

Curso de Licenciatura em Física

UTFPR-CT

Fluidos e Termodinâmica Experimental

Prof. Marcia Muller

2022

1

Índice geral

Densimetria

- D1- Medida da densidade absoluta de líquidos e sólidos com picnômetro
- D2- Medição da densidade absoluta de sólido irregular usando o Princípio de Arquimedes
- D3- Medição da densidade absoluta de líquidos usando o Princípio de Arquimedes
- D4- Medição da densidade absoluta de líquidos não miscíveis usando o Princípio de Stevin
- D5- Medição da densidade absoluta de líquidos miscíveis usando o Princípio de Stevin

Calorimetria

- C1- Determinação da capacidade térmica do calorímetro
- C2- Determinação do calor específico de um sólido
- C3- Determinação do calor específico de líquidos
- C4- Determinação do equivalente elétrico do calor

Viscosidade

- V1- Determinação da viscosidade de líquidos usando a Lei de Stokes

Densimetria

Introdução:

A densidade absoluta ou massa específica é uma propriedade da substância definida pela razão entre a sua massa e o seu volume. Cada substância pura tem uma densidade absoluta própria cuja unidade no SI é kg/m³.

Parâmetros externos como pressão e temperatura podem alterar a densidade de um material. Por exemplo, o aumento da temperatura causa a expansão térmica de sólidos e líquidos, o que altera o volume e, conseqüentemente a densidade absoluta. Variações de pressão, por sua vez, alteram mais significativamente a densidade de gases uma vez que estes são facilmente comprimidos.

Portanto, a densidade absoluta de um material pode ser obtida pela razão entre sua massa e o seu volume, sendo que os procedimentos de medição a serem adotados dependerão das características do material. No caso de líquidos pode ser usada uma balança analítica para medir a massa e um picnômetro calibrado para medir o volume. No caso de um material sólido de forma regular, basta usar uma balança analítica para medir a massa e um paquímetro ou micrômetro para medir as dimensões a fim de calcular o volume. No entanto, no caso de sólidos irregulares pode-se obter o volume usando o princípio de Arquimedes.

“Um corpo totalmente ou parcialmente mergulhado em um fluido sofre a ação de uma força vertical, empuxo, que é igual ao peso do volume do fluido deslocado.”

A densidade de líquidos pode também ser obtida experimentalmente usando o Teorema de Stevin que é a Lei Fundamental da Hidrostática.

“A diferença entre as pressões de dois pontos de um fluido em equilíbrio (repouso) é igual ao produto entre a densidade do fluido, a aceleração da gravidade e a diferença entre as profundidades dos pontos.”

O teorema propõe que a pressão de um líquido independe da forma do recipiente, dependendo somente da altura da coluna.

O teorema de Stevin é representado matematicamente na forma:

$$\Delta P_{\text{pressão}} = P \cdot \Delta h = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Onde $\Delta P_{\text{pressão}}$ é a variação da pressão hidrostática (Pa), P é o peso específico do fluido (N/m³), ρ é a densidade do fluido (Kg/m³), g é a aceleração da gravidade (m/s²), e Δh é a variação da altura da coluna de líquido (m).

Objetivos:

- Verificação do princípio de Arquimedes.
- Determinação da densidade absoluta de líquidos e sólidos.

- Determinação da densidade de líquidos miscíveis e não-miscíveis usando o teorema de Stevin.

Procedimentos:

D1- Medição da densidade absoluta de líquidos e sólidos com picnômetro

Primeiro passo: calibração do picnômetro

- Lave o picnômetro com álcool e deixe secar bem.
- Coloque em um becker aproximadamente 150 ml de água destilada e deixe que essa entre em equilíbrio térmico com o ambiente. Use o termômetro.
- Determine a massa do picnômetro vazio e tampado usando a balança analítica, use um papel para carregar o picnômetro. Repita o procedimento 5 vezes colocando e retirando o picnômetro da balança e ajustando a tara cada vez. Anote os valores medidos e a resolução da balança.
- Complete o picnômetro com a água do Becker e tampe de maneira que este fique totalmente preenchido. O excesso de água deve escorrer pela parede externa do picnômetro. Evite bolhas de ar no interior do picnômetro. Termalize o picnômetro com a água do becker (imersão por ~15 minutos) e meça a temperatura da água do becker. Anote o valor medido de temperatura e a resolução do termômetro. Estime a incerteza estatística e encontre a incerteza padrão para a medição da temperatura.
- Determine a densidade da água nessa temperatura. Se for necessário interpole valores tabelados encontrados na literatura. Para tanto, faça um gráfico de temperatura contra densidade da água e encontre o coeficiente angular da reta. Use este coeficiente para propagar para a densidade a incerteza obtida para temperatura.
- Enxugue o exterior do picnômetro com a flanela e meça a massa novamente com a balança analítica. Repita o procedimento 5 vezes. Faça isso o mais rápido possível para evitar mudança de temperatura. Tome cuidado para não engordurar ou sujar a parede externa do picnômetro.
- A diferença entre as massas do picnômetro cheio e vazio será usada juntamente com o valor de densidade para calcular o volume do picnômetro.

Dados das medições.

Massa do picnômetro vazio	Massa do picnômetro cheio

- Faça o tratamento estatístico dos dados e propague as incertezas para o volume do picnômetro. Represente corretamente os valores obtidos.

Grandezas e incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Resolução da balança	
Resolução do termômetro	
Massa do picnômetro vazio	
Massa do picnômetro cheio	
Temperatura da água	
Densidade da água	
Volume do picnômetro	

Segundo passo: Medição da densidade absoluta da amostra.

- Lave o picnômetro com o líquido que se deseja avaliar (comece com o álcool) e deixe secar. Para tanto coloque uma pequena quantidade do líquido no picnômetro e agite-o. Repita o procedimento 3 vezes.
- Complete o picnômetro com o líquido cuja densidade se deseja medir tomando cuidado para que não ocorra a formação de bolhas de ar, tampe-o deixando escorrer o excesso pela superfície externa. Seque o exterior do picnômetro.
- Meça a massa do picnômetro cheio com a balança analítica 5 vezes, colocando e retirando o picnômetro da balança a cada pesagem e ajustando a tara.
- Meça a temperatura do líquido no picnômetro com o termômetro.
- Faça o tratamento estatístico dos dados e propague as incertezas para o a densidade dos líquidos. Represente corretamente os valores obtidos.

Dados das medições.

Álcool comercial	Glicerina
Massa do picnômetro cheio	Massa do picnômetro cheio

Grandezas e incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Resolução da balança	
Resolução do termômetro	
Massa do álcool	
Massa da glicerina	
Temperatura do álcool	
Temperatura da glicerina	
Densidade do álcool	
Densidade da glicerina	

Terceiro passo: Medição da densidade absoluta de sólidos com forma irregular.

- Lave o picnômetro com álcool.
- Insira no picnômetro pedaços do metal que se deseja determinar a densidade. Meça 5 vezes a massa do picnômetro mais as amostras metálicas usando a balança analítica seguindo o procedimento adotado anteriormente.
- Coloque água até cobrir os pedaços de metal e mergulhe o picnômetro em um becker com água fervente para retirar as bolhas aderidas ao metal.
- Coloque o picnômetro num becker contendo água a temperatura ambiente e deixe por 15 minutos para entrar em equilíbrio térmico à temperatura ambiente. Meça a temperatura da água com o termômetro.
- Complete o volume do picnômetro com água destilada a temperatura ambiente e tampe-o seguindo o procedimento adotado anteriormente. Meça 5 vezes a massa do picnômetro contendo a amostra e a água.
- Faça o tratamento estatístico dos dados e propague as incertezas para a densidade da amostra. Represente corretamente os valores obtidos.

Metal A: dados das medições.

Massa do picnômetro com amostra	Massa do picnômetro com amostra e água

Metal A: Valores das grandezas com suas respectivas incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Massa do picnômetro vazio	
Massa do picnômetro com amostra	
Massa do picnômetro com amostra e água	
Massa de água	
Volume da água	
Volume da amostra	
Densidade da amostra	

Metal B: Dados das medições.

Massa do picnômetro com amostra	Massa do picnômetro com amostra e água

Metal B: Valores das grandezas com suas respectivas incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Massa do picnômetro vazio	
Massa do picnômetro com amostra	
Massa do picnômetro com amostra e água	
Massa de água	
Volume da água	
Volume da amostra	
Densidade da amostra	

D2- Medição da densidade absoluta de sólido irregular usando o Princípio de Arquimedes

- Meça 5 vezes a massa do sólido com a balança analítica.
- Coloque água em uma proveta deixando-a semi-preenchida.
- Insira cuidadosamente o sólido na proveta. Use o fio para inserir e tirar o sólido da proveta.
- Certifique-se que a água e o sólido estão em equilíbrio térmico com o ambiente e anote a temperatura.
- Determine o volume do sólido pelo princípio de Arquimedes, medindo 5 vezes o volume do líquido deslocado quando o sólido é mergulhado no líquido conhecido, água.
- Antes de cada inserção do sólido na água, seque-o bem e meça o volume de água na proveta.
- Anote o volume após a inserção do sólido.
- Anote a resolução da proveta.

Dados das medições.

Massa do sólido	Volume inicial na proveta	Volume final na proveta	Volume de líquido deslocado

- Faça o tratamento estatístico dos dados e propague as incertezas para a densidade da amostra. Represente corretamente os valores obtidos.

Grandezas e incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Resolução da proveta	
Resolução do termômetro	
Massa do sólido	
Volume do sólido	
Temperatura do sólido	
Densidade do sólido	

D3- Medição da densidade absoluta de líquidos usando o Princípio de Arquimedes

Quando um corpo suspenso por um dinamômetro é introduzido dentro de um recipiente contendo um líquido, a leitura do dinamômetro diminui em virtude do empuxo.

A equação que fornece a densidade do líquido em função do peso do corpo no ar e no líquido e da sua densidade pode ser obtida:

$$P_l = P_{ar} - E$$

onde pelo Princípio de Arquimedes o empuxo é:

$$E = P_{l\text{deslocado}} = m_{l\text{deslocado}} \cdot g = \rho_l \cdot g \cdot V_c$$

$$P_l = P_{ar} - \rho_l \cdot g \cdot V_c$$

$$\rho_l = \frac{P_{ar} - P_l}{g \cdot V_c}$$

$$\rho_l = \rho_c \cdot \frac{P_{ar} - P_l}{P_l}$$

Método 1:

- Suspenda o corpo preso por um fio com um dinamômetro e meça 6 vezes o seu peso no ar. Realize a montagem de tal forma que o dinamômetro também esteja suspenso por um fio inextensível a um suporte fixo, e que o corpo cilíndrico possa ser baixado aos poucos dentro do becker contendo líquido desconhecido (usar glicerina).
- Posicione uma régua paralelamente ao fio usando também um suporte fixo.
- Posicione a base inferior do cilindro próxima a superfície do líquido, porém sem entrar em contato com o mesmo. Faça uma marca no fio indicando a posição inicial na régua. Anote a resolução da régua e do dinamômetro e a temperatura do líquido.
- Baixe o cilindro mergulhando parte do seu volume no líquido. Meça o deslocamento do fio que corresponde à altura da porção submersa do cilindro e o peso indicado no dinamômetro. Faça novos deslocamentos (num total de 7 alturas diferentes) e repita o procedimento. Repita o experimento três vezes e anote na tabela abaixo os valores obtidos.
- Usar a incerteza final obtida para o peso do sólido no ar para representar a incerteza estatística do peso no líquido.

Dados das medições.

Peso do sólido no ar						
----------------------	--	--	--	--	--	--

Dados das medições.

Medição 1		Medição 2		Medição 3	
Altura submersa do cilindro	Indicação do dinamômetro	Altura submersa do cilindro	Indicação do dinamômetro	Altura submersa do cilindro	Indicação do dinamômetro

Grandezas e incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Resolução do dinamômetro	
Resolução do termômetro	
Temperatura do líquido	
Densidade do líquido	

- Meça o diâmetro do cilindro e calcule a área da base e sua incerteza.
- Encontre a equação que relaciona a densidade do líquido com a altura submersa do cilindro.
- Construa um gráfico de peso contra altura da porção submersa do cilindro. Encontre a partir do gráfico a densidade do líquido. Faça o tratamento estatístico dos dados e propague as incertezas para a densidade. Represente corretamente os valores obtidos. Use nos cálculos a aceleração da gravidade local de $(9,78 \pm 0,02) \text{ m/s}^2$.

Método 2:

- Encontre a equação que fornece a densidade do líquido em função da densidade da água e dos pesos do corpo no ar, na água e no líquido.
- Sendo:

$$\rho_l = \rho_c \cdot \frac{P_{ar} - P_l}{P_l} \quad (A)$$

Podemos escrever a densidade do corpo como:

$$\rho_c = \rho_{agua} \cdot \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{agua}} \quad (B)$$

Sabendo que num líquido qualquer:

$$\rho_l = \rho_c \cdot \frac{P_{ar} - P_l}{P_l}$$

Substituindo (B) em (A):

$$\rho_l = \rho_c \cdot \frac{P_{ar} - P_l}{P_l} = \rho_{agua} \cdot \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{agua}} \cdot \frac{P_{ar} - P_l}{P_l} = \rho_{agua} \cdot \frac{P_{ar} - P_l}{P_{ar} - P_{agua}} \quad (C)$$

- Suspensa um corpo preso por um fio com um dinamômetro e meça o seu peso no ar. Realize a montagem de tal forma que o dinamômetro também esteja suspenso por um fio inextensível a um suporte fixo, e que o corpo possa ser baixado dentro do becker contendo um líquido.
- Mergulhe totalmente o corpo na água e meça novamente o peso no dinamômetro. Repita a operação 5 vezes. Meça a temperatura da água com o termômetro.
- Seque bem o sólido antes de inserir no segundo líquido.
- Mergulhe totalmente o corpo no líquido desconhecido e meça novamente o peso no dinamômetro. Repita a operação 5 vezes. Meça a temperatura do líquido com o termômetro.
- Repita o experimento usando líquidos diferentes.
- Faça o tratamento estatístico dos dados e propague as incertezas para a densidade do líquido. Represente corretamente os valores obtidos. Use nos cálculos a aceleração da gravidade local de $(9,78 \pm 0,02) \text{ m/s}^2$.

Dados das medições.

Peso no ar	Peso na água	Peso no líquido 1	Peso no líquido 2

Grandezas e incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Resolução do dinamômetro	
Resolução do termômetro	
Densidade do líquido 1 (.....)	
Densidade do líquido 2 (.....)	
Densidade do líquido 3 (.....)	
Densidade do líquido 4 (.....)	

D4- Medição da densidade absoluta de líquidos não miscíveis usando o Princípio de Stevin

A densidade de líquidos não miscíveis pode ser medida usando um tubo em U aberto usando um líquido com densidade conhecida, por exemplo a água, como referência. O experimento consiste em adicionar o líquido que se deseja determinar a densidade e o líquido com densidade conhecida dentro do tubo. Os líquidos nas duas aberturas do tubo estarão sob a ação da pressão atmosférica ($1,013 \times 10^5$ Pa). No entanto, a diferença de densidade entre os líquidos faz com que as alturas das colunas nos dois ramos do tubo sejam diferentes.

Segundo o Princípio de Pascal:

“A pressão aplicada sobre um fluido incompressível é transmitida integralmente a todas as partes do fluido e as paredes do recipiente que o contém.”

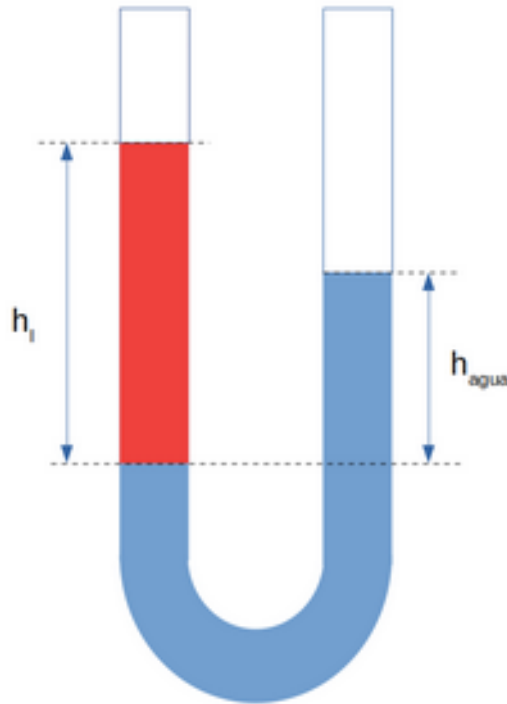
Dois pontos do interior do tubo em U que estejam na mesma altura, um em cada ramo do tubo, estarão sob a ação da mesma pressão. Podemos usar a interface entre os dois líquidos como referência e medir a altura dos líquidos nos dois ramos do tubo com relação a este ponto.

Assim, igualando a pressão nos dois ramos temos:

$$\Delta P_{ramo1} = \Delta P_{ramo2}$$

$$P_0 + \rho_{agua} \cdot g \cdot h_{agua} = P_0 + \rho_l \cdot g \cdot h_l$$

$$\rho_l = \rho_{agua} \cdot \frac{h_{agua}}{h_l} \quad (D)$$



Materiais: Tubo em U aberto, suporte para o tubo, amostras, seringa, termômetro, régua.

- Coloque água destilada em um becker. A água e o óleo com densidade desconhecida devem estar em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente para evitar variações de densidade durante o experimento. Pingue uma gota de corante na água para facilitar a identificação da interface entre os líquidos.

- Com a ajuda de uma seringa introduza água no tubo em U. A altura das colunas de água devem ficar próximas a altura média dos ramos.

- Prepare a câmera para filmar o experimento à partir deste ponto. Faça um teste para ver se na filmagem as interfaces água/ar são visíveis e se suas alturas podem ser medidas à partir do vídeo. Quando estiver tudo preparado inicie o experimento e a filmagem. Filme todo o experimento num único vídeo.

- Você irá adicionar óleo em pequenas quantidades em um dos ramos do tubo. Cada vez que for adicionada uma quantidade de óleo, o topo das colunas de água, óleo e da interface irão variar. Espere um tempo antes de colocar mais óleo para que todo o óleo adicionado anteriormente escorra pelo tubo, e as posições das interfaces estabilizem. Em seguida com outra seringa coloque lentamente $\sim 0,4$ ml do líquido de densidade desconhecida no tubo evitando a formação de bolhas. Repita o procedimento adicionando mais 6 a 8 vezes $\sim 0,4$ ml do líquido de densidade desconhecida ao tubo no ramo correspondente.

- Use o vídeo para obter as posições das 3 interfaces (água/ar, óleo/água e óleo/ar) em diferentes instantes do experimento. Construa uma tabela com estes valores. Tente obter pelo menos 10 conjuntos de alturas.

- Calcule as incertezas nos valores de altura das interfaces. Use estimativa de incertezas para estimar a incerteza estatística, e a resolução da régua para determinar a incerteza estatística residual. Combine as duas para obter a incerteza final da

medição de altura. Se tiver dúvidas consulte a apostila da disciplina de Fundamentos da Física Experimental.

- Usando os valores tabelados de alturas das interfaces, calcule as alturas das colunas de água e de óleo com relação a posição da interface óleo/água. Como estas alturas são obtidas pela diferença entre dois valores medidos, a incerteza precisa ser propagada.

- Usando o software SciDAVis, construa um gráfico, ainda sem as barras de erro, das alturas da coluna de água contra as alturas da coluna de óleo.

- Faça um ajuste linear com o SciDAVis e obtenha o coeficiente angular da reta ajustada.

- Use este valor de coeficiente angular do ajuste inicial para rebater a incerteza da altura no eixo x para incerteza em y. Combine com a incerteza na altura em y para encontrar a incerteza final combinada em y. Isso é necessário uma vez que o software considera somente as incertezas em y para o ajuste.

- Construa um novo gráfico, agora com as barras de erro em y e faça o ajuste linear. **FAÇA A DETERMINAÇÃO GRÁFICA DA DENSIDADE DO ÓLEO**, ou seja, use o coeficiente angular da reta ajustada para encontrar a densidade da amostra e sua incerteza.

- Meça a temperatura dos líquidos para poder identificar a amostra a partir da densidade obtida. Faça uma pesquisa na internet.

Dados das medições.

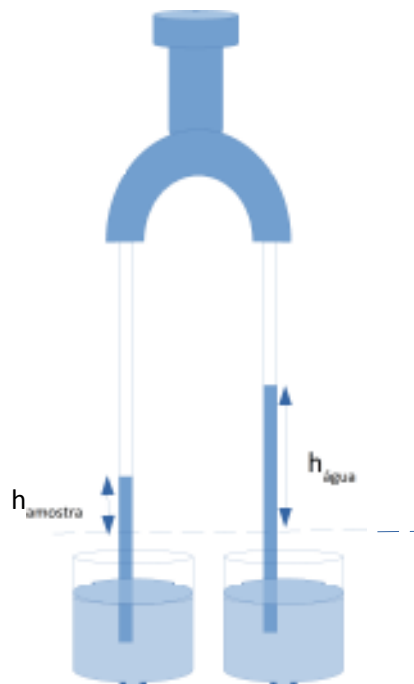
Altura da interface água/amostra H	Altura da interface água/ar H _a	Altura da interface amostra/ar H _i	Altura da coluna de água h _{água} =H _a -H	Altura da coluna da amostra h _{amostra} =H _i -H

Grandezas e incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Resolução da régua	
Resolução do termômetro	
Temperatura da amostra	
Densidade da amostra	

D5- Medição da densidade absoluta de líquidos miscíveis usando o Princípio de Stevin

A densidade de líquidos miscíveis também pode ser medida usando um tubo em U aberto. Para tanto usa-se como referência um líquido com densidade conhecida, por exemplo a água. O experimento consiste em usar uma seringa para puxar para dentro dos ramos do tubo os líquidos acondicionados em copos de becker, aquele que se deseja determinar a densidade e o líquido com densidade conhecida usado como referência. Após esta etapa, os líquidos nas duas aberturas do tubo estarão sob a influência da mesma pressão, a pressão atmosférica ($1,013 \times 10^5$ Pa). As interfaces líquido-ar dentro do tubo também estão sob a mesma pressão imposta pela seringa. No entanto, a diferença de densidade entre os líquidos faz com que as alturas das colunas nos dois ramos do tubo sejam diferentes. Medindo a diferença de altura é possível determinar a densidade do líquido usando a relação (D).



Materiais: Tubo em U fechado, suporte para o tubo, 40 ml de amostras, 2 beakers de 50 ml, termômetro, réguas.

- Coloque ~40 ml de cada líquido em 2 copos de becker de 50 ml, cada becker contém somente um líquido. Ambos devem estar em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente para evitar variações de densidade durante o experimento.
- Meça a temperatura dos líquidos com o termômetro.
- Posicione os tubos de maneira que as extremidades abertas fiquem inseridas uma em cada líquido.
- Prepare a câmera para filmar o experimento à partir deste ponto. Faça um teste puxando o êmbolo da seringa para ver se na filmagem as interfaces líquido/ar dentro dos tubos são visíveis e se suas alturas podem se medidas à partir do vídeo. Quando estiver tudo preparado esvazie completamente os dois tubos e inicie o experimento e a filmagem. Filme todo o experimento num único vídeo.

- Você deverá puxar contínua e lentamente o êmbolo da seringa enquanto filma. Cuidado para que os líquidos não subam nos ramos a ponto de se misturarem.
- Use o vídeo para obter as posições das alturas das colunas de líquido nos dois ramos em diferentes instantes do experimento. Construa uma tabela com estes valores. Tente obter pelo menos 10 pares de alturas.
- Repita o procedimento 3 vezes, tomando o cuidado de sempre colocar o mesmo ramo do tubo na água para evitar contaminação.
- Calcule as incertezas nos valores de altura das interfaces. Use estimativa de incertezas para estimar a incerteza estatística, e a resolução da régua para determinar a incerteza estatística residual.
- Usando o software SciDAVis, construa um gráfico, ainda sem as barras de erro, das alturas da coluna de água contra as alturas da coluna da amostra.
- Faça um ajuste linear com o SciDAVis e obtenha o coeficiente angular da reta ajustada.
- Use este valor de coeficiente angular do ajuste inicial para rebater a incerteza da altura no eixo x para incerteza em y. Combine com a incerteza na altura em y para encontrar a incerteza final combinada em y. Isso é necessário uma vez que o software considera somente as incertezas em y para o ajuste.
- Construa um novo gráfico, agora com as barras de erro em y e faça o ajuste linear. FAÇA A DETERMINAÇÃO GRÁFICA DA DENSIDADE DO ÓLEO, ou seja, use o coeficiente angular da reta ajustada para encontrar a densidade da amostra e sua incerteza.
- Meça a temperatura dos líquidos para poder identificar a amostra a partir da densidade obtida. Faça uma pesquisa na internet.

Dados das medições.

Altura da coluna de água h_a	Altura da coluna da amostra $h_{amostra}$

Grandezas e incertezas.

Grandeza	Valor e incerteza
Resolução da régua	
Resolução do termômetro	
Temperatura do líquido	
Densidade do líquido	

Calorimetria

Introdução:

Quando dois ou mais corpos que se encontram em temperaturas diferentes entram em contato entre si, ocorre uma transferência de energia térmica. Esta transferência de energia térmica ou transferência de calor cessa quando o equilíbrio térmico entre os corpos é atingido.

No sistema internacional de unidades, a quantidade de calor é fornecida em Joule (J), porém é comum esta grandeza ser expressa em caloria (cal), sendo que 1 cal equivale a 4,186 J.

A quantidade de calor recebida ou cedida por um corpo depende da massa do corpo m , da temperatura inicial T_i , da temperatura final T_f e do calor específico c do material do qual o corpo é feito.

$$Q = mc \Delta T$$

O **calor específico c** é característico de cada substância e depende da fase em que essa se encontra. Valores tabelados de calor específico para substâncias puras podem ser usados na identificação de materiais. No caso de corpos fabricados por compostos de diferentes substâncias, por exemplo ligas metálicas, e ou no caso de misturas de líquidos, os valores de calor específico serão característicos da mistura. A unidade do calor específico no sistema internacional é J/kg.K porém, é comumente expresso em cal/g.°C. O calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para que a temperatura de uma determinada substância aumente de uma unidade de temperatura.

Se N corpos com temperaturas diferentes forem colocados no interior de um sistema isolado termicamente do meio externo, ocorre a troca de calor entre os corpos, sendo que, a soma algébrica dos valores de quantidade de calor cedido e recebido é nula.

$$\sum_{i=1}^N \Delta Q_i = 0$$

O calorímetro é uma aproximação experimental de um sistema termicamente isolado do meio exterior. Apesar desse isolamento, o calorímetro também faz parte do conjunto de corpos que trocam calor e, portanto, é definida uma constante para o calorímetro denominada capacidade térmica do calorímetro.

A Capacidade térmica ou capacidade calorífica C é uma característica do corpo, e não da sua constituição que corresponde a quantidade de calor necessária para que a temperatura de um determinado **corpo** aumente de uma unidade de temperatura. A unidade do sistema internacional é J/K porém é comumente expressa em cal/°C.

$$Q = C \Delta T$$

Portanto, antes de usar um calorímetro para determinar o calor específico de um líquido ou um sólido, é preciso determinar a capacidade calorífica do calorímetro usando uma substância cujo calor específico seja conhecido, por exemplo, a água

pura. Para isso, insere-se no calorímetro uma quantidade de água pura com massa m_1 . Após o sistema calorímetro mais água entrar em equilíbrio térmico numa temperatura T_1 , adiciona-se ao conjunto uma quantidade de água com massa m_2 a uma temperatura mais alta T_2 . As trocas de calor que ocorrem entre o calorímetro e as massas de água m_1 e m_2 levam o sistema ao equilíbrio térmico numa temperatura T_f . O fenômeno pode ser facilmente equacionado.

$$Q_{\text{recebido por } m_1} + Q_{\text{cedido por } m_2} + Q_{\text{recebido pelo calorímetro}} = 0$$

$$m_1 c (T_f - T_1) + m_2 c (T_f - T_2) + C (T_f - T_1) = 0$$

Um procedimento normalmente adotado consiste em expressar a capacidade térmica do calorímetro em termos de gramas de água, ou seja, fornecer um termo de correção que é o “equivalente em água do calorímetro”.

Definimos o equivalente em água do calorímetro como a massa de água que sofre a mesma variação de temperatura ao receber a mesma quantidade de calor.

$$Q = C \Delta T = mc \Delta T \Rightarrow C = mc \Rightarrow m = c / C$$

Em 1859, James P. Joule, observou que para gerar uma quantidade de calor igual a uma caloria é necessário realizar um trabalho de 4,186 J. Ficou assim estabelecida a equivalência entre a quantidade de calor e o trabalho mecânico. Esta relação também é válida para outras formas de trabalho, inclusive para o trabalho realizado pela força elétrica que resulta na energia elétrica.

O princípio da conservação da energia enunciado pela 1ª lei da Termodinâmica estabelece que:

“ A energia do universo se conserva ”

Portanto, quando diferentes formas de energia são transformadas em calor e vice-versa, a quantidade de energia total permanece constante. Sendo assim, o equivalente elétrico do calor pode ser determinado experimentalmente, medindo no tempo a energia elétrica que é dissipada por um resistor imerso na água contida dentro de um calorímetro.

A quantidade de energia elétrica dissipada no resistor é dada por:

$$E = P \Delta t \quad (\text{Joule})$$

A potência dissipada ao longo do tempo pode ser calculada por meio dos valores medidos de resistência R e corrente i ou tensão U .

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ ou } P = Ri^2$$

A quantidade de calor recebida pelo conjunto calorímetro e água, sendo que o calorímetro compreende o recipiente, haste de agitação e termômetro, é dada por:

$$Q = C\Delta T = (C_{\text{calorímetro}} + m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}}) \Delta t \text{ (caloria)}$$

A razão entre a energia elétrica dissipada em Joules e a quantidade de calor recebida em calorias fornece o equivalente elétrico do calor.

Objetivos:

- Observar experimentalmente o fenômeno da troca de calor entre materiais em diferentes temperaturas.
- Compreender os conceitos de calor, calor específico, capacidade calorífica e a relação entre capacidade calorífica e equivalente em água.
- Usar os conhecimentos construídos para identificar líquidos e o material constituinte de sólidos.
- Medir a equivalência entre energia elétrica e energia térmica para determinar o fator de conversão de Joules para calorias.

Materiais:

1 Tripé, 1 haste, 1 gancho, 1 presilha, corpos metálicos com furo, fio, aquecedor de água, gelo, água (preferencialmente destilada), álcool, 1 becker de 500 ml, 1 jarra metálica, calorímetro, termômetro digital, 1 balança analítica, 2 provetas graduadas de plástico. Calorímetro com resistor, termômetro digital, fonte, cronômetro e multímetro, balança.

Procedimentos:

C1- Determinação da capacidade térmica do calorímetro

- Despeje água fria no becker e adicione gelo. Aqueça água usando a jarra metálica. Monitore a temperatura da água fria e espere estabilizar.
- Coloque o calorímetro vazio e tampado na balança analítica e zere a tara.
- Abra o calorímetro e despeje no seu interior aproximadamente 80 ml da água fria que se encontra numa temperatura abaixo da temperatura ambiente ($T \cong T_{\text{amb}} - 10^{\circ}\text{C}$).
- Feche o calorímetro e meça a massa m_1 da água fria.
- Insira o termômetro no calorímetro e espere que o sistema (calorímetro + água + termômetro) alcance o equilíbrio térmico. Meça a temperatura T_1 no equilíbrio com o termômetro instalado. Esta é a temperatura do sistema calorímetro+água+termômetro.
- Coloque a proveta vazia na balança e zere a tara. Despeje aproximadamente 80 ml da água aquecida a uma temperatura no mínimo 20°C acima da temperatura ambiente na proveta e meça uma única vez a massa m_2 e a temperatura T_2 da água.
- Abra o calorímetro contendo a água fria (não retire o termômetro da tampa) e despeje rapidamente a água aquecida tampando-o logo em seguida. Monitore a temperatura e espere a o sistema entrar em equilíbrio térmico. Filme com a câmera do celular o termômetro (se desejar filme também o cronômetro de outro celular) para depois fazer um gráfico de $T \times t$ e modelar como ocorre a transferência de calor. Anote a temperatura T_f quando o sistema atingir o equilíbrio térmico.
- Repita no mínimo 5 vezes o experimento desde o início.

- Use a expressão que relaciona as trocas de calor para calcular a capacidade térmica do conjunto calorímetro mais termômetro obtida cada vez que o experimento foi realizado.
- Neste caso não faremos a propagação das incertezas das medições das massas e das temperaturas para encontrar a incerteza na capacidade térmica. O fato é que existem outras fontes de incertezas resultantes do próprio procedimento de realização do experimento que acabam sendo mais significativas. A fim de considerar todas as fontes de incertezas estatísticas optamos por repetir o experimento 5 vezes.
- Faça um tratamento estatístico dos valores de capacidade térmica calculados e considere o desvio padrão experimental como incerteza da capacidade térmica. Represente corretamente os valores obtidos.

Grandezas medidas e capacidade térmica calculada						
experimento	m_1 (g)	m_2 (g)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_f (°C)	C (cal/°C)
1						
2						
3						
4						
5						

- Expresse a capacidade térmica do calorímetro em gramas de água.

C2- Determinação do calor específico de sólidos

- Use a balança analítica para medir (5 medições) a massa m_2 total dos sólidos que serão usados nos experimentos. Use o fio para que o corpo possa ser suspenso.
- Coloque os sólidos dentro da jarra metálica contendo água e aqueça a água até a temperatura de ebulição. Obs: Pendure os sólidos por um fio para que estes não fiquem em contato com o fundo do recipiente. A temperatura do sólido aquecido será considerada como a temperatura medida da água em ebulição.
- Use uma proveta para medir a uma única vez a massa m_1 de aproximadamente 100 ml de água resfriada que se encontra numa temperatura abaixo da temperatura ambiente ($T \cong T_{amb} - 10^\circ\text{C}$). Coloque a proveta vazia na balança, zere a tara, despeje a água e meça a massa. Despeje a água fria no calorímetro. Feche o calorímetro e espere que o sistema (calorímetro + água + termômetro) alcance o equilíbrio térmico. Meça a temperatura T_1 no equilíbrio com o termômetro instalado.
- Meça a temperatura da água quente T_2 , retire o sólido que também está na temperatura T_2 da água, abra ligeiramente o calorímetro sem retirar o termômetro da tampa e coloque o sólido rapidamente no calorímetro. Mantenha o termômetro afastado do sólido. Meça a temperatura da água do calorímetro ao longo do tempo e anote os valores. Filme com a câmera do celular o termômetro (se desejar filme também o cronômetro de outro celular) para depois fazer um gráfico de $T \times t$ e

modelar como ocorre a transferência de calor. Espere o sistema entrar em equilíbrio térmico e meça a temperatura final T_f .

- Faça um gráfico do comportamento da temperatura ao longo do tempo e encontre o tempo necessário para que o sistema atinja o equilíbrio térmico.

- Use a expressão que relaciona as trocas de calor para calcular o calor específico do sólido. Faça uma pesquisa na internet para identificar o material constituinte do sólido.

- Faça o tratamento estatístico dos dados e propague as incertezas para a calor específico do sólido. Represente corretamente os valores obtidos.

Obs: Use a incerteza estatística da massa do sólido como incerteza estatística estimada para uma única medição realizada da massa da água fria. Isso agiliza o procedimento de medição e evita que a temperatura da água varie muito durante o experimento. A incerteza estatística do termômetro deve ser também estimada.

- Faça uma pesquisa na internet para identificar o material constituinte do sólido.

Dados das medições.

<i>Massa da água</i> $m_1 (g)$	<i>Massa do sólido</i> $m_2 (g)$

$m_1 (g) \pm \sigma$	$m_2 (g) \pm \sigma$

Grandezas e incertezas.

<i>Sólido 1</i>	$m_1 (g) \pm \sigma$	$m_2(g) \pm \sigma$	$T_1 (^\circ C) \pm \sigma_{T1}$	$T_2 (^\circ C) \pm \sigma_{T2}$	$T_f (^\circ C) \pm \sigma_{Tf}$
<i>Sólido 2</i>	$m_1 (g) \pm \sigma$	$m_2(g) \pm \sigma$	$T_1 (^\circ C) \pm \sigma_{T1}$	$T_2 (^\circ C) \pm \sigma_{T2}$	$T_f (^\circ C) \pm \sigma_{Tf}$

C3- Determinação do calor específico de líquidos

O calor específico medido do sólido pode ser usado para medir o calor específico de um líquido.

- Coloque água na jarra metálica, mergulhe o sólido na água e leve para aquecer até o ponto de ebulição da água. Obs: Pendure o sólido por um fio para que este não fique em contato com o fundo do recipiente.

- Meça a massa m_1 de aproximadamente 150 ml de álcool que se encontra na temperatura ambiente e despeje no calorímetro. Coloque a proveta na balança analítica, zere a tara, despeje o álcool na proveta e meça a massa m_1 .

- Feche o calorímetro e espere que o sistema (calorímetro + álcool + termômetro) alcance o equilíbrio térmico. Meça a temperatura T_1 no equilíbrio com o termômetro instalado.

- Abra ligeiramente a tampa do calorímetro sem retirar o termômetro e insira o sólido de massa m_2 que está na temperatura de ebulição da água T_2 . Meça a temperatura ao longo do tempo e anote os valores. Filme com a câmera do celular o termômetro (se desejar filme também o cronômetro de outro celular) para depois fazer um gráfico de $T \times t$ e modelar como ocorre a transferência de calor. Espere o sistema entrar em equilíbrio térmico e anote a temperatura final T_f .

- Faça um gráfico do comportamento da temperatura ao longo do tempo e encontre o tempo necessário para que o sistema atinja o equilíbrio térmico.

- Faça o tratamento estatístico dos dados e propague as incertezas para a calor específico do álcool. Represente corretamente os valores obtidos.

Obs: Use a incerteza estatística da massa do sólido como incerteza estatística estimada para uma única medição realizada da massa do álcool. Isso agiliza o procedimento de medição e evita que a temperatura do álcool varie muito durante o experimento. A incerteza estatística do termômetro deve ser também estimada.

- Faça uma pesquisa na internet para identificar o álcool.

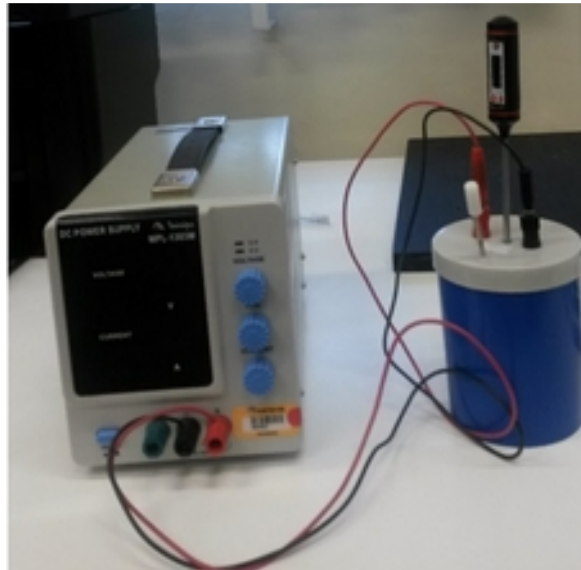
Grandezas e incertezas.

$m_1 (g) \pm \sigma$	
$m_2 (g) \pm \sigma$	
$T_i (^\circ C) \pm \sigma$	
$T_2 (^\circ C) \pm \sigma$	
$T_f (^\circ C) \pm \sigma$	

Dados das medições.

Tempo (s)	Temperatura ($^\circ C$)	Tempo (s)	Temperatura ($^\circ C$)	Tempo (s)	Temperatura ($^\circ C$)

C4- Determinação do equivalente elétrico do calor



- Meça a massa de aproximadamente 200 ml de água e coloque no calorímetro. Feche o calorímetro e monitore a temperatura da água. Espere que o equilíbrio térmico seja atingido e anote a temperatura T_0 . Enquanto isso, antes de conectar os cabos ao calorímetro, ligue a fonte, ajuste a voltagem para 10V e espere esta estabilizar. Prepare o cronômetro.
- Conecte os cabos da fonte a resistência por meio dos terminais localizados na tampa do calorímetro e aumente a corrente até que está atinja um valor máximo de 2 A. Anote os valores de corrente e tensão exibidos no mostrador da fonte e acompanhe-os ao longo de todo o experimento. Acione imediatamente o cronômetro e meça a temperatura em intervalos de tempo regulares, de 15 ou 20 segundos, até que se passem 360 s (6 minutos). Agite a água do calorímetro antes de cada medição para uniformizar a temperatura do volume de água.
- Após transcorridos os 360 s, desligue a fonte e continue acompanhando a temperatura por aproximadamente 3 minutos ou até que esta fique estabilizada.
- Repita o experimento 5 vezes, tentando anotar a temperatura sempre nos mesmos instantes de tempo.
- Construa um gráfico da temperatura da água em função do tempo. Avalie as incertezas nos valores medidos de temperatura e tempo. Interprete o comportamento observado.
- Construa um gráfico de potência dissipada em função do tempo. Avalie as incertezas nos valores medidos do tempo e propague para a potência as incertezas nos valores medidos de resistência e corrente. Interprete o comportamento observado.
- A partir do gráfico encontre a energia em Joules dissipada no resistor durante o experimento. Propague as incertezas na potência e no tempo para a energia.
- Calcule a capacidade calorífica do conjunto calorímetro mais água. Encontre a capacidade calorífica do calorímetro e compare com o resultado obtido anteriormente.
- Calcule a quantidade de calor recebida pela água durante o experimento.
- Determine o equivalente elétrico do calor em Joules e compare com o valor de referência. Comente.

Dados das medições.

Água		
Massa (g)	Volume (ml)	Calor específico (cal/g ⁰ C)
I (A)	U (V)	

Primeiro conjunto de medições			
T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)

Segundo conjunto de medições			
T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)

Terceiro conjunto de medições			
T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)

Quarto conjunto de medições			
T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)

Quinto conjunto de medições			
T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)

Viscosidade

Introdução:

Devido a viscosidade do fluido, a queda de um corpo num meio está sujeita a uma força oposta ao seu movimento cuja dependência com a velocidade é dada pela **Lei de Stokes**. No caso particular de esferas caindo com velocidade baixa num líquido sob a ação da gravidade, a força de atrito viscosa é dada por:

$$F = 3 \pi d v \eta$$

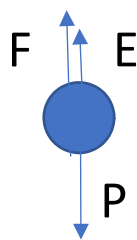
Onde d é o diâmetro da esfera, v a sua velocidade com relação ao meio e η é a **viscosidade do fluido**. No entanto, esta equação somente é válida na condição de fluxo laminar, no qual as camadas adjacentes do fluido deslizam suavemente entre si e o fluxo é estacionário. O **número de Reynolds R_e** é um parâmetro usado como critério qualitativo para determinar qual é o tipo de fluxo ao qual o objeto está sujeito. Para um fluxo laminar o número de Reynolds deve ser menor que 2000.

$$R_e = \frac{\rho_l v l}{\eta}$$

Onde ρ_l e η são a densidade e a viscosidade do fluido, v é a velocidade da esfera movendo-se através do fluido e l é o comprimento característico do sistema.

Num experimento realizado com o objetivo de determinar a viscosidade de um fluido usando a Lei de Stokes, é necessário garantir um pequeno diâmetro das esferas além de baixa densidade e alta viscosidade do fluido, parâmetros que são favoráveis a obtenção de fluxo laminar.

As forças atuando sobre a esfera em queda no fluido estão representadas no diagrama a seguir e são o seu peso P , a força de atrito viscosa F e o empuxo E .



Quando a esfera atinge a velocidade terminal u , a resultante das forças atuando sobre ela é nula e a viscosidade do fluido pode ser encontrada pela expressão:

$$\eta = \frac{g (\rho_e - \rho_l)}{18 u} d^2 \quad \text{sendo } \eta \text{ dada em (g/cm.s)}$$

Esta velocidade terminal é uma aproximação que não leva em conta a influência das paredes do tubo no movimento da esfera. Existe um fator de correção, **fator de Ladenburg**, que leva em conta o diâmetro da esfera d , o diâmetro do tubo d_t e a altura h_t do tubo. Este fator deve ser multiplicado pelo valor de velocidade calculado acima.

$$k = \left(1 + 2,4 \frac{d}{d_t}\right) \left(1 + 1,65 \frac{d}{h_t}\right)$$

Conversão de unidades: 1 g/cm.s=0,1 Pa.s e 1 Pa.s=1000 cP (centipoise)

Materiais:

Proveta de vidro, amostra (glicerina ou outra substância), suporte com marcação de altura, conjunto de esferas, micrômetro, cronômetro, termômetro, balança, ímã, papel toalha.

Objetivos:

Medir a viscosidade de um líquido. Verificar experimentalmente a lei de Stokes.

Procedimentos:

V1- Determinação da viscosidade de líquidos usando a Lei de Stokes

- Com o termômetro meça a temperatura ambiente.
- Use a balança analítica para medir a massa e o micrômetro para medir o diâmetro das esferas que serão usadas no experimento. No caso da massa individual de cada esfera ser muito pequena, pode-se optar por medir a massa de um conjunto contendo um certo número de esferas semelhantes. A massa de uma esfera pode ser considerada como sendo a divisão da massa total do conjunto pelo número de esferas do conjunto. Determine a densidade absoluta (massa específica) das esferas. Faça um tratamento estatístico dos dados medidos e propague incertezas para a densidade.

Dados das medições.

m (g)	d (mm)

Grandezas e incertezas.

esfera	$m \pm \sigma$	$d \pm \sigma$	$\rho_e \pm \sigma$

- Faça a montagem experimental preenchendo a proveta com o líquido e posicionando o suporte com a régua próximo a proveta. **Importante:** As esferas devem atingir a velocidade terminal entre os pontos inicial e final de medição do tempo gasto no percurso. Avalie a incerteza no tamanho do percurso.
 - Solte as esferas sempre da mesma altura com relação a superfície do líquido no tubo, para que sua velocidade ao entrar no líquido seja aproximadamente igual em todos os lançamentos. O ideal é soltar a massa bem próximo a superfície do líquido.
 - Use a câmera do celular para filmar a queda das esferas dentro do líquido. Depois com o software *Tracker Video Analysis and Modeling Tools* (<https://physlets.org/tracker/>) obtenha a distância percorrida em função do tempo.
 - Meça a massa e o volume de uma certa quantidade da amostra para obter a densidade na temperatura de realização do experimento.
 - Obtenha a velocidade terminal à partir do gráfico de $s \times t$.
 - Tabele as velocidades terminais de cada esfera e encontre o valor médio e sua incerteza.
 - Calcule o fator de Ladenburg e encontre a velocidade terminal corrigida.
 - Determine a viscosidade do líquido. Propague as incertezas das grandezas para a incerteza na viscosidade.
- Compare o valor de viscosidade obtido com valores tabelados que são encontrados em livros ou outras fontes.