

---

# **Manual del laboratori de Física**

## **Grau en Ciència i Tecnologia dels aliments**

---

**- Curs 2012-2013 -**

## Índex

---

Pràctica 1	Mesura de densitat de sòlids .....	1
Pràctica 2	Mesura de densitat de líquids .....	3
Pràctica 3	Mesura de viscositats: fluid newtonià .....	5
Pràctica 4	Mesura de viscositats: fluid no newtonià .....	7
Pràctica 5	Mesura de la tensió superficial amb estalagmòmetre .....	9
Pràctica 6	Llei del refredament .....	11
Pràctica 7	Mesures de so .....	13
Pràctica 8	Mesura de l'índex de refracció .....	16
Apèndix:	Taules de densitats, viscositats i tensions superficials .....	18

# PRÀCTICA 1. Mesura de densitat de sòlids

## 1. Objectius

Determinació de la densitat, amb el seu error, de sòlids irregulars a partir de l'espenta que apareix en submergir-los en aigua. Comparació dels resultats amb els valors tabulats i discussió dels resultats.

## 2. Introducció

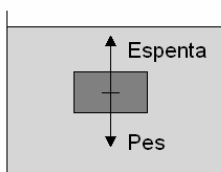
La densitat d'un sòlid es el quocient entre la seua massa ( $m_s$ ) i el seu volum ( $V$ )

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (1.1.)$$

La massa d'un sòlid podem determinar-la amb una balança. Si el cos és regular, podem calcular-ne el volum mesurant-ne les dimensions. A partir de la massa i el volum del cos, amb les imprecisions relatives d'aquest, podem calcular-ne la densitat amb el seu error. Tanmateix, si el sòlid no és regular, és més complicat determinar el volum del sòlid.

Per a la mesura de la densitat partirem del principi d'Arquimedes: "Sobre qualsevol cos insoluble, totalment o parcialment submergit en un fluid, hi actua una força vertical que l'empeny cap amunt i que és igual que el pes del fluid que desallotja".

Quan un sòlid entra en un fluid (líquid o gas) desplaça una porció d'aquest per tal d'entrar-hi. El sòlid desplaça el fluid exercint una força sobre aquest. Pel principi d'acció i reacció (3a llei de Newton), si el sòlid exerceix una força sobre el fluid, aleshores el fluid exercirà una força igual i de sentit contrari. La força amb què el fluid empeny és el pes del fluid al qual el sòlid ha desplaçat (fluid desallotjat).



Així tindrem que l'espenta serà el pes del fluid desallotjat

$$Espenta = Pes_f = m_f g = \rho_f V_f g, \quad (1.2.)$$

on el subíndex  $f$  es refereix al fluid desallotjat pel sòlid, i a més hi hem aplicat l'equació (1.1.) de la densitat.

Figura 1.1. Diagrama de forces

El punt clau es la coincidència entre el volum del fluid desallotjat i el volum del sòlid submergit (quan aquest està totalment submergit),  $V_f = V_s$ , i podem escriure

$$Espenta = \rho_f V_f g = \rho_f V_s g \quad (1.3.)$$

Per tal de conèixer la densitat del sòlid, necessitem saber-ne el volum  $V_s$ . Com que sabem la densitat del fluid, mesurarem la força de l'espenta amb l'ajuda d'una balança i utilitzant l'equació (1.3.) podrem conèixer el volum del sòlid.

## 3. Material

- sòlid problema (os o alumini)
- suport i corriola
- termòmetre
- balança
- vasos de precipitats
- aigua

## 4. Procediment experimental

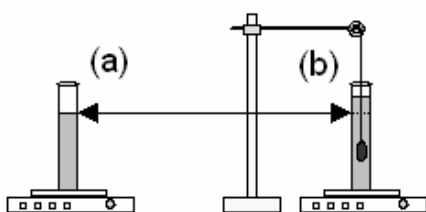


Figura 1.2. Muntatge experimental

1. Mesureu la massa del sòlid amb la balança ( $m_s$ ).
2. Retireu el sòlid. Poseu un cert volum d'aigua en un recipient en el plat de la balança; mesureu la temperatura de l'aigua i tareu la balança (Fig. 1.2a.).
3. Pengeu el sòlid problema de la corriola, submergiu-lo en aigua sense que toque les parets o el fons: el volum d'aigua augmentarà (Fig. 1.2b.). Preneu la mesura de la massa que apareix en la balança ( $m_f$ ) amb el seu error.

El volum d'aigua augmenta perquè el sòlid ha desallotjat part del líquid. Pel principi d'Arquimedes, el cos experimenta una força cap amunt: l'espenta, que coincideix amb el pes del fluid desallotjat, equació (1.2.). Pel principi d'acció i reacció, si l'aigua espenta el sòlid cap amunt, aleshores el sòlid espenta l'aigua cap avall. Aquesta força cap avall és allò que detectem amb la balança, ja que el pes del cos no intervé (està sostingut per la corriola). Com a conclusió, la balança mesura la massa del fluid desallotjat ( $m_f$ ).

4. Calculeu la densitat del sòlid.

Utilitzant les equacions (1.2.) i (1.3.):

$$m_f g = \rho_f V_f g = \rho_{aigua} V_s g \quad (1.4.)$$

Aïllant  $V_s$  i simplificant la  $g$  obtenim:

$$V_s = \frac{m_f}{\rho_{aigua}} \quad (1.5.)$$

La densitat de l'aigua val  $1 \text{ g/cm}^3$  a  $3.98 \text{ }^\circ\text{C}$ . Per obtenir la densitat de l'aigua a la temperatura del laboratori, haurem d'interpol·lar a partir de la Taula 1 de densitats (vegeu l'apèndix). L'error associat a la mesura del termòmetre produirà un error de la interpolació de la densitat.

A partir de la massa del sòlid ( $m_s$ ) amb el seu error, la massa del fluid desallotjat ( $m_f$ ) amb el seu error, i la densitat de l'aigua ( $\rho_{aigua}$ ) amb el seu error, podem determinar per substitució la densitat del sòlid ( $\rho_s$ ) a partir de l'expressió següent:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_s}{m_f} \rho_{aigua} \quad (1.6.)$$

L'error associat a  $\rho_s$  el podem calcular amb el mètode dels logaritmes o el de les derivades parcials.

5. Repetiu el procediments per a tres sòlids del mateix material amb el propòsit de millorar la precisió de la mesura. Calculeu el valor mitjà de les densitats, que serà la densitat experimental  $\rho_{exp}$ . Per a l'error de la mesura, utilitzeu el major entre l'error mitjà

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(\rho_1) + \varepsilon(\rho_2) + \varepsilon(\rho_3)}{3} \quad (1.7.)$$

i l'error de dispersió

$$\varepsilon_D = \frac{\rho_{m\grave{a}x} - \rho_{m\grave{i}n}}{4} \quad (1.8.)$$

on  $\rho_{m\grave{a}x}$  és el valor màxim, i  $\rho_{m\grave{i}n}$ , el valor mínim.

## 5. Anàlisi dels resultats

1. Discussiu el valor resultant de la densitat del sòlid en funció de la dispersió  $D$  de les tres mesures, calculada com

$$D(\%) = \frac{\rho_{m\grave{a}x} - \rho_{m\grave{i}n}}{\bar{\rho}} 100, \quad (1.9.)$$

on  $\bar{\rho}$  és el valor mitjà.

2. Compareu el valor resultant de la densitat del sòlid amb la Taula 2 de l'apèndix, utilitzant la desviació relativa (que indica l'exactitud de la mesura)

$$DR(\%) = \frac{\rho_{exp} - \rho_T}{\rho_T} 100, \quad (1.9.)$$

on  $\rho_{exp}$  és el valor determinat experimentalment i  $\rho_T$  és el valor tabulat. Discussiu la causa de les possibles diferències.

## PRÀCTICA 2. Mesura de densitat de líquids

### 1. Objectius

Determinar la densitat de diferents dissolucions d'aigua i sal comuna mitjançant el principi d'Arquimedes. Relacionar matemàticament la densitat i la concentració en sal. Fer prediccions de concentració en sal a partir de la densitat i verificar-les.

### 2. Introducció

La densitat d'un sòlid es el quocient entre la seua massa ( $m_s$ ) i el seu volum ( $V$ ):

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (2.1.)$$

La massa d'un sòlid podem determinar-la amb una balança. Si el cos és regular, podem calcular-ne el volum mesurant-ne les dimensions. A partir de la massa i el volum del cos, amb les imprecisions relatives d'aquest, podem calcular-ne la densitat amb el seu error. Tanmateix, si el sòlid no és regular, és més complicat determinar el volum del sòlid.

Per a la mesura de la densitat partirem del principi d'Arquimedes: "Sobre qualsevol cos insoluble, totalment o parcialment submergit en un fluid, hi actua una força vertical que l'empeny cap amunt, i que és igual que el pes del fluid que desallotja".

Quan un sòlid entra en un fluid (líquid o gas) desplaça una porció d'aquest per tal d'entrar-hi. El sòlid desplaça el fluid exercint una força sobre aquest. Pel principi d'acció i reacció (3a llei de Newton), si el sòlid exerceix una força sobre el fluid, aleshores el fluid exercirà una força igual i de sentit contrari.

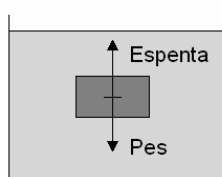


Figura 1.1. Diagrama de forces

La força amb què el fluid empeny és el pes del fluid al qual el sòlid ha desplaçat (fluid desallotjat). Així tindrem que l'espenta serà el pes del fluid desallotjat

$$Espenta = Pes_f = m_f g = \rho_f V_f g, \quad (2.2.)$$

on el subíndex  $f$  es refereix al fluid desallotjat pel sòlid, i a més hi hem aplicat l'equació (1.1.) de la densitat.

El punt clau es la coincidència entre el volum del fluid desallotjat i el volum del sòlid submergit (quan aquest està totalment submergit),  $V_f = V_s$ , i podem escriure

$$Espenta = \rho_f V_f g = \rho_f V_s g \quad (2.3.)$$

L'espenta la mesurarem amb l'ajuda d'una balança; utilitzarem un sòlid (immensor) de volum conegut  $V_s$ ; i la incògnita serà la densitat del fluid  $\rho_f$ . Utilitzarem com a problema diverses dissolucions d'aigua i sal comuna, tenint en compte que la seua concentració és

$$C(\%) = \frac{\text{massa de solut (grams)}}{100 \text{ grams de dissolució}} 100 \quad (2.4.)$$

### 3. Material

- dissolucions d'aigua i sal comuna
- termòmetre
- suport i corriola
- immensor de volum conegut
- balança
- diversos recipients

### 4. Procediment experimental

1. Mesureu la temperatura de les dissolucions salines (0, 4, 8, 12, 16%).
2. Introduïu una dissolució en el recipient. Poseu el recipient en el plat de la balança i tareu-la (Fig. 2.1a.).
3. Introduïu el suspensori completament en el líquid evitant que toque les parets i el fons, i tractant d'introduir la menor quantitat possible de fil (Fig. 2.1b.).

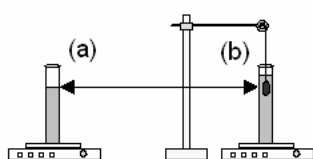


Figura 2.2. Muntatge

4. Preneu la lectura de la massa ( $m_f$ ) amb el seu error.

L'immersor, en entrar en el líquid, desallotjarà un certa quantitat d'aquest i, per tant, apujarà el nivell del líquid en el recipient. Pel principi d'Arquimedes, el líquid empenyerà l'immersor amb una força: l'espenta, és a dir, el pes del fluid desallotjat. Per la llei d'acció i reacció, l'immersor també empenyerà el líquid amb la mateixa força, però en sentit contrari. Per tant, la lectura de la balança indicarà el pes del fluid desallotjat pel suspensori. El pes de l'immersor no apareixerà en la balança, ja que l'immersor està subjectat per la corriola. Com a conclusió, la balança mesurarà la massa de fluid desallotjat ( $m_f$ ). Aplicant les expressions (2.2.) i (2.3.) i el fet que el volum de fluid desallotjat coincideix exactament amb el volum del sòlid submergit (immersor)  $V_f = V_s$

$$\text{Espenta} = m_f g = \rho_f V_f g = \rho_f V_s g \quad (2.5.)$$

ara podem extraure la densitat del fluid com

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_s} \quad (2.6.)$$

Si utilitzem la massa  $m_f$  en grams, com que l'immersor té un volum de  $10 \text{ cm}^3$  (amb un error estimat de l'1%), la densitat del fluid, en  $\text{g/cm}^3$  l'obtindrem directament de

$$\rho_f (\text{g/cm}^3) = \frac{m_f (\text{g})}{10 \text{ cm}^3} \quad (2.7.)$$

5. Repetiu el procediment tres vegades per a cada dissolució per evitar possibles dispersions.

## 5. Anàlisi dels resultats

1. Representeu gràficament la densitat del fluid (eix X) i la concentració (eix Y). Si els punts es disposen formant una recta, trobeu-ne l'equació mitjançant un ajust per mínims quadrats, on A és la pendent i B, l'ordenada en l'origen.

$$C(\%) = A \rho_f (\text{g/cm}^3) + B \quad (2.8.)$$

La importància d'aquesta equació rau en el fet que: (1) ens relaciona la densitat i la concentració salina; (2) ens prediu quina serà la concentració salina a partir d'una certa mesura de densitat d'una dissolució.

2. Calculeu els errors d'A i B. Deduïu-ne les unitats.
3. Mitjançant el mètode dels logaritmes o el de les derivades parcials, calculeu l'error de cada concentració a partir de l'equació (2.4.), tenint en compte els errors en la massa del solut i en la massa de la dissolució causats per la precisió de la balança.
4. Calculeu l'error de cada densitat mitjana mesurada a partir de l'equació (2.7.), discutint, si s'escau, les dispersions observades (apartat 4 secció 5). Incloeu-hi els errors de la densitat i la concentració com a barres d'error.
5. Verifiqueu la validesa de la predicció de la concentració. Prepareu una dissolució amb una concentració concreta (per exemple del 10%). Mesureu experimentalment el valor de la densitat  $\rho_p$ . A partir d'aquest valor i de l'equació (2.8.), predieu el valor de la concentració  $C_p'$ . Si la nostra predicció ha estat bona, hem d'obtenir el mateix valor de la densitat, és a dir,  $C_p = C_p'$ . Discutiu la validesa de la predicció en funció de les diferències relatives que pugui haver-hi entre  $C_p$  i  $C_p'$ . Amb aquest fi, empreu l'equació (1.9) i canvieu  $\rho_T$  per  $C_p$  i  $\rho_{\text{exp}}$  per  $C_p'$ .
6. Quina és la validesa de l'equació (2.8.)? Com a ajuda empreu la Taula 3 de l'apèndix.

## PRÀCTICA 3. Mesura de viscositats: fluid newtonià

### 1. Objectius

Determinar la viscositats de fluids newtonians mitjançant el viscosímetre de Cannon-Fenske, per comparació amb la viscositat de l'aigua.

### 2. Introducció

#### Fluid

Les diferències entre sòlid, líquid i gas es poden explicar en funció de les forces que lliguen les molècules. En els sòlids, les molècules estan rígidament lligades i per això tenen forma i volum definits. En els líquids, les molècules no estan unides amb una força suficient per mantenir una forma, però sí per a mantenir un volum definit. El líquid s'adapta al recipient que el conté, però manté el seu volum (una terç de cervesa s'adapta a la botella o al got, però el seu volum continua sent 33 cl). En els gasos, les molècules no estan unides i per això manquen de forma i volum definits. Del fet que tant líquids com gasos puguen fluir deriva la denominació de fluids.

#### Viscositat

La viscositat és una propietat dels fluids relacionada amb el moviment d'aquests. Des de fa segles, se sap que l'aigua no es mou ella sola. Els rius flueixen perquè hi ha un cert pendent cap a la mar; per a ruixar els camps era necessari fer conductes inclinats perquè l'aigua es moguera i avui dia s'utilitzen motors per bombejar l'aigua. Tot açò succeeix perquè les molècules del fluid xoquen les unes amb les altres i es perd energia. Per això cal subministrar energia (energia potencial amb els pendents o exercint una pressió) per tal de moure els fluids. La viscositat és una propietat dels fluids que explica la relació entre la força aplicada per a moure'ls i la velocitat amb què es mouen. Imaginem una botella d'aigua que es buida en inclinar-la. L'aigua flueix sense problemes perquè la seua viscositat és relativament baixa. A la mel, en canvi, li costa molt més fluir perquè és molt més viscosa.

Un fluid newtonià té viscositat constant (no depèn de la força aplicada per fer-lo fluir).

#### Equació de Poiseuille

Per tal de moure un fluid per una conducció a una certa velocitat és necessari subministra-li una certa pressió (en definitiva, una energia), a causa de la viscositat. Hi ha una relació entre la pressió aplicada (en realitat sobrepressió  $\Delta P$ ), la llargada  $L$  de la conducció, el seu radi  $R$ , la seua secció o superfície  $S$ , la velocitat  $v$  del fluid i la seua viscositat  $\eta$ .

$$\Delta P = \frac{8\eta L}{\pi R^4} S v \quad (3.1.)$$

Si la conducció és vertical, la sobrepressió que farà moure el fluid estarà causada per la diferència d'altures del líquid (pressió hidrostàtica). En la part inferior de la conducció hi ha més pressió, ja que té damunt el líquid.

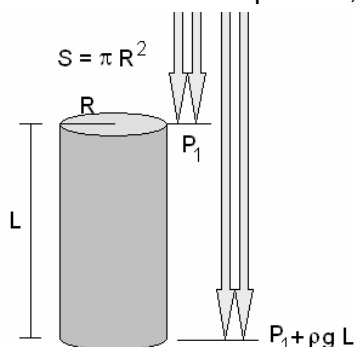


Figura 3.1. Conducció vertical

Així, la diferència de pressió entre els extrems de la conducció (sobrepressió) serà

$$\Delta P = \rho g L \quad (3.2.)$$

Si substituïm en l'equació (3.1.) i considerem que la conducció té secció circular ( $\pi R^2$ ), tenim

$$\rho g L = \frac{8\eta L}{\pi R^4} S v = \frac{8\eta L}{\pi R^4} \pi R^2 \frac{L}{t} \quad (3.3.)$$

ja que la velocitat del fluid és

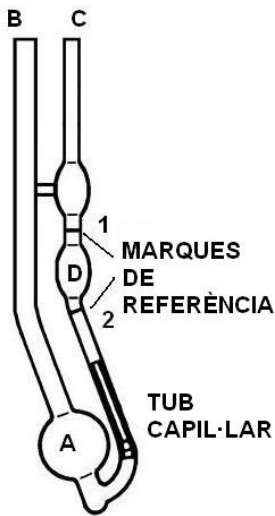
$$v = \frac{\text{espai recorregut}}{\text{temps utilitzat}} = \frac{L}{t} \quad (3.4.)$$

Si simplifiquem l'equació (3.3.), podem aïllar la viscositat com

$$\eta = \rho t \frac{g R^2}{8 L} \quad (3.5.)$$

Ara suposem que tenim una conducció i que mesurem el temps  $t_1$  que tarda en fluir-hi un líquid 1 (amb densitat  $\rho_1$  i viscositat  $\eta_1$ ). A continuació, netegem la conducció i hi fem passar un líquid 2 (amb densitat  $\rho_2$  i viscositat  $\eta_2$ ) i mesurem el temps  $t_2$  que tarda en fluir. Si apliquem (3.5) als dos líquids:

$$\eta_1 = \rho_1 t_1 \frac{gR^2}{8L}; \quad \eta_2 = \rho_2 t_2 \frac{gR^2}{8L} \quad (3.6.)$$



Si dividim ambdues expressions, el terme  $\frac{gR^2}{8L}$  se simplifica i obtenim

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \quad (3.7.)$$

i així podem aïllar la viscositat del líquid 2

$$\eta_2 = \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \eta_1 \quad (3.8.)$$

Amb l'equació (3.8.) podem obtenir la viscositat d'un cert líquid problema.

**Figura 3.2.** Viscosímetre de Cannon-Fenske

Per fer-ho partirem d'un líquid de referència (aigua), de densitat ( $\rho_1$ ) i viscositat ( $\eta_1$ ) conegudes i mesurarem el temps que tarda en fluir ( $t_1$ ) per una conducció. Després farem fluir el líquid problema de densitat coneguda ( $\rho_2$ ) per la mateixa conducció i mesurarem el temps que hi tarda ( $t_2$ ).

### 3. Material

- viscosímetre de Cannon-Fenske
- termòmetre
- cronòmetre
- vasos de precipitats
- aigua
- líquid problema (etanol al 50% en massa)
- pera de goma
- xeringa

### 4. Procediment experimental

1. Injecteu aigua en el viscosímetre per la branca B fins omplir el dipòsit A.
2. Aspireu amb la pera de goma per la branca C fins que l'aigua ascendisca per damunt de les marques de referència.
3. Poseu el viscosímetre en el seu suport de manera que la branca B quede vertical. Retireu la pera de goma i mesureu el temps que tarda (amb el seu error) el líquid en fluir entre les marques de referència. El nombre de mesures necessàries estarà determinat per la desviació.
4. Netegeu el viscosímetre i repetiu el procediment amb el líquid problema.

### 5. Anàlisi dels resultats

1. Calculeu la densitat i viscositat de l'aigua amb el seu error a la temperatura del laboratori a partir de la Taula 1 (apèndix).
2. Obteniu la densitat del líquid problema, amb l'error, a partir de la Taula 4 (apèndix).
3. Calculeu la viscositat del líquid problema, amb el seu error, mitjançant l'equació (3.8.).
4. Compareu la viscositat calculada amb la determinada a partir de la Taula 4: obteniu la desviació relativa i hipotetitzeu sobre les possibles causes de les desviacions.
5. Si és possible, mesureu la densitat del líquid problema amb la balança tal i com es descriu en la pràctica 2. Torneu a calcular la viscositat del líquid problema i analitzeu la influència d'utilitzar un valor de densitat tabulat o mesurat.



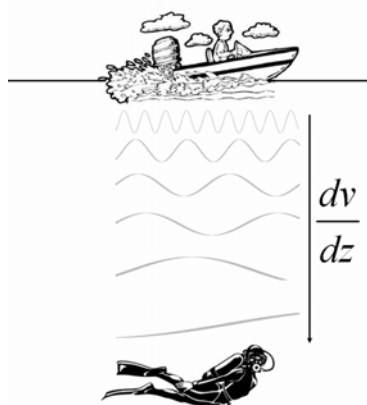
## PRÀCTICA 4. Mesura de viscositats: fluid no newtonià

### 1. Objectius

Mesura de la viscositat de dos fluids i determinació del caràcter newtonià o no newtonià.

### 2. Introducció

La viscositat és una propietat que explica la relació entre la força aplicada per moure'ls i la velocitat amb què es mouen. En analitzar el moviment d'un fluid viscos també cal considerar la superfície de fluid que està en moviment. A més a més, cal tenir en compte que, a causa de la viscositat, no totes les capes del fluid es mouran a la mateixa velocitat (Figura 4.1.).



**Figura 4.1.** La velocitat amb què es mouen les capes d'aigua en passar la llanxa decreix amb la profunditat: hi ha un gradient de velocitats.

Un vaixell que sura té el seu pes compensat per l'espenta del fluid. És a dir, no pesa gens. Tanmateix, els vaixells més grans necessiten remolcadors més potents que els petits per tal de ser arrossegats. La raó principal és que els vaixells més grans estan en contacte amb una superfície més gran de fluid i farà falta una força més gran per moure el fluid. Com més gran siga la superfície del fluid, més força farà falta per moure'l, ja que hi haurà més fricció entre les molècules. La relació entre les magnituds que hem mencionat és

$$F = S\eta \frac{dv}{dz} \quad (4.1.)$$

on  $F$  és la força aplicada, i  $S$ , la superfície de fluid que es mou.

El terme  $dv/dz$  és el gradient de velocitats (la velocitat canvia amb la profunditat, Figura 4.1.). A més a més, la força dependrà de la facilitat amb què es desplaça el fluid sota l'acció de la força: la viscositat  $\eta$ . L'equació (4.1.) sol expressar-se com

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dz} \rightarrow \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (4.2.)$$

on  $\tau$  és l'esforç de cisallament i  $\dot{\gamma}$ , la velocitat de cisallament o agitació.

En els fluids newtonians la viscositat és independent de l'esforç de cisallament, com en el cas de l'aigua: el reograma  $\tau = f(\dot{\gamma})$  donarà una recta. Tanmateix, en els fluids no newtonians la viscositat pot o bé disminuir amb l'esforç de cisallament (com en el iogurt o la pintura plàstica) o bé augmentar (barreja espessa de midó de dacsca i aigua). El reograma  $\tau = f(\dot{\gamma})$  donarà una corba amb pendent decreixent si la viscositat disminueix amb l'agitació, o bé ascendent si la viscositat augmenta.



**Figura 4.2.** Viscosímetre Brookfield.

#### Viscosímetre rotatori

Mesura la viscositat fent girar un cilindre (*spindle*) en el si d'un fluid. Un motor, de velocitat regulable, fa girar el cilindre. Les forces de viscositat dificultaran el gir del cilindre (exerciran el moment d'una força). És possible mesurar aquesta oposició al moviment del cilindre mitjançant un moll calibrat. El viscosímetre Brookfield és un dels més utilitzats en la indústria. Ofereix una precisió de l'1% quan s'utilitza el cilindre i la velocitat de gir adequats al valor de viscositat. Així, tenim:

- Mínim interval de mesura (viscositat petita): cilindre més gran i més velocitat.
- Màxim interval: cilindre més menut i menys velocitat.

El fabricant proporciona la conversió entre la velocitat angular del motor  $\omega$ , en revolucions per minut (rpm) i la velocitat de cisallament ( $\dot{\gamma}$ ), sempre que el recipient que continga el líquid siga molt més gran que el cilindre. La conversió és

$$\dot{\gamma}(s^{-1}) = 0.209 \omega(rpm) \quad (4.3.)$$

### 3. Material

- viscosímetre rotatori

- líquids problema (mel i tomaca fregida)

### 4. Procediment experimental

1. Les instruccions d'ús de cada viscosímetre es troben al costat de cada aparell.
2. No canvieu el cilindre del viscosímetre. Ja que mantenim sempre el mateix cilindre, considerarem que la precisió en la viscositat és d'un 5%. Utilitzareu un viscosímetre diferent per a cada líquid problema.
3. Seleccioneu la velocitat angular ( $\omega$  en rpm) més baixa, espereu que s'estabilitze la lectura i anoteu la lectura de  $\omega$ , de la viscositat (en mPa s) i del percentatge de deformació del moll.  
**Avís:** si al cap de 20-25 segons no apareix cap lectura, és que no es tracta d'una velocitat angular massa petita. En canvi, si se sent un xiulit, la velocitat serà massa elevada. En ambdós casos s'exclourà la mesura.
4. Augmenteu la velocitat, i espereu que s'estabilitze la lectura abans de prendre la mesura següent. Continueu fins arribar a la velocitat més elevada (vegeu l'avís del punt anterior).
5. Preneu les dades ara fent el recorregut invers de velocitats fins arribar a la velocitat més baixa.
6. Preneu les dades tornant a augmentar les velocitats fins a la velocitat més alta. D'aquesta manera haurem mesurat tres vegades la viscositat per a cada velocitat.

### 5. Anàlisi dels resultats

1. Obteniu la velocitat de cisallament amb el seu error para cada velocitat angular utilitzant l'equació (4.3.). Obteniu l'esforç de cisallament i el seu error a partir de les mesures de viscositat i l'expressió (4.2.).
2. Per a cada líquid representeu gràficament els reogrames: (1) viscositat en funció de velocitat de cisallament; (2) esforç de cisallament en funció de velocitat de cisallament.
3. El percentatge de deformació del moll en una mesura vàlida ha de ser superior al 10% i inferior al 80-90%. Utilitzeu aquests valors per avaluar la qualitat dels punts representats en l'apartat anterior. Torneu a traçar les figures si fóra necessari deixar de costat alguna mesura. Descriviu-ne els resultats.
4. A partir de la pendent del reograma  $\tau = f(\dot{\gamma})$  deduiu el caràcter newtonià o no newtonià dels líquids.
5. Ajusteu a una recta el reograma  $\tau = f(\dot{\gamma})$  del líquid newtonià.
6. Ajusteu a una funció del tipus  $\tau = m\dot{\gamma}^n$  el reograma del líquid no newtonià, on m és la consistència i n, l'índex de pseudoplasticitat.
7. Estudieu la influència en l'error de la velocitat de cisallament i en el de l'esforç de cisallament el fet de considerar que l'error de la velocitat angular és de 0.1 rpm.

## PRÀCTICA 5. Mesura de la tensió superficial: estalagmòmetre

### 1. Objectius

Determinar la constant d'un estalagmòmetre. Obtenir la tensió superficial d'un líquid problema a partir de la de l'aigua.

### 2. Introducció

#### Tensió superficial

Un líquid manté la seua estructura per les forces que uneixen les molècules entre si. Cada molècula es manté unida a les molècules que té al voltant. Tanmateix, les molècules de la superfície del fluid no tenen molècules per damunt.

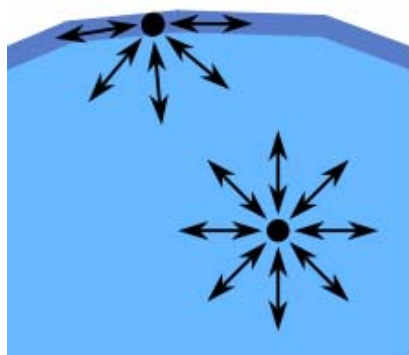


Figura 5.1a. Diagrama de forces de les molècules del fluid.



Figura 5.1b. Si el clip no exerceix suficient treball, no es trencarà la superfície de l'aigua. El clip és d'acer i no està surant.

Açò dona lloc a una força resultant en la superfície del fluid (Figura 5.1a.), que cohesionava amb més força les molècules de la superfície. La força resultant farà necessari un cert treball per tal de modificar la superfície del fluid. Si s'exerceix menys treball, la superfície es resistirà a canviar de forma (Figura 5.1b.).

El treball necessari per modificar la superfície d'un fluid dependrà de les dimensions de la superfície (a més superfície, més treball). Per això el treball per modificar la superfície ( $\Delta W$ ) sol fer-se relatiu a les dimensions de la superfície ( $\Delta S$ ): la tensió superficial  $\sigma$  (amb unitats de  $J/m^2$  o  $N/m$ ).

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta S} \quad (5.1.)$$

La determinació de la tensió superficial és important en la indústria pel seu paper en diversos fenòmens: formació de gotes, aplicació de recobriments en superfícies (pintures, vernissos, tractament de lents) i disseny de tensioactius pulmonars (per facilitar la formació de bombolles d'oxigen que absorbeixen els pulmons).

#### Llei de Tate

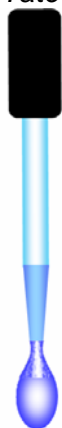


Figura 5.2. Formació d'una gota.

La tensió superficial fa que la superfície de l'aigua es resista a canviar de forma quan flueix. Una manera de resistir-se al canvi és ocupant la menor superfície possible (igual que ens resistim al fet que ens lleven la jaqueta fent el cos com si fóra una bola). Per a un cert volum d'aigua, es pot demostrar geomètricament que la menor superfície possible és l'esfera, per això la forma de les gotes. Quan s'utilitza un comptagotes (o un estalagmòmetre), el líquid normalment no cau. La tensió superficial impedeix que fluïska per l'obertura estreta. S'ha d'exercir un treball pressionant perquè isca el líquid. La tensió superficial fa que s'ofereixca una resistència al canvi de forma i s'aconsegueix una forma arrodonida sense que es trenque la superfície.

Arriba un moment que el pes de l'aigua és massa gran i es trenca la superfície. El fluid tendeix a ocupar de nou la mínima superfície i es forma una gota esfèrica.

La llei de Tate, equació (5.2.), relaciona el pes d'una gota en el moment de desprendre's, amb la tensió superficial del líquid i amb una constant que només depèn de l'estalagmòmetre. En concret, la constant només depèn del radi de l'obertura de l'estalagmòmetre i és independent del líquid que s'utilitzi.

$$mg = k\sigma \quad (5.2.)$$

on  $m$  és la massa d'una gota;  $g$  és l'acceleració de la gravetat;  $\sigma$  és la tensió superficial i  $k$  és la constant de l'estalagmòmetre.

En aquesta pràctica utilitzarem la llei de Tate per calcular la constant de l'estalagmòmetre i la tensió superficial d'un líquid problema.

### 3. Material

- |  |               |                |
|--|---------------|----------------|
| - estalagmòmetre                               | - comptagotes | - aigua        |
| - vas de precipitats                           | - termòmetre  | - pera de goma |
| - líquid problema<br>(alcohol al 50% en massa) | - balança     | - sabó         |

### 4. Procediment experimental

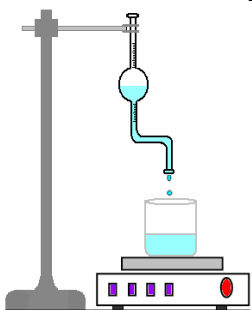


Figura 5.3. Estalagmòmetre i balança

1. Anotar la temperatura de l'aigua amb el seu error.
2. Amb el comptagotes, introduir en l'estalagmòmetre una quantitat suficient d'aigua.
3. Pesar en el vas de precipitats 20 gotes d'aigua amb el seu error amb l'estalagmòmetre. Repetir el procediment tres vegades i avaluar si s'han pres mesures suficients a partir de la dispersió.
4. A partir de la massa de 20 gotes d'aigua, obtenir la massa d'una gota d'aigua ( $m_1$ ) amb el seu error.

**IMPORTANT:** no toqueu amb els dits a l'eixida de l'estalagmòmetre perquè el podeu danyar.

5. Eixugar l'estalagmòmetre, la balança i el comptagotes.
6. Repetir els passos de l'1 al 4 reemplaçant l'aigua pel líquid problema.

### 5. Anàlisi dels resultats

1. Obtenir la tensió superficial de l'aigua amb la seua temperatura i la Taula 1.
2. Aplicar la llei de Tate a l'aigua

$$m_1g = k\sigma_1 \quad (5.3.)$$

i obtenir la constant de l'estalagmòmetre  $k$ , amb el seu error. Deducir-ne les unitats.

3. Obtenir la tensió superficial (valor experimental), amb el seu error, mitjançant la llei de Tate, on  $m_2$  és la massa d'una gota del líquid problema.

$$m_2g = k\sigma_2 \quad (5.4.)$$

4. A partir de la temperatura del líquid problema i de la Taula 4 (apèndix), obtenir-ne la tensió superficial (valor tabulat).
5. Analitzar l'exactitud de la mesura de la tensió superficial del líquid problema a partir de la desviació relativa entre el valor experimental i el tabulat, adaptant l'equació (1.9.).
6. Repetir l'experiment posant unes gotes de sabó en l'aigua. Discutir-ne els resultats.
7. Raonar per què calculem la massa d'una gota pesant 20 gotes en lloc de, directament, pesar la massa de només una gota.
8. Què fa que es pugui vèncer la tensió superficial del líquid en l'estalagmòmetre? Si tapem amb el dit l'obertura superior de l'estalagmòmetre, deixen de caure gotes, així doncs no es tracta de la força de la gravetat.
9. Per què hem utilitzat l'estalagmòmetre i no el comptagotes per mesurar la tensió superficial?

## PRÀCTICA 6. Llei del refredament

### 1. Objectius

Comprovar la llei del refredament. Predir l'evolució de la temperatura d'un sistema durant el seu refredament.

### 2. Introducció

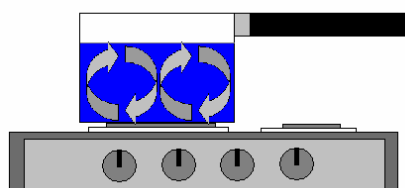
Quan un cos es troba a més temperatura que la del seu voltant, perd energia en forma de calor. Hi ha tres procediments per a la transferència de calor.

#### Conducció

La conducció està relacionada amb l'augment de l'energia interna. L'energia interna és la vibració dels àtoms i dels electrons lliures. En escalfar-se una substància, els àtoms vibren més de pressa, xoquen amb els àtoms veïns i els fan girar també més de pressa. Així es transmet la calor. Però com que els àtoms estan lligats en el sòlid, el seu moviment està restringit i la transferència de calor per vibracions atòmiques és lenta. En alguns materials hi ha electrons lliures (no lligats a un nucli i que es mouen per tot el material, com en els metalls) que en guanyar energia la transfereixen ràpidament als àtoms i electrons adjacents. Per això els metalls són bons conductors de la calor.

#### Convecció

Apareix en els fluids quan no totes les seues parts es troben a la mateixa temperatura. Sabem que els fluids menys densos (com l'oli) suren per damunt dels més densos (com l'aigua). També que la densitat d'un fluid decreix en augmentar la temperatura (com l'aire calent dels globus aerostàtics, que els fa ascendir). Així, les parts més calentes del fluid seran menys denses i ascendiran en forma de corrents (Figura 6.1.).



**Figura 6.1.** En escalfar aigua al foc, es produeixen corrents de convecció.

En ascendir, el fluid a temperatura més elevada cedeix per conducció part de la seua calor a unes altres parts del fluid més fredes. En refredar-se, el fluid descendeix i el cicle recomença. Són les anomenades corrents de convecció.

La convecció apareix en sistemes menuts com unes poques molècules i també en sistemes molt grans com l'atmosfera, les mars i el mantell terrestre.

#### Radiació

Tots els cossos emeten radiació a causa de la temperatura a la qual es troben. A temperatura molt elevada, la radiació que emeten és visible (per exemple, un metall encès o el filament d'una bombeta elèctrica). Quan el cos està a temperatura ambient, la radiació emesa no és visible. Stefan i Boltzmann van deduir que la radiació emesa és proporcional a la quarta potència de la temperatura i que també hi influeixen les característiques d'emissió del material.

#### Llei del refredament

Quan un sistema es troba a una temperatura més elevada que el seu voltant, perd energia en forma de calor pels tres mecanismes descrits.

D'aquesta manera, la temperatura del sistema va disminuint gradualment, fins assolir la temperatura ambient (Figura 6.2.). Matemàticament, podem descriure l'evolució de la temperatura del sistema amb el temps, si coneixem la temperatura inicial i la dels voltants

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} \quad (6.1.)$$

on  $t$  és el temps;  $T_0$  és la temperatura inicial del sistema;  $T_a$  és la temperatura dels voltants;  $k$  és una constant que depèn de la superfície del sistema ( $S$ ), la seua massa ( $m$ ), la calor específica ( $c_e$ , assumint que és constant) i una constant  $N$ , relacionada amb com el sistema intercanvia la calor.

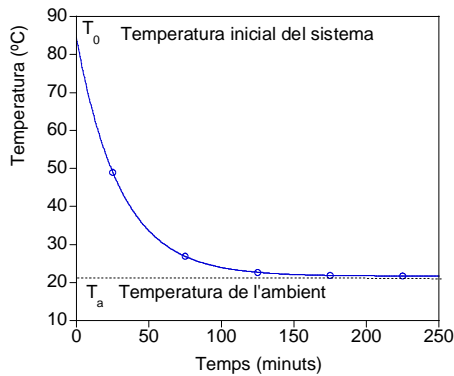


Figura 6.2. Refredament d'un sistema

$$k = \frac{NS}{mc_e}$$

(6.2.)

En el procés de refredament, els voltants no canvien la seua temperatura significativament, ja que l'energia rebuda és menyspreable en termes relatius a la seua mida.

### 3. Material

- microones
- 2 vasos de precipitats
- aigua
- superfície aïllant
- cronòmetre
- termòmetres

### 4. Procediment experimental

1. Preneu dos vasos de precipitats de diferent capacitat (100 i 150 cm<sup>3</sup>) i ompliu-los d'aigua. Seran els dos sistemes que es refredaran.
2. Escalfeu els dos vasos en el microones fins que assolisquen una temperatura aproximada de 80 °C.
3. Amb precaució per tal d'evitar cremar-vos, disposeu els vasos sobre la superfície aïllant. Preneu la temperatura inicial de cada sistema i la temperatura ambiental, amb els seus respectius errors.
4. Preneu la temperatura dels dos sistemes (amb els seus errors) cada minut durant 45-60 minuts, així com també la temperatura ambiental.

### 5. Anàlisi dels resultats

1. Per què en escalfar els dos vasos en el microones no assoleixen la mateixa temperatura?
2. Si la precisió del cronòmetre es d'1 centèsima de segon, calculeu l'error relatiu que cometem si la unitat de temps és el minut. Quines conclusions pràctiques podem extraure del valor de l'error relatiu del temps?
3. Representeu gràficament la temperatura de cada sistema en funció del temps.
4. Obteniu la constant de refredament de cada sistema. Per a això, operarem amb l'equació (6.1.), aïllarem l'exponencial i aplicarem logaritmes neperians

$$\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = e^{-kt} \rightarrow \ln\left(\frac{T - T_a}{T_0 - T_a}\right) = -kt \quad (6.3.)$$

Definint H en l'argument del logaritme (entre parèntesi), tindrem

$$\ln(H) = -kt \quad (6.4.)$$

Representeu gràficament ln(H) en funció del temps. Si els punts es disposen al llarg d'una recta, trobeu-ne l'equació pel mètode dels mínims quadrats. Obteniu k a partir de la pendent de la recta i les seues unitats.

5. Discussiu els valors de k de cada sistema en funció de les magnituds de l'equació (6.2.).
6. A partir de l'equació de l'ajust, calculeu el temps que tardarà cada sistema en assolir la temperatura ambiental. Aquest instant el descriurem matemàticament com que la diferència entre la temperatura del sistema (T) i la temperatura dels voltants (T<sub>a</sub>) siga tan menuda que el termòmetre no puga apreciar-la. Si la precisió del termòmetre és de 0.1 °C, considerarem l'equilibri tèrmic quan T-T<sub>a</sub>=0.1 °C. Què hauríem de fer per comprovar la predicció?

## PRÀCTICA 7. Mesures de so

### 1. Objectius

Mesurar el nivell de soroll en diversos llocs del campus i analitzar-ne els resultats. Mesurar l'atenuació del soroll en travessar un porta. Dur a terme la mesura del so de successos puntuals i interpretar-los.

### 2. Introducció

So

L'oïda és un dels nostres sentits, potser un dels determinants per a la nostra supervivència durant milers d'anys. Encara que ens va permetre detectar els nostres depredadors i fugir-ne, avui dia l'utilitzem principalment per comunicar-nos i per a divertir-nos. El so comença quan un cert element fa vibrar l'aire. La vibració arriba fins al nostre timpà, que és una membrana molt sensible a la qual es transmet la vibració de l'aire. Aquesta vibració es propaga dins de l'orella i estimula unes terminacions nervioses connectades al cervell, el qual interpreta el so.

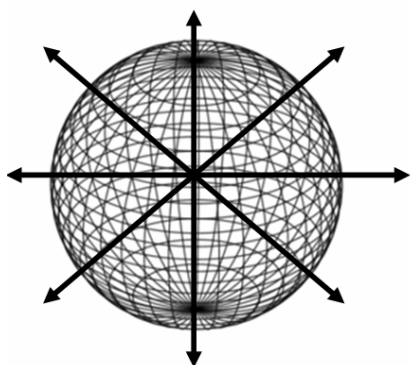
*Percepció del so*

La nostra percepció de so és subjectiva, ja que només podem dir si un so es més o menys fort; a més a més, la percepció varia d'una persona a una altra. El soroll es un so no desitjat, format per una superposició de sons de diferents freqüències. Quan supera un cert nivell se'l denomina contaminació acústica i resulta perjudicial. En els últims anys s'ha legislat sobre el soroll per tal de protegir els ciutadans. Hi ha una sèrie de magnituds físiques que permeten mesurar i controlar el soroll.

*Nivell d'intensitat*

El so és una ona mecànica: és energia que es propaga dins d'un medi material, sense que hi haja transmissió de matèria. L'energia que produeix l'ona es caracteritza per la seua potència  $P$  (energia subministrada per unitat de temps). En allunyar-nos de la font del so, percebem que el so es fa cada vegada més feble. L'explicació és que el so es propaga en les tres direccions de l'espai. El so és una vibració de l'aire i el fet que es propague significa que es fa vibrar cada vegada més molècules d'aire. Per fer vibrar aquestes molècules es consumeix energia, de manera que l'energia de l'ona s'ha de repartir per tots els punts i, com a conseqüència, el so es fa més feble com més ens allunyem de la font, és a dir, s'esmoreix.

Una manera de caracteritzar l'esmoreïment del so a una certa distància  $r$  de la font és mitjançant la intensitat de l'ona  $I$ . La intensitat és la potència de l'ona dividida per la superfície de l'esfera de radi  $r$  centrada en la font del so



**Figura 7.1.** L'energia de l'ona sonora es reparteix en tots els punts de l'espai. A tots els punts d'una esfera centrada en el focus del so els arriba el so igual de fort: la potència es reparteix en la superfície esfèrica.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

(7.1.)

on  $4\pi r^2$  és la superfície de l'esfera. En altres paraules, el so es propaga com les capes d'una cebeta. Prop del nucli, el so és més fort perquè l'energia es reparteix en una capa més menuda: més intensitat. En la capa exterior, l'energia es reparteix en una superfície molt més gran, i per això la intensitat és més menuda.

Les unitats d'intensitat són watts per metre quadrat ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). La nostra oïda pot percebre des d'un murmur (llindar d'audició,  $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ ) fins a un so tan fort que es percep com a dolor (llindar de dolor,  $1 \text{ W}/\text{m}^2$ ).

Per a abastar aquests 12 ordres de magnitud, entre  $10^{-12}$  i 1, s'utilitza una escala logarítmica: el 2 no és el doble de l'1, sinó 100 vegades més; el tres no es el triple de

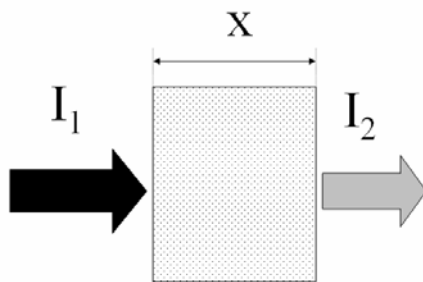
l'1, sinó 1000 vegades més. Aquesta escala rep del nom de nivell d'intensitat  $\beta$  (sensació sonora o nivell sonor) i es mesura en decibels (dB)

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (7.2.)$$

on  $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$  és el llindar d'audició. D'aquesta manera, l'escala varia entre 0 (no sentim res) i 120 dB, quan ens fa mal. Tanmateix, en els locals en què el nivell d'intensitat siga superior a 90 dB, s'ha de col·locar per llei un avís perfectament visible sobre les conseqüències nocives del so.

#### Transmissivitat

Quan el so es troba amb un medi material, com ara una paret, experimenta una reducció brusca de la intensitat. Es necessita molta més energia per fer vibrar les molècules de rajola, de formigó o de suro, que per fer vibrar les de l'aire. A més a més, com més espessor de material, més disminueix la intensitat de l'ona.



**Figura 7.2.** Absorció d'una ona per un medi material

Aquest fenomen de disminució de la intensitat del so rep el nom d'absorció, i es pot descriure amb l'equació de Lambert-Beer

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha x} \quad (7.3.)$$

on:  $I_1$  es la intensitat incident en el medi material;  $I_2$  és la intensitat a l'eixida del medi;  $x$  (en metres) és la distància recorreguda dins del medi; i  $e$  és la base del logaritme neperià.

El coeficient  $\alpha$  (en  $\text{m}^{-1}$ ) quantifica de quina manera absorbeix el medi.

Un medi amb un  $\alpha$  elevat absorbeix ràpidament un so que el travessa. Una manera senzilla de descriure l'absorció és mitjançant la transmissivitat del medi  $\tau$ , que és el quocient d'intensitats

$$\tau = \frac{I_2}{I_1} \quad (7.4.)$$

La transmissivitat varia entre 0 (cap so travessa el medi material) i 1 (tot el so travessa).

#### Sonòmetre



**Figura 7.3.** Sonòmetre digital

Un sonòmetre permet mesurar directament el nivell d'intensitat del so. Consisteix en un micròfon, un circuit que fa la mitjana quadràtica de les mesures en un cert temps (entre 0.125 i 1 segon), i un *display* digital. L'instrument té l'opció de mostrar el valor en cada instant o el valor màxim assolit en el temps que l'instrument està encès. Per a evitar danyar l'instrument, no crideu ni colpegeu sobre el micròfon.

### 3. Material

- sonòmetre
- cinta mètrica
- cronòmetre
- lector d'mp3 amb auriculars
- mostres musicals

### 4. Procediment experimental

1. Trieu 5 llocs representatius del Campus on s'intuïska que els nivells d'intensitat seran diferents. En cada lloc, preneu nota del nivell d'intensitat cada 10 segons durant 4 minuts.



- Busqueu un lloc on hi haja una porta que puguem obrir i tancar. Mesureu el nivell d'intensitat amb la porta oberta i tancada, segons el mateix patró temporal de l'apartat 4.1.
- Mesureu el nivell d'intensitat d'alguns successos puntuals (per exemple tos, esternut, mòbil sonant, xiulit, crit a una certa distància...), i preneu nota de la distància al sonòmetre.
- Mesureu el nivell d'intensitat que rebem quan escolteu música. Per a això, mesureu el nivell d'intensitat màxim de la freqüència de referència de 1000 Hz i de les peces musicals proposades que sonen pels auriculars a diferents volums.

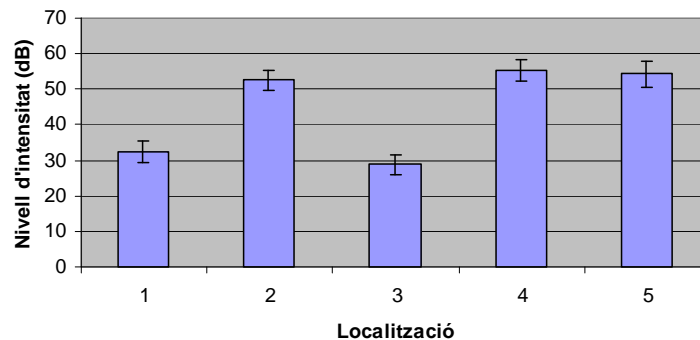
### 5. Anàlisi dels resultats

- Calculeu el nivell d'intensitat mitjà  $\bar{\beta}$  dels llocs triats en l'apartat 4.1. Abordarem les mesures de manera estadística i obtindrem la precisió de la mesura a partir de l'anomenat error estàndard de la mitjana

$$\varepsilon(\beta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\beta_i - \bar{\beta})^2}{N(N-1)}} \quad (7.5.)$$

on  $\beta_i$  és cadascuna de les mesures realitzades, i  $N$ , el nombre total de mesures.

- Elaboreu el diagrama de barres (Fig. 7.4.) de les mesures, on l'altura de la barra és la mitjana, i la barra d'error ve de l'equació (7.5.):



**Figura 7.4.** Diagrama de barres del nivell d'intensitat

Interpreteu el nivell d'intensitat de cada lloc, tenint en compte el criteri amb què es van triar els llocs de mesura. Verifiqueu si aquests valors estan d'acord amb la legislació vigent (Llei 7/2002, de 3 de desembre, de protecció contra la contaminació acústica).

- Per a un succés puntual del qual haureu pogut mesurar el nivell d'intensitat amb claredat, determineu-ne la intensitat a partir de l'equació (7.2.), i la potència a partir de l'equació (7.1.).
- Determineu, per a cada mostra musical de l'apartat 4.4., a partir de quin volum resulta nociu escoltar música amb auriculars (90 dB). Discutiu les possibles diferències entre els valors per a les mostres.
- A partir de la mesura de l'apartat 4.2., determineu la transmissivitat de la porta, utilitzant l'equació (7.4.). Com a eines matemàtiques tenim:

Equació logarítmica	Derivades
Obteniu $I_1$ a partir de $\beta_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0}$ ;	$h_1 = 10^x$ ; $h_1' = 10^x \ln(10)$
$\frac{\beta_1}{10} = \log \frac{I_1}{I_0} \rightarrow 10^{\frac{\beta_1}{10}} = \frac{I_1}{I_0} \rightarrow I_1 = I_0 10^{\frac{\beta_1}{10}}$	$h_2 = 10^{\frac{x}{10}}$ ; $h_2' = 10^{\frac{x}{10}} \ln(10) \frac{1}{10}$

## PRÀCTICA 8. Mesura de l'índex de refracció

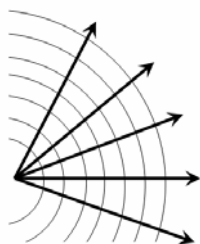
### 1. Objectius

Determinar l'índex de refracció de diverses dissolucions d'aigua i sucre. Predir el contingut en sucre d'una dissolució a partir de la mesura de l'índex de refracció i validar-ne la predicció. Determinar el contingut en sucres d'un suc comercial.

### 2. Introducció

#### Índex de refracció

La llum és una ona que es pot descriure utilitzant el concepte de raig (Figura 8.1.), un feix de llum molt estret. S'ha observat que la velocitat de la llum no és la mateixa en tots els medis. La velocitat de la llum és exactament de 299 792 458 metres per segon, però és inferior quan travessa un altre medi.



Per descriure com és de diferent la velocitat de la llum en un cert medi respecte a la velocitat en el buit, s'introdueix l'anomenat índex de refracció  $n$

$$n = \frac{c}{v}, \quad (8.1.)$$

on  $c$  és la velocitat de la llum en el buit i  $v$ , la velocitat de la llum en el medi en qüestió.

**Figura 8.1.** Concepte de raig.

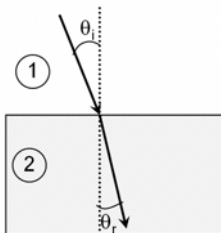
Per exemple, l'índex de refracció de l'aigua pura és, aproximadament, 1.33, que significa que l'aigua viatja 1.33 vegades més ràpid en el buit que en l'aigua. Quan la llum s'acosta a un medi amb diferent índex de refracció, part de la llum es reflecteix i la resta passa al segon medi (es refracta). S'observa experimentalment (per exemple introduint una cullera en un got d'aigua) que els raigs de llum canvien de trajectòria quan entren en l'altre medi (Figura 8.2a.). Hi ha una relació entre els angles de la llum i els índexs de refracció dels medis, l'anomenada llei de Snell

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (8.1.)$$

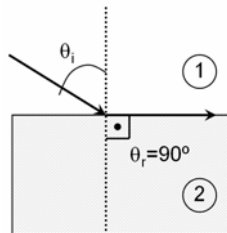
on:  $n_1$  i  $n_2$  són els índexs de refracció dels dos medis;  $\theta_i$  és l'angle d'incidència; i  $\theta_r$  és l'angle de refracció. Ambdós angles es mesuren respecte a la recta perpendicular a la superfície de separació entre els dos medis (interfície). L'equació (8.1.) es vàlida sempre que els medis siguin inotròpics, és a dir, uniformes en totes direccions.

#### Angle límit

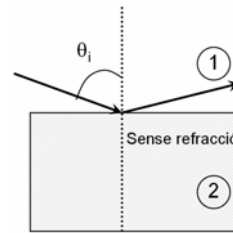
Quan la llum viatja d'un medi d'índex de refracció més elevat a un altre d'índex de refracció més baix (per exemple de vidre amb  $n_1=1.75$  a aigua amb  $n_2=1.33$ ), hi ha un angle d'incidència (angle límit  $\theta_L$ ) per al qual l'angle de refracció es de  $90^\circ$ , és a dir, la llum no canvia de medi, sinó que es mou per l'interfície (Figura 8.2b.). Si apliquem (8.1.), obtindrem l'equació (8.2.):



**Figura 8.2a.** Refracció de la llum



**Figura 8.2b.** Angle límit



**Figura 8.2c.** Reflexió interna total

$$n_1 \sin \theta_L = n_2 \sin 90^\circ \rightarrow \theta_L = \arcsin(n_2 / n_1) \quad (8.2.)$$

Per a angles més grans que l'angle límit només es produirà reflexió, l'anomenada reflexió interna total (Figura 8.2c.). Quan, en lloc d'aigua, es tracte d'una dissolució amb índex de refracció  $n_2$  desconegut, si es coneix l'angle límit i es coneix l'índex de refracció del primer medi  $n_1$ , és possible conèixer  $n_2$  aplicant l'equació (8.2.). És la base del refractòmetre (Figura 8.3.).



**Fig. 8.3.** Refractòmetre manual. El refractòmetre està dissenyat perquè la llum arribe, almenys, amb l'angle límit a un prisma d' $n_1$  conegut. A continuació, se situa una fina pel·lícula d'una dissolució problema ( $n_2$  desconegut). La llum ix del prisma segons les Figures 8.2b. i 8.2c. i il·lumina una escala calibrada en la qual es llegeix directament l'índex de refracció del líquid problema.

### Escala Brix

El grau Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ) és una unitat representativa del contingut en sucre d'una dissolució aquosa. 1 grau Brix correspon a 1 gram de sacarosa (sucre de taula) en 100 grams de dissolució. Per exemple, 13  $^{\circ}\text{Bx}$  correspondrà a

$$13^{\circ}\text{Bx} = \frac{13\text{ g sacarosa}}{100\text{ g dissolució}} = \text{concentració del 13\% (en massa)} \quad (8.3.)$$

Si la dissolució conté uns altres sòlids diferents dissolts de la sacarosa pura, com uns altres sucres, minerals, àcids... (en el cas del suc de fruita), aleshores l'escala Brix expressa aproximadament la quantitat de sucres dissolts. Conèixer això és important en la indústria de producció de suc, vi, midó i sucre. Per exemple, en la indústria vinícola, l'escala Brix informa de la quantitat de sucres presents en els mostos, que seran determinats en la qualitat final del vi després de la fermentació. L'índex de refracció d'una dissolució dependrà del nombre de partícules que continga, les quals faran que disminuisca la velocitat de la llum. Ara les partícules dissoltes són de sacarosa i estudiarem la relació entre l'índex de refracció i la concentració de sacarosa.

### 3. Material

- |              |                       |                         |                 |
|--------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| - termòmetre | - font de llum        | - refractòmetre manual  | - suc comercial |
| - sacarosa   | - balança de precisió | - dissolució de control | - comptagotes   |

### 4. Procediment experimental

1. Alceu la tapa protectora del refractòmetre. Netegeu i eixugueu el prisma. Poseu-hi unes gotes de líquid i tanqueu la tapa. Sosteniu l'instrument apuntant-lo cap a la llum i mireu pel visor (en negre, Figura 8.3.). El límit entre la part il·luminada (corresponent a l'angle límit) indica en l'escala l'índex de refracció.
2. L'índex de refracció de l'aigua pura (0  $^{\circ}\text{Bx}$ ) amb la temperatura apareix en la Taula 1. Comproveu que la mesura per a l'aigua és correcta. Torneu a calibrar el refractòmetre si fóra necessari amb el caragol.
3. Prepareu 5 dissolucions de sacarosa en aigua entre 5 i 16  $^{\circ}\text{Bx}$ .
4. Amb el refractòmetre mesureu l'índex de refracció de cada dissolució amb l'error.
5. Mesureu l'índex de refracció de la dissolució control i del suc, amb els errors.

### 5. Anàlisi dels resultats

1. Calculeu l'error comés en la concentració de les dissolucions a causa de la precisió de la balança.
2. Representeu gràficament l'índex de refracció (Y) en funció de la concentració en sacarosa (X), incloses les barres d'error. Trobeu els paràmetres (amb error) de l'equació que relaciona ambdues variables.
3. Utilitzant l'equació de l'apartat anterior, predieu la concentració de sucres del suc.
4. Utilitzeu que coneixem la concentració en sacarosa de la dissolució de control ( $C_{\text{control}}$ ) per fer una estimació de l'error de la predicció. A partir de l'índex de refracció del control, utilitzant l'equació obtinguda en l'apartat 5.2. en predirem la concentració en sacarosa ( $C_{\text{predicció}}$ ). Idealment s'hauria de complir que  $C_{\text{control}} = C_{\text{predicció}}$ , però com que no serà així, emprarem la desviació relativa entre ambdós valors com l'error de la predicció.

$$DR(\%) = \frac{C_{\text{control}} - C_{\text{predicció}}}{C_{\text{control}}} 100, \quad (8.4.)$$

Aplicarem aquest error relatiu a la predicció que hem fet per al suc en l'apartat 5.3.

5. Depenent de la collita (presència de sol, fred, pluja, plagues...), la dolçor de la fruita varia. Com és possible que els fabricants de suc aconseguisquen un sabor dolç constant si la llei prohibeix afegir-hi sucre?

## Apèndix

**Taula 1.** Densitat, viscositat i tensió superficial de l'aigua en funció de la temperatura

Temperatura (°C)	Densitat (g/cm <sup>3</sup> )	Tensió superficial (N/m)	Viscositat (mPa s)	Índex de refracció (a 589.3 nm)
0	0.99984		1.793	0.0757
5	0.99996			
10	0.99970	0.07423		
15	0.99910			
20	0.99821		1.002	1.33334
25	0.99701	0.07199	0.890	1.33285
30	0.99565			1.33228
35	0.99403			
50	0.98804	0.06794	0.547	

**Taula 2.** Densitats de sòlids a temperatura ambient 20-25°C

Material	Densitat (g/cm <sup>3</sup> )
Alumini	2.7
Os	1.7-2.0
Vidre	2.4-2.8
Acer inoxidable	7.8
Plom	11.3

**Taula 3.** Densitat de dissolucions de clorur sòdic en aigua. Valors per a 20 °C

Concentració (%)	Densitat (g/cm <sup>3</sup> )	Concentració (%)	Densitat (g/cm <sup>3</sup> )
0.5	1.0018	10.0	1.0707
1.0	1.0053	12.0	1.0857
2.0	1.0125	14.0	1.1008
3.0	1.0196	16.0	1.1162
4.0	1.0268	18.0	1.1319
5.0	1.0340	20.0	1.1478
6.0	1.0413	22.0	1.1640
7.0	1.0486	24.0	1.1804
8.0	1.0559	26.0	1.1972
9.0	1.0633		

**Taula 4.** Densitat i tensió superficial en funció de la temperatura per a certes substàncies

<b>Etanol</b>	0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	50 °C
Densitat (g/cm <sup>3</sup> )		0.79782	0.79358	0.78932	0.78504	0.78073	
Tensió superf. (N/m)		0.02322			0.02197		0.01989
Viscositat (mPa s)	1.786				1.074		0.694
<b>Etanol (50% massa)</b>							
Densitat (g/cm <sup>3</sup> )		0.92159	0.91773	0.91381	0.90982	0.90577	
Tensió superf. (N/M)				0.02851	0.02796	0.02753	0.02578
Viscositat (mPa s)			3.288	2.813	2.338	1.8630	

**Font:** Haynes, W. M. (ed.) (2012): *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press.  
Versió en línia en <<http://www.hbcpnetbase.com/>>.

Nota: s'ha utilitzat un punt per a marcar els decimals.