reômetros e viscosímetros com velocidade controlada, nos quais a taxa de deformação

é definida e a tensão de corte é medida, são mais comuns em reometria. Em reômetros de tensão controlada, a tensão de corte encontra-se na ordenada. Atualmente quase todos os reômetros fazem uso de computadores que permite a mudança de abcissa e ordenada. Assim sendo, uma curva de escoamento pode facilmente ser calculada com a taxa de deformação no abcissa ou na ordenada.

Outro diagrama muito comum é:  $(\eta)$  versus  $(\dot{\gamma})$ . Este diagrama é chamado de "curva de viscosidade".



**Figura 2.4:** Curva de viscosidade de um líquido Newtoniano [5]

A cada tipo de curva de escoamento corresponde um tipo de curva de viscosidade.[5]

## 2.8 Parâmetros de viscosidade

A viscosidade, a qual descreve a propriedade física de um líquida de resistir ao fluxo induzido pelo cisalhamento, pode depender de seis parâmetros independentes:

$$\eta = \text{função de } S, T, P, \dot{\gamma}, t, E$$

**S** - denota a natureza físico-química de uma substância, por exemplo: se o líquido é água, óleo, mel, ou um polímero fundido, etc.

**T** - está relacionamento à temperatura da substância. A experiência mostra que a viscosidade é fortemente influenciada por mudanças na temperatura. como exemplo, a viscosidade de um óleo mineral sofre um decréscimo de 10% para um aumento de temperatura de apenas 1 °C.

**P** - de "pressão", não é testado tão frequentemente quanto a temperatura. A pressão comprime os fluidos, aumentando a resistência intermolecular. Os líquidos são compressíveis sob influência das altas pressões. O crescimento da pressão tende a aumentar a viscosidade.

$\dot{\gamma}$  - a taxa de deformação é um factor decisivo que influencia na viscosidade de muitos líquidos. O aumento da taxa de deformação pode diminuir ou aumentar a viscosidade.

**t** - o tempo, indica a dependência da viscosidade de algumas substâncias da história de tensões de corte, ou seja, do tempo ao qual uma substância foi submetida a tensões de corte contínuo ou se foi mantida parada antes de ser analisada.

**E** - o campo eléctrico está relacionado com uma família de suspensões cujo comportamento de escoamento é fortemente influenciado pela magnitude de campo eléctrico atuante. Essas suspensões são chamadas de "fluidos electroviscosos" ou "fluidos electoreológicos".[5]

## 2.9 Substâncias

### 2.9.1 Líquidos Newtonianos

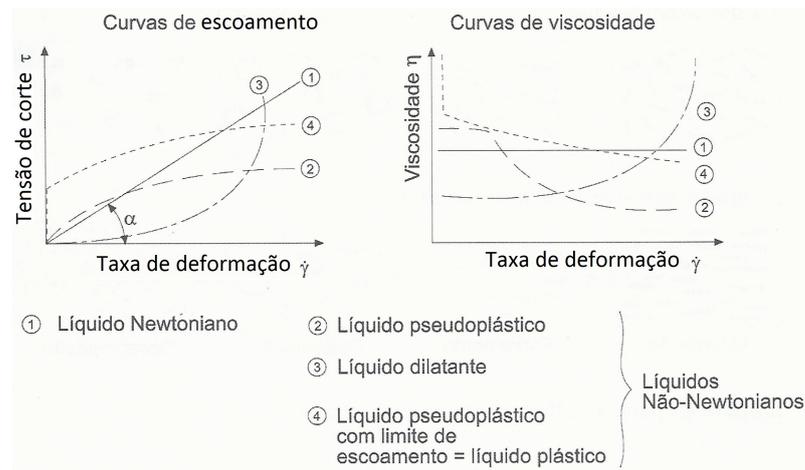
Define-se de líquidos Newtonianos como líquidos que exibem um "comportamento de escoamento Newtoniano" em determinadas condições de tensão e de taxa de deformação .

Newton assumiu que o gráfico da curva de escoamento equivalente da equação [2.1] para um líquido ideal seria uma linha recta, com início na origem e que esta recta subiria com uma inclinação de ângulo  $\alpha$ . Qualquer ponto desta recta define pares de valores para  $\tau$  e  $\dot{\gamma}$ . Dividindo um pelo outro, obtém-se o valor de  $\eta$  (equação 2.4). Este valor também pode ser definido como a tangente do ângulo de inclinação  $\alpha$  da curva de escoamento:  $\eta = \tan \alpha$

Devido ao facto de a curva de escoamento para um líquido ideal ser uma recta, a razão de todos os pares de valores de  $\tau$  e  $\dot{\gamma}$  pertencentes a essa recta é constante. Isto significa que a viscosidade ( $\eta$ ) não é afectada por mudanças da taxa de deformação. Assim todos os esses líquidos são chamados de líquidos Newtonianos (curvas 1 na figura ). Exemplos: água, óleo mineral, betume, melado, etc.[5] [2]

## 2.9.2 Líquidos não-Newtonianos

Todos os outros líquidos que não exibem os comportamentos anteriores de escoamento "ideal" são chamados de líquidos não-Newtonianos. Em quantidade, eles excedem muito aos líquidos ideais.[5]  
[2] [3]



**Figura 2.5:** Vários tipos de comportamento de escoamento [5]

- Fluidos não Newtonianos Independentes do Tempo

**Pseudoplásticos** - São substâncias que, em repouso, apresentam suas moléculas em um estado desordenado, e quando submetidas a uma tensão de corte, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. E quanto maior esta força, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade.

**Dilatantes** - São substâncias que apresentam um aumento de viscosidade aparente com a tensão de corte.

**Pseudoplásticos com limite de escoamento** - Também chamado de Bingham generalizado. Este tipo de fluido também necessita de uma tensão inicial para começar a escoar. Entretanto, a relação entre a tensão de corte e a taxa de deformação não é linear.

- Fluidos não Newtonianos Dependentes do Tempo

Tixotrópicos - Esta classe de fluídos tem sua viscosidade diminuída com o tempo de aplicação da tensão de corte, voltando a ficar mais viscosos com quando esta cessada.

Reopéticos - Este tipo de fluído apresenta um comportamento inverso ao dos tixotrópicos. Desta forma, a viscosidade destes fluidos aumenta com o tempo de aplicação da tensão, retornando à viscosidade inicial quando esta força cessada.

## 2.10 Condições de contorno

O tratamento matemático de problemas físicos de um fluido sendo deformado sob influência de forças de corte resulta em uma equação diferencial muito complexa que, de forma geral, não pode ser resolvida. O problema somente pode resultar em uma solução matemática aceitável quando as condições de testes são mantidas dentro das restrições (em termos matemáticos, condições de contorno). A lei de Newton da reometria somente é válida dentro dessas restrições. A medida da viscosidade exige condições de teste que forneçam:[5]

### 2.10.1 Escoamento laminar

A tensão de corte aplicado deve causar somente escoamento laminar. O efeito da homogeneização em amostras heterogêneas durante os testes não pode ser esperado ou permitido.

Por outro lado, esta exigência evita o uso de um misturador como sensor para a medida de viscosidade absoluta. Os misturadores como máquinas de processar têm seus rotores e reservatórios projectados para criar um fluxo o mais turbulento possível, para misturar completamente todos os componentes. Muito mais energia é exigida para manter um escoamento turbulento do que simplesmente manter um escoamento laminar. Sendo assim, o torque medido não é mais proporcional à viscosidade absoluta da amostra. O escoamento turbulento na medição da viscosidade pode gerar erros de 50%, 100% ou mais.[5]

### **2.10.2 Escoamento estacionário**

Na lei de Newton de reometria, a tensão de corte é definida como suficiente para sustentar uma taxa de escoamento constante. A energia adicional necessária para acelerar ou desacelerar o escoamento não pode ser considerada na equação [2.1].[5]

### **2.10.3 Sem deslizamento**

A tensão de corte aplicada deve ser transmitida da placa em movimento à primeira camada de líquido. No caso da aderência entre a placa em movimento e o líquido não ser suficiente para transmitir a tensão de corte, a placa em movimento desliza sobre a amostra de líquido parado desde modo qualquer resultado da teste será insignificante.[6]

### **2.10.4 Amostras devem ser homogêneas**

Esta exigência significa que a amostra deve reagir de forma uniforme a tensão de corte. Se a amostras são dispersões ou suspensões, então, todos os ingredientes, gotas ou bolhas devem ser bem pequenas em relação à espessura da camada de líquido, ou seja, elas devem estar distribuídas homogeneamente.[5]

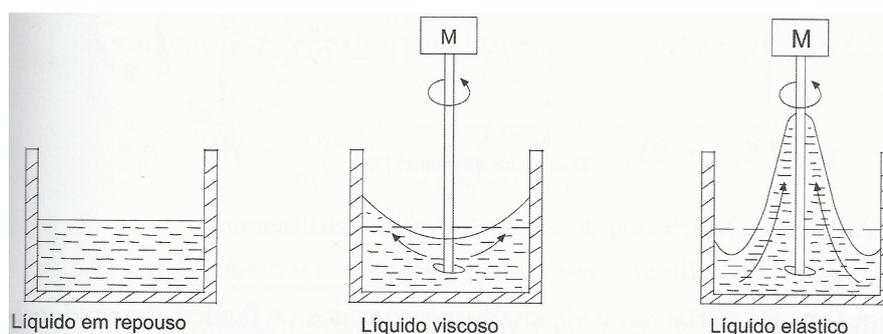
### **2.10.5 Sem mudanças químicas ou físicas na amostra durante o teste**

Mudanças devido a processos químicos como o endurecimento ou degradação de polímeros ou transformações físicas como as encontradas em um plastissol de PVC, com suas interações entre partículas e plastificantes, são influências secundárias na viscosidade. Elas devem ser evitadas na reometria normal, a não ser nos casos em que essas influências sejam os principais objetivos da pesquisa.[5]

### **2.10.6 Sem elasticidade**

Líquidos podem apresentar um dos seguintes fenômenos (ver figura 2.6): dois líquidos diferentes sem pigmentação, transparentes como água e uma solução de borracha em repouso não podem

ser diferenciados a olho nu. Mas, se agitados rapidamente por um rotor, eles responderão diferentemente como por exemplo a água que irá sair para fora e para cima do recipiente devido a força centrífuga gerada pela rotação; enquanto para os líquidos elásticos, as tensões normais aparecem ultrapassando as tensões de corte, o que empurra o líquido para cima da haste do rotor.[5]



**Figura 2.6:** Comportamento de líquidos viscosos e elásticos [5]

Amostras fluidas devem ser puramente viscosas quando se utiliza a lei simples da reometria. Toda a energia transferida para amostra no estado estacionário deve resultar num escoamento bem documentado e na conversão total das tensões de corte em aquecimento.

Se uma amostra é viscoelástica, então alguma percentagem de qualquer energia de tensão de corte gerada durante processos não-estacionários é armazenada elasticamente e temporariamente e somente o restante não conhecido induz o escoamento. Sob estas circunstâncias, a relação directa entre a quantidade conhecida de energia transferida e o fluxo resultante não é mais válida. A viscosimetria simples fornece resultados muito errados para esta classe de fluidos.

Muitos amostras, como polímeros fundidos ou soluções poliméricas e também muitas dispersões, apresentam ambas as respostas viscosa e elástica em relação às tensões de corte ou taxas de deformação. Além disso, a razão entre a resposta viscosa e a resposta elástica muda com a variação de taxa de deformação.

## 2.11 Reometria/viscosimetria absoluta

Reómetros são definidos como reómetros absolutos se a medição de viscosidade pode ser efetuada dentro das leis físicas e seus resultados podem ser expressos em unidades absolutas da física:

- Forças → em unidades de Newton [N]
- Dimensões do sistema de sensores → em unidades de metros [m]
- Intervalos de tempo → em unidades de segundos [s]

A viscosidade é definida na unidade resultante de "Pascal.segundos"[Pa.s]

$$\eta = \frac{N}{m^2} \cdot s = Pa \cdot s$$

As exigências para a medida de viscosidade absoluta são:

- As amostras testadas devem ser submetidas a um dos quatro tipos de escoamentos descritos na figura 2.1, permitindo uma avaliação matemática. Tanto a tensão de corte como a taxa de deformação nas paredes do sistema de medição ou em pontos representativos ao longo da espessura da substância testada devem ser acessíveis para cálculos exatos.
- As condições de teste escolhidas devem levar em consideração os limites dados pelas condições de contorno mencionadas anteriormente.

Um benefício importante de reometria absoluta é que os resultados dos testes são independentes do tipo de reômetro ou viscosímetro utilizado. Isso é importante para se testar líquidos Newtonianos, mas é essencial para definir comportamento de fluxo não-Newtoniano. Dados de reometria absoluta podem ser facilmente comparados entre laboratórios em todo mundo.[5]



## Capítulo 3

# Tipos de reômetros e viscosímetros

### 3.1 Reômetros e viscosímetros rotativos

#### 3.1.1 Comparação entre os diferentes reômetros

O princípio dos reômetros rotativos aliados aos sistemas de medição tipo cilindro coaxial, cone-placa e placas paralelas permite o desenvolvimento e a fabricação de reômetros absolutos que apresentam excelência e versatilidade.

Os sistemas de medição tipo cilindros coaxiais em reômetros/viscosímetros rotativos resulta do modelo de placas paralelas de Newton formando um cilindro interno e outro externo. Uma amostra líquida preenche o espaço anelar entre os dois cilindros (*gap*) e é submetida a tensões de corte por um tempo determinado. Condições como as mostradas na figura 2b resultam em escoamentos laminares e permitem que os dados resultantes de testes de tensão de corte, taxas de deformação e viscosidade sejam tratados matematicamente em unidades físicas apropriadas. O mesmo pode ser dito para os sistemas de medição tipo cone-placa e placas paralelas, que possuem áreas especiais de aplicação.[3][5]

Duas alternativas básicas transformam as geometrias mencionadas acima reômetros/viscosímetros absolutos:

- a) Ter controlador *input* de tensão e determinar a taxa de deformação resultante: estes são chamados "Reômetros de tensão Controlada (*Controlled Stress Rheometers*)" ou "Reômetros CS".
- b) Ter um controlador *input* de taxa de deformação e determinar a tensão de corte resultante: eles

são chamados "Reómetros de Taxa controlada (*Controlled Rate Rheometers*)" ou "Reómetros CR".

Alguns reómetros têm a possibilidade de trabalhar com ambos os modos de teste. E existem ainda duas outras diferenças adicionais no projecto desses reómetros: Os sistemas de medição tipo:

1) Searle e 2) Couette. [3][5]

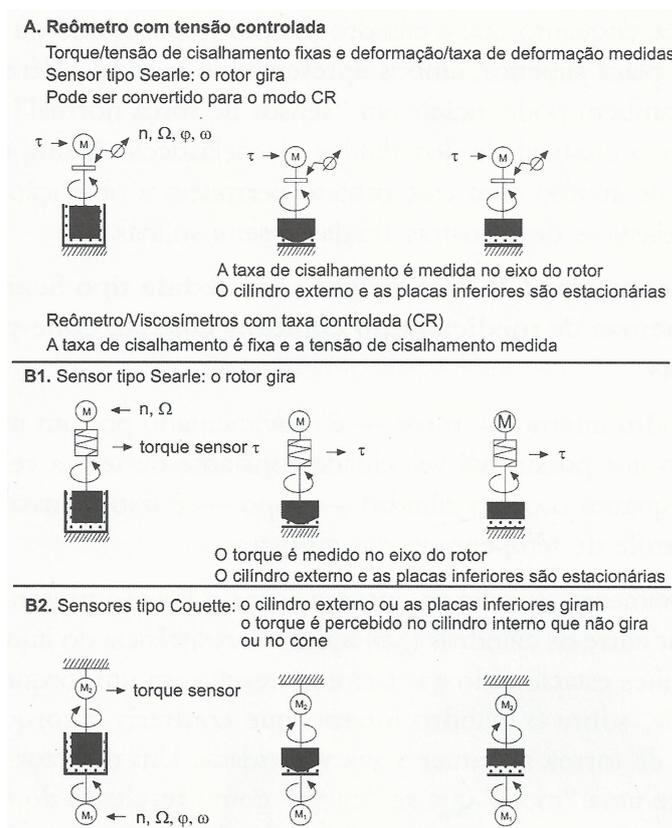


Figura 3.1: Tipos de reómetro rotativos[5]

### 3.1.2 Comparação entre reómetros CS e CR

Importantes diferenças entre os reómetros de CS e CR podem ser observadas quando fluidos viscoelásticos são testados. Isso ocorre especialmente quando amostras idênticas oferecem tanto respostas tipo líquido como tipo sólido, e são submetidas a diferentes condições, como, por exemplo, a diferentes taxas de deformação.[5]

### 3.1.3 Equações

Definições matemáticas de taxa de deformação e de tensão de corte para reómetros/viscosímetros rotativos são:

#### Sistemas de medição tipo cone-placa

- Taxa de deformação  $\dot{\gamma}_c$

$$\dot{\gamma}_c = \frac{1}{\tan(\alpha)} \times \frac{2\pi n}{60} \quad [s^{-1}] \quad (3.1)$$

sendo que:

$n$  = velocidade do rotor [ $min^{-1}$ ]

$\alpha$  = ângulo do cone

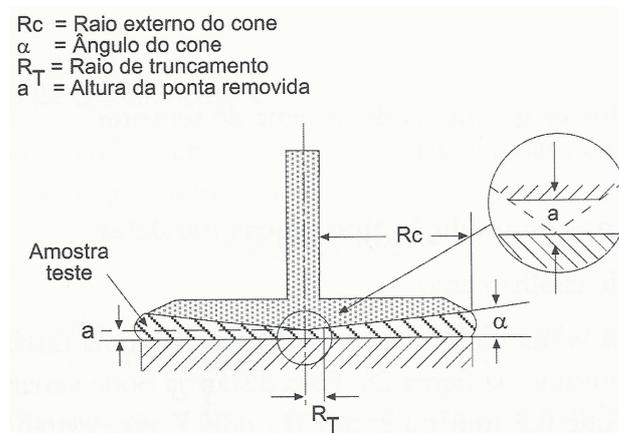
Os ângulos do cone em sistemas de medição tipo cone-placa são normalmente muito pequenos ( $\alpha = 1^\circ$ ). Algumas vezes são oferecidos ângulos de cone ainda menores, mas para eles o "estabelecimento" do espaçamento correto entre o cone e a placa é bastante difícil e, por isso, eles são menos recomendados. Porém, ele é aceitável por aproximar na equação acima:  $\tan(\alpha) \approx \alpha$ . Ângulos do cone superiores a  $\alpha = 4^\circ$  são normalmente utilizados em fluidos com grande tamanho de partículas.

Os ângulos do cone ( $\alpha$ ) são escolhidos de tal forma que, para qualquer ponto da superfície do cone, a razão entre a velocidade angular e a distância entre a placa é constante, isto é, a taxa de deformação  $\dot{\gamma}$  é constante, da ponta do cone até o raio externo  $R_c$ .

A taxa de deformação pode ser assumida constante para qualquer ponto do líquido entre a placa e o cone. É muito difícil estabelecer o posicionamento do cone de tal forma que a ponta toque a placa, especialmente quando se utilizam cones com pequenos ângulos.

Para evitar que a ponta do cone e o centro da placa se desgastem em demasia, quando os fluidos com partículas abrasivas são testados, resultando num falso posicionamento do cone

em relação à placa, normalmente utilizam-se cones truncados: a ponta do cone é retirada formando um raio de truncamento ( $R_T$  figura 3.2). Isso também significa que a altura axial do cone é reduzida de um valor "a". Quando o sistema de medição tipo cone-placa é preparado para um teste, primeiro o cone é movido para baixo até que o cone truncado toque a placa. O cone é, então movido para cima até a distância axial "a" chamada de *gap*. É necessário que a ponta imaginária do cone toque a placa é requerido para os sistemas de medição tipo cone-placa.[5] [3]



**Figura 3.2:** Sistema cone-placa com cone truncado [5]

- Tensão de corte

$$\tau_c = \left( \frac{3}{2\pi \cdot R_c^3} \right) \times M_d \quad (3.2)$$

Sendo que:

$\tau_c$  = tensão de corte no cone [Pa]

$R_c$  = raio externo do cone [m]

$M_d$  = torque medido [N.m]

- Viscosidade  $\eta$

A Viscosidade é determinada utilizando-se a mesma equação usada para os sistemas de medição tipo cilindros coaxiais.

$$\eta = \frac{60M_d}{2\pi n} \cdot \frac{3\tan(\alpha)}{2\pi.R_c^3} \quad [Pa.s] \quad (3.3)$$

### 3.1.4 Critério de qualidade

#### Sistemas de medição tipo cone-placa

A qualidade dos resultados dos testes é melhor com ângulos menores. Sistemas de medição tipo cone-placa têm, preferencialmente, um ângulo de cone  $\alpha$  de  $1^\circ$ . O seguinte ponto deve ser considerado: são encontrados grandes erros nos resultados se o contacto entre o cone e a placa não for bem estabelecido ou não for bem mantido, além disso, quando a amostra está sujeita a alta tensão de corte perde-se razoavelmente o controle da temperatura.[5]

#### 3.1.5 Vantagens e desvantagens do sistema de medição cone-placa

Normalmente, os sistemas de medição tipo cone-placa são escolhidos se a limpeza do equipamento após o teste é um problema. Em testes de controle de qualidade em fluidos altamente pigmentados, por exemplo, a limpeza do copo e do cilindro coaxial é bastante difícil e preferencialmente utiliza-se o sistema de medição tipo cone-placa de forma a não desperdiçar muito tempo com a limpeza. Em pastas contendo metais preciosos é importante que grande maioria da amostra seja recuperada.

Um argumento importante para a escolha do cone-placa é que a quantidade de amostra usada é normalmente muito menor do que a quantidade de amostra requerida para a maioria dos sistemas cilíndricos. Isso tem importância em casos em que a amostra é muito preciosa ou existem apenas gotas de uma amostra.

Sistemas de medição tipo cone-placa têm sua aplicação em altas taxas de deformação, em faixas superiores a  $\dot{\gamma} = 10^4 [s^{-1}]$ .

O aumento de viscosidade relacionado ao tempo ou à temperatura que ocorre como resultado de reacções químicas, tais com o endurecimento ou cura, pode ser medido e registado. Se o polímero

se transformar em uma massa sólida durante esta reacção química, é importante que o cone possa ser facilmente separado do prato inferior para permitir a remoção das substâncias poliméricas curadas. Sistemas de medição tipo cilindro coaxial não podem ser usados, por razões óbvias, para teste de cura de resinas termoplásticas.[5]

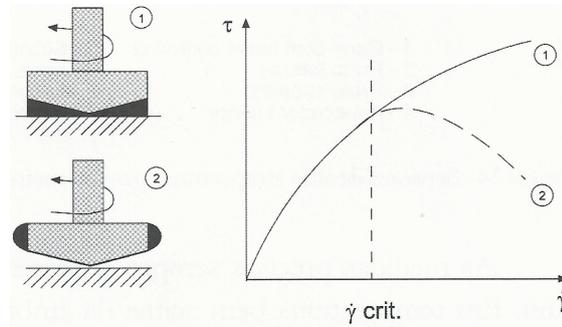
### **Limitações do uso de sistema tipo cone-placa**

No rotor cónico, a distância entre cone e a placa varia do zero (na ponta do cone) até um máximo (no raio do cone  $R_c$ ). Nos fluidos, as partículas, mesmo de pequenos tamanhos, são obviamente grandes demais para o espaçamento próximo à ponta do cone. Quando o sistema de sensores tipo cone placa é usado para fluidos que apresentam partículas de tamanho significativo ou possuem uma grande quantidade de partículas, tais como pigmentos de tintas de impressão ou tintas de parede, durante o teste, essas partículas são expulsas da região da ponta do cone para a região mais externa do cone. O escoamento radial na fase de fluidos com partículas requer bastante força axial, especialmente no caso de amostras que possuem um alto valor de limite de escoamento, resistindo a este escoamento radial de compressão.

Nas fluidos tixotrópicos, como cremes e as pomadas, o escoamento radial de compressão implicará em a aplicação de uma pré-tensão de corte para assim efectuar uma destruição parcial da estrutura tixotrópica. Durante um teste em tintas, um fluxo secundário de partículas na direcção radial pode ser criado e sobreposto sobre o fluxo laminar principal principal, afectando de forma negativa o escoamento laminar principal. Este fenómeno também faz com que as amostras com uma grande quantidade de partículas tornem-se mais heterogéneas durante um teste. Partículas de tamanhos maiores necessitam de cones que possuam, ângulos superiores a  $1^\circ$  até  $4^\circ$  o que aumenta ainda mais o efeito negativo do escoamento secundário sobre os resultados.

Os sistemas de medição tipo cone e placa são mais afectados pelas forças normais (resultantes da resposta elástica das amostras viscoelásticas quando submetidas a tensão de corte) do que os sistemas de medição coaxiais. Essas forças são capazes de empurrar a amostra para fora do espaçamento angular e acima da borda externa do cone. Quando a amostra é "sugada" parcialmente para fora do *gap*, sofre uma "divisão parcial" no meio do espaçamento angular (figura 3.3). Isto causa uma séria perturbação na medição da viscosidade. A saliência da amostra que aparece na borda

do cone, e que se torna maior para maiores taxas de deformação, indica esta perturbação. Esta "divisão" pode ser percebida dentro do *gap* quando o operador observa a rotação de perto.



**Figura 3.3:** Testes de amostras viscosas e viscoelásticas em sistemas cone-placa [5]

A perturbação causada pelas forças normais também pode ser observada na curva do escoamento (figura 3.3). A linha contínua (1) descreve o comportamento do escoamento de um fluido unicamente viscoso. A linha descontínua (2) mostra que a curva de um líquido viscoelástico desvia da curva verdadeira (1) se o líquido é submetido a uma taxa de deformação acima da tensão crítica. Nesta situação, a "divisão" da amostra dentro do *gap* torna-se suficientemente grande para alterar os resultados. Sendo assim, não faria sentido avaliar qualquer resultado obtido em taxas de deformação acima do nível crítico.

Mas até mesmo o melhor controle de temperatura não pode evitar totalmente que as amostras testadas em taxas de deformação constante desenvolvam mais calor no seu interior (devido a fricção) do que o calor que possa ser removido, no mesmo intervalo de tempo por condução térmica nas vizinhanças do cone e da placa. O volume da amostra necessária nesses sistemas é pequeno, então, se o torque utilizado for muito alto, a temperatura da massa pode ultrapassar os limites aceitáveis tornando os resultados do teste insignificantes. Sistemas de medição tipo cone-placa de qualidade possuem sensores de temperatura que podem monitorizar o aquecimento produzido pela tensão de corte e podem diminuir tal aquecimento quando se torna demasiada alta (o que na maioria das vezes ocorre se  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ ).

Conclui-se então que portanto, que os sistemas de medição cone-placa são menos adequados para medições de amostras de baixa viscosidade e mais indicados para amostras com média ou alta viscosidade.



## Capítulo 4

# Metodologia utilizada

### 4.1 Réómetro

O réómetro utilizado (figura 4.1 ) para a realização deste projecto é um réómetro rotativo. Este trabalha com dois modos de teste, ou seja, tem um controlador de *input* de tensão de corte ou de taxa de deformação para assim determinar a taxa de deformação ou a tensão de corte. Pode então impor-se a tensão de corte e medir a taxa de deformação ou então impor a taxa de deformação e obter a tensão de corte.



**Figura 4.1:** Réómetro rotativo utilizado

O conjunto de sistemas de medição (figura 4.2) por vezes chamadas de geometrias de medição que estão disponíveis para a realização de testes reológicos são:

**Cone-placa**

- CP 4°/40 mm
- CP 1°/55 mm
- CP 1°/60 mm (geometria danificada)

**Placas paralelas**

- PP 20 mm



**Figura 4.2:** Geometrias disponíveis

## 4.2 Adaptação ao réómetro rotativo

A minha adaptação ao réómetro foi bastante difícil tendo de recorrer ao manual do réómetro para assim poder adaptar-me ao funcionamento deste. Até agora não existia qualquer tipo de tutorial de iniciação ao réómetro, a pedido de algumas pessoas realizei um (ver anexo), a partir dos conhecimentos adquiridos.

### 4.3 Experiências de validação de resultados

Depois de ter realizado o estudo do manual de utilização do reómetro, iniciei cuidadosamente uma serie de testes de viscosidade sobre diferentes tipos de fluidos para assim verificar o bom funcionamento por validação dos resultados obtidos.

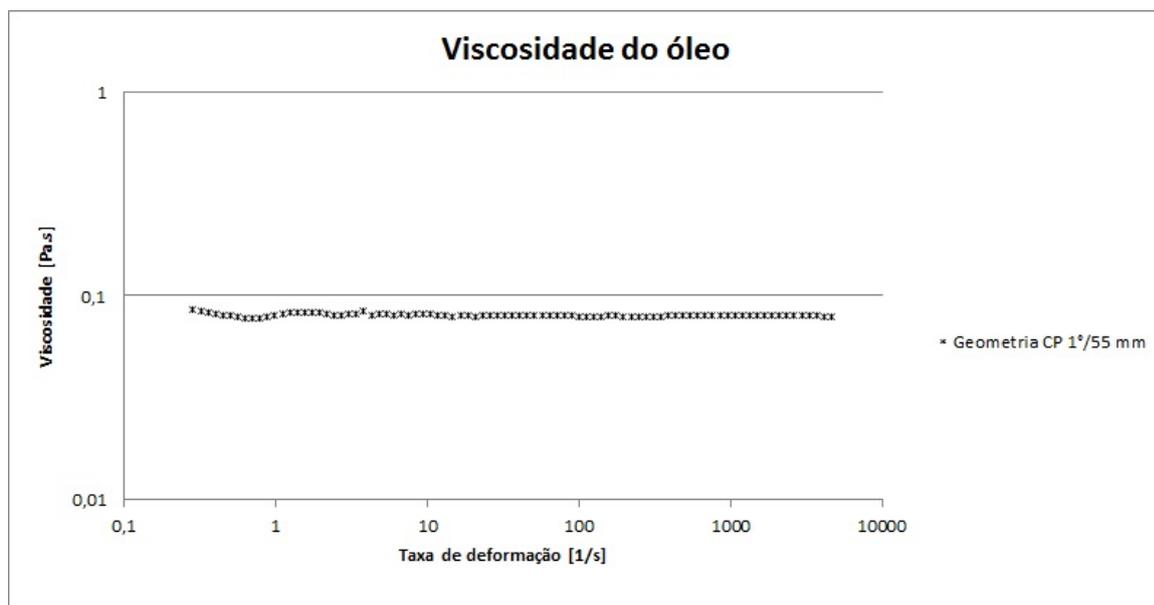
Foram realizados diferentes teste de experimentação do equipamento com a geometria CP 4 °/40 mm e CP 1 °/55 mm.

- **Óleo**

O primeiro fluido a ser testado foi o óleo (Shell Tellus S32), a geometria escolhida foi a CP 1 °/55 mm devido ao facto do óleo ser pouco viscoso, daí ser preferível escolher uma geometria com um ângulo bastante reduzido. Os parâmetros do teste são apresentados a tabela 4.1 e os resultados do teste de viscosidade na figura 4.3.

**Tabela 4.1:** Parâmetros do teste

Parâmetros	
Temperatura	17,5 °C
Input do reómetro	Taxa de deformação



**Figura 4.3:** Resultado do teste

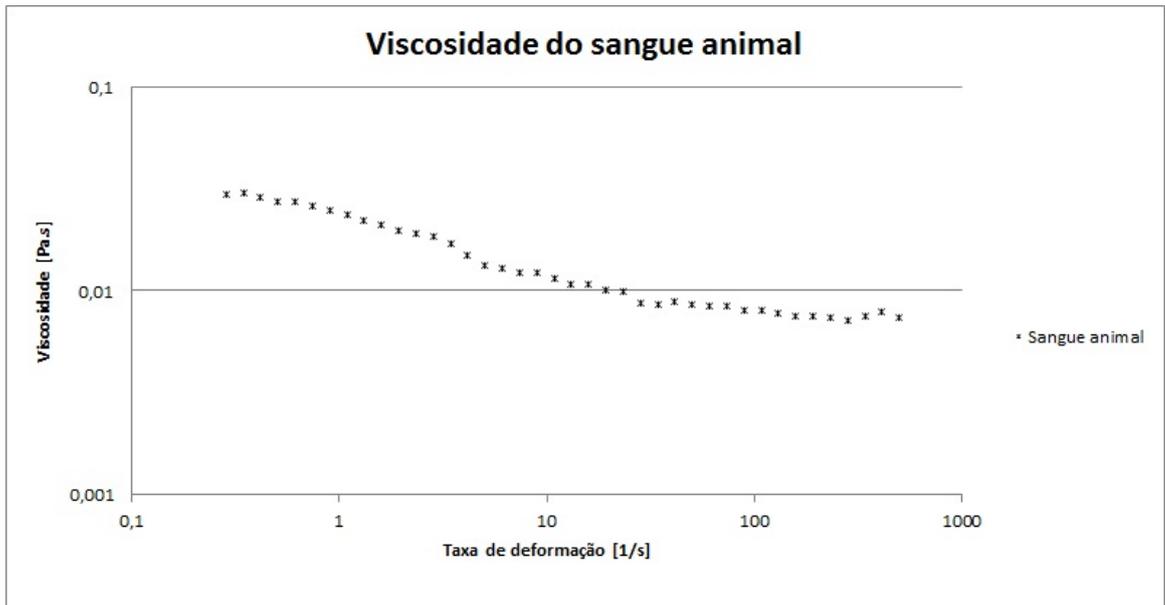
Analisando os resultados do teste conclui-se que a viscosidade é constante e de aproximadamente 0,08 Pa.s, coincidente com o valor fornecido pelo fabricante de 0,087 Pa.s (tabela em anexo,  $\rho = 876 \text{ Kg/m}^3$ ).

- **Sangue animal**

Para realizar testes de viscosidade ao sangue, a geometria escolhida foi a CP 1°/55 mm pelo mesmo facto do óleo. Para o sangue foram realizado vários testes com diferentes amostras. Os parâmetros dos testes estão apresentados a tabela 4.2 bem, como um dos resultados está apresentado na figura 4.4.

**Tabela 4.2:** Parâmetros do teste

Parâmetros	
Temperatura	20 °C
Input do reómetro	Taxa de deformação



**Figura 4.4:** Resultado do teste

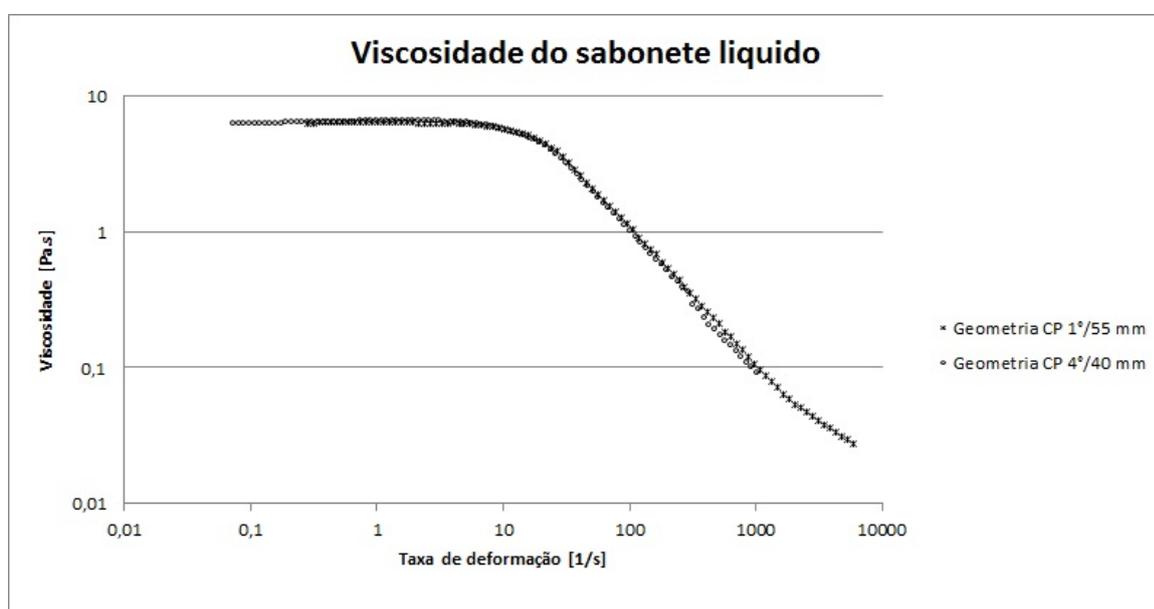
Analisando o resultado do teste verifica-se uma diminuição da viscosidade com o aumentar da deformação, isto deve-se ao facto de o sangue ser um fluido não-Newtoniano. Não existe muita informação sobre a viscosidade do sangue, sabe-se apenas que o sangue humano a  $37^{\circ}\text{C}$  tem normalmente uma viscosidade entre  $3$  e  $4 \times 10^{-3}$  Pa.s. Sabe-se também que a viscosidade do sangue depende da percentagem de cada constituinte e a medida que a temperatura do sangue diminui a sua viscosidade aumenta.

- **Sabonete líquido**

A escolha deste líquido deve-se ao facto de ser um fluido bastante viscoso e de se pensar ser um fluido não-Newtoniano ou seja que a sua viscosidade varia em função da taxa de deformação. Assim sendo realizaram-se os testes de viscosidades com a geometria CP 4°/40 mm e CP 1°/55 mm e assim poder-se realizar uma comparação entre as duas geometrias. Os parâmetros dos testes estão apresentados a tabela 4.3 e na figura 4.5 estão apresentados os resultados dos testes.

**Tabela 4.3:** Parâmetros do teste

Parâmetros	
Temperatura	20 °C
Input do reômetro	Taxa de deformação

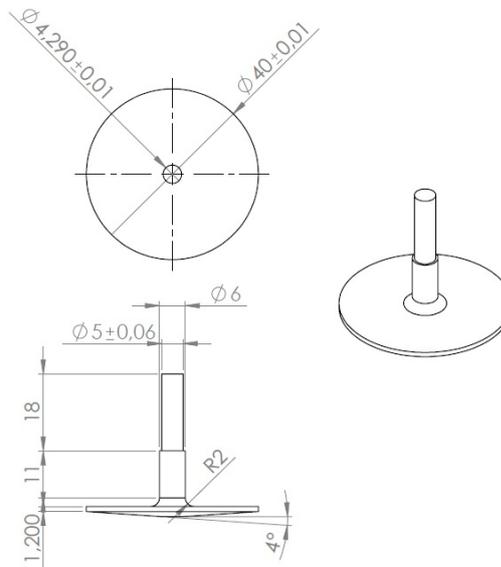


**Figura 4.5:** Resultados dos testes com a geometria CP 1° / 55 mm e CP 4° / 40 mm

Analisando os resultados dos testes, conclui-se pela forma das curvas características obtidas que se trata de um fluido não-Newtoniano devido à variação da viscosidade à medida que a taxa de deformação aumenta como referenciado na figura 2.5. Analisando a figura 4.5 verifica-se a sobreposição das curvas pelo que ambas as geometrias utilizadas (CP 1° / 55 mm e CP 4° / 40 mm) são adequadas para utilização destes testes.

## 4.4 Fabricação das novas geometrias

Nesta fase iniciou-se a investigação propriamente dita. Para ser possível verificar a existência ou não de escorregamento foi necessário utilizar duas geometrias idênticas com superfícies de contacto distintas (uma com a superfície lisa e outra rugosa). A primeira ideia seria adquirir uma nova geometria idêntica a uma já existente no laboratório, mas depois de contactar a empresa que forneceu o reómetro sobre os custos de aquisição de uma nova geometria decidiu-se, devido ao elevado custo, fabricar duas peças no laboratório de tecnologias mecânicas da escola. Fabricaram-se duas geometrias do tipo CP 4°/40 mm em aço ao carbono. Antes de iniciar a maquinagem das geometrias, teve-se que realizar um levantamento de algumas dimensões da geometria original para assim realizar uma modelação tridimensional (figura 4.6) e assim ficar a conhecer todas as dimensões da geometria pretendida. Sabendo que o *gap* é de 0,150 mm foi realizada uma modelação tridimensional do volume necessário à realização de testes de viscosidade com a geometria CP 4°/40 mm que é aproximadamente 1,17236 ml.[4]



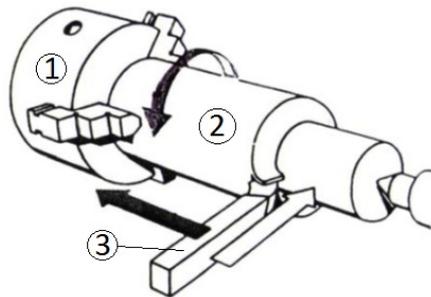
**Figura 4.6:** Dimensões em milímetros da geometria CP 4°/40 mm

Tratando-se as geometrias de peças de revolução, ou seja, peças que sejam criadas em redor de um eixo, a sua realização deve ser executada no torno mecânico paralelo (figura 4.7) existente no laboratório.



**Figura 4.7:** Torno paralelo

O funcionamento do torno, consiste basicamente em aplicar uma rotação a uma peça (geralmente peça de forma cilíndrica) fixa na bucha em que posteriormente irá ser retirado material a peça com ajuda de uma ferramenta de desbaste. Na figura 4.8 estão representados os movimentos de uma operação de torneamento.



**Figura 4.8:** Movimentos de uma operação de torneamento

1. Bucha de fixação
2. Peça a maquinar
3. Ferramenta de desbaste

Seguindo as dimensões da figura 4.6, iniciou-se o processo de maquinagem (com uma peça inicial de 40 mm de comprimento com 40 mm de diâmetro):

- Depois de fixar a peça na bucha iniciou o desbaste (com pastilha de desbaste) até se obter o diâmetros de 6 mm e posteriormente de 5 mm;
- Por fim realizou-se o fillet (com pastilha de desbaste) de 2 mm designado por R2 na figura 4.6;
- Inverteu-se o sentido da peça na bucha, de modo a ficar fixa pelo diâmetro de 6 mm;
- Realizou-se a maquinagem da superfície de contacto (com pastilha de acabamento), iniciando pelo desbaste até a obtenção de um cone com o ângulo de  $4^\circ$ ;
- Finalmente realizou o desbaste (com pastilha de acabamento) ponta do cone denominada de *gap* ou de *a* (ver figura 3.2).

Todo este processo foi realizado duas vezes devido à necessidade de duas geometrias de medição idênticas, apenas com as superfícies de medição com rugosidades diferentes. A fase de maquinagem mais complexa foi a concretização da superfície de contacto pois era necessário atingir as dimensões com grande rigor e com o melhor acabamento possível tratando-se de um torno totalmente manual daí a dificuldade. Na tabela 4.4 estão apresentados os paramentos de maquinagem.

**Tabela 4.4:** Parâmetros de maquinagem

Parâmetro da maquinagem	
Velocidade de rotação	1250rpm

#### 4.4.1 Ajustes das geometrias

Depois de finalizar as geometrias foi necessário fazer o acabamento superficial da área de contacto, consistindo basicamente em lixar (com lixa 1000 de água) a superfície de contacto das geometrias e depois realizar testes de viscosidade até se conseguir resultados idênticos, com erros insignificantes, entre as duas geometrias fabricadas. Na figura 4.9 são apresentados os resultados do teste realizado com o sabonete líquido.

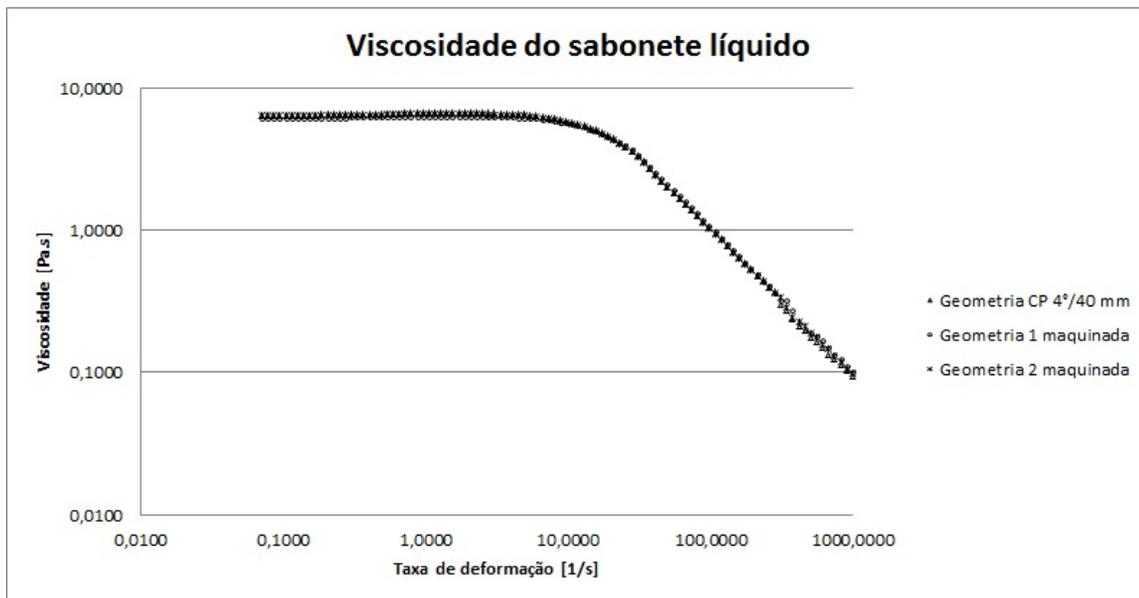


Figura 4.9: Resultados dos testes de viscosidade

Analisando a figura 4.9 conclui-se que as geometrias são semelhantes uma vez que as curvas se sobrepõem e analisando a figura 4.10 verifica-se que os erros médios cometido em comparação com a geometria original ao longo do teste são inferiores a 5%.

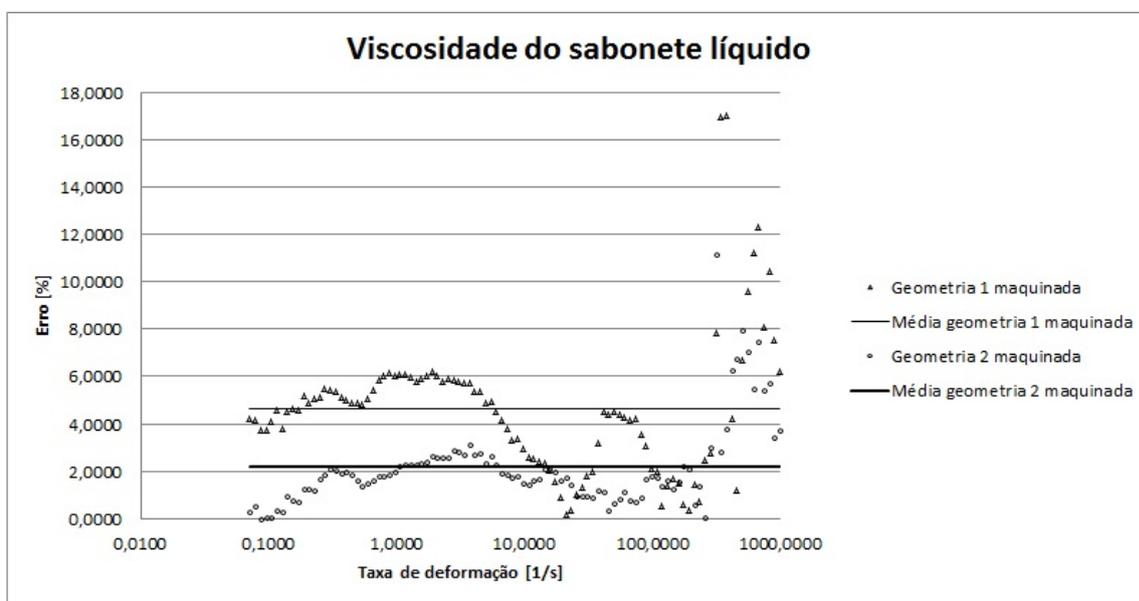


Figura 4.10: Erros cometidos em comparação com a geometria original

#### 4.4.2 Execução da rugosidade

Para aplicar uma rugosidade na geometria foi pensado primeiro em colar uma lixa na geometria mas isso seria bastante difícil devido à forma cônica da geometria de medição. Outra ideia foi realizar a rugosidade com uma gravador elétrico mas depois de ensaiar numa superfície experimental verificou-se que a rugosidade seria demasiado baixa. Por fim, decidiu-se executar a rugosidade com uma broca de 2 mm, o processo consistiu basicamente em pontear toda a superfície da geometria com a broca de forma a criar pequenas cavidades. Para a realização deste processo foi utilizado a furadora da figura 4.11.



**Figura 4.11:** Furadora de bancada

A figura 4.12 mostra o resultado final das duas geometrias fabricadas.



**Figura 4.12:** Geometrias CP 4 °/40 mm maquinadas lisa e com rugosidade

## 4.5 Testes com geometria lisa e com rugosidade

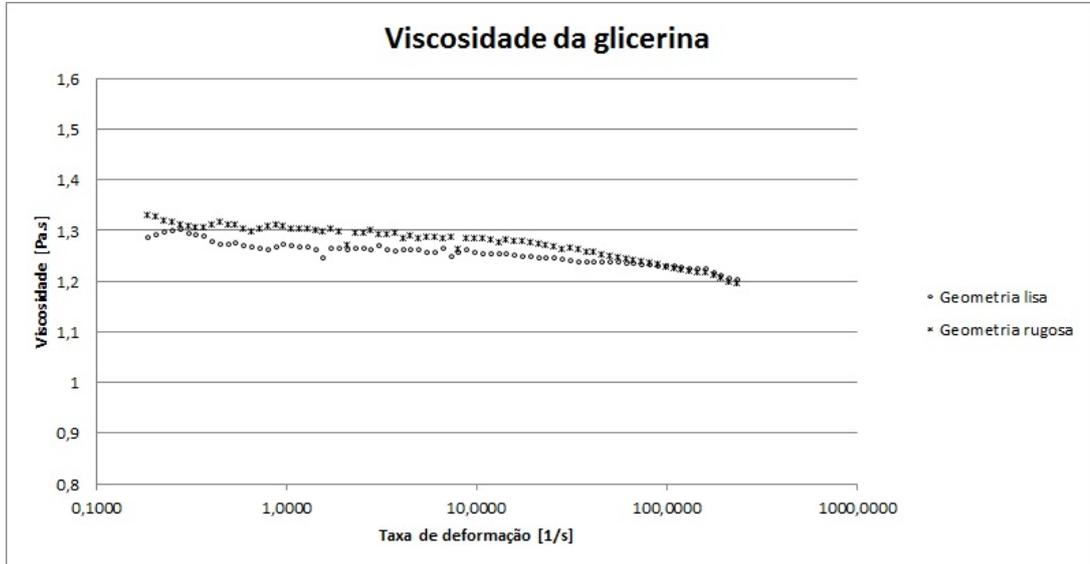
Para a realização dos ensaios foram escolhidos 3 fluidos: Glicerina (fluido Newtoniano), Óleo Shell (fluido Newtoniano) e Sabonete líquido (fluido não newtoniano). O primeiros testes a serem realizados, foram com a glicerina.

Na tabela 4.5 estão apresentados os parâmetros utilizados nos testes comparação entre a geometria lisa e a geometria rugosa.

**Tabela 4.5:** Parâmetros dos testes sobre a glicerina, sabonete e óleo

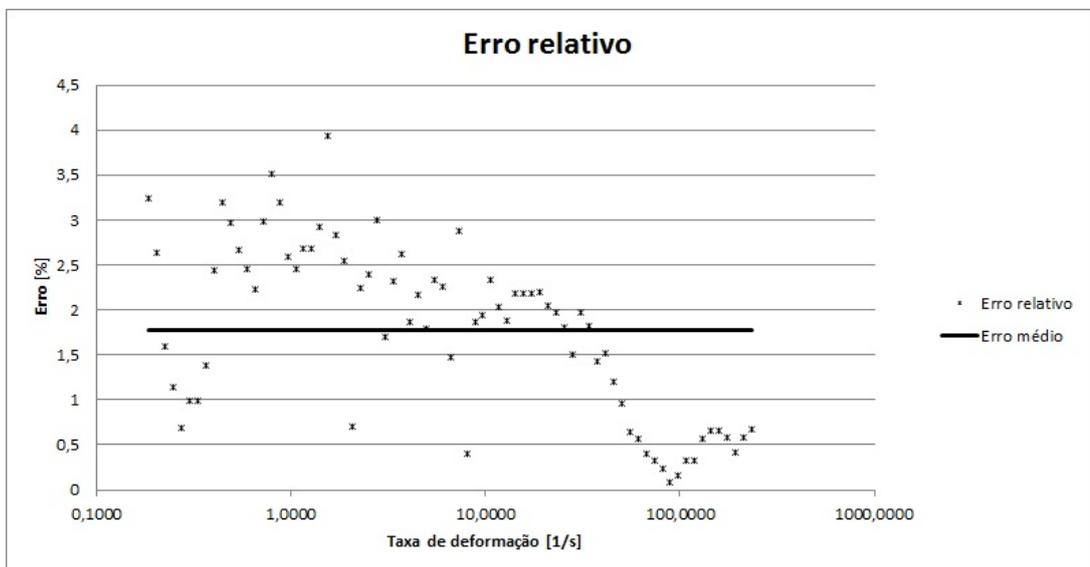
Parâmetros	
Temperatura	17,5 °C
Input do reómetro	Tensão de deformação

A figura 4.13 apresenta os resultados com as duas geometrias (a viscosidade da glicerina a 20 °C é de aproximadamente 1,3923 [Pa.s]).



**Figura 4.13:** Resultados de viscosidade sobre glicerina

Na figura 4.14 podemos analisar o erro relativo cometido diminui à medida que a taxa de deformação aumenta.



**Figura 4.14:** Erros cometidos na glicerina

A seguir realizaram os testes de viscosidade com sabonete líquido. Na figura 4.15 encontram-se os resultados obtidos.

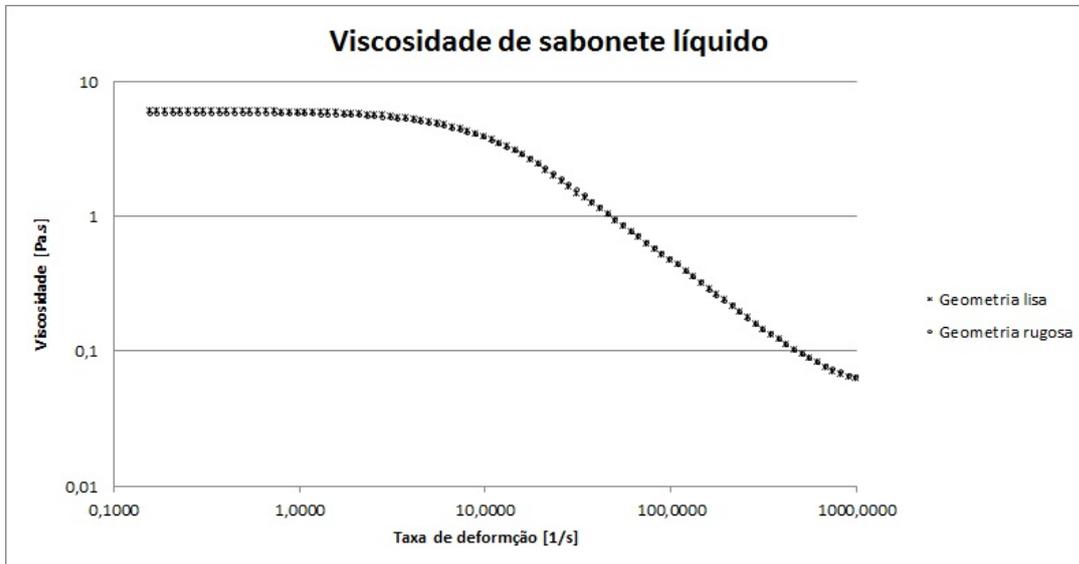


Figura 4.15: Resultados de viscosidade sobre sabonete líquido

Pela figura 4.16 podemos analisar o erro relativo cometido à medida que a taxa de deformação aumenta bem como a média desses erros.

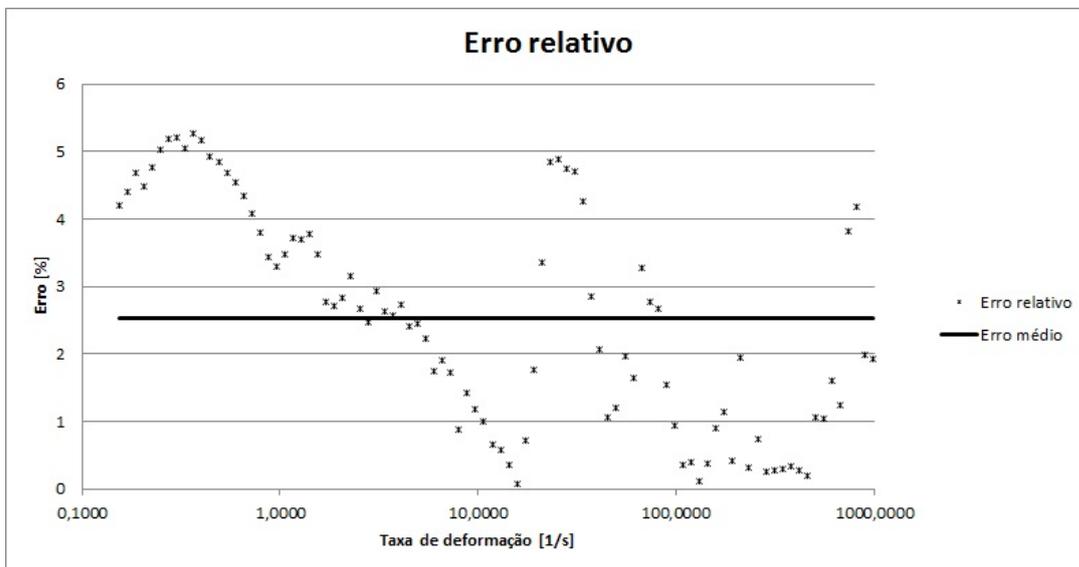


Figura 4.16: Erros cometidos no sabonete líquido

Por fim realizaram-se os testes de viscosidade com óleo. A figura 4.17 apresenta os resultados (a viscosidade do óleo 20 °C é de aproximadamente 0,087 [Pa.s]).

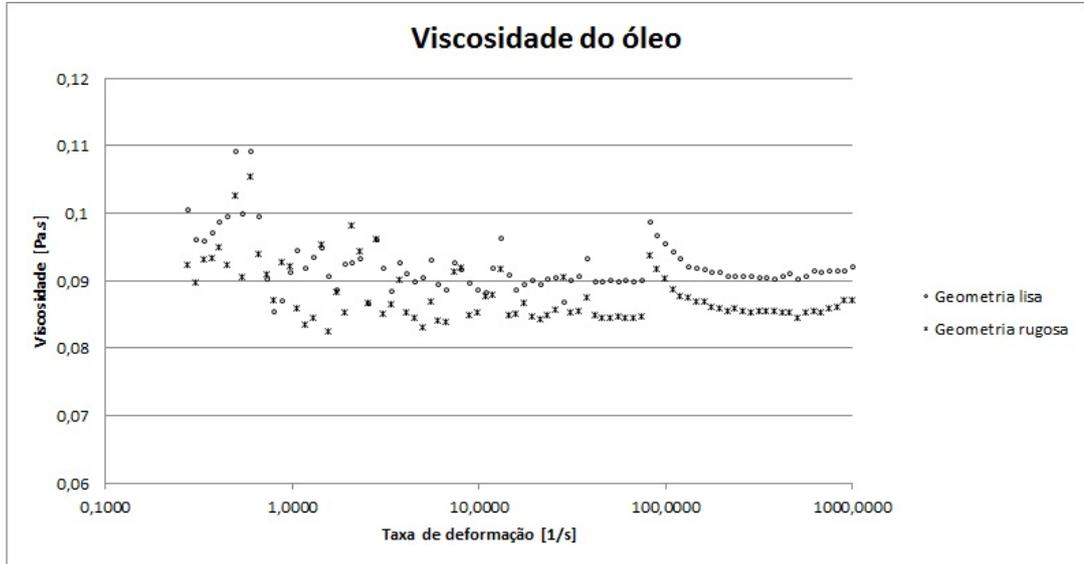


Figura 4.17: Resultados de viscosidade sobre óleo

Na figura 4.18 podemos analisar o erro relativo cometido à medida que a taxa de deformação aumenta bem como a média desses erros.

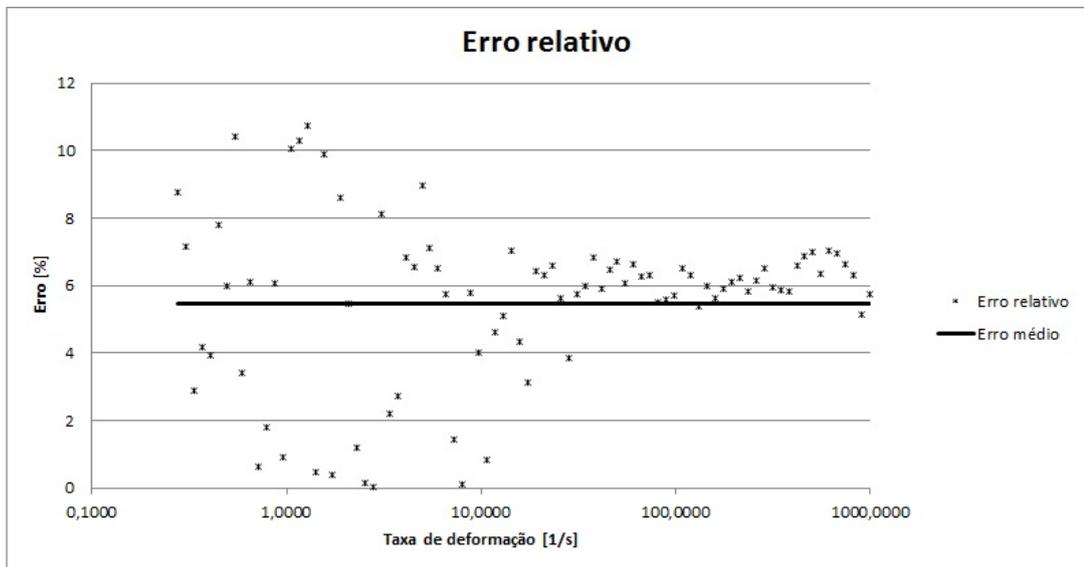


Figura 4.18: Erros cometidos no óleo

## 4.6 Discussão de resultados

Analisando as figuras 4.15 a 4.18 verifica-se que os resultados são bastantes próximos, tendo-se obtido erros médios inferiores a 5%. Os resultados das experiências, as curvas características da viscosidade, com ambas as geometrias de medição, lisa e rugosa, para os três fluidos, permitem concluir que o efeito do eventual escorregamento, objeto deste estudo, não ocorreu nas experiências. Analisando agora a figura 4.17 constata-se uma pequena diferença de valores até metade do teste, na outra metade do teste verificamos grande proximidade de valores que deu origem a um erro médio inferior a 5%. Podemos também verificar que os erros relativos dos testes tendem a diminuir a medida que a taxa de deformação aumenta.

De modo geral constata-se um erro relativo superior no óleo, este facto poderá ser devido ao fluido ter uma viscosidade inferior a 1 Pa.s.

Assim sendo, não é possível confirmar com toda a certeza a ausência do efeito de escorregamento nas superfícies de medição devido a vários fatores, tais como:

- Precisão dimensional das geometrias fabricadas;
- Acabamento superficial da superfícies de contacto das mesmas;
- Qualidade da rugosidade realizada na geometria;
- Testar maior variedade de tipos fluidos.

A precisão das geometrias fabricadas, bem como o seu acabamento superficial, são aspetos muito importantes sobre tudo para este tipo equipamento, em que apenas uma minúscula gota de ar existente entre a geometria e a placa inferiores durante um teste irá fazer com que os resultados sejam errados. Daí uma grande complexidade em conseguir a ausência de bolhas de ar que fica retidas nas cavidades da geometria rugosa quando a mesma começa a descer até ao espaçamento coreto.

## **Capítulo 5**

# **Conclusões e trabalhos futuros**

### **5.1 Conclusões**

A principal conclusão a retirar do trabalho realizado é que nos testes de viscosidade realizados não foi possível verificar o efeito de escorregamento, uma vez que os erros obtidos são demasiados baixos para se confirmar a ocorrência de escorregamento.

### **5.2 Trabalhos futuros**

Os possíveis trabalhos futuros a desenvolver no âmbito desta investigação, deverão passar pelo melhoramento da qualidade das geometrias realizada tanto a nível dimensional bem como a nível da realização da rugosidade. A forma de as melhorar passa pela fabricação de geometrias realizadas num torno de comando numérico computadorizado para assim se conseguir as geometrias com grande precisão comparando com um torno convencional. Sem duvida que fabricar as geometrias em aço inoxidável para evitar a oxidação das mesmas é uma questão a considerar no futuro. A realização da rugosidade é um dos aspetos fundamentais, pois grau de rugosidade que se aplica a geometria irá ser determinante na realização de testes de viscosidade. Um método possível para a realização da superfície rugosa será por granalhagem que tem por função fixar grãos de areia de modo a criar uma rugosidade ou por electroerosão onde este tipo de processo maquina peças deixando um acabamento superficial deficiente (superfície granitada).



# Bibliografia

- [1] *User manual for bohlin rheometers*, July 2004.
- [2] Hutton J. F. Barnes H. A. and Walters K., *An introduction to rheology*, 1993.
- [3] Christopher W. Macosko, *Rheology - principles measuments, and applications*, 1994.
- [4] Simões Morais, *Desenho técnica básico*, 2006.
- [5] Gebhard Schramm, *Reologia e reometria*, 2006.
- [6] Taha Sochi, *Slip at fluid-solid interface*, (2011), 69.



# Anexo A – Tutorial de iniciação ao reómetro

A seguir encontra-se os passos a seguir para a realização de um simples teste de viscosidade.[1]

- Ligar o compressor no botão vermelho (ver figura seguinte).



- Ligar o computador que se encontra ligado ao reómetro.
- Ligar interruptor que se encontra na parte de traseira da caixa de controlo do reómetro (figura seguinte).



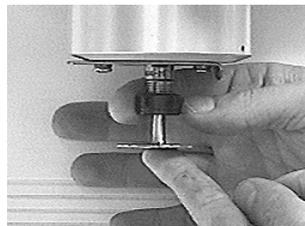
- Ligar interruptor que se encontra na parte de traseira do reómetro (figura seguinte).



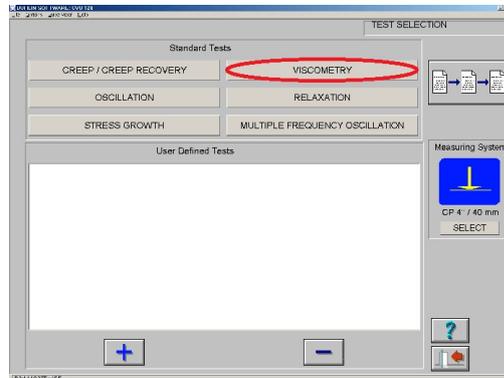
- Deslizar o bloqueio do mandril para a esquerda (conforme figura seguinte). Se ele não ir, vire suavemente o mandril até que o bloqueio deslize livremente.



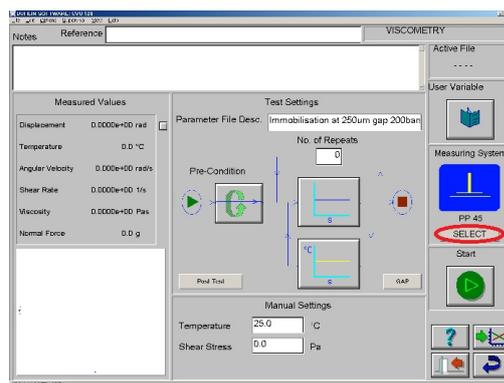
- Girar o mandril no sentido horário (olhando o reómetro de cima) até conseguir inserir o sistema de medição que se adequa ao fluido a testar. Depois de inserir segure no sistema de medição e rode no sentido anti-horário o mandril de modo a apertar o sistema de medição (ver figura seguinte).



- Abrir software (Bohlin R6.51.0.3) do reómetro.
- Escolher a opção *Viscometry* (ver figura seguinte).



- A seguir seleccionar a geometria escolhida no programa (ver figura seguinte) e clicar *ok*.



- Realizar o zero da geometria colocada premindo (durante 2 segundos) o botão *Zero* do painel do reómetro (ver figura seguinte) depois do reómetro realizar o zero mover o bloqueio do mandril para a direita.



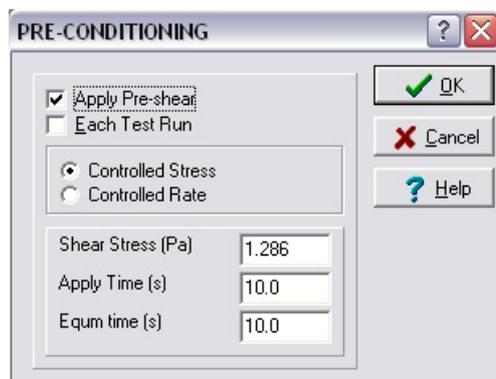
- A seguir iremos levantar a geometria usando as setas do painel do reómetro (ver figura seguinte) para assim proceder ao deposição do fluido a testar de forma centrada.



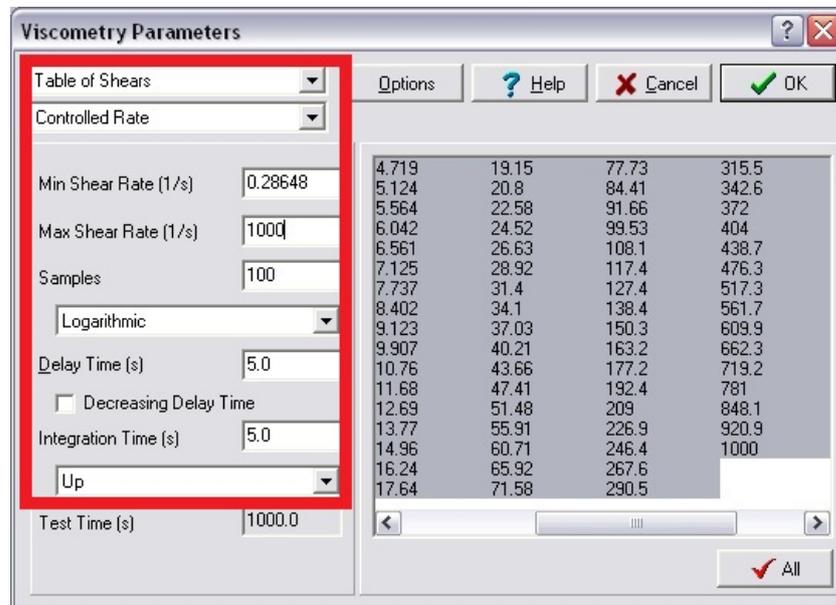
- Verificar no manómetro se o ar comprimido tem 3 bar de pressão (ver figura seguinte).



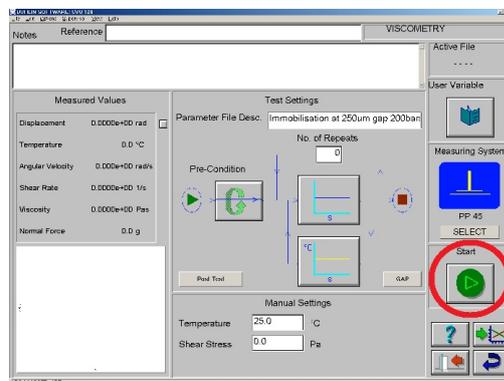
- No software clicar em *Pre-Condition* para aplicar pré-tensões de corte sobre o fluidos (ver figura seguinte) e fazer *ok*.



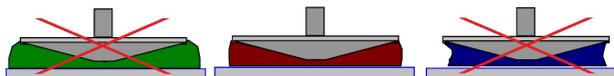
- Depois de clicar em *Viscometry Parameters* inserir parâmetros do teste (conforme a figura seguinte). Nota: este teste realiza 100 medições de viscosidade cada 5 segundos entre a taxa de deformação de 0,28648 e 1000 1/s.



- Para iniciar o teste clicar em *Start* (ver figura seguinte).



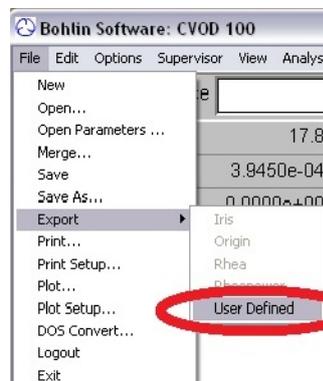
- Verificar se a quantidade do fluidos em teste de modo a se verificar o mesmo efeito conforme a figura seguinte.



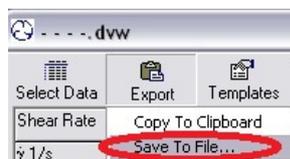
- Caso a quantidade de fluido não a seja correta clicar em *Abort Test* para cancelar teste e assim ajustar a quantidade de fluido.
- No fim de realizar o teste o software irá pedir para guardar o gráfico realizado podendo guardar da seguinte forma:



- Para extrair os resultados para poderem ser tratar informaticamente clicar em *File* → *Export* → *User Defined* (conforme figura seguinte).

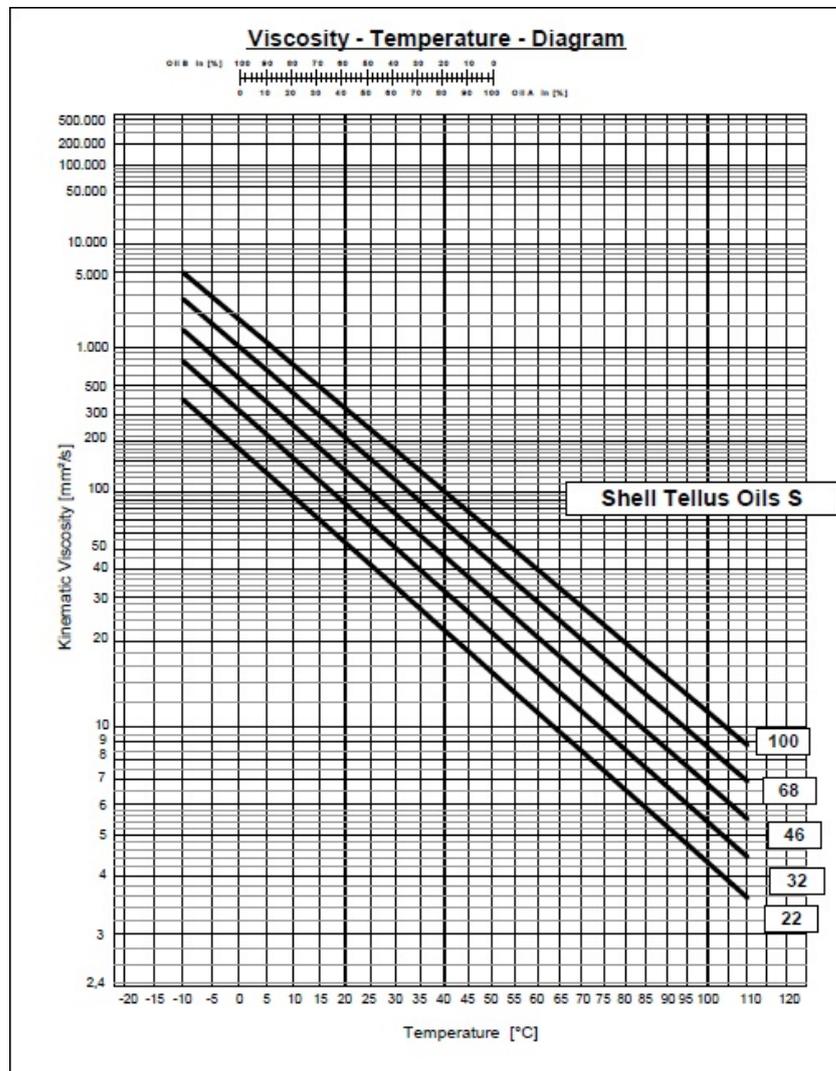


- Depois clicar em *Export* → *Save To File* (conforme figura seguinte) e guardar resultados.



# Anexo B – Viscosidade do óleo

- Na figura seguinte encontra-se a tabela da viscosidade do óleo utilizado (Tellus S32).





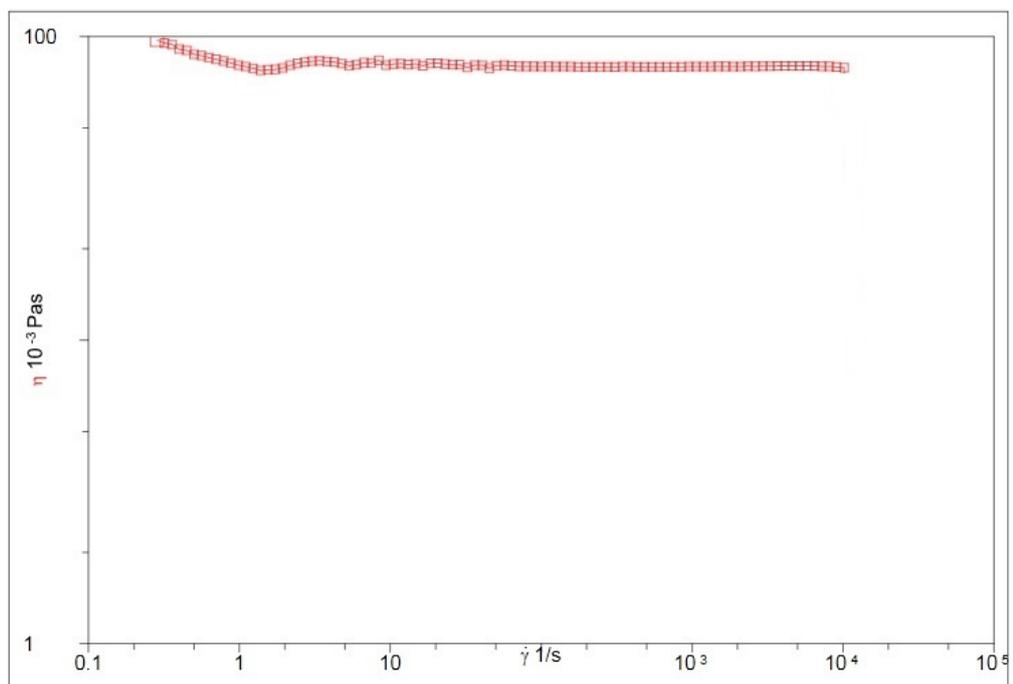
# Anexo C – Testes realizados

- Resultado de teste de viscosidade realizado ao óleo.

MALVERN INSTRUMENTS

CVOD 100 : VISCOMETRY

Parameter File : f:\oleo\oleo.pvw  
Parameter Description : Óleo  
Measuring System : CP 1" / 55 mm  
Sample Reference : none  
Start Of Test : Tuesday, October 23, 2012 14:28:12  
Temperature Range : 17.8°C..18.0°C

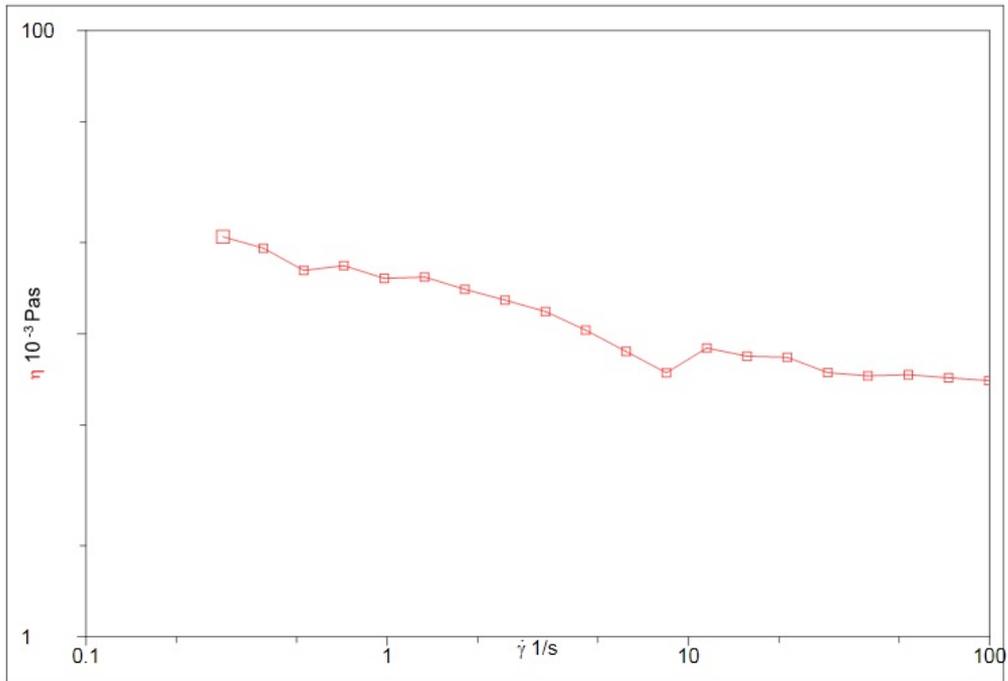


- Resultado de teste de viscosidade realizado ao sangue.

MALVERN INSTRUMENTS

CVOD 100 : VISCOMETRY

Parameter File : f:\liquido da loigal- ---.pww  
Parameter Description : sangue  
Measuring System : CP 1" / 55 mm  
Sample Reference : none  
Start Of Test : Thursday, March 29, 2012 16:28:44  
Temperature Range : 20.0°C..20.0°C

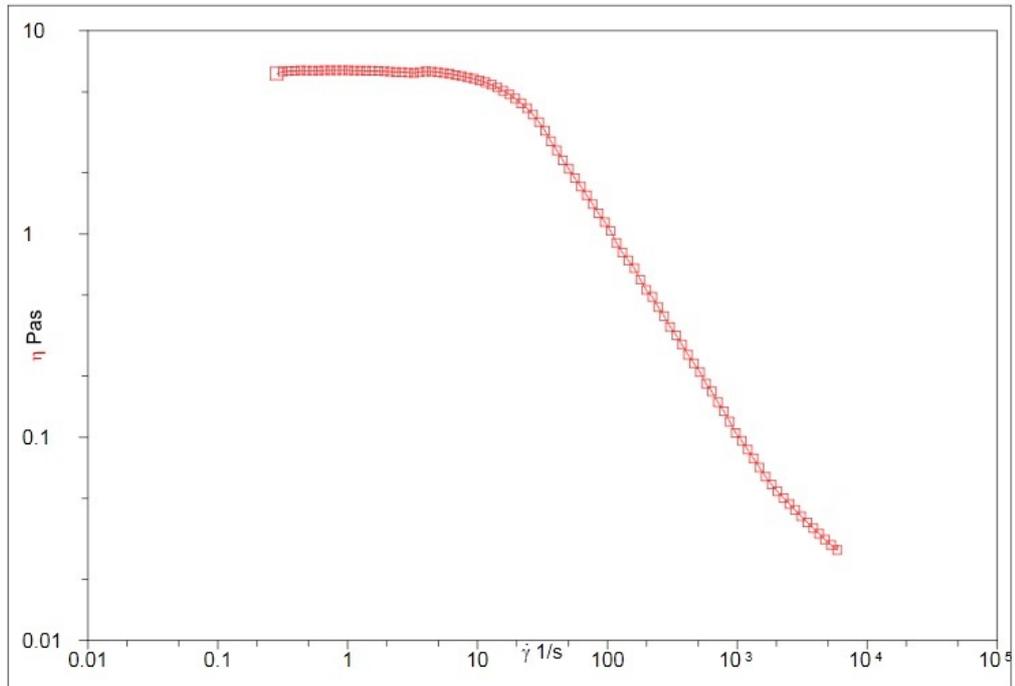


- Resultado de teste de viscosidade realizado ao sabonete líquido.

MALVERN INSTRUMENTS

CVOD 100 : VISCOMETRY

Parameter File : f:\liquido da loical- ---.pww  
Parameter Description : liquido da maos  
Measuring System : CP 1" / 55 mm  
Sample Reference : none  
Start Of Test : Thursday, March 29, 2012 17:42:37  
Temperature Range : 20.0°C..20.0°C





# Anexo D – Desenhos de definição

- Desenho de definição da geometria original.

