

Capítulo 5

EXP. 7 - MEDIDA DA CONCENTRAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO DE AÇUCAR ATRAVÉS DA POLARIZAÇÃO ÓTICA

5.1 OBJETIVOS

Apresentar o fenômeno da rotação da direção de polarização da luz por uma solução de açúcar medindo o ângulo de giro produzido uma solução com concentração conhecida e determinar uma concentração desconhecida.

5.2 PARTE TEÓRICA

5.2.1 Polarização da luz

O que normalmente chamamos de luz corresponde à parte visível do espectro eletromagnético. A luz (radiação eletromagnética) tem as características de uma onda transversal, ou seja, os vetores \mathbf{E} e \mathbf{B} dos campos elétrico e indução magnética são perpendiculares à direção de propagação da onda. O comportamento da direção do vetor do campo elétrico de uma onda define o *estado de polarização da onda*. Quando não é possível descrever o comportamento da direção desse vetor dizemos que a onda não é polarizada. É o que ocorre quando a onda é uma superposição de várias ondas que foram produzidas por várias fontes independentes não correlacionadas. Por exemplo, a luz que ilumina esse texto que você está lendo é proveniente de várias fontes distintas e não correlacionadas sendo, portanto, não polarizada. Quando é possível descrever o comportamento da direção do vetor \mathbf{E} em função do tempo (ou do espaço) dizemos que a onda é polarizada.

O estado de polarização de uma onda pode ser alterado por processos físicos como a reflexão e a refração ou mesmo a transmissão por um meio específico. Por exemplo, quando a luz não polarizada é refletida por uma superfície, em um determinado ângulo que depende do material, a luz refletida pode se tornar polarizada com o vetor \mathbf{E} oscilando em uma única direção.

A luz natural é uma luz não polarizada, o vetor \mathbf{E} pode ser encontrado em qualquer direção em um plano perpendicular à direção de propagação, a cada instante de tempo, de modo completamente aleatório. Se um feixe de luz não polarizada passar através de uma folha de um material especial, denominado polarizador, que possui uma direção característica de polarização, apenas as componentes do campo elétrico que vibram paralelamente a essa direção são transmitidas. O feixe resultante consiste, então, de um campo elétrico vibrando em uma única direção e dizemos que a luz está linearmente polarizada nesta direção. A figura (Fig. 5.1) mostra um corte da seção de um feixe luminoso que propaga na direção perpendicular ao plano do papel antes e após o processo de polarização.

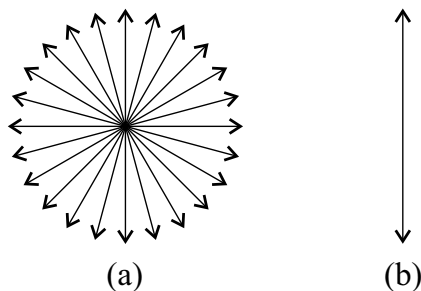


Figura 5.1: Representações das direções de oscilação do vetor \mathbf{E} em uma luz não polarizada (a) e uma luz linearmente polarizada (b).

É evidente então, que a direção de vibração da luz polarizada, ou seja, a direção de polarização depende da natureza e orientação do material polarizador.

5.2.2 Polarização por reflexão

Suponhamos um feixe de luz não polarizado incidente sobre uma superfície de uma placa de vidro como mostra a figura (Fig. 5.2)

O vetor do campo elétrico de cada trem de onda do feixe pode ser decomposto em duas componentes, uma perpendicular ao plano de incidência (que é o plano da figura) e outra, contida neste plano. A primeira, representada por uma série de pontos, é a chamada componente σ (perpendicular). A segunda, representada pelas setas, denomina-se componente π (paralela). No caso da luz ser natural, ou seja, não polarizada, essas duas componentes tem, em média, amplitudes iguais.

Existe um ângulo de incidência, chamado de ângulo de polarização θ_p , ou ainda, *ângulo de Brewster* em que a componente π da onda refletida anula-se. O feixe refletido pelo vidro, embora de baixa intensidade, torna-se polarizado com a direção de polarização σ perpendicular ao plano de incidência. O feixe refratado, de alta intensidade, ainda possui as duas componentes (π e σ) do campo, porém com amplitudes médias diferentes; dizemos, então, que a onda refratada é parcialmente polarizada.

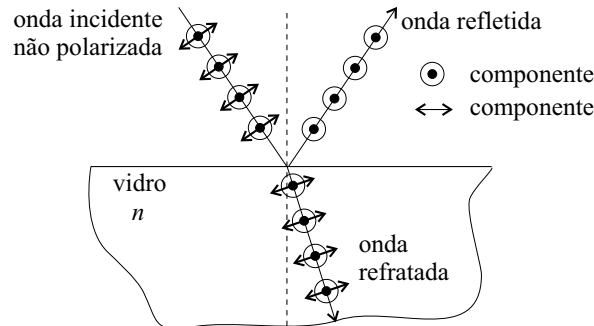


Figura 5.2: Processo de polarização por reflexão em um meio com índice de refração n .

É possível aumentar a intensidade do feixe polarizado refletido se repetirmos o processo de reflexão mantendo o mesmo ângulo de Brewster de incidência para uma segunda placa de vidro colocada por baixo da primeira. A luz parcialmente polarizada que atravessa a primeira placa incidirá na segunda onde será parcialmente refletida e parcialmente refratada. A componente refletida que é polarizada reforçará a componente refletida da primeira reflexão aumentando a intensidade do feixe refletido. Utilizando-se várias placas empilhadas aumentaremos a intensidade da luz polarizada refletida e, também, cada vez que a luz atravessa uma placa ela vai se tornando mais polarizada (lembre-se que ela é parcialmente polarizada) com a diminuição progressiva da componente σ . Com uma grande quantidade de placas paralelas acabaremos polarizando também a luz transmitida (na direção da componente π).

Experimentalmente, verifica-se que, quando a incidência ocorre com o valor do ângulo de polarização (ângulo de Brewster) os raios refletidos e refratados são perpendiculares entre si como mostra a figura (Fig. 5.3).

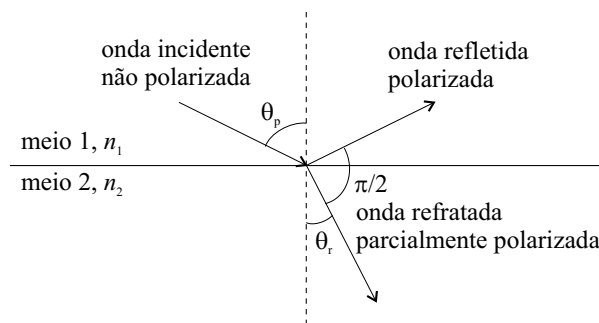


Figura 5.3: Geometria dos raios quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de polarização.

Pela lei de Snell-Descartes

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_p = n_2 \operatorname{sen}\theta_r. \quad (5.1)$$

Contudo,

$$\theta_p + \theta_r = \frac{\pi}{2}. \quad (5.2)$$

Combinando essas duas equações temos

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_p = n_2 \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_p \right) = n_2 \cos \theta_p, \quad \therefore \quad \tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5.3)$$

Essa é a chamada lei de Brewster.

5.2.3 Lâminas polarizadoras

Uma lâmina polarizadora ou polaroide é um material, normalmente um plástico, que possui uma *anisotropia* que lhe confere a característica de polarizar a luz que a atravessa. A direção de polarização é representada por uma série de linhas paralelas sobre a lâmina polarizadora na figura (Fig. 5.4).

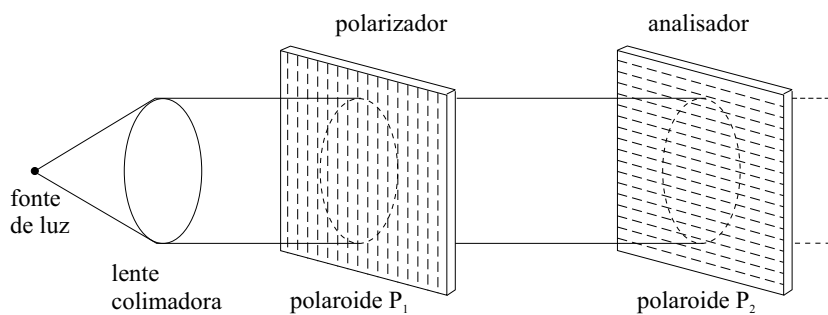


Figura 5.4: Arranjo experimental com lâminas polarizadoras giradas de $\pi/2$.

A lâmina transmite apenas os componentes dos vetores dos campos elétricos dos trens de ondas que vibrem paralelamente a essa direção e absorve aqueles componentes que vibrem perpendicularmente aos primeiros. A luz emergente da placa será, portanto, polarizada.

O arranjo da figura mostra o trajeto luminoso da luz que atravessa duas placas polarizadoras cujas direções de polarização não coincidem. Nessa configuração, a lâmina polarizadora da esquerda é chamada de polarizadora e a da direita é chamada de analisadora. Se giramos P_2 em torno da direção de propagação, há duas posições nas quais a luz transmitida quase se anula; essas posições correspondem à ortogonalidade entre as direções de polarização de P_1 e P_2 . Em outras palavras, a luz não polarizada proveniente da fonte não é transmitida através de dois polarizadores cruzados.

Consideremos uma lâmina polarizadora cuja direção de polarização é mostrada na figura (Fig. 5.5) juntamente com o vetor do campo elétrico \mathbf{E} da onda nela incidente.

Esse vetor do campo pode ser decomposto nos componentes \mathbf{E}_x e \mathbf{E}_y respectivamente perpendicular e paralelo à direção de polarização da lâmina.

$$\mathbf{E}_x = E \operatorname{sen} \theta \quad (5.4)$$

e

$$\mathbf{E}_y = E \cos \theta. \quad (5.5)$$

Nesse caso, o componente que atravessará a lâmina polarizadora é E_y . Chamando de I_0 a intensidade da luz antes de passar pelo polarizador, I_1 a intensidade da luz após passar pelo

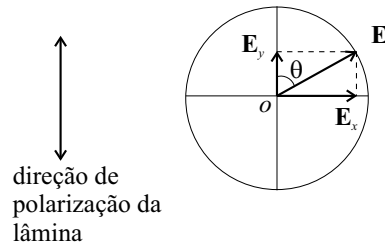


Figura 5.5: Direção de polarização de uma lâmina polarizadora e as projeções do vetor do campo elétrico \mathbf{E} .

polarizador e lembrando que a intensidade depende do quadrado da amplitude do campo, temos a seguinte relação entre as intensidades:

$$I_1 = I_0 \cos^2 \theta. \quad (5.6)$$

Voltemos à figura 5.4 e consideremos que o analisador (P_2) esteja girado de um ângulo α com relação ao polarizador (P_1). A fonte emite luz não polarizada que chega ao polarizador com intensidade I_0 . Como o vetor do campo elétrico da luz incidente tem direção aleatória com o passar do tempo e apenas o componente paralelo à direção do polarizador o atravessa, após este polarizador a intensidade terá caído à metade, ou seja, $I_1 = I_0/2$. Após o polarizador a luz está linearmente polarizada na vertical e incide no analisador cuja direção de polarização está girada de α com relação à vertical. Portanto, após o analisador, a intensidade I_2 vale

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha = \frac{I_0}{2} \cos^2 \alpha. \quad (5.7)$$

A intensidade máxima para a luz transmitida pelo analisador ocorre quando as direções de polarização de P_1 e P_2 forem paralelas, isto é, quando $\alpha = 0^\circ$ ou quando $\alpha = 180^\circ$. Quando $\alpha = 90^\circ$ ou quando $\alpha = 270^\circ$ a intensidade da luz emergente será nula.

Contudo, quando o olho humano é usado para detectar esses pontos de máximo ou de mínimo de intensidade obtém-se pouca precisão porque o olho é pouco sensível para perceber variações absolutas na intensidade. No entanto o olho é bastante sensível para fazer comparações entre duas imagens próximas com diferentes intensidades se as intensidades forem suficientemente baixas. O *polarímetro de penumbra*, que será descrito adiante, é um instrumento que mede a direção de polarização da luz baseado nessa capacidade de comparação do olho humano.

5.2.4 Atividade óptica

A atividade óptica é uma característica ou propriedade de alguns materiais e consiste na modificação do estado de polarização da luz ao atravessar esse material. A atividade óptica mais simples é a alteração da direção de polarização de uma luz linearmente polarizada à medida que a luz penetra no material. Essa alteração é medida através de um ângulo α formado entre a direção de polarização da luz incidente e a direção de polarização da luz transmitida (ou emergente) pelo material. O valor desse ângulo é proporcional ao comprimento l da substância que é atravessado pelo feixe de luz polarizada e depende também da natureza dessa substância. Do ponto de vista de um observador que recebe a

luz transmitida, as substâncias são chamadas *dextrógiras* se o sentido de rotação da direção de polarização for horário ou *levógiras* se o sentido de rotação da direção de polarização for anti-horário.

Certas substâncias apresentam a atividade óptica somente quando se encontram no estado sólido. Muitos cristais inorgânicos, especialmente o quartzo, e alguns cristais orgânicos, como o benzil ($(C_6H_5CO)_2$), são desse tipo. Essas substâncias perdem a atividade óptica na vaporização, em solução ou na fusão. Isso demonstra o fato de que a atividade óptica dessas substâncias depende dos arranjos espaciais dos átomos e moléculas no cristal, arranjos esses que desaparecem quando as moléculas se orientam ao acaso no estado líquido ou gasoso. Outras substâncias, tais como a terebintina, açúcar, cânfora e ácido tartárico, permanecem opticamente ativas em qualquer estado físico e também em soluções. Nessas substâncias, a atividade óptica está associada com as moléculas individuais e não com seu arranjo relativo.

Quanto a direção de polarização gira, varia de um composto para outro. Para qualquer composto dado, depende do número de moléculas no caminho da radiação luminosa ou, no caso de soluções, da concentração e do comprimento da amostra.

O ângulo de giro α da direção da luz polarizada é usualmente expresso em graus e dado por

$$\alpha = k l C \quad (5.8)$$

onde

k é a constante de rotação específica, característica de cada sistema particular e de condições determinadas sendo geralmente referida à temperatura de 20°C ;

l é o comprimento da amostra;

C é a concentração da solução em g/cm^3 .

5.3 EQUIPAMENTOS

5.3.1 O polarímetro

É um instrumento destinado a medir o ângulo de giro da direção da luz polarizada ao atravessar uma substância opticamente ativa. É mostrado esquematicamente na figura (Fig. 5.6).

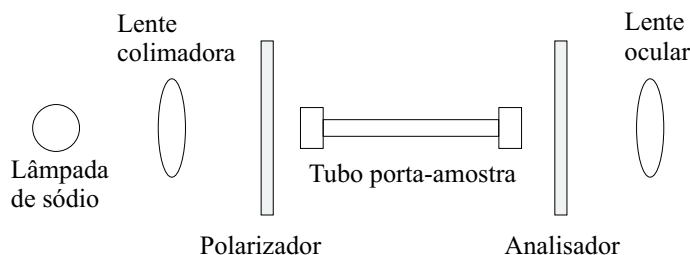


Figura 5.6: Partes de um polarímetro.

Consta de duas placas polarizadoras (polaroides) sendo uma o polarizador e a outra o analisador. O analisador pode girar de um ângulo conhecido com relação ao polarizador em torno do eixo comum. A radiação monocromática, divergente, procedente da lâmpada

de sódio é transformada em um feixe de luz paralelo através da lente colimadora e incide no polarizador onde a luz torna-se linearmente polarizada. Esse feixe de luz polarizada atravessa a amostra que está contida num tubo de vidro de comprimento conhecido e fechado em ambas extremidades por lâminas de vidro transparentes. Ao longo desse tubo a luz sofre uma rotação em sua direção de polarização, atravessa o analisador e finalmente vai à lente ocular de um telescópio para ser observada. A intensidade da luz observada será máxima quando a direção de polarização do analisador coincidir com a direção de polarização da luz que atravessou a amostra. Girando-se e ajustando-se o analisador para a intensidade máxima pode-se medir o ângulo de giro da direção de polarização da luz causado pela amostra. Esse processo também pode ser executado utilizando-se o mínimo de intensidade que ocorre quando a direção de polarização do analisador estiver a 90° com relação à direção de polarização da luz que atravessou a amostra. Contudo, nenhum desses dois processos fornece uma medida precisa do ângulo de giro devido à dificuldade do olho humano determinar valores absolutos de máximo ou de mínimo da intensidade luminosa. Para obter maior precisão, utiliza-se o polarímetro de penumbra descrito a seguir.

5.3.2 O polarímetro de penumbra

Em sua forma mais simples, esse polarímetro possui um polarizador duplo constituído por duas placas polarizadoras semicirculares colocadas lado a lado de maneira tal que suas direções de polarização formem um pequeno ângulo δ como mostra a figura (Fig. 5.7).

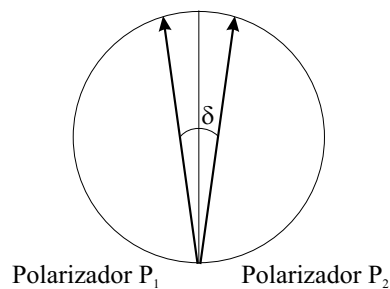


Figura 5.7: Direções de polarização em um polarizador duplo de um polarímetro de penumbra.

Incidindo-se um feixe de luz não polarizada nesse polarizador (vindo por trás da página), a luz emergente sai em dois feixes linearmente polarizados com direções de polarização que também formam um pequeno ângulo δ entre si. Quem observa essa luz através de um analisador (lâmina polarizadora), verá os dois feixes com intensidades que dependerão das direções relativas entre a direção de polarização do analisador e cada uma das direções dos polarizadores. Se a direção de polarização do analisador for ortogonal à direção de polarização de P_1 , a intensidade da luz que atravessa este polarizador e o analisador será zero. Contudo, nessa mesma condição, a direção de polarização do analisador com respeito à direção de polarização de P_2 não vale exatamente 90° e pouca intensidade luminosa atravessará esse conjunto. Os dois feixes de luz serão observados como um feixe totalmente escuro ao lado de um feixe luz na penumbra. Se a situação for invertida, isto é, a direção do analisador for ortogonal à direção de P_2 , não passará luz por este conjunto mas passará um pouco de luz pelo conjunto analisador e P_1 e os feixes serão vistos com a ordem trocada.

Se o analisador estiver posicionado em uma situação intermediária, quase ortogonal à P_1 e quase ortogonal à P_2 , passará um pouco de luz em cada conjunto e os dois feixes de luz serão vistos simultaneamente com baixa intensidade. Como o olho humano é capaz de comparar duas imagens fica fácil posicionar o analisador nessa posição intermediária e utilizá-la como uma posição de referência.

5.4 MEDIDAS

5.4.1 Cuidados com o equipamento

O tubo porta-amostra de vidro é frágil. Esse tubo possui duas tampas rosqueadas e em seu interior existe uma lâmina fina de vidro. Não deixe o tubo e as lâminas caírem no chão. Toda vez que o colocar sobre a bancada, certifique-se que está em um local seguro, que não rolará sobre a bancada e que não tenha possibilidade de queda. Também não aperte demasiadamente as tampas rosqueadas para evitar a quebra das lâminas de vidro. Aperte apenas o suficiente para não haver vazamento do líquido que estiver no interior do tubo.

Enxugue o exterior do tubo e suas tampas antes de colocá-lo no polarímetro.

5.4.2 Medida da concentração de uma solução de açúcar

Inicie preparando uma solução de açúcar a 20% g/cm³. Para isso coloque um béquer sobre o prato da balança, tare a balança (zere a indicação) e adicione açúcar até obter 20,0 g. Retire o béquer da balança e adicione, cuidadosamente, água destilada até completar 100,0 cm³ de solução. Tome cuidado ao observar o nível da solução para evitar o erro devido ao menisco do líquido. Dissolva totalmente o açúcar e filtre com papel filtro se a solução estiver turva. A solução deve estar perfeitamente transparente.

Em seguida determinaremos a *posição zero* α_0 do analisador correspondente a uma substância não opticamente ativa. Para tanto abra o tubo porta amostra, cuidadosamente, para não deixar cair a lâmina de vidro existente no interior da tampa. Lave o tubo e as tampas com água da torneira da pia para retirar todo o açúcar que porventura tenha sido deixado no interior do tubo e das tampas. Execute uma única lavagem final com água destilada (poupe a água destilada). Encha-o com água destilada e feche-o tendo o cuidado para não haver formação de bolhas de ar em excesso. Se ficar alguma bolha, ela deverá ser deslocada para a região de maior diâmetro do tubo. Enxugue o tubo e as tampas com papel toalha ou pano e observe se o tubo está transparente olhando uma fonte de luz através de uma de suas extremidades. Coloque o tubo no polarímetro já ligado fechando a tampa de proteção do aparelho e observe a luz através da ocular. Você deverá ver uma região circular (disco) iluminada com uma barra vertical em seu interior. Ajuste o foco girando a ocular até obter a imagem mais nítida possível. Esse ajuste depende do olho do observador. Gire o analisador, através do botão de giro, até a posição em que todo o campo visual esteja na penumbra (quase na escuridão) e que não seja mais possível distinguir a barra vertical no interior da região circular. Ambos deverão ter a mesma intensidade (fraca) luminosa. Todas as medidas posteriores serão efetuadas nessa mesma condição. Você deverá observar um fato curioso: ao girar ligeiramente o analisador ao redor do ponto de igual intensidade você perceberá uma inversão na intensidade da barra com relação à região circular, ora a barra estará escura e o disco estará claro e ora a barra estará clara e o disco estará escuro. Essa inversão é muito abrupta e é esse fato que ajuda a melhorar a precisão da medida.

Nessa condição, olhe a escala graduada no lado direito e frontal do equipamento através da pequena lente que existe ao lado da lente ocular. Posicione sua cabeça para que os números sejam vistos com nitidez. A escala graduada externa tem divisões de meio em meio grau e a escala interna (vernier) tem divisões a cada centésimo de grau. A referência para a leitura em graus é o traço correspondente ao algarismo zero do vernier. Os décimos e centésimos do grau são lidos na coincidência dos traços das duas escalas do mesmo modo que a leitura em um paquímetro como você já aprendeu nas disciplinas anteriores. O valor lido deve estar próximo de zero grau se seu instrumento estiver bem calibrado. Repita essa leitura mais duas vezes retirando e voltando o analisador para a mesma posição e anote os três resultados. Tome a média aritmética $\bar{\alpha}_0$.

Esvazie o tubo e encha-o agora com a solução de açúcar de concentração conhecida a 20%. Enxugue-o, verifique a transparência e leve-o ao polarímetro fechando a tampa de proteção. Como a direção de polarização foi girada, é preciso girar o analisador até a nova posição em que a barra desaparece no disco na penumbra. É esperado que isso ocorra em algum valor entre 15 e 40 graus para você se referenciar. Verifique o sentido de giro e faça a medida desse ângulo α_1 por três vezes e tome o valor médio $\bar{\alpha}_1$

O ângulo de giro será

$$\alpha = \bar{\alpha}_1 - \bar{\alpha}_0. \quad (5.9)$$

Esvazie o tubo colocando a solução em um outro béquer. Acrescente, aproximadamente, a mesma quantidade de água destilada nessa solução para torná-la uma solução desconhecida. Misture bem e retorne essa nova solução ao tubo. É importante que a solução esteja bem misturada, para isso, volte novamente a solução do tubo para o béquer e torne a misturar pois sempre ficam restos da solução anterior no tubo. Repita esse processo umas três vezes para “lavar” o interior do tubo com essa nova solução. Tampe o tubo, enxugue-o e observe a transparência. Se você ainda estiver observando uma imagem na forma de ondas no interior do tubo é porque a solução não está bem misturada. O tubo deve estar perfeitamente transparente. Coloque-o de volta no polarímetro e faça a nova medida do ângulo α_2 por três vezes, anote os valores obtidos e tome o valor médio $\bar{\alpha}_2$. Para essa solução, o ângulo de giro será

$$\alpha' = \bar{\alpha}_2 - \bar{\alpha}_0. \quad (5.10)$$

Retire o tubo do polarímetro descarte a solução e lave o tubo e as tampas. Meça com uma régua e anote o *comprimento da solução* no interior do tubo. Leve em conta a espessura das borrachas de vedação que possam existir no interior das tampas pois elas também contribuem para o comprimento da solução. Estime e anote o erro da medida.

Monte os tubos e coloque-os na caixa plástica sobre a bancada.

5.5 TRABALHO COMPLEMENTAR

- Usando a equação (5.8), expresse k em função de C , α e l . Para a solução de concentração conhecida, calcule a constante de rotação específica, k , usando essa expressão e o valor de α dado em (5.9).
- Desenvolva uma expressão para a concentração desconhecida C_x usando também a equação (5.8), trocando C por C_x , α por α' e substituindo k pela expressão utilizada no item anterior. Você deverá obter uma expressão para C_x que seja independente do

comprimento l do tubo. Calcule então o valor de C_x utilizando os valores de C , α e α' .

- Analise qualitativamente as possíveis fontes de erro na determinação de k e C_x . Sabendo-se que o erro relativo ($\Delta C/C$) na determinação da concentração conhecida é menor que 5%, calcule os erros absolutos nessas grandezas.
- Faça uma tabela constando todas as grandezas medidas e calculadas com seus respectivos erros e unidades. Expresse corretamente essas grandezas lembrando que os desvios absolutos devem conter apenas um algarismo significativo.

5.6 BIBLIOGRAFIA

[2], [3], [4], [6], [9], [13], [16], [21], [20], [23]

Críticas e sugestões, contate Prof. Newton B. Oliveira - newton@ufba.br