

# Reômetro para lamas utilizadas na fabricação de moldes para microfusão

Luis Fernando Espinosa Cocian, Carlos Ferreira Frick, Renato M. de Brito

Laboratório de Fundição - Centro de Tecnologia - PPGEMM - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## Resumo

Este trabalho comprova a viabilidade na utilização de dispositivos sensores da tensão de cisalhamento, para efetuar medidas indiretas de viscosidade e densidade, e que efetuam estas medidas na mesma linha de processo, em sistemas com fluidos em movimento rotacional.

Para a medição da viscosidade são utilizados extensômetros de resistência elétrica (EREs), colados num conjunto de hastes que são colocadas de forma paralela ao fluxo do fluido em movimento, de maneira que a força de arrasto, desenvolvida pelo fluido nas hastes, devido à força de atrito, ocasiona uma deformação mecânica relativa, que é proporcional à viscosidade do fluido.

A medição de densidade, também, utiliza extensômetros de resistência elétrica, colados numa outra haste, sentindo o arrasto devido à pressão ocasionada pelo movimento do fluido. As hastes são colocadas de forma transversal ao fluido em movimento. Dessa maneira, a força de arrasto, devido ao diferencial de pressão, é proporcional à densidade do fluido sob teste.

Os valores de viscosidade e densidade são calculados, utilizando medidas da velocidade angular do fluido no ponto onde estão colocadas as hastes, do nível e da temperatura ambiente. Os valores, encontrados nas medidas práticas, são aceitáveis quando comparados com outros métodos de medida, utilizados como o copo Zahn, e com a vantagem de que as medidas são feitas na linha de processo, o que aumenta a confiabilidade e diminui o tempo de resposta do sensor. Uma outra vantagem é que o erro total da medida pode ser estimado com bastante exatidão, pois os sinais envolvidos são de natureza elétrica e permitem o tratamento via computador, possibilitando, assim, a monitoração e um controle mais acurado do processo.

## Palavras-chave

Instrumentação; viscosímetros; reômetros; microfusão.

# Abstract

The aim of this work is to prove the viability of using resistive strain gauges to indirect measures of viscosity and density on process, at rotating fluids.

It was used metallic plates with bonded strain gauges to measure viscosity. They were placed parallel to the fluid flow in a way that the drag measure caused by friction produces a mechanical strain that is proportional to the fluid viscosity.

Strain gauges bonded on plate are also used for measures of density, sensing the drag due to the differential pressure originated by the changes of the flow. The plates were placed in transversal direction to the fluid flow, so that the drag is proportional to the density of the fluid.

The viscosity and density values are calculated using the angular velocity, the level of the fluid and the environmental temperature.

The viscosity and density values found in the practical measurement were quite acceptable when compared with other methods of measurement that use the Zahn glass, e.g., and with the advantage that the measurement is done on process, increasing the reliability and decreasing the response time of the system. Other advantage is that the error of the measurement can be estimated with good accuracy, because it involves electrical signals allowing computer treatment, real-time monitoring and process control.

## Key words

Instrumentation; viscosimeter; rheometer; investment casting.

# Introdução

A medição das propriedades físicas dos fluidos tem sido alvo de inúmeros estudos desde há muito tempo. Este trabalho comprova a viabilidade na utilização de dispositivos sensores da tensão de cisalhamento, para efetuar medidas indiretas de viscosidade e densidade, e que efetuam estas medidas na mesma linha de processo, em sistemas com fluidos em movimento rotacional.

Até hoje, ainda, não se compreende de maneira convincente os princípios físicos ou leis que regem o comportamento dos fluidos. A análise dos dados levantados de maneira experimental é muito complexa devido às inúmeras variáveis que influem no processo de medição. Por causa disto, foram elaboradas leis empíricas que descrevem processos, envolvendo fluidos, dependendo do tipo a que este pertence e das condições em que está envolvido, criando 'constantes' de ajuste que variam com as condições ambientais e com o tipo de fluido.

O conhecimento das propriedades dos fluidos (densidade, viscosidade, pressão, etc.) é essencial na indústria de veículos (terrestres, aquáticos e aéreos), construções, indústrias alimentícias, químicas, metalúrgicas e outras, jogando um papel preponderante na melhoria do desempenho das máquinas e no controle da qualidade dos processos. Com a automação e instrumentação de máquinas em processos em que os fluidos têm vital importância, o monitoramento contínuo da viscosidade torna-se fundamental, possibilitando a prevenção de falhas, assim como o preciso acompanhamento e controle do processo.

Com a necessidade de medidas mais precisas e sistemas mais complexos, aperfeiçoaram-se instrumentos específicos para a medição da viscosidade, dependendo do tipo de fluido e das características ambientais. Por outro lado, as técnicas desenvolvidas neste trabalho, além de representarem uma nova tecnologia na área, possibilitam a medição contínua e rápida da viscosidade de fluidos em movimento rotacional, numa faixa bastante ampla e independente do tipo de fluido em questão.

## ANTECEDENTES E OBJETIVOS

Neste trabalho demonstra-se a viabilidade da medição de grandezas, tais como, a viscosidade e densidade, utilizando indiretamente medidas de força, provenientes de sensores de deformação *strain-gauges*.



Figura 1 - Moldes em cera.

O objetivo deste trabalho é utilizar sensores de viscosidade para a preparação de lamelas, utilizadas em processos de microfusão. Nos processos de microfusão, elaboram-se moldes de peças delicadas (muito difíceis de serem usinadas) em cera, das peças que vão ser feitas (ver Figura 1). Logo, estes moldes de cera são imersos num composto de sílica, água e outros aditivos, que grudam na superfície do molde e, depois de secos, formarão uma matriz de cerâmica, como mostra a Figura 2.



*Figura 2 - Matrizes de cerâmica.*

A viscosidade e a densidade são grandezas que devem ser bem conhecidas, pois são responsáveis pelo controle de qualidade da matriz a ser fabricada. Uma vez seca a matriz, é colocada num forno para o derretimento da cera que serviu de matriz, ficando um molde oco onde será colocado o metal correspondente no seu estado líquido. A finalização da peça ocorre com o metal já estiver no estado sólido, e a quebra do molde cerâmico.

Ainda hoje, as medidas da viscosidade são feitas com copo Zahn, onde a precisão é muito pobre, devido a que o sistema é pouco repetitivo nesta aplicação e depende do operador. Esta medida é feita da seguinte maneira: o operador enche um copo com a lama em questão, tapando o orifício do mesmo com o dedo e, em seguida, permite a saída do líquido e começa a medir o tempo. Isto se repete por várias vezes, de maneira a diminuir a incerteza da medida. Uma característica deste processo é que a viscosidade pode mudar muito rapidamente, enquanto o operador estiver efetuando as reiterativas amostras de tempo do material, levando-o a erros na tomada de decisão de quais os aditivos que devem ser colocados para corrigir a lama. Portanto, há perdas temporais e econômicas. O recipiente contendo o composto pode ser observado na Figura 3.

Da descrição do processo, pode-se ver as vantagens que decorrem do novo tipo de sensor proposto neste trabalho. Pode-se citar como vantagens técnicas: repetibilidade, medidas na linha de processo, tempo de resposta do transdutor, precisão independente do operador e pelas características dos sinais envolvidos (sinais de natureza elétrica), possibilidade de tratamento dos sinais, monitoração e controle, levando, até mesmo, à possibilidade de automação do processo.



*Figura 3 - Recipiente de preparação das lamas.*

Nos capítulos que seguem, será dada uma abordagem teórica do problema, de maneira a que se possa chegar ao entendimento do comportamento de um fluido em movimento e possam ser relacionados os conceitos, que levaram às diversas escolhas no projeto do sistema de medição. Nos capítulos finais, são amostrados os dados obtidos na medição do sistema comparando com os resultados obtidos pela análise teórica. Também, são descritos os procedimentos de projeto dos sensores e dos correspondentes condicionadores de sinais.

# Viscosidade dos Fluidos Reais

Uma das propriedades fundamentais dos líquidos é a fluidez [Addison, Herbert, 1954]. Enquanto alguns fluem com muita facilidade, como a água e o álcool, outros o fazem com grande dificuldade, como o mel e óleos espessos, o que prova que cada líquido tem uma condição peculiar que o faz mais ou menos fluido. Esta condição é a viscosidade, que é a propriedade ou virtude que define num líquido a oposição às forças deformantes excessivas (esforços de cisalhamento), e mede ou expressa a resistência do líquido a se deixar cortar ou separar. Que existe uma relação entre a força deformante e a resistência que o líquido opõe a mesma, comprova-se, facilmente, tentando tirar verticalmente uma colher encravada num pote de mel: se a colher é tirada lentamente, apenas precisa-se de um pequeno esforço para desprendê-la, mas se puxarmos bruscamente a colher para cima, a resistência do líquido para separar-se da colher é tal que todo o pote com o mel levanta-se da mesa, como se estivesse pendurado à colher.

A resistência de um fluido ao cisalhamento [Streeter, Victor et al, 1982] depende da coesão das moléculas e da velocidade de transferência da quantidade de movimento molecular.

Para estudar as forças que contrariam e vencem a viscosidade [Addison, Herbert, 1954] pode-se supor uma camada muito fina de líquido, compreendida entre duas placas A, A' (Figura 4). Para que a placa superior possa deslizar sobre a inferior, cortando ou escorregando sobre a lâmina de líquido interposta, tem que ser aplicada uma força tangencial F, cujo valor é:

$$F = \mu A \frac{v}{y}$$

Equação 1

onde:  $A$  é a área ou superfície de cada uma das placas,  
 $v$  é a velocidade de uma placa com respeito a outra,  
 $y$  é a espessura da lâmina líquida e  
 $\mu$  é a viscosidade do líquido.

Deve ser ressaltado que a Equação 1 é uma aproximação válida só para espessuras  $y$  muito pequenas, onde pode-se considerar a velocidade com característica linear.

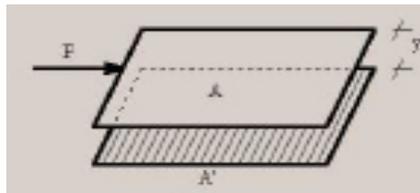


Figura 4 - Definição da viscosidade.

Quando  $A$ ,  $v$ ,  $y$  tiverem por valor respectivo a unidade, resulta  $\mu$  expressa pelo mesmo número que  $F$ , donde se deduz que a viscosidade de um líquido está dada pelo valor numérico da força tangencial que, exercida sobre a unidade de superfície de uma de duas placas paralelas separadas entre si pela unidade de distância (estando ocupado o espaço intermediário pelo líquido que trate), imprime à dita placa um movimento no próprio plano, de velocidade igual a unidade com respeito à segunda placa.

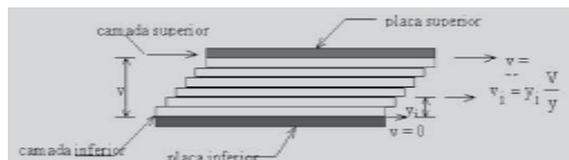


Figura 5 - Representação gráfica dos esforços de cisalhamento.

Para compreender melhor o comportamento de um líquido quando testa-se sua viscosidade, pode-se imaginar a lâmina líquida da Figura 4 como composta de uma infinidade de camadas paralelas de espessura infinitesimal, que resvalam umas sobre as outras (ver Figura 5). Estando em repouso a placa inferior, a camada de líquido imediatamente em contato com aquela também estará em repouso; a camada superior terá a mesma velocidade  $V$  que a placa de cima, e as camadas intermediárias terão velocidades proporcionais às suas distâncias da placa inferior.

Ou seja, que a velocidade da camada situada a uma distância  $y_i$  da placa inferior, será  $y_i \frac{V}{y}$ ;

então, a relação  $\frac{V}{y}$  no cálculo da viscosidade de um fluido, considerando uma camada  $y$  não infinitesimal, é o gradiente de velocidade nesta camada.

Então, se  $v_i = y_i \frac{dv}{dy}$ , substituindo na Equação 1 para uma camada de espessura  $y_i$ :

$$F = \mu A \underbrace{\left( y_i \frac{dv}{dy} \right)}_{v_i} \left( \frac{1}{y_i} \right) = \mu A \frac{dv}{dy}$$

A relação  $F/A$  é conhecida como tensão de cisalhamento, tendo em vista a direção da força em relação à área considerada. Então, diz-se que a intensidade da tensão de cisalhamento na viscosidade, ou esforço cisalhante  $\tau$  na viscosidade, num ponto de um líquido em que o gradiente de velocidade seja  $\frac{\partial v}{\partial y}$ , pode ficar na forma:

Equação 2

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

### FORÇAS DA VISCOSIDADE

No estudo do movimento dos fluidos reais, normalmente, deixam-se de lado quaisquer divergências com aquelas que possam ser previstas na teoria dos fluidos ideais. Em certos casos, estas divergências são muito pequenas, mas, às vezes, elas são muito importantes [Comolet R., Bonnin, J., 1963]. A noção de fluido ideal não corresponde, portanto, mais do que a uma primeira aproximação da dinâmica dos fluidos reais. Admite-se, por conseqüência, que os fluidos reais são dotados de uma propriedade física particular que introduz forças de um novo tipo, conhecida com o nome de viscosidade, ou atrito interno.

Quando supomos o fluido ideal [Comolet R., Bonnin, J., 1963], a ação de contato que é exercida sobre um elemento de superfície preso dentro do fluido (elemento da camada de fluido), é considerada normal a este elemento. Assim é que se define a pressão. Se tratamos um fluido real, deve-se admitir que estes esforços de contato não são só normais, e apresentam uma componente tangencial no plano do elemento de superfície. Esta componente faz o papel de uma força de atrito como acontece no movimento relativo de duas superfícies sólidas em contato.

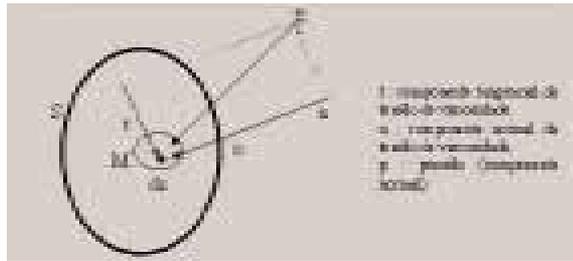


Figura 6 - Tensão exercida em um ponto M.

Supondo que em um ponto **M** de um elemento de superfície **dS** de uma partícula do fluido real, a tensão **T** está inclinada em relação à normal de **dS**, e decompondo **T** em uma componente normal e outra tangencial, considera-se que a viscosidade introduz a componente tangencial, e modificando um pouco também a componente normal que se espera num fluido ideal (ver Figura 6).

O primeiro problema que se coloca em mecânica dos fluidos reais é o de exprimir estas forças de viscosidade em função das características do fluido e do seu movimento.

## TEORIA DA VISCOSIDADE

### Líquidos Puros

Nas teorias modernas da física, tende-se a aproximar o estado líquido do estado sólido, antes que do estado gasoso [Comolet R., Bonnin, J., 1963]. No interior de um líquido, uma molécula dada está colidindo, constantemente, sob a ação de um número de moléculas igualmente grande como num cristal. Já nos gases, uma molécula goza de uma liberdade completa, salvo os momentos de colisões ocasionais.

Andrade [Comolet R., Bonnin, J., 1963], sobre esta hipótese, elaborou uma teoria da viscosidade como aquela na qual admite que as moléculas dos líquidos são susceptíveis de vibrar  $n$  vezes por segundo, e suportam a cada meia oscilação uma mudança de direção, ocasionando, assim, uma verdadeira migração (dentro de um sólido, as moléculas vibram ao redor de uma posição fixa). Por causa das rápidas associações moleculares, existe a cada instante uma alongação máxima do curso daquelas moléculas que mudam suas quantidades de movimento (estas mudanças não se produzem se as moléculas possuem uma certa energia potencial  $E$ , independente da temperatura) [Comolet R., Bonnin, J., 1963]. O número de tais moléculas é

proporcional a  $e^{\frac{E}{kT}}$  (estatística de Boltzmann) e se escreve:

$$\text{Equação 3 } \mu = A \frac{B}{T} \quad (\text{fórmula de Andrade})$$

onde  $A$  e  $B$  são constantes. Estas fórmulas justificam a fórmula de Walther e representam, satisfatoriamente, as variações de  $\mu$  para um grande número de líquidos, em uma faixa de temperatura que vai do ponto de fusão ao ponto de ebulição.

### Líquidos Impuros ou Turvos - Misturas

A viscosidade de um líquido varia com a composição e a pureza [Comolet R., Bonnin, J., 1963]. Uma água lodosa, por exemplo, é mais viscosa que a água destilada. Isto deve-se ao

fator  $A$ . Uma fórmula simples de Einstein dá a variação relativa  $\frac{\Delta\mu}{\mu}$  da viscosidade de um fluido, contendo partículas coloidais sólidas e esféricas.

Sob condição de hipóteses simples:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = 2.5\varphi \quad (\text{f\u00f3rmula de Einstein})$$

Equa\u00e7\u00e3o 4 onde  $\varphi$  representa o volume ocupado pelas part\u00edculas em uma unidade de volume da suspens\u00e3o;  $\varphi$  deve ser um n\u00famero pequeno. Esta f\u00f3rmula \u00e9 verificada na pr\u00e1tica. Seguindo o mesmo racioc\u00ednio no caso de emuls\u00f5es (l\u00edquido contendo em suspens\u00e3o part\u00edculas esf\u00e9ricas de um outro fluido n\u00e3o mistur\u00e1vel), verifica-se que:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = K\varphi \quad e$$

$$K = 2.5 - \frac{1.5}{1 + \frac{\mu'}{\mu}}$$

Equa\u00e7\u00e3o 6

$\mu$  e  $\mu'$  s\u00e3o respectivamente os coeficientes de viscosidade din\u00e2mica do l\u00edquido de propor\u00e7\u00e3o pequena e o l\u00edquido intersticial (aquele que existe em maior quantidade).

No que concerne \u00e0s misturas de l\u00edquidos, numerosas tentativas foram feitas por mais de 50 anos para calcular a sua viscosidade em fun\u00e7\u00e3o dos seus constituintes, mas as f\u00f3rmulas encontradas n\u00e3o apresentam qualquer generaliza\u00e7\u00e3o, e n\u00e3o se pode estabelecer, ainda, uma rela\u00e7\u00e3o certa e precisa entre a viscosidade e a concentra\u00e7\u00e3o das solu\u00e7\u00f5es. Segundo o caso, constata-se que a viscosidade aumenta com a concentra\u00e7\u00e3o; em outros casos, poderia passar por um m\u00e1ximo, ou bem diminuir e passar por um m\u00ednimo, tudo isto dependendo do fluido em quest\u00e3o.

## RESIST\u00caNCIA DOS FLUIDOS. FOR\u00c7AS DESENVOLVIDAS EM CORPOS SUBMERSOS

A resist\u00eancia ao escoamento \u00e9 um fato que se enfrenta continuamente no campo da mec\u00e2nica dos fluidos [Albertson, Maurice et al, 1960]. Por exemplo: tubula\u00e7\u00f5es requerem bombas para impulsionar um fluido, de maneira a vencer v\u00e1rios tipos de resist\u00eancia; l\u00edquidos que fluem em canais abertos, mediante a a\u00e7\u00e3o da gravidade, as custas de perdas na energia potencial para vencer resist\u00eancia ao escoamento; e v\u00e1rios tipos de objetos, tais como avi\u00f5es, autom\u00f3veis, gotas de \u00e1gua na chuva, e part\u00edculas de areia e sedimentos, que se movem dentro de um fluido, mas seu movimento resulta em perdas de energia a qual \u00e9 convertida em calor, para vencer a resist\u00eancia ao escoamento ao redor destes objetos. Em resumo, qualquer sistema hidr\u00e1ulico enfrenta, de alguma maneira, uma resist\u00eancia ao seu movimento.

### Causas da Resist\u00eancia ao Escoamento

Como primeiro passo no estudo da resist\u00eancia ao escoamento, a causa de tal resist\u00eancia ser\u00e1 considerada [Albertson, Maurice et al, 1960].

Basicamente, a resist\u00eancia ao escoamento pode ser dividida em dois tipos:

1. Resist\u00eancia ao cisalhamento;
2. Resist\u00eancia de press\u00e3o.

A resist\u00eancia ao cisalhamento, devido a esfor\u00e7os tangenciais, \u00e9 ocasionada pela viscosidade do fluido, e toma lugar ao longo dos contornos (descontinuidades) do fluxo na dire\u00e7\u00e3o do movimento local. A resist\u00eancia de press\u00e3o, devido a esfor\u00e7os normais, \u00e9 ocasionada pela acelera\u00e7\u00e3o do fluido, e resulta em um decr\u00e9scimo da press\u00e3o desde o lado do montante de um objeto imerso em um fluido, ao lado do jusante. Todos os tipos de resist\u00eancia podem ser analisados como uma combina\u00e7\u00e3o destas duas categorias.

Em alguns problemas, a resist\u00eancia \u00e9, claramente, devido somente ao esfor\u00e7o cisalhante em uma superf\u00edcie do contorno e na dire\u00e7\u00e3o do movimento; ainda em outros problemas, a resist\u00eancia \u00e9, claramente, devido somente ao decr\u00e9scimo da press\u00e3o na dire\u00e7\u00e3o do movimento, desde o montante para o jusante, dos limites do fluxo adjacentes \u00e0s bordas do objeto ou superf\u00edcie. Freq\u00fcentemente, os problemas em resist\u00eancia dos fluidos envolvem ambas: resist\u00eancia ao cisalhamento e resist\u00eancia de press\u00e3o em diversas propor\u00e7\u00f5es.

### Resist\u00eancia ao Cisalhamento

Quando um fluido passa por um contorno sólido, as moléculas do fluido, que estão em contato imediato com ela, têm velocidade zero (isto é a mesma velocidade relativa que a superfície), e o esforço cisalhante atua tanto no fluido como na superfície [Albertson, Maurice et al, 1960]. Esse esforço cisalhante na superfície resulta em uma força de arrasto transmitida desde o fluido para a superfície, e ela transmite em troca uma força para o fluido, igual em magnitude, mas oposta em direção. Isto se reflete como uma resistência ao escoamento do fluido.

Esta resistência ou arrasto está associada com o cisalhamento, devido a esforços tangenciais e, portanto, é chamada de resistência ao cisalhamento, ou arrasto de cisalhamento. A direção do arrasto na superfície é a mesma que a do movimento, enquanto a resistência total da superfície da descontinuidade opõe-se ao fluxo na direção contrária, e é o produto da unidade de cisalhamento  $\tau_0$  e a área  $A$  sob a qual atua. Isto é mostrado na Figura 7.

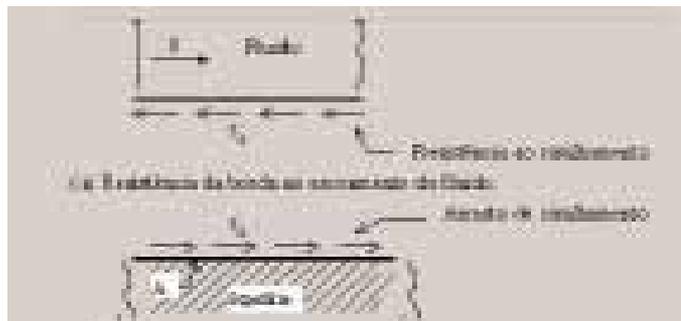


Figura 7 - Resistência ao cisalhamento e arrasto cisalhante.

### Resistência de Pressão

Quando um fluxo contorna um obstáculo não paralelo ao mesmo, o arrasto do objeto e a resistência, ocasionada ao escoamento, depende somente da forma do contorno (esta é uma aproximação válida para número de Reynolds elevados ou onde os efeitos, devido à viscosidade, possam ser desprezados). A forma do obstáculo ocasiona a deflexão das linhas de fluxo e a aceleração local do fluido [Albertson, Maurice et al, 1960]. Conseqüentemente, ocorre um decréscimo na pressão, ou esforços normais, desde o lado do montante ao lado do jusante do objeto.

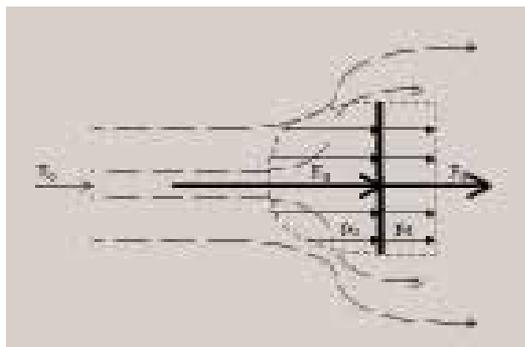


Figura 8 - Arrasto de pressão com separação das forças.

Em resumo, nesta superfície ocorre uma diferença de pressões que resultam em um arrasto de pressão no corpo e uma resistência de pressão que se opõe ao movimento do fluido. Para o disco da Figura 8, a força total de arrasto é a soma algébrica das forças de pressão nos dois lados do disco. Como podemos ver nesta figura, a pressão no lado do montante é essencialmente positiva, enquanto que no lado do jusante a pressão é inteiramente negativa, correspondendo a forças  $F_u$  e  $F_d$  que contribuem no arrasto do disco imerso no fluido.

### Equação Geral do Arrasto

As determinações do arrasto de um fluido, escoando em torno de um objeto [Albertson, Maurice et al, 1960], podem ser feitas pela combinação de:

1. Considerações das variáveis envolvidas;
2. Uso de análise dimensional para arranjar as variáveis em parâmetros simples mais significativos;
3. Uso de dados experimentais para estabelecer as relações numéricas entre esses parâmetros dentro de uma ampla faixa.

As variáveis envolvidas são aquelas que descrevem a *geometria*, o *fluxo*, e o *fluido*. Assim,

$$F_D = \phi_1(L, sf, e, V_o, \rho, \mu)$$

onde  $L$  e  $sf$  descrevem a geometria, e são as características de comprimento e o fator de forma (*shape factor*, que é adimensional) dos contornos sobre os quais o arrasto de cisalhamento e de pressão atuam;  $e$  é a rugosidade da superfície (ou contorno);  $F_D$  e  $V_o$  descrevem o fluxo, e são o arrasto total e a velocidade do fluxo;  $\rho$  e  $\mu$  descrevem as características do fluido.

Utilizando o Teorema Pi. Escolhendo  $L$ ,  $V_o$  e  $\rho$  como variáveis repetidas independentes tem-se que

$$\frac{F_D}{L^2 \rho V_o^2} = \phi_2\left(\frac{V_o L \rho}{\mu}, sf, \frac{e}{L}\right)$$

equação que pode ser arranjada por conveniência em

$$\text{Equação 7} \quad \frac{F_D}{A \rho V_o^2 / 2} = C_D = \phi_3\left(R_E, sf, \frac{e}{L}\right)$$

desde que  $L^2$  é uma área e pode ser colocada como  $A$ , e a pressão de estagnação pode ser obtida pela divisão por 2 para achar  $\rho V_o^2 / 2$ . O primeiro parâmetro é comumente conhecido como coeficiente de arrasto e pode ser arranjado para dar [Albertson, Maurice et al, 1960] a equação geral do arrasto:

$$\text{Equação 8} \quad F_D = \frac{C_D A \rho V_o^2}{2}$$

onde  $F_D$  é a força de arrasto de qualquer superfície de área  $A$ , à velocidade de fluxo  $V_o$ , e sendo  $\rho$  a densidade do fluido.

A equação 7 mostra que o coeficiente de arrasto  $C_D$  depende da relação entre os efeitos viscosos e inerciais (como os contidos no número de Reynolds  $R_E$ ), do fator de forma da superfície  $sf$ , e da rugosidade relativa  $e/L$ . Desde que os efeitos inerciais estão, também, incluídos no termo para pressão de estagnação, é lógico esperar que para grandes valores de  $R_E$  o efeito viscoso fique relativamente muito pequeno e o coeficiente de arrasto  $C_D$  fique independente de  $R_E$ . Isto é verificado tanto na teoria como na prática. Para pequenos valores de  $R_E$ ,  $C_D$  é inversamente proporcional a  $R_E$ , e à medida que  $R_E$  aumenta,  $C_D$  fica mais independente de  $R_E$ .

A área  $A$  é escolhida diferenciadamente para diferentes condições de superfícies. Para superfícies planas, é a área do plano paralela ao fluxo; para objetos submersos, é a área projetada normalmente em relação ao fluxo.

Em efeito, o produto  $A \rho V_o^2 / 2$  dá a força de arrasto que deve resultar da pressão de estagnação  $\rho V_o^2 / 2$  sendo aplicada na área  $A$ , e o coeficiente de arrasto  $C_D$  atua como um fator de correção, que ajusta esta força de estagnação ao atual arrasto encontrado para as condições particulares de contorno (forma do objeto que experimenta arrasto) e condições de fluxo (representada pelo número de Reynolds).

Em muitos problemas, as resistências de cisalhamento e de pressão acontecem simultaneamente. Além disto, com as mesmas condições geométricas, a resistência de cisalhamento (esforços tangenciais) pode predominar para uma condição de fluxo (pequeno  $R_E$ ), e a resistência de pressão (esforços normais) pode predominar sob outras condições (grande  $R_E$ ).

### Teoria da Camada Limite

Em anos passados, a ciência da hidráulica foi largamente empírica. Os primeiros resultados do fenômeno hidráulico foram levantados e projetados com critérios estabelecidos sem o atual conhecimento de detalhes significativos e processos físicos envolvidos no fenômeno [Albertson, Maurice et al, 1960].

Apesar de que muitos cientistas, tal como Osborne Reynolds, fizeram as maiores contribuições à ciência, elas não foram levadas muito em conta, até que Prandtl propôs sua teoria da camada limite nos primeiros anos deste século, e que explica satisfatoriamente os processos físicos mais importantes. Da hipótese de Prandtl, foi possível entender e visualizar os detalhes da maioria dos processos e as causas da resistência das superfícies e das formas.

Prandtl pensava que, em um sistema de fluxo, a influência de um contorno é confinada a uma relativamente fina camada de fluido perto dele. Sua teoria diz que, perto do contorno, uma camada de fluido é desacelerada devido à resistência ao escoamento que é originada pelo esforço cisalhante no contorno (ver Figura 9). Esta fina camada é chamada de camada limite. Ela pode acontecer em fluxos laminares ou turbulentos. Prandtl demonstrou que todas as perdas por atrito ocorrem dentro dessa fina camada adjacente à parede sólida, e o escoamento externo à camada pode ser considerado sem atrito.

Como essa camada atua, mais ou menos, como um objeto submerso dentro de um fluido, elas influenciam além dos limites próprios da mesma. Como será mostrado mais adiante, essa camada tem influência importante no fluxo em condutos uniformes (abertos ou fechados), no fluxo expansivo ou em contração, no fluxo em direções curvilíneas, e no fluxo em torno de objetos submersos.

Apesar de que fora da camada limite o fluxo é, normalmente, irrotacional, dentro da camada limite (e em qualquer direção) a distribuição não uniforme da velocidade resulta em fluxo rotacional.

A espessura da camada limite é representada por  $\delta$  como é mostrado na Figura 9. A resistência ao escoamento, ocasionada pelo contorno próximo, produz uma redução na velocidade e, assim, a quantidade de movimento do fluido, passando pelo contorno é reduzido. Por meio da equação da quantidade de movimento do fluxo, é possível relacionar a variação na quantidade de movimento do fluxo com a resistência total, que o contorno exerce no fluido para ocasionar esta redução na velocidade. Tal relação, com a equação de continuidade e certas hipóteses, permite desenvolver uma expressão matemática para a variação de velocidade dentro da camada limite.

Considera-se uma placa muito fina dentro de um fluido [Albertson, Maurice et al, 1960], como mostra a Figura 9. A velocidade do fluido que se acerca ao contorno, chamada  $V_0$ , é completamente uniforme. Ainda, foi assumido que a aceleração do fluido, ao longo do contorno, é insignificante, comparada com a aceleração do fluido normal a este. Como o fluido encontra o contorno, os esforços de cisalhamento resistem ao escoamento e retardam o movimento do fluido.

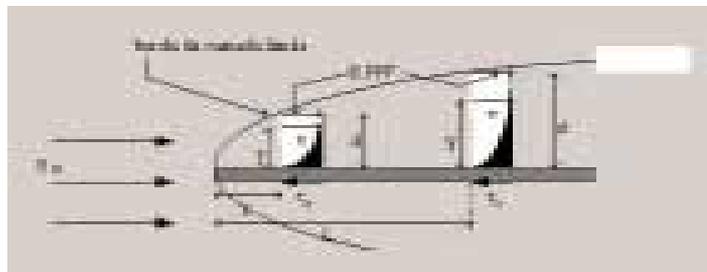


Figura 9 - Representação esquemática da camada limite (escala vertical grandemente ampliçada).

Portanto, a velocidade na superfície é zero, e a alguma distância  $\delta$  do contorno, a velocidade chega perto de  $V_0$ . Estritamente falando, a velocidade na superfície da camada limite, onde  $y=\delta$ , é um pouco menor que  $V_0$ , porque teoricamente a velocidade chega a  $V_0$  somente no infinito

(ainda que na prática este limite é finito). Por razões práticas, a superfície da camada limite tem sido definida, arbitrariamente, como sendo onde a velocidade local  $v$  é quase igual à velocidade ambiental do fluido  $V_\infty$ , escrevendo  $v/V_\infty = 0.99$ .

Esta camada limite, que se desenvolve em uma placa plana, expande-se indefinidamente (com a condição de que a profundidade e o comprimento da placa sejam infinitos), de maneira que  $\delta$  fica muito grande quando  $x$  aumenta no sentido do jusante, e a pressão permanece constante em todo o movimento.

### RESISTÊNCIA DOS OBSTÁCULOS COM ARESTAS VIVAS

Como primeiro passo, considera-se o caso de uma placa infinitamente longa [Comolet R, 1963], e depois será visto o caso de uma placa de comprimento finito.

#### Placa Infinitamente Longa

Seja uma placa plana, fina, de largura  $D$ , infinitamente longa [Comolet R, 1963], e colocada perpendicularmente à velocidade do fluxo  $V_\infty$ . Por razões de geometria, a resistência se reduz ao arrasto de pressão. Para um comprimento  $L$  da placa, tem-se:

$$\text{Equação 9} \quad F = C_x \cdot \frac{1}{2} \rho S V_\infty^2 \quad \text{onde } S = L \cdot D, \rho \text{ é a densidade, e } V_\infty \text{ a velocidade.}$$

Adotando como número de Reynolds:

$$\text{Equação 10} \quad R_E = \frac{V_\infty D}{\nu} \quad \text{onde } \nu \text{ é a viscosidade cinemática.}$$

Quando  $R_E$  é pequeno ( $R_E < 0.1$ ), o escoamento é do tipo puramente viscoso e as linhas decorrentes contornam a placa sem se descolar (Figura 10a). A velocidade aumenta de  $A$  para  $B$ , e diminui de  $B$  para  $C$ , e é máxima nos pontos  $B$  e  $B'$ , onde a curvatura da trajetória é grande.

O coeficiente  $C_x$  é dado por (verificado experimentalmente para número de Reynolds menor que 100):

$$\text{Equação 11} \quad C_x = \frac{8\pi}{R_E} \frac{1}{2.2 - \log R_E}$$

Na parte do jusante da placa, acontecem condições favoráveis a um descolamento (gradiente de pressão fortemente positivo); este não tarda em se produzir, e dois turbilhões aparecem. Estes turbilhões aumentam e as linhas de descolamento se estabelecem sobre as duas bordas da placa (Figura 10b). Para os valores de  $R_E$  na ordem de 10, os turbilhões se desprendem, alternativamente, em forma de um corredor turbilhonário (Figura 10c). Donde se segue que a placa está submetida a um arrasto (perpendicular a  $V_\infty$ ), dirigido alternadamente de um sentido para o outro, mas o valor médio no tempo é nulo.

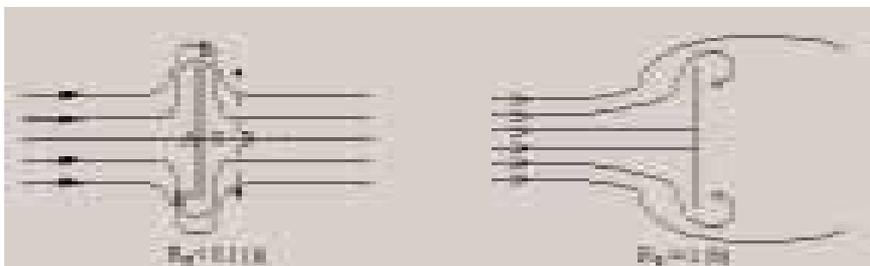


Figura 10 (a) e (b) - Escoamento em torno de uma placa normal.

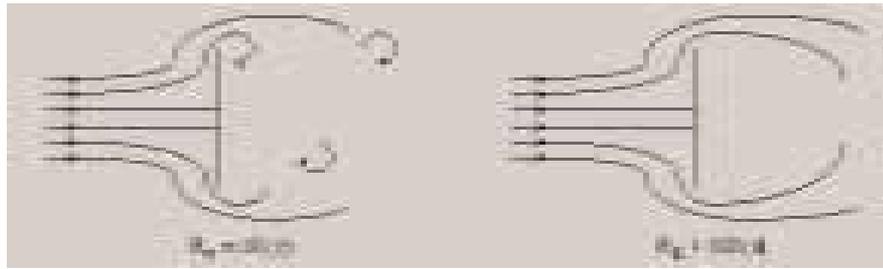


Figura 10 (c) e (d) - Escoamento em torno de uma placa normal à velocidade  $V_\infty$ .

Se  $R_E$  continua a aumentar, a esteira de vórtices perde sua característica de regularidade, se forma uma esteira que ocupa toda a parte posterior da placa ( $R_E \approx 100$ ) e se modifica lentamente até que alcança uma configuração mais estável, mas as linhas de descolamento restantes estão ainda situadas sobre as arestas da placa (Figura 10d). Para grandes valores de  $R_E$ ,  $C_x$  não varia mais e a experiência confirma que:

$$C_x = 2$$

### Placa de Comprimento Finito

Quando a placa tem um comprimento limitado [Comolet R, 1963], aparece um outro fenômeno denominado de Ventilação de Esteira, que leva a uma diminuição de  $C_x$ .

Para grandes valores de  $R_E$ ,  $C_x$  se estabelece, não obstante, num valor constante. Eis aqui aqueles valores:

placa infinitamente longa $\left(\frac{L}{D} = \infty\right)$	$C_x = 2$
placa quadrada $\left(\frac{L}{D} = 1\right)$	$C_x = 1.17$
placa circular	$C_x = 1.17$

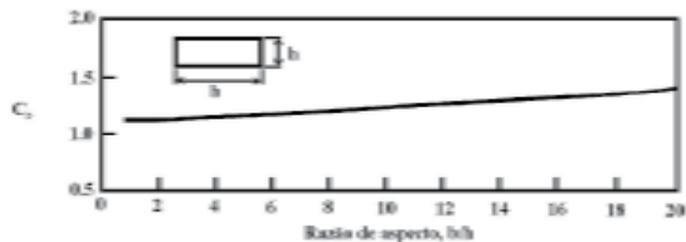


Figura 11 - Variação do coeficiente de resistência com a razão de aspecto para uma placa plana de largura infinita, normal ao escoamento, com  $RE > 1000$ .

Quando o comprimento  $L$  da placa é inferior a  $D$ , as conclusões são as mesmas com a condição que deve ser considerada a relação inversa  $D/L$ .

A variação do coeficiente de arrasto com a relação de aspecto é mostrada [Giles, Ranauld V.] na Figura 11.

A prática tem demonstrado que o coeficiente de arrasto varia com o número de Reynolds e com o formato do corpo imerso no fluxo.

### PROJETO DOS SENSORES

Viu-se, anteriormente, que a força de arrasto de cisalhamento depende do coeficiente de arrasto, da densidade, da área característica e da velocidade do fluxo. Por sua vez, o número de Reynolds é diretamente proporcional à velocidade e ao comprimento característico do corpo,

e inversamente proporcional à viscosidade cinemática (que é igual à viscosidade dividida pela densidade), ou seja, que a força é igual a

Equação 12 
$$F = C_D \rho L h (\omega r)^2$$
 onde

Equação 13 
$$C_D = \frac{1.3}{\sqrt{R_E}} + \frac{4.2}{R_E}$$
 para placas com vetor de área perpendicular ao fluxo.

Equação 14 
$$C_D = \frac{8\pi}{R_E} \frac{1}{2.2 - \log(R_E)}$$
 para placas com vetor de área paralelo ao fluxo.

Equação 15 
$$R_E = \frac{\omega r L}{\nu}$$
 e por sua vez

Equação 16 
$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

A orientação espacial das placas e descrição como placas paralelas e perpendiculares ao fluxo, referem-se aos seus respectivos vetores de área.

Desta maneira, temos todas as relações resumidas no conjunto de fórmulas acima. Pode-se notar que se tivermos informação quantitativa da força que atua no corpo, as características geométricas do sistema, (medidas do sensor a ser colocado no fluxo), as condições de fluxo (velocidade), e a natureza do fluido (densidade) poder-se-ia calcular o valor do coeficiente de arrasto que contém informação da viscosidade do fluido.

Assim, pode-se notar que para a medição da viscosidade precisar-se-á de um sensor de velocidade, um sensor de nível (para saber o comprimento imerso do sensor e para posterior cálculo da área efetiva) e um sensor de força, que meça a força de atrito, ocasionada pelo fluido nas paredes do sensor, minimizando, ao máximo, o arrasto devido ao arrasto de pressão.

Para a medição da densidade, precisar-se-á dos mesmos sensores, mas, neste caso, deve ser minimizado o arrasto devido à viscosidade.

O sistema para teste é composto por um recipiente cilíndrico rotativo com medida de diâmetro de, aproximadamente, 0.14m e uma altura de 0.23m que gira a uma velocidade aproximada de 0.5 Hz.

### SENSOR DE VELOCIDADE

É composto por dois dispositivos do tipo reed-switch que são chaves acionadas magneticamente. No eixo do motor, antes do redutor de velocidade, foram colados 2 ímãs permanentes que, ao girar à velocidade de aproximadamente 1140rpm (nominal), geram pulsos elétricos nestas chaves, ocasionando, assim, um trem de pulsos de freqüência proporcional à velocidade de rotação.

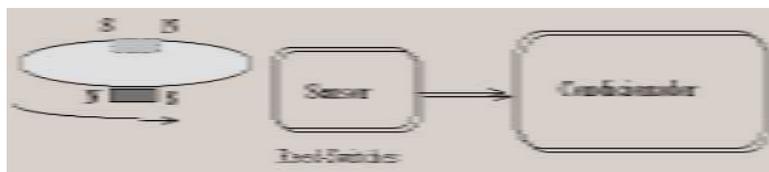


Figura 12 - Sistema de medição de velocidade.

O condicionador de sinais é composto de um conversor freqüência-tensão e proporciona, na sua saída, um sinal contínuo proporcional à velocidade do motor e pode ser visualizado na Figura 4. A calibração foi feita, utilizando um osciloscópio digital, medindo a largura dos pulsos para uma carga padrão. Nota-se que a variação da velocidade do motor com a carga é desprezível.

No início, os ímãs foram colocados na base do tambor que gira com freqüência de, apro-

ximadamente, 0.5 Hz (ou seja, uma volta completa a cada 2 segundos), mas surgiram problemas com o condicionador, pois a frequência muito baixa forçava a ter tempos de estabilização muito elevados e com a falta de estabilidade inerente.

A distância mínima entre os *reed switches* e o ímã é de, aproximadamente, 0.005m. De cada *reed switch* saem dois fios, onde um de cada é ligado à entrada do condicionador, e os restantes são ligados à tensão de alimentação regulada e à referência, respectivamente.

### **SENSOR DE TEMPERATURA**

Sabe-se que o valor da densidade varia com a temperatura, portanto, precisa-se da medida desta para poder efetuar alguns ajustes. Para este trabalho, inicialmente, foi utilizado um sensor de bulbo de mercúrio como termômetro e, depois, foi desenvolvido um termômetro a semicondutor, utilizando um circuito integrado dedicado para esta função. O princípio, utilizado neste último, é o da variação na tensão quiescente de polarização de uma junção p-n com a variação da temperatura. Para isto, foi utilizado um sensor LM35D, fabricado pela National Semiconductor Corporation, e fornece um sinal de saída de 10mV/°C que é amplificado por um condicionador de sinais. A precisão é de 0.5 °C com um desvio de linearidade de, aproximadamente, 0.25 °C dentro da faixa de atuação (0-100 °C). Este sensor é colocado ao ar livre, pois a temperatura da lama é, aproximadamente, igual à temperatura ambiente. Maiores informações podem ser obtidas do Linear Devices Databook da National Semiconductor Corporation, páginas 6-12 a 6-21.

### **SENSOR DE FORÇA DE ARRASTO DE PRESSÃO**

É o sensor que nos dá a informação da densidade do fluido. No início, como medida de densidade do fluido em questão foi utilizada uma balança de precisão e um volume conhecido. Foi projetado um sensor de força de arrasto devido ao arrasto de pressão, de maneira a ter uma medida da densidade diretamente da linha de processo, para utilizá-la no cálculo da viscosidade.

Como foi colocado no capítulo anterior, para número de Reynolds relativamente alto, o coeficiente de arrasto fica constante, e só depende das características geométricas do corpo imerso como mostra a Figura 13. Como o número de Reynolds neste sistema é muito baixo, foi necessária a utilização da fórmula aproximada do coeficiente de arrasto para  $R_E$  menores que 100, o que ocasiona mais uma equação e mais uma incógnita.

Desta maneira, foi projetado um sensor de força de arrasto, que consta de uma haste de aço orientada com seu vetor de área paralelo à direção do fluxo. O sensor de força projetado é composto de uma haste de aço com dimensões de, aproximadamente, 0.30 m de altura, uma espessura de, aproximadamente, 0.0007 m e uma largura de 0.012 m, com suporte fixo em uma das suas extremidades. Os strain-gauges foram colados a 0.01 m do suporte mecânico, restando uma distância de 0.239 m até a extremidade inferior. O diagrama mecânico e as variáveis podem ser visualizados na Figura 13.



Figura 13 - Sensor de arrasto de pressão.

### SENSOR DE FORÇA DE ARRASTO VISCOSO

O sensor de força foi projetado de acordo com as especificações do sistema, e é composto por uma haste de alumínio e outras duas de aço. Estas últimas com dimensões de, aproximadamente, 0.30 m de altura; espessura de, aproximadamente, 0.0007 m e uma largura de 0.012 m, com suporte fixo em uma das suas extremidades. Já a lâmina de alumínio tem comprimento de 0.124 m, largura de 0.015 m e espessura de aproximadamente 0.0007 m. As duas hastes de aço são imersas aos poucos no fluido em rotação até um nível pré-determinado pelo sensor de nível, por meio de um braço mecânico constituindo as hastes sensoras da força de arrasto.

Na haste de alumínio que fica na parte superior, foram colados sensores de deformação do tipo strain-gauges, na configuração de meia ponte, e que nos dão uma informação de força média (transmitida através de um braço de alavanca) que o fluido exerce sob o corpo em questão, constituindo o sensor de deformação. O condicionador de sinais utilizado consta de um amplificador de instrumentação que nos fornece a saída já amplificada para ser lida na placa de aquisição de dados.

Para a medição da força de arrasto de origem viscosa, as hastes sensoras devem ser colocadas de maneira a minimizar o arrasto devido à pressão de choque, para isto elas devem ser colocadas com o seu vetor de superfície perpendicular ao fluxo, de maneira a que arrasto viscoso seja o principal responsável pelo valor de força medido, e assim poder desprezar o arrasto de pressão. Os strain-gauges foram colados a, aproximadamente, 0.03 m do suporte mecânico, restando uma distância de 0.357 m até a extremidade inferior. A distância entre as hastes é de aproximadamente 0.005m. Foi desprezada a influência entre as hastes devido às baixas velocidades envolvidas, o efeito torcional e a força de sustentação, devido à trajetória curvilínea do fluido. Os strain-gauges são, praticamente, insensíveis a esforços transversais.

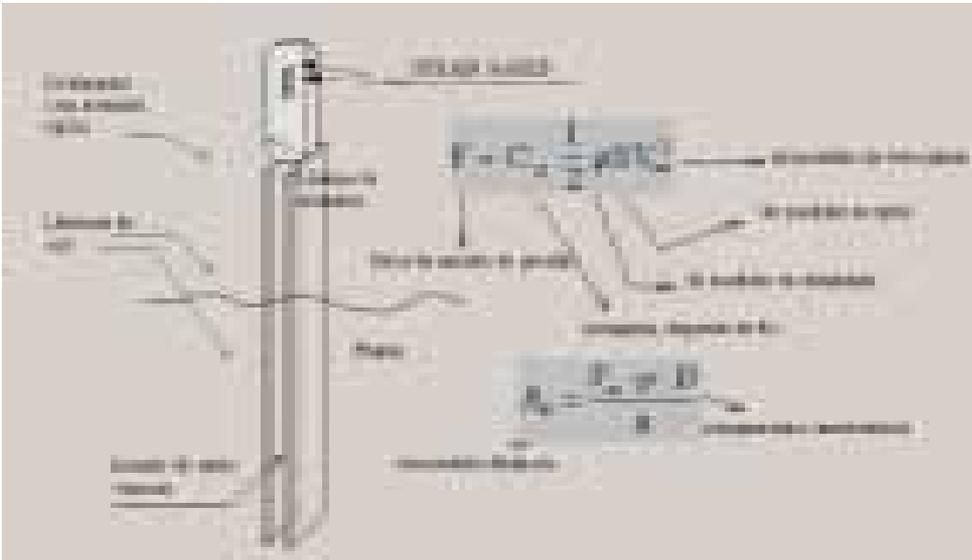


Figura 14 - Sensor de arrasto viscoso.

Para um estudo mais detalhado deste tipo de sensor, devem ser levadas em conta as características citadas no parágrafo anterior.

Os sensores de viscosidade e densidade são colocados no fluido, simultaneamente, e estão separados por uma distância aproximada de 0.04 m.

Dentre os materiais comuns para o elemento elástico, destacam-se o aço ABNT 4340, com tensão de escoamento de 800 MPa e módulo de elasticidade (E) de 207 GPa, e o alumínio 2024-T4, com tensão de escoamento de 318 MPa e módulo de elasticidade de 73 GPa.

Para o projeto dos dois últimos sensores mencionados, foram utilizados strain-gauges, fabricados pela KYOWA (Japão), com as características mostradas na tabela 1.

Tabela 1 - Características dos Strain-gauges.

Modelo: 400-3-120-C1-11	Gauge Fornecedor: 2.03 ± 1.0 %
Composição do elemento de medida: Aço	Exatidão térmica: 11.3 μm/m/°C
Comprimento: 3 mm	Sensibilidade longitudinal (24°C, 50 % RH): 0.40 %
Resistência ao deslocamento (24°C, 50 % RH): 119.3 ± 0.2 Ω	Coeficiente de temperatura: 0.03 ± 0.3 %/100°C
Vol. 40.72286	Galv. 113 A
Coeficiente de temperatura do Gauge Fornecedor: 0.3 ± 0.3 %/100°C	
Fórmula para (valor de deformação a 100°C): $\text{valor} = -0.42 \cdot 10^{-2} + 0.32 \cdot 10^{-1} \cdot -0.33 \cdot 10^{-1} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-1}$	
Relação: + 0.33 [(km/m)/°C]	

Foram utilizados o total de quatro extensômetros, colados com cimento PC-6. Cabe ressaltar que o sensor de viscosidade é de alumínio e o strain-gauge tem compensação de variação de temperatura para o aço. Isto não é inconveniente, devido a que a faixa de temperatura de trabalho do sensor é muito pequena (temperatura ambiente), o que faz o erro, devido à variação, de temperatura desprezível.

### SENSOR DE NÍVEL

De maneira a aumentar o ganho do sensor de viscosidade e para poder aproveitá-lo como sensor de nível, foram utilizadas duas hastes, constituindo um medidor de nível-viscosidade. Assim, o sensor de força de arrasto viscoso é composto de duas lâminas de aço paralelas (separadas por 0.005 m aproximadamente), isoladas eletricamente e que podem ser utilizadas como medidores de nível, usando o princípio da variação da capacitância elétrica com o comprimento imerso no fluido.

Para isolar as hastes eletricamente, estas foram unidas com um material epóxi que fornece a rigidez suficiente. Para evitar a circulação de corrente elétrica através do fluido, foi utilizado o produto M-COAT A (Air-Drying Polyurethane Coating, Control Number 792, Measurements Group Ing. Raleigh, N.C.) que é um composto de poliuretano, utilizado para isolamento de strain-gauges. O sensor pode ser visualizado na Figura 15.

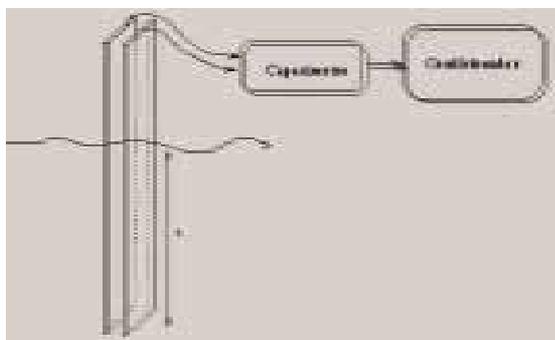


Figura 15 - Sensor de nível por variação da capacitância elétrica.

O revestimento, mencionado acima, é aplicado na superfície das hastes e fornece o isolamento máximo depois de uma semana aproximadamente. Este composto também foi utilizado na isolação dos extensômetros, o que foi necessário pelo tipo de ambiente em que estão colocados.

## Resultados experimentais

### ENSAIOS REALIZADOS COM OS SENSORES DE VISCOSIDADE E DENSIDADE

As medidas foram realizadas em diversas datas, utilizando para este efeito óleos comerciais da marca Mobil Oil, com densidades SAE 30, 40, 90 e 20W/40. SAE são as siglas da entidade Society of Automotive Engineers e definem o comportamento do valor da viscosidade para óleos de uso automotor, com a temperatura. A letra W deriva da palavra Winter (inverno) e define o valor da viscosidade a 0 °F, cabe destacar que quando não aparece esta letra, o valor é dado para ensaios de medição da viscosidade a 210 °F.

O condicionador de extensometria, utilizado para as medições de deformação mecânica relativa, é um condicionador projetado e montado no laboratório do IEE e é identificado por FTCC. INMETAL.NI-0188 6. O misturador utilizado tem a seguinte inscrição na placa de patrimônio da UFRGS, Patrimônio DEMET, N°. Cadastro 517, localizado no Laboratório de Microfusão do Centro de Tecnologia.

Nas tabelas que seguem, são representados os valores de saída correspondentes à deformação relativa nas hastes devido ao arrasto do fluido, em unidades de  $\mu\text{m}/\text{m}$  para a respectiva viscosidade dada pelo tipo de óleo. Também é representada, nestas tabelas, a temperatura na qual a medida foi efetuada, e o comprimento efetivo sensor da haste.

### Sensor de Viscosidade

Altura efetiva = 0.06 m.

Tabela 2 - Valores obtidos do sensor de viscosidade ( $h = 0.06 \text{ m}$ ).

Temperatura (°C)	SdG 20M/40 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 20 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 40 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 90 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
19.5	219.16	161.15	258.19	299.17
19.5	160.14	219.14	254.19	
19.5	250.110	173.19	233.13	263.14

Tabela 3 - Valores obtidos do sensor de viscosidade ( $h = 0.12 \text{ m}$ ).

Temperatura (°C)	SdG 20M/40 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 20 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 40 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 90 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
19.5		299.15	304.14	260.10
19.5	301.13	297.10	350.16	267.15
19.5	364.110	296.17	354.15	263.14

### Sensor de Densidade

Altura efetiva = 0.06 m.

Tabela 4 - Valores obtidos do sensor de densidade ( $h = 0.06 \text{ m}$ ).

Temperatura (°C)	SdG 20M/40 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 20 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 40 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 90 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
19.5		53.11	63.14	73.17
19.5	69.11	43.11	63.12	74.11
19.5	69.12	43.13	62.12	73.11

Altura efetiva = 0.12 m.

Tabela 5 - Valores obtidos do sensor de densidade ( $h = 0.12 \text{ m}$ ).

Temperatura (°C)	SdG 20M/40 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 20 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 40 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	SdG 90 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
19.5		124.13	133.19	209.19
19.5		104.13	133.14	200.10
19.5	136.14	90.13	133.13	143.13

Deve ser salientado que os ensaios foram feitos em dias diferentes e com as hastes em posições diferentes, em relação ao ângulo em que o fluxo as atinge. Isto explica as grandes diferenças encontradas, comparando ambas as tabelas.

### CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A calibração das hastes sensoras de viscosidade e densidade foi feita mediante um sistema de pesos como mostra a Figura 16. O ponto de aplicação da carga é o ponto médio onde atua a força de arrasto, que no caso é a metade da profundidade efetiva das hastes (0.06 e 0.12 m), com as quais foram feitas as medições. Um fio é amarrado no ponto médio da haste (0.03 e 0.06

m) que é suportado por uma polia que direciona o sentido da força a ser aplicada. Foram usadas pequenas massas calibradas para simular as forças de arrasto dentro do fluido e para ter uma noção das forças atuantes no sistema.

A excitação do sistema foi feita, aplicando estímulos em ordem crescente e logo decrescente, para obter informação da linearidade, histerese e desvio de zero. Os resultados desta calibração são apresentados a seguir e o processo é esquematizado na Figura 16.

As massas utilizadas foram de 1, 2, 5, 10, 20 e 50 gramas e foram aplicadas uma a uma a cada sensor para cada altura. Os valores da excitação são dados em Newton, e as saídas em  $\mu\text{m/m}$  foram registradas direto do condicionador de sinais para extensometria. Cada gráfico tem informação da saída do transdutor correspondente para sinais de estímulo crescentes e decrescentes para cada uma das alturas. Portanto, tem-se 4 funções por gráfico. Também foram apresentadas as tabelas com os dados levantados para o efeito.

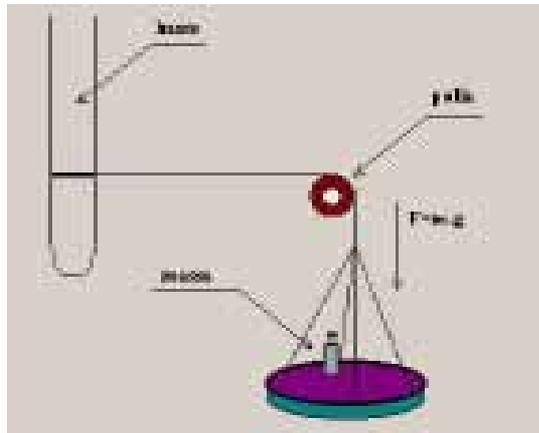


Figura 16 - Calibração dos sensores.

Deve ser ressaltado que o fato de considerar o ponto equivalente de atuação das forças de arrasto como o ponto médio é uma mera aproximação, já que nas lamelas tem-se gradientes de viscosidades e densidades ao longo do eixo vertical, o que deslocaria o ponto equivalente de atuação da força de arrasto.

### Calibração do sensor de Viscosidade

Tabela 6 - Calibração do sensor de viscosidade.

Força (Newton)	Altura de 200 m		Altura de 205 m	
	Resposta para aumento	Resposta para decréscimo	Resposta para aumento	Resposta para decréscimo
	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]
0	0	0	0	0
0,00940	45	55	54	51
0,01962	90	91	61	61
0,02984	135	134	124	124
0,03996	180	178	160	159
0,04982	225	224	222	222
0,04982	181,5	181,5	182,5	182,5

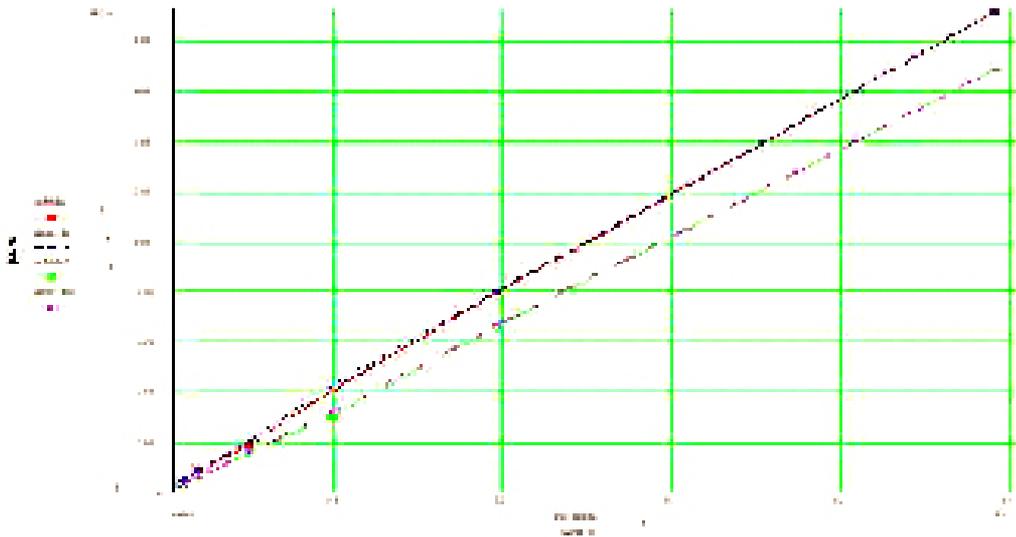


Figura 17 - Curva de calibração do sensor de viscosidade.

### Calibração do sensor de densidade

Tabela 7 - Resposta do sensor de densidade.

Entrada [kg/m <sup>3</sup> ]	Altura 0.03 m		Altura 0.05 m	
	Resposta para aumento de densidade [mV]	Resposta para diminuição de densidade [mV]	Resposta para aumento de densidade [mV]	Resposta para diminuição de densidade [mV]
0	0	0	0	0
0.00901	24	20	22	22
0.01962	57	57	45	45
0.04905	146	147	109	109
0.0901	287	288	220	220
0.1962	562	563	485	487
0.4905	1261	1261	1213	1213

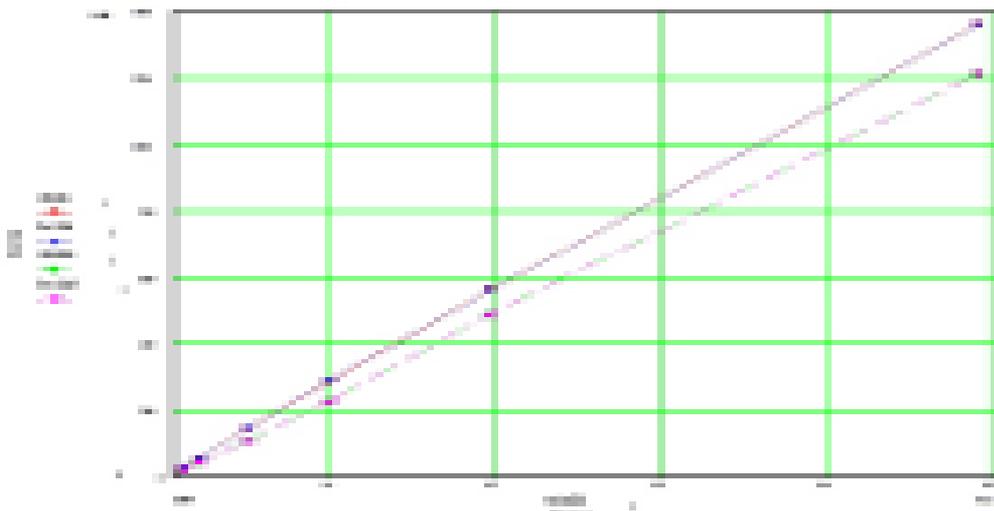


Figura 18 - Calibração do sensor de densidade.

Nos gráficos acima, pode-se observar a existência de uma pequena histerese, que pode ser devido ao procedimento escolhido de calibração, utilizando uma polia. Provavelmente, o atrito desta produz a pequena histerese observada.

## CÁLCULO DAS FORÇAS ESPERADAS, UTILIZANDO VALORES DE VISCOSIDADE E DENSIDADE MEDIDOS.

### Medição da viscosidade e densidade dos óleos

Para efeitos de aferição com um padrão, foram feitas as medidas de viscosidade nos óleos com copos Zahn N<sup>o</sup>. 5. Este copo é nada mais do que um pequeno recipiente cilíndrico de bronze com uma abertura no lado superior por onde o líquido em questão é carregado, e um pequeno orifício no lado inferior por onde o líquido deverá escorrer por efeito da ação da gravidade. O tempo que o líquido demora para escorrer pelo orifício fornece uma informação de viscosidade cinemática. A incerteza esperada neste tipo de medição é, em torno, de 10%. Os valores encontrados na média de várias medições são apresentados na tabela 8.

De acordo com o método empregado neste trabalho para a medição da viscosidade, deve-se levar em conta o valor da densidade, isto para efeitos de cálculo da viscosidade absoluta do líquido. Para a medição da densidade dos óleos, foi empregado um recipiente de volume conhecido. Este recipiente foi enchido do óleo em questão e logo pesado numa balança de precisão. Os valores médios encontrados para estes óleos também é representado na tabela 8.

Tabela 8 - Viscosidade e densidades medidas com padrões secundários.

TIPO DE ÓLEO (T = 38 °C)	VISCOSIDADE [s]	DENSIDADE [kg/m <sup>3</sup> ]
S.A.E 30	13.3	812
S.A.E 40	20.3	848
S.A.E 90	29	874

As medidas em segundos do copo Zahn número 5 têm relação com as medidas em segundos do viscosímetro Saybolt Universal (SSU), e cuja transformação para a unidade Stoke (CGS) é feita de acordo com a função abaixo.

$$v[\text{St}] = 0.0022t + \frac{1.0}{t}$$

Equação 17

O Stoke é equivalente a sua correspondente no Sistema Internacional (SI) 1 St = 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s.

Calculando a viscosidade dinâmica, utilizando a relação  $\mu = \rho \nu$ , tem-se (tabela 9):

Tabela 9 - Medidas da viscosidade dos óleos com copo Zahn.

TIPO DE ÓLEO (T = 38 °C)	VISCOS. DINÂMICA ZAHN [s]	VISCOS. DINÂMICA SSU [s]	VISCOS. DINÂMICA [St]	VISCOS. DINÂMICA [m <sup>2</sup> /s]
S.A.E 30	13.3	1392	3.3	3.3 10 <sup>-4</sup>
S.A.E 40	20.3	2000	4.4	4.4 10 <sup>-4</sup>
S.A.E 90	29	2900	6.38	6.38 10 <sup>-4</sup>

As viscosidades absolutas aproximadas são apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 - Medidas da densidade dos óleos com balança de precisão.

TIPO DE ÓLEO (T = 38 °C)	VISCOSIDADE DINÂMICA [N.s/m <sup>2</sup> ]
S.A.E 30	0.00116
S.A.E 40	0.0019
S.A.E 90	0.0027

### Cálculo das forças desenvolvidas nas hastes

Cabe ressaltar que o cálculo teórico a continuação é um valor aproximado. Devido as imperfeições geométricas do recipiente, os valores da velocidade angular e da densidade são aproximados, e houve uma pequena variação de temperatura no intervalo entre as medidas. Para efeitos de comparação do valor calculado com o medido, foi utilizado o método da regressão

linear, para extrair os valores de deformação relativa da curva de calibração de cada transdutor.

Deve ser salientado que a fórmula utilizada para o cálculo da velocidade tangencial é válida para fluidos com valor de viscosidade infinito (sólidos), já que a variação da velocidade tangencial com o raio não é linear quando tratamos com fluidos em movimento rotacional, portanto só temos um valor aproximado. Essa característica deverá ser levada em conta para melhorar a precisão do sistema.

### Viscosímetro

Com os valores da viscosidade absoluta e a densidade conhecida, pode-se calcular qual a força que o fluido deve conferir às hastes sensoras. Tudo isto utilizando as fórmulas teóricas que vêm da teoria da camada limite, apresentada anteriormente.

Como primeiro passo, é calculado o número de Reynolds. Logo com este resultado, calcula-se o valor do coeficiente médio de arrasto, especificamente utilizando a equação de Kuo, que já foi apresentada em capítulo anterior. Com os valores do coeficiente médio de arrasto, densidade, velocidade de fluxo e as características geométricas dos sensores e do recipiente, pode-se calcular a força a que os sensores estão submetidos.

A fórmula do número de Reynolds é

$$R_E = \frac{\omega r L}{\nu}$$

onde  $\omega$  é a velocidade de rotação,  $r$  a distância do centro do recipiente até a posição do sensor,  $L$  é o comprimento característico (neste caso corresponde à largura das hastes) e  $\nu$  é a viscosidade cinemática medida com copo Zahn. Para efeitos de cálculo, será utilizado como ferramenta o software matemático MathCad 5.0. Os valores médios encontrados na prática foram calculados dentre 40 bateladas de aquisição.

#### CÁLCULO DAS FORÇAS DE AFRASTO SAE 91

Altura da haste em relação ao eixo do líquido: 0,05 m

Velocidade de rotação: 114 rad/s

Comprimento da haste: 0,012 m

Posição do sensor em relação ao centro: 0,05 m

$r := 0,05 \text{ m}$       $L := 0,012 \text{ m}$       $\omega := 114 \text{ rad/s}$

Para o cálculo da força usando um óleo SAE 91, usamos as medidas da viscosidade cinemática:

$\rho := 894 \text{ kg/m}^3$       $\nu := 0,00033 \text{ m}^2/\text{s}$

Com este valor do coeficiente de arrasto calculamos a

força por haste:  $F_{d1}$

$F_{d1} = 0,06 \text{ N}$

$F_{d2} := C_d \cdot \rho \cdot L \cdot h \cdot (\omega \cdot r)^2$       $F_{d2} = 0,0344367248 \text{ N}$

Como o sensor consta de duas hastes, a força total desenvolvida deve ser igual à soma das duas forças.

$r := 0,05 \text{ m}$

$$R := \frac{\omega \cdot r \cdot L}{\nu} \quad R = 2,95447538498$$

$$C_d := \frac{1,33}{\sqrt{R}} + \frac{4,12}{R} \quad C_d = 2,1682635555$$

$$F_{d2} := C_d \cdot \rho \cdot L \cdot h \cdot (\omega \cdot r)^2 \quad F_{d2} = 0,0344367248 \text{ N}$$

$$F_t := F_{d1} + F_{d2} \quad F_t = 0,0729769222 \text{ N}$$

O seguinte passo é calcular a deformação que esta força deve produzir no sensor e comparar com o valor de deformação medido. Para isto, foi feito um cálculo de regressão linear a partir da curva de calibração de maneira a obter a equação geral do comportamento da deformação com a carga.

#### Regressão Linear

$m = \text{slope}(\text{exatidão}, \text{subida})$

$b = \text{intercept}(\text{exatidão}, \text{subida})$

Deform SAE90 =  $m \cdot Fr + b$       Deform SAE90 = 29,64221-0,99

O valor médio da medida de deformação é aproximadamente igual à calculada.

Deformação\_SAE90médico = 29,64221 mm

Tabela 11 - Comparação da resposta do viscosímetro com o valor teórico para  $h = 0,06 \text{ m}$ .

$h = 0,06 \text{ m}$	Valor médio medido [Pa.s (cm)]	Valor calculado [Pa.s (cm)]	Divergência em %
SAE 90	272,75	292,73	9,5
SAE 40	214,40	213,58	1,9
SAE 30	161,25	162,98	9,3

Este valor dá um desvio de, aproximadamente, 8% do valor teórico calculado. Esta divergência pode ser devido aos valores de velocidade, posição, dimensões geométricas que facilmente podem ter erros desta ordem de grandeza, propagando assim o erro na medição.

Assim, pode-se montar as seguintes tabelas para o viscosímetro (tabela 11 e tabela 12).

Tabela 12 - Comparação da resposta do viscosímetro com o valor teórico para  $h = 0,12 \text{ m}$ .

$h = 0,12 \text{ m}$	Valor médio medido [Pa.s (cm)]	Valor calculado [Pa.s (cm)]	Divergência em %
SAE 90	463,00	492,12	7,23
SAE 40	333,67	331,24	0,73
SAE 30	234,67	272,79	7,65

Pode-se observar que o valor medido é, aproximadamente, igual ao valor calculado. Portanto, pode ser verificada a validade das equações teóricas. O desvio máximo esperado foi de 9.5% que é um valor muito pequeno, levando em consideração as aproximações e incertezas do processo de medição (comprimentos, velocidades e densidades) e de cálculo (regressão linear e a fórmula de Kuo). Tudo isto nos leva à conclusão de que este sistema de medição de viscosidade, que mede a força de arrasto, é bastante confiável e pode ser implementado num sistema com medição na linha de processo.

#### Densímetro

Com os valores da velocidade tangencial do fluido que chega no sensor, os fatores geométricos, a viscosidade cinemática e o valor da densidade, pode-se calcular qual a força que o fluido deve conferir às hastas sensoras. Tudo isto utilizando as fórmulas teóricas que vêm da teoria que trata sobre resistência dos obstáculos com arestas vivas, apresentado anteriormente.

Como primeiro passo, é calculado a velocidade média. Logo, o número de Reynolds. Com este resultado, calcula-se o valor do coeficiente médio de arrasto e, finalmente, com os valores do coeficiente médio de arrasto, densidade. Com as características geométricas do sensor e do recipiente, pode-se calcular a força que o sensor está submetido.

Utilizando para o efeito o MathCad:

### CÁLCULO DAS FORÇAS DE ATRASO SAE 90

Altura da haste em relação ao nível do líquido: 11,3 cm

Velocidade de rotação:  $n = 1000$  rpm

Comprimento característico: 1,2 cm

Tempo de sensor marcação ao centro: 12,5 cm

Razo é o recorte: 10 cm

Gap entre a borda do recorte e a haste: 3 mm

Comprimento real sob o líquido: 11,3 cm

$$R = 0,07 \quad \text{gap} = 0,003$$

$$L = 0,012 \quad \eta = 0,013$$

$$r = 0,02$$

$$z = 0$$

A velocidade média no fluxo que choca nas hastes é dada por:

$$v = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{R}{R-L-\text{gap}} \cdot \omega \cdot r \cdot dx \quad v = 0,1733902884$$

O cálculo acima é aproximado (válido para corpos esféricos em movimento circular)

Para o cálculo da força usando um tubo SAE 90, usamos as medidas da viscosidade dinâmica e da densidade:

$$\rho = 998 \quad \eta = 0,0101682$$

O número de Reynolds é igual a:

$$R = \frac{v \cdot L}{\eta} \quad R = 3390129517$$

Assim o coeficiente de arrasto de acordo com a fórmula de arrasto para placas paralelas ao fluxo e número de Reynolds maior que 10 temos:

$$C_d = \frac{0,3}{R^{0,27} \cdot \log_2(R)} \quad C_d = 4,52016375$$

Com este valor de coeficiente de arrasto calculamos a força para  $h = 11,3$  cm

$$F_d = \frac{C_d \cdot \rho \cdot (v \cdot h)^2 \cdot A}{2} \quad F_d = 0,0032363229$$

Regressão Linear

$$m := \text{slope}(\text{excitação}, \text{subida}) \quad m = 3,480396195 \cdot 10^{-5}$$

$$b := \text{intercept}(\text{excitação}, \text{subida}) \quad b = -4,7845338212$$

$$\text{DefForm}_3[4]2211 := m \cdot F_d + b \quad \text{DefForm}_3[4]2210 = 211,675707099$$

O valor médio medido foi de 193.33 mm/m que está dentro dos 5%.

Tabela 13 - Comparação da resposta do densímetro com o valor teórico para  $h = 0,06$  m.

h = 0,06 m	Valor medido (mm/m)	Valor calculado (mm/m)	Divergência absoluta (mm/m)	Divergência relativa (%)
5,0 s	211,33	193,33	18,00	9,38%
5,0 s	40,33	40,33	0,00	0,00%
5,0 s	49,33	51,33	-2,00	-4,05%

Tabela 14 - Comparação da resposta do densímetro com o valor teórico para  $h = 0,06$  m.

h = 0,12 m	Valor medido (mm/m)	Valor calculado (mm/m)	Divergência absoluta (mm/m)	Divergência relativa (%)
5,0 s	193,33	201,33	-8,00	-4,14%
5,0 s	129,33	149,33	-20,00	-15,46%
5,0 s	106,00	117,33	-11,33	-10,68%

Pode-se observar que os resultados obtidos para o medidor de densidade foram aproximados (desvio máximo esperado na ordem dos 16%), mas dando uma olhada nas tabelas de valores medidos em várias oportunidades, pode ser observado que não se tem uma repetibilidade muito boa, isto devido a que o sensor é muito sensível à mudança de posição, o que ocorreu inúmeras vezes durante o processo de medição. Uma possível solução para minimizar este problema é utilizar um elemento de suporte fixo para o sensor. Portanto, fica ainda por ser estudado o comportamento deste tipo de sensor.

### AQUISIÇÃO DIGITAL DE DADOS

Foi feita a coleta de dados, utilizando um conversor analógico-digital, com freqüência de aquisição igual a 1000 Hz, durante 10 segundos, o que dá um total de 10000 pontos por batelada de aquisição.

O objetivo é o de observar as interferências (no caso devido à imperfeição geométrica do recipiente e ao ruído ambiental), verificar as diferenças de sinal, quando utilizado cada tipo de óleo, e o de observar o valor da menor freqüência de ressonância para cada sensor.

Para estas medidas, foi utilizado um microcomputador equipado com processador Pentium 90, uma placa de aquisição com um conversor AD7802 e um software em linguagem C, desenvolvido pelo autor deste trabalho. Na saída do condicionador, foi aplicado um filtro passa-baixa com o objetivo de minimizar o ruído de 60 Hz, que influenciava na medida. O conversor analógico-digital possui, na sua entrada, um outro filtro passa-baixas com freqüência de corte em, aproximadamente, 7 kHz. para evitar efeitos de aliasing.

### Medidas adquiridas do sensor de densidade

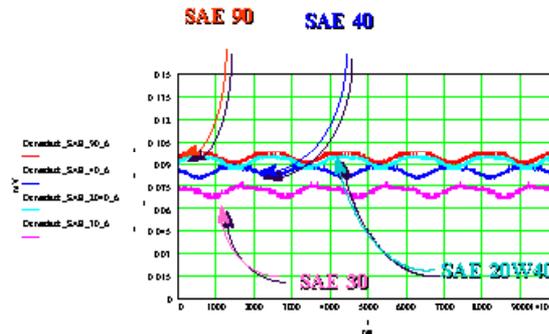


Figura 19 - Aquisição digital com informação da densidade (altura = 0.06 m).

Nas Figuras 19 e 20, pode-se observar os sinais obtidos para quatro óleos de diferentes densidades. A oscilação no sinal deve-se à imperfeição da forma geométrica do recipiente, que cria um gradiente de velocidade perto do sensor. Isto vale para os gráficos subsequentes.

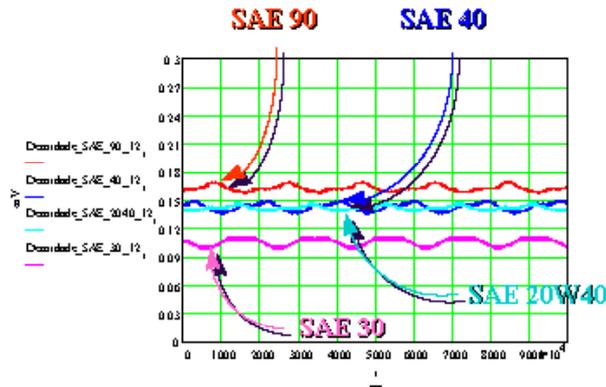


Figura 20 - Aquisição digital com informação da densidade (altura = 0.12 m).

Os valores lidos no eixo vertical são em milivolts, e têm um valor proporcional à força aplicada em cima da haste no momento da aquisição.

### Medidas adquiridas do sensor de viscosidade

O sensor de viscosidade apresenta muitas variações com valores de imersão pequenos, mas ainda se pode reconhecer cada óleo pelo valor médio da leitura.

Para uma altura de imersão de 0.12 m, fica bem clara a diferença de viscosidade entre os óleos. Também, pode-se observar uma diminuição da oscilação no sinal, pois com maior área submersa tem-se uma integração das variações da velocidade do fluxo que chega no sensor. O ruído observado é devido à interferência da rede elétrica que é induzido no cabo de coleta do sinal.

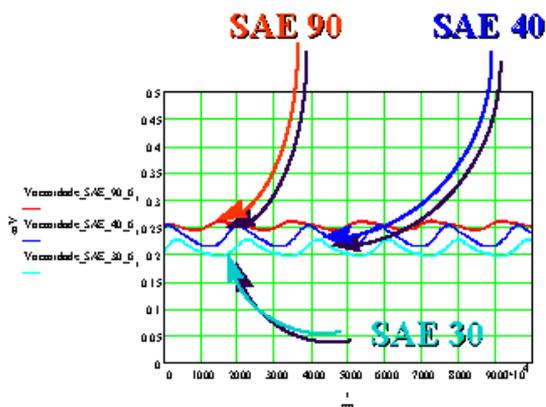


Figura 21 - Aquisição digital com informação da viscosidade (altura = 0.06 m).

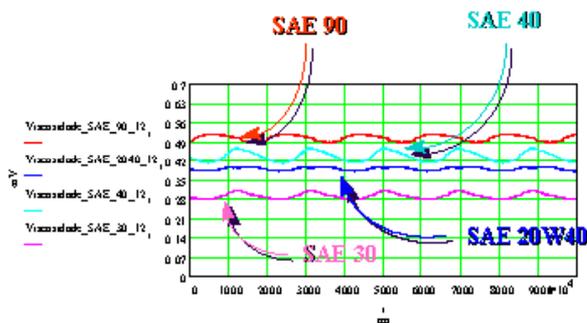


Figura 22 - Aquisição digital com informação da viscosidade (altura = 0.12 m).

### Resposta em frequência do sensor de densidade

Foi aplicado um pulso de duração pequena nas hastes, com o objetivo de verificar a frequência natural de oscilação. Com as hastes fora do líquido, aplicou-se um pulso de força e do qual foram obtidos os resultados mostrados na Figura 23.

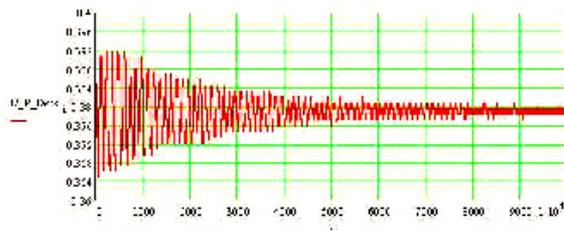


Figura 23 - Resposta em frequência do sensor de densidade.

Da resposta, calcula-se a frequência natural, utilizando o método da transformada rápida de Fourier.

Aqui, pode-se observar uma frequência de oscilação de, aproximadamente, 8 Hz. Os valores obtidos do sensor oscilam com esta frequência aproximadamente (8 vezes por segundo).

### Resposta em frequência do sensor de viscosidade

Aplicando um pulso de força, foi lido o seguinte sinal (Figura 24).

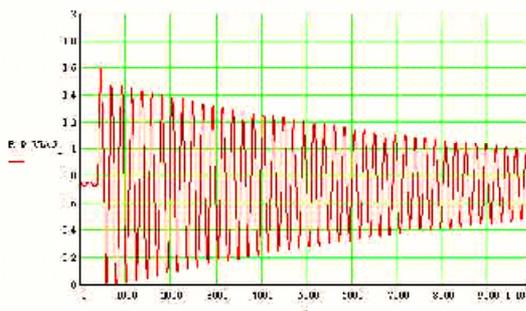


Figura 24 - Resposta em frequência do sensor de viscosidade.

Calculando a transformada rápida de Fourier para 8192 pontos deste gráfico, obtém-se a resposta em frequência. Pode-se observar uma frequência de oscilação de aproximadamente 4 Hz. Isto poderia limitar o uso do sensor para velocidades de rotação próximas deste valor.

### AFERIÇÃO DA VISCOSIDADE DOS ÓLEOS COM O VISCOSÍMETRO PADRÃO

Foram enviadas amostras dos óleos lubrificantes, utilizados nas medições, para aferição do seu valor da viscosidade, à Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP - PETROBRAS).

As amostras de óleos lubrificantes SAE 30, SAE 20W/40, SAE 40 e SAE 90 foram analisadas quanto a sua viscosidade, nas seguintes temperaturas: 25.8 °C, 27.8 °C, 29.8 °C, 32.0 °C, 40.0 °C e 60.0 °C. O equipamento utilizado foi o viscosímetro rotativo Brookfield, modelo LVTDV-II, spindle 18 e sistema Thermosel.

Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 25 e foram levantados para diferentes velocidades de rotação e para cada uma das temperaturas, obtendo-se a tensão cisalhante nas velocidades utilizadas.

O eixo vertical é dado em  $\text{Ns/m}^2$  e o horizontal em graus Celsius.

Para achar qual seria a viscosidade destes óleos à temperatura ambiente, foram utilizados métodos numéricos de extrapolação. Os métodos de extrapolação (interpolação) do tipo spline cúbica de ordem dois e três (parabólica e cúbica nos extremos respectivamente) se mostraram inadequados para este tipo de aplicação. O método de interpolação spline cúbica com extremidades lineares apresentou-se como o mais adequado, e o resultado pode ser visualizado na Tabela 15.

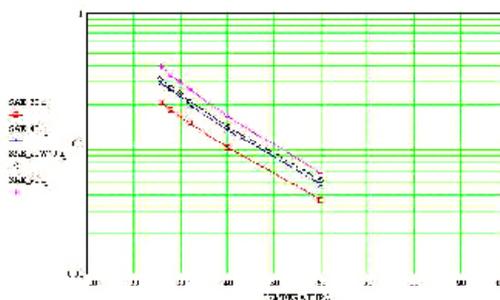


Figura 25 - Valor da viscosidade medida na PETROBRAS.

Tabela 15 - Métodos numéricos de interpolação com dados obtidos pela Petrobrás.

Temp. = 25.5 °C	SAE 90 [kg/m <sup>3</sup> ]	SAE 40 [kg/m <sup>3</sup> ]	SAE 30 [kg/m <sup>3</sup> ]
Valor médio (caso Zabet)	0.23116	0.2319	0.37
Médias 4 métodos (caso cálculo)	0.29325	0.4144	0.59
Divergência máxima [%]	6	7	4

A divergência máxima obtida (7%) pode ser melhorada, obtendo mais pontos de amostragem. No caso, foram tomadas só seis amostras.

### COMPARAÇÃO COM RESULTADOS OBTIDOS NA MEDIÇÃO DE LAMAS

Uma das lamas preparadas para a medição apresentou as seguintes características para valores de viscosidade e densidade (tabela 16 e Figura 17).

Tabela 16 - Comparação das propriedades dos óleos com as da lama.

Temperatura 25.5 °C	SAE 90	SAE 40	SAE 20W40	SAE 30	DM
Temperatura 25.5 °C	30	40	20W40	30	d
densidade 25.5 °C	0	0	0	0	0
Caso Zabet	13	13	17	21	3.3
[s]	13	3			
Deformação viscosimétrica	222	232	243	303	193
[kg/m]	1.6	1.4	7	13	13
Densidade	0.8	0.8	0.9	0.9	2.6
[g/m]	6	39		13	3
Deformação viscosimétrica	73	36	93	113	112
[kg/m]	1.3	1.3	2	1.2	1.2

O resultado da aquisição digital para quatro tipos de óleo e uma lama pode ser observado na Figura 26.

Podemos visualizar na Figura 26 que os valores de viscosidade apresentados na saída do condicionador de sinais, para cada fluido, ficam bem diferenciados. O eixo vertical está graduado em mm/m, e o horizontal em ms.

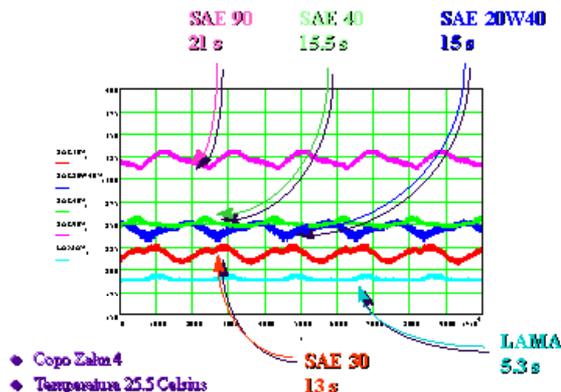


Figura 26 - Comparação das viscosidades dos óleos com as da lama.

Na Figura 27, podemos notar que o valor da deformação para o óleo SAE90 é maior do que a da lama (comparando os valores da tabela 16), que tem uma densidade no mínimo duas vezes maior. Isto demonstra que, para viscosidades muito elevadas, o sensor projetado é sensível ao arrasto devido ao atrito do fluido; na ordem de grandeza ao arrasto é devido à transferência da quantidade de movimento.

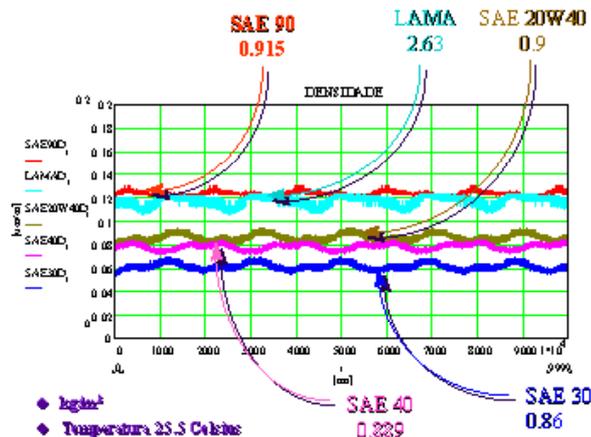


Figura 27 - Comparação das densidades dos óleos com as da lama.

## IMPERFEIÇÕES DO SISTEMA

Nesta seção, serão apresentadas as sugestões para melhorias que podem ser efetuadas em trabalhos futuros. Todas elas adquiridas com base na experiência adquirida ao longo deste trabalho.

Os problemas encontrados são descritos a seguir.

### Imperfeições geométricas

A não concentricidade do reator provoca a variação da velocidade angular no ponto em que são colocadas as hastes sensoras, gerando ruído com frequência igual à velocidade angular de rotação, interferindo no sinal desejado com amplitude bastante elevada. A distribuição de velocidades não é linear com o raio do recipiente, como seria no caso de rotação de um sólido (viscosidade infinita).

### Adesão das partículas de fluido nas hastes sensoras

O fluido caracteriza-se pela adesão ao molde de cera da peça a ser fabricada, aderindo-se também às hastes sensoras. Portanto, os sensores devem ser limpos frequentemente para evitar que a lama “seque”, o que faz a remoção mais difícil. O material aderido às hastes modifica as suas características geométricas.

### Formação de grumos

Algumas vezes, existe a formação de porções mais compactas das partículas de fluido da massa diluída, que adquire energia cinética e bate nas hastes com a consequente interferência observada no sinal elétrico. Estes grumos colam entre as duas superfícies do sensor de viscosidade/nível, modificando a sua característica geométrica e aumentando a sua sensibilidade em relação às variações de densidade.

Esta formação de grumos também dificulta a medição da viscosidade (além da calibração); utilizando o copo Zahn, estes interrompem o fluxo através do orifício do copo, fornecendo medidas de tempo (e portanto de viscosidade) que não têm relação só com a viscosidade cinemática do fluido.

### O tamanho dos sensores

O tamanho dos sensores pode atrapalhar a colocação de moldes de tamanho apreciável em relação ao raio do recipiente do reator. O tamanho dos sensores também dificulta a sua remoção para limpeza e faz o sistema ser menos robusto à manipulação mecânica.

### Ruído devido à rede de alimentação elétrica

Este ruído é característico em fábricas e laboratórios onde existem cabos de força alimentando cargas que geram campos eletromagnéticos fortes. Este ruído deve ser filtrado, tendo como frequência fundamental 60 Hz e as suas harmônicas ímpares, principalmente.

### Decantação do material

As partículas sólidas em suspensão tendem a ir para o fundo do recipiente por causa da

força gravitacional. Isto ocasiona a existência de um gradiente de viscosidade e densidade em relação ao eixo vertical de referência. Se faltar energia elétrica, as partículas de fluido decantam no fundo, formando uma massa sólida, podendo danificar sensores e outros elementos mecânicos constituintes.

#### **Isolamento elétrico do medidor de nível**

O fluido em contato com as hastes provoca o desgaste do revestimento de poliuretano que serve para isolar as hastes do medidor de nível, devendo a cada certo tempo efetuar uns retoques no revestimento.

#### **Degradação do material dos sensores**

As hastes, em contato com a água e outros componentes, apresentam um processo de oxidação, que a longo prazo poderia afetar as características geométricas do sensor como as características químicas da lama.

#### **A calibração**

A calibração do viscosímetro feita, comparando as medidas efetuadas com o copo Zahn, oferece uma referência não muito confiável, pois depende do operador do instrumento e das características físicas da lama no momento da medição.

No que se refere à calibração do densímetro, esta foi feita medindo a massa de uma amostra de material. Esta medida depende da profundidade da qual a amostra foi retirada, devido ao problema de decantação descrito anteriormente.

O descrito acima também serve para o medidor de viscosidade. Existiu o problema da disponibilidade de fluidos de viscosidade conhecida (e com valor estável com a variação da temperatura), nas quantidades requeridas para a calibração (mínimo de 2 litros). Devido a esta dificuldade, decidiu-se a utilização de óleos comerciais com faixa de viscosidade dentro de valores padronizados. Esta escolha resultou em dificuldades para aferir o valor de viscosidade exato à temperatura ambiente, pois estes fluidos mudam o seu valor de viscosidade de maneira muito abrupta com a variação da temperatura.

#### **A evaporação**

A água contida no recipiente evapora ao longo do tempo, exigindo ajustes periódicos de posicionamento da altura das hastes ou de um cálculo constante da área imersa do sensor, para obter medidas mais exatas.

#### **O posicionamento das hastes**

Cada vez que as hastes são descidas e levantadas por meio do braço mecânico, ocorrem desvios na posição em relação ao centro do recipiente e variações do ângulo de ataque das hastes em relação ao fluxo. Isto tem como consequência a variação no sinal de saída, o que diminui a repetibilidade do sistema de medição.

Existem forças de sustentação devido ao movimento rotacional do fluido e pelas placas serem planas, aumentando a incerteza do sistema.

#### **Tempo de resposta**

Devido às massas envolvidas, o tempo de resposta do sistema devido a um estímulo pode chegar a segundos, mas pelas velocidades envolvidas isto não representa um problema de maior atenção.

#### **Viscosidades elevadas e densidades baixas**

Foi observado que o sensor de densidade, projetado neste trabalho, não se mostra efetivo quando o fluido em questão possui um valor de viscosidade relativamente alto (maior que 10 segundos Zahn 4) e densidade relativamente baixa (menor que 1000 Kg/m<sup>3</sup>). Acontece que a espessura da haste sensora (de densidade) provoca forças devido à viscosidade, com valores da ordem de força provocada pela pressão de choque (proporcional à densidade). Isto foi verificado, observando as respostas dos óleos comparadas às respostas das lammas.

#### **Número de Reynolds**

Devido às baixas velocidades envolvidas, o número de Reynolds é da ordem de 10 a 100, o que mantém o valor do coeficiente de arrasto variável. Isto é indesejado no projeto do sensor de densidade. Para número de Reynolds acima de 1000, este coeficiente é praticamente constante

(depende somente de características geométricas) e independente desta variável.

### O Fluido

As fórmulas aproximadas deduzidas para o cálculo dos coeficientes de arrasto são para fluidos newtonianos. De acordo com a verificação feita pela PETROBRÁS, os óleos testados têm características de fluidos newtonianos, mas para as lamas não foi feito este tipo de teste, e foram considerados como fluidos newtonianos numa primeira aproximação.

## Referências Bibliográficas

- ADAM, J. **Versuche zur kontinuierlichen Messung des rheologischen**. Gießerei-Institut, 1993.
- ADDISON, H. **Tratado de Hidráulica Aplicada**. (Tradução espanhola da obra inglesa TREATISE ON APPLIED HYDRAULICS, por José M. Mandero). Ed. Gustavo Gili S.A. 1954 p. 5-10, 534-547.
- ALBERTSON, M. L.; BARTON, J. R.; SIMONS, D. B. **Fluids mechanics for engineers**. Prentice Hall, Inc. 1960. p. 228-239, 443-449.
- BASTOS, F. A. A. **Problemas de mecânica dos fluidos**. Guanabara Dois, 1983.
- CAUDURO, C. R.; BORCHARDT, I. G. **Projeto Mecânico de Transdutores Extensométricos**. INMETAL, 1993.
- COMOLET, R. **Dynamique des fluides réels, turbomachines**. Tome II. Masson et Cie, 1963. p. 1-26, 132-135.
- COMOLET, R.; BONNIN, J. **Recueil de problèmes**. Tome III. Masson et Cie, 1963.
- DOEBELIN, E. O. **Measurement systems. Application and design**. McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- EVETT, J. B.; LIU, C. **2500 Solved problems in fluid mechanics & hydraulics**. McGraw-Hill, 1989.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introduction to fluid mechanics**. John Wiley & Sons, Incl, 1978.
- GILES, R. V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. McGraw-Hill.
- GILES, R. V. **Schaum's outline of theorie and problems of fluid mechanics and hydraulics**. McGraw-Hill.
- GRAEME, J. G. **Designing with operational amplifiers. Application alternatives**. McGraw-Hill Book Company, 1977.
- KINNARD, I. F. **Medidas electricas y sus aplicaciones**. (Tradução espanhola da obra inglesa Applied electrical measurements, L. Ibañez Morlan). Ediciones Tecnicas Marcombo S.A., 1967.
- NORTON, H. **Sensor and analyzer handbook**. Prentice Hall, Inc., 1982. p. 288-289.
- PIPPENGER, D. E.; TOBABEN, E. J. **Amplifiers, comparators, timers, and voltage regulators**. Texas Instruments Inc., 1985.
- SCALE MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Load cell terminology and test procedure recommendations**. Washington, D.C.: Scale Manufacturers Association, 1979.
- SCHLICHTING, H. **Boundary layer theory**. (Tradução inglesa da obra alemã Grenzschicht-theorie). McGraw-Hill, 1960.
- STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. **Fluid mechanics**. McGraw-Hill, 1982. p. 8-13, 335-338.
- THE TECHNICAL STAFF OF MEASUREMENTS GROUP, INC. **Strain gage based transducers. Their design and construction**. Measurements Group, Inc., 1988.
- WERNECK, M. M. **Transdutores e interfaces**. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996.