

**Manual Operatiu de Disseny  
d'Exercicis de Laboratori  
Ambientalitzats (MODEL I)**

Monografies universitàries, 8

BIBLIOTECA DE CATALUNYA. DADES CIP:

**Manual** operatiu de disseny d'exercicis de laboratori ambientaltzats (Model I). - (Monografies universitàries ; 8)  
Bibliografia  
ISBN 978-84-393-7614-9  
I. Rovira, Miquel, ed. II. Martínez-Lladó, Xavier, ed. III. Grau, Antoni, ed.  
IV. Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge  
V. Col·lecció: Monografies universitàries ; 8  
1. Tecnologia - Aspectes ambientals - Manuals de laboratori  
62:504(076.5)

Manual Operatiu de Disseny d'Exercicis de Laboratori Ambientaltzats (MODEL I)

© Generalitat de Catalunya  
Departament de Medi Ambient i Habitatge  
[www.mediambient.gencat.net](http://www.mediambient.gencat.net)

Aquesta monografia consta d'un text escrit i un CD-Rom

Edició a cura de Miquel Rovira, Xavier Martínez-Lladó i Antoni Grau

Primera edició: novembre de 2007  
Tiratge: 1.000 exemplars  
Producció i impressió: Barcino Solucions Gràfiques

DL: B-53779-2007  
ISBN: 978-s84-393-7614-9



Aquesta publicació ha estat feta amb paper estucat ecològic de 125 g per a l'interior i de 250 g per a les cobertes

# Sumari

INTRODUCCIÓ .....	5
Capítol 1 ADOBAMENT AL CROM D'ALT ESGOTAMENT.....	9
Capítol 2 DETERMINACIÓ DE LA DQO PEL MÈTODE DE REFLUX TANCAT .....	27
Capítol 3 RECUPERACIÓ DE CROM: FILTRE DE PREMSA.....	35
Capítol 4 TOP AQUÓS D'ALTES SOLIDESSES (PRÀCTICA DE PLANTA PILOT AMBIENTALITZADA D'ACABATS)	39
Capítol 5 APROFITAMENT D'AIGÜES DEPURADES EN AGRICULTURA .....	41
Capítol 6 BALANÇ ENTRE LA PRODUCCIÓ DE NITROGEN D'ORIGEN RAMADER I LES NECESSITATS DE NITROGEN DELS CEREALS I CONREUS FARRATGERS DE LA COMARCA D'OSONA .....	51
Capítol 7 CARACTERITZACIÓ DE MATERIALS ORGÀNICS COM A POSSIBLES ADOBS ORGÀNICS.....	59
Capítol 8 DISSENY DE L'ÀREA D'UN SEDIMENTADOR PER AL TRACTAMENT D'AGÜES RESIDUALS .....	73
Capítol 9 ESTUDI DE L'IMPACTE DE LES FUITES D'HIDROCARBURS DEL PETROLI SOBRE AIGÜES SUBTERRÀNIES .....	79
Capítol 10 SIMULACIÓ DE L'EVOLUCIÓ I ELS EFECTES D'UNA FUITA DE GAS TÒXIC .....	91
Capítol 11 COMPTADOR O DESCOMPTADOR DE DÈCADA AMB PANTALLA (DECADE DOWN/UP COUNTER WITH DISPLAY) .....	101
Capítol 12 DETECTOR DE NIVELL D'AIGUA REMOT .....	105
Capítol 13 ORGUE ELECTRÒNIC (IC ORGAN) .....	109
Capítol 14 PRESENTACIÓ DEL LABORATORI BÀSIC D'ELECTRÒNICA .....	115
Capítol 15 CONSTRUCCIÓ D'UN ROBOT MÒBIL AUTÒNOM ECOEFICIENT .....	123

Capítol 16	IDENTIFICACIÓ DE COMPONENTS EN UNA PLACA DE CIRCUIT IMPRÈS PER AL SEU DESACOBLEMENT .....	135
Capítol 17	MODELITZACIÓ D'UN CANAL DE REG .....	141
Capítol 18	ASSAIGS DE DEFORMACIÓ DE XAPA VIRTUALS .....	147
Capítol 19	AVALUACIÓ ECONÒMICA I AMBIENTAL DE LA CORROSIÓ EN METALLS ESTRUCTURALS.....	159
Capítol 20	RECICLATGE DE FOSSES D'ALUMINI .....	167
Capítol 21	ASSAIGS DE TRACCIÓ AMB PROVETES DE PLÀSTIC RECILAT .....	175
Capítol 22	IDENTIFICACIÓ DE RESIDUS PLÀSTICS .....	185
Capítol 23	REAPROFITAMENT DE PLÀSTICS: EXTRUSIÓ .....	193
Capítol 24	GESTIÓ DELS RESIDUS DE LES OPERACIONS DE PINTAT INDUSTRIAL .....	203
Capítol 25	GESTIÓ DELS RESIDUS DEL PROCÉS D'OBTENCIÓ DE PECES PER FOSA AMB MOTLLE DE SORRA .....	213
Capítol 26	GESTIÓ DELS RESIDUS DE TALLERS DE MECANITZACIÓ DE METALLS .....	229
Capítol 27	ESTUDI EN MODEL REDUÏT D'UN TRAM DE RIU. CAS DE LA RIERA DE RUBÍ A L'ENTORN DE LES FONTS .....	241
Capítol 28	ESTUDI HIDRÀULIC AMB EL MODEL NUMÈRIC HEC-RAS. CAS DE LA RIERA DE TOSSA A L'ENTORN DE LA SUREDA.....	249
Capítol 29	ESTUDI EN MODEL REDUÏT D'UN COL·LECTOR D'AIGÜES PLUVIALS. CAS DEL COL·LECTOR DEL TORRENT DE SANTA MARIA AL MONESTIR DE MONTSERRAT .....	253
Capítol 30	INTRODUCCIÓ A LA QUÍMICA VERDA .....	263
Capítol 31	OBTENCIÓ DE L'ÒXID DE COURE (II) I RECUPERACIÓ COM A COURE METÀL·LIC.....	267
Capítol 32	PROPIETATS I REACTIVITAT DE L'ETANOL .....	275
Capítol 33	V-LAB3D. L'APRENENTATGE MITJANÇANT LA PRÀCTICA: SIMULACIÓ VIRTUAL I INTERACTIVA EN 3D D'UN LABORATORI DE QUÍMICA .....	283

# Introducció

El novembre del 2000, el Departament de Medi Ambient i Habitatge va editar el llibre *Problemes ambientalitzats de les àrees científiques dels primers cursos. Monografies Universitàries núm. 2*, a cura de Joan Jorge. Aquest llibre va demostrar que es pot introduir el medi ambient en tot tipus d'assignatures i matèries, fins i tot en les que això sembla més difícil.

Per tal de continuar la iniciativa que tants bons resultats va proporcionar, s'ha fet el mateix amb les pràctiques de laboratori. En aquest cas, els efectes generats poden ser encara més notoris, ja que les pràctiques de laboratori constitueixen una aproximació a la realitat tecnològica, i sovint generen un impacte ambiental elevat.

Cal fer esforços adreçats al control rigorós del cicle de vida dels productes que s'utilitzen a les pràctiques de laboratori dels centres docents del nostre país, tenint en compte, per exemple, els tipus de productes que s'empren en l'elaboració de protocols, les mesures de seguretat necessàries, així com la generació i el tractament dels residus resultants.

L'objectiu d'aquest manual se centra a disposar d'una col·lecció de pràctiques de laboratori ambientalitzades per a diferents àrees de coneixement i assignatures, que potencii la sensibilització i formació de l'alumnat en aquest àmbit. Es tracta d'entendre que l'ambientalització curricular de les assignatures no és dissenyar-les pensant que els estudiants seran professionals en medi ambient. Per tant, s'han plantejat pràctiques similars a les que s'acostumen a fer, però que tant pels objectius, l'enunciat o el procediment tenen connotacions ambientals i suposen una millora del medi ambient.

El manual inclou un total de 32 pràctiques corresponents a les disciplines següents:

- Adoberia
- Agricultura
- Enginyeria química
- Informàtica
- Materials plàstics
- Materials metàl·lics
- Mecànica
- Obres públiques
- Química
- Telecomunicacions

Les pràctiques han estat elaborades majoritàriament per professorat de la UPC de diferents departaments, els quals disposen d'una gran experiència en recerca i docència. La majoria d'exercicis són

totalment innovadors i inèdits, i alguns corresponen a una versió ambientalitzada de pràctiques que ja existien abans de redactar el manual.

El manual s'ha elaborat en format paper i en un CD interactiu que en facilita la consulta i contribueix a fer-ne una utilització més sostenible.

Fruit d'aquest projecte i per tal de facilitar l'ambientalització de pràctiques ja existents o de les futures, s'ha establert una llista de control, que s'exposa a continuació i conté aspectes fàcilment implementables en molts dels exercicis de laboratori de diferents disciplines. En definitiva, pretén ser una eina de treball senzilla que contribueixi a incloure tants punts com sigui possible en les pràctiques des de l'òptica del medi ambient.

	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
La pràctica té a veure amb el compliment i/o comprensió d'aspectes relacionats amb la legislació ambiental?		
Té en compte l'oportunitat de sensibilitzar ambientalment l'alumnat?		
En el moment d'executar la pràctica al laboratori, es tenen en compte bones pràctiques relacionades amb el consum de recursos auxiliars com ara aigua, energia, paper o d'altres? S'han tingut en compte les fitxes de seguretat de productes, material o equipament en l'elaboració de la pràctica?		
Es fa referència als elements d'actuació i equips de protecció individual?		
S'incorpora la revisió preventiva, per part dels alumnes, dels aparells que s'utilitzen?		
S'incorpora la noció de risc associat a la pràctica així com les mesures preventives escaients?		
S'ha reduït l'escala de l'experiment o bé es treballa a microescala mantenint la qualitat docent?		
S'empren els productes químics menys perillosos i perjudicials possibles per al medi ambient i les persones?		
Les etapes de neteja es fan atenent criteris ambientals?		
La pràctica inclou la separació i classificació dels residus generats?		
S'inclouen aspectes relacionats amb el consum de recursos?		
La pràctica empra subproductes o reutilitza aigua o compostos provinents d'altres activitats o del mateix exercici?		
El material de laboratori que s'empra és reutilitzable?		
S'empra algun programa informàtic com a substituiu o complement de l'experimentació?		
S'inclouen aspectes relacionats amb la generació de residus?		
La pràctica permet fer front a la gestió de residus generats al llarg del seu desenvolupament?		
S'inclouen aspectes relacionats amb emissions i/o la qualitat de l'aire?		
S'inclouen aspectes relacionats amb la generació d'efluents i/o la gestió de l'aigua?		
S'inclouen aspectes relacionats amb la contaminació del sòl?		
S'inclouen aspectes relacionats amb la contaminació acústica?		
Es possibilita que els estudiants puguin aportar idees per ambientalitzar encara més l'exercici de laboratori?		

## Agraïments

Cal agrair a tot el professorat de la UPC que ha participat en la redacció d'aquest manual el seu interès i dedicació, ja que han fet realitat una experiència innovadora i que de ben segur contribuirà a la sostenibilitat de la nostra societat.

També, cal remarcar especialment el suport en el treball per part de Dídac Ferrer i Yazmín Cruz del CITIES de la UPC i a Anna Estella del Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya, que, a més de ser els veritables impulsors d'aquest projecte, han mostrat un gran interès en el manual, alhora que hi han realitzat valuoses aportacions.

## Referències

EPA (2000). *Environmental Management Guide for Small Laboratories*. United States Environmental Protection Agency. EPA 233-B-00-001.

JORGE, J. (2000). *Problemes ambientalitzats de les àrees científiques dels primers cursos*. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya.

PBPA (2002). *Bones Pràctiques ambientals als laboratoris. Manual d'ecogestió núm. 13*. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya.

SAGALÀS, J. (2000). *L'avaluació sostenibilista del PFC*. Col·legi d'Enginyers Tècnics i Industrials de Barcelona.

Miquel Rovira<sup>1,2</sup> i Xavier Matínez-Lladó<sup>1,2</sup>

1 Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Politècnica de Catalunya

2 CTM Centre Tecnològic





## Capítol 1

# Adobament al crom d'alt esgotament

JAUME SOLER

Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial d'Igualada (EUETII)  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

La transformació de la pell d'un animal en cuir implica la realització de tot un seguit de processos cada un dels quals té una finalitat pròpia englobada en un objectiu final: obtenir cuir acabat.

Les primeres operacions es coneixen entre la gent del ram com a «processos humits o de ribera», a causa de la presència permanent i necessària de l'aigua en tots ells, i són els següents: el remull, la pelada, el calciner, el descarnatge, la divisió, el desencalçament, el rendiment, el piquelatge, l'adobament, la neutralització, el readobament, la tintura i el greixatge.

#### *La matèria primera*

La pell que arriba a l'adober està formada per tres parts ben diferenciades: el pèl, l'epidermis, la dermis i el teixit subcutani. La part que interessa a l'adober és la dermis i, en el curs dels processos humits, s'eliminen les altres tres parts. La dermis està constituïda fonamentalment per fibres de col·lagen. L'adobament es pot definir com el tractament del col·lagen de la pell que en comporta una estabilització.

#### *La conservació de la pell en brut*

Una vegada s'ha sacrificat l'animal a l'escorxador i s'ha separat la pell de la resta del cos, s'hi apliquen uns tractaments que permeten la seva conservació temporal fins que aquesta pell arriba a l'adober. Els dos tractaments més habituals són l'assecatge i el salatge.

### *Els recipients utilitzats*

Els recipients on s'efectuen els treballs humits són els bombos.

Els bombos són com unes màquines de rentar roba, que agiten el bany i les pells en rodar sobre l'eix que els suporta. La capacitat d'un bombo ha de ser sis cops el pes de la pell molla.

La capacitat útil dels bombos varia molt. La quantitat de pell que s'hi ha de tractar està relacionada amb l'article final. Normalment en un bombo es tracten de 500 a 5.000 kg de pell.

### *Variables que cal tenir en compte*

Les variables físiques que en certa manera governen les reaccions químiques que tenen lloc en els recipients són la temperatura, el temps i l'efecte mecànic.

Les variables químiques més importants que cal controlar són el pH, la densitat del bany i la concentració de productes emprats.

### *El remull*

El remull és un tractament de la pell en brut amb aigua per tal d'aconseguir-ne la humectació i netejar-la de sal, sang, cascàries, microorganismes, limfes, globulines, albúmines i productes de conservació addicionats anteriorment.

Els productes que més correntment s'afegeixen en el remull són:

- Agents humectants i tensioactius. Els productes formats per la condensació de l'òxid d'etilè amb alcohols grassos són molt utilitzats.
- Antisèptics, que redueixen el creixement bacterià en el remull.

Una vegada la pell està neta i humectada, es passa a l'operació següent.

### *Pelada i calciner*

La pelada i el calciner són dues operacions, però sovint es fan alhora. La pelada consisteix en l'eliminació de l'epidermis i el pèl de la pell, i el calciner en una hidròlisi de proteïnes que produeix un aflluiment de l'estructura fibrosa del col·lagen o, dit en altres paraules, el calciner «buida» la pell. Els productes que es fan servir per depilar són el sulfhidrat i el sulfur sòdic. A causa del seu caràcter reductor, trenquen els ponts de disulfur de la queratina (proteïna del pèl).

Per al calciner es fa servir l'hidròxid càlcic, que trenca els ponts d'hidrogen que hi ha entre les fibres de col·lagen. Acabat aquest procés, es renten les pells a fons i s'efectuen les operacions mecàniques.

### *El descarnatge*

El descarnatge consisteix a netejar la pell de les restes de carn i de greix que hi puguin quedar. Això es fa amb l'ajut d'una màquina que porta un cilindre amb ganivetes incorporades en forma de V. Després, si cal, es passa a la divisió.

### *La divisió*

Si la pell és massa gruixuda per a l'article que s'ha de confeccionar, es passa per una màquina que té una cinta sense fi d'acer esmolada. Aquesta màquina divideix la pell en dos, de tal manera que el cantó de la flor (on hi havia el pèl) queda igualat a un gruix prèviament seleccionat, i separat del cantó de la carn.

Aquest cantó de la carn s'anomena serratge i es pot adobar posteriorment, si té prou gruix, i obtenir-ne articles aptes. En cas contrari, es fa servir per fabricar coles i gelatines.

#### *El desencalcinament*

En aquest punt del procés la pell conté àlcalis en els líquids presents als espais interfibrilars i hidròxid càlcic precipitat entre les fibres de la pell. Ens interessa eliminar-los perquè sinó aquests compostos produirien problemes d'absorció i impedirien un bon adobament posterior. Aquesta eliminació s'efectua amb productes que formen compostos solubles amb els àlcalis, com el sulfat amònic, el bisulfit, l'àcid làctic i l'àcid clorhídric.

Aquests compostos s'eliminen mitjançant rentatges amb aigua, en un procés que s'anomena desencalcinament.

#### *El rendiment*

En el rendiment es busca, amb l'addició d'enzims proteolítics, un afluixament de l'estructura del col·lagen.

Químicament aquest efecte es pot explicar dient que els enzims utilitzats digereixen lleugerament les fibres del col·lagen.

#### *El píquel*

Consisteix en el tractament de les pells amb solucions salines i àcides en el mateix bany. Aquesta operació atura definitivament l'acció dels enzims del rendiment i prepara la pell per a l'adobament. En fer el píquel per adobar en crom, es deixa la pell en un pH d'aproximadament 3,5. Aquesta acidesa inflaria la pell per osmosis i obstaculitzaria l'entrada de productes, però això s'evita amb l'addició prèvia de sal comuna fins que s'obté un bany d'aproximadament 6-7 graus Baumé de densitat (60-70 g/L de sal) .

#### *L'adobament al crom*

En un bombo es tracten les pells que estan aproximadament en un pH de 3,5 procedents del píquel, amb el 20-80 % de bany salí, i del 6 % al 8 % de sals de crom III (sulfat monobàsic de crom III). Després de l'addició inicial de sals de crom, es va augmentant a poc a poc el pH, neutralitzant alhora l'àcid que tenia la pell piquelada i el sulfúric, que es lliura per la hidròlisi de les sals de crom. Així, aquestes es van tornant més bàsiques, augmenten la mida molecular i la reactivitat pel col·lagen, i es produeix el fenomen de l'adobament.

Per augmentar a poc a poc el pH (basificar) es fan servir carbonat sòdic, bicarbonat sòdic, i format sòdic, entre altres. Les quantitats són, aproximadament, del 5 % al 3 %. El pH final per a l'adobament se situa entre 3,8 i 4,0 en la majoria del casos.

Aquesta basificació s'ha de fer a poc a poc a fi de donar temps a les sals de crom més bàsiques perquè puguin entrar fins a la microestructura del col·lagen abans de fer-se insolubles, i evitar així la precipitació en la superfície de la pell, que la tacaria de manera quasi irreversible (taques de crom).

## 1.1 Possible impacte ambiental del crom residual de l'adobament al crom

Com que es tracta d'una reacció química de formació de complexos, sempre està en equilibri i el bany de crom mai no s'esgota totalment, en contacte amb la pell. Però, segons com s'empren les variables ja esmentades, la fixació del crom III en la pell augmenta i alhora disminueix la quantitat de sal de crom III, que queden en el bany residual d'adobament.

## 1.2 Intents de minimitzar l'impacte ambiental dels banys residuals de crom III

Les sals de crom III no són desitjades en les aigües residuals, ni en els fangs de les depuradores, i per això, per ajudar a minimitzar l'impacte ambiental de les sals de crom III residuals en el bany d'adobament residual, s'empren principalment tres mètodes:

- Reciclar el bany residual no esgotat, si és possible per la baixa qualitat de l'article.
- Precipitar el crom III com a hidròxid, filtrar-lo i tornar-lo a dissoldre, ja concentrat.
- Intentar esgotar el crom tant com es pugui, a fi d'emprar amb més èxit la recirculació de banys, ja que no interessa que hi hagi molt crom en contacte amb la pell abans que el píquel hagi disminuït el pH.

Industrialment, en l'adobament tradicional, emprant un bany del 60 % del pes de la pell més el 8 % de sal de crom III, que té un 25 % d'òxid de crom III, treballant a una temperatura de 25-30 °C i acabant a un pH d'aproximadament 3,7-3,9, el bany residual té un contingut de sal de crom de l'ordre de 20 g/L, i tenint en compte l'aigua present a la pell (aproximadament un 80 %), el volum total de bany amb crom és de prop del 150 % del pes de la pell.

En l'adobament d'alt esgotament, emprant un bany del 30 % més un 6 % de sal de crom III, que té un 25 % d'òxid de crom III, treballant fins a una temperatura d'uns 55 °C i acabant en un pH d'aproximadament 5, el bany residual té un contingut de sal de crom d'uns 4 g/L, i el volum del bany residual és només de prop del 120 % del pes de la pell.

Com es pot veure, la reducció de sal de crom III residual és important: es passa del 20 g/L de l'adobament tradicional al 4 g/L en l'adobament d'alt esgotament i, si tenim en compte el volum de bany per cada 100 kg de pell, es llencen 0,48 kg en lloc de 3 kg de sal de crom III.

## 2. Objectiu

En aquesta pràctica, es tracta de constatar que, aplicant la metòdica proposada o ampliant-la fins on l'alumne cregui convenient, l'esgotament del crom és més elevat que emprant una metòdica convencional.

Alhora es farà pràctica d'adobament, d'anàlisi de banys residuals de crom III i, si es vol, de tot un procés humit de fabricació de cuir en crom.

### 3. Material

- Pells piquelades a pH = 3,5

(Cal obtenir-les d'una fàbrica o haver fet abans tot el procés fins a tenir pells en aquest estat, com s'indica en l'annex I.) (Cal tenir present que en aquest estat les pells poden agafar fongs i és millor desar-les en un frigorífic.)

- Bombo per adobar pells

(Amb possibilitat d'escalfar-ne el contingut amb calor afegida des de l'exterior o amb resistències internes degudament protegides. Recordem que el volum útil del bombo (cilindre) ha de ser sis vegades el pes de la pell.)

- Aigua freda (a una temperatura d'aproximadament 20 °C)
- Paper pH universal
- Papers de pH fraccionat entre pH 3,0 i 6
- Solució indicadora de verd de bromocresol
- Solució indicadora universal de pH
- Vasos de precipitats de 100 i 250 mL
- Una bureta amb el seu peu
- Pipeta graduada de 10 mL
- Matràs aforat de 250 mL
- Un embut de vidre
- Paper blanc
- Retolador negre
- Una vareta de vidre
- Balances per pesar amb precisió de 0,1 g.
- Bàscula per poder pesar la pell o les pells
- Sal
- Sulfat de crom III de 33 % de basicitat i 25 % d'òxid de crom =  $\text{Cr}(\text{SO}_4)(\text{OH})$
- (Cromitan de BASF, Cromosal de BAYER, Cromotan de CROMGENIA UNITS, Sintocromo de STOPPANI o contratipus d'altres marques.)
- Carbonat sòdic
- Ortoftalat sòdic (emmascant i ajudant la fixació de crom a la pell)

## 4. Metodologia

### 4.1 Adobament al crom d'alt esgotament

Pells piquelades a pH = 3,5

Tants per cent aplicats al pes de la pell en tripa o pes piquelat + el 35 % del seu pes

Aigua 30 %

Sal (clorur sòdic) . . . . . 8 %

Rodar 30 minuts (fins que la sal es desfaci del tot)

Afegir al bombo les pells piquelades

Rodar 30 minuts

Afegir-hi sal de crom (25 % d'òxid de crom) . . . . . 6 % en pols per la boca del bombo

Rodar 60 minuts

Afegir-hi ortoftalat sòdic . . . . . 1 % en pols per la boca del bombo

Rodar 3-4 hores

(pot passar la nit rodant i parant alternativament)

### 4.2 Basificació progressiva de l'adobament amb crom d'alt esgotament

Preparar una solució de carbonat sòdic al 10 % pes/volum (1mL = 0,1 g de carbonat sòdic)

Mesurar el pH

Agafar 20 mL de bany, posar-los en un vas de precipitats sobre un paper blanc amb ratlles negres i neutralitzar amb una solució al 10 % de carbonat sòdic, afegint-hi de 0,5 en 0,5 mL fins que es comenci a tornar tèrbol (precipitació de sals bàsiques de crom).

Mesurar el pH i calcular la quantitat de carbonat sòdic que es pot afegir al bany d'adobament (no a la suma del bany d'adobament i l'aigua de dins de la pell, eh!), sense que hi hagi cap risc de provocar una precipitació de sal de crom bàsica en el bany (taques a la pell).

Afegir aquesta quantitat de carbonat sòdic dissolt 1/5 i anotar aquesta quantitat de solució afegida al bany, per tenir-la en compte en futurs càlculs.

Rodar dues hores i repetir l'operació si el pH del bany encara se situa per sota de 5-5,1.

Si el pH del bany està molt prop de 5-5,1, cal deixar rodar dues hores més.

Quan ja no es pot afegir més carbonat, ja que els 20 mL de bany precipiten amb les primeres gotes de solució de carbonat, s'ha d'aplicar calor al sistema fins a arribar a una temperatura de 57 °C. Rodar quatre hores més.

Recollir el bany residual d'aquest adobament.

Descarregar les pells.

Apilar-les i deixar-les reposar 24 hores.

(És interessant continuar la fabricació fins a acabar la fase humida, assecar i estovar les pells.) (Vegeu els annexos II i III.)

### Exemple d'un primer càlcul

Suposem que treballem amb 20 kg de pell en tripa, així el 30 % de bany és de 6 litres.

Traiem 20 mL de bany i gastem, per valorar fins a la precipitació, 4 mL de solució de carbonat sòdic al 10 % (equivalents a 0,4 g de carbonat sòdic).

Aquests 0,4 g de carbonat sòdic han estat necessaris per basificar 20 mL de bany; així doncs, per basificar 6.000 mL de bany, es necessitaran  $(0,4/20) \cdot 6.000 = 120$  g, que equivalen a un 0,6 % de carbonat sòdic, sobre el pes de la pell.

## 4.3 Adobament al crom tradicional

Pells piquelades a pH = 3,5

Tants per cent aplicats al pes de la pell en tripa o pes piquelat + un 35 % del seu pes

Aigua 60 %

Sal (clorur sòdic) . . . . . 9 %

Rodar 30 minuts (fins que la sal es desfaci del tot)

Afegir al bombo les pells piquelades

Rodar 30 minuts

Afegir-hi sal de crom (25 % d'òxid de crom) . . . . . 8 % en pols per la boca del bombo

Rodar 60 minuts

Afegir-hi ortoftalat sòdic . . . . . 1 % en pols per la boca del bombo

Rodar 2 hores

Afegir-hi a poc a poc carbonat sòdic dissolt . . . . . 1,5 %

Rodar 6 hores i a la nit, rodant i parant

L'endemà s'ha de fer el control de pH = 3,6-3,8

(Si el pH és més baix, s'hi afegixen petites quantitats de carbonat sòdic (0,2-0,3 %) i es fa rodar el bombo 1-2 hores fins que el pH s'estabilitza en els valors indicats.)

Un cop assolits els pH indicats, s'apilen les pells i es deixen reposar 24 hores.

Recollir també el bany residual d'aquest adobament.

(És interessant continuar la fabricació fins a acabar la fase humida, assecar i estovar les pells.) (Vegeu els annexos II i III.)

## 5. Anàlisi dels banys residuals

### 5.1 Material

- Campana d'extracció de gasos
- Aigua freda corrent (a una temperatura d'uns 20 °C)
- Armari o un lloc fosc on poder deixar un matràs d'Erlenmeyer
- Matrassos d'Erlenmeyer de 252/500 mL, amb tap de tefló o esmerilat
- Proveta de 50 mL i una altra de 100 mL
- Calefactor elèctric per a matrassos d'Erlenmeyer
- Guants aïllants o pinces per agafar matrassos d'Erlenmeyer calents

- Termòmetre de 0-100 °C
- Boles de vidre per regular l'ebullició
- Vasos de precipitats de 500-1.000 mL
- Una bureta amb el seu peu
- Pipeta graduada de 10 mL
- Una vareta de vidre
- Una espàtula
- Aigua desionitzada o destil·lada
- Àcid nítric concentrat reactiu per a anàlisi
- Àcid sulfúric concentrat reactiu per a anàlisi
- Àcid perclòric del 60 % reactiu per a anàlisi
- Solució de tiosulfat 0,1 Normal
- Iodur potàssic reactiu per a anàlisi
- Midó soluble / solució a l'1 %

## 5.2 Fonament del mètode d'anàlisi del crom III en els banys residuals

El mètode es basa a oxidar el crom III a crom VI amb l'ajuda de l'àcid perclòric i, després d'eliminar l'excés d'aquest àcid, fer reaccionar el crom VI amb iodur potàssic, i valorar el iode resultant amb tiosulfat.

## 5.3 Mètode d'anàlisi del crom III contingut en els banys residuals

Introduir exactament 10 mL de bany residual en un matràs d'Erlenmeyer de 250 o 500 mL.

Afegir 30 mL d'àcid nítric concentrat i agitar manualment per barrejar amb el bany residual.

Afegir 10 mL d'àcid sulfúric concentrat i agitar manualment per barrejar-ho tot.

Afegir 30 mL d'àcid perclòric concentrat i agitar manualment per barrejar-ho tot.

Posar a escalfar aquest matràs d'Erlenmeyer a poc a poc, i portar-lo a ebullició, dins la campana d'extracció de gasos, fins que el color verd es torni taronja-vermell (el crom III => crom VI).

Deixar que continuï l'ebullició durant un minut, no més, i treure el matràs d'Erlenmeyer del calefactor i refredar ràpidament el contingut del matràs amb aigua corrent o posant-lo dins un vas de precipitats de 500-1.000 mL mig ple d'aigua freda. L'operació s'ha de repetir fins que la temperatura del líquid del matràs d'Erlenmeyer sigui d'aproximadament 25 °C.

Afegir 3 boletes de vidre i 100-20 mL d'aigua desionitzada o destil·lada i fer bullir de nou el contingut del matràs d'Erlenmeyer durant 10-15 minuts (eliminació de restes d'àcid perclòric).

Refredar de nou el matràs d'Erlenmeyer i, un cop fred, afegir-hi 1 g de iodur potàssic; tapar el matràs i deixar-lo a les fosques durant 10 minuts (el iodur potàssic passa a iode, i el crom VI passa a crom III).



Valorar el iode format amb solució de tiosulfat 0,1 N, prèviament col·locada a la bureta. Al final, afegir-hi 1-2 mL de solució de midó a l'1 % per veure millor el punt final (de blau-violeta fosc a verd clar).

## 6. Càlculs

Casualment, emprant 10 mL de solució de bany residual com s'ha indicat, el nombre de mL de solució de tiosulfat 0,1 N gastats és pràcticament igual al nombre de g/L de sal de crom presents en el bany residual, ja que:

Si anomenem a els mL de tiosulfat 0,1 N gastats en la valoració, tenim:

$$a \text{ mL} \times \frac{0,1 \text{ equivalents}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ mol de Cr}_2\text{O}_3}{6 \text{ equivalents}} \times \frac{152 \text{ g de Cr}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol de Cr}_2\text{O}_3} \times \frac{100 \text{ g de sal de crom}}{25 \text{ g de Cr}_2\text{O}_3} \times \frac{1.000 \text{ mL / L de bany}}{10 \text{ mL de mostra}} = a \times 1,01 \text{ g/L de sal de crom en el bany residual}$$

## 7. Qüestions

1. Abans de fer l'anàlisi del crom en els banys residuals, ¿s'aprecia qualitativament la diferència de crom entre els dos banys observant la intensitat del color verd gris? Si és o no és així, què podem pensar?
2. Un cop feta l'anàlisi, es correspon l'aspecte dels banys amb els resultats obtinguts? Si és o no és així, què podem pensar?
3. El color de les pells adobades al crom, és una mica diferent segons l'adobament emprat? El color de les pells, sembla tenir alguna relació amb el color i l'esgotament dels banys de crom? (Recordem que si la pell està més basificada –l'adobament s'ha acabat a un pH més alt– normalment és més verda.)
4. Si hem treballat les pells fins a obtenir-les tenyides i seques, i tenint en compte que les hem tenyit juntes, ¿és igual el color de les dues o hi ha petites diferències? Què ens pot fer pensar això?

## ANNEX I - METÒDICA SENZILLA PER OBTENIR LA PELL PIQUELADA

### 1. Maquinària i material

- Bombo igual que l'emprat per adobar les pells (vegeu les figures 1 i 2)
- Màquina de descarnar (vegeu la figura 3)
- Màquina de dividir (vegeu la figura 4)
- Ganivet o cúter
- Pell vacuna salada

- Solució alcohòlica de fenolftaleïna a l'1 % (indicador de pH)
- Solució de verd de bromocresol (indicador de pH)
- Solució indicadora universal de pH
- Paper pH universal
- Aigua
- Tensioactiu
- Bactericida
- Calç = hidròxid càlcic
- Sulfhidrat sòdic
- Sulfur sòdic
- Àcid acètic
- Enzim pancreàtic de 1.200 unitats LV (Rindecalin –Curtex–, Tripsol –Cromogenia–, Aduzime –Curtin– o similars)
- Sal comuna = clorur sòdic
- Àcid fòrmic
- Amoníac
- Fungicida

## **2. Formulació que detalla la mètdica que s'ha de seguir per piquelar pells**

### 2.1 Matèria primera

Pell de vaca salada

Pesar i aplicar el tant per cent al pes salat obtingut

Carregar pells al bombo

### 2.2 Remull

200 % aigua a 20 °C . . . . . repòs de 20 minuts

Rodar intermitentment durant 2 hores

Buidar bany

200 % aigua a 23 °C

1 % tensioactiu . . . . . rodar 20 minuts

0,2 % bactericida . . . . . rodar 20 minuts

Repòs nit . . . . . rodar 10 minuts cada 2 hores

Buidar bany

## 2.3 Pelada i calciner

100 % aigua a 25 °C  
1 % hidròxid càlcic . . . . . rodar 30 minuts  
0,5 % sulfhidrat sòdic . . . . . rodar 30 minuts  
1,0 % sulfur sòdic . . . . . rodar 30 minuts  
100 % aigua a 25 °C  
2 % sulfur sòdic  
2 % hidròxid càlcic . . . . . rodar 30 minuts  
Reposar nit . . . . . rodar 5 minuts cada 2 hores  
Buidar bany  
200 % aigua . . . . . rodar 20 minuts  
Descarregar les pells sempre amb guants  
Descarnar (vegeu la figura 3)  
Dividir a 3-3,5 mm (vegeu la figura 4)  
Desencalcinament i rendiment  
Tornar a carregar les pells al bombo.

(El serratge que ha sobrat després de dividir, un cop retallat de les vores més primes, es pot afegir a les pells.)

200 % aigua a 30 °C . . . . . rodar 20 minuts  
Buidar bany  
200 % aigua a 35 °C . . . . . rodar 20 minuts  
Buidar bany  
100 % aigua a 35 °C  
2-3 % àcid acètic afegit, diluït 1/5 . . . . . en 3 cops de 5 minuts  
Rodar 60 minuts fins que el desencalcinament sigui total, pH interior 8-8,2  
(Controlar un tall de la pell que ja no marca color rosa amb la fenolftaleïna => pH = 8-8,2)  
0,75 % enzim pancreàtic . . . . . rodar 30-45 minuts  
Buidar bany  
Control pH bany i tall de la pell pH = 7,5-8  
200 % aigua a 25 °C . . . . . rodar 20 minuts  
Buidar bany

## 2.4 Píquel

80 % aigua a 20 °C  
12 % sal (fins a 6-8 °Bé) . . . . . rodar 15 minuts  
3 % àcid fòrmic diluït 1/5 i afegit en 3 cops, cada 15 minuts  
Rodar 3-4 hores  
Control bany i tall travessat a pH = 3,5  
(Si el pH és més alt, s'hi ha d'afegir àcid fòrmic; si és més baix, s'hi ha d'afegir una mica d'amoni-  
ac.)  
0,1-02 % fungicida . . . . . rodar 30 minuts  
Buidar bany, apilar i desar les pells i el serratge per començar a fer l'adobament al crom.

## **ANNEX II - INTRODUCCIÓ TEÒRICA AL PROCÉS DE POSTADOBAMENT DE LA PELL**

### **1. Rebaixatge del cuir**

Per poder fer aquesta operació, prèviament cal escórrer la pell. L'escorreguda consisteix a fer passar el cuir entre dos cilindres envoltats de feltre que premen la pell i provoquen la sortida del bany residual d'adobament d'entre les fibres.

El rebaixatge és una operació que fa passar la pell entre dos cilindres metàl·lics, un dels quals és llis i l'altre té ganivetes en forma de V, que tallen el cuir i en fan encenalls. Aquesta operació permet regular i igualar la diferència de gruix del mateix cuir, i també d'un cuir a un altre.

La distància entre els dos cilindres és graduable i això permet obtenir cuir de diferent gruix final segons la graduació en què fem treballar la màquina.

### **2. La neutralització de pells al crom**

En la majoria dels casos, l'operació posterior al rebaixatge és la neutralització, en què es busca l'eliminació de rebaixadures, sals i sal de crom no fixada, i també dels àcids forts que conté el cuir, o bé canviar-los per àcids orgànics. Aquesta eliminació o substitució dels àcids forts és importantíssima, ja que, a la llarga, aquests perjudiquen notablement la resistència de les fibres del cuir.

Aquesta operació comença amb un rentatge previ dels cuirs amb aigua. Sovint aquesta aigua s'acidula amb un àcid feble, com el fòrmic o l'acètic, fins a  $\text{pH} = 4$ .

Després del rentatge es fa la neutralització pròpiament dita, que consisteix en un tractament al bombo dels cuirs amb aigua i sals alcalines. Les més utilitzades són el bicarbonat sòdic o amònic i el formiat sòdic o càlcic.

### **3. El readobament de la pell al crom**

En aquesta operació s'introdueixen diferents substàncies dins el cuir ja adobat. Aquestes substàncies acostumen a tenir caràcter adobant per si mateixes, però el que es busca és modificar certes propietats del cuir d'acord amb l'article que es vulgui aconseguir. Exemples d'aquestes propietats són el tacte, el farciment, la fermesa, la capacitat de tenyiment, la resistència a la suor, etc.

Els productes readobants més usuals en cuirs adobats al crom són els següents:

- Sals de crom de diferent basicitat i/o emmascarades. Amb aquest readobament es busca normalment aconseguir cuirs tous, de flor llisa i gra fi.
- Sals d'alumini basificades. Són normalment sulfats o clorurs d'alumini en diferents graus de basificació.

Amb aquest readobament es busca sovint millorar propietats com la plenitud, la solidesa en les tintures i la capacitat d'esmerilament.

- Extractes vegetals. Provoquen, entre altres coses, un augment de la plenitud del cuir, fet que permet millorar els cuirs d'estructura buida. També modifiquen altres propietats, com la capacitat d'esmerilament, el tacte, el color i la finesa de flor, entre d'altres.
- Sintètics. Són compostos de base fenòlica o naftalensulfònica, de comportament semblant als extractes vegetals; a vegades es fan servir combinats amb aquests.
- Aldehids. Els més emprats són el formaldehid i el glutaraldehid, encara que avui en dia se substitueixen a vegades per productes que són altres aldehids modificats.

Amb aquests productes es busca sobretot obtenir cuirs molt tous.

- Resines. Potser les més emprades són les acríliques i les d'urea-formol.

Amb aquests productes es busca fonamentalment omplir les parts més buides del cuir, sovint les faltes, per tal d'uniformitzar-lo.

#### 4. La tintura

Aquesta operació serveix per donar color al cuir. Les tintures es fan al bombo. A més del colorant, i juntament amb aquest o prèviament a aquest, s'afegeix al bombo una sèrie de productes que regulen el pH i la càrrega del cuir per facilitar la penetració i la distribució correcta del colorant en el cuir. La fixació es fa en aquest bany, afegint-hi un producte àcid, normalment àcid fòrmic.

#### 5. El greixatge

En aquesta operació es lubrifiquen les fibres del cuir per tal d'obtenir un cuir que presenti una flexibilitat i un tacte adequats en assecar-lo.

Els productes emprats en aquesta operació són greixos emulsionables en aigua. L'operació de greixatge es fa al bombo i els greixos s'addicionen amb l'emulsió prèvia amb aigua calenta. El bany de greixatge es fa amb aigua una mica calenta per tal d'evitar el trencament prematur de les emulsions dels greixos, els quals quedarien dipositats sobre el cuir o al bany i no complirien la seva missió.

La majoria dels greixos són productes aniònics (sulfitats, sulfonats, sulfoclorats, parafines sulfoclorades, etc.).

Una vegada s'ha fet rodar el bombo el temps suficient perquè els greixos hagin passat del bany al cuir, s'acaba d'esgotar el bany acidificant amb àcid fòrmic, la qual cosa afavoreix la fixació dels greixos al cuir, i també del colorant si el greixatge i la tintura es fan conjuntament.

Després del greixatge es deixen els cuirs en repòs com a mínim una nit, ben estirats sobre un cavallet o una paleta, per tal que s'escorri una mica i augmenti la fixació de colorants i greixos.

## 6. L'escorreguda i la repassada

Per escórrer, es fan passar els cuirs per una màquina que té dos cilindres recoberts de feltre. En passar entre els cilindres, el cuir expulsa part de l'aigua que té a causa de la pressió a què se sotmet.

Per repassar, la pell es passa per un cilindre amb ganivetes en forma de V que no tallen i que permeten estendre i afinar la flor del cuir. Sovint la mateixa màquina fa les dues operacions alhora.

## 7. L'assecatge

La finalitat d'aquesta operació és evaporar l'aigua que contenen els cuirs. Aquesta operació influeix sobre les característiques del cuir acabat. Segons el tipus d'adobament i el producte final desitjat, el sistema d'assecatge serà un o altre.

Hi ha diversos sistemes d'assecatge:

- A l'aire lliure. Els cuirs es penjen i s'assequen per l'acció de l'aire.
- En una cambra i en un túnel. Els cuirs també es penjen i s'assequen per acció de l'aire calent.
- Per bomba de calor. Els cuirs es penjen i s'assequen amb aire a baixa temperatura i força sec.
- El buit. La pell s'estén i s'estira sobre una placa horitzontal calenta. Es fa baixar una altra placa que tanca de manera hermètica i després es provoca una forta baixada de pressió.

## 8. L'estovament

El cuir s'estova mitjançant una acció mecànica, a la màquina d'estovar, per flexibilitzar-lo.

En aquest estat, ja es pot valorar si el cuir té la majoria de qualitats que interessa que tingui: tou, flor fina, resistències físiques suficients, bondat de la tintura, etc.

## ANNEX III - METODOLOGIA SENZILLA PER OBTENIR LA PELL TENYIDA I SECA

### 1. Maquinària i material

- Bombo igual que l'emprat per adobar les pells (vegeu foto)
- Màquina d'escórrer (vegeu les figures 1 i 2)
- Màquina de rebaixar (vegeu la figura 5)
- Màquina d'escórrer i repassar (vegeu la figura 6)
- Màquina d'assecar al buit (vegeu la figura 7)
- Màquina d'assecar al fred (vegeu la figura 8)

- Màquina d'assecar amb pinces (vegeu la figura 9)
- Màquina d'estovar (vegeu la figura 10)
- Ganivet o cúter
- Pell vacuna adobada al crom
- Solució de verd de bromocresol (indicador de pH)
- Solució inidicadora universal de pH
- Paper pH universal
- Aigua
- Tensioactiu
- Àcid acètic
- Formiat sòdic
- Bicarbonat sòdic
- Dispersant: Retanal HD de Cromogenia, Sellazol TN de TFL, Trupotan TD de Trumpler Tanor NDP de Sttopanni o contractipus d'altres empreses químiques.

Extracte vegetal de quebratxo additivat: Trupotan AG de Trumpler, extracte de quebratxo de Forestal Tanica, etc.

- Sintètic de substitució: Basyntan D de BASF-Curtrex, Trupotan H de Trumpler, etc.
- Colorant : àcid brown 75 o altre, de Clariant, Trumpler, TFL, colorants industrials, etc.
- Triglicèrid sulfonat i additivat: Trupon K III de Trumpler, Coripol EXK de TFL, Aduvax BN de Curtin, etc.
- Àcid fòrmic
- Fungicida

## **2. Formulació que retalla la metòdica que s'ha de seguir per neutralitzar, readobar, tenyir, greixar i assecar pells adobades al crom**

Escórrer i rebaixar a 1.5 mm les pells adobades amb crom i reposades (a màquina).

### 2.1 Rehumectació

Carregar al bombo les pells adobades en crom i rebaixades.

250 % aigua a 30 °C

0,3 % àcid acètic (diluit 1:5)

0,3 % tensioactiu no iònic ..... rodar 1 hora

Escórrer el bany

## 2.2 Neutralització

150 % aigua a 35 °C

1 % formiat sòdic ..... rodar 10 minuts

0,5 % bicarbonat sòdic ..... rodar 1 hora

Control ..... pH i tall a valors d'aproximadament 5-5,5

Escórrer el bany

## 2.3 Readobament, tintura i greixatge

50 % aigua a 35 °C

1 % dispersant en pols

2 % colorant en pols

5 % sintètic de substitució

5 % extracte de quebratxo ..... rodar 1 hora

150 % aigua a 60 °C ..... rodar 20 minuts

6 % triglicèrid sulfonat additivat, emulsionat ..... rodar 45 minuts

1 % àcid fòrmic diluït 1/5 ..... rodar 30 minuts

Escórrer i rentar

Descarregar les pells i apilar-les

Reposar 24 hores

Escórrer i repassar a màquina

Assecar en el buit + aire o només a l'aire

Estovar a màquina



### 3. Figures



**Figura 1.** Bombos de laboratori



**Figura 4.** Màquina de dividir



**Figura 2.** Bombo planta pilot



**Figura 5.** Màquina de rebaixar



**Figura 3.** Màquina de descarnar



**Figura 6.** Màquina d'escórrer i de repassar alhora



**Figura 7.** Assecador emprant el buit



**Figura 9.** Assecador de pines



**Figura 8.** Assecador de bomba de calor o només amb aire ambient (si no es posa en marxa, la bomba de calor només fa passar l'aire ambient).



**Figura 10.** Maquina d'estovar

## Capítol 2

# Determinació de la DQO pel mètode de reflux tancat

JOAQUIM FONT

Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial d'Igualada  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

La demanda química d'oxigen (DQO) al dicromat és el mètode més utilitzat per avaluar la càrrega orgànica d'una aigua residual. Forma part de la normativa sobre aigües residuals de la major part de països, inclosos els del nostre entorn.

La DQO mesura la quantitat d'oxigen equivalent al dicromat potàssic consumit en oxidar en medi àcid i en calent una mostra d'aigua residual. La determinació de la DQO està plenament normalitzada, de manera que els diferents laboratoris d'arreu del món que l'apliquen utilitzen els mateixos reactius i la mateixa duració. Per exemple, a l'Estat espanyol s'aplica la norma UNE 77004:1989.

Segons el sistema de digestió, existeixen dos procediments per a la determinació de la DQO:

- mètode a reflux obert
- mètode a reflux tancat

Els reactius que utilitzen els dos mètodes són els mateixos i es troben en la mateixa proporció relativa entre ells, però el mètode a reflux tancat treballa a una escala reduïda (microescala), amb un consum sis vegades menor de reactius. A aquesta reducció, s'hi afegeix el fet que per les pròpies característiques del procediment espectrofotomètric de mesura no és imprescindible preparar una digestió de referència (un blanc) per a cada mostra que s'ha d'analitzar, cosa que sí que cal fer en el mètode a reflux obert.



**Figura 1.** Digestió de mostres segons el mètode tradicional de determinació de la DQO a reflux obert. El baló de la dreta conté la solució de la mostra, i el de l'esquerra és la solució de referència, que es coneix com a «blanc». El color del «blanc», que conserva el taronja original del dicromat, contrasta amb el verd de la solució de la mostra, a causa de la reducció del dicromat a crom trivalent.

En conjunt, l'aplicació del mètode de reflux tancat implica un estalvi de més del 90 % dels reactius consumits en el mètode a reflux obert. A més, la refrigeració dels tubs s'efectua per aire, amb la qual cosa s'estalvia l'aigua que es consumiria durant dues hores en els refrigerants de serpenti utilitzats en el sistema de reflux obert.

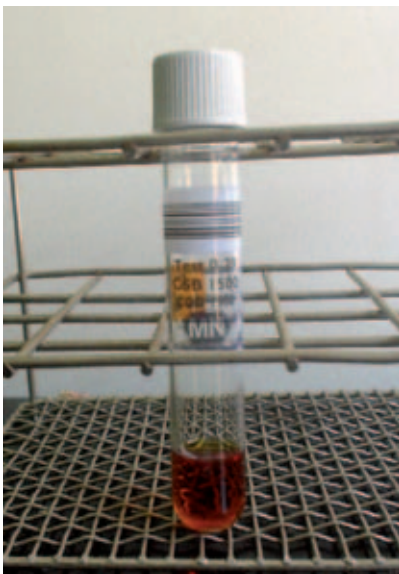
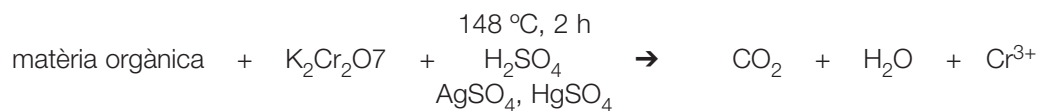
Els tubs usats es poden lliurar al subministrador de reactius perquè els recicli o, millor encara, es poden reomplir en el mateix laboratori amb els reactius adequats, per poder-los reutilitzar successives vegades per a noves determinacions de la DQO.

## 2. Objectiu

Mesurar la DQO d'una mostra d'aigua residual. Comparar el valor de la DQO amb el de la mateixa aigua deixada decantar dues hores.

## 3. Fonaments

Consisteix a oxidar els components orgànics continguts en l'aigua amb un excés de dicromat potàssic, en medi àcid, i en presència de sulfat de plata i sulfat de mercuri.<sup>[2] i [3]</sup>



**Figura 2.** Tub de vidre de 16 mm de diàmetre exterior, amb tap de rosca i junta de tefló, que contenen els reactius de la DQO.

L'oxidació es fa a reflux tancat en tubs de vidre amb tap de rosca i junta de tefló. D'aquesta manera els compostos orgànics volàtils són completament oxidats.

Els tubs de vidre contenen els reactius necessaris per a la determinació de la DQO a l'escala de treball 100-1.500 ppm de O<sub>2</sub>. Després de dues hores de digestió a 148 °C, els tubs es deixen refredar i la DQO es determina per colorimetria mesurant a 600 nm l'absorbància originada pel crom(III) format en la reacció.

L'absorbància a 600 nm és directament proporcional a la DQO de la mostra.

Per a valors de DQO inferiors a 100 ppm de O<sub>2</sub>, s'ha de treballar en una escala diferent, que usa els reactius més diluïts, la qual no està descrita en aquesta pràctica però es pot consultar en la bibliografia.<sup>2,3</sup> Per a valors superiors, cal diluir les mostres.

## 4. Metodologia

### 4.1 Tractament de mostra

Es parteix d'uns 500 mL d'aigua residual, que hauria de tenir menys de 1.200 mg/L de clorurs, i una DQO inferior als 1.500 mg/L de O<sub>2</sub>. En cas de superar aquests valors, cal fer una dilució prèvia. Una manera ràpida de verificar que la concentració de Cl<sup>-</sup> no arriba als 1.200 ppm, i per tant que no interferirà en la determinació de la DQO, és mesurar la conductivitat i comprovar que no supera els 4.500 µS/cm.

Es faran dos tractaments diferents en la mateixa mostra:

- mostra decantada dues hores
- mostra sense decantar

#### *Mostra decantada dues hores*

Es mescla bé l'aigua i es transfereix una fracció d'aproximadament la meitat del seu volum a un got estret i alt de 250 mL. Es tapa amb vidre de rellotge. Es deixa reposar sense cap moviment durant dues hores, deixant que decantin els sediments de l'aigua. Passat aquest temps, s'agafa una mostra de la part clarificada superior.

#### *Mostra sense decantar*

S'agafa directament de la meitat de mostra restant, just després d'homogeneïtzar-la bé.

### 4.2 Reactius

- Tubs comercials ja preparats Nanocolor CSB 1500 de Macherey Nagel (ref. 985-029).
- Bifalal potàssic, qualitat EQP de Panreac, referència 241481.
- Aigua ultrapura (Milli Q de Millipore o similar).
- Solució stock de bifalal potàssic de 2.000 ppm de O<sub>2</sub>.: bifalal potàssic C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>COOHCOOK (assecat 1 hora a 103 °C), 1.7020 g, H<sub>2</sub>O ultrapura, que cal enrasar a 1.000 mL (es guardarà en un matràs i es conservarà en un frigorífic).

### 4.3 Material necessari

- Material habitual al laboratori.
- Pipeta d'èmbol de 5 mL.
- Digestor regulable a 148 °C amb capacitat per a tubs de vidre pyrex de 16 cm de diàmetre. Es pot substituir per un bany de sorra termostatitzat.
- Colorímetre o espectrofotòmetre visible, preferentment amb capacitat per a emmagatzematge de corbes de calibratge. Es poden usar cubetes d'1 cm, de vidre òptic o de plàstic d'un sol ús.

#### 4.4 Calibratge

Prepareu les quatre solucions patró i el blanc tal com es descriu en la taula següent.

Taula 1 – Recta de calibratge

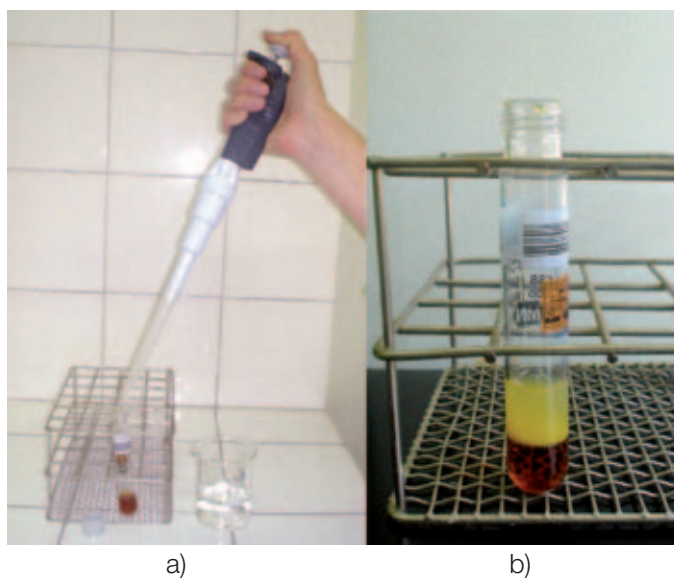
DQO (ppm O <sub>2</sub> )	mL de solució stock de biftalat 2.000 ppm O <sub>2</sub>
0 ppm O <sub>2</sub>	Aigua ultrapura
100 ppm O <sub>2</sub>	5 mL en matràs de 100 mL
400 ppm O <sub>2</sub>	20 mL en matràs de 100 mL
800 ppm O <sub>2</sub>	40 mL en matràs de 100 mL
1.200 ppm O <sub>2</sub>	60 mL en matràs de 100 mL

Preneu totes les mesures necessàries per evitar la contaminació amb matèries orgàniques que provenen del material de vidre, de pols, o de l'aire.

En un tub Nanocolor CSB 1500, afegiu amb precaució 2 mL de solució patró, mesurats amb pipeta d'èmbol de 5 mL (que prèviament haureu regulat i calibrat al volum desitjat), de manera que formi una capa superior sense barrejar-se amb la capa inferior dels reactius (vegeu la figura 3).

Precaució: Els tubs contenen àcid sulfúric concentrat i substàncies tòxiques, com ara dicromat potàssic i sulfat de mercuri.

Tapeu el tub amb cura. Amb precaució, el remeneu per homogeneïtzar. El contingut del tub s'escalfa a causa del procés de dilució de l'àcid sulfúric, que és molt exotèrmic. Identifiqueu cada tub, escrivint al tap el número de solució patró que li correspon.



**Figura 3.** a) Addició amb pipeta d'èmbol dels 2 mL de solució patró. b) La capa superior correspon als 2 mL de solució patró i la inferior, als reactius.



Col·loqueu el tub dins del bloc digestor (figura 4) i programeu una digestió de dues hores a 148 °C.

Transcorregudes les dues hores, retireu els tubs del digestor. Remeneu per homogeneïtzar el contingut i deixeu refredar. Transferiu la mostra digerida a una cubeta i mesureu l'absorbància a 600 nm, usant aigua ultrapura com a referència. Consulteu el PNT corresponent per qualsevol dubte sobre el funcionament de l'espectrofotòmetre (figura 5).



Figura 4. Aparell digestor

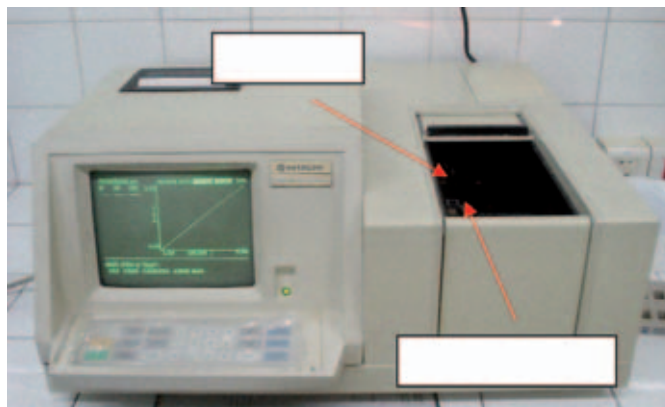


Figura 5. Espectrofotòmetre

Construïu la recta de calibratge representant l'absorbància a 600 nm en funció de la DQO.

#### 4.5 Determinació de la DQO

Per la mostra decantada (DQO dec) i per la mostra sense decantar (DQO nd):

En un tub Nanocolor CSB 1500, afegiu amb precaució 2 mL de mostra mesurats amb pipeta d'èmbol de 5 mL (que prèviament haureu regulat i calibrat al volum desitjat), de manera que formi una capa superior sense barrejar-se amb la capa inferior de catalitzador.

Tapeu el tub amb cura. Amb precaució, el remeneu per homogeneïtzar. El contingut del tub s'escalfa a causa del procés exotèrmic de dilució de l'àcid sulfúric. Col·loqueu el tub, marcat adequadament, dins del bloc digestor i programeu una digestió de dues hores a 148 °C.

Transcorregudes les dues hores, retireu els tubs del digestor. Deixeu refredar i remeneu per homogeneïtzar el contingut. Transferiu la solució a una cubeta i mesureu l'absorbància a 600 nm, usant aigua ultrapura com a referència. Interpoleu en la recta de calibratge determinada en l'apartat 4 i calculeu el valor de la DQO de l'aigua analitzada.

### 5. Càlculs

La interpolació en la recta de calibratge dóna directament el resultat de la DQO en ppm de O<sub>2</sub>, excepte quan heu fet una dilució prèvia de la mostra. En aquest cas, haureu d'aplicar els càlculs corresponents segons la dilució feta.

## 6. Qüestions

- a) Quina de les dues mostres, la decantada o la no decantada, fa servir l'Agència Catalana de l'Aigua per calcular el cànon de l'aigua? Consultar la referència 4 et pot ajudar.
- b) Quin és el límit màxim de DQO autoritzat en un abocament a la xarxa pública de clavegueram del teu municipi? Compliria l'aigua analitzada aquesta normativa? Hauràs de consultar l'ordenança corresponent.
- c) Pensa en possibles interferències o problemàtiques que poden limitar o impedir l'aplicació d'aquest procediment analític.
- d) Quines conclusions es poden deduir de les diferències observades entre els valors de la DQO dec i de la DQO nd?

## 7. Observacions

Els tubs usats es poden lliurar al subministrador de reactius perquè els recicli o es poden reomplir en el mateix laboratori amb els reactius adequats, per poder-los reutilitzar successives vegades per a noves determinacions de la DQO.

A continuació es descriu breument el procediment per a la preparació dels tubs.

Transferiu el contingut dels tubs usats al recipient de recollida selectiva corresponent. Netegeu bé els tubs i els taps amb aigua desionitzada i ultrapura. Generalment no cal sabó. Deixeu-los assecar.

Prepareu els dos reactius següents:

- Solució sulfúrica de sulfat de plata: afegir 2,36 g de  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  cristal·litzat a 10 mL d'aigua ultrapura. Afegir amb precaució i per porcions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (96 %) fins a 200 mL. Remenar i deixar reposar 1-2 dies. Es guardarà en una botella de color topazi.

- Solució de dicromat potàssic:

$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (assecat 2 hores a 103 °C). 2.391 g (*Qualitat PA, Panreac, ref.: 131500*)

$\text{H}_2\text{SO}_4$  96 % (d = 1,84) 50 mL (*Qualitat PA, Panreac, ref.: 131058*)

$\text{HgSO}_4$ . 3,75 g (*Qualitat PA, Panreac, ref.: 142166*)

$\text{H}_2\text{O}$  ultrapura, que cal enrasar a 100 mL

Es desarà en el matràs i es conservarà en el frigorífic.

Transferiu a cada tub 1 mL de solució de dicromat potàssic mesurat amb pipeta d'èmbol d'1 mL recentment calibrada.

Afegiu a cada tub 2,30 mL de solució sulfúrica de sulfat de plata amb pipeta d'èmbol de 5 mL recentment calibrada. Es remena la solució i es deixa refredar. Si s'ha de guardar el tub amb els reactius a dins per a futures sessions de pràctiques, a part d'assegurar-se que el tub està ben tancat amb el tap roscat, és aconsellable posar-lo en un lloc fosc.

Aquests tubs estan preparats per usar-se per a la determinació de la DQO, seguint el procediment descrit en l'apartat 5. No obstant això, la recta de calibratge determinada amb els tubs nous Nanocolor que contenen els reactius amb les concentracions originals no és vàlida per als tubs reciclats i preparats en el mateix laboratori. Cal fer un nou calibratge, seguint les directrius de l'apartat 4.



Els tubs es poden reutilitzar de manera indefinida, fins que el tap i/o la junta de tefló no mostrin senyals de deteriorament.

## **8. Bibliografia**

[1] Norma UNE 77004:1989. Vegeu <http://www.aenor.es>.

[2] Norma ASTM D 1252 – 00. Accessible a <http://biblioteca.upc.es/>.

[3] CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E.; EATON, A. D. (ed.). Standard Methods for the examination of water & wastewater. 20th Edition. Secció 5-17/5-19. Mètode 5220 D. American Public Health Association. 1998.

[4] Annex I del DOGC núm. 3097, de 13-03-2000.



## Capítol 3

# Recuperació de crom: filtre de premsa

ROSA GUADROS, JOAQUIM FONT I JOANA LALUEZA  
Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial d'Igualada (EUETII)  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

El crom és un dels contaminants presents a les aigües residuals d'adoberia i un dels que suposa una preocupació més gran per part de l'Administració que s'encarrega de la protecció del medi ambient. Tot i que en el procés d'adobament de la pell el crom s'utilitza en la forma trivalent, molt menys tòxica que la forma hexavalent, els seus límits d'abocament són baixos, d'aproximadament 1-2 mg/L.

Per arribar a aquests límits, la indústria del sector adober a la ciutat d'Igualada recull els banys residuals d'adobament i, en una planta industrial de recuperació, mitjançant un tractament fisicoquímic de precipitació i redissolució, redueix el nivell de crom present a les aigües residuals i permet reaprofitar el crom per a nous processos d'adobament.

Aquest tractament presenta millores ambientals importants, ja que elimina càrrega contaminant a l'entrada de l'EDAR, en facilita el funcionament i aconsegueix un reaprofitament del producte.

### 2. Objectiu

En aquesta pràctica es vol reduir el crom trivalent present a les aigües residuals d'adoberia, tal com es fa en el procés industrial.

Per aconseguir-ho, es precipita el bany residual de crom, se separa el precipitat mitjançant un filtre de premsa i es valora l'eficàcia de la separació.

### 3. Fonament teòric

El procés de recuperació de crom es basa en la seva precipitació com a hidròxid mitjançant l'addició d'hidròxid sòdic, la separació de l'hidròxid format per mitjà de filtració i la redissolució de l'hidròxid per addició d'àcid sulfúric; d'aquesta manera, es forma el sulfat bàsic de crom que s'utilitzarà a les indústries.

En l'etapa de filtració s'utilitza un filtre de premsa del qual s'obtenen, per l'acció de les teles filtrants, dues fraccions ben diferenciades. D'una banda, quedaran a les càmeres de les plaques filtrants tots els sòlids suspesos, que donaran lloc a una mostra sòlida d'hidròxid de crom, mentre que, d'altra banda, la fase líquida passarà a través de les teles.

### 4. Material

- Filtre de premsa EFP-250-5-6 bar (figura 1)
- Manta calefactora
- Balança analítica
- Estufa
- Matrassos d'Erlenmeyer de 500 mL de boca ampla
- Embuts de vidre
- Matràs aforat de 100 mL
- Pipetes aforades de 10 i 25 mL
- Bureta de 25 mL
- Proveta de 100 mL
- Boles de vidre

### 5. Reactius

- Àcid nítric 60 % PA
- Àcid perclòric 70 % PA
- Àcid sulfúric 98 % PA
- Iodur potàssic PA
- Tiosulfat sòdic 0,1N SV
- Solució de midó al 0,4 %



Figura 1. Filtre de premsa

## 6. Procediment

### 6.1 Procés de filtració

En primer lloc, s'inicia el procés de tancament del filtre (figura 2). S'acciona la bomba hidràulica manual, s'omple el cilindre i es produeix el seu avançament. Es continua accionant la bomba fins a assolir la pressió màxima de tancament (200 bar) indicada per un manòmetre. La pressió assolida en el filtre es manté gràcies a una vàlvula antiretorn.



**Figura 2.** Filtre de premsa (bomba hidràulica)

A continuació es pot alimentar el filtre amb l'aigua residual que s'ha de tractar, on es troba el crom precipitat en forma d'hidròxid. Per a això, és necessari posar en marxa la bomba d'alimentació en el filtre de premsa. A mesura que augmenta el temps de filtració, augmenta el gruix de sòlid filtrat. Això implica que cada cop pot passar menys solució a través de la bomba i va augmentant la pressió d'alimentació.

El procés de filtració acaba quan l'espai entre plaques filtrants (figura 3) està completament ple de matèria sòlida. Això es determina mitjançant un manòmetre instal·lat a la canonada d'entrada del líquid que s'ha de filtrar. La pressió de treball que assoleix el manòmetre és de 4 bar.



**Figura 3.** Plaques filtrants

El procés d'obertura del filtre és manual i s'ha de fer amb compte. Abans d'obrir el filtre, s'ha de comprovar que la pressió del sistema ha arribat a zero. S'obre el filtre amb la bomba hidràulica manual, posant la palanca en la posició que permet obrir.

### 6.2 Determinació de la humitat de la mostra sòlida

Peseu entre 5-10 g de mostra sòlida amb balança analítica i deixeu-la a l'estufa a 100 °C fins a pes constant.

### 6.3 Anàlisi d'un bany residual de curtició

Per valorar l'eficàcia del filtre de premsa, s'ha de determinar la quantitat de crom abans i després de filtrar, i de la mostra sòlida. El principi del mètode es basa en la mineralització àcida, en condicions oxidants, del crom contingut en el bany. Es destrueix la matèria orgànica i el crom s'oxida a crom (VI) que es valora iodomètricament.

El mètode analític és el següent:

En tres matrassos d'Erlenmeyer de 500 mL de boca ampla, introduïu:

- 10 mL d'una dilució 25:100 de la mostra inicial
- 10 mL de mostra final
- 0,10-0,15 g de mostra sòlida seca

Afegiu-hi 5 mL d'àcid nítric concentrat i remeneu suaument el matràs. A continuació, afegiu-hi 15 mL de la mescla  $\text{HClO}_4 / \text{H}_2\text{SO}_4$  (3 parts de  $\text{HClO}_4$  + 1 part de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Tapeu el matràs d'Erlenmeyer amb un embut, de manera que es pugui evaporar l'aigua i que no es perdi líquid a causa dels esquitxos. Escalfeu lentament amb la manta calefactora i a la campana. Quan la matèria orgànica s'ha descompost (és a dir, no apareixen fums marronosos), escalfeu a ebullició.

Quan la barreja comença a virar a taronja, reduïu la potència de la manta. Escalfeu durant 1-2 minuts més (no més) després d'observar el canvi de color. Deixeu refredar lentament a l'aire i després ràpidament a l'aigua freda. Afegiu al matràs uns 150 mL d'aigua i 2 boles de vidre. A continuació, bulliu durant 7 o 10 minuts i torneu a deixar refredar el matràs.

Afegiu 1-2 g de iodur potàssic, remeneu suaument i deixeu a les fosques durant 10 minuts. Valoreu amb tiosulfat sòdic 0,1N fins a color groc, afegiu uns 4 mL d'indicador de midó i continueu valorant fins a color verd clar.

Expresseu els resultats en g/L de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

## 7. Càlculs i qüestions

- a) Expliqueu detalladament tot el procés de recuperació de crom.
- b) Determineu la quantitat de crom abans i després de filtrar la mostra (expressat en g/L de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).
- c) Determineu la humitat i la quantitat de crom (expressat en g/L de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) de la mostra sòlida obtinguda amb el filtre de premsa.
- d) Escriviu totes les reaccions que intervenen en el procés de recuperació de crom i les que intervenen en l'anàlisi volumètrica del crom.

## 8. Bibliografia

[1] Symposium Internacional de Curtició al Cromo. Igualada: 1992. Pàg. 175-183.

## Capítol 4

# Top aquós d'altres solidesses (pràctica de planta pilot ambientalitzada d'acabats)

ROSA VIDAL

Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial d'Igualada (EUETII)  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

Fins fa pocs anys, per aconseguir un acabat sòlid per a les pells s'utilitzaven tops finals del tipus laques nitrocelul·losiques en fase solvent, les quals s'havien de barrejar amb dissolvents del tipus acetat de butil i acetat d'etil.

Aquestes solucions comporten una gran problemàtica a l'hora de preparar-les i aplicar-les.

Això és degut al fet que per poder fer aquestes aplicacions era imprescindible que a les pistoles no hi hagués gens d'aigua, ja que podria precipitar aquestes laques solvents.

D'altra banda, quan es parla de la neteja d'aquestes pistoles de pigmentació, s'ha de fer igualment amb productes del tipus acetona, la qual cosa també implica una gran contaminació ambiental.

En els últims anys i a causa de la gran demanda de pells acabades amb altres solidesses, s'han desenvolupat diferents tipus de tops finals amb fase aquosa per reduir la problemàtica de l'aplicació pràctica i de la contaminació ambiental.

## 2. Metodologia

La formulació per a una pràctica d'acabat amb top aquós és la següent:

Sobre les pells que ja porten un fons, s'hi aplica el top final, que ens donarà les característiques que desitgem (tacte, brillantor i solidesa).

La fórmula genèrica és:

- Poliuretà (que pot ser mat o brillant) . . . . . 100 parts
- Aigua . . . . . 300 parts
- Agent de tacte (silicona, gras...) . . . . . 10 parts

Aquesta fórmula tan senzilla fa que puguem treballar d'una manera molt neta i pràctica, i que l'impacte ambiental sigui nul.



## Capítol 5

# Aprofitament d'aigües depurades en agricultura

PATRICIA JIMENEZ-DE RIDDER, TERESA BALANYÀ, NURIA CAÑAMERAS I JORDI COMAS

Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona (ESAB)

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

Atès l'augment creixent de la demanda d'aigua i la seva mancança a les zones àrides i semiàrides del Mediterrani, la reutilització de l'aigua depurada desperta un interès creixent. Es tracta de preservar l'aigua potable per al subministrament públic i aprofitar l'aigua depurada per a usos com el reg agrícola o d'espais verds, la protecció de zones humides i la recàrrega d'aqüífers per frenar la intrusió marina.

Si ens centrem en el seu aprofitament per al reg, aquestes aigües presenten aspectes positius, com el seu contingut en diversos components aprofitables (N, P i K), un abastament força constant i una gran ubiqüitat. El seu ús, però, no està exempt de risc, ja que, segons l'origen de les aigües i el grau de depuració rebut, és normal la presència de microorganismes patògens i, en alguns casos, de contaminants químics com els metalls pesants. Per tant, els criteris que cal tenir en compte no solament són agronòmics, sinó que s'haurà de controlar el risc sanitari i l'ambiental que pot comportar la utilització d'aigua depurada per a reg. A tall d'exemple, podem esmentar diferents problemes que pot originar l'ús per a reg d'aigua residual depurada i que cal evitar:

- Malalties transmissibles: la presència de patògens que poden contaminar els conreus i posteriorment causar malalties en animals i persones.
- Acumulació de contaminants en la cadena alimentària: la presència de metalls pesants i el seu possible traspàs i acumulació a la cadena tròfica (aigua → sòl → planta → animal → ésser humà).

- Contaminació de masses d'aigua subterrània o superficial: per aplicacions incorrectes en sòls amb massa pendent i propers a cursos d'aigua, o en sals amb una elevada velocitat de drenatge.

Existeix normativa diversa arreu del món sobre això<sup>[4], [9] i [14]</sup>, però encara no n'hi ha en l'àmbit de la Unió Europea. A l'Estat espanyol hi ha un esborrany de decret elaborat pel CEDEX<sup>[7]</sup> i, pel que fa a Catalunya, actualment es poden seguir les recomanacions que el Departament de Salut de la Generalitat de Catalunya fa sobre el tema:<sup>[6]</sup> Previsió del risc sanitari derivat de la reutilització d'aigua residual depurada com a aigua de reg (es poden consultar en <http://www.gencat.net/salut/> → salut ambiental → aigua residual regenerada). D'aquestes normatives i recomanacions, cal destacar que aborden de manera preferent el risc sanitari.

L'aigua depurada que s'obté d'una depuradora que inclou un tractament secundari convencional, en general no presenta el grau de depuració necessari per considerar-la apta per ser reutilitzada i, per tant, cal aplicar-hi tractaments posteriors (terciaris) que en millorin la qualitat. Com a exemple, en la taula 1 es mostra l'efectivitat del tractament terciari de l'EDAR de Piera, que consta d'un tractament secundari per a fangs activats d'aeració prolongada i un tractament terciari d'infiltració per percolació.

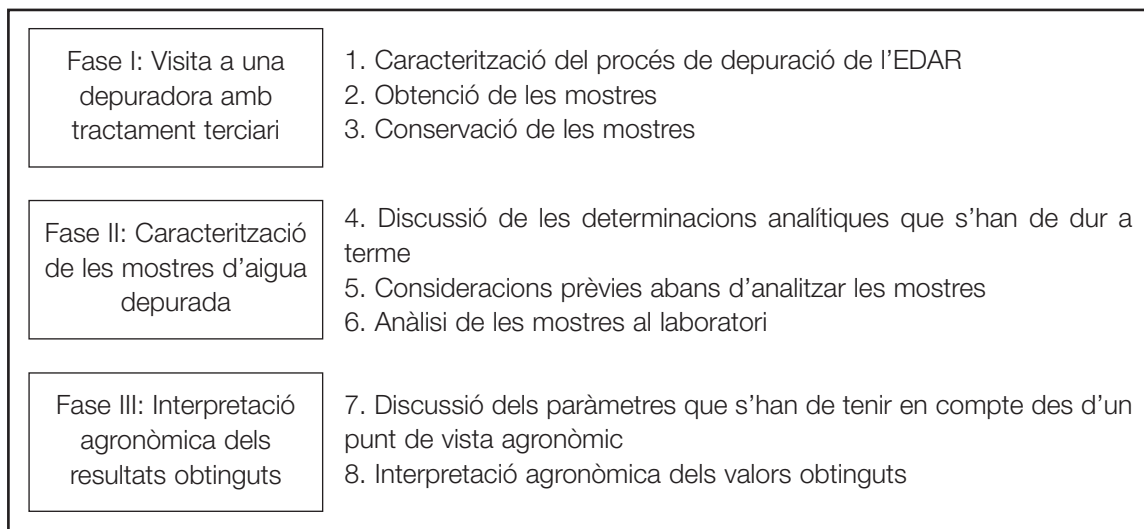
**Taula 1.** Efectivitat del tractament terciari de l'EDAR de Piera<sup>[10]</sup>

<b>Paràmetres</b>	<b>Entrada terciari</b>	<b>Sortida terciari</b>
MES (mg/L)	21	ND
DQO (mg/L)	39	19
N-NTK (mg/L)	2,4	1,4
Coliformes fecals (UCF/100mL)	3600	11
Ous d'helminth (UD/100L)	44	<1

Bàsicament amb el tractament terciari es persegueix la reducció de matèria orgànica, matèries en suspensió, N, P i desinfecció. Dintre del ventall de sistemes terciaris, es troben els que es basen en tecnologia tova que impliquen filtracions a través del sòl o d'un substrat en condicions controlades i en un espai més o menys confinat, com per exemple, els aiguamolls o les llacunes construïts o els sistemes d'infiltració-percolació. Aquests sistemes, encara una mica desconeguts, obtenen molt bons resultats amb un baix cost d'explotació i una bona integració en el medi.

## 2. Desenvolupament

En aquesta pràctica s'enfoca l'aprofitament d'aigües depurades per a reg de manera integrada, estudiant-ne alhora l'origen, la caracterització i la valoració agronòmica. Es planteja en tres fases successives (figura 1):



**Figura 1.** Esquema de desenvolupament de la pràctica

En la fase I es proposa la visita a una EDAR que disposi de tractament terciari i la presa de mostres d'aigua depurada. En la fase II es proposa fer una discussió aprofundida de les anàlisis que s'han de dur a terme i fer les anàlisis en un laboratori amb una certa capacitat analítica. I finalment, en la fase III, es proposa la interpretació agronòmica dels resultats obtinguts.

## 2.1 Fase I. Visita a una depuradora amb tractament terciari. Obtenció de mostres

Es visita una EDAR amb tractament terciari que disposi d'instal·lacions de tipus aiguamolls construïts o infiltració-percolació, com per exemple l'EDAR del Baix Llobregat (Depurbaix), la d'Hostalets de Pierola o la de Piera.

Les tasques associades a aquesta fase són les següents:

### *Caracterització del procés de depuració seguit a l'EDAR*

1. Dibuixeu un diagrama de la línia d'aigua i de fangs indicant l'objectiu de les diferents parts de la instal·lació.

Responen les preguntes següents sobre el tractament terciari:

- Quins són els objectius d'aquest tractament terciari?
- Quins són els mecanismes d'eliminació de la contaminació que bàsicament hi tenen lloc?
- Per què no hi ha decantador després del tractament terciari?
- Feu un balanç d'inputs i outputs.
- Quin tipus de manteniment requereix?
- Quins avantatges creieu que té aquest sistema davant una desinfecció convencional amb clor?

### *Obtenció de les mostres*

Per tal de poder caracteritzar posteriorment l'aigua depurada, s'obtingran dos tipus de mostres a la sortida del tractament terciari: una de puntual i una d'integrada.

Preneu una mostra puntual de 8 L.

Com que la mostra integrada s'ha de recollir durant un període llarg de temps (preferiblement 24 h), només es pot obtenir en cas que l'empresa explotadora de la depuradora us la proporcioni.

### *Conservació de les mostres*

Cal mantenir les mostres a la nevera fins al moment de l'anàlisi.

## 2.2 Fase II. Caracterització de les mostres d'aigua depurada

Per a la caracterització de les mostres d'aigua, convé conèixer el màxim nombre possible d'indicadors. Els diferents indicadors es poden classificar<sup>[11]</sup> en indicadors generals, nutrients, matèria orgànica, ions principals, elements traça, contaminants orgànics i característiques microbiològiques. Tanmateix, convé prioritzar els paràmetres que tinguin una importància rellevant per a l'ús de l'aigua que aquí es proposa. En aquest sentit, i segons el que s'ha assenyalat en la introducció, té molta importància conèixer:

- Les característiques sanitàries de l'aigua depurada.
- El seu contingut en certs metalls pesants.
- L'aportació en nutrients: nitrogen, fòsfor i potassi.
- Els paràmetres específics per a reg.

Les característiques sanitàries queden fora de l'abast d'una anàlisi química i, per tant, proposem avaluar aquest aspecte de la qualitat sol·licitant-lo a l'empresa explotadora de la instal·lació. Les altres característiques sí que es poden conèixer a través del treball experimental al laboratori.

### *Discussió de les determinacions analítiques que s'han de dur a terme*

La primera activitat d'aquesta fase de la pràctica consistirà a discutir els paràmetres que s'han d'analitzar. En la taula 2 descrivim una pauta completa de treball analític a partir de la qual convindrà concretar el contingut de la pràctica en funció dels condicionants de temps i del laboratori. En la discussió caldrà:

- Definir la capacitat analítica del laboratori on s'analitzaran les mostres.
- Definir quins indicadors es determinaran.
- Fixar amb quantes mostres es treballarà.
- Fixar el nombre de rèpliques que s'obtingran per a cada determinació tant individualment com en el grup de pràctiques.
- Buscar la descripció del/s mètode/s en la bibliografia.
- Estudiar les seves possibilitats de realització pràctica.
- Elaborar els reactius necessaris.

### *Consideracions prèvies abans d'analitzar les mostres*

Abans d'analitzar les mostres, caldrà discutir els aspectes següents:

1 - Pretractament de les mostres: L'aspecte de la mostra ha de ser poc heterogeni; per tant, la majoria de determinacions es podran fer sobre mostra directa. Només si el contingut en matèries en suspensió és alt, caldrà treballar amb la mostra filtrada.

2 - Tractament de mostra: Només es preveu per a la determinació del nitrogen orgànic, en què s'ha de fer una mineralització del nitrogen present en forma orgànica.

3 - Quantificació: Per a la majoria de les determinacions, es proposa la quantificació mitjançant un mètode instrumental, ja que presenta l'avantatge de ser més ràpid. És especialment interessant la possibilitat de disposar de l'equip electroforesi capil·lar / cromatografia iònica per trobar simultàniament el conjunt d'ions. Tanmateix, per a paràmetres com calci, magnesi i clorurs (i també per a l'alcalinitat), es pot proposar com a alternativa una determinació volumètrica i, per a sulfats, una gravimetria.<sup>[13]</sup>

4 - Resultats: Per a l'obtenció dels resultats caldrà revisar acuradament el procés de càlcul, que pot no estar inclòs en el protocol analític. El conjunt de resultats obtinguts per l'estudiant i pel grup s'han de presentar en forma de butlletí de resultats analítics i posar especial èmfasi en les unitats en què s'expressen.

5 - Interpretació analítica de resultats: La interpretació analítica és l'etapa prèvia a la interpretació més pròpiament relacionada amb l'objectiu de l'anàlisi (fase III) i és indispensable per conèixer la fiabilitat de les dades obtingudes. Aquesta etapa permet, doncs, fer un filtre del conjunt de resultats i elaborar un sol butlletí per mostra amb els valors mitjans ja contrastats.

Les pautes que s'han de seguir en la interpretació dels resultats<sup>[13]</sup> són les següents:

- Inspecció del conjunt de resultats (valors, unitats, coincidència entre replicats, comparació entre estudiants, diferència entre mostres...).
- Concordança entre el valor de conductivitat i la suma total de ions.
- Comprovació del balanç iònic (anions, cations).

### *Anàlisi de les mostres al laboratori*

Les determinacions analítiques es realitzaran en tres sessions: en la primera, es determinaran paràmetres generals (pH, conductivitat elèctrica, terbolesa i sòlids en suspensió); en la segona, es determinaran els nutrients (nitrogen total, amoniacal i nítric; fòsfor, potassi i bor), i en la tercera, es determinaran altres ions (sodi, calci, magnesi, clorurs i sulfats) i metalls pesants (cadmi, molibdè, seleni, ferro i manganès). Vegeu les taules 2 i 3.

**Taula 2.** Conjunt de determinacions analítiques i les seves característiques principals

Indicadors		Mètode	Equipament	Referència bibliogràfica
Paràmetres generals	pH	Lectura directa	pH-metre	[2]
	Conductivitat		Conductímetre	
	Terbolesa		Turbidímetre	
	Sòlids en suspensió	Gravimetria	Filtració al buit estufa	[1]
Nutrients	Nitrogen total	Digestió i quantificació Kjeldahl	Digestor i destil·lador Kjeldahl	[1]
	Nitrogen amoniacal	Destil·lació Kjeldahl		[2]
	Nitrogen nítric	Lectura directa amb elèctrode selectiu	Elèctrode selectiu de nitrats	[2]
	Fòsfor	Formació complex acolorit amb molibdat amònic	Colorímetre	[1]
	Potassi	Lectura directa o bé d'una dilució	Fotòmetre de flama	[2]
	Bor		Absorció atòmica i làmpada de bor	[2]
Sodi	Fotòmetre de flama		[2]	
Altres ions	Calci i magnesi	Lectura directa o bé d'una dilució	Absorció atòmica / electroforesi capil·lar	
	Clorur i sulfats		Electroforesi capil·lar	
Metalls pesants	Cd, Mo, Se	Lectura directa o bé d'una dilució	Absorció atòmica	[2]
	Fe, Mn			

**Taula 3.** Organització de la pràctica

Sessió 1 (4 hores)	Sessió 2 (4 hores)	Sessió 3 (4 hores)
Paràmetres generals	Nutrients	Ions principals i metalls

### 2.3 Fase III. Interpretació agronòmica dels resultats obtinguts

#### *Discussió dels paràmetres que s'han de tenir en compte des del punt de vista agronòmic*

En primer lloc, es discutiran els paràmetres agronòmics que s'han de tenir en compte per avaluar la qualitat de l'aigua. Per valorar la qualitat de les aigües residuals depurades per regar es poden utilitzar generalment els mateixos criteris que per a les aigües de reg convencionals, tot i que, com ja s'ha dit anteriorment, també caldrà tenir en compte el contingut en microorganismes patògens i la concentració de metalls pesants. En aquesta fase de la pràctica s'interpretaran el conjunt de resultats obtinguts per a cadascuna de les mostres.

Les directrius que es poden fer servir per avaluar la qualitat de l'aigua figuren en l'adaptació feta per R. Mujeriego<sup>[8]</sup> del llibre *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater – A Guidance Manual*, dels autors G. S. Pettygrove i T. Asano. Per conèixer la tolerància dels cultius i el rendiment potencial segons la conductivitat de les aigües de reg, es pot consultar la classificació establerta per Ayers i Westcott.<sup>[3]</sup> Es compararan també els resultats amb les recomanacions/normatives vigents a Catalunya sobre possibles usos d'aquests tipus d'aigües.

Per realitzar una interpretació agronòmica sobre la qualitat d'una aigua, caldrà tenir en compte els resultats analítics que poden ocasionar algun perjudici al cultiu o al sòl. Els paràmetres que es proposa tenir en compte són els següents:

**Conductivitat elèctrica:** Indica de quina manera la salinitat pot afectar la disponibilitat d'aigua del cultiu. Com més quantitat de sals solubles es trobin en la fracció hídrica del sòl més difícil resulta la utilització de l'aigua per als cultius. Aquest és el paràmetre més important per determinar la idoneïtat d'una aigua de reg.

**Taxa d'adsorció de sodi:** Indica si la permeabilitat del sòl es pot veure afectada (variació de la taxa d'infiltració). Les aigües amb continguts elevats de sodi provoquen una sodificació del sòl.

**Sòlids en suspensió:** Poden indicar, entre altres, el perill d'obturació en el cas de reg localitzat. Cal tenir present que aquestes aigües contenen més sòlids en suspensió que les aigües normals i, per tant, la freqüència de neteja de filtres i d'altres dispositius ha de ser més elevada. En cas que arribin al sòl, poden provocar la disminució de la conductivitat hidràulica d'aquest sòl.

**Concentració de sodi, clorurs, bor i altres microelements:** Permetrà saber si la seva presència pot produir problemes de toxicitat en els cultius, ja que moltes espècies vegetals són sensibles a concentracions poc elevades.

**Concentració de nitrogen, fòsfor, potassi, calci, magnesi, sulfats i carbonats:** Per conèixer la quantitat de nutrients presents, que caldrà tenir en compte en el programa d'adobatge del cultiu per tal d'evitar l'excés d'algun d'aquests elements. Una aportació excessiva de nitrogen pot ser perjudicial per a les plantes, i també pot ocasionar un augment de la lixiviació del nitrat i la contaminació de les aigües freàtiques.

**pH:** Assenyala el grau d'acidesa de l'aigua i també pot resultar un indicador del grau de perill d'obturació de les instal·lacions de reg.

Interpretació agronòmica dels valors obtinguts

Ompliu la taula 4 i feu una discussió sobre la qualitat agronòmica de l'aigua analitzada. Aquesta aigua, pot ésser utilitzada per regar? Per què?

**Taula 4.** Interpretació dels resultats

Indicadors	Unitats	Valor	Grau de restricció en l'ús de l'aigua		
			Cap	De dèbil a moderat	Elevat
PH					
CE					
Relació d'adsorció de sodi (RAS)					
Sòlids en suspensió					
N-total					
N-nítric					
N-amoniacal					
Fòsfor					
Potassi					
Bor					
Sodi					
Calci					
Magnesi					
Clorur					
Sulfats					
Cadmi					
Molibdè					
Seleni					
Ferro					
Manganès					

### 3. Bibliografia

[1] AFNOR. Association Francaise de Normalisation: NF T 90-105 (1978), NF T 90-110 (1981), NF T 90-023 (1982).

[2] APHA-AWWA-WPCF (1992). Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Editorial Diaz de Santos.

[3] AYERS, R. S.; D. W. WESTCOT (1984). «Water quality for agriculture». FAO Irrigation and Drainage Paper (núm. 29), Roma.

[4] California (2000). Code of regulations. Division 4: Environmental Health. Chapter 3. Water recycling criteria. Dept. of Health Services. Sacramento, California.

[5] Cañameras, N. (2005). Apunts de teoria d'agroclimatologia i agronomia del reg. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona, Universitat Politècnica (apunts de l'assignatura).

[6] GENERALITAT DE CATALUNYA (1994). Prevenció del risc sanitari derivat de la reutilització d'aigua residual depurada com a aigua de reg. Departament de Sanitat i Seguretat Social de la Generalitat. Pàgina web: URL <http://www.gencat.net/salut/> → salut ambiental → aigua residual regenerada [consulta, març de 2006].

[7] CEDEX (1999). Borrador del Decreto sobre reutilización de aguas residuales.



- [8] MUJERIEGO, R. (ed.) (1990). Riego con agua residual municipal regenerada. Manual práctico. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- [9] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (1989). Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Serie Informes Técnicos 778. Ginebra.
- [10] PEÑUELAS, G. (1997). La infiltración precolación. Jornades sobre tractaments terciaris de depuració. Ecomed 1997. Comunicació oral.
- [11] POCH, M. (1999). Les qualitats de l'aigua. Rubes Editorial i Departament de Medi Ambient i Habitatge.
- [12] Rodier, J. (1981). Análisis de las aguas. Ediciones Omega.
- [13] SOLIVA, M.; PUJOLÀ, M.; JIMÉNEZ, P. (2005). Pràctiques d'anàlisi química agrícola. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona, Universitat Politècnica (guió de pràctiques de l'assignatura Anàlisi Química Agrícola).
- [14] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1992). Manual Guidelines for water reuse. EPA /625/ R-92/004. Technology Transfer. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.



## Capítol 6

# Balanç entre la producció de nitrogen d'origen ramader i les necessitats de nitrogen dels cereals i conreus farratgers de la comarca d'Osona

JORDI COMAS

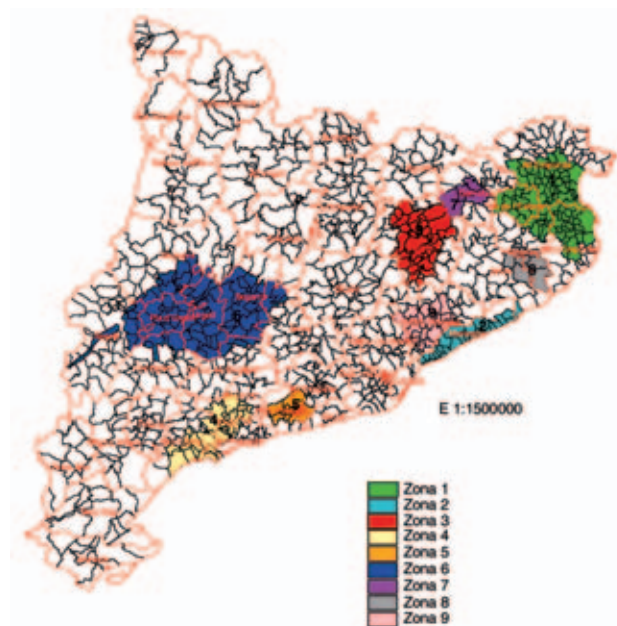
Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona (ESAB)

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

A Europa s'han detectat algunes zones en què la contaminació dels aqüífers amb nitrats representa un problema. Per intentar solucionar-lo es promulgà la Directiva 91/976/CEE, sobre protecció de les aigües contra la contaminació produïda pels nitrats procedents de fonts agràries. A Espanya aquesta directiva es va transposar en el Reial decret 261/1996. Aquest Reial decret atribueix a les comunitats autònomes la designació de zones vulnerables, enteses com aquelles superfícies territorials l'escolament superficial i filtració de les quals afecti o pugui afectar la contaminació per nitrats dels cossos hídrics subterranis. També correspon a les comunitats autònomes establir programes amb l'objectiu de prevenir i reduir la contaminació causada per nitrats d'origen agrari. Finalment, el Reial decret esmentat estableix que les comunitats autònomes hauran d'elaborar un codi de bones pràctiques agràries que els agricultors podran posar en pràctica de manera voluntària amb la finalitat de reduir la contaminació produïda per nitrats d'origen agrari. Aquest codi és de compliment obligat en les superfícies territorials que hagin estat designades com a zones vulnerables.



**Figura 1.** Zones vulnerables de Catalunya. Decret 476/2004 de la Generalitat de Catalunya

En el Decret 283/1998 es van designar les zones vulnerables de Catalunya. Quatre anys més tard, lluny de reduir-se la superfície afectada que figura en el Decret 476/2004, les zones afectades per contaminació amb nitrats a Catalunya s'amplien.

El codi de bones pràctiques agràries es va establir en l'Ordre de 22 d'octubre de 1998. El codi proporciona un seguit de recomanacions per a la gestió adient de la fertilització nitrogenada. En l'Ordre es palesa que una premissa bàsica per a una gestió correcta del nitrogen és ajustar les quantitats de fertilitzants aplicades a les necessitats de fertilització del cultiu en el moment adequat, per tal d'intentar evitar al màxim un possible impacte negatiu sobre l'entorn i/o la salut humana de la fertilització. Per aquest motiu, més enllà de calcular les dosis de fertilització de manera correcta, s'estableixen els períodes en què no és convenient l'aplicació de fertilitzants per falta de cultius que puguin absorbir els nitrats. També cal tenir en compte els elements territorials que poden augmentar el risc de contaminació de les aigües, com ara el pendent del sòl, el seu entollament, la proximitat de cursos d'aigua, etc. El càlcul de la dosi de fertilitzant que hi ha consisteix a fer un balanç a nivell de parcel·la, en què es prenen en consideració els principals processos que determinen l'entrada i la sortida de nutrients; d'aquesta manera, augmenta al màxim l'eficiència de la fertilització.

El programa de mesures agronòmiques aplicables a les zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats procedents de fonts agràries es manifesta en el Decret 205/2000. El programa esmentat es basa en bona part en els principis que inspiren el codi de bones pràctiques. Per a cada zona vulnerable es concreten les dosis màximes que s'hi poden aplicar. Així, per exemple, a la comarca d'Osona s'estableixen les quantitats màximes següents: blat, 250 kg N/ha; ordi, 210; blat de moro farratger, 350; cereals d'hivern farratgers, 210; sorgo farratger, 250; alfals, 170; raigràs, 350; prats permanents, 250; naps, 210. També s'hi indica que, per intentar ajustar les disponibilitats de nutrients a les necessitats de fertilització dels cultius, els titulars de les explotacions ramaderes han de disposar d'instal·lacions d'emmagatzematge de les dejeccions ramaderes i d'altres materials orgànics amb valor fertilitzant que tinguin prou capacitat.

Les dejeccions ramaderes representen una part molt significativa dels residus d'origen orgànic generats a Catalunya. L'origen d'aquestes dejeccions es troba, principalment, en les granges de porcí, a les quals cal afegir les granges avícoles, vacunes i ovines. El sector ramader, especialment el porcí juntament amb el sector hortofructícola, han estat els principals motors de la modernització i capitalització del sector agrari català. Així, el sector porcí representa un 26,7 % de la producció final agrària. A més a més, la producció de bestiar porcí té un paper clau dins del sistema agroindustrial. Atesa la importància econòmica del sector porcí, caldria buscar solucions per minorar els riscos que les dejeccions ramaderes poden representar per a l'entorn i la salut humana, tenint sempre molt present que els residus ramaders constitueixen un recurs molt important per restituir la fertilitat dels sòls en els sistemes agrícoles.<sup>[2]</sup>

Per mantenir la fertilitat dels sistemes agrícoles, cal restituir la matèria orgànica del sòl que es mineralitza amb el temps i els nutrients minerals que s'escapen del sistema amb les exportacions de la collita o en processos menys controlables, com per exemple les pèrdues per lixiviació. En aquest sentit, els residus ramaders constitueixen un recurs valuós, sempre que s'apliquin als sistemes agrícoles seguint criteris agronòmics. És per això que el primer pas en l'elaboració d'una gestió de residus orgànics, aptes per ésser utilitzats com a fertilitzants d'un territori, consisteix a fer un balanç de matèria orgànica i nutrients, en què es prevegin l'oferta i les necessitats dels sistemes agrícoles.<sup>[7]</sup>

En aquesta pràctica es vol contrastar la hipòtesi següent:

¿És possible valoritzar tot el purí de porcí produït a la comarca d'Osona utilitzant-lo com a fertilitzant per a la producció de cereals per a gra i de conreus farratgers de la mateixa comarca?

Per contrastar aquesta hipòtesi, es plantegen els objectius següents:

- Estimar el cens ramader de la comarca d'Osona (porcí).
- Estimar la producció de N.
- Estimar la distribució de la superfície cultivada.
- Estimar les necessitats de fertilització nitrogenada netes i brutes.
- Fer un balanç entre necessitats dels conreus i oferta de nitrogen del bestiar porcí.

## 2. Desenvolupament

### 2.1 Determinació del cens ramader de la comarca d'Osona (porcí i boví)

Per estimar l'oferta de purí de la comarca d'Osona, cal determinar quin és el cens de bestiar porcí. Aquesta informació, la podem trobar en l'enquesta d'explotacions de porcí duta a terme pel Gabinet Tècnic del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Aquesta enquesta és obligatòria en tots els països de la UE. Es proposa treballar amb l'enquesta de desembre de 2000, que està publicada.<sup>[4]</sup> A partir de l'enquesta, estimeu el nombre de porcs d'engreix i de truges reproductores de la comarca. Introduïu les dades a la taula 1.

## 2.2 Avaluació del purí generat a la comarca

Un cop conegut el nombre d'animals, estimeu la producció mitjana diària de purí per cada tipus d'animal. Aquesta informació, la podeu trobar a [2]. A continuació estimeu la producció total de purí. Introduïu les dades a la taula 1.

**Taula 1.** Determinació del nombre de caps de porcí a la comarca d'Osona

Osona	Nombre d'animals	Producció mitjana de purí per tipus d'animal	Producció total de purí
Porcs de 20 a 50 kg			
Porcs d'engreix			
Truges reproductores			
Mascles reproductors			

## 2.3 Estimació del valor fertilitzant dels purins

Per estimar el valor fertilitzant dels purins, se n'ha de conèixer la composició. Uns valors orientatius els podeu trobar a [5]. Cal tenir en compte que la composició del purí és relativament estable expressada sobre matèria seca (MS). En canvi, el seu contingut en matèria humida és molt més variable; depèn molt del tipus de gestió. Suposem que el purí d'Osona té un contingut mitjà en MS de l'11,1 % per als porcs d'engreix i de 9,2 % per a les truges reproductores. Introduïu les dades a la taula 2.

**Taula 2.** Estimació de la composició mitjana del purí de les granges de porcí d'Osona

	Engreix	Truges reproductores
MS	11,1	9,2
Densitat		
Composició del purí sobre MS		
N orgànic (%)		
N amoniacal (%)		

El valor fertilitzant del purí en nitrogen se sol expressar en kg de N per m<sup>3</sup>. Per tant, se n'ha de conèixer la densitat. La densitat, la podem estimar a partir del contingut en MS del purí. La relació entre densitat i MS, la podem trobar a [5].

Per valor fertilitzant del purí en nitrogen entenem la quantitat de N del purí que serà disponible per al cultiu quan el purí s'utilitza com a fertilitzant. Per estimar-lo, suposarem que el nitrogen disponible per al cultiu serà aquella fracció del nitrogen total contingut en el purí que no entra a formar part de la matèria orgànica estable que es formi durant la seva descomposició (vegeu la figura 1). Per estimar la matèria estable generada pel purí, suposarem una k1 (coeficient isohúmic del purí) de 0,25. Introduïu les dades a la taula 3.

$$\boxed{\text{Nitrogen total purí}} - \boxed{\text{Nitrogen retint en l'humus generat pel purí}} = \boxed{\text{Nitrogen disponible per al cultiu}}$$

**Figura 2.** Model simplificat de càlcul del valor fertilitzant del purí

**Taula 3.** Determinació del nombre de caps de porcí a la comarca d'Osona

Osona	Purí total	Valor fertilitzant unitari en N	Valor fertilitzant total
Porcs de 20 a 50 kg			
Porcs d'engreix			
Truges reproductores			
Mascles reproductors			
TOTAL			

NOTA: Per fer els càlculs, suposeu que un 15 % del nitrogen amoniacal es perd per volatilització. Relació C/N de l'humus generat pel purí = 10. Tant per cent de C de l'humus generat pel purí = 50.

## 2.4 Estimació de la producció dels cereals per a gra i els farratges de la comarca

Per poder estimar la producció dels cereals per a gra i dels farratges de la comarca, en primer lloc, s'han de determinar les superfícies mitjanes ocupades per aquests conreus. Podeu trobar aquesta informació a [3]. Considereu els conreus següents:

Cereals d'hivern: blat i ordi.

Cultius farratgers: blat de moro farratger, sorgo farratger i margall.

**Taula 4.** Estimació de la superfície, rendiment i producció de cereals i farratges a la comarca d'Osona

Cereals d'hivern	Superfície	Rendiment en secà (t/ha)	Producció
Blat		6	
Ordi		5	
Conreus farratgers			
Blat de moro farratger		50	
Sorgo farratger		30	
Margall		40	

## 2.5 Determinació de les necessitats de fertilització nitrogenada netes i brutes

El càlcul de les necessitats netes de fertilització nitrogenada (NNFN) el farem, de manera simplificada, com s'indica a continuació:

$$\boxed{\text{NNFN}} = \boxed{\text{EU(N)}} \times \boxed{\text{P}} - \boxed{\text{NNFN}}$$

NNFN: Necessitats netes de fertilització nitrogenada; EU(N): extraccions unitàries en nitrogen; P: producció

**Figura 3.** Model simplificat de càlcul de les necessitats netes de fertilització nitrogenada (NNFN)

No tindrem en compte les possibles aportacions de nitrogen de les restes de cultius anteriors. Les extraccions totals en nitrogen de cada grup de conreus, les calcularem multiplicant les extraccions

unitàries que podeu trobar a Boixadera et al.<sup>[1]</sup> per les produccions totals expressades a la taula 4. Per estimar les aportacions de nitrogen de l'humus del sòl quan es mineralitza, suposarem que el contingut mitjà en humus dels sòls cultivats de la comarca és el 2,1 %. Suposarem també que el coeficient de mineralització de l'humus del sòl és de l'1,5 %; que els cultius d'hivern n'aprofiten el 100 %, i que els cultius d'estiu només n'aprofiten el 60 %. Un cop tingueu els resultats, ompliu la taula 5.

**Taula 5.** Estimació de necessitats netes de fertilització nitrogenada (NNFN) dels cereals per a gra i conreus farratgers d'Osona

<b>Cereals d'hivern</b>	<b>Producció (t)</b>	<b>Extraccions unitàries (kg N/t de producte)</b>	<b>Extraccions totals (kg N)</b>	<b>Necessitats netes de fertilització nitrogenada (NNFN)</b>
Cereals d'hivern				
Blat				
Ordi				
Conreus farratgers				
Blat de moro farratger				
Margall				
Sorgo farratger				
TOTAL				
Indiqueu el valor obtingut del N total que es mineralitza a partir de l'humus del sòl.				

Quan es calculen les necessitats de fertilització d'un conreu, cal distingir entre necessitats netes de fertilització (NNF) i necessitats brutes de fertilització (NBF). Així, per exemple, en la fertilització nitrogenada, cal tenir en compte que el nitrogen amoniacal contingut en els purins es pot perdre en part per volatilització, especialment si el purí no s'enterra i el sòl està sec. A més a més, el nitrogen amoniacal que penetra en el sòl es transforma ràpidament en nitrogen nítric. Els nitrats són extraordinàriament solubles, cosa que fa que la planta els pugui absorbir fàcilment, ja que arriben a la superfície radical per flux de massa. Al mateix temps, però, aquesta mateixa solubilitat fa que sigui inevitable que es produeixin pèrdues per rentatge. És clar que hem de fer tot el que sigui possible per reduir les pèrdues de nitrogen del sòl. Per fer el càlcul, suposarem que l'eficiència de la fertilització nitrogenada amb purins és del 70 %; per tant,  $NBFN = NNFN/0,7$ .

## 2.6 Balanç entre necessitats dels conreus i oferta de nitrogen del bestiar porcí

Un cop calculats el valor fertilitzant per purí produït a la comarca d'Osona i les necessitats brutes de fertilització nitrogenada dels cereals per a gra i els conreus farratgers de la comarca, observarem en quina proporció aquest purí pot ser valoritzat com a fertilitzant. Introduïu les dades a la taula 6.

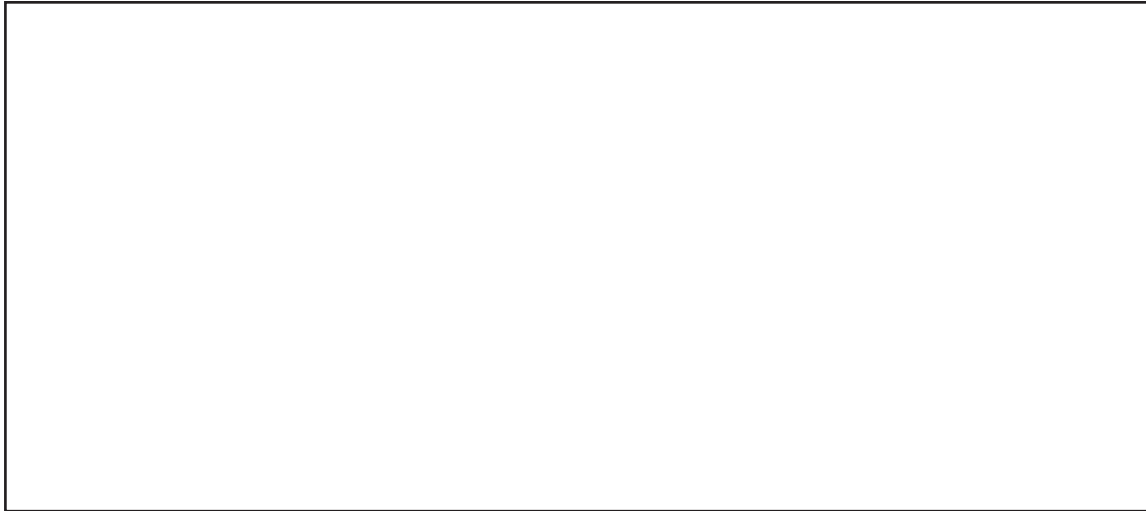
**Taula 6 -** Balanç de nitrogen entre les aportacions del purí de la comarca d'Osona i les necessitats de fertilització nitrogenada dels cereals per a gra i els conreus farratgers

<b>Nitrogen generat pel sector porcí</b>	<b>Necessitats dels conreus</b>	<b>Diferència</b>



### 3. Resultats

Discutiu els resultats obtinguts en el requadre següent:



### 4. Bibliografia

[1] BOIXADERA, J.; SIÓ, J.; ALAMOS, M; TORRES, E. (2000). Manual del codi de bones pràctiques agràries: nitrogen. Generalitat de Catalunya, Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Es pot trobar a [www.gencat.net/darp/c/camp/nitrogen/doc/cnitro01.pdf](http://www.gencat.net/darp/c/camp/nitrogen/doc/cnitro01.pdf).

[2] DANÈS, R.; MOLINA, V.; PRATS, I. LI.; ALAMOS, M.; BOIXADERA, J.; TORRES, E. (1995). Manual de gestió de purins i la seva reutilització agrícola. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca.

[3] GABINET TÈCNIC (1998). L'agricultura a les comarques de Catalunya, any 1996. Barcelona: Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca.

[4] GABINET TÈCNIC (2004). Estadístiques agràries i pesqueres de Catalunya, any 2000. Barcelona: Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca.

[5] NAVÉS, J.; TORRES, C. (1994). Pla pilot de purins. Consell Comarcal del Pla d'Urgell.

[6] POMARES, F.; CANET, R. (2001). «Los residuos orgánicos utilizables en agricultura: origen, composición y características». A: BOIXADERA, J.; TEIRA, M. R. (2001). Aplicación agrícola de residuos orgánicos. Universitat de Lleida.

[7] TEIRA, M. R.; FLOTATS, X. (2001). «Planes de gestión de residuos ganaderos». A: BOIXADERA, J.; TEIRA, M. R. (2001). Aplicación agrícola de residuos orgánicos. Universitat de Lleida.



## Capítol 7

# Caracterització de materials orgànics com a possibles adobs orgànics

PATRÍCIA JIMÉNEZ, OSCAR HUERTA, MARGA LÓPEZ, MONTSERRAT SOLIVA I JORDI COMAS

Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona (ESAB)

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

L'augment de producció de residus orgànics ha provocat que moltes vegades es busqui com a solució més senzilla i «econòmica» la seva utilització en agricultura. Aquesta sortida, que pot tenir avantatges i que no s'ha de desestimar, és sovint problemàtica a causa de la valoració «simplista» que es fa de certes característiques dels residus. A vegades, pel sol fet que un residu tingui un contingut important de matèria orgànica (MO) i nitrogen (N), ja es considera que és molt adequat utilitzar-lo com a fertilitzant, tot oblidant altres aspectes, com per exemple que la fermentabilitat de la MO o una aplicació excessiva de certes formes de N pot provocar problemes importants en l'entorn. Sovint també es creu que si un material orgànic no porta metalls pesants ja es pot aplicar, sense considerar altres constituents i/o contaminants que també poden donar problemes. Cal caracteritzar bé un residu i sobretot cal saber què s'ha de conèixer per poder aconsellar l'ús raonat d'un residu orgànic com a fertilitzant orgànic. El que és busca és la reutilització de materials orgànics, no un abocament encobert. Un residu orgànic pot tenir aplicació agrícola com a fertilitzant, com a substrat o bé ésser utilitzat per recuperar zones degradades. En cada cas, cal definir bé les característiques que ha de tenir i les condicions en què s'ha d'aplicar.<sup>[24] i [27]</sup>

## 2. Desenvolupament

Aquesta pràctica es planteja en tres fases. En la fase I es proposa l'obtenció de la mostra d'un material orgànic susceptible d'ésser utilitzat en agricultura. En la fase II es fan i es discuteixen les determinacions analítiques necessàries per caracteritzar el material d'acord amb els possibles usos. És bo simplificar al màxim les determinacions analítiques que s'han de fer, i que aquestes siguin senzilles i reproduïbles. Es plantegen dos nivells d'anàlisi per caracteritzar els materials orgànics en funció de la seva complexitat de realització. En la fase III es proposa l'elaboració d'un informe que aglutini tots els resultats i una discussió. Els resultats obtinguts es comparen amb la legislació vigent<sup>[20]</sup> o proposada en l'àmbit de la Unió Europea<sup>[8]</sup> (figura 1).

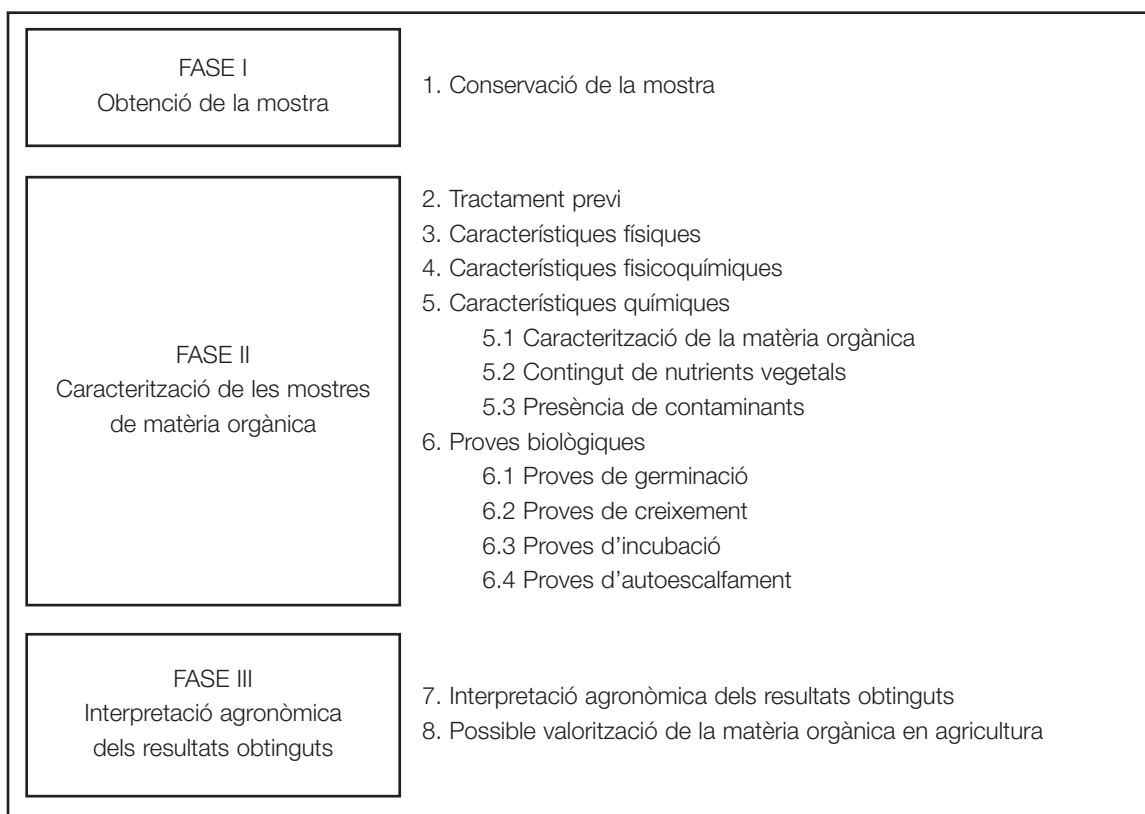


Figura 1. Desenvolupament de la pràctica

### 2.1 Fase 1. Obtenció de la mostra

Sempre que es pugui, és preferible anar a prendre la mostra per veure in situ l'origen del residu, les condicions en què es genera. S'ha de saber com cal agafar la mostra i en quines condicions s'ha de conservar per transportar-la al laboratori. Es proposa escollir una planta de compostatge de residus municipals de petita capacitat i amb un sistema de compostatge en piles on agafar les mostres<sup>[1]</sup> i prendre consciència de com són els residus municipals, quins problemes creen si no es fa recollida selectiva en origen i com cal tractar-los per



Figura 2. Presa de mostres de fens i compost

transformar-los en un recurs (compost). També es pot escollir una explotació ramadera de vaques per prendre consciència de què són els fems i com mostrejar-los.

En cas que això no sigui possible, s'han de portar al laboratori diferents mostres de residus municipals, del seu compost i de fems, per poder apreciar-ne l'aspecte i l'heterogeneïtat.

Cal preparar una fitxa d'entrada de la mostra al laboratori per tenir el màxim d'informació sobre el procés de producció del residu. En les taules 1 i 2 teniu un exemple de fitxa d'entrada.

Taula 1. Exemple de fitxa d'entrada, en què es palesen els aspectes tècnics del procés de compostatge de la planta de l'Espluga de Francolí.

Planta	<b>ESPLUGA DE FRANCOLÍ</b>	
Material	<b>COMPOST</b>	
Data de mostreig		
Descomposició	Maduració	
Sistema	Piles voltejades	Piles voltejades
Duració	15-30 dies	Mínim 10 setmanes
Freqüència de volteig	3 dies	10 dies
Freqüència de reg	Segons necessitats	Segons necessitats
Tipus d'aigua	Pluvials	Pluvials
Fase del procés	Mecanisme utilitzat: selecció d'impropis de la fracció compostable a la planta de l'Espluga de Francolí	
Inici de la maduració	Manual i trommel de 80 mm	
Afinament final	Trommel 10 mm, taula densimètrica, aspiració plàstic i magnètic	

Taula 2. Exemple de descripció sensorial d'una mostra procedent de la planta de l'Espluga de Francolí

<b>Descripció</b>	
Aspecte general	Bon aspecte
Humitat	Correcta
Color	7-8
Olor	Olor a terra de bosc i lleugerament a humitat alhora
Homogeneïtat	Molt homogènia en composició i grandàries
Fibres vegetals	Gran presència de fibres vegetals
Impropis	De tant en tant, plàstics lleugers de petita grandària

Les mostres s'han de conservar a la nevera a 0 °C. Si es preveu un temps de conservació llarg, és aconsellable desar una fracció de la mostra al congelador.

## 2.2 Fase 2. Caracterització de les mostres

En primer lloc, cal fer una discussió aprofundida de les anàlisis que s'han de dur a terme d'acord amb l'origen del material orgànic, l'ús que se li vulgui donar i la capacitat analítica del laboratori. Són importants la conservació i el tractament previ a què se sotmeti la mostra. Les anàlisis que s'han de dur a terme es poden dividir en físiques, fisicoquímiques, químiques i biològiques. En tots els casos s'han elegit les determinacions més senzilles i reproduïbles possibles, però que donen informació

valuosa sempre que s'interpretin correctament.<sup>[9], [22], [27] i [30]</sup> Al llarg del text s'indiquen les fonts bibliogràfiques en què es pot trobar una descripció detallada de la metodologia d'anàlisi que cal seguir.

### *Tractament previ de la mostra*

Una vegada obtinguda la mostra, se li han d'aplicar els pretractaments necessaris. Algunes determinacions s'hauran de fer sobre mostra humida (tal com arriba al laboratori), tot i que pot presentar problemes d'heterogeneïtat. No obstant això, sempre que es pugui, les determinacions s'han de fer sobre mostra seca triturada per assegurar-ne l'homogeneïtat.



**Figura 3.** Aspecte de diferents mostres

### *Característiques físiques*

En primer lloc, caldrà veure l'aspecte del residu i donar dades sobre coloració, olor i homogeneïtat. També se n'haurà de determinar la humitat (influeix en el cost del transport i en les condicions d'aplicació). D'aquesta informació ja es podrà deduir la dificultat de transport o de tractament, per exemple per un contingut molt elevat d'aigua, o les dificultats d'aplicació directa i d'emmagatzematge per problemes d'olor i d'aspecte en general. La mostra, una vegada seca, es tritura i es deixa a punt per poder-hi fer les anàlisis sobre mostra seca.

### *Altres determinacions físiques*

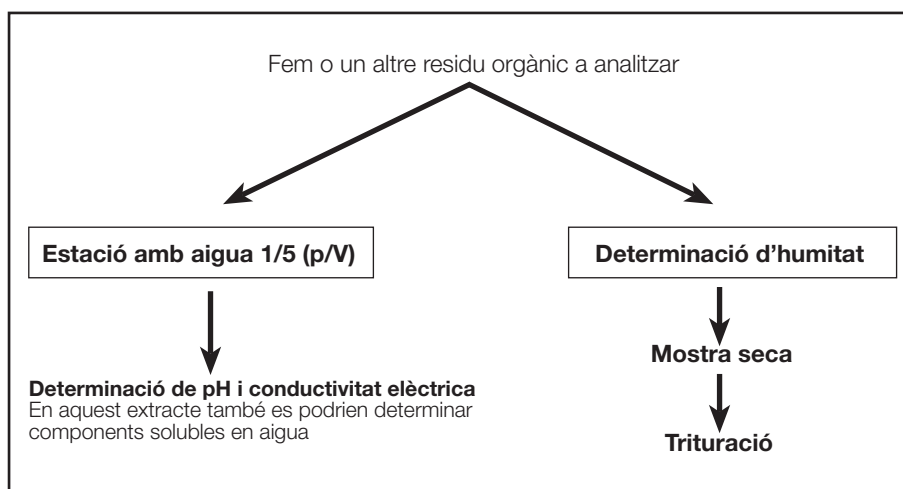
A més de les característiques anteriors, es poden determinar la granulometria i el contingut en impureses.



**Figura 4.** Exemple de determinació de la granulometria d'una mostra de compost de residus municipals

### *Característiques fisicoquímiques*

El pH i la conductivitat elèctrica (CE) són dues característiques bàsiques que cal conèixer, sigui quina sigui l'aplicació que s'hi hagi de donar. Aquestes determinacions permeten establir la idoneïtat de les condicions ambientals generades pels mateixos residus respecte a l'activitat biològica del sòl i al desenvolupament vegetal. Un pH molt extrem pot limitar la seva aplicació o almenys la dosi d'aplicació. Una CE elevada pot limitar molt la seva dosi d'aplicació o la zona, segons el tipus de conreu, l'aigua que es faci servir per regar, etc.



**Figura 5.** Esquema de les determinacions bàsiques que s'han de fer en un residu orgànic.

Determinacions com el pH i la CE es realitzen en un extracte aquós de la mostra humida (1/5 v/v mostra/aigua). És molt important establir un mètode de preparació de l'extracte per dur a terme la determinació, a fi de facilitar la comparació de resultats i establir limitacions.

Pot ser interessant utilitzar també l'extracte aquós preparat per determinar pH i CE per determinar la coloració de l'extracte (colors foscos acostumen a indicar una millor estabilitat de la MO).

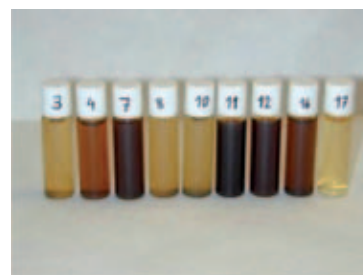
### Característiques químiques

En les determinacions químiques, cal diferenciar les referides a la matèria orgànica (MO) i la seva qualitat de les referides als nutrients i les que fan referència a la presència de contaminants.

### Caracterització de la matèria orgànica

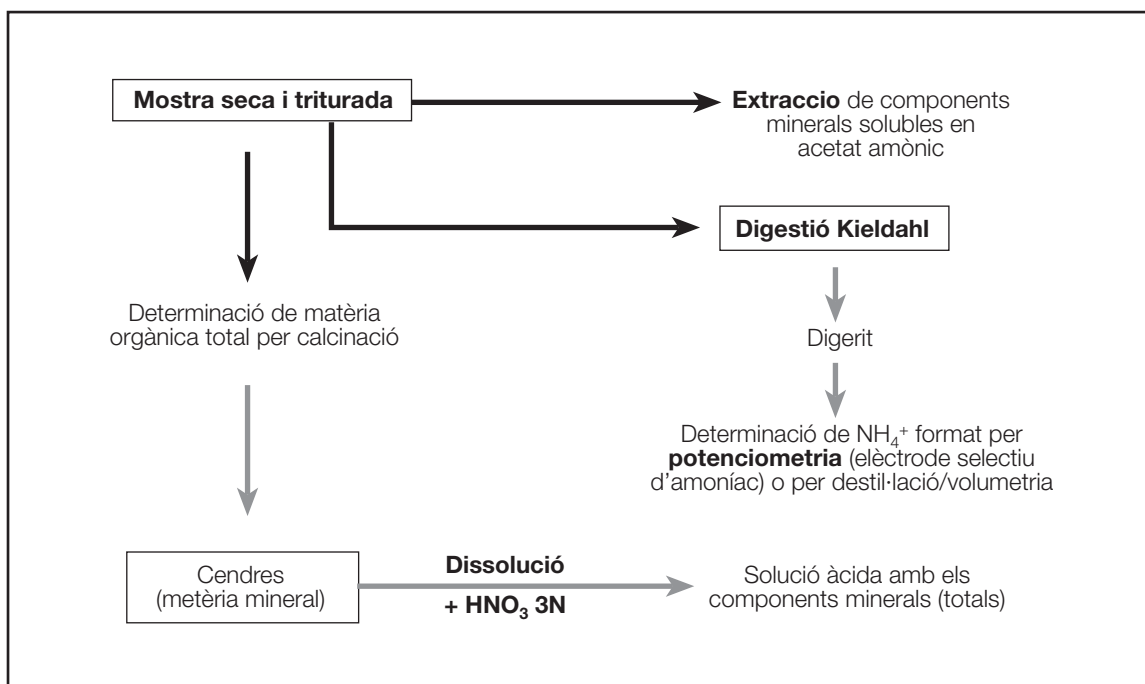
És un paràmetre important, tant si cal tractar el residu, emmagatzemar-lo, abocar-lo o aplicar-lo al sòl. Les aplicacions de matèria orgànica acostumen a ser necessàries en els nostres sòls, perquè en tenen continguts baixos, però cal tenir una idea de la seva qualitat, de la seva degradabilitat, ja que interessa que la seva aplicació produeixi uns efectes beneficiosos i a llarg termini. També un contingut elevat de MO molt degradable, juntament amb continguts elevats d'humitat, pot afavorir transformacions anaeròbies durant el transport o l'emmagatzematge. Aquestes transformacions, en cas que la mostra contingui compostos de sofre, poden provocar l'emissió de sulfur d'hidrogen i es podrien donar situacions de risc. Una matèria orgànica molt degradable pot desaparèixer molt ràpidament i, per tant, la seva aplicació pot no resultar eficaç o bé provocar problemes de pudors i fermentacions no desitjades.

Matèria orgànica total (MOT). Es tracta d'una simple determinació per gravimetria indirecta, en què es mesura la pèrdua de pes causada per la combustió de la matèria orgànica. La quantitat que en porti el producte és important per treure rendibilitat a l'aplicació.<sup>[15]</sup>



**Figura 6.** Coloracions de diferents extractes de mostres de residus orgànics

Carboni oxidable. És una determinació del contingut en matèria orgànica oxidable per via humida, utilitzant una barreja de dicromat potàssic i àcid sulfúric.<sup>[15]</sup> Els compostos orgànics de naturalesa química simple (sucres, àcids orgànics de cadena curta, etc.) són oxidats completament, però altres substàncies més complexes, com els compostos húmics, els derivats aromàtics i materials amb un gran contingut de lignines, no s'oxiden totalment. És una activitat formativa des del punt de vista analític, però no és prou aclaridora per a la caracterització de materials orgànics; a més, presenta el problema important dels residus que genera al laboratori.<sup>[4]</sup>



**Figura 7.** Determinacions que cal fer sobre la mostra seca i triturada.

Nitrogen Kjeldhal. Es pot determinar sobre la mostra humida o seca; en cada cas, els resultats i la informació són diferents. El fet que es faci una determinació o l'altra depèn sobretot de l'aspecte i l'homogeneïtat/heterogeneïtat de la mostra, així com de quina forma de N esperem que hi sigui més present. En mostres molt heterogènies, la determinació en mostra humida pot facilitar resultats molt poc reproduïbles i significatius, tot i donar a la vegada el nitrogen orgànic més l'amoniacal. Si es realitza sobre mostra seca, s'haurà perdut la majoria de nitrogen amoniacal en l'assecatge i pràcticament només donarem el N orgànic, però amb un valor més fiable.<sup>[15]</sup> Aquest mètode utilitza reactius que, una vegada finalitzat, s'han de recollir i tractar adequadament,

Relació C/N. És un paràmetre molt utilitzat per rutina, però els seus valors s'han de considerar amb precaució i cal donar-los el valor just. Aconsellem calcular-lo dividint la MOT per 2 i després pel N orgànic. Uns valors elevats ens indiquen un material que en degradar-se al sòl pot portar problemes d'immobilització del N i que, si s'hi apliqués un tractament de compostatge, el procés seria lent. Valors molt baixos ens indiquen que alliberarà molt ràpidament N mineral, fet que s'ha de tenir en compte per evitar pèrdues i, per tant, contaminacions. Pot ser interessant valorar conjuntament el grau d'estabilitat (GE) i la relació C/N.



### *Altres característiques de la matèria orgànica*

La determinació de la MOT s'ha de valorar juntament amb la qualitat o, millor dit, estabilitat; per això caldria fer també la determinació del següent:

Matèria orgànica resistent (MOR) a un determinat atac químic i que es pot donar com a matèria orgànica resistent a la hidròlisi respecte a la matèria orgànica total (s'anomena grau d'estabilitat GE).<sup>[7]</sup> i <sup>[22]</sup> En un material sense tractar, la seva resistència pot venir de la composició inicial en biopolímers i, en un material tractat, de les substàncies prehúmiques o húmiques que s'hagin format durant el tractament (digestió anaeròbia, compostatge, etc.). Seria important exigir-ne un valor mínim. Valors molt baixos ens indiquen la facilitat de degradació, que pot donar problemes en l'abocament, l'emmagatzematge o en la seva possible aplicació (sobretot segons la proporció C/N). Una MO poc estable, en ser aplicada al sòl, continua la descomposició i crea un ambient adequat per a la manifestació de microorganismes patògens, la producció de metabòlits tòxics i la reducció dels nivells d'oxigen.

Nitrogen no hidrolitzable (NnH). Aquest paràmetre, encara que una mica laboriós de determinar, pot servir per complementar molt favorablement la informació sobre el N Kjeldhal. Es determina a partir de l'atac realitzat en la mostra per fer el GE i ens indica la part de N orgànic més resistent a la degradació. Cal tenir en compte que un material amb un contingut elevat de nitrogen orgànic i amb poca estabilitat (un grau d'estabilitat baix i un contingut baix en NnH) podria alliberar massa ràpid el nitrogen en aplicar-lo al sòl i crear problemes per pèrdues de nitrogen mineral, que podria arribar a les aigües subterrànies.<sup>[9]</sup> i <sup>[17]</sup>

### *Contingut en nutrients vegetals*

Interessa conèixer quins nutrients porta, si estan equilibrats i si són fàcilment assimilables. Cal tenir en compte que la possibilitat d'aplicar el residu o de no aplicar-lo, i la dosi, no solament dependran del contingut en matèria orgànica, sinó també dels nutrients vegetals; si s'apliquen dosis que fan que sobri algun nutrient, provocariem algun tipus de contaminació o de desequilibri i si algun no s'aplica en la dosi adequada, podem provocar carències i/o desequilibris nutricionals.

El N es pot trobar en diverses formes, tot i que en residus orgànics es troba majoritàriament en forma orgànica; d'aquesta forma ja s'ha comentat que és interessant conèixer-ne el contingut total i el més resistent a la degradació.

De les formes de N mineral podríem parlar del N-nítric i del N-amoniacal. Encara que moltes vegades els seus continguts són baixos, cal tenir-ne una idea; es podria considerar una determinació més aprofundida.

Per exemple, en segons quin tipus de fangs, podem trobar quantitats importants de N-amoniacal. Ignorar-ho podria provocar una aportació excessiva de N. En un compost pot ser interessant determinar nitrats perquè, a part de ser la fracció més aprofitable per a la planta i també la més soluble, està relacionada amb la maduresa. El N-amoniacal s'acostuma a extreure amb KCl, per assegurar-ne l'extracció total, i encara que els nitrats es podrien extreure amb aigua, la seva determinació també s'acostuma a fer en aquest extracte per facilitar les analítiques.<sup>[27]</sup>

Per als altres nutrients principals (P i K) es poden diferenciar, sobretot en el cas del P, els continguts totals i els més assimilables. Es diferenciaran segons el tipus d'extracció.<sup>[11]</sup> i <sup>[15]</sup>

### *Presència de contaminants*

Cal veure'n el contingut i la mobilitat per determinar la possible incidència sobre l'activitat biològica del sòl i el creixement i la qualitat dels conreus. És difícil donar una llista dels que cal comprovar, perquè depèn molt de l'origen del residu: elements potencialment tòxics, contaminants orgànics, patògens... Ens podem limitar a conèixer la possible toxicitat o intentar anar més enllà i veure quina n'és la causa. Coneixent l'origen i les possibles vies de contaminació del residu, s'establiran els contaminants que s'han d'estudiar. En el cas dels contaminants, del que es disposa de més informació (tant analítica com toxicològica) és sobre els elements potencialment tòxics (Cd, Pb, Ni, Cr, etc.). Seria convenient, doncs, pensar a establir dos nivells: totals i assimilables. Els continguts totals s'han de determinar després de destruir la matèria orgànica de la mostra per via seca (calcinació a temperatura controlada)<sup>[9], [15] i [27]</sup> o per via humida (digestió amb barreges oxidants fortes). Els assimilables caldria extreure'ls amb extractants com acetat amònic o solucions complexants (EDTA). Aquesta distinció permet la discussió de si ambientalment és acceptable l'aportació de determinats metalls pel sòl, tot i que siguin insolubles i per tant no assimilables pels cultius.<sup>[18]</sup>

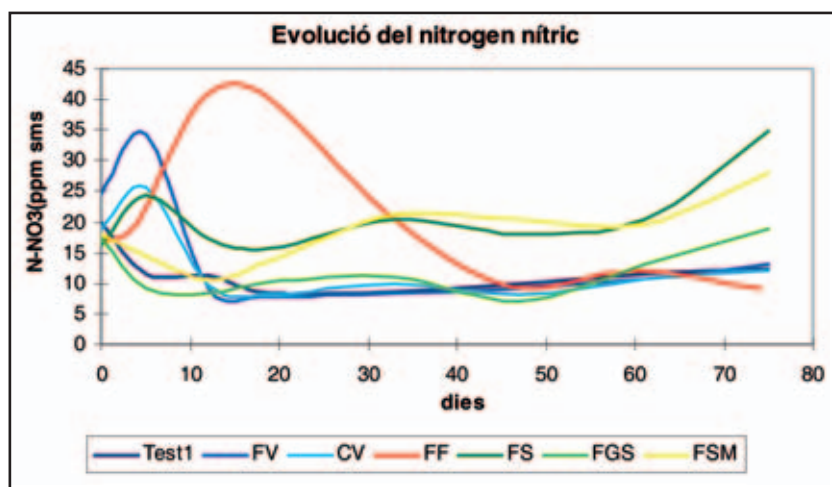
### *Proves biològiques*

Les determinacions comentades més amunt són interessants i definitòries des del punt de vista químic i ens poden donar dades interessants que, relacionades amb una certa experiència en l'aplicació de residus, poden informar del seu comportament; però sempre cal fer proves biològiques, com més simples millor, que donin informació més concreta sobre el comportament al camp. Es poden realitzar tres tipus de proves amb diferents nivells de complexitat i, per tant, d'informació: proves de germinació, proves de creixement i incubacions<sup>[9]</sup> per comprovar degradabilitat i mineralització de nutrients.

Les proves de germinació són les més utilitzades i més fàcils de dur a terme, i en certa manera d'interpretar. Poden donar una idea sobre la toxicitat total, sobre la germinació o simplement de si es produeix un retard. Seguint mínimament la prova, poden informar de si la toxicitat influeix més en el desenvolupament de la plàntula que en la germinació. Es poden fer utilitzant extractes o directament sobre mostra sòlida. Existeix un tipus de prova de germinació sobre mostra sòlida que informa a més de la presència en la mostra de llavors indesitjables.<sup>[30]</sup>

Les proves de creixement es poden realitzar utilitzant plantes del tipus raigràs que permeten, a més de veure la influència del material (i la seva possible toxicitat) sobre el creixement, la velocitat d'alliberació de nutrients. Tot i que les estem aplicant, en aquest moment hi ha una certa dificultat a trobar el substrat, el tipus de sòl o les barreges més adequades que s'han d'aplicar per facilitar que es puguin realitzar d'una manera comparable en diferents laboratoris.<sup>[5] i [21]</sup>

Les incubacions s'acostumen a fer en barreges amb determinats tipus de sòls i permeten determinar tant la degradabilitat o estabilitat del material com la toxicitat sobre l'activitat biològica del sòl o la velocitat de mineralització. Presenten la problemàtica de la variació de característiques del sòl de referència, fet que dificulta la comparació de resultats. S'hauria de mirar d'establir mètodes utilitzant barreges amb sorra inerta d'una determinada granulometria o utilitzar productes orgànics de composició coneguda i amb una complexitat diferent, que permetessin (utilitzant qualsevol tipus de sòl) establir uns nivells base.<sup>[10], [16] i [19]</sup>



**Figura 8.** Exemple d'evolució del nitrogen nítric durant la incubació de residus orgànics (test 1: testimoni; FV; FF, FS, FGS, FSM: fangs; CV: compost). Font: <sup>[10]</sup>

La determinació de la temperatura al llarg d'un procés de compostatge resulta molt informativa si s'interpreta correctament. En teoria, quan el procés està finalitzant, el compost hauria d'assolir temperatures pròximes a l'ambiental.<sup>[24]</sup> Un compost insuficientment estable posa en evidència la seva activitat biològica en aïllar una quantitat relativament petita de material dins un vas Dewar. El test d'autoescalfament mesura l'increment de temperatura produït per l'activitat microbiana d'una mostra en unes condicions determinades d'humitat dins un recipient aïllat tèrmicament durant un temps determinat. La generació de calor es manifesta si s'assoleixen les condicions adients per al desenvolupament microbiològic, especialment en el que fa referència a aeració i humitat. Entre 2 i 9 dies d'experiment ja es poden obtenir resultats, si bé les mostres de compostos immadurs assoleixen abans el pic màxim que els madurs o més estables.<sup>[2]</sup> i <sup>[3]</sup> En principi, un material madur es manté estable encara que s'humitegi i s'aïregi. Una preparació adient de la mostra és fonamental per obtenir un bon resultat. La primera, prevista per la diversa bibliografia, consisteix a subministrar un grau d'humitat adequat, ja que la humitat de la mostra pot fer variar els resultats.<sup>[2]</sup> i <sup>[3]</sup> Per igualar les condicions per a totes les mostres, cal afegir-hi aigua. Aquesta operació es fa en la majoria dels casos «a ull», de tal manera que la mostra adquireixi un «cert grau de plasticitat», que estigui humida però no degotegi en pressionar-la amb la mà. En el treball de Condes i Induráin,<sup>[6]</sup> es va establir que la humitat més adient per a l'activitat microbiana és del 50 % per a mostres de compost de fracció orgànica. L'altre aspecte important en la preparació de la mostra consisteix a garbellar a 1 mm abans d'afegir-hi l'aigua; amb aquesta pràctica s'aconsegueix igualar les condicions de totes les mostres, ja que el garbellament final que es fa a les plantes no sempre és el mateix.



**Figura 8.** Materials i preparació del test d'autoescalfament

**Taula 3.** Classificació de l'estabilitat <sup>[30]</sup>

Increment màxim de temperatura neta (T vas – T ambient)	Grau	Tipus de compost
< 10 °C	V	Estable
10–20 °C	IV	Estable
20–30 °C	III	Actiu
30–40 °C	II	Actiu
> 40 °C	I	Fresc

### 2.3 Fase III. Discussió dels resultats obtinguts

#### *Interpretació agronòmica dels resultats*

Es poden trobar dades analítiques de mostres de compost molt variades a <sup>[12]</sup>.

Un cop discutides les possibles determinacions analítiques i realitzades les que es considerin més oportunes d'acord amb el residu de què es disposa i l'aplicabilitat que se li vol donar en el sector agrari, es proposa discutir els resultats obtinguts. Ompliu la taula 6 tenint en compte la legislació espanyola (taula 4) i l'avançament de la legislació europea pel que fa a metalls pesants (taula 5).

**Taula 4.** Legislació espanyola,<sup>[20]</sup> de 8 de juliol, sobre productes fertilitzants (classes A, B i C, vegeu el text del RD).

% H = 30–40			
C/N < 20			
% MOT > 35			
% Impureses < 3			
Granulometria: pedres i graves Ø > 2 mm menys del 3 %			
90 % partícules Ø > 25 mm			
Contingut en metalls			
	Classe A	Classe B	Classe C
mg · (kg sms) <sup>-1</sup> Zn			
200	500	1000	
mg · (kg sms) <sup>-1</sup> Cu	70	300	400
mg · (kg sms) <sup>-1</sup> Ni	25	90	100
mg · (kg sms) <sup>-1</sup> Cr	70	250	300
mg · (kg sms) <sup>-1</sup> Pb	45	150	200
mg · (kg sms) <sup>-1</sup> Cd	0.7	2	3
mg · (kg sms) <sup>-1</sup> Hg	0.5	1.5	2.5

**Taula 5.** Avançament de la legislació europea sobre contingut de metalls pesants

	Legislació europea (metalls norm. 30 % MO)	
	Tractament biològic de residus orgànics (2n esborrany)	
Material	Classe 1	Classe 2
mg · kg <sup>-1</sup> Zn	200	400
mg · kg <sup>-1</sup> Cu	100	150
mg · kg <sup>-1</sup> Ni	50	75
mg · kg <sup>-1</sup> Cr	100	150
mg · kg <sup>-1</sup> Pb	100	150
mg · kg <sup>-1</sup> Cd	0.7	1.5

**Taula 6.** Interpretació dels resultats

Planta		
Material		
Data de mostreig		
	<b>Valor</b>	<b>Interpretació</b>
<b>Característiques fisicoquímiques</b>		
Matèria seca (%)		
pH		
CE dS/m (1/5)		
Coloració extracte		
<b>Caracterització de la MO</b>		
% matèria orgànica total (MOT)		
% carboni oxidable		
% nitrogen Kjeldhal		
C/N		
% matèria orgànica resistent (MOR)		
% nitrogen no hidrolitzable		
% MO resistent sobre MO total		
% N no hidrolitzable sobre N Kjeldhal		
<b>Macronutrients principals</b>		
mg kg <sup>-1</sup> N-NO <sub>3</sub> (1/5)		
mg kg <sup>-1</sup> N-NH <sub>4</sub> (1/5)		
% P		
% K		
% Ca		
% Mg		
% Fe		
% Na		
<b>Contaminants</b>		
mg kg <sup>-1</sup> Zn		
mg kg <sup>-1</sup> Mn		
mg kg <sup>-1</sup> Cu		
mg kg <sup>-1</sup> Ni		
mg kg <sup>-1</sup> Cr		
mg kg <sup>-1</sup> Pb		
mg kg <sup>-1</sup> Cd		

### *Possible valorització de la matèria orgànica en agricultura*

Un cop caracteritzat el producte orgànic, es tracta de discutir-ne la possible valorització en agricultura. A [14] podeu trobar alguns exercicis que poden servir d'exemple.

### **3. Bibliografia**

- [1] BONILLA, M. J. (1983). Influència del mostratge en el seguiment d'una prova de compostatge d'escombraries urbanes i fangs de depuradora. TFC ESAB.
- [2] BRINTON, W.; EVANS, E.; DAVIES, E. W. (1995). Maturity testing for compost end-product quality classification. Mt Vermont, EUA: Woods End Research Associates.
- [3] BRINTON, W. F.; EVANS, E.; DROFFNER, M. L.; BRINTON, R. B. (1995). «Standardized test for evaluation of compost self-heating». BioCycle, núm. 36: 64-69.
- [4] CLAVER, A.; ORMAD, P.; RODRÍGUEZ, I.; OVELLEIRO, J. L. «Tratamiento de residuos procedentes del análisis sistemático de la DQO». Residuos, núm. 73.
- [5] CROS, P. (1994). Estudi sobre el procés de mineralització de fòsfor afegit al sòl en forma de compost. TFC, ESAB.
- [6] CONDES, L.; INDURAIN, M. (2002). Test d'autoescalfament en la qualificació del compost de residus municipals. TFC, ESAB.
- [7] DE LA RIVA, A. (1980). Comparación de técnicas analíticas de determinación del grado de humificación en un fango de depuración usado como abono. Treball final de carrera. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.
- [8] DG ENV.A.2. – EUROPEAN COMMISSION (2001). Biological treatment of biowaste, 2nd draft. Working Document.  
<[http://europa.eu.in/comm/environment/waste/facts\\_en.htm](http://europa.eu.in/comm/environment/waste/facts_en.htm)>
- [9] DIVERSOS AUTORS (1987). Mètodes d'anàlisi de compost i de fangs de depuradora. Publicació interna ESAB.
- [10] FERNÁNDEZ, M. (2000). Mineralització del nitrogen de residus orgànics amb diferents graus de maduresa. TFC, ESAB.
- [11] GIRÓ, F. (1987). Estudi d'alguns mètodes de determinació de fòsfor assimilable en diversos composts utilitzables com a substrats. TFC, ESAB.
- [12] HUERTA, O.; LÓPEZ, M.; SOLIVA, M. (2003). Base de dades de compost. Workshop Internacional de l'ECN amb Exposició: «El futur de la recollida selectiva dels residus orgànics a Europa». European Compost Network. Barcelona, 15 i 16 de desembre de 2003.
- [13] JACAS, J.; SOLIVA, M. (1986). «Recull de diferents paràmetres emprats en la qualificació del compost». Arxius de l'Escola Superior d'Agricultura de Barcelona. 4a sèrie, núm. 9: 25-29.

- [14] JIMÉNEZ, P.; PUJOLÀ, M.; SOLIVA, M. (2003). Exercicis d'anàlisi química agrícola. Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya / UPC.
- [15] JIMÉNEZ, P.; PUJOLÀ, M.; SOLIVA, M. (2004). Guió de pràctiques d'anàlisi química agrícola. Publicació interna ESAB.
- [16] LÓPEZ, S. (2001). Comportament de materials orgànics de diferents orígens en incubacions de curta durada. TFC, ESAB.
- [17] LÓPEZ, M. (2005). Estabilitat i maduresa del compost de residus urbans: determinació, interpretació i aplicabilitat. Projecte de tesi en el Programa de Doctorat Biotecnologia Agroalimentària i Sostenibilitat de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- [18] MARÍN, M.; MARTÍNEZ, M. J. (1999). Estudi del contingut en metalls pesants, totals i assimilables, de compost de RSU. TFC, ESAB.
- [19] NAVARRO, M. (1989). Estudi del procés de mineralització en el sòl del compost de deixalles. TFC, ESAB.
- [20] RD 824/2005, de 8 de juliol, sobre productes fertilizants.
- [21] SANTAMARÍA, N. (1994). Estudi sobre el procés de mineralització del nitrogen d'un compost madur de residus sòlids urbans en condicions de cultiu. TFC, ESAB.
- [22] SAÑA, J. (1985). La utilització dels fangs de depuradores d'aigües residuals urbanes com a adobs: caracterització de la seva fracció orgànica. Tesi doctoral. Facultat de Farmàcia. Universitat de Barcelona.
- [23] SAÑA, J.; SOLIVA, M. (1985). «Necessitat d'una caracterització dels adobs orgànics». Quaderns Agraris de l'ICEA, novembre 1985: 7-22.
- [24] SAÑA, J.; Soliva, M. (1987). El compostatge: procés, sistemes i aplicacions. Servei de Medi Ambient de la Diputació de Barcelona.
- [25] SAÑA, J.; GIRÓ, F.; SOLIVA, M.; FLORENSA, P. (1989). «Methodology used for evaluating the quality of compost produced in Catalonia». Proceedings of Simposio Internazionale Produzione ed impiego del compost: 343-382.
- [26] SOLIVA, M.; CAÑAMERAS, N.; MARTÍNEZ, F. X. Congrés ICEA. Torre Marimon. Caldes de Montbui.
- [27] SOLIVA, M. (1992). Control de la qualitat del compost («Estudis i monografies, 16: La gestió municipal dels residus sòlids urbans»). Servei de Medi Ambient de la Diputació de Barcelona.
- [28] SOLIVA, M. (2001). Compostatge i gestió de residus orgànics («Estudis i monografies, 21»). Servei de Medi Ambient de la Diputació de Barcelona.
- [29] SOLIVA, M.; BERNAT, C.; GIL, E.; MARTÍNEZ, X.; PUJOL, M.; SABATÉ, J.; VALERO, J. (2004). Organic waste management in education and research in agricultural engineering schools.

International Conference Education in Sustainable Development EESD 2004. Barcelona, octubre de 2004.

[30] TMECC (2002). «Organic and Biological Properties». Test Methods for the Examination of Composting and Compost.  
<<http://tmecc.org/tmecc>>



## Capítol 8

# Disseny de l'àrea d'un sedimentador per al tractament d'aigües residuals

ALEX CORNET<sup>1</sup> I JOAN DE PABLO<sup>1, 2</sup>

<sup>1, 2</sup> Departament d'Enginyeria Química

Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>2</sup> CTM – Centre Tecnològic

### 1. Introducció

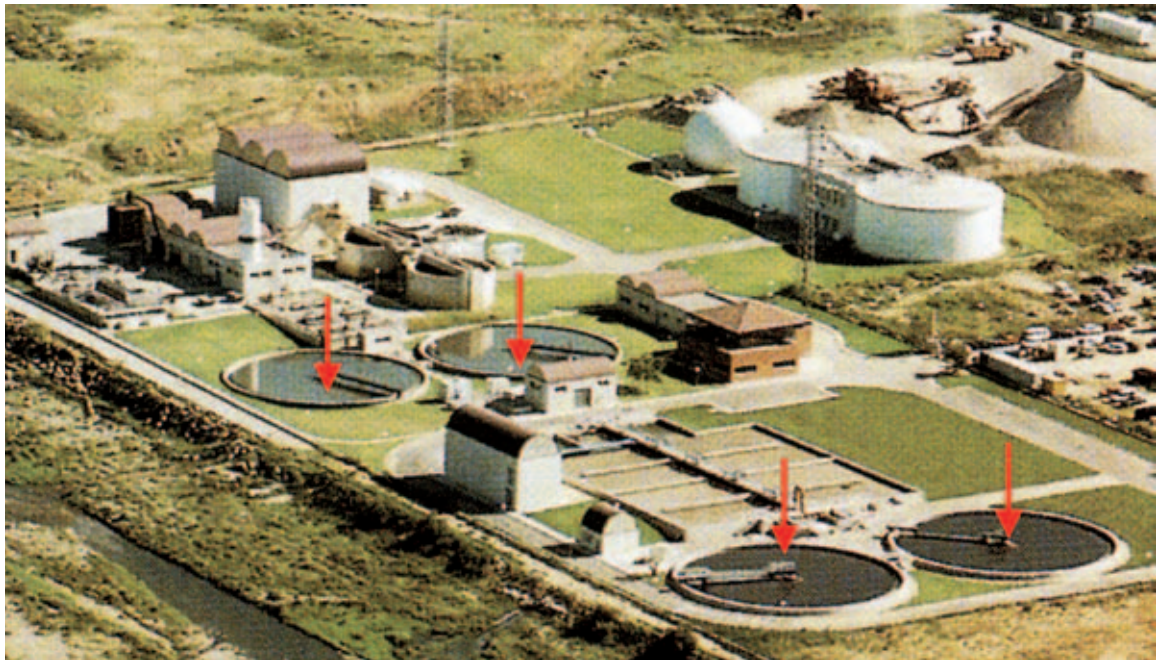
La sedimentació s'utilitza, entre altres, en el tractament d'aigües residuals per separar els sòlids en suspensió. Aquesta separació està basada en la diferència de pes específic entre les partícules sòlides i el fluid on es troben.

A la figura 1, es pot veure una EDAR (estació de depuració d'aigües residuals) on s'observen quatre clarificadors/sedimentadors. Els sedimentadors de les EDAR permeten també l'eliminació de la matèria orgànica, que es pot observar en la disminució de la demanda biològica d'oxigen (DBO) de l'aigua residual. En les plantes potabilitzadores d'aigua (ETAP), les operacions de sedimentació s'utilitzen després dels processos de floculació.

Es poden considerar tres tipus de processos de sedimentació que depenen de la natura dels sòlids presents en suspensió.

- **Sedimentació discreta:** Les partícules que es dipositen mantenen la seva individualitat. Les propietats físiques de les partícules (mida, forma, pes específic) no canvien durant el procés. La deposició de partícules de sorra a les sorreres és un exemple típic de sedimentació discreta.

- Sedimentació amb floculació: L'aglomeració de les partícules ve acompanyada de canvis en la densitat i en la velocitat de sedimentació. La sedimentació que té lloc en els sedimentadors primaris és un exemple d'aquest procés.
- Sedimentació per zones: Les partícules formen una espècie de manta que sedimenta com una massa total i presenta una interfase diferent pel que fa a la fase líquida. Exemples d'aquest procés inclouen la sedimentació de fangs activats en els clarificadors secundaris i la floculació d'alúmina en el tractament d'aigües.



**Figura 1.** Vista aèria d'una estació de depuració d'aigües residuals

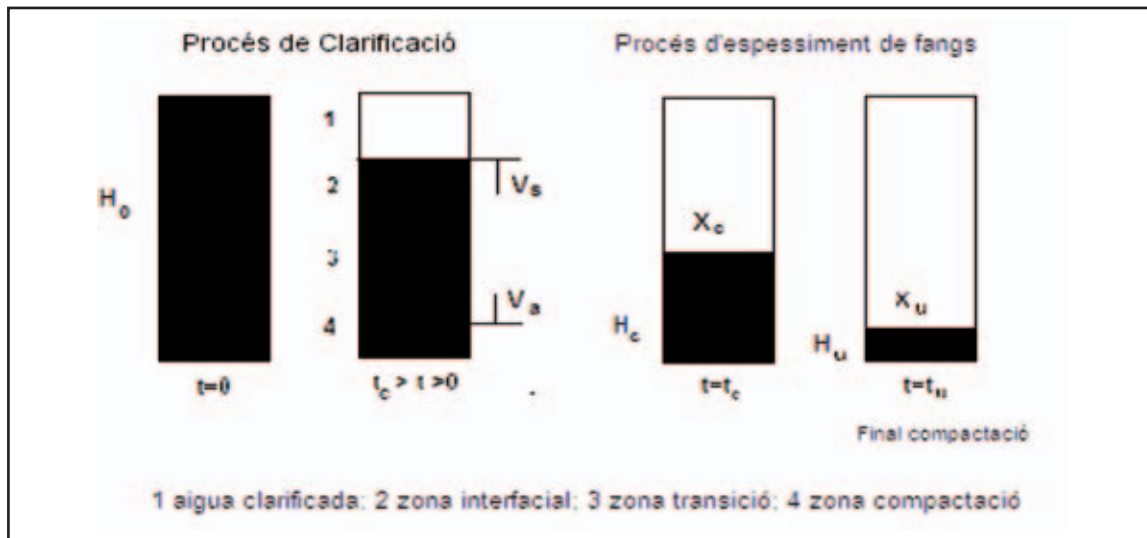
## 2. Objectius

El principal objectiu d'aquesta pràctica és l'estudi de la sedimentació per zones a escala de laboratori. L'obtenció de dades experimentals de sedimentació en discontinu ha de permetre el disseny d'un sedimentador en continu.

## 3. Fonaments

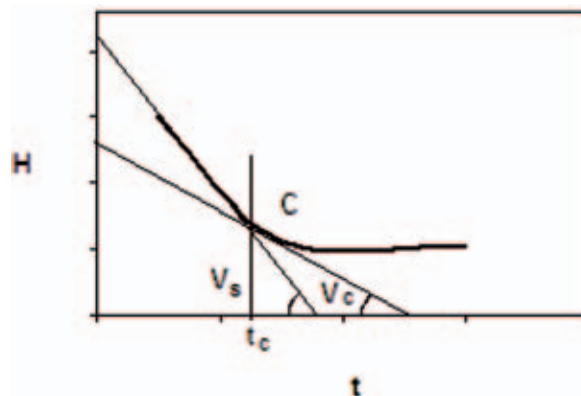
Aquest tipus de sedimentació es dona en concentracions de sòlids superiors a  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . La capa de fangs presenta diverses zones perfectament diferenciades. Cada zona es caracteritza per una concentració específica en fangs i per una velocitat de sedimentació determinada.

A la figura 2 es mostra un esquema del procés de sedimentació. La interfase 1 es mou cap avall a una velocitat constant  $V_s$ , mentre que la interfase 2 es mou cap amunt a una velocitat constant  $V_a$ . En alguns casos, les zones de compactació i interfacial es poden arribar a trobar, en un moment crític ( $t_c$ ), i la zona de transició desapareix. En aquest moment, el fang sedimentat té una concentració uniforme  $X_c$ , que s'anomena concentració crítica.



**Figura 2.** Esquema del procés de sedimentació

S'inicia la compactació i el fang es comença a espessir, fins que arriba a una concentració final  $X_u$ . La velocitat de sedimentació en el moment  $t_c$  correspon a un valor  $V_c$ , que ve donat pel pendent de la tangent a la corba de sedimentació en el punt C, com es pot veure a la figura 3, en què  $V_c < V_s$ .



**Figura 3.** Evolució de l'altura de fang amb el temps

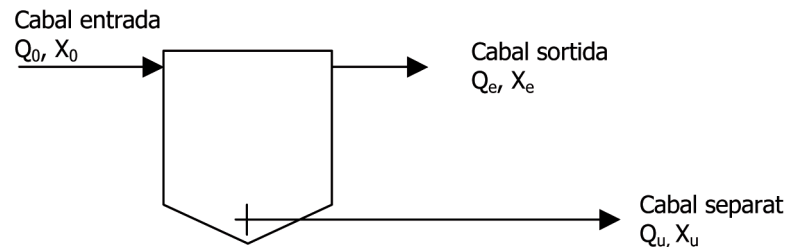
El procediment per dissenyar clarificadors que operin en aquestes condicions de sedimentació per zones és el següent:

1. Es calcula l'àrea de la superfície mínima que es necessita per clarificar el fang.
2. Es calcula l'àrea de la superfície mínima que es necessita per aconseguir l'espessiment dels fangs i assolir les concentracions desitjades.
3. Es considera la més gran d'aquestes dues àrees com a àrea de disseny per al clarificador.

### 3.1 Determinació de l'àrea mínima per aconseguir la clarificació dels fangs

El balanç de matèria d'un sedimentador per zones ve donat pels cabals i les composicions que es

poden veure a la figura 4. Suposant que la concentració dels sòlids a la sortida és nul·la, tenim:



**Figura 4.** Esquema del procés

$$Q_u \cdot X_u = Q_0 \cdot X_0$$

$$Q_e = Q_0 - Q_u$$

L'àrea mínima per a la clarificació  $A_c$  depèn de la velocitat  $V_s$ , per la qual les partícules en suspensió sedimenten abans d'arribar a la concentració crítica interfacial  $X_c$ . En condicions de cabal constant, la velocitat de l'aigua no pot excedir  $V_s$  si es vol obtenir la clarificació. Per tant:

$$A_c = Q_e / V_s$$

$Q_e$  és el cabal de sortida ( $m^3 h^{-1}$ ),  $V_s$  és la velocitat de sedimentació per zones ( $m h^{-1}$ ) i  $A_c$ , l'àrea mínima requerida per a la clarificació ( $m^2$ ).

### 3.2 Determinació de l'àrea mínima per aconseguir l'espessiment del fang

L'àrea es determina a partir del flux de sòlid al sedimentador ( $F_i$ ). Aquest es calcula a partir de:

$$F_i = X_i \cdot V_{si}$$

$F_i$  és el flux de sòlids ( $kg m^{-2} h^{-1}$ ),  $V_{si}$  és la velocitat de sedimentació ( $m h^{-1}$ ) i  $X_i$ , la concentració de sòlids ( $kg m^{-3}$ ).

En un sedimentador en continu, els sòlids es transporten cap a la part inferior tant per gravetat com pel moviment provocat per la separació dels fangs en el fons del clarificador. Per tant, el flux total serà:

$$F_T = F_i + F_u$$

$F_T$  és el flux total de sòlids,  $F_i$  és el flux de sòlids en funcionament discontinu i  $F_u$  és el flux de sòlids extrets.  $F_u$  és pot escriure com:

$$F_u = X_i V_u$$

$V_u$  és la velocitat del fang deguda a l'extracció que es fa per la part inferior. El flux total es pot variar controlant  $V_u$ , ja que està determinat pel cabal de bombeig d'extracció de fangs.

$$F_T = X_i \cdot V_{si} + X_i V_u$$

Si es pogués obtenir un valor  $F_T$  tal, que s'obtingués el valor desitjat de  $X_u$ , és a dir, de la concentració de sòlids en el fang del clarificador, l'àrea mínima del sedimentador en continu requerida per l'espessiment del fang es podria obtenir a partir de:

$$A_{min} = Q_0 \cdot X_0 / (F_T)_L$$

Perquè el valor de  $F_T$  sigui mínim  $((F_T)_L)$ , se n'ha d'anul·lar la derivada respecte a la concentració i això té lloc quan les derivades dels seus dos components són iguals i de sentit contrari.

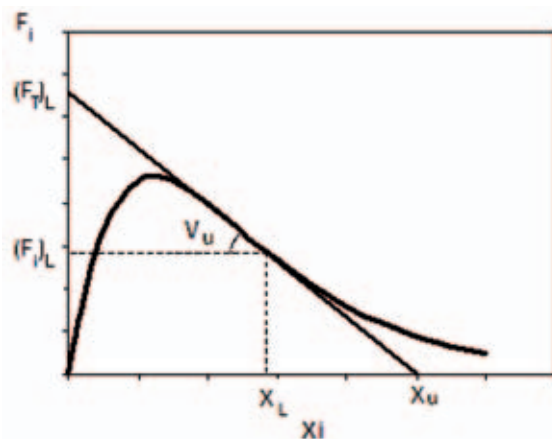
$$\frac{dF_t}{dX_i} = 0 \quad \frac{dF_i}{dX_i} = - \frac{dF_u}{dX_i}$$

Tenint en compte les expressions de  $F_i$  i de  $F_u$ , s'obté:

$$\frac{dF_i}{dX_i} = -V_u$$

Per tant, prenent  $X_L$  com la concentració a la qual es produeix el flux total mínim, la tangent de la corba  $F_i$  per a aquesta concentració és igual a  $-V_u$ . La tangent talla l'eix d'ordenades en  $(F_T)_L$  i l'eix d'abscisses en  $X_u$  (vegeu la figura 5). Per tant, per determinar l'àrea del sedimentador s'han de seguir els passos següents:

1. Conèixer les dades de cabal i la composició d'entrada.
2. Fixar la composició desitjada de sortida.
3. Obtenir la corba  $F_i$  en funció de la concentració.
4. Traçar la tangent a la corba que passi per  $(0, X_L)$ . El tall de la tangent amb l'eix y és  $(F_T)_L$ .
5. El valor de l'àrea es pot calcular a partir de l'equació següent:



**Figura 5.** Representació del mètode gràfic de determinació del flux total mínim

### 3.3 Part experimental

S'utilitzen provetes graduades de 1.000 ml d'una altura estàndard de 0,34 m. Es preparen 5 dissolucions amb concentracions de  $\text{CaCO}_3$  de 100, 150, 200, 250 i 300 g/l, i unes gotes de blau de metilè per facilitar la distinció de la interfase sòlid-líquid. S'omplen 5 provetes i es deixen reposar, es

mesura l'altura de la interfase sense agitar la proveta; a continuació, s'agita vigorosament la proveta prenent com a temps zero el moment en què es deixa en repòs i se segueix l'altura de la interfase en funció del temps. Aquest procés es repeteix per a cada concentració.

Per a cada concentració es fa una representació gràfica de l'altura de la interfase en funció del temps. El pendent de la recta correspon al valor de  $V_{si}$ . A continuació, per regressió lineal de  $\ln V_{si}$  enfront de  $X_i$ , s'obté l'equació que relaciona les variables  $V_{si}$  i  $X_i$ .

A continuació es construeix la corba pel funcionament discontinu representant la funció  $F_i = X_i V_{si}$  enfront de  $X_i$  com es pot veure a la figura 4. A partir de la gràfica es determina  $(F_T)_L$ ,  $(F_i)_L$  i  $X_L$ .

### 3.4 Determinació de l'àrea mínima requerida per a la sedimentació

Les dades obtingudes es poden utilitzar per determinar les dimensions d'un sedimentador en continu coneixent les dades d'entrada, el cabal i la concentració de sòlids, i la concentració de sortida desitjada pels fangs. Així, per exemple, si suposem un cabal d'entrada de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  amb una concentració de sòlids en suspensió de  $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , i es desitja una concentració de sòlids en suspensió en el cabal de fangs de  $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , determineu:

1. Cabals del procés (vegeu la figura 4).
2. Àrea mínima per a la clarificació.
3. Àrea mínima per a l'espessiment del fang (vegeu la figura 5).
4. Els fangs són una problemàtica important a les depuradores. Descriu diferents opcions de tractament i gestió mediambiental dels fangs.

## 4. Bibliografia

[1] RAMALHO, R. S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté.

[2] METCALF, E. (1998). Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. Ed. McGraw-Hill.

[3] COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. (1981). Ingeniería Química. Tom II: «Operaciones básicas», Ed. Reverté.

## Capítol 9

# Estudi de l'impacte de les fuites d'hidrocarburs del petroli sobre aigües subterrànies

VICENS MARTÍ I CRISTINA GONZÁLEZ

CTM – Centre Tecnològic

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

La fuga d'hidrocarburs derivats del petroli des de tancs soterrats d'emmagatzematge de combustible implica la migració de múltiples compostos orgànics a través del terreny en forma de fase lliure, que pot surar sobre un nivell freàtic o dissoldre's en l'aigua subterrània.

Aquests mecanismes impliquen generalment l'equilibri fisicoquímic entre la fase lliure i l'aigua i el transport de compostos orgànics fins a punts d'ús on es pot donar lloc a vies d'exposició que afectin la salut humana.

Considerant l'aigua subterrània per al consum humà, el Reial decret 140/2003, de 7 de febrer (transposició de la Directiva 98/83/CE, de 3 de novembre), estableix els paràmetres químics i paràmetres indicadors per al control de l'aigua destinada a aquest ús.

La mesura de certs paràmetres químics orgànics en l'aigua de consum implica utilitzar tècniques instrumentals d'anàlisi, com la cromatografia de gasos amb espectrometria de masses (GC/MS), capaces de determinar els múltiples compostos associats a les fuites d'hidrocarburs, entre els quals, quant a risc i normativa, hi destaquen el benzè i diversos hidrocarburs aromàtics policíclics (HAP).

Entre els paràmetres indicadors de control d'aigua de consum associats als vessaments d'hidrocarburs (a part dels organolèptics color, olor i sabor), hi destaquen l'oxidabilitat (determinació de l'índex

de permanganat) i el carboni orgànic total. D'entre aquests dos mètodes, l'oxidabilitat és un mètode més senzill, atès que és una variant de la volumetria redox amb permanganat aplicada a una aigua amb matèria orgànica, com és la derivada de posar en contacte un hidrocarbur del petroli amb aigua com a simulació d'una fuga de combustible.

## 2. Objectius

La pràctica està integrada per dues parts: una part teòrica, de càlcul teòric d'equilibri de compostos dels hidrocarburs en aigües, i una part experimental, de valoració redox (oxidabilitat amb permanganat), per determinar la càrrega dels compostos orgànics en aigua que ha contactat amb combustible gasoil.

Els objectius d'aquesta pràctica, per tant, són múltiples i inclouen objectius mediambientals, de generació de continguts virtuals i de disseny sostenible, a part dels didàctics.

### 2.1 Objectius de temàtica mediambiental

La integració de les dues parts de la pràctica té com a objectiu clar l'estudi d'una temàtica mediambiental concreta: l'efecte de les fugues d'hidrocarburs del petroli sobre aigües subterrànies.

La pràctica també integra l'ús de legislació<sup>[2]</sup> i normatives<sup>[1]</sup> de control ambiental.

### 2.2 Objectius de generació de continguts per a espais virtuals

La primera part de la pràctica s'ha dissenyat per utilitzar eines de càlcul, del tipus aplicació de programari, que estan disponibles a Internet, ja que utilitza com a eina un programari d'accés lliure de l'Agència de Protecció Ambiental Nord-americana (USEPA).

Aquesta metodologia permet donar resposta a la concentració de determinats compostos individuals en l'aigua subterrània d'una manera ràpida i sense necessitat d'una instrumentació que no s'acostuma a disposar en els laboratoris, que complicaria molt la pràctica i que generaria més quantitat de residus especials.

### 2.3 Objectius de redisseny sostenible

La segona part de la pràctica s'ha redissenyat quant a volums de mostra i reactius, per tal de minimitzar el volum de productes químics i residus dins del laboratori. S'ha escollit com a base de disseny la realització d'unes 20 determinacions d'oxidabilitat per sessió.

### 2.4 Objectius didàctics

L'objectiu principal d'aquesta pràctica és, per una banda, la comprensió teòrica del fenomen d'equilibri entre els compostos dels hidrocarburs del petroli i l'aigua i, per l'altra, l'aplicació de l'oxidabilitat (determinació de l'índex de permanganat) com un indicador per al control d'aigua que ha estat en contacte amb un hidrocarbur de petroli.

L'estudi teòric dels fenòmens d'equilibri integra conceptes com la fracció molar, el coeficient d'activitat, el volum molar i la solubilitat dels compostos orgànics en aigua per mitjà de la llei de Raoult.



La determinació de l'oxidabilitat a escala experimental està en consonància amb les volumetries redox que tradicionalment s'imparteixen en cursos de química analítica no instrumental dins d'enginyeria química i altres enginyeries.

Des del punt de vista orientatiu, la pràctica està concebuda per efectuar la part teòrica d'equilibri i la determinació d'oxidabilitat en una mateixa sessió de dues hores. En funció de la disponibilitat d'espai i material al laboratori i del temps, es poden dividir els alumnes en dos grups (un grup que modelitza i un altre grup que analitza), que es poden intercanviar les tasques de les dues parts de la pràctica o bé les poden intercalar.

### 3. Fonaments

#### 3.1 Fonaments de l'equilibri entre hidrocarburs del petroli i aigua

Els fonaments de l'equilibri entre cada compost integrant d'una barreja de dissolvents orgànics (com els hidrocarburs del petroli) i l'aigua vénen donats per l'expressió de la constant de partició  $K_{fw}$ , entre el combustible i l'aigua:<sup>[3]</sup>

$$K_{fw} = \frac{\chi_{if}}{\chi_{iw}} = \frac{\gamma_{iw}}{\gamma_{if}}$$

Referit a l'hidrocarbur,  $\chi$  expressa la fracció molar del compost i  $\gamma$  el coeficient d'activitat de cada compost orgànic (**i**) en l'hidrocarbur del petroli (**f**) i en l'aigua (**w**).

Expressant la fracció molar en aigua en funció de la concentració molar  $C_{iw}$  en l'aigua en l'equilibri (solubilitat efectiva) i del volum molar  $V_{iw}$ , s'obté:

$$C_{iw} = \frac{\chi_{if} \gamma_{if}}{\gamma_{iw} V_{iw}}$$

Empíricament,  $\gamma_{iw}$  s'equipara al valor que es produeix quan s'arriba a la concentració de saturació corresponent al compost orgànic en aigua (S) si l'equilibri fos directe (compost orgànic-aigua) i  $\gamma_{if}$  es pren com la unitat, hipòtesi que finalment permet obtenir la solubilitat efectiva.

Aquesta expressió és la que s'utilitza en el programari en línia.

$$C_{iw} = \chi_{if} S$$

#### 3.2 Fonaments de l'oxidabilitat en aigües en contacte amb hidrocarburs del petroli

L'oxidabilitat de les aigües en aquesta pràctica es mesura sobre la base de la utilització d'un oxidant (permanganat) en un medi àcid, que oxida la matèria orgànica a  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . La semireacció d'oxidació és:

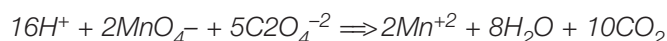


L'acció d'oxidació del permanganat equival a la semireacció:



Això significa que igualant les semireaccions redox de les dues expressions anteriors, 4 mols de  $MnO_4^-$  equivalen a 5 mols de  $O_2$ .

La utilització d'oxalat com a solució primària permet realitzar la titulació de la solució de permanganat atenent el procés redox:



## 4. Metodologia

### 4.1 Metodologia del càlcul teòric de l'equilibri entre hidrocarburs del petroli i aigua

#### *Introducció i abast*

Aquesta part de la pràctica permet fer el càlcul de l'equilibri teòric entre compostos orgànics de diversos combustibles del petroli i aigua, utilitzant un programari específic. L'eina integra una petita base de dades amb solubilitats i concentracions de compostos en els productes del petroli —bàsicament benzè, toluè, etilbenzè i xilè (BTEX)—, que és modificable per l'usuari.

#### *Materials*

Per a la realització d'aquesta pràctica cal un ordinador portàtil comú connectat a Internet.

#### *Procediment*

Accediu a la pàgina web EPA On-line Tools for Site Assessment, Calculation Effective Solubility Calculation (vegeu la figura 1, a la part inferior):

<http://www.epa.gov/athens/learn2model/part-two/onsite/es.htm>.

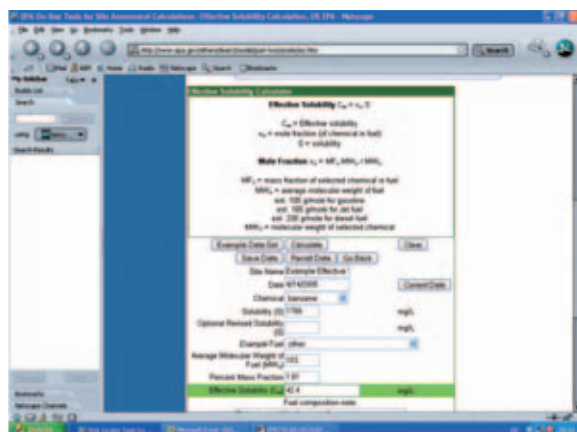


Figura 1. Pàgina web per al càlcul de la solubilitat efectiva

Seleccioneu a «Example Fuel» other, i calculeu mitjançant la pàgina web EPA On-line Tools for Site Assessment, Calculation Effective Solubility Calculation la solubilitat efectiva del benzè, etilbenzè, toluè i xilè en aigua, utilitzant les composicions màximes dels hidrocarburs del petroli resumides a la taula 1 del full de pràctica.<sup>[4]</sup>

Adopteu un pes molecular mitjà de 103 g/mol per a la benzina i 233 g/mol per al gasoil i el fueloil. Anoteu els resultats en la mateixa taula 1 del formulari de resultats.

## 4.2 Metodologia de la determinació de l'oxidabilitat en aigües en contacte amb hidrocarburs del petroli

### *Introducció i abast del mètode*

Aquest protocol descriu un mètode per a la determinació de l'índex de permanganat, o oxidabilitat, que és aplicable a aigües afectades per hidrocarburs del petroli i segueix la norma europea sobre qualitat de l'aigua, determinació de l'índex de permanganat.<sup>[5]</sup>

El mètode analític consisteix a fer bullir una mostra d'aigua amb matèria orgànica, amb una quantitat coneguda de permanganat potàssic i àcid sulfúric, durant un temps determinat. Una fracció del permanganat es redueix per acció de la matèria oxidable present a la mostra.

Es determina el permanganat consumit mitjançant l'addició d'una solució d'oxalat sòdic en excés seguida d'una valoració amb permanganat. Al llarg de la pràctica es detallen les mesures de seguretat que s'han de tenir en compte.

### *Material*

#### Aparells

- Aparell calefactor i agitador magnètic
- Balança analítica (preparació prèvia)
- Agitador automàtic de vaivé (opcional)

#### Material

- Vasos de precipitats de 100 ml
- Matrassos aforats de 250 i 500 ml
- Bureta de 10 ml amb divisions de 0,02 ml
- Pipetes de 5, 10, 25 i 50 ml
- Embut de decantació de 100 ml
- Pinces i suports
- Pipetes Pasteur
- Peres o èmbols per pipetejar
- Guants
- Ulleres de protecció
- Vitrina de gasos

### *Reactius*

- Gasoil tipus A, B o C, 250 ml.
- Aigua destil·lada o desionitzada.
- Oxalat sòdic ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) 50 mM: S'asseca l'oxalat sòdic a 120 °C durant 2 h. Dissoleu 6,7 g de l'o-

xalat sec en 1 L d'aigua destil·lada. Aquesta solució és estable durant 6 mesos si s'emmagatzema en la foscor. S'ha de preparar cada vint sessions.

- Oxalat sòdic ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) 5 mM: Es pipetegen 50 ml  $\pm$  0,25 ml de la solució d'oxalat sòdic 50 mM i s'enrasa a 500 ml amb aigua destil·lada. Aquesta solució és estable durant dues setmanes.
- Permanganat de potassi ( $\text{KMnO}_4$ ) 20 mM: Es dissolen 3,2 g de permanganat potàssic en aigua destil·lada i es dilueix a 1 L. S'escalfa la solució a una temperatura entre 90 i 95 °C durant 2 h, es refreda i s'emmagatzema durant 2 dies com a mínim. Es decanta la solució clara i s'emmagatzema en una ampolla de color ambre. S'ha de preparar cada vint sessions. Estandardització: Es pipetegen 25 ml d'oxalat sòdic 50 mM i 10 ml d'àcid sulfúric concentrat. S'escalfa fins a 80-90 °C i es valora amb la solució de permanganat potàssic 20 mM.
- Permanganat de potassi ( $\text{KMnO}_4$ ) 2 mM: Es dilueixen 50 ml de la solució de permanganat potàssic 20 mM i s'enrasa a 500 ml amb aigua destil·lada.
- Àcid sulfúric ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 2 M: Es dilueixen 55,48 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 96 % (conc.) en 500 ml d'aigua destil·lada. A l'hora de preparar aquesta dissolució s'ha de fer amb la protecció adequada, és a dir, amb guants i ulleres de protecció, sempre treballant sota la vitrina de gasos, i s'ha d'anar amb molta cura. Igual que amb la resta d'àcids forts, de primer s'ha d'afegir al matràs l'aigua destil·lada o desionitzada, i després, l'àcid sulfúric.

### *Procediment*

#### Condicions instrumentals i calibratge

S'ha d'encendre la manta calefactora, a temperatura màxima, una estona abans de començar les anàlisis, perquè estigui calenta quan es posen els vasos de precipitats a escalfar.

La manta calefactora s'ha de col·locar sota la vitrina de gasos i s'ha d'anar amb compte de no col·locar material inflamable en contacte amb aquesta, i alhora vigilar de no cremar-se. Si es disposa de dues vitrines de gasos separades, seria recomanable realitzar la part d'equilibri gasoil-aigua en una vitrina diferent d'aquella en què s'ha col·locat la manta calefactora.

S'ha d'evitar utilitzar una altra font de calor, com per exemple un bec de Bunsen, per evitar que el gasoil entri en contacte amb la flama. Al llarg de tota la pràctica s'han de dur guants de protecció i ulleres.

#### *Equilibri gasoil-aigua*

En un embut de decantació s'introdueixen 50 ml d'aigua destil·lada o desionitzada, juntament amb 5 ml de gasoil. Un cop tapat l'embut, s'agita manualment o bé amb un agitador automàtic durant 15 minuts. S'ha de vigilar que la sobrepressió inicial no tregui el tap de l'embut.

Després del temps d'agitació, es deixen reposar les fases durant 30 minuts, col·locant l'embut verticalment amb l'ajut d'un suport i unes pinces (figura 2).

#### *Blanc i estandardització*

Durant aquests minuts d'espera es poden anar fent el blanc i l'estandardització del permanganat 2 mM. El muntatge de la bureta es realitza en un suport adequat, tal com es mostra en la figura 3.



**Figura 2.** Detall de l'equilibri gasoil-aigua

Blanc

1. Es pipetegen 25 ml de l'aigua destil·lada o desionitzada amb una pera o èmbol i s'introdueixen en un vas de precipitats; després s'hi afegixen 5 ml d'àcid sulfúric 2 M. No s'ha de pipetejar mai la dissolució directament amb la boca.

El sulfúric s'ha d'afegir sobre la dissolució (no a l'inrevés) i lentament.

2. Transcorreguts els 10 minuts, s'hi afegixen 5 ml de la solució de permanganat potàssic 2 mM i es torna a deixar 10 minuts més sense treure'l de la manta.

3. Un cop transcorregut aquest temps, s'addicionen porcions de 5 ml d'oxalat sòdic 5 mM fins que la solució es descolori.

En calent, es valora la solució amb permanganat potàssic 2 mM fins a l'obtenció d'una coloració rosa pàl·lid que persisteixi durant 30 s aproximadament. S'anota el volum  $V_0$  de solució de permanganat consumit.

Estandardització

4. Amb la dissolució encara en calent, s'hi afegixen 5 ml més d'oxalat sòdic ( $V_2$ ) 5 mM i es torna a valorar amb permanganat potàssic de concentració nominal 2 mM fins a l'obtenció d'una coloració rosa pàl·lid persistent durant 30 s. S'anota el volum  $V_1$  de solució de permanganat consumit.



**Figura 3.** Detall de la valoració per determinar l'oxidabilitat

D'aquesta manera s'obté la concentració exacta, en mM, de la solució de permanganat potàssic  $C_{perm}$  utilitzada, que és:

$$C_{perm} = \frac{2 \cdot C_{ox} \cdot V_2}{5 \cdot V_1}$$

$V_1$  és el volum de la solució de permanganat consumit en l'estandardització (ml).

$V_2$  és el volum de la solució d'oxalat sòdic 5 mM utilitzat per a la determinació de l'estandardització del blanc (ml).

$C_{ox}$  és la concentració de la solució d'oxalat sòdic (mmol/l).

*Anàlisi de mostra*

Decanteu uns 30-40 ml de la fase aquosa que ha estat en equilibri amb el gasoil. Eviteu que passin a la fase aquosa gotes de gasoil.

Tal com s'ha fet amb el blanc, es pipetegen 25 ml de mostra i s'introdueixen en un vas de precipitats, juntament amb 5 ml d'àcid sulfúric 2 M. Es realitzen els passos de l'1 al 3 de la mateixa manera que amb el blanc, i s'anota el volum V<sub>3</sub> de solució de permanganat C<sub>perm</sub> consumit.

### Mesures i càlculs

Es calcula l'índex de permanganat, I<sub>Mn</sub>, expressat en mil·ligrams d'oxigen per litre (mg O<sub>2</sub>/L), segons l'expressió:

$$I_{Mn} = \frac{(V_3 - V_0) \cdot C_{perm} \cdot M}{V_{mostra}}$$

V<sub>0</sub> és el volum de solució de permanganat consumit en la valoració del blanc (ml).

V<sub>3</sub> és el volum de solució de permanganat consumit en la valoració de la mostra analitzada (ml).

V<sub>mostra</sub> és el volum de la mostra analitzada (ml).

C<sub>perm</sub> és la concentració de la solució de permanganat obtinguda mitjançant l'estandardització, i calculada amb l'expressió 4.1 (mM).

M són els mg d'oxigen/mmol de permanganat, per l'expressió del resultat en oxigen (en aquest cas són 40 mg O<sub>2</sub> corresponents a la ràtio 5 mol O<sub>2</sub> per cada 4 mols de permanganat).

L'interval òptim d'anàlisi és de 0,5 a 10 mg/L d'oxigen. En cas que les mostres presentin un índex de permanganat superior a 10 ppm, s'hauria de diluir la mostra abans de l'anàlisi.

## 5. Resultats

### 5.1 Formulari

**Taula 1.** Resultats del càlcul de l'equilibri hidrocarburs i aigua

	<b>BENZINA (%)**</b>	<b>C<sub>iw</sub> (mg/L)</b>	<b>GASOIL (%)</b>	<b>C<sub>iw</sub> (mg/L)</b>	<b>FUELOIL (%)</b>	<b>C<sub>iw</sub> (mg/L)</b>
<b>Benzè</b>	1,81E+00		5,15E-02		6,25E-02	
<b>Etilbenzè</b>	1,61E+00		1,04E-01		3,40E-02	
<b>Toluè</b>	1,23E+01		3,54E-01		6,75E-02	
<b>Xilè, mescla</b>	5,77E+00		1,21E+00		2,30E-01	
<b>Total</b>	-		-		-	

\* Average Molecular Weight of Fuel (MWO) \*\* Percent mass fraction = 100\*xif

**Taula 2.** Càlcul de l'índex de permanganat

<b>Estandardització permanganat</b>		<b>Càlcul de l'índex de permanganat</b>	
C <sub>ox</sub> (mM)		V <sub>0</sub> (ml)	
V <sub>1</sub> (ml)		V <sub>3</sub> (ml)	
V <sub>2</sub> (ml)		V <sub>mostra</sub> (ml)	
C <sub>perm</sub> (mM)		I <sub>Mn</sub> (mg/L)	

## 5.2 Resultats de la pràctica

**Taula 3.** Resultats del càlcul de l'equilibri hidrocarburs i aigua

	<b>Ciw (benzina) (mg/L)</b>	<b>Ciw (gasoil) (mg/L)</b>	<b>Ciw (fueloil) (mg/L)</b>
<b>Benzè</b>	42,40	2,74	3,32
<b>Etilbenzè</b>	2,38	0,35	0,11
<b>Toluè</b>	72,70	4,79	0,91
<b>Xilè, mescla</b>	9,38	4,41	0,84
<b>Total</b>	126,66	12,29	5,18

En l'estandardització del permanganat, si s'han seguit bé les indicacions en preparar les mostres, s'espera una concentració real pròxima a 2 mM.

L'índex de permanganat pot augmentar amb el temps d'agitació entre fases i si no se separen correctament les fases abans de la valoració. Valors típics es poden situar entre 2 i 10 mg O<sub>2</sub> /L.

## 6. Qüestions

### 6.1 Equilibri entre hidrocarburs del petroli i l'aigua

A partir dels resultats de simulació de la primera part de la pràctica per als tres tipus de combustible (apartat 4.1) i suposant un cas hipotètic en què l'aigua en equilibri es transporti fins a un pou de consum d'aigua i es dilueixi 100 vegades.

a) Determineu si l'aigua es pot consumir, prenent com a base els nivells de benzè que estableix el Decret 140/2003, de 7 de febrer (1µg benzè/L), en els tres casos.

b) Calculeu quin tant per cent d'eliminació del benzè de l'aigua cal dur a terme perquè aquesta pugui ser apta per al consum en els tres casos.

### 6.2 Oxidabilitat en aigües en contacte amb hidrocarburs del petroli

A partir del càlcul d'oxidabilitat de la segona part de la pràctica per al gasoil (apartat 4.2):

c) Determineu si l'aigua es pot consumir, prenent com a base els nivells d'oxidabilitat que estableix el Decret 140/2003, de 7 de febrer (5,0 mg O<sub>2</sub>/L).

d) Suposant que l'experiment s'hagués fet amb benzina i prenent com a referència el contingut total de BTEX en aigua de la simulació de l'apartat 4.1, indiqueu raonadament si l'oxidabilitat seria major o menor, i si el resultat seria més o menys fiable tenint en compte que els compostos de la benzina són més volàtils que els del gasoil.

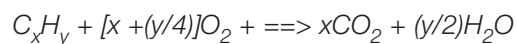
### 6.3 Qüestions complementàries (interrelació de les dues parts)

e) Suposant només les concentracions teòriques en aigua de cada BTEX en l'equilibri aigua-gasoil de la primera part de la pràctica, estimeu quina relació d'àtoms d'hidrogen / àtoms de carboni cal esperar en la solució teòrica. Tingueu en compte els pesos moleculars dels compostos.

**Taula 4.** Pesos moleculars

	<b>Mw (g/mol)</b>
<b>Benzè</b>	78,12
Etilbenzè	106,18
Toluè	92,15
Xilè	106,18

f) Sobre una mateixa solució d'equilibri gasoil-aigua suposem que disposem del valor d'oxidabilitat i de TOC. Considerant que l'oxidabilitat prové només d'una oxidació amb  $O_2$  de tot l'hidrocarburi de la dissolució d'equilibri, es tindria una expressió del tipus:



Demostreu que la ràtio hidrogen/carboni (y/x) ve donada per l'expressió:

$$4[(I_{Mn} M_C / TOC M_{O_2}) - 1]$$

$I_{Mn}$  és l'índex de permanganat (mg  $O_2/l$ ), TOC és el valor del carboni orgànic total (mg C/L), i  $M_{O_2}$  i  $M_C$  són els pesos moleculars i atòmics de l'oxigen i del carboni.

### 6.4 Solucions a les qüestions

Qüestions sobre equilibri entre hidrocarburs del petroli i aigua

- a) En cap dels tres casos no es pot consumir, ja que presenten nivells de 424, 27,4 i 33,2  $\mu g/L$  respectivament.
- b) Respecte al benzè, cal reduir-lo un 99,8 % en el cas de vessament de benzina; un 96,4 %, en el cas del gasoil, i un 97,0 %, en el cas del fueloil.

*Qüestions sobre oxidabilitat en aigües en contacte amb hidrocarburs del petroli*

- c) Generalment s'obté un valor experimental superior, però es pot donar el cas que sigui acceptable. Si no s'ha agitat prou temps, el valor podria ser inferior, i si no s'ha separat correctament el gasoil en l'equilibri, els valors podrien ser molt superiors.
- d) En l'equilibri amb benzina, la concentració de compost orgànic en equilibri en l'aigua és superior segons el que s'ha obtingut en la simulació. Això implicaria una major oxidabilitat. Tot i així, el fet que els compostos orgànics siguin més volàtils i que en el procediment s'escalfi la mostra provoca valors inferiors d'oxidabilitat en relació amb el contingut real, que fan que el resultat sigui menys exacte.

*Qüestions complementàries (interrelació de les parts 1 i 2)*



e) Ràtio H/C és 1,14, tenint en compte els BTEX en aigua amb equilibri amb gasoil.

	<b>C (mg/L)</b>	<b>Mw</b>	<b>C (mM)</b>	<b>Ratio H/C</b>	<b>Contribució</b>
<b>Benzè</b>	2,74E+00	78,12	3,51E-02	1	2,66E-01
<b>Etilbenzè</b>	3,50E-01	106,18	3,30E-03	1,25	3,12E-02
<b>Toluè</b>	4,79E+00	92,15	5,20E-02	1,14	4,49E-01
<b>Xilè</b>	4,41E+00	106,18	4,15E-02	1,25	3,94E-01
	12,29		1,32E-01		<b>1,14</b>

f) La demostració parteix del fet d'observar la reacció, en què es constata que la relació molar  $O_2/CO_2$ , equivalent a la relació  $O_2/C$ , ve donada per:

$$1 + (y/4x) = (I_{Mf}/MO_2)/(TOC/M_c)$$

Aïllant el terme  $y/x$  s'obté el resultat de l'enunciat.

## 7. Bibliografia

[1] AENOR, desembre de 2005, Norma UNE-EN ISO 8467:1993, Calidad del agua. Determinación del índice de permanganato.

[2] MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA. Real decreto 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE núm. 45, 21 de febrer de 2003).

[3] SCHWARZENBACH, R. P.; GSCHWEND, P. M.; IMBODEN, D. M. (2003). Environment Organic Chemistry (2a edició). EUA: Wiley and Sons, Hoboken, NJ. Pàg. 235.

[4] TPHCWG (Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group, Toxicology Technical Action) (1997). Selection of Representative TPH fractions based on the fate and transport considerations. TPHCWG Series Volume 3, Amherst Scientific Publishers.



## Capítol 10

# Simulació de l'evolució i els efectes d'una fuga de gas tòxic

ELSA PASTOR, JOAQUIM CASAL, EULÀLIA PLANAS I JOSEP ARNALDOS

Departament d'Enginyeria Química

Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC)

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

L'experimentació és gairebé sempre un complement important en moltes assignatures del camp de l'enginyeria i de les ciències. Ara bé, en alguns casos l'experimentació no és possible a la pràctica per diverses raons: pot ser molt cara, o molt perillosa, o qüestions de tipus legal o ètic la poden fer impossible. Aquesta situació la trobem en determinades assignatures de moltes enginyeries, de medicina i de determinades llicenciatures.

Fins fa pocs anys aquesta impossibilitat no tenia pràcticament solució. El buit se suplía amb explicacions més o menys detallades a les classes de «teoria», tot esperant que la realitat del món professional ja solucionaria allò que la universitat no podia resoldre. La revolució informàtica que ha tingut lloc en els darrers anys, amb la massiva implantació dels ordinadors i de potents eines de càlcul i simulació, ha canviat substancialment la situació. En el cas concret de l'anàlisi de riscos, aquest canvi ha tingut un paper fonamental.

### 2. Fonaments

#### 2.1 L'anàlisi de riscos

La indústria química, el sector energètic, el transport de mercaderies perilloses i altres activitats industrials tenen associat un cert risc que, de vegades, es tradueix en accidents greus o molt greus.

Accidents que no només ocorren en països del Tercer Món —com l'accident de Bhopal, a l'Índia—, sinó que també poden succeir en societats que tenen una indústria que en principi es pot considerar com a relativament segura; podem recordar aquí la violenta explosió ocorreguda fa poc en una fàbrica de Tolosa (2001), que ocasionà una trentena de morts.

Per reduir al màxim la probabilitat que aquests accidents succeeixin, s'ha posat a punt tot un cos de metodologies i eines de càlcul que, amb el nom d'anàlisi de riscos, permet millorar de manera sistemàtica la seguretat de les instal·lacions i les activitats esmentades anteriorment. Els objectius de l'anàlisi de riscos són, bàsicament:

- Identificació dels accidents que poden ocórrer.
- Establiment de la seva probabilitat o de la freqüència amb què presumiblement poden ocórrer.
- Estimació dels seus efectes en funció del temps i la distància.
- Estimació de les seves conseqüències sobre persones, equipament i entorn.
- Establiment de les mesures que s'han de prendre per reduir el risc a nivells tolerables.

Només podem controlar allò que coneixem. Per cobrir aquests objectius cal, doncs, conèixer els diversos accidents possibles (incendis, explosions, fuites tòxiques): com s'esdevenen, com s'inicien, com evolucionen, quins són els seus efectes (radiació tèrmica, ona de sobrepressió, projecció de fragments, concentració de contaminant o producte tòxic), què passa quan aquests efectes interaccionen amb persones, habitatges, medi. Per tant, cal conèixer els incendis, les explosions, les fuites tòxiques i totes les seves combinacions, així com els seus efectes i les seves conseqüències.

Ara bé, l'experimentació en aquest camp és sovint complicada i cara i, moltes vegades, resulta impossible.

## 2.2 La dispersió atmosfèrica de fuites tòxiques

Un cas concret en què és molt difícil recórrer a l'experimentació és el de la dispersió atmosfèrica de fuites tòxiques. Aquest fenomen, associat a alguns dels accidents greus que han ocorregut en la indústria química (Bhopal, Seveso), se sol caracteritzar pels danys potencials a la població i a l'entorn, tot i que en principi no afecta —o ben poc— els equipaments. És un fenomen complex, en què intervenen diverses variables tant atmosfèriques com de la instal·lació i en què cal emprar models matemàtics de certa complexitat.

## 2.3 Variables atmosfèriques

Les variables que intervenen en el comportament i el moviment de l'atmosfera seran les que regiran la dispersió d'un contaminant que s'hi aboqui. Entre les principals, podem esmentar les següents:

### *El vent*

Amb un comportament que depèn de l'escala, que fa que més que parlar de la velocitat del vent convingui parlar d'un camp de velocitats, el vent és el que marca cap on i a quina velocitat es desplaçarà un núvol tòxic. Afectat per una capa de fricció que arriba fins als 700-1.000 m d'altura i que depèn dels accidents existents sobre la superfície, la velocitat i la direcció del vent se solen mesurar a 10 m d'altura. La seva variació en funció del temps en un determinat lloc se sol representar en la denomi-

nada rosa dels vents (figura 1).

### El gradient tèrmic i l'estabilitat atmosfèrica

La temperatura de l'aire varia amb l'altura. Normalment disminueix en guanyar altitud, 1 °C cada 100 m, però de vegades el comportament és diferent: el gradient és més elevat, o més petit, o fins i tot negatiu (inversió tèrmica). L'existència d'aquests gradients és el que marca l'estabilitat atmosfèrica, és a dir, la capacitat de l'atmosfera per desplaçar-se cap a dalt o cap a baix, reforçant o esmorteint qualsevol moviment induït per forces mecàniques (com, per exemple, el vent). Aquesta estabilitat farà que una fuga tòxica es dispersi molt de pressa o es mantingui en forma de núvol amb forta concentració fins a distàncies considerables.

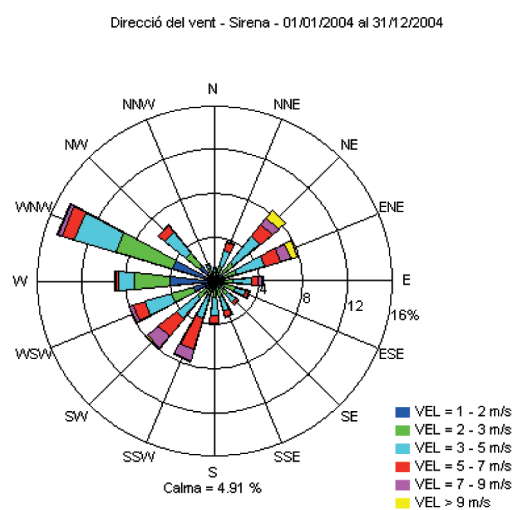


Figura 1. Rosa dels vents per a una determinada localitat

## 2.4 Els models de dispersió

Els models matemàtics de dispersió són conjunts d'equacions que permeten, per a un determinat cas, predir l'evolució d'una fuga de gas o vapor a l'atmosfera. Aquestes equacions comprenen la influència de les principals variables: característiques de la fuga (cabal, durada, propietats de la substància), del terreny (rugositat, presència d'obstacles) i de l'atmosfera (vent, estabilitat). Varien també en funció de:

- si la fuga és contínua o instantània;
- si la substància és més lleugera que l'aire, de la mateixa densitat o més pesant que l'aire.

Per a substàncies de densitat inferior o semblant a la de l'aire, se solen aplicar els denominats models gaussians, que assumeixen perfils de concentració amb una distribució gaussiana o normal. Per a substàncies més pesants que l'aire, aquesta suposició ja no es compleix i els models són força més complicats, i normalment s'hi apliquen codis de càlcul per ordinador. Les equacions originals d'aquests models, que no pertoca incloure aquí, es poden trobar en les obres esmentades en la bibliografia.

### 3. Simulació de la dispersió de gasos tòxics mitjançant el programa Aloha

El programa ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) és una eina que permet estimar el moviment i la dispersió de gasos. Es basa en la implantació de dos models matemàtics de dispersió; el primer d'aquests models correspon a un model gaussià, per treballar amb gasos neutres, mentre que l'altre és un codi aplicable a gasos pesants, anomenat DEGADIS (Spicer i Havens, 1989). Es troba disponible gratuïtament a la pàgina web de l'EPA (U.S. Environment Protection Agency), organisme que ha desenvolupat aquesta aplicació. Com la majoria de programes, permet resoldre problemes molt ràpidament proporcionant els resultats en forma gràfica, fàcilment interpretable. Ara bé, cal tenir sempre present que ALOHA és solament una eina la utilitat de la qual depèn de com s'utilitzi i de com s'interpretin els resultats. Tot seguit es planteja un exemple tipus per resoldre amb aquest simulador.

Una fàbrica paperera situada en una zona molt industrialitzada del Baix Llobregat emmagatzema grans quantitats de clor líquid. El dia 15 de maig de 2005, a les 13.00 h, un operari trenca accidentalment una canonada amb una pala excavadora. Prop d' $1 \text{ m}^3$  de clor és emès en forma d'aerosol que s'evapora ràpidament (fuita instantània). El clor s'emmagatzema normalment a  $-34 \text{ }^\circ\text{C}$ . L'edifici d'oficines d'aquesta empresa paperera té les finestres tancades, és situat a 400 m de la fàbrica en la direcció del vent i recentment s'han plantat arbres i arbusts al voltant de l'edifici. En el moment del vessament el cel estava completament tapat, la temperatura ambient era de  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  i el vent bufava de ponent amb una velocitat de  $5,1 \text{ m/s}$ . La humitat relativa era del 67 %. S'ha de determinar:

- Els punts més llunyans de la font de contaminant on s'assoleixen nivells de concentració amb efectes reversibles, irreversibles i letals per a les persones.
- La concentració màxima de clor dins i fora de l'edifici d'oficines.

Figura 2. Problema exemple de simulació de la dispersió de gasos tòxics

#### 3.1 Interfície d'ALOHA

La interfície d'ALOHA és la típica d'un programa d'entorn Windows, amb una barra a la capçalera que conté diversos menús desplegable que permeten executar les funcions normals d'arxivi i edició (menús File i Edit), introduir les dades necessàries per a la simulació (menús SiteData i SetUp), i visualitzar-ne els resultats (menú Display). A més, conté opcions avançades de representació geogràfica d'escenaris accidentals dins el darrer menú Sharing. En la figura 3 es representen tots aquests desplegable.

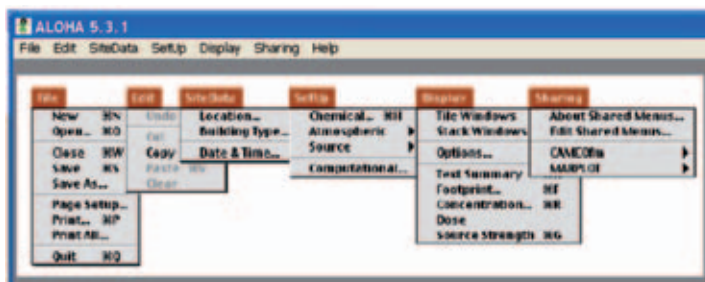


Figura 3. Menús desplegable de la capçalera d'ALOHA

### 3.2 Introducció de les dades de l'escenari accidental

El primer pas per resoldre el problema amb ALOHA consisteix a introduir totes les dades referents a l'accident, agrupades en les categories següents:

- Localització i data de l'esdeveniment
- Producte químic involucrat en l'accident
- Condicions atmosfèriques i del terreny
- Tipus de font contaminant i principals característiques de la instal·lació

Per a la primera categoria i amb referència a la localització, el programa disposa d'una base de dades interna dels paràmetres geogràfics (latitud, longitud, elevació, desviació horària GMT estàndard) de diverses poblacions dels Estats Units (SiteData-Location). Tanmateix, s'hi poden crear nous registres, en cas que la simulació se situï en qualsevol altre país, com és el d'aquesta pràctica. En la figura 4, s'observa el registre que correspon al cas particular de l'enunciat, amb totes les finestres de dades desplegades (aquestes dades es poden consultar, entre altres llocs, a la web de l'Institut Cartogràfic de Catalunya, <http://www.icc.es>).

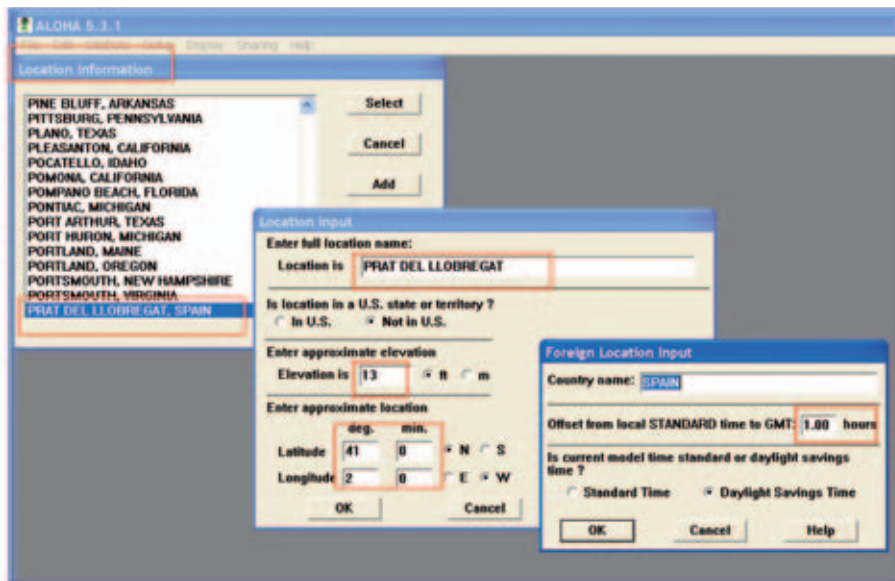


Figura 4. Creació d'un nou registre geogràfic

Un cop creat i seleccionat el registre, es poden introduir les dades que completen aquesta categoria, dins els submenús SiteData-DataTime i SiteData-BuildingType, en què s'especifiquen, d'una banda, el moment en què té lloc l'accident, i de l'altra, les característiques d'un possible edifici proper a la zona de fuga, en què també es vulgui calcular la concentració de producte tòxic. En aquest cas particular, l'accident ocorre a les 13.00 h del 15 de maig de 2005 i la planta té un edifici d'oficines en la direcció de l'evolució de la fuga (figura 5).

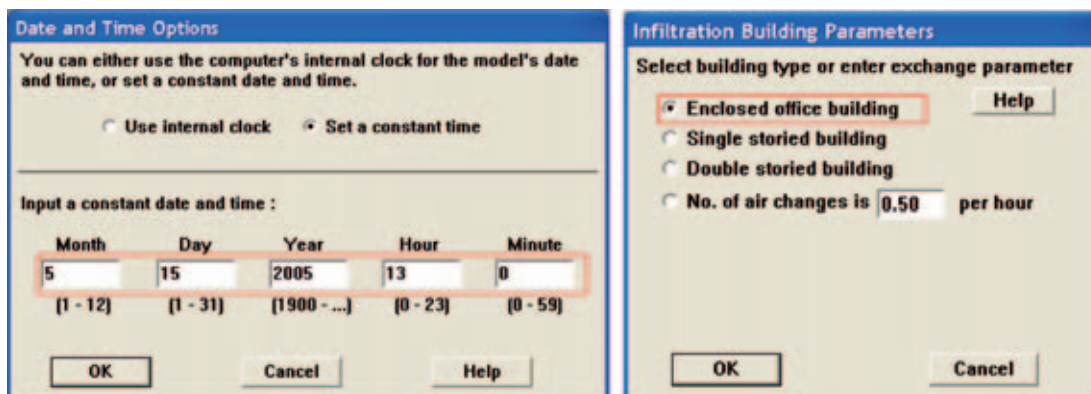


Figura 5. Submenús SiteData-DataTime i SiteData-BuildingType

La categoria següent fa referència al producte químic involucrat en l'accident. ALOHA en pren els paràmetres fisicoquímics necessaris d'una base de dades interna amb més d'un miler de substàncies perilloses caracteritzades. Seleccionant Chlorine del menú SetUp-Chemical, s'emmagatzemen automàticament les dades d'aquest producte necessàries per fer els càlculs matemàtics del problema.

Pel que fa a les categories de dades restants, també es poden introduir de manera molt senzilla i intuïtiva amb sengles menús gràfics. Amb tot, cal tenir especial cura a introduir les dades en les unitats desitjades, ja que ALOHA permet l'ús d'unitats anglosaxones i del sistema internacional, indistintament. Les condicions atmosfèriques i de rugositat del terreny s'omplen en la successió de finestres que apareixen en SetUp-Atmospheric-UserInput (figura 6), mentre que les dades referides a les característiques de la fuga s'inclouen dins l'opció més apropiada del menú SetUp-Source. Així, ALOHA permet modelitzar l'emissió de contaminant quan aquest prové d'un tanc, d'un bassal o d'una canonada (SetUp-Source-Tank/Puddle/Pipe), i requereix les dimensions corresponents de la font considerada. En qualsevol cas, quan la quantitat o el cabal i les condicions de pressió i temperatura del producte vessat són coneguts, es pot modelitzar la fuga directament a partir de l'opció SetUp-Source-Direct (figura 7).

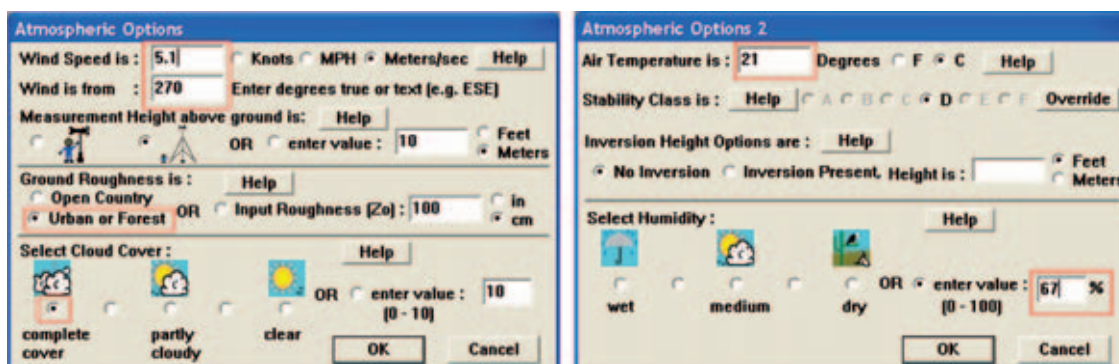


Figura 6. Condicions atmosfèriques i del terreny



Figura 7. Font de contaminant

Un cop finalitzada la tasca d'inserció de dades, es dona l'ordre a ALOHA per calcular els resultats (Setup-Computational). Mitjançant aquest submenú, es pot escollir el model matemàtic que es vol utilitzar (gaussiana o gas pesant) o, en cas de dubte, deixar que ALOHA el seleccioni. La classificació en aquest sentit no és sempre senzilla. Si la densitat del gas és lleugerament superior a la de l'aire, ALOHA considera el gas com a pesant. A més, gasos que són lleugers en condicions normals però que normalment s'emmagatzemen en condicions criogèniques —com és el cas de la pràctica— també són considerats per ALOHA com a pesants. De fet, quan ALOHA detecta aquestes condicions d'emmagatzematge, dona el missatge d'avís dient que el producte pot experimentar un flash o resultar en una fuga bifàsica, el comportament de la qual serà de gas pesant.

### 3.3 Resultats de la pràctica

Els resultats de la simulació es poden obtenir en forma gràfica i numèrica mitjançant el menú Display i, entre tots ells, se'n poden destacar els següents:

- Projectió sobre xy de la dispersió del contaminant (Display-Footprint)
- Vessament del contaminant en funció del temps (Display-SourceStrength)
- Concentració en funció del temps i la distància (Display-Concentration)
- Dosi d'exposició al contaminant en un punt específic x,y (Display-Dose)

A més, els valors numèrics significatius d'aquests resultats queden registrats a la finestra de text (Display-TextSummary), així com totes les dades de l'escenari accidental que s'han anat introduint.

#### *Efectes sobre les persones*

Per respondre la primera qüestió, cal determinar en primer terme les concentracions llindar per als efectes sobre persones. En el submenú Display-Footprint es poden seleccionar fins a tres nivells simultanis d'anàlisi, que corresponen, per defecte, als llindars d'efectes reversibles, irreversibles i letals, codificats amb les sigles ERPG-1, ERPG-2 i ERPG-3 respectivament (ERPG són les sigles de Emergency Response Planning Guidelines. Aquests llindars han estat desenvolupats per l'Associació Americana de Seguretat i Higiene). La finestra activa per fer aquesta selecció, així com la representació gràfica que en resulta, s'inclouen en la figura.

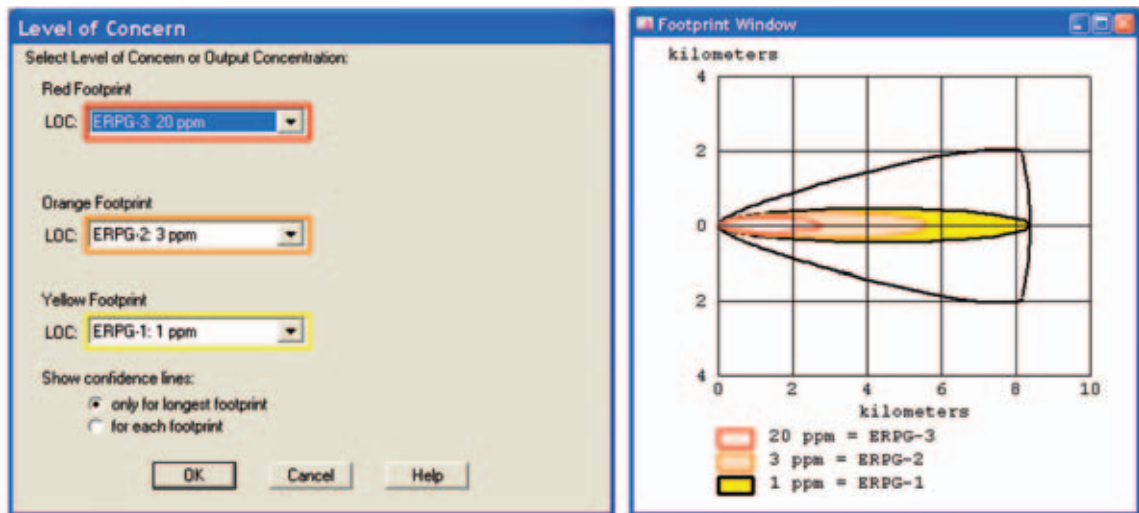


Figura 8. Efecte sobre les persones

En la imatge precedent es representen les tres projeccions en planta de les zones del núvol on la concentració és d'1 ppm, 3 ppm i 20 ppm. El punt més allunyat de la font per a cadascun d'aquests tres nivells de concentració es troba a 8,4 km, 5,7 km i 2,8 km respectivament.

### Protecció per confinament

Determinant la concentració màxima dins i fora de l'edifici d'oficines, es pot avaluar el nivell de protecció per confinament en l'escenari accidental amb què es treballa. De la mateixa manera que en el cas anterior, es poden seleccionar certs valors llindar de comparació —l'IDLH és un valor apropiat en aquest cas (IDLH són les sigles d'Immediately Dangerous to Life or Health, concentració immediatament perillosa per a la vida i la salut) i correspon a 10 ppm en el cas del clor—; tot seguit se selecciona el punt d'estudi (Display-Concentration) i s'obté l'evolució de la concentració amb el temps en aquest punt (figura 9).

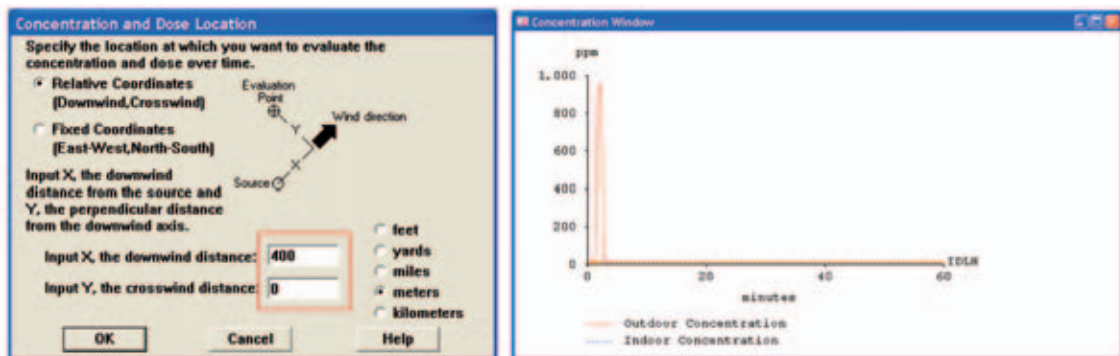


Figura 9. Evolució de la concentració de contaminant

La gràfica anterior inclou l'evolució temporal de la concentració en un punt a 400 m a sotavent del punt de fuga, considerant confinament i absència d'aquest. A més, també mostra el valor de comparació IDLH. Per bé que aquesta gràfica no permet determinar amb precisió els nivells de concentració, aquesta informació queda enregistrada a la finestra de text (Display-TextSummary) (figura 10). Així, la concentració màxima fora de l'edifici d'oficines és de 958 ppm i dins de l'edifici és de 7,7 ppm.

D'aquests resultats es desprèn que el confinament en l'edifici d'oficines de la fàbrica paperera és suficient per no experimentar efectes immediatament perillosos per a la salut.

#### **4. Observacions**

La resolució d'un cas pràctic com el que aquí s'ha proposat es pot fer en grups de dos alumnes, amb l'assessorament d'un professor, en un temps raonable —entre dues i quatre hores— si s'han estudiat prèviament els aspectes teòrics i en funció de la profunditat de l'anàlisi de l'accident i els seus efectes.

Els alumnes, en finalitzar la pràctica, han de presentar un informe en què s'exposin els resultats obtinguts en la seva resolució, així com una breu discussió raonada sobre els resultats esmentats.

#### **5. Bibliografia**

[1] VAN DER BOSCH, C. J. H.; WETERINGS, R. A. P. M. (ed., 1997). Methods for the calculation of the physical effects, part 2. Committee for the Prevention of Disasters (CPD). La Haia.

[2] DGLMSAE (1992). Methods for the determination of possible damage (Green book). Committee for the Prevention of Disasters. La Haia.

CASAL, J.; MONTIEL, H.; PLANAS, E.; VÍLCHEZ, J. A. (2001). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. Alfaomega.

[3] CROWL, D. A.; LOUVAR, J. (2002). Chemical process safety. Prentice Hall.

[4] SPICER, T.; HAVENS, J. (1989). User's guide for the DEGADIS 2.1 Dense Gas Dispersion Model. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency. EPA-450/4-89-019.

[5] ALOHA®5.3.1. United States Environmental Protection Agency (EPA), octubre de 2004.  
<<http://www.epa.gov/ceppo/cameo/aloha.htm>>

SITE DATA INFORMATION:

Location: PRAT DEL LLOBREGAT, SPAIN  
Building Air Exchanges Per Hour: 0.50 (enclosed office)  
Time: May 15, 2005 1300 hours DST (user specified)

CHEMICAL INFORMATION:

Chemical Name: CHLORINE                      Molecular Weight: 70.91 g/mol  
ERPG-3: 20 ppm    ERPG-2: 3 ppm    ERPG-1: 1 ppm  
IDLH: 10 ppm  
Carcinogenic risk - see CAMEO  
Normal Boiling Point: -34.0° C              Ambient Boiling Point: -34.0° C  
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm  
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC INFORMATION: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 5.1 meters/sec from 270° true at 10 meters  
No Inversion Height  
Stability Class: D                      Air Temperature: 21° C  
Relative Humidity: 67%                      Ground Roughness: urban or forest  
Cloud Cover: 10 tenths

SOURCE STRENGTH INFORMATION:

Direct Source: 1 cubic meters              Source Height: 0  
Source State: Liquid  
Source Temperature: -34° C  
Release Duration: 1 minute  
Release Rate: 26 kilograms/sec  
Total Amount Released: 1,558 kilograms  
Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.

FOOTPRINT INFORMATION:

Model Run: Heavy Gas  
Yellow LOC (20 ppm = ERPG-3) Max Threat Zone: 2.8 kilometers  
Orange LOC (3 ppm = ERPG-2) Max Threat Zone: 5.7 kilometers  
Red LOC (1 ppm = ERPG-1) Max Threat Zone: 8.4 kilometers

TIME DEPENDENT INFORMATION:

Concentration Estimates at the point:  
Downwind: 400 meters  
Off Centerline: 0 meters  
Max Concentration:  
Outdoor: 958 ppm  
Indoor: 7.7 ppm

Figura 10. Finestra TextSummary generada a partir de l'exemple proposat

## Capítol 11

# Comptador o descomptador de dècada amb pantalla (decade down/up counter with display)

JOSEP M. TORRENTS

Departament d'Enginyeria Electrònica  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció i objectius

Treballeu aquest estudi previ en equip (que almenys ho sàpiga el teu company). Endavant! Si la dispersió de coneixements entre els alumnes que han fet electrònica i els que no l'han fet és important, encara ho és més quan arribem a l'electrònica digital. No patiu en aquest aspecte, l'ambientalització de la pràctica afegeix una variable aleatòria en la dispersió de coneixements en química.

Sé que us frisàveu per arribar als circuits digitals i oblidar els avorrits circuits analògics amb les lleis de Kirchoff, equivalents Thévenin, Norton, etc. Aquest oblit només és possible en part: l'electrònica digital opera per capes com si fos una cebeta. En electrònica digital, treballem en la capa lògica i per entendre una capa no cal considerar-ne les internes. Però només oblidem les lleis dels circuits (la capa més física i per tant més interna) quan treballem exclusivament en el nivell o capa lògica. Per entendre com funciona el circuit d'aquesta pràctica, treballem gairebé sempre a un nivell lògic.

Però la gràcia del laboratori és que el nivell més físic no desapareix (la placa de components, xips, components i fils de connexió no en saben de lògica i encara compleixen les mateixes lleis de sempre). És com una maledicció de la qual no us podeu deslliurar; així doncs, no creieu que perquè sigui la darrera pràctica, podeu fer campana.

L'objectiu de la pràctica és muntar un comptador (o descomptador) amb una pantalla de díodes LED de set segments, per a la qual cosa disposarem dels xips 555, 4029 i 4511. Un dels avantatges del

món digital és que moltes funcions són idèntiques i els fabricants acostumen a oferir solucions a mida que minimitzen la feina del dissenyador.

### 1.1 Els xips, contaminen?

Tradicionalment, s'ha cregut que la indústria electrònica no contamina. Cal matisar el que es diu: l'impacte ambiental que tenen uns quants xips davant qualsevol obra civil és fora de tota mena de dubte i comparació, però l'acumulació en deixalleries d'estrís electrònics en bon estat però obsolets per l'avenç de la tecnologia i la miniaturització, que complica molt la seva separació per al reciclatge, provoquen una creixent alarma social.

Confeccioneu una llista de deu fabricants de xips, preferiblement especialitzats en electrònica digital, per exemple Intel, Microchip, Motorola, Philips. Busqueu en les seves pàgines web si incorporen alguna mesura per reduir la contaminació dels seus productes, com ara lliures de plom (Pb), de triòxid d'antimoni ( $Sb_2O_3$ ) o d'halògens. Aquestes mesures, en cas que les tinguin, les incorporen a tots els productes? Classifiqueu els fabricants (o els seus productes) en funció del seu respecte pel medi ambient. Com a data curiosa, Kuehr (2003) calcula la despesa energètica, d'aigua i els tòxics consumits i alliberats en la producció d'un PC. Incorporen els fabricants que heu classificat alguna informació sobre el procés de producció del seu producte? (No solament si el producte en si conté algun tòxic.) No us «enrotlleu», sintetitzeu i només empleu un full de la vostra llibreta de laboratori.

## 2. Desenvolupament

Tornem a l'objectiu de muntar la pràctica: busqueu a Internet els fulls de dades (data sheet) dels xips que intervenen en aquesta pràctica: 555, 4029 i 4511. Quina és la funció lògica de cadascun? Descriviu-les en poques paraules (en total unes  $5 \times 3 = 15$  línies). Podeu identificar el fabricant de cadascun d'aquests xips?

A les bosses de components, mireu si teniu els xips esmentats. Quin tipus d'encapsulació tenen? Com se sap quina és la pota número 1?

Suposant una tensió d'alimentació de 9 V, calculeu teòricament (a partir dels fulls de dades) el consum aproximat del projecte.

Amb l'ajuda de Floyd (2000) i del full de dades, identifiqueu la funció que realitza el temporitzador 555; descriu-la en unes quantes línies (5). (La maledicció: per entendre el funcionament del temporitzador cal baixar a la capa física.)

Finalment, quina connexió cal invertir per convertir el descomptador en comptador? (Busqueu-ho al full de dades del 4029.)

### 3. El muntatge del circuit

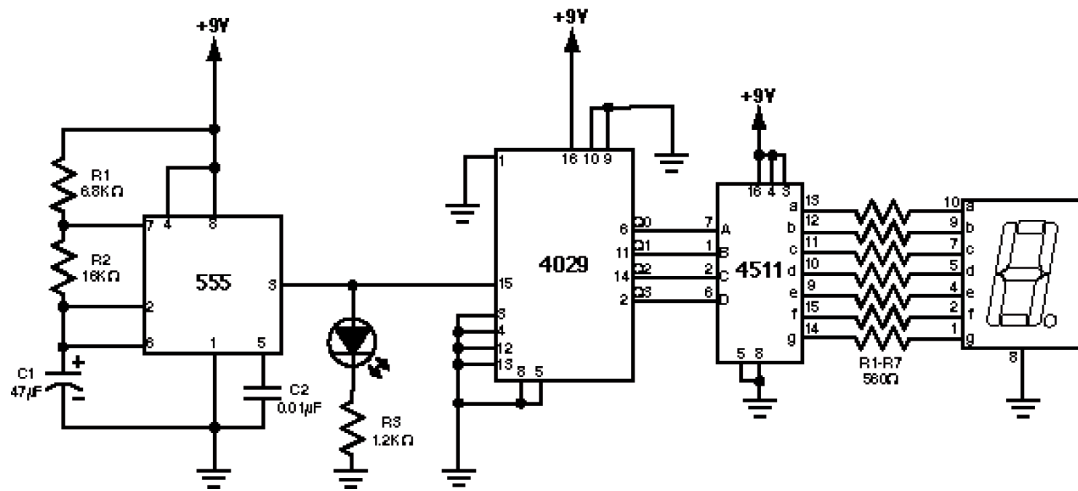


Figura 1. Esquema del circuit, comptador (descomptador) decimal en pantalla de díodes LED de set segments

En una primera apreciació heu pensat que el 4511 converteix DCB en decimal. És inexacte, converteix DCB en un codi que il·lumina els díodes LED de set segments, de tal manera que l'usuari interpreta decimal; diríem que la interfície d'usuari s'adapta a l'ull humà perquè es creï decimal.

### 4. Bibliografia

[1] KUEHR, R.; WILLIAMS, E. (editors, 2003). Computers and the Environment: Understanding and Managing Their Impacts, Kluwer Academic Publishers, Eco-Efficiency in Industry and Science Series, Dordrecht/NL. cap. 3. Pàg. 65.

[2] FLOYD, T. L. (2000). Fundamentos de sistemas digitales. Prentice Hall. Pàg. 517-524.





## Capítol 12

# Detector de nivell d'aigua remot

JOSEP M. TORRENTS

Departament d'Enginyeria Electrònica  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció i objectius

Per una banda, les TIC permeten enviar informació a distància a una velocitat pràcticament instantània, i per l'altra, la dimensió social és un dels eixos sostenibles. Així, podem considerar l'accés a la informació com una necessitat social. Els mitjans de comunicació només es recorden d'aquest paradigma preocupant quan són notícia (per exemple, el tsunami de Sant Esteve de 2004). No podem, ni seria desitjable, controlar la natura; tanmateix, sí que podem respectar-la i l'hauríem de respectar a través del seu coneixement i la seva consideració.

Un dels temes més actius, en els camps de recerca variats que en formen part, són les xarxes de sensors autònoms, precisament per conèixer millor l'entorn. Per mesurar fa falta energia i per transmetre dades (informar) també fa falta energia. Moltes vegades queden obertes preguntes com: Quina distància cal entre sensors? Com es passaran les dades (al més proper, al principal, entre ells)? Cada quant cal prendre una mesura?

Aquest laboratori bàsic d'electrònica introdueix aquests conceptes mitjançant el disseny d'un petit emissor AM d'ona mitjana, capaç de transmetre a una distància curta que un dipòsit d'aigua s'ha omplert. El fet d'emetre en AM és per senzillesa, i en ona mitjana, per poder aprofitar els receptors comercials. Les ramificacions d'aquesta idea com a element bàsic d'avís o d'alerta es deixen a la vostra imaginació.

### 2. Desenvolupament

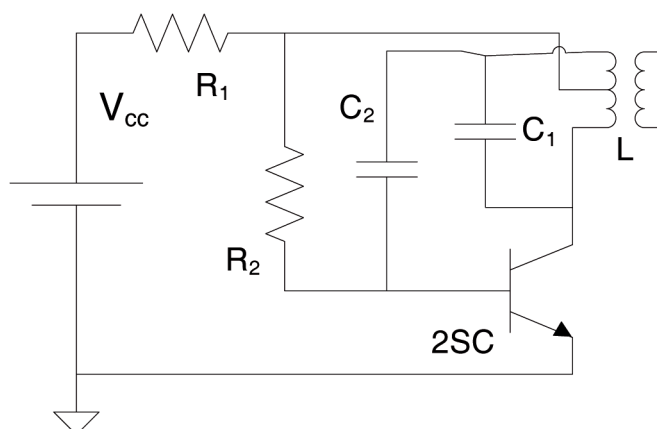
Suposem un sensor autònom per a mesures mediambientals situat al mig de la natura que requereix plaques fotovoltaïques per al seu funcionament. Adquireix dades contínuament amb una despesa

energètica de 10 mW, però només les transmet cada 10 minuts durant 5 segons amb una despesa d'1 W. Quina potència mitjana consumeix el dispositiu? Si suposem una radiació solar d'1 kW/m<sup>2</sup> durant 4 hores al dia i una eficiència de les plaques del 15 %, quina superfície de plaques necessitarem per alimentar el sensor autònom amb un marge de seguretat de 2?

Busqueu els conceptes d'oscil·lador en algun llibre, com per exemple Schilling (1993) o Horowitz (1989), encara que qualsevol altre també servirà. Quins paràmetres governen la freqüència d'oscil·lació? En el cas d'un circuit de segon ordre, quina relació s'estableix entre la freqüència d'oscil·lació i les reactàncies (L i C) implicades?

Un circuit real que ressona té pèrdues (elements que dissipen energia); per tant, qualsevol oscil·lació que es produeixi per una excitació puntual s'esmoreirà. Per produir una oscil·lació sostinguda, cal una aportació d'energia externa, de manera que contraresti la dissipació d'energia deguda a les pèrdues. Un transistor pot convertir l'energia elèctrica contínua que el polaritza en energia que subministra al parell ressonador (L i C) per compensar les seves pèrdues.

El circuit de la figura 1 és un oscil·lador LC, en què el primari d'un transformador (d'àudio) amb presa intermèdia fa d'inductància (L) i C1 afegeix la capacitat per oscil·lar.



**Figura 1.** Oscil·lador LC

La topologia que se us presenta rep el nom d'oscil·lador de Hartley; si voleu aprendre més sobre com funciona, podeu consultar les seccions d'oscil·ladors de Horowitz (1989) i Ghausi (1965). Munteu el circuit de la figura 1 amb  $V_{cc} = 5\text{ V}$ ,  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 47\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 100\text{ nF}$  i  $C_2 = 47\text{ nF}$  perquè oscil·li a freqüències audibles. Per visualitzar l'oscil·lació mitjançant un oscil·loscopi, punxeu el col·lector del transistor. Dibuixeu la forma d'ona. Mesureu la freqüència d'oscil·lació i anoteu-la a la llibreta. Canvieu la capacitat  $C_1$  per un valor 3,3 vegades més gran i 3,3 i 10 vegades més petit, anoteu les respectives freqüències d'oscil·lació en forma de taula i comproveu que segueix la relació (arrel quadrada) establerta dos paràgrafs més amunt.

## 2.1 Una emissora de radio AM bàsica

Busqueu els conceptes de freqüència mitjana (OM) en radiodifusió i de modulació d'amplitud (AM), i descriu-los. Utilitzeu els conceptes d'ona portadora i d'ona moduladora. En quins marges freqüencials es mouran cadascuna?

En la pràctica anterior vèiem un oscil·lador de relaxació amb un contingut freqüencial gran (feu la transformada de Fourier d'un senyal quadrat periòdic), mentre que en aquesta pràctica es planteja un oscil·lador sinusoidal. Per què no podem muntar l'oscil·lador de relaxació? Què significa que només podem ocupar un canal de l'espectre? Busqueu què significa puresa espectral.

Munteu un altre circuit com el de la figura 1 amb  $V_{cc} = 5\text{ V}$ ,  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 22\text{ k}\Omega$ ,  $C_2 = 100\text{ pF}$  i, per poder canviar la freqüència d'oscil·lació, feu  $C_1$  amb un condensador ajustable (trimmer) de 300 pF. Perquè oscil·li a freqüències d'ona mitjana, substituïu el transformador per una ferrita (com les que fan d'antena d'AM). Visualitzeu l'oscil·lació i dibuixeu-la a la llibreta. Quins marges de freqüència podem obtenir variant el valor del condensador ajustable?

Ajunteu els dos circuits oscil·ladors amb connexió tal, que comparteixin la font d'alimentació  $V_{cc} = 5\text{ V}$  i  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ . Quin tipus d'oscil·lació hi observeu? Acabeu de construir una emissora d'AM! Emeteu un to fix. Proveu de sincronitzar l'oscil·loscopi tant amb la portadora com amb la moduladora. No és fàcil. Si no us en sortiu, demaneu ajuda al mestre. Si substituïu el circuit modulador per un micròfon i un amplificador, podríeu emetre la vostra veu i rebre-la amb un receptor convencional. Si teniu ganes de sentir la vostra veu, de primer acabeu la resta de la pràctica i, després, pregunteu al mestre i, ple-gats, dissenyareu un circuit per muntar.

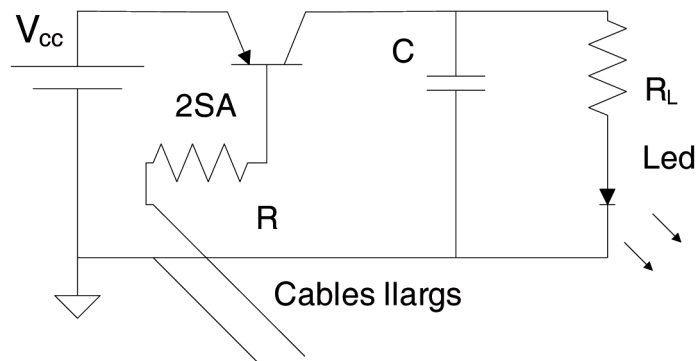
## 2.2 L'interruptor, un sensor de tot o res

El to que emet aquest circuit pot servir d'alarma o de senyal quan s'assoleix alguna condició prees-tablerta. Imagineu un sensor que connecti l'emissora quan detecti si un dipòsit d'aigua ha arribat a un cert nivell. Una manera senzilla de fer-ho i, a la vegada, de baix consum, pot consistir en un inte-rruptor d'alimentació que es connecti quan s'arribi a la condició predeterminada. Per exemple, que el cable d'alimentació sigui discontinu i que l'aigua, conductora, arribi al nivell on tancarà el circuit.

Tot i que la idea és fàcil de realitzar, planteja problemes d'electròlisi si la potència d'emissió és prou gran. Per això, la figura 2 proposa intercalar un transistor que treballi en saturació o tall, en funció que polaritzi o no polaritzi la base, el circuit de la qual és discontinu i es tanca quan l'aigua assoleix el nivell predeterminat. La possible electròlisi es redueix pel guany de corrent del transistor (aproxima-dament  $\mu$ ) si la resistència de base està ben ajustada.

Munteu el circuit de la figura 2 i comproveu que funciona amb un got d'aigua que tancarà el circuit de la base del transistor (els dos cables llargs),  $R = 10\text{ k}\Omega$  i  $C = 100\text{ }\mu\text{F}$  (compte amb la polaritat, que és electrolític). Mesureu amb el DMM (i anoteu a la llibreta) els corrents de base i de col·lector quan el circuit de col·lector té una càrrega  $R_L = 1,5\text{ k}\Omega$  en sèrie amb un díode LED.

Finalment, traieu la càrrega del circuit de la figura 2 ( $R_L$  i díode LED) i substituïu-la pel circuit sencer dels dos circuits oscil·ladors acoblats sense la font d'alimentació ( $V_{cc} = 5\text{ V}$ ) i pel lloc on es connec-tava als circuits. Mesureu l'abast de la vostra emissora. Anoteu (i comproveu) dues o tres maneres d'augmentar-ne l'abast.



**Figura 2.** Circuit interruptor a partir del contacte entre els dos cables llargs

### 3. Bibliografia

- [1] SCHILLING, D. L. (1993). Circuitos electrónicos (3a edició). McGraw-Hill. Pàg. 554-555.
- [2] HOROWITZ, P.; HILL, W. (1989). The art of electronics (2a edició). Cambridge University Press. Pàg. 297-300.
- [3] GHAUSI, M. S. (1965). Principles and Design of Linear Active Circuits. McGraw-Hill. Pàg. 415-422. (A la biblioteca podeu trobar Electronic Devices and Circuits del mateix autor i de l'any 1985, però les explicacions de les pàgines 505-506 són menys detallades.)

## Capítol 13

# Orgue electrònic (IC Organ)

JOSEP M. TORRENTS

Departament d'Enginyeria Electrònica  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció i objectius

En aquesta pràctica es munta un orgue electrònic que produeix una octava completa amb un sol xip de portes NO-I i un amplificador d'un sol transistor que fa el so audible. Quan l'acabeu de muntar, engegueu-lo i premeu les tecles d'una en una, l'òrgan tocarà tota l'escala. No premeu dues tecles de cop, ja que no és polifònic.

Diuen que Ctesíbios d'Alexandria inventà el primer orgue hidràulic que es va difondre per Europa durant la romanització. Penseu que l'orgue, com molts altres instruments, estris i andròmines de la nostra vida quotidiana, va tenir un origen «energèticament humil»; s'accionava manualment, fet que en limitava la «potència màxima». L'aparició de l'electricitat com a font d'energia al nostre abast, amb capacitat de molta potència i extremament barata, provoca que molts d'aquests aparells es passin a accionar amb electricitat.

De diabòlic podríem qualificar aquest procés amb realimentació positiva: la factura de l'electricitat és barata, per tant, construïm més aparells accionats amb electricitat, augmentem la demanda i els governs s'afanyen a satisfer-la, molts cops amb el nom d'«energies alternatives». Hem d'aprendre que el cost de la generació d'electricitat va més enllà de la factura i que cal incloure-hi les despeses mediambientals que implica. Baixem una mica dels núvols i tornem a l'electrònica que ens reuneix. Com a corol·lari, caldrà ser més ambiciosos quan construïm aparells energèticament eficients o de baix consum elèctric i avaluem si l'electricitat és la millor manera de fer-los funcionar. I un exemple final: compareu les joguines dels anys seixanta «fabricado en España» amb les joguines d'ara «made in Xina».

Tornem al muntatge electrònic. Potser no enteneu del tot el circuit de la figura 1. Si heu fet electrònica en cursos anteriors, us preguntareu: Per què funciona? On és la font de senyal? Com es transforma una porta NO-I en NO?

Si no heu fet electrònica, us preguntareu: Què significa el diagrama elèctric de la figura 1? Què és aquest triangle amb un botó davant etiquetat amb  $\frac{1}{4}$  4011?

No patiu, no us espanteu, podem llegir aquest muntatge a molts nivells, posem-ne 4; si esteu en el nivell de comprensió 1 i assoliu el 2, ja compliu; tots arribarem al nivell 4 quan toqui. Assumiu aquest repte, no us conformeu amb menys que la superació! Gaudiu de les eines: bibliografia recomanada, l'equip docent i... ganes, dedicació, treball en equip (que almenys ho sàpiga el teu company). Endavant!

## 2. Fonaments

### 2.1 Analitzem un circuit de dues malles

Modelem les bombetes com a resistències i dibuixem l'esquema elèctric d'una bateria de 6 V que es connecta al llum de carretera de 60 W d'una motocicleta. Quin corrent circula pel circuit? I quant val la resistència del llum? El capítol 2, d'anàlisi de circuits bàsics, de Thomas & Rosa pot guiar els més despistats, paciència.

«El món de l'automoció es preocupa pel consum»; així, molts dels llums dels cotxes moderns són «de baix consum». Esbrineu quins cotxes incorporen llums de xenó i díodes LED. Sabeu com funcionen aquests elements de llum? Quantifiquem l'estalvi respecte de les bombetes incandescentes de lluminositat equivalent. Quins altres sistemes d'il·luminació eficients podeu esmentar?

Dibuixeu l'esquema elèctric d'una bateria de 12 V que es connecta als dos llums de carretera d'un cotxe de 60 W cadascun. Quin corrent lliura la bateria? I quant val la resistència de cada llum? Alerta! Hem oblidat de tancar els llums (suposem només els del davant, de carretera). Quanta estona podem trigar a tornar abans no esgotem una bateria de 55 Ah?

Quina energia (en J) consumeix aquesta bombeta de 60 W engegada durant 1 hora? La sigla TEP significa «tona equivalent de petroli»: 1 TEP = 42 GJ. Suposant una eficiència del 100 %, quina fracció d'aquest TEP consumiria la bombeta durant 1 hora? I si suposem una eficiència del 30 % (habitual en els motors de combustió interna)?

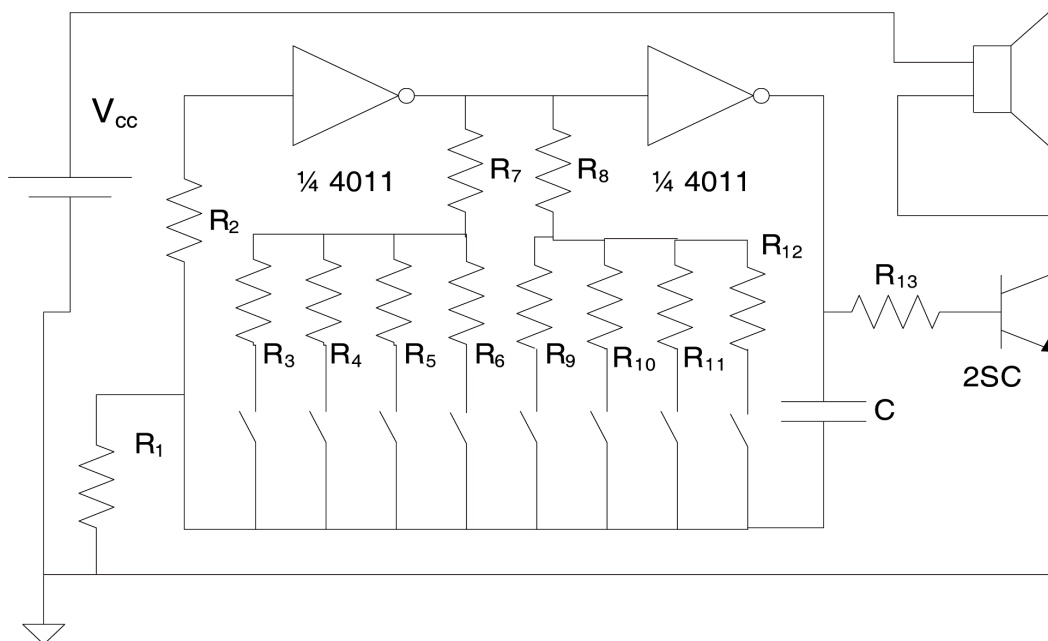
### 2.2 Una incursió a corre-cuita en el món digital

Sabeu què és un inversor o porta NO? I una porta NO-I? Mireu els primers fulls del capítol 3 de Floyd. Sigueu curiosos, ensumeu una mica d'aviònica en l'exemple 3.17.

Convertiu una porta NO-I en una porta NO. Què significa que les portes NO-I i NO-O formen un conjunt complet?

Esbrineu si un xip (en aquest cas el 4011) i el seu procés de fabricació estan lliures de plom. Pot ser que un mateix xip estigui lliure de plom, o no, en funció de qui el fabrica. La utilització de matèries perilloses pot ser el motiu pel qual la majoria de fàbriques de xips (foundries) es localitzen al sud-est asiàtic.

### 3. Desenvolupament



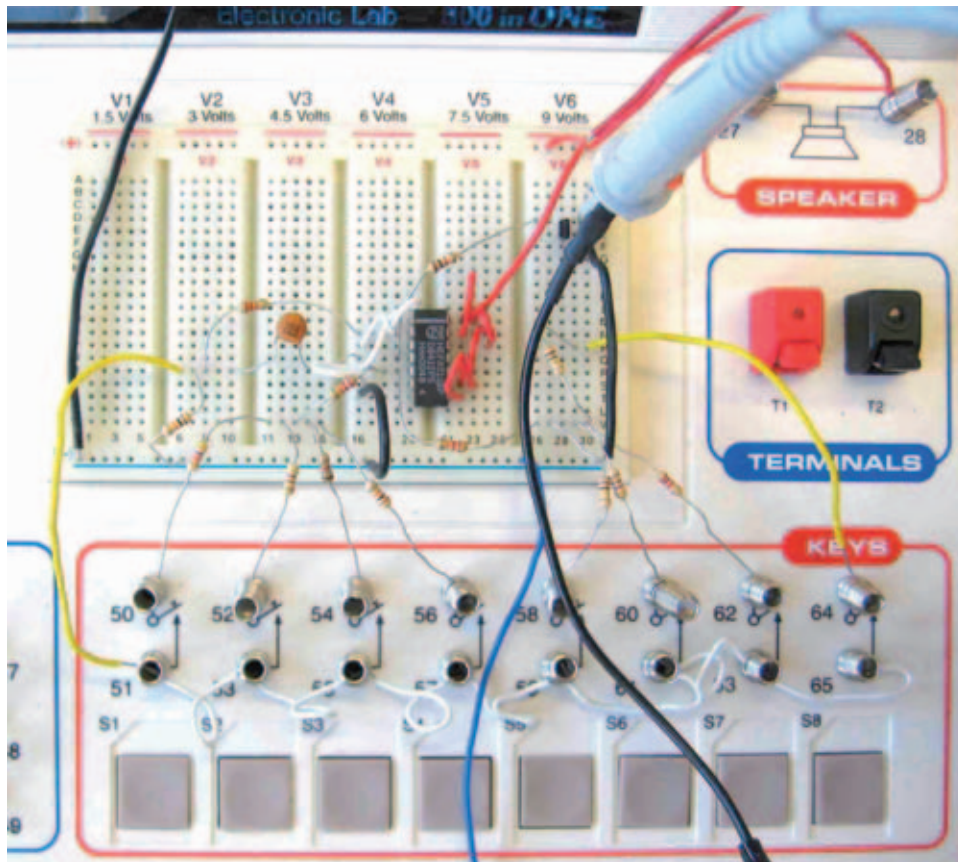
**Figura 1.**  $R_1 = 1\text{ M}\Omega$ ,  $R_2 = 220\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 5,6\text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 3,3\text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 1,8\text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_7 = 12\text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 8,2\text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 3,3\text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 2,2\text{ k}\Omega$ ,  $R_{11} = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_{12} = 470\ \Omega$ ,  $R_{13} = 10\text{ k}\Omega$ ,  $C = 100\text{ nF}$ ,  $V_{cc} = 5\text{ V}$

Efectivament, el circuit proposat per a l'orgue és un oscil·lador de relaxació: suposem un estat inicial amb el condensador C descarregat (forma de lletina marcada amb 104 a la figura 2), on la primera porta NO (la de l'esquerra en la figura 1, o les potes 1, 2, i 3 del xip 4011 de la figura 2) té un «1» lògic (5 V) a l'entrada i un «0» lògic (0 V) a la sortida, que a la vegada és l'entrada de la segona porta NO (potes 4, 5 i 6 del xip 4011) que mostra un «1» lògic (5 V) a la sortida; és a dir, 101. (Comproveu després de la situació inicial 010 també funciona.)

Si premem una tecla, tanquem el circuit format per C en sèrie amb dues resistències (la nota més greu serà R3 en sèrie de R7). Així C, de 100 nF, es comença a carregar, de primer més de pressa i, a mesura que la seva tensió augmenta, més a poc a poc.

Arriba un moment que l'entrada de la primera porta NO, a la qual no entra corrent i per tant la caiguda de tensió a R2 és nul·la, la interpreta com un «0» lògic i commuta la primera porta a «1» que, a la vegada, commuta la segona porta. Aquest és un procés sense fi que provoca que el circuit oscil·li a una freqüència funció de C i de les dues R sèrie seleccionades.

Finalment, R3 i el transistor 2SC amplifiquen el senyal per atacar l'altaveu i que soni. Munteu el circuit (podeu prendre el model de la figura 2, el valor de les resistències és arbitrari).



**Figura 2.** Placa de proves amb una realització de l'òrgue que es proposa en aquesta pràctica. La distribució topològica es pot prendre com a exemple, encara que els valors de les resistències són a l'atzar per dissuadir la còpia directa de l'esquema. La sonda de l'oscil·loscopi mesura la tensió de base del transistor 2N2222.

#### 4. Qüestions

Què significa que l'oïda humana sent els sons entre 20 Hz i 20 kHz? Podem interpretar l'oïda humana com un filtre de pas de banda?

Com descriuríeu un so de 20 Hz? I un de 20 kHz? Proveu-los al laboratori! Utilitzeu l'altaveu de la caixa/kit, el generador de funcions i l'oscil·loscopi per visualitzar l'ona.

Us sona quina és la resposta d'un circuit de primer ordre davant d'un grau? Si contesteu que no, mireu la secció 7-2 de resposta al graó de circuits de primer ordre de Thomas & Rosa. Si contesteu sí, formuleu l'equació matemàtica i interpreteu-la.

Què és un «oscil·lador de relaxació»? Podeu trobar el principi de funcionament en la secció 2.4 de filtres actius i oscil·ladors de Horowitz o a Internet (consultada per darrera vegada el 25-7-05, [http://www.unicrom.com/cir\\_oscilador\\_con\\_ujt.asp](http://www.unicrom.com/cir_oscilador_con_ujt.asp)).

Avalueu el consum del circuit en repòs (quan no toca cap nota). I quan toca una nota (busqueu el full d'especificacions del xip de portes 4011 i del transistor 2N2222)? Un mateix xip, en aquest cas el 4011, pot consumir més o menys segons la tecnologia de fabricació. Quina és la tecnologia del 4011 que



teniu al laboratori? Mesureu el consum de corrent amb el DMM en sèrie amb l'alimentació del circuit i una escala de corrent gran. Podríeu mesurar de la mateixa manera el consum de l'altaveu quan sona? I amb un oscil·loscopi?

Mireu amb l'oscil·loscopi la freqüència d'oscil·lació de cada nota, relacioneu R i C de l'oscil·lador amb la freqüència d'oscil·lació. Elaboreu-ne una taula.

Finalment, què us sembla l'estratègia de desconectar els circuits automàticament quan no s'utilitzen? En aquest circuit, es fa de manera global o parcial? Proposeu modificacions per aconseguir una reducció del consum més important. Una alternativa senzilla pot ser un interruptor en sèrie amb la font Vcc.

## 5. Bibliografia

[1] THOMAS, R. E.; ROSA, A. J. (2001). The Analysis and design of linear circuits (3a ed.). Nova York: John Wiley & sons.

[2] FLOYD, T. L. (2000). Fundamentos de sistemas digitales (7a ed.). Madrid: Prentice Hall.

[3] HOROWITZ, P. (1989). The art of electronics (2a ed.). Cambridge University Press.

[4] Pàgines web amb fulls de dades de portes NO-I 4011 de diferents fabricants i diferents tecnologies [consultades l'1-3-05]:

<<http://www.standardproducts.philips.com/support/techdocs/logic/pdf/hefspec.pdf>>

<<http://www.standardproducts.philips.com/products/hef/pdf/hef4011ub.pdf>>

<<http://www.national.com/mds/CD/MNCD4011BM-X.pdf>>

<<http://www.national.com/pf/CD/CD4011BM.html>>

<<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/2022.pdf>>

[5] Altres famílies de portes NO-I [consultades el 2-3-05]:

<<http://www.standardproducts.philips.com/products/als/pdf/74als00a.pdf>>

<<http://www.standardproducts.philips.com/products/fast/pdf/74f00.pdf>>

<<http://cache.national.com/ds/54/54F00.pdf>>

<<http://www.national.com/mds/54/MN54F00-X.pdf>>

[6] Sobre protecció del medi ambient en la producció de xips [consultades el 2-3-05]:

<<http://www.national.com/pf/leadfree.txt>>

<<http://www.national.com/packaging/leadfree/>>

<<http://www.national.com/quality/green/>>

<<http://www.st.com/stonline/company/environm/report03/envi03.pdf>>



## Capítol 14

# Presentació del laboratori bàsic d'electrònica

JOSEP M. TORRENTS

Departament d'Enginyeria Electrònica  
Universitat Politècnica de Catalunya

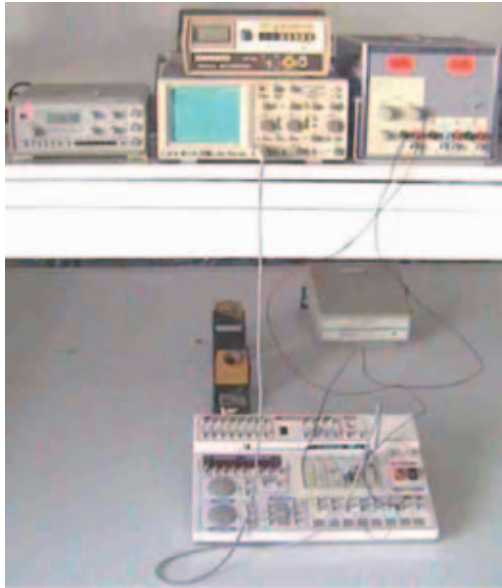
### 1. Introducció i objectius

Benvinguts al laboratori d'electrònica. En aquesta guia es descriuen un laboratori general d'electrònica i els seus instruments bàsics, com ara oscil·loscopi i multímetre (DMM), mitjançant comentaris i preguntes, de vegades molt obertes. Es persegueix impulsar l'aprenentatge autònom atesa la ràpida evolució de les tecnologies associades a les TIC, com l'electrònica. Ara i en el futur, aquesta habilitat d'aprenentatge ha de ser respectuosa amb l'entorn; els nostres fills ens jutjaran per l'herència «ambiental» que els deixem. El desenvolupament sostenible és un repte tecnològic que s'intueix en algun moment al llarg d'aquesta guia.

Agrupeu-vos en parelles. Abans d'anar al laboratori, estudeu de manera crítica i registreu comentaris, deures i punts destacats de cada pràctica en una sola llibreta en forma de diari. Després d'una posada en comú i de la consulta bibliogràfica, podeu formular els dubtes que tingueu al professor. Un cop dins el laboratori, registreu les mesures, discutiu els resultats i traieu-ne conclusions. D'aquesta manera, s'aprofita el temps al màxim.

### 2. Fonaments

Un laboratori bàsic d'electrònica consta, generalment, de 1) llocs de treball amb taules i cadires, 2) instruments de generació i de mesura on avui s'inclou el PC i 3) accés a la xarxa elèctrica per posar en marxa tant els instruments de mesura com els dispositius que es mesuren. (Vegeu la figura 1.)



**Figura 1.** Lloc de treball típic d'un laboratori bàsic d'electrònica. Sobre el prestatge i d'esquerra a dreta: generador de funcions, oscil·loscopi amb un DMM a sobre i font d'alimentació. Sobre la taula, en primer terme, la placa de proves i, en segon terme, un suport per a soldador i un altre DMM d'esquena. Fixeu-vos que l'oscil·loscopi duu una sonda, acostumeu-vos a connectar-les sempre.

Sabeu com funciona o per a què serveix cadascun dels instruments? Anoteu una definició de no més de tres o quatre línies per a cadascun. Aneu a la biblioteca, al prestatge que correspongui (per exemple, signatura 621.3.08) i busqueu-ne les definicions. Busqueu en catàlegs o a Internet els fabricants que ofereixen models d'aquests instruments amb un consum mínim (en el cas del PC, opteu per models portàtils).

En general i per a cada sessió de laboratori, sol·liciteu en préstec als mestres de laboratori:

- 2x sondes oscil·loscopi
- 4x cables banana-banana
- 2x cables BNC-banana
- 1x placa de proves i components de la caixa/kit

Entreu al laboratori amb el material i identifiqueu els elements del vostre lloc de treball, que serà el mateix al llarg del quadrimestre, dibuixeu-lo a mà alçada. Identifiqueu també els elements de seguretat elèctrica –magnetotèrmic i diferencial, connexions (derivacions) de terra–, com mostren la foto de la figura 2 i l'esquema de la figura 3 (copieu-lo a la llibreta per discutir-lo a classe); esbrineu com funcionen i per a quins nivells de corrent actuen; què vol dir armar-los? Estan ben dimensionats per als elements als quals subministren energia?

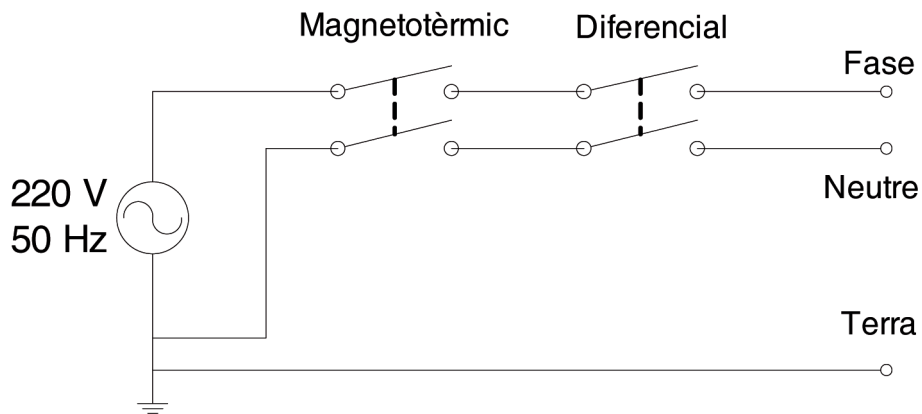
Esbrineu el consum de cadascun dels instruments –a partir 1) de la placa de característiques de la part posterior de la carcassa, 2) del full de característiques (que podeu demanar als mestres de taller), o 3) d'una cerca a Internet– (feu-ne una taula).

A qui protegeix el magnetotèrmic? I el diferencial? **AMB MOLTA PRECAUCIÓ** (sempre sota l'observació del professor i amb un company a prop del magnètic o diferencial per desarmar-lo immediatament en cas d'accident), identifiqueu, amb l'ajuda del DMM, la fase i el neutre en una base de xarxa (vegeu la figura 4).



**Figura 2.** Diferencial i magnetotèrmic

Exemple: Un lloc de treball consta de DMM (consum 20 W), oscil·loscopi (consum 100 W), font d'alimentació (FA) (300 W), generador de funcions (GF) (70 W) i PC (200 W). Un total de 690 W que, per a una tensió de 220 V, representa un corrent de 3,14 A. Si cada magnetotèrmic serveix quatre llocs de treball, el seu dimensionament mínim ha de ser de 15 A.



**Figura 3.** Esquema simplificat de la font d'energia del laboratori i elements de protecció

Si el DMM incorpora una sonda de corrent, podríem mesurar el corrent que arriba als instruments i, atès que considerem la tensió constant, calcularíem la potència i l'energia que consumeixen. En aquest cas concret, però no en altres casos, descartem utilitzar una resistència com a sonda de corrent perquè és perillós.



**Figura 4.** Mesura de la tensió de xarxa i detecció de fase i neutre en una mateixa base. Observeu que el conductor negre es connecta a terra en les figures b) i c), mentre que el vermell es connecta a la fase i al neutre, amb mesures properes a 220 V i 0 V respectivament.

Si cada sessió de laboratori és de dues hores i suposem que mantenim engegats els instruments tota l'estona més un fluorescent de 40 W, quin serà el consum en kWh d'un lloc de treball? Feu l'equivalència a la unitat corresponent del sistema internacional. Suposant que la companyia d'electricitat cobra a 0,1 € el kWh, quant ens costaria aquest consum si el paguéssim de la nostra butxaca?

Fem un petit incís: suposem que el nostre cos necessita 2.500 kcal diàries (metabolisme basal) per funcionar; si poguéssim obtenir aquesta energia de la xarxa elèctrica, quant hauríem de pagar cada dia per mantenir-nos? Quin és el consum TOTAL d'energia diari a Catalunya dividit pel nombre d'habitants? (Podeu buscar les dades de consum energètic a l'Institut Català d'Energia (ICAEN) —vegeu la bibliografia. Considereu una tona equivalent de petroli: TEP = 42 GJ.)

Completeu a la llibreta en forma de taula (4 x 7 quadres) els consums:

- a) d'un viatge de mitja hora de Barcelona a Castelldefels en cotxe (considereu 1 litre de gasolina = 40 MJ);
- b) d'un lloc de laboratori (durant 2 hores);
- c) d'una persona (durant tot el dia);
- d) el que es fa diàriament a Catalunya, dividit entre els seus habitants.

(Expresseu els resultats en 1) energia (J), 2) energia (kWh), 3) potència mitjana (W), 4) energia (litre de gasolina), 5) energia (TEP), 6) preu, si la font d'energia és xarxa elèctrica (0,1 € el kWh) i 7) preu, si la font d'energia és el litre de gasolina a 1,00 €.)

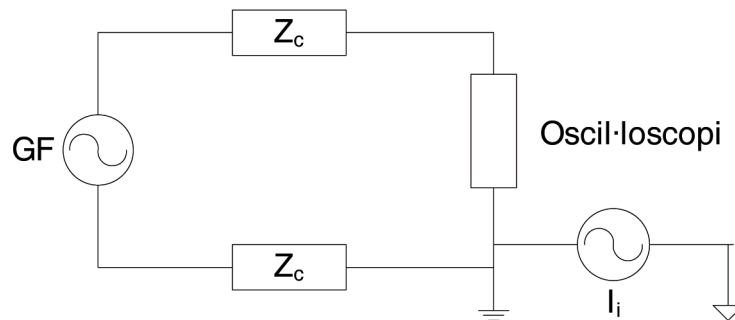
**Taula 1.** Exemple de taula per completar amb les dades de consums energètics (comproveu que no hi ha errors).

	<b>Viatge en cotxe</b>	<b>Lloc de laboratori</b>	<b>Persona</b>	<b>Catalunya / <math>7 \cdot 10^6</math></b>
Energia (J)	80 MJ		10 MJ	
Energia (kWh)	22,2 kWh			
P mitjana (W)	67 kW (en 20')		120 W (en 1 dia)	
Energia (l gas)	2 l		0,25 l	
Energia (TEP)	0,0019 TEP			
Preu elèctric (€)	2,22 €			
Preu gasolina (€)	2,00 €		0,24 €	

### 3. Desenvolupament

#### 3.1 Abast i marges de mesura dels instruments bàsics

Un cop superat aquest incís energètic, genereu una tensió contínua de 5 V amb la FA i mesureu-la amb el DMM i amb l'oscil·loscopi. Guieu-vos per l'esquema de la figura 5. Escriviu el resultat a la llibreta. Ídem amb 15 V. Ídem amb -15 V. Ídem amb 25 V. Amb quin instrument es mesura amb més exactitud, amb el DMM o amb l'oscil·loscopi?



**Figura 5.** Connexió bàsica de FA o GF amb l'oscil·loscopi i el DMM

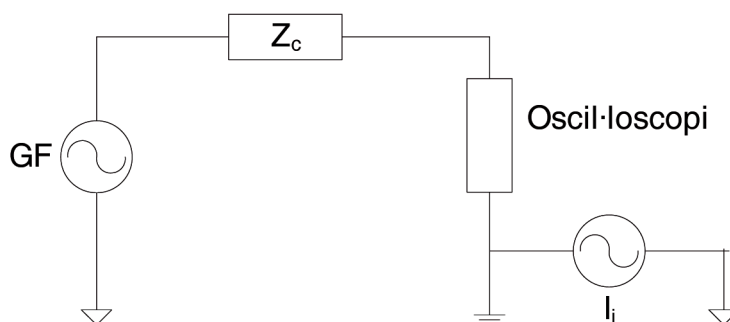
Genereu una tensió alterna sinusoidal d'1 kHz de freqüència i 1 V de pic d'amplitud amb el GF i mesureu-la amb el DMM i amb l'oscil·loscopi. Escriviu el resultat a la llibreta. Quin element de mesura aporta més informació? I quin més precisió? Com expressa el DMM una tensió alterna?

Ídem amb una tensió alterna quadrada. Coincideixen les mesures del DMM i de l'oscil·loscopi? Quina és errònia? Què vol dir DMM de valor eficaç vertader (true RMS)? El DMM del laboratori, és de valor eficaç vertader?

Quins són els marges de freqüència que pot generar el GF? Aquest marge, és el mateix per a tots els tipus d'ona? L'oscil·loscopi, és analògic o digital? Si és digital, incorpora submostratge? Quina freqüència màxima mesura?

### 3.2 Interferències resistives

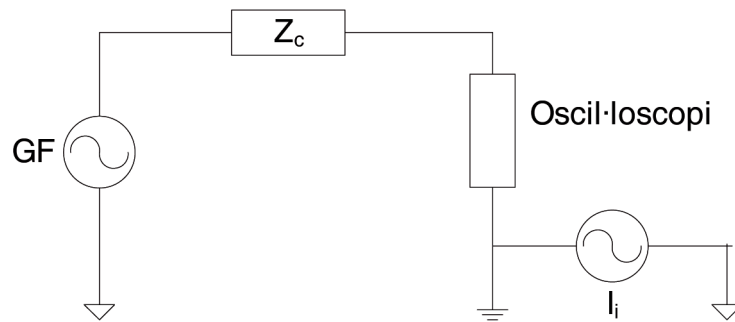
Visualitzeu amb l'oscil·loscopi un senyal sinusoidal del GF de 50 mV d'amplitud i 1 kHz de freqüència. Dibuixeu la forma d'ona i anoteu les sensibilitats del canal horitzontal i vertical. La figura 8 és un esquema de la connexió en què es considera també la resistència dels cables. Desconnecteu les malles, què passa? Amb precaució, connecteu la malla del GF al terra d'una base de xarxa. El senyal que apareix a la pantalla, s'assembla a l'original abans de desconnectar les malles? Quina diferència hi observeu? La figura 6 modela la nova situació.



**Figura 6.** Possible connexió entre GF i oscil·loscopi. S'hi inclouen impedàncies de cables de connexió i referències de terra. La font  $I_i$  modela senyals indesitjats que circulen pel terra.

Parlem d'interferència resistiva quan un senyal d'interès comparteix un conductor o una resistència amb un senyal indesitjat o interferència.

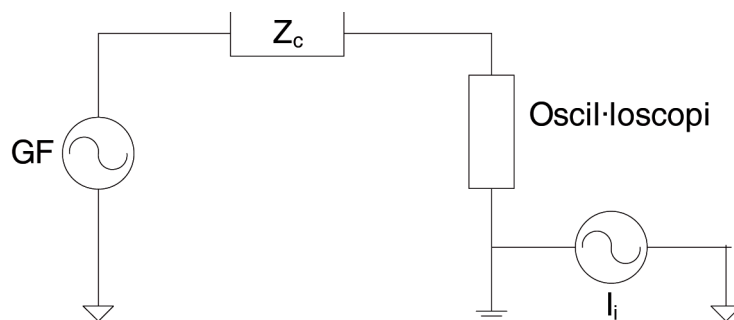
Cal connectar la malla de l'oscil·loscopi a terra? Per què? Repetiu el procés substituint l'oscil·loscopi pel DMM. Cal ara connectar la malla del DMM a terra per estabilitzar la lectura?



**Figura 7.** Possible esquema de connexió entre GF i oscil·loscopi, quan s'estalvia un cable i la malla del GF es connecta a terra.

### 3.3 Interferències capacitives o elèctriques

Acoblegu el senyal de disparament de l'oscil·loscopi (trigger) amb la xarxa (sovint l'instrument marca l'opció amb el símbol  $\sim$ ). Connecteu-hi una sonda i allargueu el connector central (el viu) amb un cable sense pantalla. Què observeu a l'oscil·loscopi? Si allargueu el cable o l'acosteu al fluorescent del lloc de treball (encara que estigui apagat), augmenta el senyal que s'hi observa? Per què? Interpreteu-ho a partir de la figura 8.



**Figura 8.** Possible model d'acoblament d'interferències capacitives

Dos conductors (per exemple, el cable sense pantalla i un conductor de la xarxa) separats per un dielèctric (per exemple, aire) defineixen una capacitat. Si suposem un equivalent de Thévenin de la xarxa, aquesta capacitat definida i l'equivalent de Thévenin de l'entrada de l'oscil·loscopi tanquen un circuit d'una malla. Aleshores, podem inferir el corrent interferent per aquesta causa a través de l'entrada de l'oscil·loscopi. Si suposem una resistència d'entrada de l'oscil·loscopi de  $1\text{ M}\Omega$ , quina és la potència que capta l'oscil·loscopi per aquest concepte? Parlem d'interferències capacitives si, a través d'una capacitat (paràsita), s'acobla un senyal indesitjat (interferent) en un circuit de mesura.

Busqueu xips de molt baix consum a Internet i a les bases de dades d'accés restringit als IP de domini UPC. Podríem alimentar un d'aquests xips només recollint l'energia d'aquest senyal interferent? (Busqueu també per les paraules clau: sistemes electrònics autònoms, recollida d'energia a l'ambient —energy harvesting—, etc.)

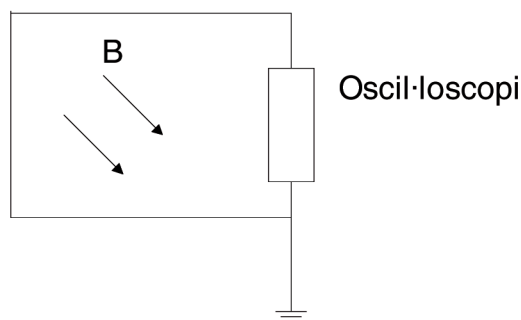
### 3.4 Interferències inductives o magnètiques

Formeu una espira múltiple petita a la punta de la sonda de l'oscil·loscopi. Situeu l'espira a prop d'un camp magnètic intens per exemple, la part superior posterior dels monitors de CRT (catode ray



tube)? i observeu el senyal en l'oscil·loscopi. Gireu l'espira. S'inverteix la polaritat del senyal observat? Es pot explicar mitjançant l'esquema de la figura 9? Si disminuïu la resolució del monitor, minva la freqüència del senyal observat? Relacioneu freqüència del senyal observat, resolució de pantalla i el seu refresc. Avalueu la potència que capta l'oscil·loscopi. Es podria alimentar algun xip de baix consum amb aquesta energia «recol·lectada» (energy harvesting)? Poseu-ne un exemple.

Un corrent que circula per un conductor indueix un altre corrent en un conductor veí, és a dir, el parell de conductors esdevenen un transformador, o el primari s'alimenta d'una font interferent i el secundari (o víctima) rep la interferència.



**Figura 9.** Possible esquema d'acoblament d'interferències inductives, en què B representa un camp magnètic.

Us sonen les sigles CMRR i SMRR? Són estratègies per evitar que el senyal interferent s'acobli al nostre circuit de mesura. Intenteu descriure, breument, la seva funcionalitat i aplicabilitat.

#### 4. Bibliografia

- [1] THOMAS, R. (1988). The analysis and design of linear circuits. Prentice-Hall International.
- [2] HOROWITZ, P. (1989). The art of electronics. Cambridge University Press.
- [3] PALLÀS, R. (1992). Instruments electrònics bàsics. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- [4] PRAT, L. (ed., 1998). Circuits i dispositius electrònics. Fonaments d'electrònica. Edicions UPC (recurs electrònic).
- [5] MORENO ALFONSO, N.; CANO GONZÁLEZ, R. (2004). Instalaciones eléctricas de baja tensión. Thomson.
- [6] KUEHR, R.; WILLIAMS, E. (editors, 2003). Computers and the Environment: Understanding and Managing Their Impacts. Kluwer Academic Publishers, Eco-Efficiency in Industry and Science Series, Dordrecht (Països Baixos).
- [7] PREDD, P. P. «How PC is your PC? [personal computer lifespan]», pàg. 11, volum 42, núm. 1, gener de 2005, IEEE Spectrum.
- [8] ICAEN, des de la pàgina inicial ([www.icaen.es](http://www.icaen.es)) aneu a «Publicacions» i tot seguit a «Eficiència

energètica» per consultar els documents; per exemple: «L'energia a Catalunya a l'horitzó del 2010» i «Els reptes energètics en el context internacional».

<[http://www.icaen.es/icaen/JSPAdmin\\_html/documents/pk74b1efmt-1972673737.pdf](http://www.icaen.es/icaen/JSPAdmin_html/documents/pk74b1efmt-1972673737.pdf)>

<[http://www.icaen.es/icaen/JSPAdmin\\_html/documents/9hdae9mit5-1788696262.pdf](http://www.icaen.es/icaen/JSPAdmin_html/documents/9hdae9mit5-1788696262.pdf)>

## Capítol 15

# Construcció d'un robot mòbil autònom ecoeficient

YOLANDA BOLEA I ANTONI GRAU

Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial (ESAI)

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció i objectius

L'objectiu principal de la pràctica és construir un robot mòbil autònom amb capacitat per recórrer el seu entorn, analitzar-lo detectant-ne els obstacles, crear un mapa de navegació i comunicar-se bidireccionalment amb altres equips.

El criteri bàsic per cobrir l'objectiu principal és l'ecoeficiència des de tots els punts de vista. Tots els materials, des de la selecció de materials fins al programari de control, passant per les bateries, els motors i les etapes sensorials que s'han d'implementar, estaran pensats perquè es puguin reutilitzar, reciclar i impliquin una despesa energètica mínima per al robot.

Un criteri secundari és que el robot sigui de baix cost, la qual cosa implica unes decisions de disseny determinades.

### 2. Metodologia

Per aconseguir l'objectiu marcat partirem de certes parts ja implementades, però abans identifiquem els elements que intervindran en el robot.

Aspectes que intervenen en la construcció d'un robot mòbil autònom:

- Materials per construir el robot i el seu disseny.

- Part mecànica: motors, codificadors (encoders), rodes motrius i directrius.
- Part elèctrica: etapa de potència per als motors.
- Part electrònica:
  - microcontrolador
  - sensors: principalment contactes, infraroig, ultrasons
  - comunicacions: inalàmbriques per radio o infraroigs
  - Bateries.
  - Programari del microcontrolador: microprogramari (firmware). Desenvolupament per capes. Rutina de control.

La part que implica la càrrega de feina més important és el disseny i la implementació del sistema microcontrolador i la seva interfície amb el PC per tal de transferir els programes que s'hi executaran. Aquest programari s'anomena microprogramari. Aquesta part ja està implementada i es dóna als alumnes juntament amb les instruccions de com es programa i l'esquema de connexions. Identifiquem doncs a continuació les parts que es donen fetes i el que han de fer els alumnes.

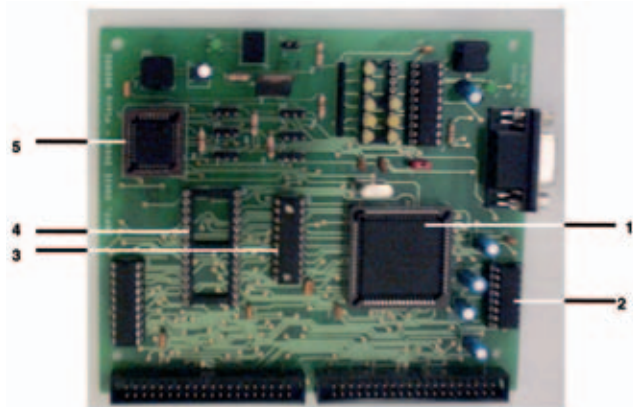
## 2.1 Part electrònica 1

### *Sistema microcontroladors*

El sistema microcontrolador serà el cervell del robot i a través del qual passarà tota la informació i les instruccions. Aquesta part ha de ser capaç de llegir tots els sensors i actuar sobre els motors amb conseqüència. També ordenarà quines són les dades que s'han de transferir i en quin moment.

D'entrada, cal dir que aquesta part es pot dur a terme amb molts microcontroladors, i aquí es dóna una possible implementació. Està basada en un microcontrolador 80C552 amb un core de i8031 d'Intel. S'ha escollit aquest microcontrolador perquè conté tots els elements perifèrics requerits, així com l'existència de diverses eines amigables per implementar codi.<sup>[1]</sup>

Els alumnes només han d'implementar el programari que correrà sobre el microcontrolador. Evidentment n'hauran d'entendre el funcionament, atès que han d'interconnectar tota la resta d'elements del robot amb la placa ESAll-MicroBot (figura 1).



**Figura 1.** Detall de la placa ESAll-MicroBot

**Taula 1.** Alguns elements de la placa microcontroladora

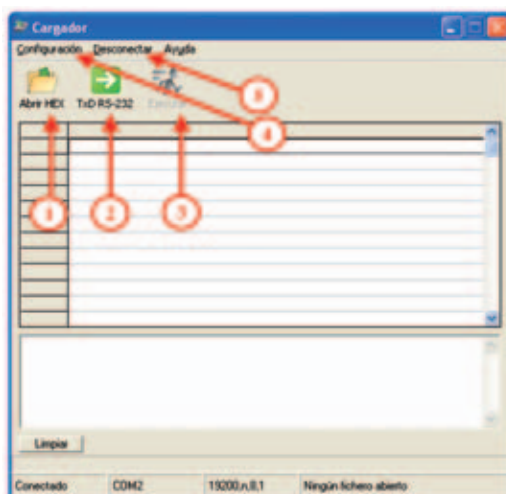
Identificació	Descripció
1	80C552: microcontrolador
2	MAX232: driver de línia sèrie RS-232
3	16V8: PAL
4	27C512: memòria ROM
5	29F040 (PLCC): memòria EEPROM (flash)

El consum màxim de la placa és de 200 mA i està molt optimitzada quant al nombre de xips i components electrònics que conté (taula 1).

La placa pot adreçar una memòria FLASH de fins a 512 Kbytes utilitzant tres bits del port 4 del microcontrolador. El microcontrolador conté també 8 conversors analogicodigitals per a la lectura de sensors analògics. La placa disposa de 2 connectors (al peu de la foto de la figura 1) a través dels quals es penjaran la resta de plaques i elements electrònics i elèctrics que formen el robot.

L'entorn de programació que s'ofereix és el uVision2 de Keil Software®.<sup>[2]</sup> Aquest programari de prova (shareware) permet programar en llenguatge d'assemblador i en llenguatge C. uVision2 és un entorn de programació integrat per als compiladors de C i assemblador que treballa amb el concepte de projecte. En un projecte hi poden haver diferents tipus de fitxers com a codi font: fitxers en ASM, fitxers en C, i llibreries ja compilades. Porta un depurador ja incorporat i suporta la majoria dels microcontroladors de la família MCS-51. Per familiaritzar-se amb l'entorn de programació el millor és recórrer al document «GSuVision2.PDF», que és una guia d'iniciació ràpida a l'entorn (<http://www.keil.com>)<sup>[2]</sup>. Entre les opcions de compilació que proporciona l'entorn s'ofereix la possibilitat de generar el fitxer amb format Intel-Hex necessari per al programador d'EPROM.

La placa va acompanyada d'un programa carregador (ESAI-LoaderBot) que permet executar programes sobre aquesta evitant treure l'EPROM, esborrar-la, gravar-la i tornar-la a col·locar a la placa. El programa carregador consisteix en dues aplicacions, una que funciona sobre la placa i una altra que funciona sobre el PC. Per instal·lar el carregador de la placa s'ha de gravar en una EPROM i inserir-la en el sòcol corresponent. El carregador que s'executa en el PC és una aplicació convencional que es pot executar en un ordinador equipat amb alguna variant del sistema operatiu Windows 98 o posterior que té l'aspecte de la figura 2.



**Figura 2.** Pantalla principal de l'ESAI-LoaderBot per transferir programes a la placa ESAII-MicroBot

El programa és senzill d'utilitzar seguint la seqüència d'operacions que s'indica.

Per saber més detalls de la placa ESAll-MicroBot, vegeu el fitxer ESAll-MicroBot.pdf adjunt.

## 2.2 Materials per construir el robot i disseny

En aquest punt cal decidir quins seran els materials per muntar el xassís del robot mòbil. Sobre aquesta estructura s'han de recolzar els motors i tota l'electrònica que es vulgui implementar.

Es pot disposar de diversos materials assequibles per part dels alumnes i fàcils d'aconseguir. Cal escollir un material que permeti suportar el pes de tots els elements que intervenen en la construcció del robot. Una possible llista de materials<sup>[11], [12], [13] i [15]</sup> és la que es dona a la taula 2.

Estaria bé que als alumnes no se'ls donés aquesta llista, sinó que l'elaboressin ells, pensant en els avantatges i els inconvenients de cadascun dels materials, sobretot en termes sostenibilistes.

Un cop decidits els materials, cal fer un plànol per tallar les peces necessàries i per situar i distribuir la resta d'elements del robot. Només així sabrem la superfície i la forma del xassís i el material de suport.

Com a recomanacions, podríem dir que el centre de gravetat es vol com més baix millor per tal de dotar de màxima estabilitat el vehicle. Per tant, els elements que més pesen (motors i piles) han d'estar situats prop del terra.

No es permetrà avançar en la construcció del robot si el professor no dona el vistiplau al disseny.

Els materials per a la construcció del robot

### *Metacrilat*

La fabricació, el processament i la utilització dels plàstics generen deixalles i és essencial que aquestes es manipulin adequadament per protegir les persones i el medi ambient.

El metacrilat es caracteritza per la seva alta resistència a l'alteració química i mecànica a baixes temperatures i per la seva escassa absorció d'aigua. Aquestes propietats fan que sigui un material adequat per a aïllaments i accessoris utilitzats a baixes temperatures, com en instal·lacions de refrigeració i en aeronaus destinades als vols a gran altura.

Avantatges: Fàcil de tallar i poc pes.

Inconvenients: Car, producció cara, difícil de reciclar, difícilment biodegradable, poc bioacumulatiu i poc sostenible

### *PVC (policlorur de vinil)*

El PVC és un plàstic derivat de la sal (57 %) i del petroli (43 %) i posseeix innumerables aplicacions, com ara embalatges, cables, etc. El reciclatge del PVC s'ha realitzat des del principi de la seva producció.

Avantatges: Fabricat amb baix consum d'energia, molt resistent, lleuger i barat.

Inconvenients: Poc sostenible.

### *Fusta (contraxapat)*

Actualment els boscos tropicals són la font de quasi el 30 % de totes les exportacions de troncs, el 10 % de taulons i el 60 % de fullola i de fusta contraplacada.

En l'assecatge de la fusta, el principal problema ambiental està lligat al consum d'energia. L'aspecte més contaminant de la indústria de la fusta està en la impregnació que serveix per protegir-la de diversos microorganismes. La quantitat d'agent impregnant depèn del tipus de fusta i de la destinació final que se li vol donar. En la impregnació amb creosota s'empra una barreja d'olis que contenen fenol i creosol que li donen el caràcter preservatiu. Durant l'aplicació tenen lloc emissions atmosfèriques. Les emissions continuen durant l'etapa d'emmagatzematge de la fusta impregnada. Algunes emissions es barregen amb els condensats que després es poden ajuntar amb aigües contaminades amb sals de metalls pesants també utilitzades. En el cas de pluges significatives, es produeix contaminació de sòls. Opcions de la P+N (producció més neta) en les indústries de la fusta són usar altres olis emulsionats amb aigua; reutilitzar les aigües en sistemes tancats; augmentar l'eficàcia de la transferència en l'aplicació automàtica dels recobriments, i reformular els recobriments emprant base aquosa i augmentant la concentració de sòlids. L'exportació de fusta dura, tot i ser una proporció petita de l'aprofitament que es fa dels arbres als tròpics —majoritàriament la fusta talada és emprada com a simple combustible—, és la que causa danys més importants, ja que s'hi destinen arbres de grans dimensions que s'extreuen amb maquinària pesant.

Les principals conseqüències de la deforestació són l'augment de l'efecte hivernacle, canvis climàtics a escala regional, erosió del sòl i pèrdua de biodiversitat. És convenient utilitzar fustes procedents d'explotacions sostenibles.

Avantatges: Fàcil de tallar i barata.

Inconvenients: Difícil de reciclar.

### *Fullola*

Les mateixes característiques que el contraxapat de fusta.

Avantatges: Lleugera i barata.

Inconvenients: Poca consistència.

### *Alumini*

Per obtenir l'alumini, de primer es processa la bauxita a alumina, deixant un residu, el llot roig, insoluble i alcalí. Tot seguit la reducció de l'alumina per electròlisi produeix l'alumini metall. Aquesta operació es realitza en banys de criolita fosa. El principal residu és una pasta formada a partir del revestiment dels tancs, una barreja de carbó i refractari que ha de ser reemplaçat periòdicament. El residu pastós conté cianurs formats durant el procés. Aquests cianurs, amb el temps, poden reaccionar amb altres components per formar principalment ferrocianurs de menor toxicitat. Durant l'electròlisi es formen gasos que contenen monòxid de carboni, àcid fluorhídric, diòxid de sofre i compostos orgànics. Les barres d'alumini es refreden directament amb aigua que la contaminen amb olis i sòlids. L'ajustament del consum d'energia és un altre factor clau en la fabricació d'alumini.

Avantatges: Molt lleuger i fàcil de tallar.  
Inconvenients: Car, producció cara i poc sostenible.

### *Ferro*

El mineral de ferro es combina amb coc, pedra calcària i addició d'aire a uns 1.000 °C en forn siderúrgic per produir ferro metàl·lic. Els gasos produïts, principalment una barreja de monòxid i diòxid de carboni, es condueixen per preescalfar l'aire d'entrada i generar vapor. Els gasos de l'alt forn es netegen i s'utilitzen com a combustible. Les bosses de gas que es formen entre càrregues successives originen emissions fugitives en ser evacuades. En la manipulació de les escòries s'emeten gasos sulfurats que s'han de recuperar igual que les emissions de pols. Com a manera directa de reduir les emissions en coqueries i alts forns, s'han desenvolupat noves tecnologies que utilitzen carbó polvoritzat en lloc de coc. Les aigües de refrigeració que no entren en contacte directe solament presenten problemes de contaminació tèrmica i es poden reutilitzar en altres operacions. Les aigües de rentatge dels gasos són similars a les aigües residuals de coqueria. El problema del tractament se simplifica fent una separació preliminar de les partícules en ciclons i separadors electrostàtics. L'escòria pot granular-se en condicions controlades i emprar-se en la fabricació de ciments i elements ceràmics.

Avantatges: Molt resistent.  
Inconvenients: Molt pesant, difícil de tallar i fàcil de reciclar.

### *Cartró*

Una de les característiques ambientals de la indústria de paper és el consum de grans quantitats d'aigua i energia. La indústria ha aconseguit des de la primera crisi energètica de la dècada dels setanta avenços significatius en la conservació de l'energia i reduccions en el consum d'aigua. En el blanqueig del paper s'ha d'estar emprant clor i hipoclorit. Un dels canvis introduïts en el procés de blanqueig per reduir el clor residual és la utilització de diòxid de clor. També cada cop més els blanquejats clàssics són reemplaçats pel peròxid d'hidrogen i, darrerament, per l'ozó. La indústria del paper ha aconseguit recuperar molts subproductes dirigint-los cap a altres tipus d'activitat industrial, malgrat que continua generant grans quantitats de corrents residuals, gasoses, sòlides i líquides. De les emissions gasoses, els compostos sulfurats són els més notables, però no els únics. Els volums d'aigües residuals són grans. Molts dels residus sòlids generats en calderes i tractaments d'aigua necessiten un tractament especial.

Avantatges: Fàcil de reciclar, fàcil de tallar i barat.  
Inconvenients: Poc resistent.

## 2.3 Part mecànica

Tot i que podria ser d'altres tipus (eruga, potes, serp...), per simplicitat, es proposa un robot amb rodes. Per tant, el pas següent és pensar en el tipus, el nombre i la disposició de les rodes que tindrà el robot. També hi ha moltes configuracions possibles, però una solució adequada per simplicitat i cost és disposar de dues rodes motrius sense direcció i una roda boja. Aleshores, el guiatge es porta a terme donant una velocitat diferent a cada roda.

Quant als motors,<sup>[10]</sup> es poden proposar motors de corrent continu (CC) o servomotors (figura 3), que tenen les característiques indicades en la taula 3. Cal fer buscar als alumnes característiques de dife-



rents motors en termes del seu parell i consum. Això, juntament amb la càrrega que ha de dur el robot, permetrà escollir el model que millor s'ajusti a les necessitats, sense sobredimensionar cap element. Cal remarcar el consum elèctric, per veure quin estalvi comporta dimensionar correctament els motors.<sup>[3]</sup>



**Figura 3.** a) i b) motors de CC, c) servomotor

**Taula 3.** Característiques del motors de CC i servomotors de la figura 3

<b>MOV112</b>	Diàmetre: 32 mm; llarg: 20,5 mm; eix: 13,6 x 2 mm Tensió: d'1,5 a 12 V CC, nominal 12 V Velocitat: 4.630 rpm Consum: 0,113 Amp Força: 17,5 g · cm
<b>MOV385</b>	Diàmetre: 28 mm; llarg: 37,8 mm; eix: 16 x 2,3 mm Tensió: de 6 a 18 V CC, nominal 12 V Velocitat: 9.500 rpm Consum: 0,260 Amp Força: 80 g · cm
<b>SERVOX6</b>	38 x 40 x 20 Pes: 44 g Parell: 4,8 Ncm, V = 27 Velocitat: 60° 4,8 V 0,21 s

Però, no solament s'ha d'optimitzar el consum energètic dels motors des del punt de vista de mínima despesa d'energia, sinó que també s'han d'utilitzar fonts d'energia renovables i no d'origen fòssil (petroli, gas i carbó). La característica d'aquestes fonts d'energia renovables que les fan tan atractives des del punt de vista mediambiental és la seva utilització com a matèries primeres d'uns recursos naturals que es renoven de manera contínua i, per tant, són inesgotables. Per contra, la generació i el consum de les energies convencionals causa importants efectes negatius en l'entorn; un exemple molt significatiu és que el 75 % de les emissions de gasos d'efecte hivernacle provenen d'aquest tipus d'energia. Sense arribar a dir que aquests efectes no existeixen en les energies renovables, sí que és cert, en canvi, que són infinitament menors. Les energies renovables no produeixen emissions de CO<sub>2</sub> i altres gasos contaminants a l'atmosfera, i no generen residus de difícil tractament, cosa que sí que s'esdevé en els anomenats combustibles fòssils.<sup>[14]</sup>

## 2.4 Part elèctrica

Aquesta part depèn principalment del tipus de motor que s'hagi escollit en el punt anterior, però la seva finalitat és donar la potència necessària als motors en funció dels senyals de control de baixa potència que provenen del sistema microcontrolador. Cal dimensionar els components perquè donin el corrent elèctric suficient als motors segons les seves especificacions.

## 2.5 Part electrònica 2

### Sistema sensorial

S'usaran bàsicament tres tipus de sensors:

- **Contacte:** aquests sensors són interruptors que es tanquen en el moment que són polsats mecànicament; per tant, serveixen per detectar que el robot ha col·lisionat amb algun objecte.
- **Ultrasons:** aquests sensors consten d'un emissor (o més) que emet una ona que viatja per l'aire. Si xoca contra algun objecte, rebota i és recollida per un receptor (o més). El temps que ha trigat aquesta ona a tornar indica la distància a què es troba l'objecte. Són indicats per a un abast mitjà (80 cm–5 m).<sup>[4]</sup>
- **Infraroigs:** el principi és semblant al dels ultrasons, però en lloc d'una ona de baixa freqüència s'envia llum infraroja. Indica la distància a la qual es troba l'objecte amb què ha xocat la llum. Serveixen per a un abast curt (10-80 cm).<sup>[5]</sup>

Si es vol mantenir l'objectiu de cost reduït no es poden plantejar sensors làser ni cambres per a processat de vídeo, ja que el seu cost és massa elevat.

En aquest apartat cal dimensionar correctament els components per tal d'evitar el consum de corrents innecessaris; per exemple, els sensors de contacte han de ser N/O (normalment oberts), perquè només consumeixin quan el robot col·lisiona i no a l'inrevés.

### *Comunicacions*

El robot i la base central es poden intercanviar informació en ambdós sentits: la base pot reprogramar el comportament del robot en qualsevol moment, i el robot pot indicar a la base l'estat dels sensors per tal de crear un mapa de l'entorn. Per dur a terme aquesta comunicació es proposa l'ús d'un estàndard suportat tant pel microcontrolador com per qualsevol base tipus PC: RS-232. El mitjà serà per radiofreqüència, la qual cosa dóna realment autonomia al robot. Es disposa d'uns emissors/receptors Bi2M que són fàcilment connectables a la línia sèrie de qualsevol processador. Vegeu-ne la descripció en <sup>[6]</sup> i <sup>[7]</sup>.

En aquest apartat s'haurà de controlar molt bé el protocol de comunicacions, atès que el consum dels emissors de ràdio és elevat i, per tant, només s'emetrà la informació justa i precisa, sense excessos. El professor supervisarà el protocol escollit pels alumnes basant-se en RS-232 sense fil.

## 2.6 Bateries

Com a font d'energia per al robot es proposa l'ús de 5 piles recarregables d'1,2 volts en sèrie, fins a aconseguir 6,0 volts. Molts dels components que cal emprar en la pràctica necessiten 5 volts, i amb 4 piles seria insuficient. A més, les piles baixen ràpidament el seu voltatge a la sortida, amb la qual cosa, 4 piles donarien aviat menys de 4,8 volts i posarien en perill el funcionament correcte dels components i, per tant, l'autonomia del robot. Així doncs, cal usar un regulador de tensió de baixa caiguda per mantenir 5 volts constants com a alimentació dels components.

Les piles poden ser del tipus AA, i seria suficient una capacitat de 1.600 mAh per dotar el robot d'una autonomia acceptable.

Per a la recàrrega de les piles es proposa la implementació d'un circuit de recàrrega ràpida (1 hora en lloc de 12-16 hores), per mitjà d'un circuit electrònic fàcil d'implementar.<sup>[8]</sup> Els borns per a la recàrrega poden estar a l'aire, o sigui en una paret per exemple, i fer que el robot s'aproximi ell sol al lloc de la recàrrega quan detecti que s'esgoten les piles i autocarregar-se fent contacte amb els seus borns i els del circuit de recàrrega. Aquesta podria ser una ampliació de la pràctica o bé una de les missions que hauria de complir el robot.

Una variant per a la recàrrega de les piles són els panells de cèl·lules solars, però cal que el robot es mogui en un entorn obert, la qual cosa dificulta l'aspecte docent, però sempre és una opció per als alumnes que ho volen fer a casa. Hi ha panells de cèl·lules solars de poc pes i que, connectats adequadament, arriben a donar la tensió i el corrent necessaris per carregar les piles que alimentaran el robot amb els components electrònics.<sup>[9]</sup>

Les piles d'hidrogen encara no donen prou corrent per dotar el robot de prou autonomia. El muntatge és complex, delicat i car.

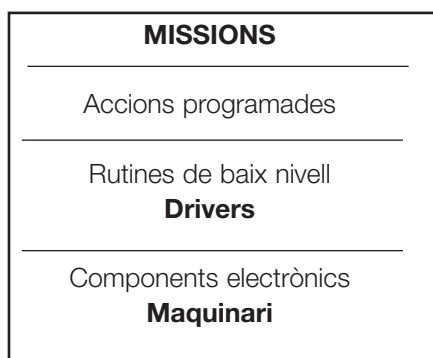
## 2.7 Interconnexió de tots els elements

Quan ja s'han decidit tots els components que integraran el robot, cal muntar-los i interconnectar-los entre ells. Cal seguir els plànols que marquen el disseny del robot. Tant les plaques com els components aïllats han de quedar ben subjectes al xassís.

## 2.8 Programari del microcontrolador

### *Desenvolupament per capes*

Per tal de programar el robot seguirem un esquema com el presentat en la figura 4. Les rutines estan dividides en capes, on cada capa té un objectiu concret i cada rutina d'una capa només veu les rutines de la capa inferior. Això ens permetrà independitzar el codi de la manera com està implementat el robot, i a més permet la modularitat i la reusabilitat del mateix codi.



**Figura 4.** Capes del programari per al robot autònom

Encara que aquest sigui el punt final, estaria bé que els alumnes provessin la placa microcontroladora abans d'interconnectar la resta de components. Un cop es verifica que aquesta funciona correctament mitjançant les barres de LED indicadores, cal connectar elèctricament els components d'un en un i verificar-los. No es pot connectar un nou component fins que l'anterior hagi passat un conjunt de proves en funció de la naturalesa del component.

Així doncs, les rutines que ataquen directament els components electrònics estaran en la capa de drivers. A continuació se n'esmenten alguns exemples:

Rutines de baix nivell (drivers):

- Lectura dels codificadors.
- Lectura dels ultrasons.
- Control dels motors.
- Enviar/rebre per la línia sèrie.
- Lectura dels infraroigs.
- Gestió dels contactes.
- Temporitzar esdeveniments.
- ...

En una capa superior, es pot dotar el programador d'un conjunt de rutines més elaborades que permetin realitzar un conjunt d'accions sobre el robot, independentment de l'electrònica que integri el robot. A continuació se n'esmenten algunes.

Accions programades:

- Avançar en línia recta.
- Avançar en arc.
- Girar un angle determinat.
- Aturar-se.
- Retrocedir.
- Detectar un obstacle.
- ...

Finalment, es poden programar les missions que el robot ha de ser capaç de portar a terme i que, com es pot veure, són d'alt nivell. Cadascuna d'aquestes missions s'ha de programar exclusivament a partir de les accions bàsiques, fet que permet una independència absoluta sobre el tipus de robot en què es desitja implementar aquella missió.

Missions:

- Construir el mapa de l'entorn.
- Seguir un altre robot.
- Evadir un altre robot.
- Autocarregar les bateries

- Localitzar i resseguir objectes.
- ...

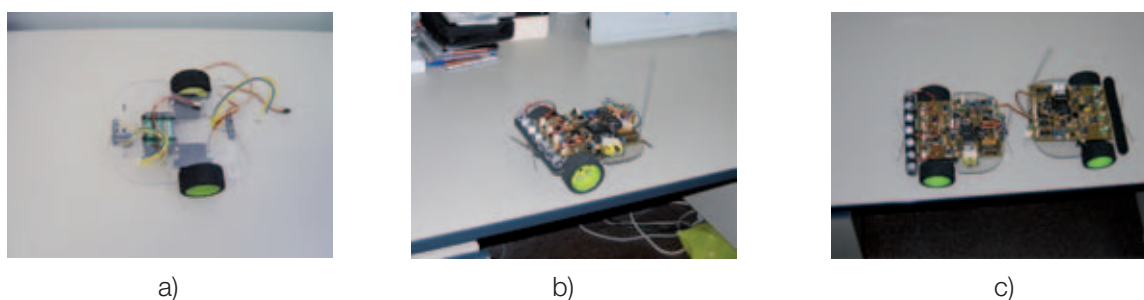
A partir de totes les rutines a tots els nivells que realitzin els alumnes, es pot crear una llibreria de rutines que serveixi per a la resta d'alumnes; d'aquesta manera es poden executar funcions complexes sense haver d'implementar tot el codi en tots els nivells cada vegada. Això permet modularitat i, sobretot, reusabilitat de codi.

És obvi que cal començar programant els drivers per a cada component físic que estigui muntat sobre el robot i verificar-lo en múltiples condicions, creant jocs de proves específics per a cadascun. A partir d'aquí es poden implementar rutines de més alt nivell, però sempre verificant-la per separat i amb un joc de proves dissenyat específicament per a aquella rutina.

### *Rutina de control*

Un dels objectius més importants perquè un robot sigui ecoeficient, a més de construir-lo amb materials sostenibles (mecànica, electrònica, etc.), és que al llarg de la seva vida el seu funcionament ocasioni una despesa mínima (càlcul de trajectòria òptima, arrencada i parada suaus, consum d'energia mínim, etc.<sup>[16]</sup>). En aquesta pràctica ens centrarem en aquest últim punt: consum d'energia mínim dels motors (que són els actuadors responsables de moure el robot). Per a això, haurem de programar en el microprocessador una rutina que representi un control òptim quant a esforç de control.

De fet, el control òptim<sup>[17]</sup> consisteix a dissenyar un controlador (càlcul dels seus paràmetres; per exemple en el cas d'un controlador PID, s'han de sintonitzar les accions de control següents:  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) que minimitzi un índex de comportament o funció de cost ( $J$ ) determinat per l'enginyer de control. Aquesta funció de cost és una expressió matemàtica que representa les característiques desitjades del sistema de control. En aquest cas, per tenir un sistema de control robòtic per a la sostenibilitat, es vol un consum mínim d'energia, que es pot representar mitjançant el disseny d'un controlador que minimitzi la funció de cost següent:  $J = \int_0^1 u(t)^2 dt$ , en què  $u$  és el senyal de control, és a dir, el consum d'energia dels motors.



**Figura 5.** Diverses vistes dels robots

En la figura 5 a) es veu un detall de la base del robot, amb el compartiment de les piles i els servomotors per a la tracció del robot. S'observa la peça de metacrilat com a base per a l'estructura. En la figura 5 b) es veu el mateix robot però amb tots els components electrònics: placa microprocessadora i els sensors d'ultrasons al davant, i també s'hi aprecia l'antena per a la transmissió/recepció d'informació. En la figura 5 c) es veu una parella de robots amb la mateixa estructura, però amb components electrònics diferents (un altre sistema microprocessador i conjunt de sensors).

### 3. Bibliografia

- [1] <<http://semiconductors.philips.com/microcontrollers/>>, microcontroladors.
- [2] <<http://www.keil.com/dd/chip/3104.htm>>, compilador.
- [3] <<http://www.didel.com/microkit/pricelist/>>, material per fer la mecànica.
- [4] <<http://www.msiusa.com>>, emissor i receptor d'ultrasons.
- [5] <[http://zuff.info/SharpGP2D12\\_E.html](http://zuff.info/SharpGP2D12_E.html)>, sensor infraroig.
- [6] <[http://www.radiometrix.com/html/products/bim\\_6.html](http://www.radiometrix.com/html/products/bim_6.html)>
- [7] <<http://www.radiometrix.com/html/products/apnt3.html>>
- [8] <[www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com)>, kit càrrega MAX 712/713 EVKIT.
- [9] <<http://www.erpt.net/>>, panells de cèl·lules solars.
- [10] <[http://www.micropik.com/provisional/pag\\_motores\\_MOTORES\\_CC.htm](http://www.micropik.com/provisional/pag_motores_MOTORES_CC.htm)>, motors de CC i servos.
- [11] <<http://www.wikipedia.org>>, plàstics: metacrilat i PVC.
- [12] <<http://www.institutodopvc.org/espanol/pvc.htm>>, PVC.
- [13] <<http://www.xarxaconsum.org/materials/tropic.htm#irresponsable>>, fusta i fullola.
- [14] <<http://www10.gencat.net/gencat/AppJava/cat/actualitat/multimedia/50725pladelenergia.jsp>>, pla d'energia de la Generalitat de Catalunya.
- [15] RIGOLA, M. (1998). Producció + Neta. Rubes.
- [16] OLLERO, A. (2001). Robótica. Manipuladores y robots móviles. Marcombo.
- [17] UMEZ-ERONINI, E. (2001). Dinámica de sistemas y control. Thomson Learning.

## Capítol 16

# Identificació de components en una placa de circuit imprès per al seu desacoblament

ANTONI GRAU I YOLANDA BOLEA

Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial (ESAI)  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció i objectius

Els e-residus, residus que provenen d'equips electrònics, cada dia són més nombrosos a causa de la creixent demanda d'aquests equips i, principalment, del curt cicle de vida útil a què estan sotmesos per raons comercials. Els avenços tecnològics fan que apareguin nous equips amb millors prestacions molt abans que l'equip anterior hagi estat amortitzat, tant econòmicament com tècnicament. Això provoca que molts equips (ordinadors i equips informàtics, reproductors de vídeo, DVD i CD, televisors, aparells Hi-Fi, entre altres) passin a engrossir la llista de residus que han de ser gestionats adequadament, prioritzant el reciclatge.

L'objectiu principal de la pràctica és mostrar als alumnes que gràcies a un procés automàtic de visió per computador<sup>[1]</sup> és possible separar components electrònics, que poden ser reutilitzats per a aplicacions posteriors, es poden reciclar per a altres usos o es poden aïllar per ser tractats i eliminar les parts nocives que no es poden abocar directament al medi ambient. Per aconseguir aquest objectiu de marcat caràcter ambiental, les imatges digitals s'hauran d'analitzar per tal de localitzar i identificar els diferents components que hi ha sobre una placa de circuit imprès. Aquests components poden ser electrònics, mecànics, elèctrics i electromecànics.

## 2. Desenvolupament

### 2.1 Programari que s'ha d'utilitzar

Per realitzar la pràctica s'ha d'usar Matlab®, i concretament Image Processing Toolbox,<sup>[2]</sup> a partir de la versió 3.1 (R12.1). Aquest programari està llicenciat en la majoria de les universitats catalanes.

### 2.2 Especificacions d'entrada

Les imatges d'entrada es poden obtenir de diverses fonts, en funció del maquinari de què es disposi i del grau de dificultat de la pràctica.

Opció 1 – Grau de dificultat baix. La imatge s'haurà d'haver obtingut en un procés fora de línia (off-line) amb qualsevol mitjà, o fins i tot es pot obtenir d'Internet. L'únic requisit és que la imatge estigui codificada amb algun estàndard d'imatge reconegut per Matlab (taula 1):

**Taula 1.** Formats d'imatges acceptats per Image Processing Toolbox V3.1

Extensió	Descripció
'jpg' o 'jpeg'	Joint Photographic Experts Group (JPEG)
'tif' o 'tiff'	Tagged Image File Format (TIFF)
'gif'	Graphics Interchange Format (GIF)
'bmp'	Windows Bitmap (BMP)
'png'	Portable Network Graphics
'hdf'	Hierarchical Data Format (HDF)
'pcx'	Windows Paintbrush (PCX)
'xwd'	X Window Dump (XWD)
'cur'	Windows Cursor resources (CUR)
'ico'	Windows Icon resources (ICO)

En aquest cas es recomana la comanda:

```
A = imread(nom_fitxer,format)
```

A serà la matriu que conté la imatge i FMT és una cadena que identifica el format de la imatge.

La relació píxel/mm s'entra com una dada més, ja que físicament no es pot calcular sobre la imatge perquè no té cap referència.

Opció 2 – Grau de dificultat alt. Si es disposa d'una càmera web, mitjançant connexió USB, es pot usar la captura en línia a través de la llibreria vcapg2.dll. El codi següent mostra en una finestra la imatge en línia que es rep des de la càmera via USB:

```
% Modalitat inicialització  
clear all;  
cardnum=vcapg2;  
% usualment el dispositiu de captura de vídeo és el número 1  
% Modalitat captura  
aa=vcapg2; % captura la imatge de la càmera  
imshow(vcapg2);  
waitforbuttonpress;
```



Caldrà preparar un escenari per a l'adquisició de les imatges per tal que ens resulti més senzill el primer processament de la imatge. En aquest cas, caldrà tenir en compte dos aspectes:

Fons de la imatge: cal posar la placa sobre un fons uniforme, de manera que ressalti i, almenys, la placa sigui fàcilment segmentable.

Il·luminació uniforme: cal vigilar molt amb la font d'il·luminació i evitar fonts direccionals (focus, làmpades), ja que es crearan ombres sobre la placa i també es generaran reflexos sobre els elements metàl·lics. Per tant, es recomana un fons d'il·luminació difusa i indirecta però constant sobre tota la placa.

També caldrà calibrar la càmera per tal d'obtenir el valor píxel/mm, que relaciona una distància en píxels amb la que li correspon en mil·límetres.

No és previst l'ús de plaques específiques de captura i adquisició d'imatges.

### 2.3 Especificacions de sortida

Com a resultat de la pràctica s'espera una llista d'ítems que indicaran la posició relativa de cada component localitzat sobre la placa, així com una etiqueta identificativa que indica de quin component es tracta. El format proposat és el següent:

...  
Component i <xCi, yCi> <max\_radi> <eix\_min\_inercia> <id>  
...

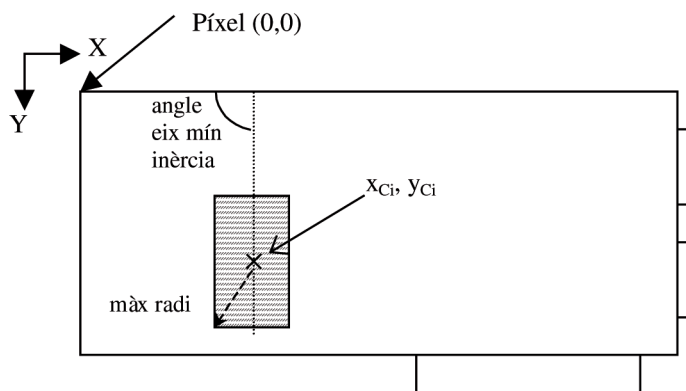


Figura 1. Representació gràfica dels valors de sortida

Per a cada component i es dona el seu centre de gravetat sobre el pla X-Y i max\_radi, el màxim radi o màxima semidiagonal, segons que es tracti d'objectes circulars/el·líptics o polièdrics (rectangle envolupant) respectivament. També s'haurà de calcular l'eix de mínima inèrcia eix\_min\_inercia (eix de simetria), suposant que la placa està ben alineada amb la màxima aresta a 0° (en realitat aquesta assumpció és fàcil de fer, ja que l'alineament és mecànic), vegeu la figura 1. L'etiqueta id s'obté de la taula 2 (part de l'enunciat de la pràctica).

S'aconsella l'ús d'aquest format per a la sortida de resultats, perquè cal pensar que el procés de visió és un pas més en la cadena del desacoblament; a continuació, vindria un element robòtic que haurà d'agafar el component mentre es desolda de la placa. Per tant, la pinça del robot necessita tenir el

centre de gravetat entre els dos dits, i a més, cal conèixer-ne el radi i l'angle en el punt més allunyat per tal d'orientar la pinça i saber l'obertura que ha de presentar.

Les coordenades del centre de gravetat de tots els components localitzats estan expressades en píxels i referenciades al vèrtex superior esquerre de la placa, que correspon al píxel (0,0).

## 2.4 Passos que s'han de seguir

Tot i que la solució a molts dels problemes de visió artificial no és única, per a aquesta pràctica es proposa un guió que pot facilitar-ne la resolució.

Pas 1 – Lectura de la imatge. Tal com s'ha comentat en l'apartat d'especificacions d'entrada, podem llegir la imatge d'un fitxer o la podem adquirir directament del bus USB.

Pas 2 – Reescalament de la imatge. Cal reescalar la imatge per tal de cobrir tot el rang dinàmic possible segons el tipus de dades amb el qual es representa la imatge.

Pas 3 – Detecció dels components. Aquest és el primer pas per a la segmentació dels components que integren la placa. L'objecte que s'ha de segmentar ha de tenir un cert grau de contrast respecte al fons; en aquest cas, és la baquelita de la placa. Aquests canvis en el contrast es troben amb operadors que calculen el gradient de la imatge. Un d'aquests podria ser l'operador de Sobel, el qual crea una màscara binària a partir d'un determinat valor llindar. L'alumne ha de trobar el llindar apropiat (de manera automàtica) per tenir la millor segmentació.

Pas 4 – Omplir forats. La màscara gradient binària mostrarà línies d'alt contrast en la imatge. Aquestes línies no delimiten exactament el perfil de l'objecte d'interès. En comparar-lo amb la imatge original, s'apreciaran espais i forats en les línies al voltant de l'objecte en la màscara del gradient. Aquests forats haurien de desaparèixer si la imatge del Sobel es dilata. Per a la dilatació es poden usar, entre altres, elements d'estructura lineal, els quals s'hauran de crear en aquest pas.

Pas 5 – Dilatació de la imatge. La màscara gradient binària s'ha de dilatar amb elements estructurats verticals i horitzontals.

Pas 6 – Omplir espais interiors. La màscara gradient dilatada hauria de mostrar el perfil dels objectes força bé, però encara hi ha forats a l'interior. Aquests s'han d'omplir.

Pas 7 – Eliminar les regions connectades en la frontera. Tot i que la segmentació s'ha dut a terme, poden quedar elements connectats a la frontera dels objectes. Cal fixar la 4-connectivitat per tal d'eliminar les connexions diagonals, si no, els objectes no se separen del tot.

Pas 8 – Suavitzar els objectes. Després de les operacions anteriors sobre els objectes, aquests hauran perdut la seva forma natural; per recuperar-la, cal erosionar la imatge dues vegades amb un element amb estructura de diamant. Una alternativa per mostrar els objectes segmentats podria ser mitjançant un contorn al seu voltant (funció `bwperim`); vegeu la figura 2 d'exemple. Cal recordar que només s'accepten objectes que superen una certa àrea.

Pas 9 – Per a cada objecte cal trobar el seu centre de gravetat; el rectangle envolupant, per tal de trobar el màxim radi, i l'eix de mínima inèrcia. Tot seguit es donen les equacions que cal implementar.

Moment de qualsevol ordre per a un objecte de la imatge:

$$\text{moment } X_n Y_n = \sum_i X_i^n Y_i^n$$

$X_i$  i  $Y_i$  són les coordenades de tots els píxels d'un mateix objecte.

Centre de gravetat, coordenada X

$$\text{centre de gravetat } X = \frac{\text{moment } X_1 Y_0}{\text{àrea}}$$

Centre de gravetat, coordenada Y

$$\text{centre de gravetat } Y = \frac{\text{moment } X_0 Y_1}{\text{àrea}}$$

Moment central:

$$\text{moment central } X_n Y_m = \sum_i (X_i - \text{centre de gravetat } X)^n \cdot (Y_i - \text{centre de gravetat } Y)^m$$

Eix de mínima inèrcia: és l'eix de simetria d'un objecte i el seu valor varia en l'interval  $[-\pi/2, +\pi/2]$ :

$$\text{eix de mínima inèrcia} = -\frac{1}{2} \arctg \left( \frac{2 \cdot \text{moment central } X_1 Y_1}{\text{moment central } X_2 Y_0 - \text{moment central } X_0 Y_2} \right)$$

### 3. Aplicació d'heurístiques

Com en moltes aplicacions en què la visió artificial té un paper rellevant, es permet l'ús d'heurístiques per facilitar el procés d'identificació. Uns exemples serien que si es detecta un rectangle just al costat del límit de la placa, aquest no pot ser un circuit integrat sinó que, amb gran probabilitat, serà un connector; el component que es detecti sota la placa, amb gran probabilitat serà el connector del bus (PCI, EISA...), i per tant ja no cal analitzar aquella àrea de la placa.

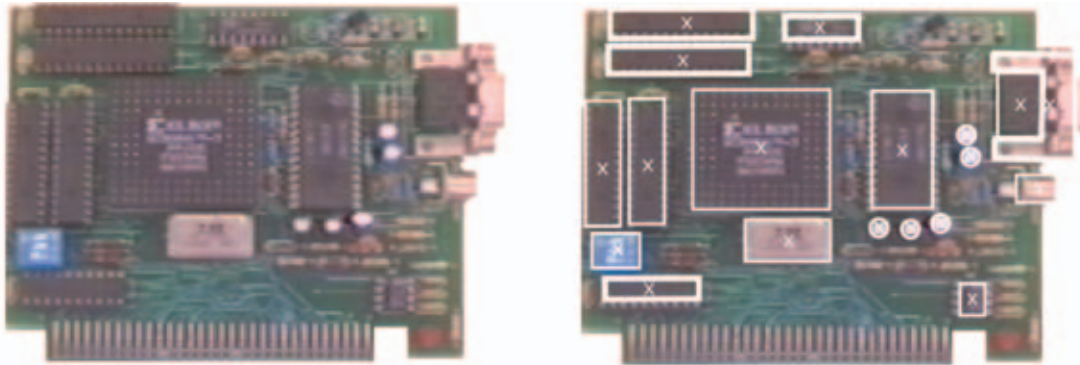
L'alumne podrà proposar totes les heurístiques que permetin identificar millor els components localitzats en la placa.

## 4. Informació addicional

Taula 2. Identificadors de components

Identificador	Descripció*
1	Circuits integrats rectangulars grans (>24 pins) DIP, DIL...
2	Circuits integrats rectangulars petits ( $\leq 24$ pins) (DIP, DIL...)
3	Circuits integrats quadrats grans (>44 pins) (PLCC...)
3	Circuits integrats quadrats petits ( $\leq 44$ pins) (PLCC...)
4	Condensadors amb polaritat (cilíndrics)
5	Cristalls
6	Transformadors
7	Relés
8	Selectors (switches)
9	Connectors cilíndrics (RCA, BNC, jack...)
10	Connectors rectangulars tipus I (cable pla)
11	Connectors rectangulars tipus II (Canon DB9-DB25...)

\* Només s'identificaran els components que tenen una mida prou gran per ser detectats; la resta no es tenen en compte (components discrets R, C, L, transistors, díodes...).



**Figura 2.** Exemple de detecció de components i dispositius.  
Esquerra: imatge d'entrada; dreta: components segmentats contornejats

## 5. Bibliografia

[1] JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B. G. (1995). Machine Vision. McGraw-Hill International Editions.

[2] GONZÁLEZ, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. (2004). Digital Image Processing Using MATLAB. Prentice Hall Ed.

## Capítol 17

# Modelització d'un canal de reg

ANTONI GRAU I YOLANDA BOLEA

Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial (ESAI)

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció i objectius

L'aigua és un bé escàs que s'ha de gestionar eficaçment. La consciència d'aquesta necessitat ha anat creixent significativament durant els darrers anys, a mesura que ha anat augmentant l'ús de l'aigua per a diversos usos. Una d'aquestes utilitats és l'agrícola, que absorbeix prop del 80 % del consum d'aigua en el nostre país. Es calcula que d'aquest reg depèn un terç de la producció d'aliments a escala mundial. Bàsicament, els usos agrícoles de l'aigua són la utilització del recurs hídric per satisfer els dèficits resultants de l'evapotranspiració dels cultius. De vegades també s'engloben en aquest concepte els usos ramaders de l'aigua. En un principi, les necessitats hídriques dels cultius es podrien satisfer directament mitjançant les precipitacions naturals, però en el nostre país, el règim hídric irregular obliga a haver de realitzar aportacions d'aigua artificials o suplementàries a aquestes precipitacions (fet que és especialment greu o acusat en els anys secs, en què aquest ús és el causant directe de la majoria dels problemes derivats de l'escassetat d'aigua); d'aquesta manera sorgeix la necessitat del regadiu. És en aquest context en què la gestió dels sistemes de distribució d'aigua entre la font de subministrament i els usuaris adquireix gran importància. Per tant, en aquests darrers anys la incorporació d'elements de control en la distribució d'aigua ha tingut un paper decisiu en el seu estalvi.

Abans de fer l'anàlisi, l'estudi del comportament i el disseny del control d'un sistema real, és convenient fer proves en un simulador que descriu de la millor manera la dinàmica del procés que s'ha de controlar; en aquest cas, el moviment de l'aigua. D'aquesta manera, una vegada s'han comprovat i verificat diferents algorismes de control sobre el simulador, ja s'està en condicions de fer una elecció més adequada del controlador segons uns criteris de control desitjats (que depenen de l'aplicació), i fer la implementació en el canal de reg.

L'objectiu principal de la pràctica és modelitzar la dinàmica d'un canal d'irrigació per tal de reproduir la dinàmica d'aquest sistema de la manera més precisa possible. Aquest sistema és de paràmetres distribuïts i es pot descriure mitjançant equacions en derivades parcials no lineals. Aquestes equacions es resoldran mitjançant mètodes numèrics.

## 2. Metodologia

### 2.1 Programari que s'ha d'utilitzar

Per realitzar la pràctica s'ha d'usar Matlab<sup>®</sup>, i concretament toolbox Simulink a partir de la versió 4.1 (R12.1), que tracta amb sistemes no lineals. Aquest programari està llicenciat en la majoria d'universitats catalanes.

### 2.2 Plantejament del problema

Es tracta de modelitzar de la manera més acurada possible el moviment de l'aigua en un tram de canal d'irrigació amb les característiques següents: una longitud  $L = 2$  km, un cabal inicial  $Q_0 = 1$  m<sup>3</sup>/s, una comporta aigües amunt amb un coeficient de desguàs  $C_{dc} = 0,6$ , un coeficient de rugositat de Manning  $n = 0,014$ , secció rectangular d'amplada  $B = 2,5$  m, un sobreexidor aigües avall d'altura  $y_{vert} = 0,7$  m, un coeficient de desguàs del sobreexidor  $C_{dv} = 2,3$  i un pendent del canal  $l_0 = 5,10^{-4}$ .

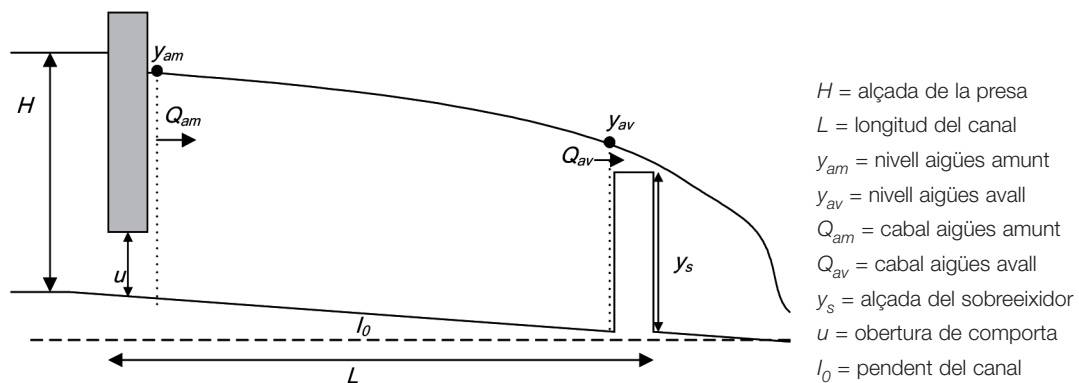


Figura 1. Esquema d'un canal de reg

### 2.3 Descripció del problema

El fenomen de la propagació en un rec natural està governat per les lleis habituals de la hidràulica, és a dir, ha de complir la conservació de la massa, així com les condicions d'equilibri dinàmic. El tipus de moviment més general de l'aigua en un rec és el denominat no permanent, gradualment variable, aquell en què les variacions de cabal i nivell d'aigua es produeixen en temps i distàncies llargs (d'uns quants minuts/hores i centenars a milers de metres). Les equacions d'aquest comportament es van presentar per primera vegada per A. J. C. Barré Saint-Venant, a l'Acadèmia de Ciències de París el 1871. Formen un sistema de dues equacions diferencials en derivades parcials, no lineals, de tipus hiperbòlic i que, per a una geometria arbitrària d'un rec, no tenen solució analítica.

Per tant, per a la modelització correcta i el més completa i detallada possible d'un canal de reg s'utilitzen les equacions de Saint-Venant:<sup>[1]</sup> i <sup>[2]</sup>

Equació de la conservació de la massa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Equació de la conservació de l'energia:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(I_0 - I_f) = 0$$

$Q = Q(x,t)$  és el cabal [ $m^3/s$ ],  $y = y(x,t)$  és el nivell [m],  $A = A(x,t)$  és l'àrea mullada [ $m^2$ ],  $t$  és la variable de temps [s],  $x$  és la variable espacial [m] mesurada en la direcció i el sentit del moviment,  $g$  és l'acceleració de la gravetat [ $m/s^2$ ],  $I_0$  és el pendent del canal i  $I_f$  és el pendent de fricció.

La planta que s'ha de modelitzar (figura 1) és un tram de canal de regadiu de longitud  $L$  i pendent  $I_0$ , que aigües amunt disposa d'una presa de nivell ( $H$ ) constant amb una comporta d'obertura variable  $u$ , i d'un sobreexidor aigües avall de nivell ( $y_s$ ). Per tant, les equacions de les condicions de contorn són:

1) l'equació de la comporta:  $Q_{am} = C_{dc} \sqrt{2gBu} \sqrt{H - y_{am}}$

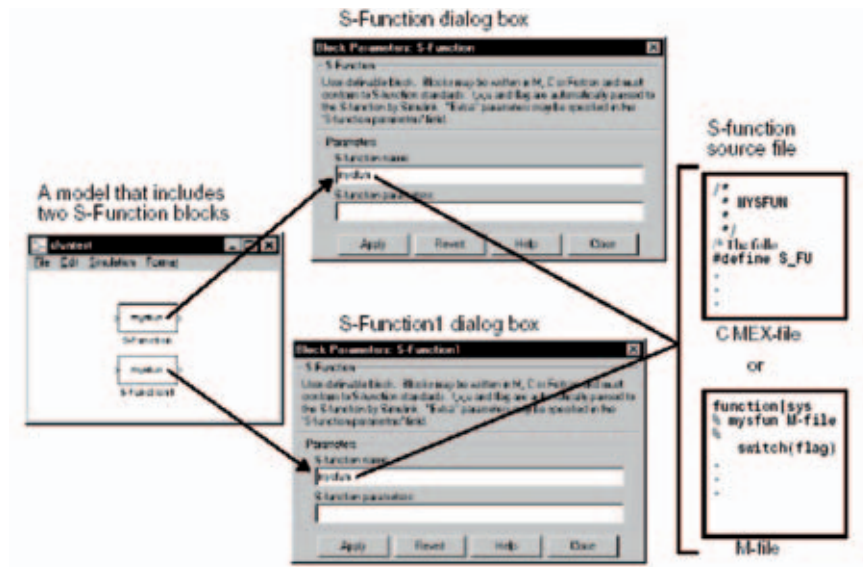
2) l'equació del sobreexidor:  $Q_{av} = C_{ds} B (y_{av} - y_s)^{3/2}$

$Q_{am}$  és el cabal aigües amunt,  $Q_{av}$  és el cabal aigües avall,  $y_{am}$  és el nivell aigües amunt,  $y_{av}$  és el nivell aigües avall,  $C_{dc}$  és el coeficient de comporta,  $C_{ds}$  és el coeficient del sobreexidor i  $B$  és l'amplada del canal.

Com hem dit abans, les equacions de Saint-Venant no tenen solució analítica, i llavors es resolen mitjançant mètodes numèrics com el mètode de les característiques, el mètode de Preissman, etc. Per tant, la modelització numèrica dels canals de reg ens permet fer un estudi hidràulic d'aquest tipus de sistemes per tal d'eliminar els dèficits hídrics, introduir racionalitat i economia en l'ús de l'aigua de regadiu, avançar en el desenvolupament de tècniques modernes en l'explotació del recurs (com el dessalatge o la reutilització directa) i garantir el desenvolupament sostenible en l'ús d'aquest bé natural.

## 2.4 Passos que s'han de seguir

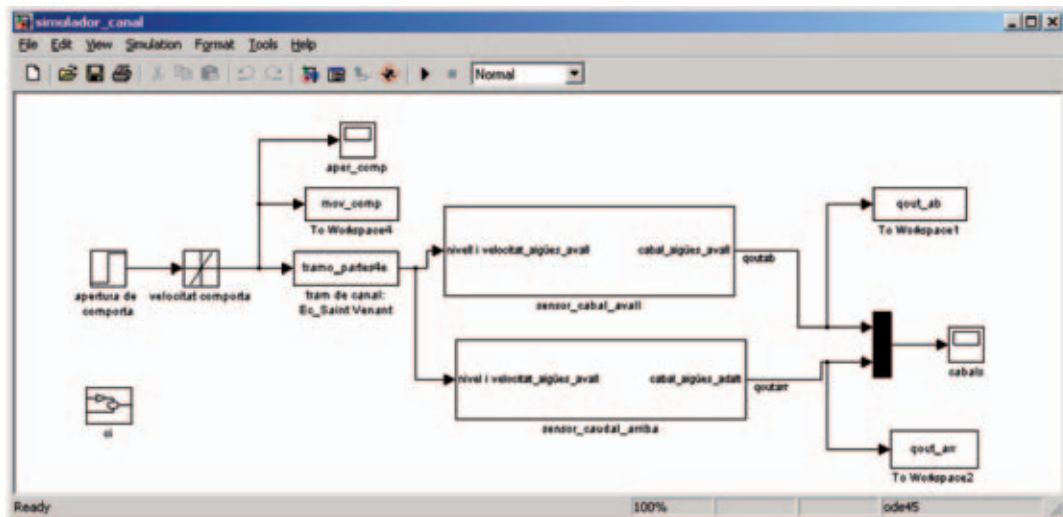
- 1) Modelització del canal de regadiu mitjançant un sistema d'equacions de Saint-Venant.
- 2) Resolució d'aquest sistema d'equacions mitjançant el mètode numèric de les característiques.
- 3) S'ha de desenvolupar un bloc en *Simulink* mitjançant una *S-Function*<sup>[3]</sup> per tal de reproduir el comportament del moviment de l'aigua en aquest canal de làmina lliure.



**Figura 2.** Relació entre el bloc *S-Function*, les seves finestres de diàleg i els fitxers font que defineixen el comportament del bloc de *Simulink*.

La *S-Function* té uns paràmetres que es poden canviar mitjançant una finestra de característiques. En aquest exemple, paràmetres com la longitud, els coeficients de desguàs de la comporta i el sobreexidor, etc.

4) Per tal de simular el comportament de l'aigua, a més d'emprar el bloc desenvolupat, s'han d'emprar interconnexions i visualitzadors (blocs *Scope To Workspace*) que es poden trobar en una biblioteca de blocs que té disponible el *Simulink*.



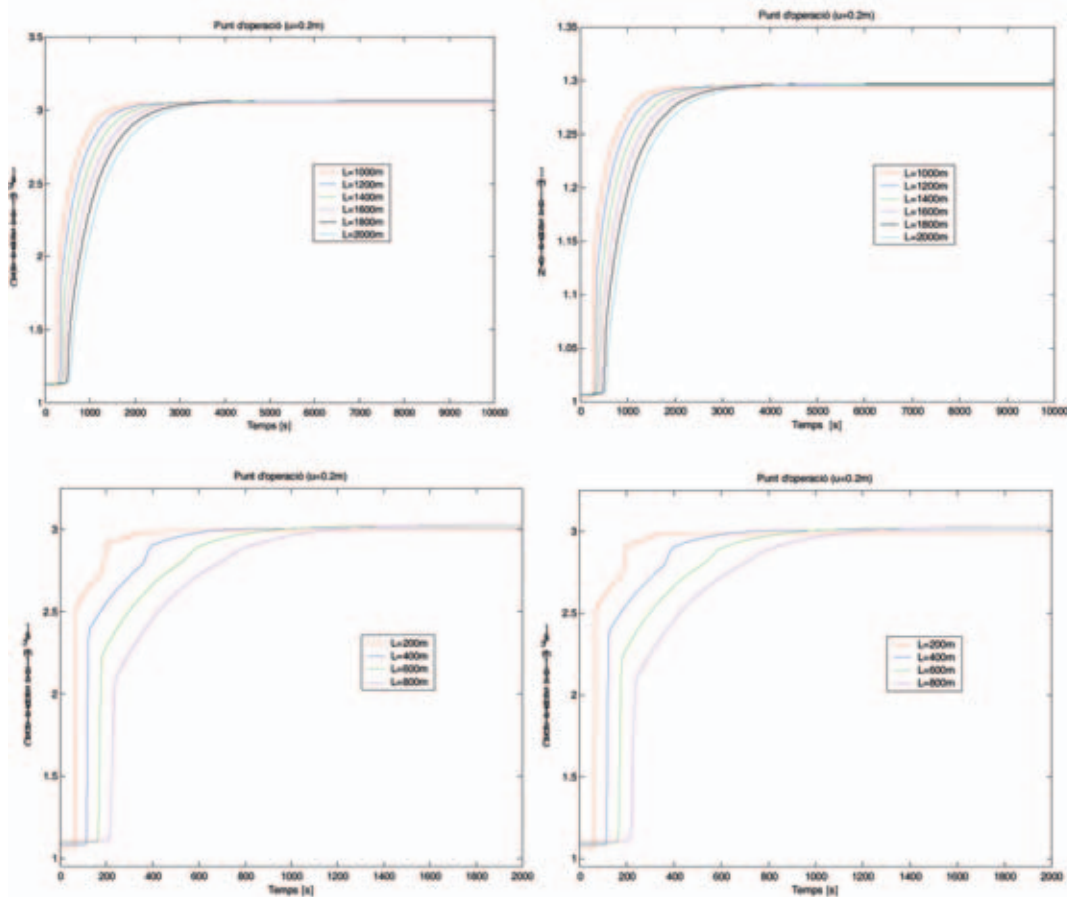
**Figura 3.** Simulador del canal (fitxer simulador\_canal.mdl)

Tot aquest conjunt de components es desen en un arxiu amb extensió mdl; en aquest cas s'ha desat en l'arxiu simulador\_canal.mdl (figura 3). Mitjançant les comandes del menú de la finestra d'aquest arxiu, es poden escollir els algorismes d'integració de les equacions diferencials ordinàries disponi-



bles en Simulink (mètodes Runge-Kutta, Euler, Adams, etc.), el temps de simulació desitjat, etc.

5) Anàlisi i validació del model que representa al sistema real. Aquest pas ens serveix per verificar que el model emprat representa d'una manera fidel la dinàmica del sistema real i que, per tant, ens servirà de simulador per predir els comportaments que tindrà el sistema real davant diferents escenaris de treball i diferents punts d'operació. Per fer aquest estudi es necessiten coneixements de física (lleis físiques) i dinàmica i identificació de sistemes dinàmics (resposta temporal), que ja s'han tractat en assignatures dels primers cursos de les enginyeries industrial i química.



**Figura 4.** Dinàmica del canal de reg estudiat (dreta), cabal aigües avall i (esquerra) nivell aigües avall, en el punt d'operació ( $u = 0.2$  m) i diversos valors de  $L$

### 3. Bibliografia

- [1] LITRICO, X.; FROMION, V.; BAUME, J.; RIJO, M. (2003). Modelling and PI Control of an Irrigation Canal. European Control Conference.
- [2] CHOW, V. T. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill.
- [3] SIMULINK. (1998). Dynamic System Simulation for Matlab. The MathWorks, Manual.



## Capítol 18

# Assaigs de deformació de xapa virtuals

ROBERT PÉREZ<sup>1, 3</sup> I XAVIER MARTINEZ<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica

<sup>2</sup> Departament d'Enginyeria Química

Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>3</sup> CTM – Centre Tecnològic

### 1. Introducció

La deformació de xapa és un procés de conformació de productes molt utilitzat per les indústries. A partir d'una xapa, formada de material metàl·lic en què una de les seves dimensions és molt més petita que les altres dues (gruix respecte a llargada i amplada), i per un procés de conformació per deformació plàstica, es passa d'una geometria plana, 2D, a una geometria en 3D.

Gots, olles i caixes i recipients metàl·lics en general (llaunes de refrescos, bústies de correu dels edificis, els parquímetres, etc.) són productes fabricats a partir de conformació de xapa.

Saber quines són les geometries que es poden aconseguir i amb quins materials es poden fer és el repte que tenen els fabricants. És molt important, doncs, conèixer perfectament com es comporta un material quan se li vol donar una forma determinada mitjançant processos d'embotició, doblegament, estiratge, etc., que comporten una deformació plàstica important en el material, és a dir, un canvi important en la seva geometria.

Un dels sistemes per conèixer el comportament del material, o millor dit, els límits d'aquest material quan és deformat de manera plàstica són els diagrames FLD (Forming Limit Diagrams) o diagrames límit de conformabilitat. En aquest diagrames es mostren els nivells, els valors de deformació que pot experimentar un material sota un determinat estat de tensions.

Els diagrames s'obtenen a partir de la representació dels valors de deformació que experimenta un material quan se sotmet a tensió i aquesta provoca un canvi en la seva geometria original. Aquests valors de deformació s'obtenen a partir de l'anàlisi de la variació en les dimensions de cercles marcats sobre la superfície del material que s'ha d'analitzar. Aquests cercles es marquen mitjançant un procés electroquímic que produeix una corrosió superficial i molt localitzada, que no afecta el material i que permet tenir una marca que no desapareix fàcilment amb dissolvents ni amb la fricció.

Actualment, l'anàlisi de les deformacions es fa amb equips de captura i anàlisi d'imatge de gran precisió, que permeten obtenir una imatge virtual i en tres dimensions de la superfície de la mostra assajada. D'aquestes representacions també s'obté una llista de tots els punts que componen aquesta representació i les seves coordenades. Això permet calcular en cada punt de la superfície el valor de la deformació, sabent el moviment que han experimentat tots els punts i els desplaçaments relatius entre ells.

Una altra manera de mesurar i analitzar els valors de la deformació experimentada per la mostra és mesurant les dimensions dels cercles abans i després dels assaigs amb l'ajuda d'una regla flexible, un peu de rei, etc.

Els estats de deformacions que pot experimentar un material són molts i molt diferents, però en tots ells sempre s'arriba a un punt en què les tensions aplicades provoquen un canvi tan marcat en la geometria, un nivell de deformació tan elevat, que el material no ho pot assimilar i es trenca. Així, cal diferenciar entre les zones del material que han experimentat una deformació plàstica uniforme i correcta, i les que s'han fracturat. Els valors de la deformació en diversos punts d'aquestes zones s'identificaran de manera diferent en l'FLD i així es podran diferenciar clarament quins són els límits del material, amb la corba FLC (corba límit de conformabilitat), representada en els diagrames. Aquesta corba marca, delimita i separa els nivells de deformació que pot assolir el material dels que donaran lloc a la fractura d'aquest.

## 2. Objectiu

L'objectiu de la pràctica és entendre el concepte de deformació de xapa i veure quins són els límits que presenta el material quan es veu sotmès a l'acció de forces que provoquen un canvi en la seva geometria. Aquests límits són representats en els diagrames FLD.

L'alumne realitza la pràctica de manera interactiva i via Internet.

En aquesta pràctica, es fan de manera virtual els assaigs necessaris per a l'obtenció dels diagrames FLD (diagrames límit de conformabilitat). Aquests assaigs són: l'assaig de tracció uniaxial, l'assaig de tracció amb proveta ampla i l'assaig Erichsen d'embotició. Així, s'estudia per a cada assaig, el nivell de deformacions a què es veu sotmesa la mostra assajada.

El segon objectiu, o propòsit de la pràctica, es poder realitzar tota una sèrie d'assaigs mecànics sense generar cap tipus de residu, com restes de lubricants, llimadures, derivats de la utilització dels aparells d'assaig del laboratori, provetes assajades, etc. D'aquesta manera es fa un estalvi en despesa ecològica que és del tot innecessària i s'aprèn el mateix.

Així, es volen assolir coneixements sobre conformació de xapa fent els assaigs de manera virtual i, per tant, neta.

## 2.1 Materials

Un dels grans al·licients d'aquesta pràctica és la seva manca de necessitat de material, de cap tipus, per a la seva realització. Només cal disposar d'un PC i d'una connexió a Internet.

Aquesta «virtualitat» de la pràctica fa que no calgui utilitzar xapa metàl·lica, ni cap dels productes químics necessaris per realitzar les marques (marcatge electroquímic) sobre la peça, i tampoc maquinària d'assaig de laboratori, amb el corresponent estalvi energètic i de desgast de la maquinària.

## 2.2 Desenvolupament

El desenvolupament de la pràctica és totalment interactiu. Un cop s'arriba a la pàgina web en qüestió, i apareix la primera pantalla (figura 1), el seu seguiment està totalment marcat per la successió de les pantalles i l'acció que es duu a terme en cadascuna d'elles. Aquestes accions són els passos que se seguirien en l'assaig real.



Figura 1. Pantalla d'inici de la pràctica

Un cop s'arriba a aquesta primera pantalla, es fa el primer assaig: l'assaig de tracció (figura 2).



Figura 2. Pantalla d'inici de l'assaig de tracció

El primer que cal fer és extreure una mostra de la xapa que s'ha d'analitzar i marcar els cercles sobre la seva superfície (figura 3). La mostra és una tira del material amb una part central més estreta, on es donarà la deformació, i els extrems més amples per poder-la subjectar i aplicar-hi les forces de tracció.



Figura 3. Pantalla amb la mostra preparada per realitzar l'assaig

En la pantalla següent (Figura 4) es mostren els diferents estats de deformació que experimenta una mostra quan se sotmet a un assaig de tracció. Aquesta representació es fa mitjançant una animació.

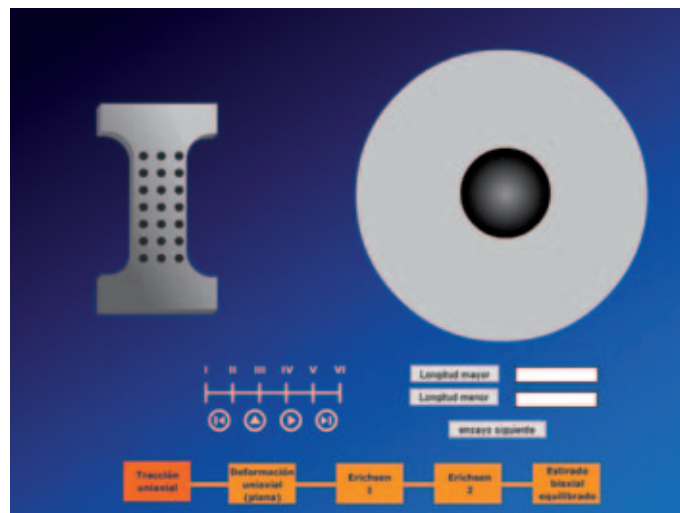


Figura 4. Pantalla principal de l'assaig de tracció

Aquesta animació es pot aturar en cada una de les sis etapes en què està dividida. En cada una de les etapes es poden mesurar els valors de la deformació dels cercles marcats en la superfície de la mostra. Els valors que s'obtenen s'introdueixen en una altra pàgina web on es grafica el diagrama FLD (figura 5).

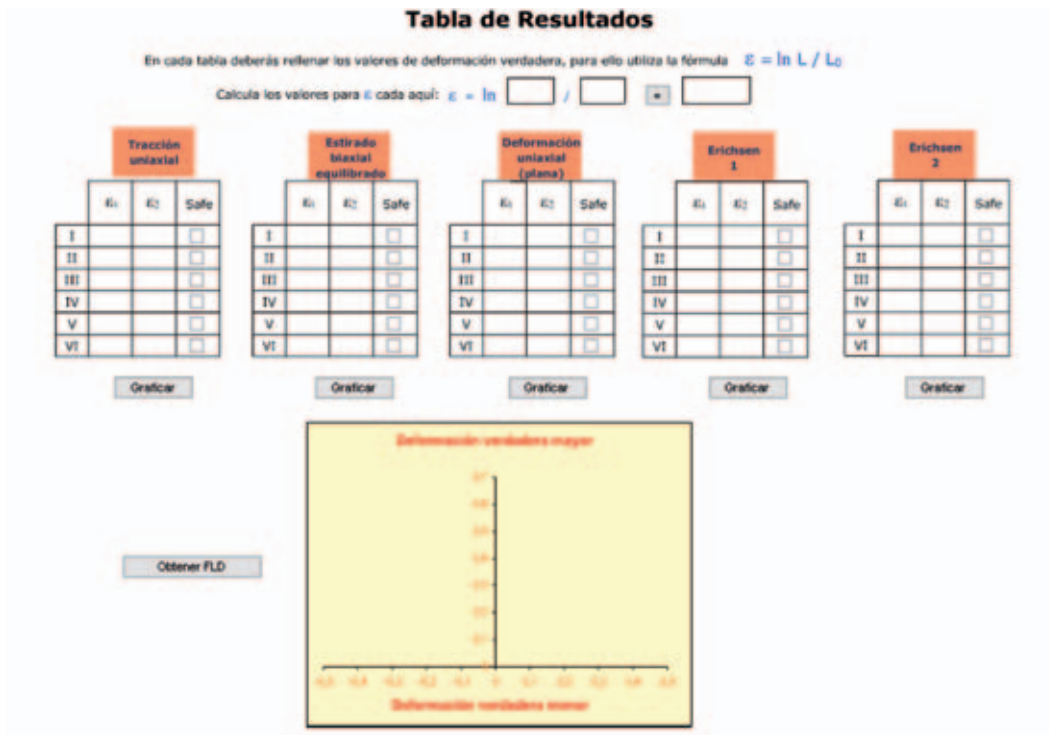


Figura 5. Pantalla on s'introdueixen els valors de les deformacions.

Es realitzen dues mesures de les dimensions dels cercles. Una en la direcció de la màxima deformació i l'altra, perpendicularment a aquesta. Així s'obtenen els parells de valors de deformació en cada punt de la mostra (figura 6).

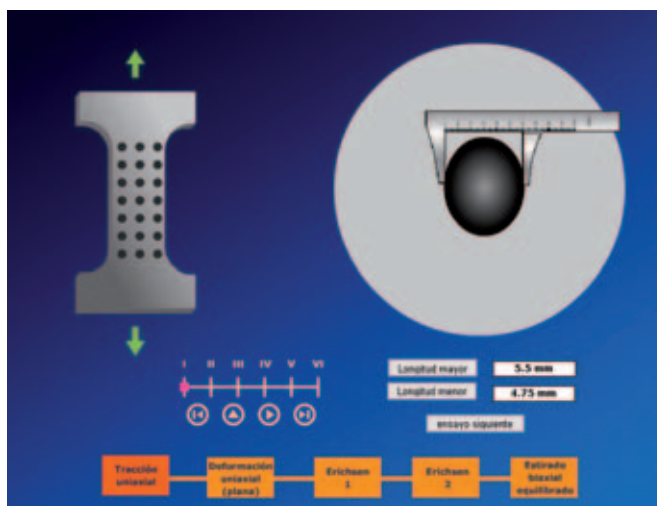
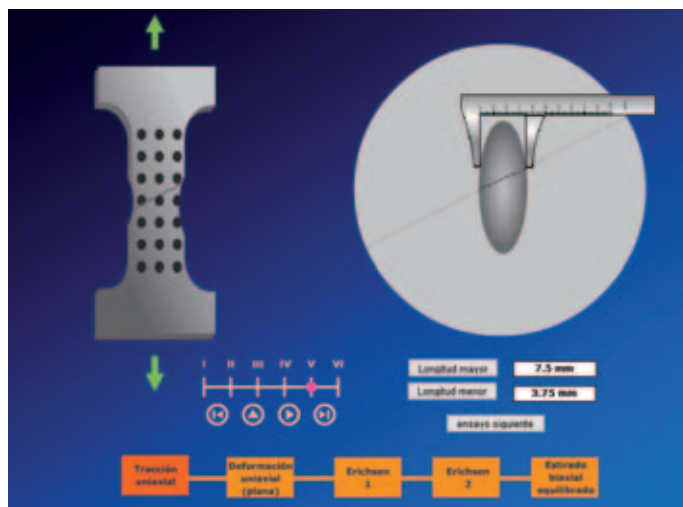
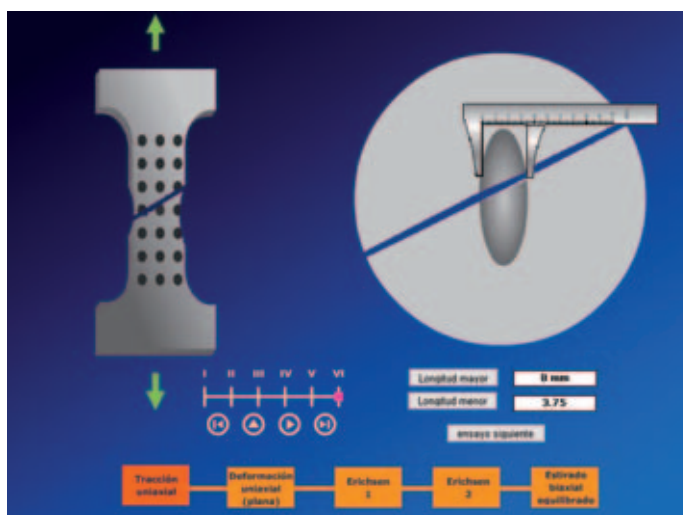


Figura 6. Mesura de les dimensions del cercle en la primera etapa de l'assaig

Se segueix el mateix procediment en les etapes següents de l'assaig (figures 7 i 8).



**Figura 7.** Etapa prèvia a la fractura de la mostra, estricció i valors de les dimensions del cercle



**Figura 8.** Fractura de la mostra i valors de les dimensions del cercle

Tots els valors de les dimensions del cercle en les diferents etapes de l'assaig s'han introduït en la taula de valors de l'altra pàgina web. En aquesta pantalla es calculen de manera automàtica els valors de les deformacions que representen aquestes noves dimensions dels cercles.

Un cop realitzat el primer assaig i mesurats els valors de les deformacions que ha experimentat la mostra, es realitzen els següents de la mateixa manera (figures 9-11).





Figura 9. Pantalla de l'assaig de deformació plana. Mostra a punt de ser assajada

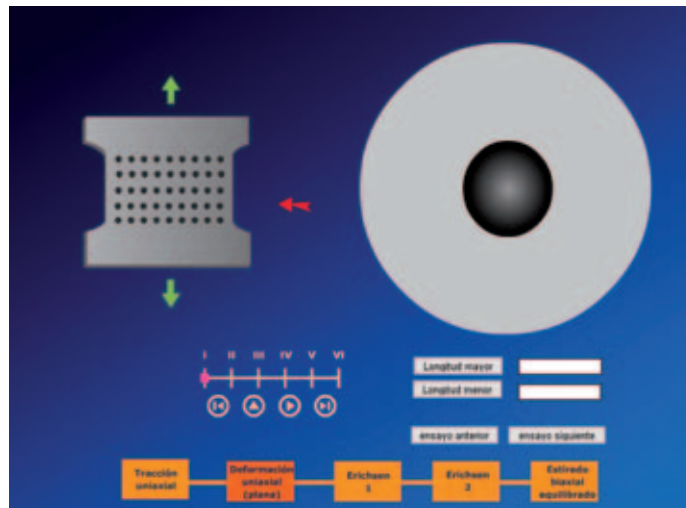


Figura 10. Pantalla d'inici de l'assaig

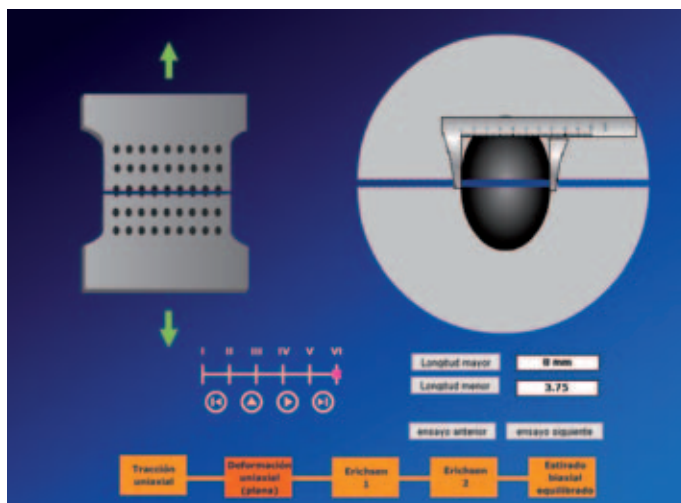
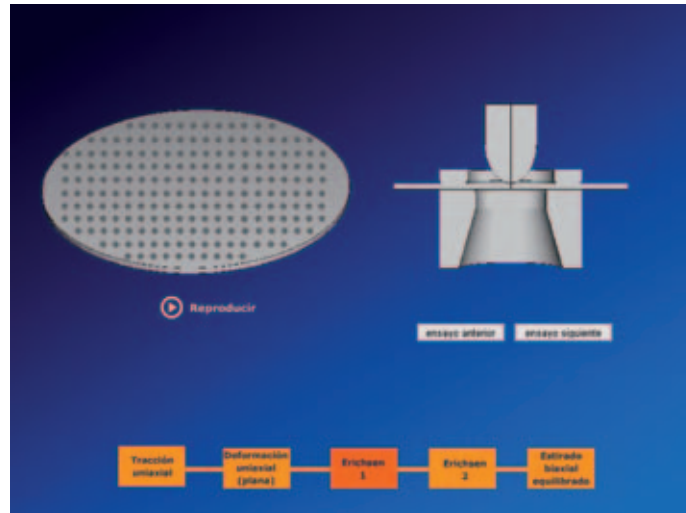


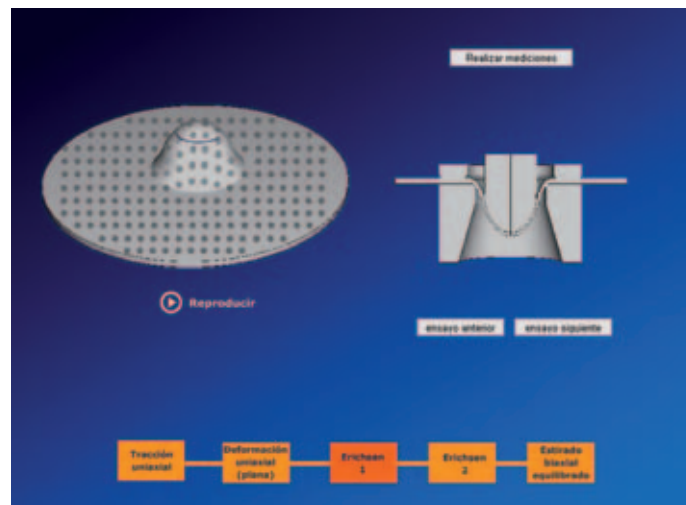
Figura 11. Pantalla de l'última etapa de l'assaig amb els valors de les dimensions del cercle amb la fractura

De la mateixa manera que per a l'assaig de tracció, els valors de les dimensions dels cercles en cadascuna de les etapes de l'assaig es van introduint en la pantalla de càlcul de les deformacions.

L'assaig que es realitza a continuació és l'assaig Erichsen d'embotició (figures 12 i 13).



**Figura 12.** Pantalla d'inici de l'assaig Erichsen amb la mostra a punt de ser assajada i un esquema de l'assaig



**Figura 13.** Pantalla final de l'assaig amb la fractura de la mostra

En aquest assaig les mesures de les dimensions dels cercles es realitzaran al llarg de la superfície de la mostra, en les zones que hagin arribat a diferents estats de deformació plàstica (figures 14-16).

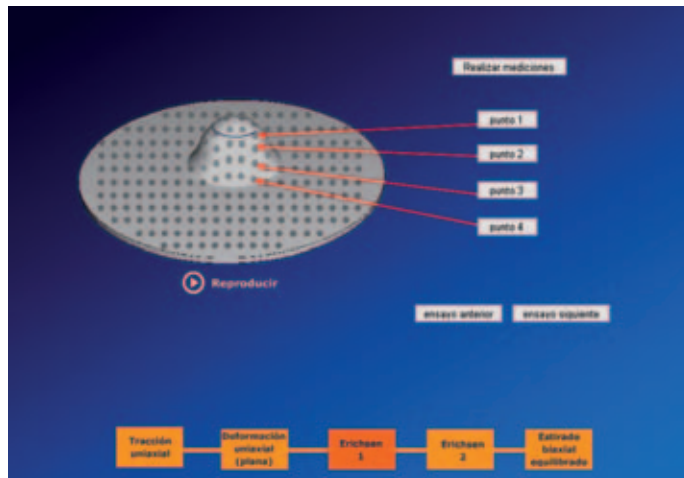


Figura 14. Pantalla amb els diferents punts per mesurar. Punts que presenten diferents estats de deformació.

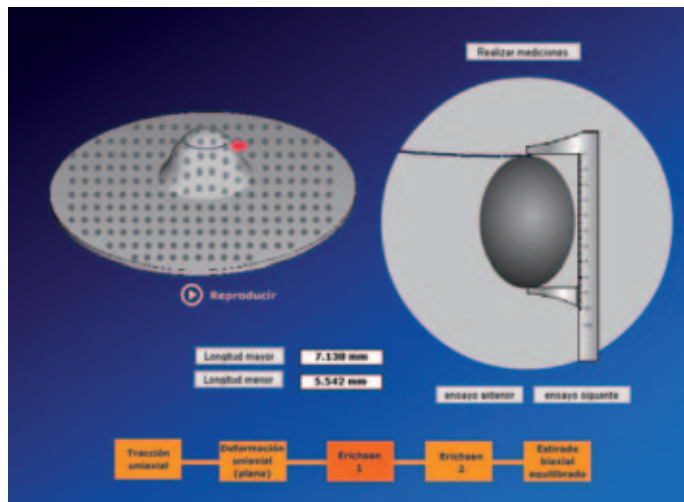


Figura 15. Pantalla amb la mesura de les dimensions del cercle del punt 4

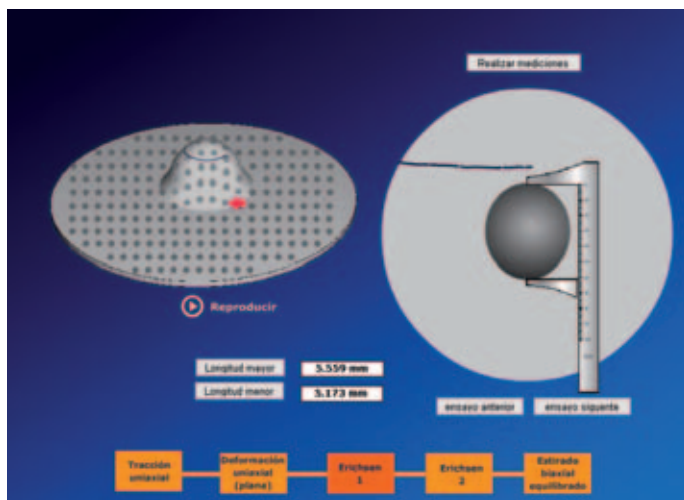


Figura 16. Pantalla amb la mesura de les dimensions del cercle del punt 1

Igual que en els assaigs anteriors, els valors de les dimensions dels cercles en cadascuna de les etapes de l'assaig es van introduir en la pantalla de càlcul de les deformacions.

El següent assaig que es realitza és el de deformació biaxial equilibrada (figura 17). En aquest assaig la mostra és estirada per igual en dues direccions. Això s'aconsegueix aplicant una pressió hidràulica per una de les cares de la mostra de xapa que està fixada en una matriu circular. Amb aquesta pressió la xapa «s'infla» i s'aconsegueix aquest estiratge per igual en dues direccions (figura 18).

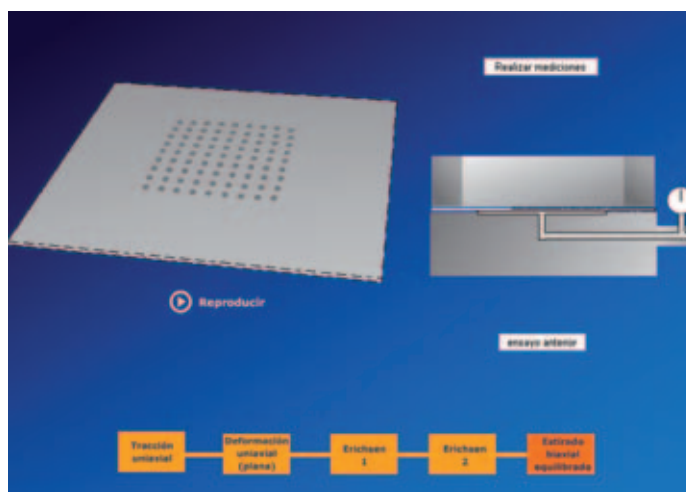


Figura 17. Pantalla d'inici de l'assaig de deformació biaxial equilibrada

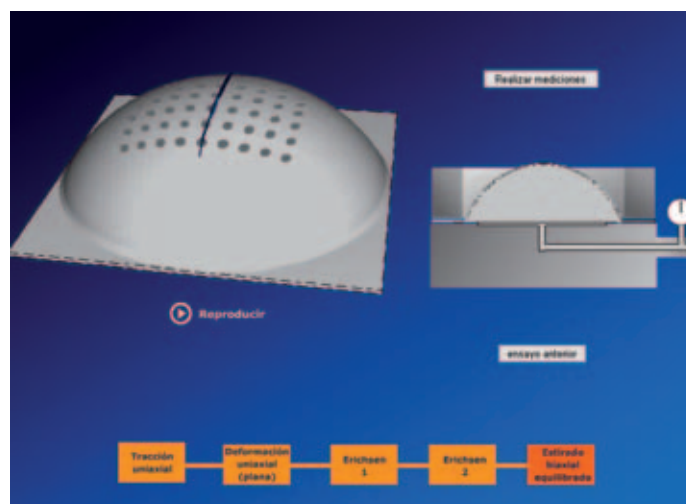


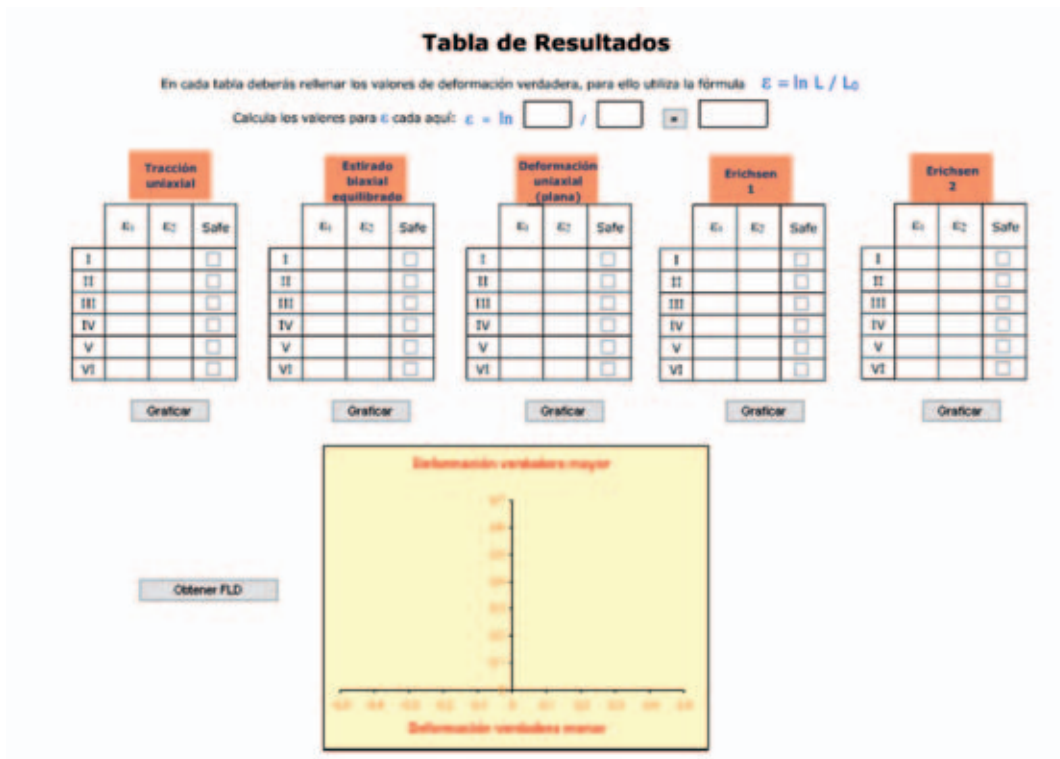
Figura 18. Pantalla de l'etapa final en l'assaig de deformació biaxial equilibrada

Igual que per als assaigs anteriors, els valors de les dimensions dels cercles en cadascuna de les etapes de l'assaig es van introduir en la pantalla de càlcul de les deformacions.

### 3. Càlculs i resultats

Els càlculs que s'han de fer en aquesta pràctica es van realitzant a mesura que aquesta es desenvolupa, amb les mesures dels valors de les dimensions i la seva introducció en la pantalla de càlcul

de les deformacions. En aquesta pantalla es calculen tots els valors de les deformacions dels punts analitzats en els diversos assaigs, i són representats en un diagrama FLD (figura 19).



**Figura 19.** Pantalla amb els càlculs de les deformacions de tots els punts i el diagrama FLD

Un cop representats tots els valors de les deformacions, s'ha de representar la corba FLC. Aquesta corba delimita el límit entre els valors de deformació que han donat lloc a la fractura del punt, de la mostra, i els que representen estats de deformació correctes i assumibles pel material. Així, cal definir per on passa aquesta corba amb l'ajut dels punts que són representats en el diagrama.

Com a resultat de la pràctica, cal obtenir el diagrama FLD del material analitzat amb la corba FLC resultant de l'anàlisi dels valors de les deformacions obtinguts.

#### 4. Referències

[1] KUHN, H.; MEDLIN, D. (editors, 2000). ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation. "Mechanical testing". ASM International.

[2] Sheet Steel Forming Handbook. SSAB TUNNPLAT, 1998.



## Capítol 19

# Avaluació econòmica i ambiental de la corrosió en metalls estructurals

ROBERT PÉREZ<sup>1, 3</sup> I XAVIER MARTINEZ<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica

<sup>2</sup> Departament d'Enginyeria Química

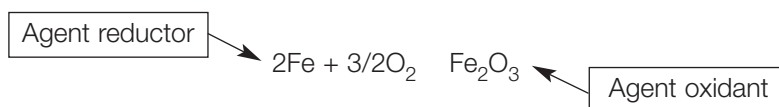
Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>3</sup> CTM – Centre Tecnològic

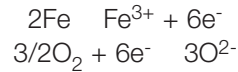
### 1. Introducció

La corrosió és un fenomen de degradació del material produït per una reacció química. Aquesta degradació s'inicia quan el material entra en contacte amb algun element que reacciona amb ell i provoca un canvi, a escala microestructural o química, amb la qual cosa el material es transforma i experimenta un canvi en les seves propietats fisicoquímiques.

L'oxidació és el procés químic mitjançant el qual un ió o àtom perd un o més electrons. Una oxidació implica, necessàriament, la presència d'un agent oxidant que incorpori els electrons perduts per la substància oxidada, també anomenada agent reductor. Per exemple, la reacció d'oxidació del ferro metàl·lic a òxid de ferro (III).



En realitat aquesta reacció és la combinació d'una reacció d'oxidació (en què el ferro perd electrons) i una altra de reducció (en què l'oxigen incorpora els electrons que ha perdut el ferro).



Tots els metalls presenten més o menys tendència a oxidar-se, a formar òxids propis, en presència d'oxigen en l'ambient. Aquesta oxidació comporta un canvi microestructural i químic del material. El material passa de ser un compost metàl·lic a ser un compost de tipus ceràmic, amb presència d'àtoms metàl·lics i no metàl·lics com l'oxigen. Aquest nou material presentarà unes propietats físiques i mecàniques diferents de l'anterior, i és aquí on rau la problemàtica.

En el cas de l'acer, aliatge de ferro i carboni, l'oxidació dóna lloc a la formació d'una capa d'òxid de ferro sobre l'acer. És a dir, el ferro canvia la seva forma química i passa a formar part de la capa d'òxid, amb la qual cosa disminueixen les propietats mecàniques globals del material. Les principals característiques d'aquesta capa d'òxid de ferro són el seu comportament fràgil sota tensions i la seva alta conductivitat, que afavoreix el creixement de la capa per permetre el pas dels electrons per produir l'oxidació, entre altres.

La selecció de materials en les etapes de disseny és un pas clau per a la minimització dels costos econòmics i ambientals derivats de la corrosió. En escollir un material és molt important tenir en compte el temps de vida útil d'aquest. Alguns materials seran més barats que altres però deixaran de ser útils més aviat i, per tant, s'hauran de reposar, cosa que multiplicarà costos.

D'altra banda, és responsabilitat de l'enginyer tenir en compte criteris d'impacte ambiental en la selecció de materials. Els costos derivats dels impactes en el medi ambient són difícils de quantificar i els assumeix tot el planeta i, per tant, són obviats a l'hora de seleccionar els materials. Un material pot ser més barat que un altre i complir perfectament els requeriments del nostre problema, però pot ser que l'impacte sobre el medi ambient sigui molt més important en un cas que en un altre.

## 2. Objectius

L'objectiu d'aquesta pràctica és entendre i avaluar la problemàtica que la corrosió provoca en els materials metàl·lics, des d'un punt de vista d'aplicació mecànica simple, i veure els costos econòmics i ambientals que se'n deriven. És a dir, incorporar criteris ambientals a l'hora de seleccionar materials.

## 3. Materials

Mostres de materials metàl·lics. Les mostres són xapes de 2 mm de gruix i de forma quadrada de 100 x 100 mm de tres materials diferents: acer, acer inoxidable i alumini.

Aquestes mostres provenen de restes de materials utilitzats en projectes o treballs d'investigació i que, un cop finalitzats, no tenen cap més utilitat i s'han de llençar. D'aquesta manera, es reutilitzen materials i s'evita l'impacte ambiental derivat de la seva fabricació.



## 4. Equipament

- Cambra de boira salina. Equip d'assaig de corrosió accelerada que genera, en una cambra tancada, una atmosfera corrosiva, alta humitat i elevada presència de salinitat en l'ambient. Aquest assaig recrea una atmosfera real, lloc on es col·locarà el material quan formi part d'un conjunt, una estructura, un component, etc., però de manera accelerada. Així es pot preveure a llarg termini el comportament quant a la corrosió del material assajat, en un temps molt reduït.
- Bàscula de precisió. Permet quantificar la pèrdua o el guany de pes que experimenten les mostres durant l'assaig a causa de la seva corrosió.
- Equips de control òptic. Lupa estereoscòpica i microscopi òptic, per poder avaluar la corrosió de cada mostra. Permeten observar amb detall el creixement de la capa de corrosió que es forma a la superfície de les mostres.

## 5. Desenvolupament

La pràctica consisteix en la selecció del material més adient per complir unes especificacions derivades d'un problema real. Primerament es plantejarà un problema estructural i es calcularà la secció necessària de cada material per tal de suportar unes sol·licitacions determinades. En una segona part, s'avaluarà la resistència a la corrosió de tres materials diferents mitjançant un assaig al laboratori. Finalment, a partir dels resultats dels apartats anteriors i tenint en compte criteris ambientals i econòmics, s'escollirà el material més adient per al problema plantejat a la segona part.

### 5.1 Càlculs dimensionals

Es pretén edificar una estructura metàl·lica en una zona propera al mar. Aquesta estructura ha de ser, per exemple, una torre d'alta tensió, un pont penjant, una nau industrial, etc. Així, aquesta estructura ha de complir una sèrie de requisits tècnics, com per exemple mantenir-se rígida i sense moviments oscil·lants; ha de suportar les carregues pròpies (pes dels vehicles, cables d'alta tensió), el seu propi pes (bigues, cables, cartelles, etc.) i les forces provocades pel vent i altres fenòmens meteorològics. En definitiva, tota una sèrie de sol·licitacions mecàniques. També ha de resistir els problemes de corrosió provocats per l'exposició total de l'estructura a l'ambient que l'envolta. Ambient proper al mar, i per tant, molt salí i corrosiu.

S'ha de fer un càlcul estructural, molt simplificat, per determinar la quantitat de material necessari per resistir les sol·licitacions mecàniques que planteja el problema. Cada material presenta unes propietats mecàniques diferents i, per tant, uns valors de resistència diferents. Un material amb menys resistència haurà de presentar una secció més gran, més massa, per aguantar sense fracturar-se el mateix nivell de càrrega que un altre de més resistent, i això implicarà uns costos econòmics i ambientals diferents.

El càlcul estructural que s'ha de dur a terme és el següent. Es planteja construir un pont penjant sobre la desembocadura d'un riu al mar. Aquest pont serà una llarga base sobre els 400 m que separen les dues vores del riu, subjectada mitjançant dos centenars de cables que surten de dos grans pilars (figures 1 i 2).



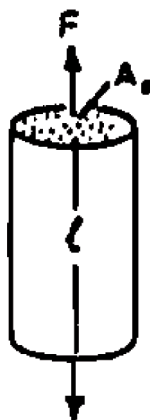
**Figura 1.** Exemple de pont penjant



**Figura 2.**  
Detall de l'estructura metàl·lica del pont

El càlcul el simplificarem sobre un sol d'aquests cables que subjecten la base del pont. Aquests cables estan sotmesos a un esforç de tracció uniaxial, és a dir, tota la càrrega que han de suportar els és aplicada de manera paral·lela al seu eix principal (vegeu la figura 3).

La tensió que pateixen aquests cables és la càrrega que han de suportar dividida per la seva secció, o la seva àrea transversal. El material dels cables pot resistir fins a un valor de tensió màxima (límit elàstic,  $\sigma_0$ ) a partir del qual aquest es comença a deformar de manera permanent. En qualsevol estructura metàl·lica que es construeix, no es pot permetre que cap component canviï de forma, es deformi, perquè faria perdre l'equilibri de forces que fa mantenir l'estructura dreta i estable.



**Figura 3.**  
Esquema estructural del cable

Aleshores, quan es tria un material per construir una estructura o un component se sap quin és el valor de la tensió màxima que pot resistir. Aquest valor, sabent la càrrega que ha de suportar el component construït d'aquest material, permet determinar quina és la secció necessària per resistir aquesta càrrega. Els càlculs són els següents:

Càlcul de la secció necessària:

$$A = \frac{F}{\sigma_0}$$

Valor de la càrrega que s'ha de suportar:  $F$  (N)

Valor del límit elàstic del material:  $\sigma_0$  (N / mm<sup>2</sup>)

Cada cable és format per un conjunt de cables trenats de menor diàmetre. Per als càlculs, se suposa que cada un d'aquests cables ha de suportar una càrrega de 1.500 N, i en total són 25 cables, trenats, de x mm. de diàmetre, que formen el conjunt del cable.

Per obtenir la massa total per a cada un dels materials, es pot estimar que el cable fa uns 10 m de llarg.

$$m = \text{Volum} \cdot \text{densitat} = \text{Àrea} \cdot \text{longitud} \cdot \text{densitat}$$

Així, el pes total del cable serà la suma de les masses dels 25 que el conformen.

Es considera que una pèrdua d'un 20 % en la secció dels cables comportaria un perill per a la integritat de l'estructura. Aquest percentatge és degut a coeficients de seguretat que s'apliquen en totes les construccions de tipus civils, com la de l'exemple.

En els càlculs d'estructures metàl·liques, i en el disseny de construccions i maquinària, s'apliquen uns factors de seguretat que magnifiquen els valors de les forces que s'han de resistir per poder tenir una seguretat extra en les construccions. Amb aquests coeficients de seguretat les seccions de les parts estructurals estan, doncs, magnificades, són més grans que el necessari per resistir l'aplicació de les càrregues externes. Així, el càlcul de la pèrdua de material s'aplicarà per calcular cada quant temps cal substituir un cable per un de nou.

## 5.2 Avaluació de la corrosió dels materials

Aquesta part se centra en l'avaluació experimental de la corrosió que pateixen les mostres metàl·liques que volem analitzar. Les mostres s'han de sotmetre a un ambient corrosiu que simularà l'ambient al qual poden estar sotmesos els materials durant la seva vida útil. Els passos que s'han de seguir són els següents:

- Neteja de les mostres amb desengreixant, aigua i sabó, i alcohol.
- Pesada de les mostres. Amb la bàscula de precisió es mesura el pes de cada una de les mostres i s'anota. Aquest pes serà la mesura de referència per avaluar l'evolució de la corrosió.
- Col·locació de les mostres a la cambra de boira salina. Les mostres s'agafaran per un dels extrems amb l'ajuda de fil de pescar i es col·locaran a l'interior de la cambra de boira salina. Les mostres es col·loquen penjades verticalment dels pals travessers i assegurant-se que la condensació que es genera sobre cada mostra no caigui sobre una altra mostra.

Un cop verificada la col·locació de les mostres, s'iniciarà l'assaig. L'assaig ja està programat i les seves característiques són les següents:

- Temperatura de l'assaig: 35 °C ± 2
- Volum de solució salina: 1,5 ml ± 0,5 (mínim 16 h)
- Durada de l'assaig: 500 h
- pH: 6,5 a 7,2 (boira salina neutra)
- Controls: cada jornada de pràctiques, extracció de mostres, neteja i observació

A causa de la llarga duració de l'assaig (250-500 h) la pràctica s'ha de dur a terme durant tot el període de practiques; s'inicia al principi del quadrimestre i finalitza en l'última pràctica.

Tot i que es pot fer la segona part de la pràctica, caldrà fer el seguiment de l'assaig de corrosió mitjançant els controls periòdics que marqui la normativa corresponent.

Un cop acabat l'assaig, es realitzarà una extrapolació de la corrosió que pateix el material amb el temps. És a dir, es quantificarà la velocitat de degradació o pèrdua de massa útil amb el temps que pateix cadascun dels materials.

Aquests valors es prenen com a referència per calcular la pèrdua de massa útil, és a dir, de secció resistent del cable amb el temps.

El càlcul de la velocitat de corrosió és complex i requereix coneixements sobre el mecanisme químic que té lloc durant l'assaig de corrosió. L'objectiu de la pràctica és avaluar els costos econòmics i ambientals des d'un punt de vista mecànic derivats del fenomen de corrosió i, per tant, l'estudi del mecanisme i el càlcul detallat de la velocitat de corrosió queda fora de l'àmbit de la pràctica. És per això que, per calcular la velocitat de corrosió, podem utilitzar alguna de les nombroses utilitats presents a Internet que calculen la pèrdua de massa útil a partir de la pèrdua de massa durant l'assaig i el tipus de material.

<http://www.ionikconsulting.com/minigen/default.asp?action=showContent&contentID=29>

### 5.3 Avaluació de costos

Un cop determinada la quantitat mínima necessària de cadascun dels materials per construir la torre d'alta tensió i tenint en compte els resultats de l'assaig de corrosió, s'avaluaran el cost econòmic i l'ambiental de cadascun dels materials seleccionats.

#### *Avaluació econòmica*

**Taula 1.** Valor aproximat i mitjà dins la varietat d'aliatges que hi ha i les seves diferents propietats mecàniques.

	Densitat $\delta$ (kg/m <sup>3</sup> )	Límit elàstic $\sigma_0$ (Mpa)*	Cost (€/kg)**
Acer	7.900	400	0,45
Acer inoxidable	7.900	300	3,67
Alumini	2.700	200	2,07

Com es pot veure en la taula, l'acer és el material més econòmic i el que presenta un valor més elevat de límit elàstic. L'acer inoxidable és el material més car dels tres, ja que per a la seva producció es necessita realitzar un procés molt ben controlat per tal d'obtenir les propietats desitjades; el preu d'aquest material depèn del preu dels seus principals elements d'aliatge, com el crom, el níquel i el molibdè. L'alumini també és un material molt car pel seu cost d'obtenció a la natura, que requereix una important despesa energètica.

Aquests preus, però, varien molt i depenen de molts factors propis del mercat, com l'oferta i la demanda, i de factors més concrets en la producció, com les noves tecnologies de producció, nous materials que representen un avenç i una millora dels actuals, logística, etc.

### Avaluació ambiental

Una manera de quantificar l'impacte que els processos de manufacturació tenen sobre el medi ambient és mitjançant les emissions de CO<sub>2</sub>.

Una de les conseqüències més importants de l'activitat humana sobre el medi ambient és l'augment de l'efecte hivernacle. L'efecte hivernacle és el procés pel qual l'atmosfera d'un planeta fa que s'escalfi, permetent l'entrada de radiació solar visible, però impeding o dificultant l'emissió de calor des del planeta. L'efecte hivernacle és perfectament natural, i de fet sense aquest efecte no hi hauria vida al planeta tal com la coneixem. Ara bé, des de fa un temps s'ha demostrat que l'activitat humana està augmentant l'efecte hivernacle, cosa que podria dur a un escalfament global i al canvi climàtic del planeta. Això es deu al fet que, en cremar combustibles fòssils (carbó, benzina, gas natural, etc.) o en incendiar-se un bosc, es produeix diòxid de carboni. Si la concentració de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera augmentés significativament, podria augmentar la força de l'efecte hivernacle. Tot i que no es coneixen amb precisió tots els factors que intervenen en l'efecte hivernacle, aquest fet va començar a preocupar l'opinió popular al final del segle XX.

L'Emission Factor Database de l'Intergovernmental Panel on Climate Change recopila factors d'emissió de CO<sub>2</sub> per a la majoria de processos industrials. A partir de la quantitat de CO<sub>2</sub> generada per kg de material utilitzat, podem tenir una idea de l'impacte ambiental derivat de la utilització d'aquest material.

**Taula 2.** Factors d'emissió pels materials utilitzats

<b>Aliatge</b> (kg CO <sub>2</sub> /kg material)	<b>Factor emissió</b>
Acer	1,6
Acer inoxidable	1,6
Alumini	1,8

## 6. Càlculs i resultats

### 6.1 Càlculs dimensionals

Material	<b>Acer</b>	<b>Acer inoxidable</b>	<b>Alumini</b>
Secció (cm <sup>2</sup> )			
Massa (kg)			

### 6.2 Avaluació de la corrosió

Material	<b>Acer</b>	<b>Acer inoxidable</b>	<b>Alumini</b>
Presenta corrosió?			
Velocitat de la corrosió (cm <sup>2</sup> /dia)			
Temps de vida útil			
Nre. de reposicions en 50 anys			

### 6.3 Avaluació econòmica i ambiental

Tenint en compte els resultats anteriors, calculeu els costos econòmics i ambientals generats en un període de 50 anys derivats de la utilització dels materials estudiats:

Material	<b>Acer</b>	<b>Acer inoxidable</b>	<b>Alumini</b>
Costos econòmics (€)			

Material	<b>Acer</b>	<b>Acer inoxidable</b>	<b>Alumini</b>
Costos ambientals (kg CO <sub>2</sub> )			

Quin és el material més adient? Argumenteu la resposta tenint en compte els resultats dels apartats anteriors.

## 7. Bibliografia

[1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. B117 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.

[2] Emission Factor Database. Intergovernmental Panel on Climate Change.  
<<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>>

[3] GERE, J. M.; TIMOSHENKO. (2004). Resistencia de materiales (5a ed.). Paraninfo.

[4] KUHN, H.; MEDLIN, D. (ed., 2000). ASM Handbook. Volum 8: «Corrosion. 'Mechanical testing'». ASM International.

[5] MEPS (2005). European Steel Review.

## Capítol 20

# Reciclatge de foses d'alumini

ROBERT PÉREZ<sup>1, 3</sup> i XAVIER MARTINEZ<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica

<sup>2</sup> Departament d'Enginyeria Química

Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>3</sup> CTM – Centre Tecnològic

### 1. Introducció

L'alumini és un metall amb molt bones propietats mecàniques i amb una alta resistència a la corrosió. Els aliatges d'alumini són uns dels materials metàl·lics que més utilitza la indústria actual. Aquests aliatges permeten obtenir peces o components d'elevada resistència i poc pes amb les propietats mecàniques requerides per indústries com la de l'automoció, construccions, aviació, etc. Els aliatges d'alumini s'obtenen a partir de la fusió i la refinació d'alumini, i la posterior addició dels elements d'aliatge, com ara silici, magnesi, coure, ferro, manganès i crom, entre altres.

Tot i això, el seu cicle de vida porta associat un elevat impacte sobre el medi ambient. La matèria primera per a la producció de l'alumini és la bauxita, un mineral amb un color vermell característic. Per elaborar tres kg d'alúmina (òxid d'alumini  $Al_2O_3$ ) es necessiten 4 kg de bauxita, i d'aquests només s'obté 1 kg d'alumini pur.

El primer pas en la producció de l'alumini és l'escalfament de la bauxita en presència de sosa càustica per obtenir l'aluminat sòdic. El principal residu d'aquest procés és l'anomenat fang vermell, que presenta un pH molt elevat i seriosos problemes per al medi ambient. Seguidament, l'aluminat sòdic passa per un procés de calcinació a 1.000 °C que permet obtenir òxid d'alumini. Aquest, posteriorment, experimenta un procés d'electròlisi que el transforma en alumini pur. Aquests dos últims processos consumeixen una gran quantitat d'energia.

Durant aquest procés, per cada tona de bauxita tractada es generen 650 kg de fang vermell, i  $2 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> de vapors de fluor i 200 m<sup>3</sup> d'aigua fluorada. D'altra banda, es calcula que per a la producció d'1 kg d'alumini calen 14 kWh d'energia en forma de corrent elèctric. Aquesta energia pot sem-

blar insignificant, però només en la fabricació de llaunes d'alumini a escala mundial es consumeixen 150 GWh, deu vegades el consum anual d'energia elèctrica a tot Catalunya (IDESCAT, 2005).

Per al reciclatge de l'alumini es requereix, aproximadament, un 6 % de l'energia utilitzada per produir-lo a partir de bauxita, és a dir, es produeix un estalvi del 94 %. És per això que a Europa un 50 % de l'alumini que es consumeix prové del reciclatge.

L'alumini és un exemple de com el reciclatge, a banda d'estalviar nombrosos problemes ambientals associats a la producció de residus i el consum d'energia elèctrica, comporta un estalvi econòmic important.

## **2. Objectiu**

L'objectiu d'aquesta pràctica és comprovar, de manera qualitativa, l'efecte del reciclatge en les propietats mecàniques d'un aliatge d'alumini. S'intenta identificar l'estalvi energètic del procés de reciclatge respecte al procés industrial.

Mitjançant un procés de refusió, es reciclarà alumini ja utilitzat. Cal tenir en compte que el procés de refusió que es realitza a la pràctica és una simplificació del que s'utilitza en la indústria. No es faran els controls requerits en el procés industrial: composició química, temperatura del bany, control de l'agitació, temps d'escalfament i manteniment, control de l'atmosfera que envolta la fusió, etc.

L'objectiu principal de la pràctica és que els alumnes entenguin el procés de refusió i coneguin els avantatges que comporta el reaprofitament d'un material metàl·lic com l'alumini, al mateix temps que avaluen les propietats mecàniques que presenta un cop reciclat i les comparen amb les que presentava en la primera fusió, a més de predir la possible degradació de l'aliatge en el procés de reciclatge.

## **3. Materials**

El material que s'utilitzarà en la pràctica són mostres de fosa d'alumini que han estat utilitzades en estudis i assaigs duts a terme al laboratori i que, un cop finalitzats aquests, ja no presenten cap més utilitat. Els assaigs que s'han dut a terme sobre aquestes mostres han estat, principalment, assaigs de tipus mecànic, com ara assaigs de tracció i de duresa. Aquests assaigs no provoquen canvis químics en l'aliatge i permeten la refusió de les mostres.

Les mostres són aliatges d'alumini i silici, algunes amb altres elements com el bor i l'estronci. Les mostres tenen geometria de proveta de tracció de secció circular. En la figura 1 es mostra una de les provetes ja assajades i que s'utilitzarà per fondre.





**Figura 1.** Proвета assajada

#### 4. Equipament

Per tal de realitzar la fosa dels aliatges d'alumini és necessari disposar d'un sistema per escalfar l'alumini per sobre del punt de fusió i un recipient/motlle per refredar i donar forma a la nova peça d'alumini reciclat.

Per escalfar l'alumini s'utilitzarà un petit forn de fosa de laboratori, que consta d'un recipient ceràmic, una cullera, que disposa d'un canal de buidatge a la part superior i que es col·loca en posició central al forn. El forn disposa d'una sèrie de resistències elèctriques que produeixen prou calor per assolir els 700 °C necessaris per fondre l'alumini.

En la figura 2 es mostra el forn de fusió utilitzat i el detall del gresol interior on es fondrà el material, amb el canal per bolcar el líquid.



**Figura 2.** Forn de fusió

El motlle és metàl·lic i està format per dues parets que ressegueixen la geometria de la proveta de tracció que s'obtindrà un cop solidificat l'alumini. Les dues parts del motlle s'uneixen i es fixen entre elles mitjançant espàrrecs, que eviten l'obertura del motlle. Al motlle es poden fer tres provetes de tracció alhora per aprofitar l'encesa i el funcionament del forn, que té un consum elevat d'energia elèctrica. Aquest motlle es recolza sobre una base també metàl·lica per poder subjectar-lo, i amb l'ajut d'un petit carro amb rodes el podem desplaçar sense perill de patir cremades. El motlle porta un petit sistema de canals per refrigerar-se, i disposa d'una connexió d'entrada i d'una de sortida d'aigua a cada meitat.

Per caracteritzar les propietats mecàniques de les noves mostres obtingudes s'han de realitzar assaigs de tracció. Per fer aquest assaig s'utilitza una màquina d'assaigs universals (tracció, compressió, flexió, etc.) electromecànica. Amb un sistema de fixació mitjançant mordasses pneumàtiques, se subjecta la mostra i la càrrega s'hi aplica pel desplaçament d'una de les mordasses. El funcionament de la màquina es controla mitjançant PC, amb un programa de càrregues prèviament dissenyat.

La figura 3 mostra la màquina de tracció amb el PC de control, que s'utilitza per realitzar els assaigs de tracció.



**Figura 3.** Instrumentació per realitzar assaigs de tracció

## 5. Desenvolupament

### 5.1 Fosa de l'alumini

Les mostres que s'han de fondre s'han de netejar prèviament de restes de greix o de qualsevol altra brutícia. Un cop netes, s'eixuguen i es pesen. Cal utilitzar uns 500 g de mostres d'alumini per omplir el motlle i obtenir tres mostres de tracció noves.

Enceneu el forn de fusió i programeu-lo a 700 °C. Quan el forn hagi assolit una temperatura aproximada de 500 °C, s'introdueixen els trossos de mostres que s'han de reciclar dins el gresol ceràmic del forn. Cal anar amb molt de compte perquè la temperatura del forn és elevada. S'han d'utilitzar guants tèrmics, ulleres o màscara de protecció i pinces metàl·liques llargues per agafar les mostres.

Durant el procés de fusió, s'ha d'anar remonent la massa fosa que es va formant al gresol per a l'homogeneïtzació correcta de les mostres. Durant el procés de fusió es realitza, mitjançant un amperímetre, una mesura de la intensitat de corrent elèctric que el forn consumeix.

Mentre continua el procés de fusió, es prepara el motlle. Primerament, es munta i es fixa amb els espàrrecs de tancament, tot col·locant-lo sobre la base. Amb l'ajut del carro es posiciona sota la sortida de buidatge del gresol del forn. Es connecten les entrades i sortides d'aigua del circuit de refrigeració a les mànegues ja preparades del laboratori.

Un cop finalitzat el procés de fusió, s'emmotllen les mostres. Per fer-ho, de primer cal protegir-se adequadament. S'han d'utilitzar els guants tèrmics, les ulleres o la màscara de protecció, un davan-

tal tèrmic i sabates de seguretat. El motlle, amb la seva boca d'entrada, ja estarà col·locat just a sota del canal de buidatge del gresol.

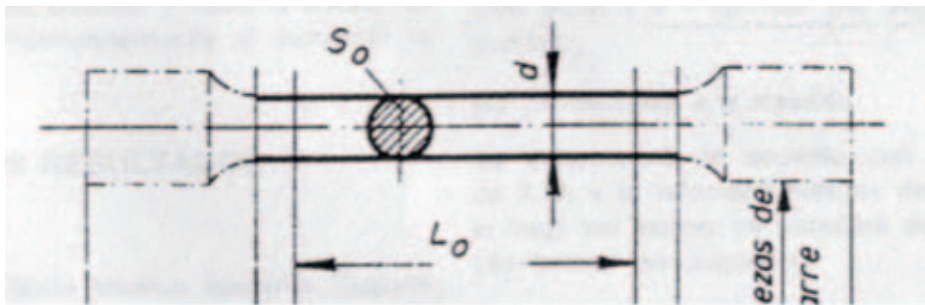
Un cop obert el pas de l'aigua del circuit de refrigeració de les dues meitats del motlle, es bolca, amb suavitat, el forn sobre el motlle. Lentament, l'alumini fos en un estat pastós anirà caient cap al motlle pel canal de buidatge. Un cop el motlle estigui ple, amb molta cura, es retorna el forn a la seva posició original.

Seguidament, cal esperar que l'alumini fos es refredi i solidifiqui dins el motlle. Això pot trigar uns 5 minuts. Passat aquest temps, es comprova que la temperatura hagi baixat prou per desemmotllar les mostres.

## 5.2 Assaig de tracció

Un cop les mostres estiguin del tot fredes, cal preparar-les per realitzar l'assaig de tracció. Mitjançant tela d'esmeril, es poleix la superfície central de la mostra i es retiren les possibles imperfeccions resultants del procés de fusió.

Es pesa la mostra i es mesuren el diàmetre i la longitud (figura 4), fent les marques de les distàncies de referència (marques a 50 mm de separació i centrades respecte al punt mitjà de la mostra).



**Figura 4.** Diagrama d'una proveta de tracció

Es realitza l'assaig de tracció sobre la mostra ja preparada. Es mesuren la resistència i l'allargament o deformació que experimenta la mostra fins que se'n produeix la fractura. Els valors importants de l'assaig són la resistència màxima i l'allargament a fractura.

## 6. Càlculs

### 6.1 Assaig de tracció

En la realització de l'assaig de tracció cal avaluar la tensió que experimenta el material quan és obligat a estirar-se.

La tensió ( $\sigma$ ) és la força aplicada sobre la mostra per unitat de superfície:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

F és la força que cal aplicar a la mostra per estirar-la i variar-ne la geometria i A, l'àrea de la secció transversal de la mostra perpendicular a la direcció d'aplicació de la força.

Quan la mostra és estirada, les seves dimensions inicials experimenten una variació, és a dir, una deformació. La deformació és la variació d'una dimensió respecte al seu valor original:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

l és la longitud al final de l'assaig i  $l_0$ , la longitud original.

Els valors obtinguts a partir de l'assaig de tracció són els següents:

- Valor de la tensió de fractura del material. Valor de la força màxima que ha resistit la mostra just abans de trencar-se dividida per l'àrea inicial de la mostra. Aquesta tensió de fractura és el que s'anomena resistència màxima ( $\sigma_m$ ) del material. Les unitats en què s'expressa són newtons per mil·límetre quadrat [N/mm<sup>2</sup>] o megapascals (MPa).
- Allargament a fractura. És la màxima deformació que ha assolit el material fins que s'ha trencat. Aquest valor s'obté anotant les dimensions de la longitud de la part central de la mostra, indicades amb dues marques separades uns 50 mm, abans i després de realitzar l'assaig. El valor de l'allargament és adimensional [mm/mm] i és en tant per 1. Cal multiplicar-lo per 100 per obtenir el percentatge de deformació.

Amb la diferència de les longituds mesurades, tindrem l'increment en longitud que ha experimentat la mostra, i amb el càlcul de la deformació, obtindrem el valor de l'allargament a fractura.

## 6.2 Consum elèctric del forn

Per assolir la temperatura necessària per fondre l'alumini que introduïm al gresol, el forn consumeix un total de 3 kW/h. El procés de fusió de les mostres d'alumini triga aproximadament 45 min des del moment que introduïm el material al gresol fins que ja podem bolcar-lo al motlle perquè es refredi i obtenir les noves mostres de tracció. En total s'introdueixen 500 g d'alumini al gresol.

## 7. Resultats

### 7.1 Càlcul dels valors de tensió de fractura

Mostra	Diàmetre (mm)	Àrea (mm <sup>2</sup> )	Força fractura (N)	Tensió fractura (MPa)
<b>Valor mitjà</b>				

<b>Valor tensió fractura mitjà (MPa)</b>	
--	--

## 7.2 Càlcul del valor de la deformació

Mostra	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)	Allargament a fractura (%)
<b>Valor mitjà</b>	--	--	

<b>Valor allargament a fractura mitjà (%)</b>	
---	--

## 7.3 Càlculs de la variació de tensió i deformació

	Allargament a fractura (%)	Tensió fractura (MPa)	Variació allargament (%)	Variació tensió fractura (%)
Mostres originals				
Mostres foses				

## 8. Qüestions

- Comenteu la possible degradació que ha experimentat la nova fosa d'alumini. És més o menys resistent la nova fosa? Es deforma més?
- Si perd propietats mecàniques, creieu que aquesta pèrdua pot ser acumulable en pròximes foses d'aquestes mostres?
- Calculeu el consum d'energia elèctrica del forn durant el procés de fusió. Si es requereixen 14 kWh per a la producció d'1 kg d'alumini a partir de bauxita, quin estalvi energètic ha suposat el procés de refusió?
- Quin és el tant per cent de material original recuperat?

## 9. Bibliografia

- [1] INSTITUT NACIONAL D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA, IDESCAT (2005). Anuari Estadístic de Catalunya 2005 (capítol 7). Generalitat de Catalunya.
- [2] AENOR. UNE 7-474-92. Parte I: Ensayo de tracción para materiales metálicos.
- [3] HUFNAGEL, W. (1992). Manual del aluminio (2a edició). Editorial Reverté.



## Capítol 21

# Assaigs de tracció amb provetes de plàstic reciclat

MIGUEL SÁNCHEZ SOTO I MARIA LLUÏSA MASPOCH  
Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica  
Centre Català del Plàstic  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

El coneixement de les propietats mecàniques dels materials és essencial per poder dissenyar estructures i peces que puguin suportar les condicions de càrrega durant la seva vida útil sense que es trenquin. Així, per exemple, moltes vegades cal conèixer l'esforç màxim que es pot aplicar a una estructura o bé la deformació que es pot esperar d'aquesta quan es troba sotmesa a un determinat estat de càrregues.

Les propietats mecàniques dels materials es determinen als laboratoris portant a terme assaigs que tracten de reproduir les condicions reals del component en servei, o bé mitjançant assaigs específics que permeten extreure característiques pròpies dels materials. Els assaigs poden ser molt variats i sovint s'han de considerar factors com la naturalesa de la força aplicada, la seva durada, la temperatura, el temps d'aplicació o bé si l'assaig és de tracció, flexió, compressió o cisalla.

Un dels assaigs mecànics més comuns i que sovint s'aplica quan es vol caracteritzar mecànicament un determinat material és el de tracció. A més de poder determinar les propietats mecàniques que caracteritzen un determinat material (resistència, mòdul elàstic, allargament etc.), l'assaig també ens permet comprovar si alguna de les característiques que mesurem d'un material en un moment determinat s'alteren per efecte dels temps o dels processos que fem. En definitiva, l'assaig de tracció ens proporciona paràmetres que són importants per al control de qualitat, per a les especificacions de producte i per al càlcul de peces sotmeses a esforços.

## 2. Objectius

Amb aquesta pràctica es pretén determinar les característiques mecàniques d'un material plàstic reciclat mitjançant l'assaig de tracció.

Un dels objectius de la pràctica consisteix a caracteritzar el comportament mecànic dels materials sotmesos a assaig i determinar el valor de les seves propietats més representatives. D'altra banda, com a segon objectiu, es pretén avaluar la possible variació en propietats del material reciclat respecte al verge mitjançant la comparació de les propietats trobades amb les que figuren en la bibliografia.

Amb la realització de l'experiència proposada l'alumne treballa els conceptes de propietats mecàniques i viscoelàstiques d'un material plàstic, a la vegada que porta a terme l'assaig amb material plàstic que prové de reciclatge. D'aquesta manera, a més del seu ús original, el plàstic reciclat en forma de provetes, per mitjà d'aquesta pràctica, troba un segon ús didàctic.

## 3. Fonaments

### 3.1 Assaig de tracció

Durant aquest assaig s'aplica una força de tensió en la direcció de l'eix principal d'una proveta amb una forma determinada. Els extrems de la proveta es fixen a les mordasses de la màquina d'assaigs; al seu torn, ambdues mordasses van unides a dos travessers de la màquina, un dels quals és mòbil i l'altre fix. El travesser mòbil es pot desplaçar a una velocitat variable que se selecciona abans de realitzar l'assaig i que habitualment oscil·la entre els límits de 0,1 mm/min i 500 mm/min (figura 1).

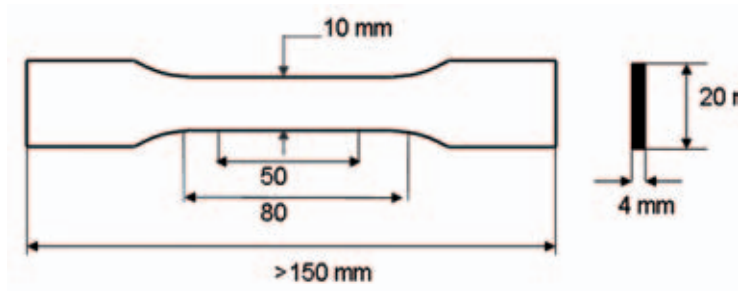
La força que la màquina aplica als extrems de la proveta va augmentant gradualment, de manera que la proveta s'allarga fins a arribar a un límit prefixat amb anterioritat o fins que es produeix el seu trencament. La força que s'aplica a cada moment es mesura mitjançant un sensor o cèl·lula de càrrega, mentre que l'allargament de la proveta es pot mesurar emprant extensòmetres o indirectament per mitjà del desplaçament del bastidor mòbil.

La forma i les dimensions de les provetes estan normalitzades i n'hi ha diversos tipus. Així, per a metalls se solen emprar provetes cilíndriques, mentre que per a ceràmics i plàstics les provetes tenen una configuració plana. En les figures 2 i 3 es representen dos tipus característics de provetes emprades amb plàstics; la primera és la més emprada en termoplàstics i termoestables, i la representada en la figura 3 és l'emprada per a materials tous, com ara elastòmers, i també per a films i fulls de plàstic de petit gruix (1-3 mm).

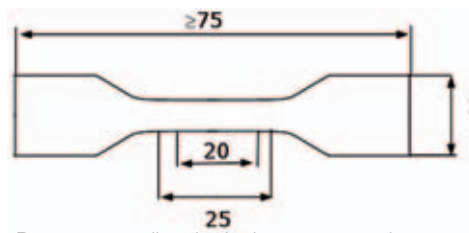




**Figura 1.** Proveta fixada a les mordasses de la màquina d'assajos



**Figura 2.** Proveta normalitzada de tipus 1A segons la norma ISO-527



**Figura 3.** Proveta normalitzada de tipus 5 segons la norma ISO-527

El resultat de l'assaig es pot registrar informàticament en forma d'evolució, per exemple, de la força aplicada enfront del desplaçament experimentat per la proveta. Les característiques força-desplaçament depenen de la geometria de la proveta i, per tant, és més interessant calcular magnituds independents de la forma particular de la proveta emprada en l'assaig. Així, és comú expressar els resultats en termes de la tensió (força/secció) i deformació (longitud / longitud de referència).

### 3.2 Comportament mecànic dels materials plàstics

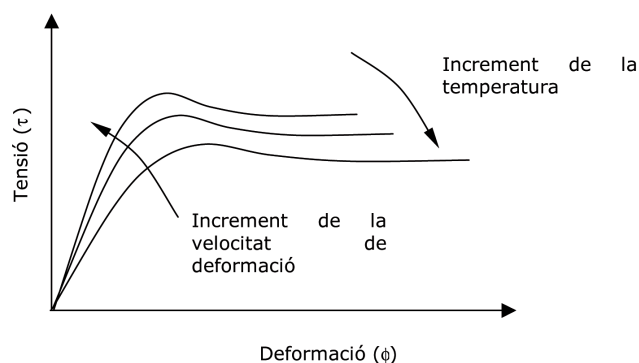
Els materials plàstics són viscoelàstics, i per tant exhibeixen un comportament mecànic dependent del temps (comportament viscoelàstic i viscoplàstic). Així, es pot dir que són parcialment elàstics i parcialment viscosos, i que resulten en un comportament de no-linealitat entre tensió i deformació. En general es considera que l'assaig de tracció no depèn del temps, ja que la seva durada és breu. No obstant això, en el cas dels materials plàstics, és pràcticament impossible que el seu comportament sigui independent del temps. Només per a alguns tipus de polímers i a temperatures baixes es podria menysprear la component viscosa. Així doncs, la velocitat de deformació associada amb l'assaig de tracció afectarà la resposta del material i, per tant, els resultats de l'assaig. A alts valors de velocitat de deformació els materials plàstics mostraran un comportament més rígid i fràgil, mentre que a baixes velocitats seran més flexibles i dúctils. La influència de la temperatura és inversa, de manera que a temperatures elevades el plàstic és més flexible, mentre que a baixes temperatures mostra més rigidesa. En la figura 4 es mostra esquemàticament la influència del temps i la temperatura en les propietats d'un material plàstic.

Atesa la dependència de les propietats dels plàstics amb la velocitat d'assaig, per poder comparar diferents materials plàstics, cal fer-ho sempre a la mateixa velocitat d'assaig. Així, és molt comú treballar amb velocitats de 50 mm/min per obtenir les corbes de comportament genèric, mentre que per calcular algun paràmetre especial, com ara el mòdul d'elasticitat, es pot treballar a una velocitat d'1 mm/min. La temperatura d'assaig de treball habitual és de 25 °C.

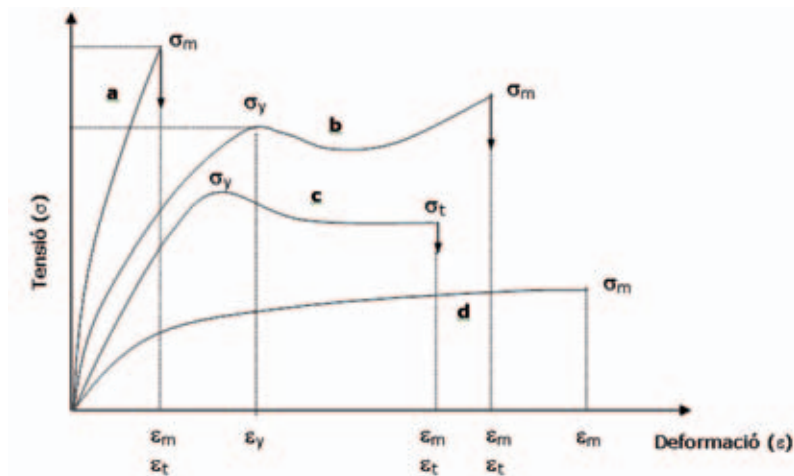
De vegades és comú categoritzar els materials plàstics en termes de la seva resposta tensió-deformació en l'assaig de tracció. Així, es descriuen els plàstics rígids com els caracteritzats per un alt

mòdul, petites deformacions a trencament, amb poca o cap fluència abans del trencament, i amb bastant proporcionalitat tensió-deformació. Els plàstics de comportament elastoplàstic o dúctil manifesten una proporcionalitat inicial entre tensió i deformació seguida de no-linealitat, tenen una rigidesa i deformacions intermèdies i exhibeixen en general punt de fluència. Finalment, els elastòmers es caracteritzen per un baix mòdul i una gran deformació a baix nivell d'esforç aplicat. En general no mostren punt de fluència i no hi ha proporcionalitat entre tensió i deformació.

En la figura 5 es mostren les corbes característiques corresponents a les tres tipologies de comportament esmentades anteriorment.



**Figura 4.** Efecte de la velocitat de deformació i temperatura sobre els materials plàstics sotmesos a l'assaig de tracció



**Figura 5.** Corbes genèriques de comportament dels materials plàstics amb indicació dels punts característics de la corba tensió-deformació

a: Plàstic rígid i fràgil. Coincideixen el punt de fluència, el màxim i el de trencament ( $\sigma_y = \sigma_m = \sigma_t$ ); ( $\epsilon_y = \epsilon_m = \epsilon_t$ ).

b: Plàstic dúctil amb punt de fluència i comportament elàstic i plàstic. La tensió de fluència ( $\sigma_y$ ) és màxima i més gran que la de trencament ( $\sigma_t$ ).

c: Plàstic amb punt de fluència. La tensió de fluència ( $\sigma_y$ ) és menor que la de trencament, que coincideix amb la màxima suportada pel material ( $\sigma_t = \sigma_m$ ).

d: Plàstic dúctil i sense punt de fluència (elastomèric). Es caracteritza per una gran deformació ( $\epsilon_m$ ).

### 3.3 Càlculs

Com s'ha comentat en els apartats anteriors, la màquina de tracció registra els valors de la força que cal aplicar sobre la proveta i també es registra l'increment de la longitud de referència. A partir d'aquests dos valors es poden obtenir les magnituds següents:

La tensió nominal  $\sigma$  es calcula mitjançant l'expressió:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

F és la força instantània aplicada sobre la proveta i  $A_0$  és l'àrea original de la proveta abans de la realització de l'assaig. En el cas dels plàstics, les unitats habituals en què s'expressa la tensió són  $\text{N/mm}^2$  o MPa.

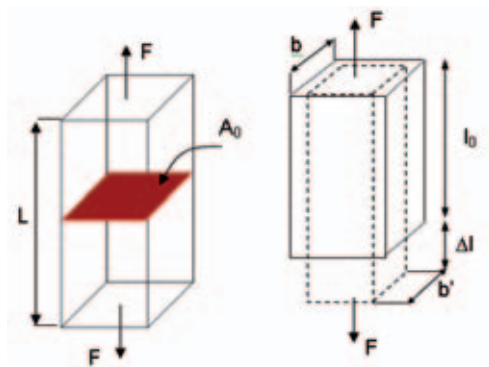


Figura 6. Variació nominal en dues dimensions

La deformació nominal,  $\epsilon$ , de la proveta en la direcció de tracció es defineix com l'allargament instantani de la proveta dividit per una longitud inicial de referència  $l_0$ .

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$l_0$  i  $l_i$  són les longituds de la proveta abans i després de fer l'assaig, respectivament. La deformació no té unitats i moltes vegades s'expressa en tant per cent, és a dir, el valor de la deformació unitària multiplicat per 100. En aplicar-hi l'esforç de tracció, la proveta s'allarga en la mateixa direcció (z), però a la vegada s'escurça en les direccions perpendiculars a la d'aplicació de força. Aquesta deformació ve donada pel coeficient de Poisson, que expressa la relació de la deformació en una direcció amb les deformacions de les dues altres direccions de l'espai. Així, i suposant un comportament isòtrop del material, el coeficient de Poisson es defineix com:

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

$$\epsilon_z = \frac{\Delta L}{L} \qquad \epsilon_x = \epsilon_y = \frac{b - b'}{b} = \frac{\Delta b}{b}$$

El coeficient de Poisson pot variar entre 0, quan no hi ha contracció lateral, i 0,5 en cas que la contracció lateral sigui igual a la contracció en sentit longitudinal. A la pràctica no hi ha materials que tinguin coeficients de Poisson iguals a 0 o 0,5. Per poder determinar el coeficient de Poisson, cal mesurar la deformació transversal de la proveta amb dispositius específics.

El mòdul d'elasticitat o mòdul de Young es defineix com el pendent de la part de la gràfica tensió-deformació en què es manté la linealitat o proporcionalitat entre ambdues magnituds, és a dir, quan es verifica la llei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad [6]$$

A la pràctica, és molt difícil establir un rang de tensions i/o deformacions en què es mantingui la proporcionalitat entre tensió i deformació per a tots els plàstics. En qualsevol cas, la normativa estableix que el mòdul elàstic s'ha de calcular aplicant l'expressió:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

$E_t$  = mòdul d'elasticitat en tracció, expressat en N/mm<sup>2</sup> (MPa)

$\sigma_1$  = esforç mesurat al valor de deformació  $\varepsilon_1 = 0,0005$

$\sigma_2$  = esforç mesurat al valor de deformació  $\varepsilon_2 = 0,0025$

El punt de fluència es defineix com el primer dels punts de la corba tensió-deformació en què té lloc un increment de la deformació sense que hi hagi un augment de la tensió. S'expressa en megapascals (MPa) i s'identifica a través de la tensió de fluència ( $\sigma_y$ ) i la deformació de fluència ( $\varepsilon_y$ ). Altres punts rellevants són la tensió màxima ( $\sigma_m$ ) i la deformació màxima ( $\varepsilon_m$ ), que poden coincidir o no amb els de trencament del polímer.

En la majoria dels casos els valors de tensions que es determinen són els denominats «enginyerils», és a dir, la força registrada es divideix pel valor de l'àrea transversal inicial de la proveta. No obstant això, durant l'assaig, l'àrea transversal de la proveta experimenta una variació important (figura 4) particularment a alts valors de tensió. Les tensions veritables es determinen dividint la força aplicada per l'àrea transversal que hi ha a cada moment de l'assaig. Es pot demostrar que si no hi ha variació de volum fins al punt de fluència les expressions següents\* són vàlides:

$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon) \quad [8]$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon) \quad [9]$$

$\sigma_v$  i  $\varepsilon_v$  són, respectivament, la tensió veritable i la deformació veritable.

### 3.4 Material plàstic

Com a material per a la pràctica es pot utilitzar qualsevol tipus de plàstic, sempre que s'hagi modelat o retallat en una de les formes indicades en les figures 1 i 2 o bé en les alternatives assenyalades per les normes (per exemple: ISO 527-2: 1993, ASTM D 647, DIN 53455).

En el nostre cas, farem servir preferentment plàstics procedents de rebuig que, mitjançant un procés d'injecció, s'han transformat en provetes. Les provetes han estat fabricades al Centre Català del

Plàstic (CCP) en el marc del Projecte Pràctic corresponent a la 2a Convocatòria Laboratori Real – Pla de medi ambient de la Universitat Politècnica de Catalunya.

En el cas d'utilitzar les provetes del Projecte Pràctic, el plàstic reciclat amb què s'han realitzat les provetes ha estat caracteritzat d'origen mitjançant diversos assaigs termomecànics. Les seves propietats s'han introduït en una etiqueta identificativa resum, en què es poden consultar les propietats més importants i es reflecteix a més el tipus de polímer, una corba característica tensió-deformació, així com altres dades d'interès. La fitxa es lliura amb cada partida de provetes. Un exemple de la fitxa resum es pot veure en la figura 7.

Propietats:		Valors	Unitats	Norma ISO
$\rho$			g/cm <sup>3</sup>	1183
$\sigma_y$			N/mm <sup>2</sup>	527
E			N/mm <sup>2</sup>	527
MFI <sub>270/5</sub>			g/10 min	1133
VICAT <sub>B120</sub>			°C	306

Figura 7. Fitxa identificativa de caracterització dels materials plàstics reciclats del Projecte Pràctic

## 4. Metodologia

### 4.1 Equipament

A més de la màquina de tracció, l'equip necessari per a la realització de la pràctica és el següent:

- Provetes de plàstic
- Termòmetre per mesurar la temperatura ambient
- Peu de rei
- Claus Allen
- Tisores
- Retolador
- Full de càlcul per ordinador (Excel o similar)

## 4.2 Procediment operatiu

1. Engegar la màquina de tracció i l'ordinador que la controla, si escau.
2. Muntar les mordasses adequades a les provetes que s'han d'assajar.
3. En el cas d'utilitzar extensòmetre, dibuixeu prèviament sobre la proveta unes marques a fi de definir la longitud de referència (L<sub>0</sub>). Les marques han de ser equidistants del centre i la distància entre elles s'ha de mesurar amb una exactitud d'almenys l'1 %. Si no es disposa d'extensòmetre, s'ha de prendre com a longitud de referència la longitud de la zona paral·lela estreta de la proveta (80 mm en la proveta de la figura 2).
- 4.- Comproveu que les provetes estan lliures de torsió i tenen les superfícies rectes. Les superfícies i les vores han d'estar exemptes de ratlles, buits, rebaves i altres defectes. Les provetes que presentin qualsevol falta observable o mesurable s'han d'eliminar o mecanitzar a les dimensions i la forma correctes de l'assaig.
5. Mesureu la temperatura ambient i, si és possible, la humitat del recinte d'assaig. Anoteu-ne els valors.
6. Preneu mesures de l'amplària (b) i el gruix (i) de la proveta amb el peu de rei. El gruix s'ha de mesurar al centre de la proveta i a 5mm per sota de cada extrem de la longitud de referència. Es recomana una aproximació de 0,1 mm per a l'amplària i de 0,02 mm per al gruix. Anoteu-ne els valors i calculeu l'àrea transversal inicial de la proveta (A<sub>0</sub>).
7. Col·loqueu les provetes en les mordasses, anant amb compte d'alinejar l'eix longitudinal de la proveta amb l'eix de la màquina d'assaig. Estrenyeu les mordasses fermament per evitar que la proveta llisqui.
8. En estrènyer la proveta amb les mordasses, s'ha realitzat un esforç sobre aquesta. Tots els assaigs han de partir de càrrega nul·la; per tant, s'ha de realitzar una descàrrega o tara de la màquina. En aquest procés, normalment automàtic, la màquina descarrega la proveta fins que arriba al zero i seguidament realitza l'assaig. Verifiqueu l'operativa de tara a càrrega nul·la.
9. Fixeu la velocitat d'assaig conforme a les necessitats de la pràctica. Pot ser necessari adoptar diferents velocitats per a la determinació del mòdul elàstic o de les propietats tensió-deformació. Així mateix, pot ser interessant fer assaigs a diferents velocitats de deformació per evidenciar els canvis de comportament dels materials plàstics (viscoelasticitat).
10. Registreu els valors de força i desplaçament. En general aquest procediment el realitza automàticament l'equip.
11. Determineu les tensions de fluència, màximes i de trencament, així com el mòdul elàstic del material.
12. Nombre d'assaigs: La normativa de tracció recomana emprar almenys cinc provetes de tracció per assaig per obtenir valors mitjans. En aquesta pràctica es recomana assajar una proveta d'almenys dos tipus de plàstics amb comportament mecànic diferent per evidenciar les diferències entre ells.

## 5. Resultats

1. En la fitxa següent (figura 8), empleneu els valors corresponents a la tensió de fluència o trencament. Calculeu el mòdul elàstic, i indiqueu expressament la velocitat a la qual s'ha obtingut (vegeu l'exemple de la figura 7).
2. Esbosseu el gràfic tensió-deformació resultant de l'assaig en l'espai indicat per a això.
3. Calculeu els valors de les deformacions a fluència ( $\epsilon_y$ ) i ( $\epsilon_t$ ), així com la màxima registrada ( $\epsilon_m$ ). Indiqueu si són coincidents o no ho són.
4. Si es disposa del registre de valors  $\sigma$ - $\epsilon$  de la màquina d'assaig, mitjançant un full de càlcul, calculeu els valors de tensió i deformació veritable. Dibuixeu el gràfic tensió veritable – deformació veritable.
5. Mesureu el gruix de la proveta després de l'assaig.

Propietats:		Valors	Unitats	Norma ISO
$\rho$			g/cm <sup>3</sup>	1183
$\sigma_y$			N/mm <sup>2</sup>	527
E			N/mm <sup>2</sup>	527
MFI <sub>270/5</sub>			g/10 min	1133
VICAT <sub>B120</sub>			°C	306

Figura 8. Fitxa de característiques del polímer per omplir

## 6. Qüestions

- a) En quina de les tipologies de plàstics que coneixeu classificaríeu el material que heu assajat?
- b) Quin mecanisme de deformació és el que principalment ha tingut lloc durant la realització de l'assaig?
- c) En quina forma tendria a variar la corba tensió-deformació si s'afegís al polímer una segona fase o càrrega més rígida? I si la càrrega fos menys rígida que el polímer?
- d) Ha variat significativament la secció transversal de la proveta durant l'assaig? En aquest cas, com creieu que seria la corba veritable del material?
- e) Si el material en assaig ha mostrat inflexió després del punt de fluència, com explicaríeu que es necessiti menys força per continuar deformant el material? Passa el mateix en la corba «veritable»? Per què?
- f) La proveta assajada, té deformació plàstica permanent apreciable? Quin és el seu valor?





## Capítol 22

# Identificació de residus plàstics

MIGUEL SÁNCHEZ SOTO I MARIA LLUÏSA MASPOCH

Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica

Centre Català del Plàstic

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

La identificació completa d'un material plàstic sol ser, en general, un problema complicat i hi fan falta tècniques d'anàlisi sofisticades, com per exemple l'espectroscòpia infraroja (IR) o la ressonància magnètica nuclear (RMN).

No obstant això, per a molts casos pràctics, com per exemple per separar i classificar residus plàstics en un procés previ al reciclatge, n'hi ha prou de conèixer a quina família de material pertany el residu o objecte de plàstic. En aquests casos el problema se simplifica bastant i existeixen mètodes molts més econòmics, fàcils i ràpids de realitzar.

En aquesta pràctica es descriuen tres mètodes senzills, que realitzats sobre un mateix material plàstic ens aporten prou informació per poder-lo classificar dintre d'un flux de residus i posteriorment fer-ne el reciclatge.

Els mètodes d'identificació que es proposen en aquesta pràctica són els següents:

- Identificació mitjançant comportament a la flama
- Determinació de la densitat
- Determinació del percentatge de cendres

## 2. Objectius

Els objectius de la pràctica són els següents:

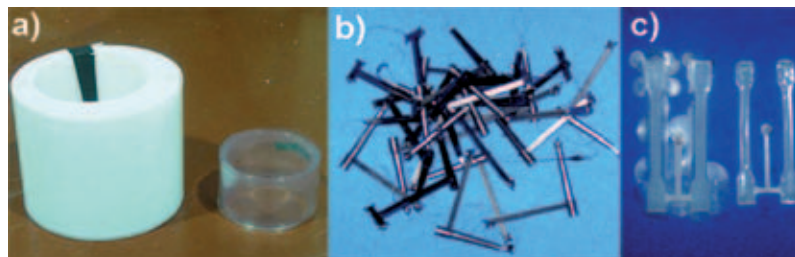
Aprendre els procediments d'identificació d'un material plàstic segons el seu comportament a la flama, la seva densitat i el percentatge de càrrega.

Aprofitar els residus plàstics generats en el laboratori o peces de plàstic en desús, com a material per a la realització de pràctiques de laboratori.

## 3. Material plàstic

Com a matèria primera es pot fer servir qualsevol tipus de residu o peces de plàstic que pertanyi a una de les sis famílies que s'indiquen en la taula 1.

Podem fer servir residus de plàstics procedents del propi laboratori. Aquests residus poden tenir aspecte i procedències diferents, per exemple una bobina que prové de l'extrusió de làmines (figura 1 a)); colades d'injecció (figura 1 b)), que és un residu inherent al procés d'injecció, o bé peces defectuoses (figura 1 c)). També ens podem trobar que el material plàstic estigui format per peces en desús, com ara taps d'ampolles, gots, bolígrafs, envasos, etc.



**Figura 1.** Exemples de residus: a) làmina d'extrusió, b) colades d'injecció i c) peces defectuoses

## 4. Equipament

L'equip necessari per a la realització de la pràctica és el següent:

Identificació del comportament a la flama

- Bec de Bunsen
- Pinces

Densitat

- Balança analítica

Percentatge de cendres

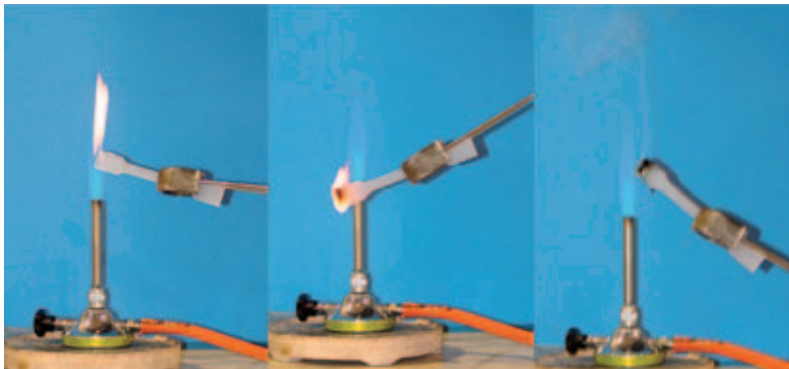
- Bec de Bunsen
- Mufla
- Balança analítica
- Gresols de porcellana

## 5. Desenvolupament

### 5.1 Identificació del comportament a la flama

Aquest mètode consisteix a posar en una flama d'un bec de Bunsen, utilitzant unes pinces, una mostra de plàstic, i observar curosament com crema el material plàstic a l'interior i fora de la flama. Cal observar també la formació de gotes de plàstic mentre està cremant o s'està fonent, així com l'olor després d'apagar la flama.

En les fotografies següents es mostra el procediment que s'ha de seguir.



**Figura 2.** Procés seguit per a la identificació del comportament a la flama

Amb les pinces, situeu la mostra a la zona exterior i cap amunt de la flama. Una vegada la mostra estigui encesa, retireu-la de la flama. Observeu el tipus de fum. **ATENCIÓ:** alguns materials degoten.

Apagueu la flama amb cura i observeu l'olor característica del fum.

En la taula 1 es resumeix el comportament a la flama de les famílies de materials plàstics més importants. En la taula també s'indiquen l'olor i les característiques dels fums que es desprenen, així com altres característiques especials molt útils per a la identificació.

Per comprovar si el material és PVC, feu el següent:

1. Amb les pinces, situeu un filferro de coure a la flama de l'encenedor fins al vermell.
2. Una vegada estigui roent, toqueu la mostra de plàstic amb el filferro (està calent i fondrà una mica de plàstic, que quedarà enganxat al coure).
3. Dueu a la flama el filferro de coure amb el plàstic que hi ha quedat enganxat.
4. Si és PVC, apareixerà un color verd molt intens.

La realització de la pràctica consisteix a cremar i identificar una mostra de cadascuna de les famílies de material plàstic, això ens permet familiaritzar-nos amb la tècnica. Després cada grup tindrà diverses peces problema per identificar.

**Taula 1.** Criteris per a la identificació de materials plàstics

Família material	Comportament a la flama	Olor i fums	Característiques	Característiques especials
Poliiolefines	Crema suaument. Fon i degota amb molta facilitat. La flama és de color groc i blau a les vores.	Parafina (cera, olor igual a quan apaguem una espelma).	Fa poc fum.	Sura a l'aigua.
Poliestirènics	Crema suaument. Flama groga.	Estirè.	Fa molt fum, amb unes partícules en suspensió de color negre.	
PVC	És autoextingible. Flama groga i verda a les vores.	Àcid clorhídric (picant).	Fa molt fum.	Quan es posa a la flama un fil de coure impregnat amb PVC, s'hi observa una flama verda.
Poliàmida	Crema suaument. Fon i degota amb menys facilitat que les poliolefines.	Banya o pèl cremat.	Fa poc fum.	
Poliacríliques	Crema suaument. La flama és de color groc i blau a les vores.	Afruitat.	Fa poc fum i crepita.	
Poliacetàliques	Crema suaument. Es fon i degota amb molta facilitat. La flama és de color blau.	Formaldehid. Olor picant.	Sense fum.	VIGILEU, no es veu que estigui cremant!

Dins la família de poliolefines es troben materials com el polipropilè (PP), el polietilè d'alta densitat (HDPE) i el polietilè de baixa densitat (LDPE). El grup dels poliestirènics el formen polímers com el poliestirè (PS), el poliestirè d'alt impacte (HIPS), el copolímer acrilnitril-estirè-butadiè (ABS), etc.

El mètode d'identificació segons el comportament a la flama només ens dona informació genèrica, és a dir, si un objecte està constituït, per exemple, per una poliolefina, el que no podem esbrinar és si es tracta d'un polietilè o d'un polipropilè. Si desitgem conèixer amb més detall el tipus de polímer, hem de recórrer a altres tècniques de més complexitat. No obstant això, determinant la densitat (apartat següent), podríem obtenir més informació.

## 5.2 Densitat

La densitat,  $\rho$ , és el quocient entre la massa ( $M$ ) i el volum ( $V$ ) d'un material.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Per determinar la densitat d'un material de manera bastant aproximada es pot utilitzar el mètode de l'impuls, que es basa en el principi d'Arquimedes: «Tot pes submergit en un líquid experimenta un impuls cap amunt igual al pes del volum de líquid desallotjat».

El mètode que es descriu a continuació és útil per determinar la densitat de materials compactes, però no serveix per a escumes o materials amb cavitats, porus o bombolles. A més, les mostres no han de presentar zones defectuoses, rebaves o altres imperfeccions.

El procediment que s'ha de seguir per a la determinació de la densitat és el següent:

Determinació de la massa ( $m_1$ ) de la mostra per pesada en l'aire.

Immersió de la peça en alcohol per disminuir la tensió superficial i evitar l'aparició de bombolles d'aire que falsejarien els resultats.

Determinació de la massa ( $m_2$ ) per pesada en el líquid d'assaig. Gairebé sempre s'utilitza com a líquid d'assaig aigua destil·lada ( $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ ). En el cas de les poliolefines s'empra metanol, ja que aquests materials tenen una densitat inferior a  $1 \text{ g/cm}^3$  (taula 2) i surarien a l'aigua.

En la figura 3 s'il·lustra el procediment que s'ha de seguir.

Per calcular la densitat de la mostra s'utilitza l'expressió següent:

$$\rho_{ex} = \frac{m_1}{V}$$

$\rho_{ex}$ : densitat experimental

$m_1$ : valor de la pesada en aire

$V$ : volum de la peça

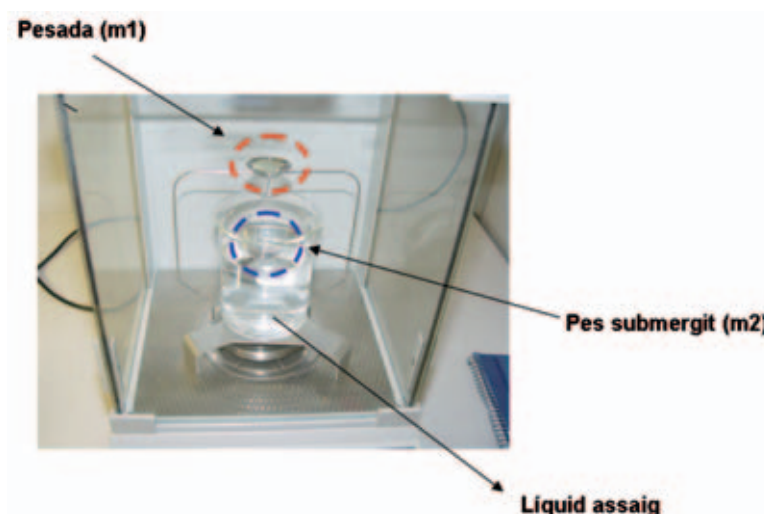
D'altra banda, el volum de la peça ( $V$ ) es determina de la manera següent:

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_{liq}}$$

$m_1$ : valor de la pesada en aire

$m_2$ : valor de la pesada quan està submergida en el líquid d'assaig

$\rho_{liq}$ : densitat del líquid d'assaig



**Figura 3.** Detall de la balança i del dispositiu per determinar la densitat

En la taula 2 s'indica el valor de la densitat dels materials plàstics més freqüentment utilitzats i que podem trobar en forma de residus de laboratori (per exemple, provetes d'assaigs mecànics) o de peces en desús.

**Taula 2.** Valors de la densitat

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
PP	0,85-0,92
LDPE	0,89-0,93
HDPE	0,94-0,98
PS	1,05
HIPS	1,01
ABS	1,06
SAN	1,10
PA	1,12-1,14
PMMA	1,19
PVC	1,37-1,44
POM	1,41-1,43

Quan el material plàstic està carregat o reforçat, per exemple amb talc carbonat càlcic, fibres o microesferes de vidre, negre de fum, etc., els valors de la densitat queden afectats i ja no es corresponen amb els indicats en la taula 2. En aquests casos és convenient determinar el percentatge de càrrega inorgànica (cendres) que conté el material (apartat 5.3).

En aquests casos la densitat del material també es pot calcular aplicant la llei de les mesclures:

$$\rho_c = \rho_m * V_m + \rho_f * V_f$$

$\rho_c$ ,  $m$ ,  $f$  = densitat del compost, de la matriu i de la segona fase, respectivament

$V_m$  = fracció en volum de la matriu

$V_f$  = fracció en volum de la segona fase ( $1 - V_m$ )

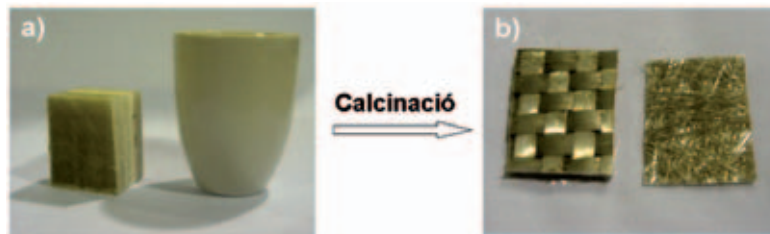
### 5.3 Percentatge de cendres

Molts materials plàstics s'usen carregats amb partícules o fibres de naturalesa ceràmica, com s'ha comentat en l'apartat anterior. Les càrregues s'usen amb la finalitat de modificar alguna de les propietats del polímer, per exemple la rigidesa, les contraccions d'emmotllament, el color, la resistència mecànica, etc.

En aquests casos, mitjançant el procediment de calcinació, es pot eliminar tota la part orgànica del material deixant un residu (cendres) que correspon a la fase o a les fases inorgàniques. Aquest residu ens dóna informació sobre el tipus, la forma, la distribució i la quantitat de càrrega present en el material plàstic.

En l'exemple que s'indica a continuació la mostra inicial és una part d'una proveta de flexió corresponent a una embarcació esportiva. Al laboratori es van fer uns assaigs per a una empresa i, transcorregut el període de temps corresponent, aquests trossos de provetes van passar a formar part dels residus generats pel laboratori. En aquest cas, reaprofitem el residu per realitzar una pràctica de laboratori.

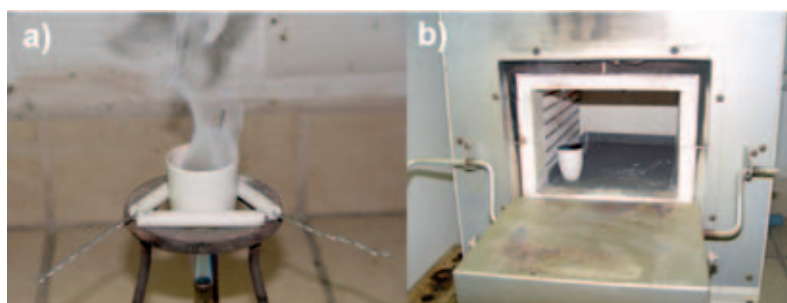
En la figura 4 es poden veure la mostra inicial i el gresol on es col·locarà per realitzar la calcinació. Després de l'assaig, tenim les cendres (figura 4 b)), que en aquest cas consisteixen en fibres de vidre en forma de teixit i fibres de vidre llargues i no teixides (mat).



**Figura 4.** a) Mostra inicial i gresol de porcellana, b) Residu de fibra de vidre

El procediment per determinar el percentatge de cendres és el següent:

1. Peseu un gresol sec en una balança analítica.
2. Introduïu una mostra a l'interior del gresol i torneu a pesar-lo, a fi d'obtenir el pes de la mostra.
3. Calcineu la mostra amb l'ajuda d'un bec de Bunsen (figura 5 a)).
4. Introduïu el gresol amb les cendres en un forn de mufla a 600 °C, i manteniu-lo a aquesta temperatura fins a un pes constant (figura 5 b)).



**Figura 5.** a) Calcinació inicial, b) Calcinació en mufla

## 6. Qüestions

a) Ompliu la taula adjunta a partir dels resultats obtinguts del comportament a la flama de les cinc mostres problema.

Peça núm.	Descripció de la peça	Observacions per a identificació	Tipus de material
1			
2			
3			
4			
5			

b) Calculeu la densitat de les tres mostres que heu assajat.

Peça núm.	m1	m2	Densitat	Tipus de material	
1					
2					
3					
			Valor mitjà		
			Desviació		

c) Determineu la densitat experimental de la mostra de material compost calcinada aplicant-hi la llei de les mescles.



## Capítol 23

# Reaprofitament de plàstics: extrusió

MIGUEL SÁNCHEZ SOTO I MARIA LLUÏSA MASPOCH

Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica

Centre Català del Plàstic

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

Una de les característiques comunes a tots els materials és la possibilitat de reaprofitar-los o reciclar-los. Avui en dia el reciclatge i el reaprofitament dels materials és un dels aspectes que ha adquirit més importància tecnològica. Els objectius del reciclatge de materials en general i dels plàstics en particular són, per una banda, la reducció de la quantitat de residus i de la càrrega ambiental que generen, i per l'altra, la conservació dels recursos naturals. Així doncs, reciclar significa aconseguir que el material torni a ser emprat una vegada exhaurit el primer cicle vital per al qual s'havia dissenyat.

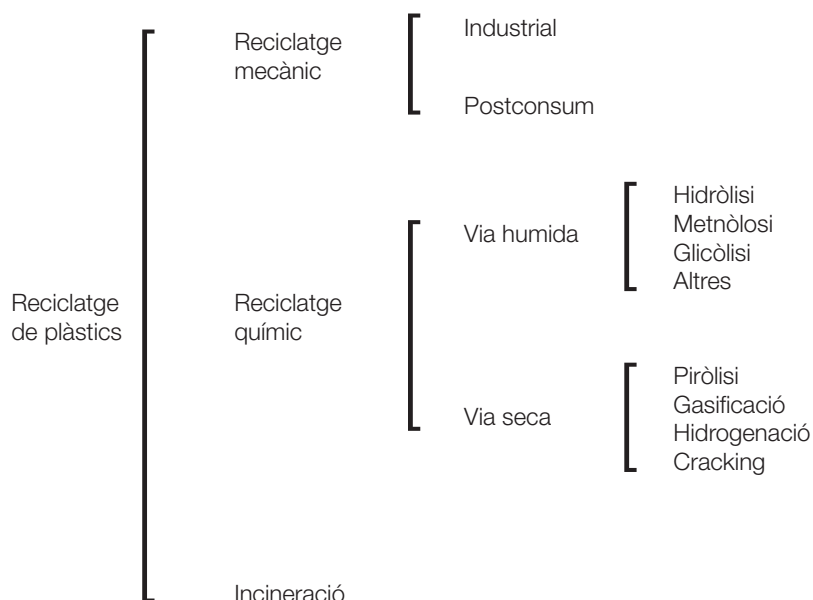
Els plàstics són materials sintètics i, per tant, en general, resistent a l'acció degradadora del medi ambient. Tanmateix, moltes vegades en la composició del plàstic s'afegeixen petites quantitats d'additius, com ara els antioxidants, que permeten reduir la pèrdua de propietats derivada de la degradació. Com a conseqüència de la seva estabilitat química, la permanència dels plàstics a un abocador serà molt llarga i superior a la d'altres materials, fet que justifica l'interès per reciclar-los. D'altra banda, la seva estabilitat intrínseca fa que siguin materials especialment adients per reciclar-los diverses vegades, ja que les seves propietats tindran poca variació, encara que això depèn de l'estructura química pròpia de cada tipus de polímer i de les condicions termomecàniques del procés de transformació.

Un determinat material plàstic que ha experimentat un cicle d'utilització i posterior reciclatge pot perdre en major o menor grau les seves propietats, bé com a conseqüència de la pròpia degradació del material o bé per la incorporació d'elements aliens al plàstic inicial, com ara impureses o restes d'altres tipus de materials que poden quedar barrejats. Pensant en l'objectiu final de tornar a fer servir el plàstic en noves aplicacions i peces, és molt important conèixer en quina proporció varien les propietats amb l'ús i el reciclatge posterior, ja que això permetrà utilitzar de nou el material en la mateixa aplicació original si la pèrdua de propietats és negligible, o bé en una aplicació amb menors exigències si la pèrdua de propietats és important. D'altra banda, un plàstic molt degradat o molt barrejat pot donar lloc a problemes durant la seva transformació i no assolir la qualitat que es requereix per al producte que es vol fabricar. Per aquest motiu és també important establir graus de qualitat del plàstic reciclat i assegurar el compliment de certes propietats termomecàniques.

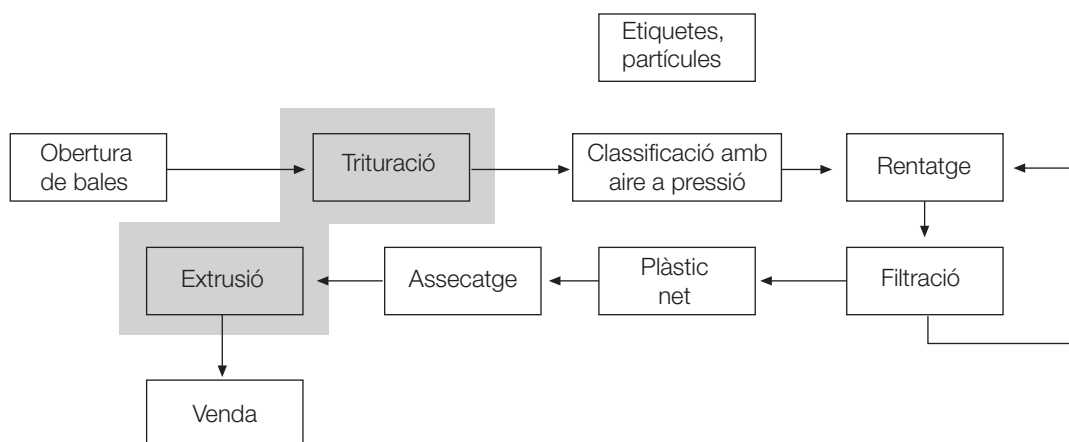
Hi ha diverses metodologies per reciclar els plàstics, que fonamentalment depenen de si el polímer es va formar per reaccions d'addició (polietilè, polipropilè, poliestirè, etc.) o de condensació (poliami-

des, policarbonats, PET, etc.), i també de l'estat de contaminació o de barreja en què aquest es trobi. Així, els mètodes per reciclar els plàstics els podem classificar segons l'esquema que es mostra a la figura 1. Dels mètodes que es mostren, el més senzill, econòmic i estès industrialment és el de reciclatge mecànic, que es pot aplicar al rebuig dels mateixos processos de fabricació (industrial) o en cas dels residus procedents d'elements de consum, és a dir, que s'han utilitzat una vegada (postconsum).

Un exemple de reciclatge postconsum és el dels envasos d'aigua de polietilè (translúcids) que s'introdueixen als contenidors grocs. Els contenidors es porten a plantes de triatge, on se separen els diferents materials —llaunes, brics i plàstics— i on els plàstics se separen per famílies i s'embaqueten en bales perquè es torni a elaborar matèria primera reciclada. Si partim d'aquest material ja separat, les operacions bàsiques que se seguirien per tornar a fabricar gransa reciclada són les que es mostren en la figura 2.



**Figura 1.** Classificació dels mètodes de reciclatge de plàstics



**Figura 2.** Etapes bàsiques involucrades en el procés de reciclatge mecànic postconsum

És difícil reproduir exactament totes les etapes d'un cicle de reciclatge industrial al laboratori, per això en aquesta pràctica es reproduiran només les etapes de trituració i de transformació. Cal dir, però, que aquestes etapes són les que més poden afectar la qualitat del plàstic i induir a la degradació, per efecte de la temperatura o cisalla desenvolupada durant la trituració o durant l'extrusió.

En la pràctica industrial, un mètode molt senzill per controlar la qualitat del producte que es fabrica i també per controlar el procés de fabricació és el denominat índex de fluïdesa. Aquest índex proporciona un valor que és indicatiu del pes molecular mitjà del polímer que s'estudia. És ben conegut que quan un plàstic es degrada, es trenquen les seves cadenes moleculars i com a conseqüència en disminueix la viscositat (augmenta la fluïdesa). Així doncs, si controlem la viscositat (o la fluïdesa) abans i després d'un determinat procés de transformació, podrem saber el grau de degradació experimentat pel plàstic per comparació amb l'estat inicial.

La determinació de l'índex de fluïdesa consisteix a introduir una petita quantitat de material plàstic dins d'un cilindre que té un petit forat a la part final. El plàstic s'escalfa fins a una temperatura determinada i es fa sortir a través del capil·lar per l'acció d'un pistó que s'ha carregat prèviament amb una massa determinada. Seguidament es mesura la quantitat de material que passa a través del forat en un temps determinat.

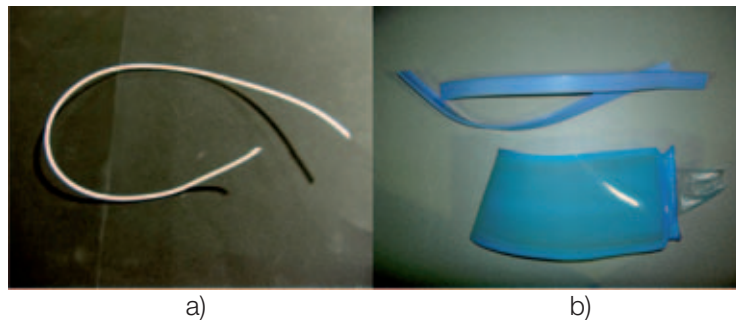
## **2. Objectius**

En primer lloc, en aquesta pràctica es pretén caracteritzar (mitjançant l'índex de fluïdesa) la degradació soferta per un determinat plàstic en funció del nombre de vegades que aquest es recicla. Tanmateix, es vol introduir els alumnes en la pràctica i tecnologia associades al reciclatge i el reaprofitament de plàstics per mitjà d'un exemple pràctic similar a l'industrial.

Amb la realització de l'experiència proposada l'alumne treballarà els conceptes de cicle de vida d'un article a la vegada que es fa una primera aproximació a la quantificació de l'impacte ambiental associat a un procés de transformació.

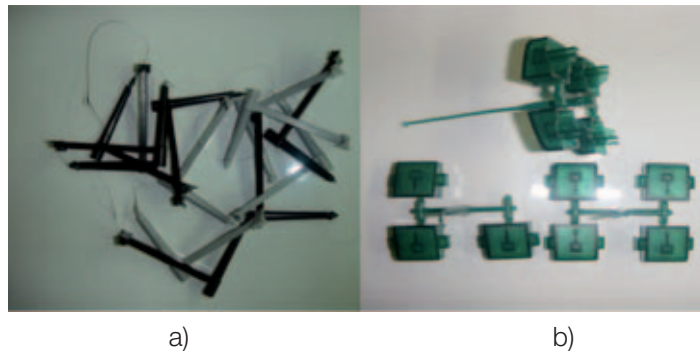
## **3. Material plàstic**

Com a matèria primera es pot fer servir qualsevol tipus de plàstic que estigui en unes condicions adequades per a la seva transformació posterior. Una font de material adient són les garrafes d'aigua de 5 o 8 litres que estan fetes de polietilè fàcilment reciclable. L'avantatge d'aquesta font de matèria primera és que ens permet seguir pas a pas el cicle de reciclatge postconsum, però l'inconvenient més important és la necessitat de recollir moltes garrafes per obtenir la quantitat necessària de material per portar a terme la pràctica.



**Figura 3.** a) Aspecte típic d'un residu d'extrusió de fil, b) Aspecte típic d'un residu d'extrusió de làmina

És per això que farem servir preferentment rebuig de plàstics procedents del mateix laboratori. Aquest rebuig pot tenir un aspecte diferent, atès que els processos de transformació que han experimentat prèviament poden ser molt diversos. Així, pot tenir una forma filamentosa si la seva procedència deriva fonamentalment d'un procés d'extrusió de fil (figura 3 a)) o bé pot tenir forma de bobina si el residu prové de l'extrusió de làmines (figura 3 b)).



**Figura 4.** a) Colades d'emmotllament, b) Peces defectuoses

També ens podem trobar que el material plàstic tingui forma de peces (provetes com les de la figura 5) o bé formes irregulars (figura 6). En qualsevol dels casos anteriors, caldrà fer una trituració acurada per transformar tot aquest rebuig en material apte per ser alimentat a la tremuja de l'extrusora.

## 4. Equipament

L'etapa de transformació representativa del procés de reciclatge que farem servir és la d'extrusió. A la pràctica industrial els recicladors fan servir l'extrusió com a mètode per homogeneïtzar plàstics de diferents tipus.

L'equip necessari per a la realització de la pràctica és el següent:

### 4.1 Extrusió

- Trituradora
- Extrusora de caragol únic
- 3-4 kg de material plàstic identificat que provingui de residus del mateix laboratori o ampolles de plàstic (3-4 kg)

- Bany d'aigua
- Gransadora
- Espàtules de fusta
- Tisores
- Diverses eines de llautó
- Una caixa de cartró de les de paper per a fotocopiadores
- Una bossa de plàstic

#### 4.2 Índex de fluïdesa

- Aparell d'índex de fluïdesa
- Petits trossos de tela de cotó (draps)
- Pinces
- Balança

### 5. Procediment operatiu

#### 5.1 Trituració

Engegueu el triturador i introduïu a poc a poc els residus de plàstic del laboratori a la boca del triturador. Abans d'introduir més material espereu uns quants segons fins que el soroll del triturador disminueixi. Quan acabeu, recolliu el material triturat del contenidor inferior de l'aparell. Assegureu-vos que l'aparell queda ben net i en les mateixes condicions que l'heu trobat.

#### 5.2 Extrusió

(Vegeu la fotografia i l'esquema de l'extrusora en les figures de la 5 a la 7.)

1. Engegueu l'extrusora fent girar l'interruptor vermell situat al costat del panell de control.
2. Seleccioneu les temperatures de les diverses zones de la màquina. Pregunteu al professor o professora quines són les temperatures més adients per al material que transformeu.
3. Col·loqueu el bany de refredament i la gransadora.
4. Col·loqueu la caixa de cartró a sota de la gransadora i poseu la bossa de plàstic dins de la capsa. A la bossa, hi recollirem el material processat una vegada trossejat.
5. Espereu uns quants minuts (5-10') fins que la màquina assoleixi les temperatures marcades. Una vegada la màquina s'ha estabilitzat a les temperatures de procés, premeu el botó de marxa (botó verd al frontal del panell de control) perquè el caragol comenci a girar. Inicialment seleccioneu una velocitat de gir petita fent girar el control de velocitat del panell de control.

6. Peseu el material plàstic que fareu servir (2-3 kg), afegiu-lo a la tremuja i espereu fins que aquest surti pel broquet de l'extrusora. Guardeu aproximadament 50 g del material inicial per fer l'índex de fluïdesa de referència.
7. Poseu en marxa la gransadora.
8. Quan el material hagi començat a sortir, talleu el fil amb les tisores i passeu-lo pel bany d'aigua i sense interrupció per la gransadora fins a obtenir un procés continu i que el material quedi trossejat a la bossa de plàstic.
9. Recolliu el material triturat i separeu-ne una part (50-100 g) per fer l'índex de fluïdesa.
10. Quan el material de la tremuja s'hagi exhaurit, afegiu tot el material triturat de nou a la tremuja i compteu com a començament del segon cicle de reciclatge.
11. Repetiu aquesta última etapa quatre vegades.
12. L'últim cop deixeu passar el material fins que no surti res pel broquet de l'extrusora, això serà indicatiu que dins l'aparell ja no queda gens de material.
13. Peseu el subproducte de plàstic que heu generat i el total de plàstic que s'ha transformat. Comptabilitzeu altres possibles subproductes i/o residus que s'hagin pogut generar. Estimeu l'energia que hem consumit per fer la pràctica.
14. Feu l'índex de fluïdesa de cada cicle. Dibuixeu la variació de l'índex amb el nombre de cicles del reciclatge.

### 5.3 Índex de fluïdesa

1. Seleccioneu la temperatura d'assaig segons les taules 1 i 2 de condicions d'assaig (UNE 53200-ISO R-1133). Deixeu estabilitzar la temperatura almenys durant 5 minuts.
2. Comproveu que tant el capil·lar com el cilindre de l'aparell estan ben nets. En cas contrari, netegeu-los fent servir els draps de cotó.
3. Col·loqueu entre 4 i 8 grams de plàstic reciclat a dins del cilindre i compacteu-ho fent una mica de força amb el pistó. Deixeu passar un parell de minuts i afegiu-hi un altre cop més material fins que, quan compacteu de nou, el material surti pel capil·lar inferior sense que hi observeu bombolles.
4. Deixeu passar un altre parell de minuts i poseu el pes indicat a la taula a sobre del pistó.
5. Mentrestant seleccioneu el temps de tall de l'extrudit per tal de que la longitud del filet no arribi a tocar la base de l'aparell ni sigui massa curta per manipular-la amb les pinces.
6. Comenceu a prendre les mostres i anoteu el temps de tall. Preneu almenys 6 o 7 mostres, peseu-les a la balança i feu-ne la mitjana aritmètica. Expressau els resultats en grams per 10 minuts.
7. Estimeu el material emprat, els residus generats i els consums de matèries primeres necessàries per fer la pràctica.

**Taula 1.** Materials plàstics i condicions segons UNE 53200

Família de material plàstic	Condicions aplicables*
Polietilè	1,3,4,5,7
Polipropilè	4,5,6,12,14
ABS	8
Acrílics	9,11,13
Policarbonats	17
Poliàmida	10,16
Poliacetals vinílics	17
Policlorotrifluoretilè	15

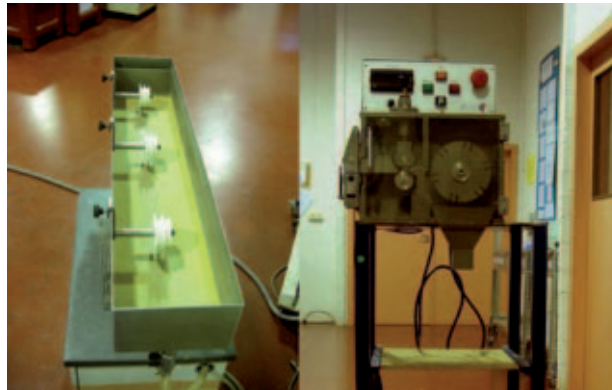
\* Vegeu la taula 2.

**Taula 2.** Condicions de l'assaig de fluïdesa (UNE 53200)

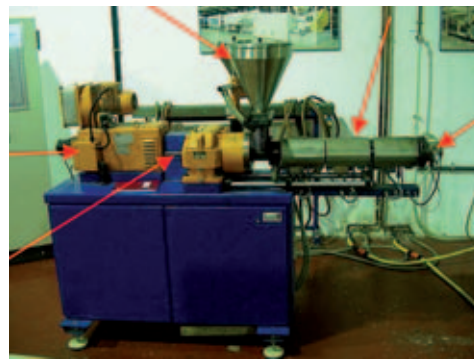
Condicions	Temperatura de l'assaig	Temps de referència (segons)	Càrrega (g)
1	190	600	2.160
2	150	600	2.160
3	190	600	325
4	190	600	2160
5	190	150	5.000
6	190	600	10.000
7	190	600	21.600
8	200	600	5.000
9	200	600	10.000
10	230	600	325
11	230	600	1.200
12	230	600	2.160
13	230	600	3.800
14	230	120	5.000
15	265	600	12.500
16	275	600	325
17	280	600	21.600



**Figura 5.** Esquema del conjunt extrusora-refrigeració-gransadora



a) b)  
**Figura 6.** a) Detall de la gransadora, b) Bany de refrigeració



**Figura 7.** Parts d'una extrusora convencional

## 6. Qüestions

- a) Representeu l'evolució de l'índex de fluïdesa del material en relació amb el nombre de cicles de reciclatge. Com és quantitativament la variació de l'índex de fluïdesa? A què creieu que es pot deure?
- b) Un investigador afirma que després de realitzar la mateixa experiència al seu laboratori, l'índex de fluïdesa que registra disminueix progressivament amb el nombre de vegades que recicla el seu material. Pot ser possible? En aquest cas, quina explicació hi donaríeu?
- c) A partir de les dades que heu extret de la pràctica, feu una estimació de les vegades que podeu fer servir el plàstic sense que les seves propietats es vegin degradades notablement. És possible extrapolar la pràctica al procés real de reciclatge de plàstic postconsum? En cas contrari, quins fets explicarien les diferències entre el procés real i el portat a terme al laboratori?
- d) Quantifiqueu el total de material processat, els residus, l'energia i altres que heu emprat en la realització de la pràctica. Feu un balanç de fluxos del sistema. Podeu fer servir un esquema similar al de la figura 8. Especifiqueu el sistema de referència que preneu.



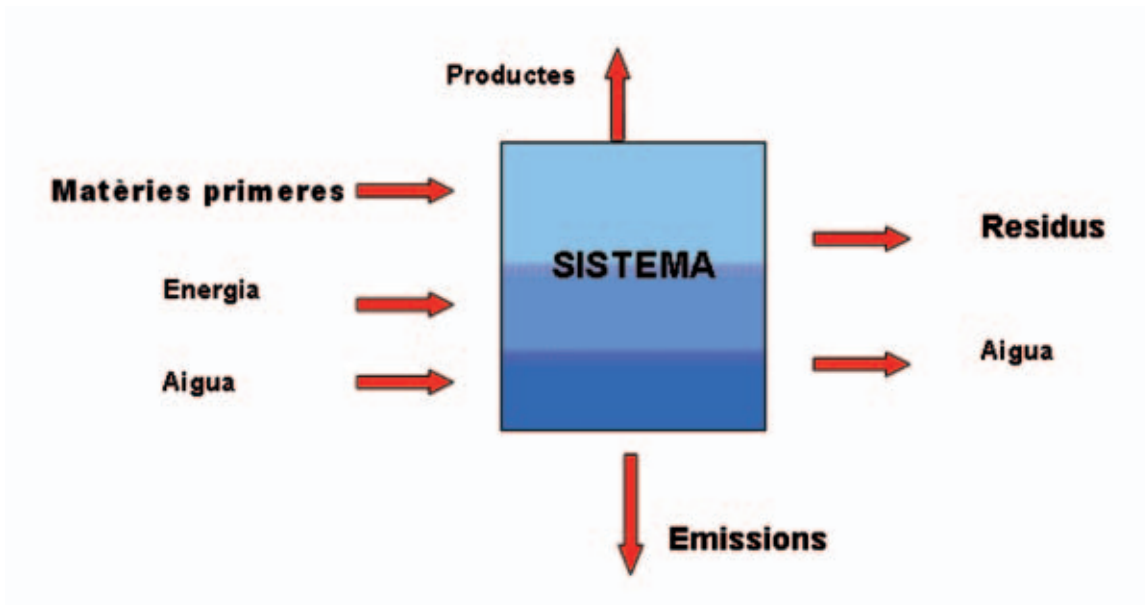


Figura 8. Balanç d'entrades i sortides d'un sistema



## Capítol 24

# Gestió dels residus de les operacions de pintat industrial

IRENE BUJ, LLUÍS COSTA I GAYETANO SIERRA

Càtedra de Processos de Fabricació

Departament d'Enginyeria Mecànica

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

Els processos d'aplicació de pintura consisteixen en el recobriment d'un substrat, ja sigui metàl·lic o plàstic, amb una pel·lícula orgànica, de manera que el material assoleix unes determinades propietats de protecció, mecàniques, òptiques, d'envelliment i d'adhesió.

La pintura més utilitzada és la líquida en base dissolvent, malgrat que també es fan servir pintures en pols o líquides en base aigua.

Les pintures líquides en base dissolvent estan formades per quatre components principals: un dissolvent orgànic, una resina, pigments i additius.

Els dissolvents s'afegeixen a la pintura per tal de dispersar la resta de constituents, així com per afavorir la fluïdesa de la pintura i facilitar-ne l'aplicació. Entre els més emprats es troben els hidrocarburs alifàtics, els hidrocarburs aromàtics, les cetones, els alcohols, els èsters i els èters glicòlics.

La resina o lligant és la base de la pintura. Serveix per unir els pigments amb els altres additius, proporciona adhesió i forma la pel·lícula plàstica final. Els més usuals són resines alquídiques, acríliques (base dissolvent o base aigua), epoxis, poliuretans, viníliques o altres resines en un dissolvent orgànic volàtil.

Els pigments són materials orgànics o inorgànics que es dispersen a la pintura amb la finalitat de donar color i opacitat al substrat, o bé per millorar-ne la resistència mecànica.

Els additius milloren les propietats físiques i químiques del recobriment, com l'assecatge, la brillantor o l'estabilització. Poden ser espessidors, biocides i fungicides, estabilitzadors, etc.

Atenent el tipus d'assecatge de les pintures, aquestes es classifiquen en:

- Pintures amb assecatge per evaporació de dissolvents. Un cop evaporats aquests, el lligant torna al seu estat original. Exemple: pintures a base de resines viníliques.
- Pintures amb assecatge per reacció amb l'oxigen atmosfèric. Els lligants presenten àcids grassos en la seva estructura, els quals absorbeixen oxigen de l'aire un cop s'evapora el dissolvent. Exemple: pintures a base d'olis vegetals.
- Pintures amb assecatge per acció de la temperatura. Cal aportar calor externa a un forn, a temperatures entre 100 i 200 °C, i temps entre 5 i 30 minuts. Exemple: pintures a base de resines acríliques termoestables.
- Pintures amb assecatge per reacció química entre diversos components. S'hi afegeix un catalitzador o enduridor, que permet que es produeixi la reacció química. Exemple: resines epoxi amb enduridors de tipus amides o amines.

En la taula 1 es recullen els principals residus líquids i sòlids generats pels processos d'aplicació de pintura:

**Taula 1.** Residus de la fabricació, formulació, distribució i utilització (FFDU), i del decapatge o l'eliminació de pintura i vernís (0801)

Classificació del residu	Codi catàleg europeu de residus	Descripció
Residus especials	080111	Residus de pintura i vernís que contenen dissolvents orgànics o altres substàncies perilloses.
	080113	Llots de pintura i vernís que contenen dissolvents orgànics o altres substàncies perilloses.
	080115	Llots aquosos que contenen pintura o vernís amb dissolvents orgànics o altres substàncies perilloses.
	080117	Residus del decapatge o eliminació de pintura i vernís que contenen dissolvents orgànics o altres substàncies perilloses.
	080119	Suspensions aquoses que contenen pintura o vernís amb dissolvents orgànics o altres substàncies perilloses.
	080121	Residus de decapants o desvernissadors.
Residus no especials	080112	Residus de pintura i vernís diferents dels especificats en el codi 080111.
	080114	Llots de pintura i vernís diferents dels especificats en el codi 080113.
	080116	Llots aquosos que contenen pintura o vernís diferents dels especificats en el codi 080115.
	080118	Residus del decapatge o l'eliminació de pintura i vernís diferents dels especificats en el codi 080117.
	080120	Suspensions aquoses que contenen pintura o vernís diferents de les especificades en el codi 080119.
	080199	Residus no especificats en cap altra categoria.

A més, els processos de pintat industrial generen altres residus líquids com els dissolvents usats procedents de tasques de neteja, l'aigua de neteja dels equips si es fan servir pintures a l'aigua, l'aigua dels rentatges previs de les peces i els buidatges dels circuits d'aigua de les cabines de separació per via humida.

Els dissolvents usats es consideren residus especials i habitualment són gestionats per empreses especialitzades. Les aigües de neteja dels equips i de buidatge dels circuits d'aigua de les cabines de separació per via humida (cortines d'aigua) també són residus especials, ja que contenen partícules (laques, pigments) i petites quantitats de dissolvent i agents coagulants. Aquestes aigües es poden gestionar com a residu o bé es poden tractar en instal·lacions pròpies de depuració, on cal aconseguir que l'aigua tingui una qualitat suficient per ser abocada sense que superi els paràmetres exigits per la normativa. Les aigües de neteja de peces i de buidatges dels circuits d'aigua de les cabines també s'han de gestionar adientment, segons la seva composició.

Pel que fa als residus gasosos, els principals són els compostos orgànics volàtils (COV) procedents de l'evaporació dels dissolvents i els gasos de combustió.

Des del punt de vista ambiental cal prevenir les emissions de COV, ja que presenten efectes indirectes, com la formació d'ozó, i alguns són perjudicials per a la salut humana. Per al tractament de les emissions de COV s'utilitzen habitualment filtres de carbó actiu, que generen a la vegada un nou residu especial.

D'altra banda, els forns de gas emprats habitualment per a l'assecatge de peces emeten gasos de combustió com  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$  i NOx.

Un altre problema ambiental relacionat amb els processos de pintat és la gestió dels envasos, tant si són buits com si contenen pintura defectuosa o caducada. Una solució per a aquesta pintura consisteix a utilitzar-la per a la preparació de les pintures de primera capa, que presenten menys exigències de qualitat.

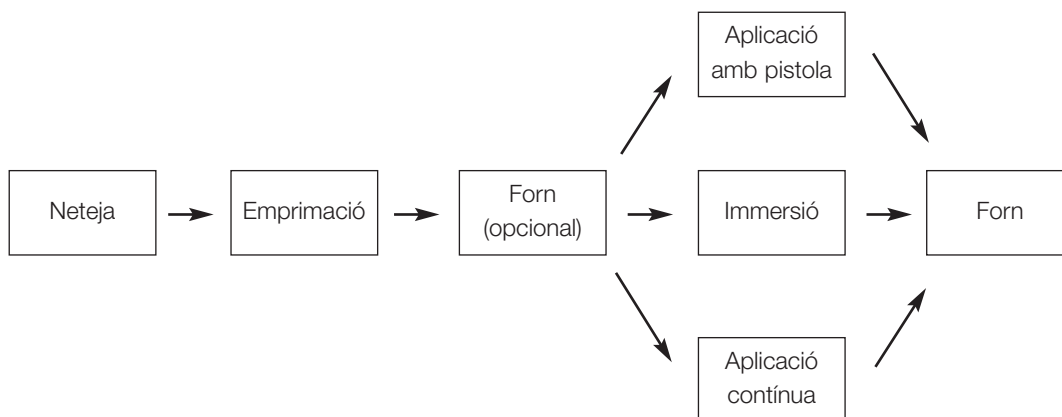
La producció neta es basa en tres tipus d'accions: prevenció, minimització i valorització, tal com s'exposa en la pràctica 1 (Gestió dels residus en tallers de deformació i mecanització de metalls).

## 2. Objectius de la pràctica

- Conèixer els diferents processos de pintat de superfícies metàl·liques i plàstiques, així com les diferències entre pintures segons la seva composició.
- Conèixer els principals residus generats en el procés.
- Determinar les millors tècniques de gestió d'aquests residus.

## 3. Procediment

En la figura 1 s'observa un diagrama de blocs amb les diferents fases d'un procés general de pintat industrial:



**Figura 1.** Diagrama de blocs d'un procés de pintat industrial

### 3.1 Neteja i preparació de la superfície

Es tracta d'una etapa molt important per tal d'assegurar l'adherència del recobriment. Consisteix a eliminar qualsevol tipus de brutícia, com oli o òxids, de la superfície del substrat.

La preparació de la superfície serà diferent depenent de la qualitat de recobriment que es vulgui obtenir. Es poden fer operacions mecàniques, com el granallatge, la raspallada o la llimada, i operacions químiques, com el desgreixatge, la fosfatació o la passivació.

### 3.2 Aplicació de la pintura

Hi ha diverses tècniques d'aplicació de la pintura. Les més utilitzades són la polvorització, l'aplicació de pintura en pols, l'electroforesi, l'autoforesi, la immersió, l'aplicació contínua i l'aplicació per extensió.

La polvorització és l'aplicació de pintura sobre el material per atomització d'aquesta, ja sigui mitjançant pressió, alimentació d'aire o una combinació de tots dos sistemes. Habitualment la pintura s'atomitza mitjançant pistoles.

L'aplicació de pintura en pols es pot fer per polvorització electrostàtica i per llit fluiditzat. En el primer cas, la pols s'atomitza mitjançant aire comprimit amb pistola i es carrega elèctricament. La peça, en canvi, es connecta a terra i així atrau les partícules de pintura, de manera que aquestes s'adhereixen a la superfície metàl·lica.

En el cas del llit fluiditzat, un corrent d'aire manté les partícules de pintura en suspensió. Les peces s'escalfen prèviament, i en posar-se en contacte amb la pintura, aquesta es fon i s'adhereix a la superfície.

L'electroforesi consisteix en la dispersió de la pintura ionitzada dins d'un bany aquós, per tal de dipositar-la per aplicació de corrent continu sobre la superfície de la peça, que ha de ser conductora. El procés s'anomena anaforesi si la superfície que es pinta és l'ànode i cataforesi si és el càtode.

En el recobriment per immersió, se submergeixen les peces en un bany de pintura líquid. L'excés de material es deixa escórrer sobre el tanc que conté el bany i posteriorment s'assequen les peces. L'aplicació contínua es pot fer mitjançant diferents sistemes: flow coating (adollament o dutxa), curtain coating (cortina o cascada) i roll coating (corró). En el primer cas, es fa avançar la peça per una

cinta transportadora mentre que diversos corrents de pintura separats (entre 1 i 80) la recobreixen. En el segon cas, es fa fluir la pintura des d'una tremuja sobre les peces. En el tercer, s'aplica un recobriment a una superfície llisa, com ara una xapa metàl·lica, fent-la passar a través d'uns corrns.

L'aplicació manual per extensió es basa en la utilització de brotxes, corrns o espàtules per estendre la pintura sobre el substrat. És una tècnica de difícil automatització, que poques vegades s'utilitza en processos industrials.

### 3.3 Assecatge o curació de la pintura

Un cop s'ha aplicat la pintura, cal sotmetre-la a un procés d'assecatge per evaporació de dissolvents o bé a una curació per transformació química, segons el tipus de pintura emprat.

Aquestes operacions es poden dur a terme de diferents maneres:

- A temperatura ambient. S'aplica a peces molt grans, amb pintura en base dissolvent, que no caben als forns de què es disposa.
- Al forn. Es realitza a temperatures entre els 100 i els 200 °C, depenent del tipus de pintura emprat.
- Assecatge forçat per aire. Permet accelerar el procés. Es fa servir especialment en pintures de base aquosa, malgrat que també serveix per a les de base dissolvent. La temperatura de l'aire oscil·la entre els 50 i els 100 °C.
- Curació per radiació. S'utilitza per a pintures que contenen fotopolímers. La curació pot ser per radiació infraroja, radiació ultraviolada o per feix d'electrons.

El temps d'assecatge o curació afecta de manera important la qualitat del recobriment. Si és inferior al necessari, pot ser que la peça presenti baixa duresa, possibilitat de ser atacada per dissolvents, baixa adhesió, pell de taronja o baixa resistència química i a la corrosió.

En canvi, si el temps d'assecatge o curació és superior al necessari, es pot reduir la durada del recobriment, i aquest es pot cremar, descolorir, fragilitzar i fins i tot es pot malmetre el substrat.

En la figura 2 s'observa una instal·lació de pintat industrial:



**Figura 2.** Instal·lació de pintat industrial

## 4. Metodologia

En aquest apartat s'estudia l'exemple d'una empresa on es pinten 600.000 components de portes de vehicles cada any.

Les principals fases del procés de pintat en aquest cas són les següents:

1. Penjada de peces en cadena.
2. Desgreixatge i fosfatació automàtica per aspersió.
3. Esbandida amb aigua de xarxa.
4. Esbandida amb aigua desionitzada.
5. Assecatge al forn.
6. Emprimació amb pintura en base dissolvent, aplicada amb pistola i recollida mitjançant cortines d'aigua (fase opcional).
7. Aplicació de pintura en pols per aspersió en cabina de pintura, amb cicló per reutilitzar-la.
8. Assecatge al forn.
9. Despenjada de les peces.
10. Inspecció de qualitat i embalatge.

Les principals matèries primeres emprades al llarg d'un any per a les operacions de pintat de l'empresa es detallen en la taula 2:

**Taula 2.** Quantitats de matèries primeres emprades per l'empresa exemple durant un any

Producte	Quantitat	Utilitat
Àcid clorhídric al 32 %	780 kg	Neteja de les resines emprades per a la desionització de l'aigua.
Sosa càustica al 50 %	432 kg	Neteja de les resines emprades per a la desionització de l'aigua.
Pintura en pols de diferents colors	5.056 kg	Pintat de superfícies metàl·liques.
Pintura per emprimació en base dissolvent	1.979 kg	Pintat de capa d'emprimació (opcional)

I els principals residus generats per la mateixa indústria són a la taula 3:

**Taula 3.** Quantitats de residus generats per l'empresa exemple durant un any

Residu	Quantitat
Aigües de la fosfatació	22.720 kg
Llots cabina de pintura	6.840 kg
Bidons de pintura buits	1.000 kg

La problemàtica ambiental de les instal·lacions de pintat es pot resumir en quatre punts:

- Tractaments previs. Les operacions de pretractament mecànic donen lloc a emissions de partícules, abrasius i moles usades. Les operacions de desgreixatge generen aigües residuals de rentatge, banys de desgreixatge esgotats, oli, greix, ferritja i brutícia. En les operacions de decapatge es generen àcids esgotats amb metalls i aigües residuals del rentatge.



- Consum excessiu de pintura. És important conèixer quina part de la pintura que s'aplica es diposita realment sobre el substrat.
- Eficiència de la transferència = Total de sòlids adherits a la peça / Total de sòlids utilitzats (%)
- Residus generats per la polvorització sobrant o part de la pintura que es diposita al voltant de la peça: parets de la cabina de pintura, filtres, conductes, bastidors, etc.
- Emissions a l'atmosfera. Principalment s'emeten compostos orgànics volàtils (COV) a partir dels dissolvents que s'evaporen en les fases d'aplicació de la pintura, assecatge/curació i neteja.

A continuació es detallen una sèrie de mesures que es poden prendre per tal de millorar les problemàtiques ambientals abans esmentades.

#### 4.1 Tractaments previs

Mesures de producció neta: minimització

- Control de l'ús de dissolvents.
- Utilització de màquines rentadores de pistoles.
- Filtratge de les aigües de fosfatació per tal d'eliminar-ne partícules i impureses no dissoltes, i així allargar la vida del bany. Es recomana fer servir filtres reutilitzables (de cartutx, teles filtrants, etc.).
- Implantació d'un separador d'oli o dipòsit específic que permet reduir al màxim les turbulències i que surin els olis. L'oli acumulat s'extreu de manera manual o automàtica.

Mesures de producció neta: reutilització

- Separació de dissolvents per reutilitzar-los.

#### 4.2 Consum excessiu de pintura

Mesures de producció neta: prevenció

- Elecció del tipus de pintura.
- Elecció de la tècnica d'aplicació més adequada.

Mesures de producció neta: minimització

- Control estricte de l'inventari de pintura.
- Equip que permeti la mescla exacta de la pintura requerida.
- Adequació de la viscositat i la temperatura de treball de la pintura a les condicions de la peça que s'ha de pintar.
- Manteniment d'una distància constant entre la peça i la pistola per tal d'obtenir un acabat uniforme.
- Velocitat constant de la pistola.
- Reducció de la pressió de l'aire d'atomització o de la pressió del fluid.
- Disminució de l'espai entre peces en penjar-les als bastidors.
- Utilització de bombes per al transvasament de pintura.

- Estudi del disseny de la peça per tal d'evitar racons on es pugui acumular la pintura.
- Operació de pintat en què, en arribar als extrems de la peça, es deixi d'aplicar pintura.
- Moviment de la pistola de manera paral·lela i perpendicular a la superfície que s'ha de pintar, per tal d'obtenir un acabat uniforme.
- Evitar la neteja inadequada de la pistola, per tal de no malbaratar la pintura.
- Millora de l'estanquitat de les cabines de pintura.

#### 4.3 Residus generats per la polvorització sobrant

Mesures de producció neta: prevenció

- ús de cabines de pintat, preferentment amb recirculació.

Mesures de producció neta: minimització

- Disminució de les turbulències d'aire a la cabina de pintat. Un cabal d'aire uniforme i laminar millora l'eficàcia de la transferència, i així es redueix la polvorització sobrant.
- Reducció de la velocitat de l'aire a la cabina de pintat. Això està especialment indicat en operacions de pintat electrostàtic, per tal de permetre l'efecte envoltant del recobriment sobre els objectes.
- Disminució dels residus de la cabina de pintat. Les cabines de cortina fan servir aigua per recollir els sòlids. Això dóna lloc a sòlids que necessiten coagulants. Les cabines de filtre sec fan servir paper o fibra de vidre per recollir la polvorització. Es recomana la utilització de filtres secs reutilitzables.
- Recuperació directa de la polvorització sobrant mitjançant ultrafiltració, deshidratació o bé el sistema Coolac.

#### 4.4 Emissions a l'atmosfera

Mesures de producció neta: prevenció

ús de pintures alternatives per reduir les emissions de compostos orgànics volàtils (COV):

- Utilització de pintures en base aigua en comptes de pintures en base dissolvent.

Avantatges: la polvorització sobrant es pot reutilitzar, l'equip es pot netejar amb aigua.

Inconvenients: és difícil d'aplicar amb temps humit o fred, el temps d'assecatge és més llarg, la pintura presenta menys brillantor i menys resistència a la corrosió.

- Utilització de pintures amb un contingut elevat en sòlids.

Avantatges: augment de l'eficàcia de transferència, cosa que implica la reducció dels residus generats.

Inconvenients: la preparació de la superfície del substrat és crítica, l'assecatge és més lent.

- Utilització de recobriments en pols.

Avantatges: recobriment amb una resistència elevada a l'impacte i a la corrosió.

Inconvenients: el canvi de color necessita molt temps, els recobriments poden donar lloc a barreges explosives.

- ps de pintures de curació per radiació.

Avantatges: no contenen dissolvents, la curació és ràpida.

Inconvenients: els sistemes UV tenen dificultat per curar els recobriments amb pigments i els que presenten determinades formes tridimensionals.

Mesures de producció neta: minimització

- ps de mètodes de neteja que minimitzin l'ús de dissolvents.
- Utilització d'una rentadora de pistoles per a la neteja dels equips.

Mesures de producció neta: reutilització interna

- Si es fan servir pintures en base aigua, la polvorització sobrant es pot recuperar i reutilitzar.

## 5. Qüestions

Algunes de les fases del procés productiu de l'empresa anteriorment esmentada són les següents:

- Neteja per desgreixatge i fosfatació.
- Aplicació d'emprimació en base dissolvent mitjançant pistola en cabina de pintura amb cortina d'aigua.
- Aplicació de pintura en pols en cabina de pintura per aspersió.

a) Enumereu els principals residus generats en cada fase.

b) Feu una llista de les diferents mesures de producció neta que es poden dur a terme a l'empresa (prevenció, minimització i reutilització interna de residus).

## 5. Bibliografia

[1] Decisió 2001/118/CE de la Comissió, de 16 de gener, que estableix la llista de residus.

[2] Decisió 2001/573/CE de la Comissió, de 23 de juliol, en què es modifica la classificació d'alguns residus.

[3] Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la cual se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

[4] ELIAS, X. (2000). Reciclaje de residuos industriales. Aplicación a la fabricación de materiales para la construcción. Editorial Díaz de Santos.

[5] Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Pintado industrial (2001). Ihobe, SA.



## Capítol 25

# Gestió dels residus del procés d'obtenció de peces per fosa amb motlle de sorra

IRENE BUJ, LLUÍS COSTA I CAYETANO SIERRA

Càtedra de Processos de Fabricació

Departament d'Enginyeria Mecànica

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

Els processos d'obtenció de peces per fosa es classifiquen en dues categories segons el tipus de motlle emprat: fosa amb motlle permanent i fosa amb motlle no permanent. En el primer cas, els motlles es poden utilitzar diverses vegades i es fabriquen preferentment de metall. En el segon, el motlle es destrueix per extreure'n la peça. Els més utilitzats són els de sorra, tot i que també n'hi ha de guix o de ceràmica.

Els motlles de sorra permeten fabricar peces de diferents mides i de gran complexitat, amb una flexibilitat i una inversió més baixes que amb motlles permanents. A més, permeten fondre metalls i aliatges amb una temperatura de fusió elevada, com els de níquel o titani i l'acer. En contrapartida, el cost de fabricació de cada peça és més gran que per als motlles permanents, ja que cal preparar un motlle per peça o conjunt de peces.

El procés d'obtenció de peces per fosa amb sorra consisteix a abocar un material fos dins d'un motlle, deixar-lo solidificar i posteriorment trencar el motlle per separar-ne la peça. Un cop desfet el motlle, la major part de la sorra es reutilitza a la mateixa foneria, però cal extreure'n una petita fracció que, o bé conté un grau elevat d'impureses, o bé presenta un gra massa fi. Habitualment, aquesta fracció es diposita en un abocador, però, a més de l'elevat cost d'admissió del residu, hi ha limitacions legals per admetre algunes terres amb elevat contingut de contaminants tòxics.

La producció neta es basa en tres tipus d'accions: prevenció, minimització i valorització, tal com s'exposa en la pràctica 1 (Gestió dels residus de tallers de deformació i mecanització de metalls).

Els principals residus sòlids generats en els processos d'obtenció de peces per emmotllament amb motlle de sorra figuren en la taula 1:

**Taula 1.** Principals residus sòlids generats en els processos d'obtenció de peces per emmotllament amb motlle de sorra

<b>Classificació</b>	<b>Codi catàleg europeu de residus</b>	<b>Descripció</b>
Especial	100905 / 101005	Noios i motlles de sorra sense colada que contenen substàncies perilloses.
No especial	100906 / 101006	Noios i motlles de sorra sense colada que no contenen substàncies perilloses.
Especial	100907 / 101007	Noios i motlle de sorra amb colada que contenen substàncies perilloses.
No especial	100908 / 101008	Noios i motlles de sorra amb colada que no contenen substàncies perilloses.
Especial	100909 / 101009	Partícules procedents d'efluents gasosos que contenen substàncies perilloses.
No especial	100910 / 101010	Partícules procedents d'efluents gasosos que no contenen substàncies perilloses.
No especial		Restes metàl·liques.
No especial	100903 / 101003	Escòries de forn.

Nota: Els codis que comencen per 1009 corresponen a residus de la fosa de peces fèrries, i els que comencen per 1010, a la fosa de peces no fèrries.

La sostenibilitat es pot definir de moltes maneres, segons quin sigui l'aspecte del qual es vol garantir en el futur el manteniment o la permanència (medi ambient, reserva energètica, salut, etc.).

La definició majoritàriament acceptada és la que va establir el 1987 la Comissió UN Brundtland, i que respon a una actuació responsable a cada moment que permeti «cobrir les necessitats del moment present sense comprometre la possibilitat que les generacions futures puguin satisfer les seves pròpies necessitats».

Segons la manera de gestió de la societat actual, una altra definició podria ser que «qualsevol nivell o tipus d'ús o actuació d'avui no ha de minorar el nivell o el tipus d'ús o actuació futura».

Idealment, es diu que un producte és sostenible quan la seva presència al llarg de tot el seu cicle de vida és respectuosa amb el medi ambient i amb les persones amb què comparteix espai.

Per tal que un producte sostenible tendeixi a ser ideal, cal tenir en compte els requeriments de disseny següents:

- Que sigui eficient en el compliment de la seva funció.
- Que sigui totalment reciclable.
- Que consumeixi la mínima energia i que aquesta, a més, sigui renovable.
- Que sigui segur i que no sigui tòxic per a les persones ni per al medi ambient.

El producte sostenible exigeix una operativa innovadora constant, mentre que el que només ha de compensar la seva renovació, només ha de créixer per fer front a la inflació.

Tot el que s'ha comentat fins aquí per al producte seria d'aplicació als processos d'obtenció d'aquest producte.

Els requisits per a la sostenibilitat d'una foneria són els següents:

- Reduir el material exigit pels béns i serveis que gestiona.
- Reduir l'energia exigida pels béns i serveis que gestiona.
- Reduir la contaminació tòxica.
- Potenciar el reciclatge del material.
- Augmentar la vida útil dels productes.
- Incrementar l'eficiència del manteniment dels béns i serveis.
- Incrementar la professionalitat dels béns i serveis.
- Maximitzar la sostenibilitat mitjançant l'ús de recursos renovables.

La sostenibilitat d'una foneria genera, a més, una extensió colateral que s'esquematitza a continuació:

- Empresa mare (foneria)
- Proveïdors
- Acereries (lingot o ferroaliatges)
- Concessionaris d'automoció
- Tallers de reparació
- Companyies d'assegurances
- Ferrallers
- Fragmentadors i briquetadors
- Trànsit
- Clients de peces foses
- Recursos energètics: carbó, gas, electricitat, etc.
- Centres de tractament de residus

## **2. Objectius**

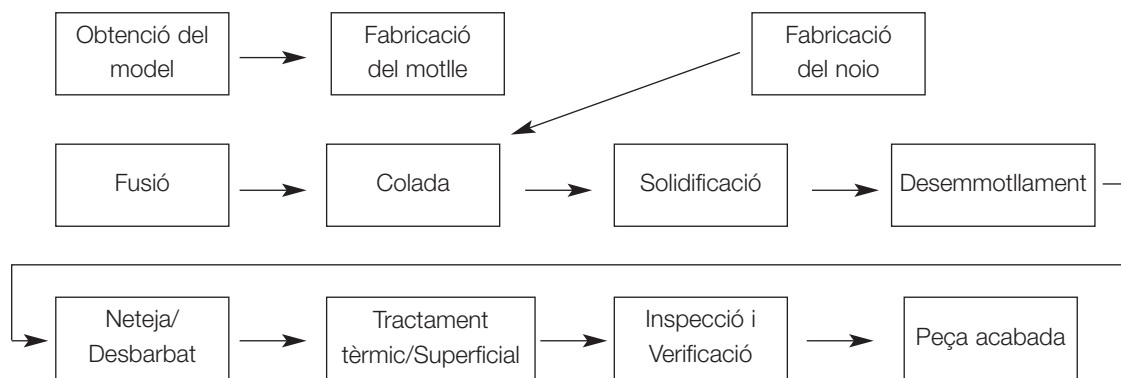
Els principals objectius d'aquesta pràctica són els següents:

- Conèixer les diferents fases del procés d'obtenció de peces per fosa amb motlle de sorra.

- Conèixer els principals residus generats per una foneria, així com les possibilitats de prevenció, minimització o valorització d'aquests residus.
- Determinar l'índex de granulometria d'una sorra per emmotllament.

### 3. Procediment

La figura 1 correspon a un diagrama de blocs amb les diferents fases del procés de fosa amb motlle de sorra:



**Figura 1.** Diagrama de blocs del procés d'obtenció de peces per fosa en motlle de sorra

A continuació es descriuen les diferents fases del procés:

#### 3.1 Obtenció del model

Un model és una reproducció de la peça que s'ha d'obtenir a escala natural, tenint en compte els excedents de material per a la mecanització posterior, així com per compensar la contracció del metall en refredar-se.

Els models exteriors defineixen la forma externa de la peça. Poden ser permanents o no permanents. Els primers s'extreuen del motlle abans de la fase de colada i es fabriquen de fusta, metall o plàstic. Els segons es fonen, líquien o cremen abans o durant la fase de colada. Poden ser de cera, mercuri o poliestirè expandit, entre altres.

Els models interns reproduïxen les superfícies internes de les peces o bé zones de difícil execució directa. S'insereixen al motlle abans de la colada. Es fabriquen amb sorra barrejada amb un compost orgànic, com oli de llinosa o resines termoestables.

#### 3.2 Fabricació del motlle

El motlle s'obté compactant terres d'emmotllament al voltant d'un model. Les terres d'emmotllament es componen d'un material resistent i un material aglomerant, el qual els confereix prou cohesió per a l'execució del motlle.



El material resistent més utilitzat és la sorra silícia, ja que compleix molt bé la seva funció i té un preu assequible. Altres sorres, com les d'oliví, cromita o zirconi només tenen aplicació quan es necessiten temperatures molt elevades o dilatacions menors. Aquestes representen menys del 5 % de consum de sorra.

Segons el tipus d'aglomeració, es distingeixen dos tipus d'aglomerants:

- Aglomerants mecànics. S'aglomeren amb l'ajut de sistemes mecànics. Són les argiles (caolinita, glauconita, bentonita, etc.) i els hidrats de carboni (midó). Només es fan servir per a la fabricació de motlles.
- Aglomerants químics. Endureixen o curen les sorres mitjançant reaccions químiques en fred o en calent. Poden ser orgànics (resines fenòliques o furàniques) o inorgànics (silicat de sodi o ciment). Es fan servir tant per a motlles com per a noies.

A més de la sorra i l'aglomerant, també s'afegeixen a les terres additius que en milloren les propietats. Aquests es classifiquen en dos grups:

1. Generadors de carboni brillant. Produeixen carboni mitjançant descomposició tèrmica dels seus materials volàtils, afavorint l'acabat superficial de les peces. Alguns d'aquests materials són pols d'hulla, betums, resines, olis i barreges de les anteriors.
2. No generadors de carboni brillant. S'hi afegeixen per tal de prevenir la falta de consistència de la sorra (midó) i millorar la desintegració del motlle un cop solidificada la peça (farines).

Per al revestiment dels motlles es fan servir pintures, plumbagines, negre de fosa o altres materials que s'apliquen sobre les cares de les caixes que estan en contacte amb el metall o bé sobre els noies, per evitar una reacció química entre el motlle i el metall.

El motlle ha de presentar propietats aparentment oposades: ha de ser prou rígid per resistir l'empenya del metall fos i, a la vegada, prou fràgil per fragmentar-se un cop solidificada la peça.

Els principals paràmetres que cal comprovar de les terres d'emmotllament són els següents:

- El tant per cent d'humitat.
- El contingut de sorra i aglomerant.
- La granulometria. Com més fina sigui la sorra millor serà el grau d'acabat superficial de la peça.
- La forma dels grans de sorra. Els grans angulosos s'adhereixen millor amb l'argila que els rodons, mentre que les terres preparades amb gra rodó presenten més plasticitat.
- La permeabilitat. Permetrà una millor sortida de gasos, per tal de minimitzar la porositat de les peces acabades.
- La cohesió. Habitualment, es determina la resistència a la compressió i a la flexió, per garantir l'estabilitat del motlle en el moment de la colada.
- La refractarietat. Les terres han de romandre inalterades a temperatures elevades, corresponents a les de fusió dels diferents materials i aliatges.

### 3.3 Fusió del material

Per a l'obtenció de peces de ferro colat, els materials base que cal emprar són lingots de primera fusió, ferralla de fosa, ferralla d'acer i ferroaliatges, que permeten ajustar la composició del material.

En la figura 2 s'observa la zona de recepció de material d'una foneria, amb briquetes de xapa de carrosseries d'automòbil i peces de fosa defectuoses:



**Figura 2.** Recepció de material en una foneria.



**Figura 3.** Operació d'extracció del metall fos del forn i transport cap a la zona de colada.

Els materials abans esmentats es porten a un forn, on s'escalfen a temperatures de fins a 1.500 °C, amb la finalitat que es fonguin. A més, s'afegeix silici per escorificar i ajustar la composició de l'aliatge.

Els forns de fusió poden ser elèctrics, de combustible o convertidors. En els primers, l'energia aportada és elèctrica. Es coneixen diferents sistemes, com ara d'arc, de resistència i d'inducció. Entre els forns de combustible més utilitzats es troben el de gresol i el cubilot. En els de gresol, el metall i el combustible estan separats, mentre que en el cubilot, el metall i el combustible (coc) estan en contacte. Mitjançant els convertidors s'aconsegueix reduir el contingut de carboni de la fosa, insuflant aire a pressió.

Un cop fos el material, es transporta cap a la zona de colada mitjançant culleres o dispositius dosificadors, com s'observa en la figura 3:

Per a la producció de fosa nodular, en aquesta fase s'afegeix un aliatge de magnesi: Cu-Mg, Ni-Mg o bé Si-Mg-Cs.

### 3.4 Colada

Un cop col·locats els nois dins del motlle, aquest es tanca i s'hi aboca el metall. A la zona de colada cal preveure sistemes d'aspiració de fums i partícules sòlides.

En la figura 4 s'observa la fase de colada del metall fos:



**Figura 4.** Fase de colada

### 3.5 Obtenció dels noios

Els noios estan formats per sorra silícia barrejada amb un aglomerant orgànic, com l'oli de llinosa o una resina termoestable. Generalment es recobreixen amb pintura per millorar-ne l'acabat superficial.

Els noios s'obtenen per emmotllament en caixes de mascles, que solen ser de fusta o de metall.

### 3.6 Solidificació i desemmotllament

Un cop efectuada la colada, la peça es deixa refredar fins que solidifiqui. Després, encara cal deixar-la refredar perquè no es malmeti a causa de la baixa resistència mecànica que presenta.

El desemmotllament és l'extracció de la peça de la caixa, mitjançant la destrucció del motlle i els noios. En primer lloc es retiren els contrapesos, s'afluixen els cargols, s'extreuen els passadors i s'obre la caixa. Posteriorment, cal separar la peça de les terres. Als tallers grans, es fan servir els sac-sejadors, que són engrael·lats horitzontals, de vibració mecànica o pneumàtica, sobre els quals es dipositen les caixes. Les terres cauen a sota de la graella i són recollides per una cinta mecànica que les porta a la secció de preparació de les terres. En aquesta fase es desprèn una gran quantitat de pols de silici, que s'aspira. Tant les terres usades com la pols es porten a dipòsits específics per emmagatzemar-les.

En la figura 5 s'observen terres usades d'emmotllament i de noios, després de la separació de les peces:



**Figura 5.** Terres d'emmotllament i de noios després del desemmotllament de les peces

### 3.7 Separació de canals d'entrada / neteja / desbarbatge

Quan les peces s'han separat del motlle de sorra, cal eliminar-ne els canals d'entrada i les massalotes, mitjançant cisell i martell manuals, cisell i martell pneumàtics o elèctrics, serres, premses, moles de tall, etc.

També fa falta una neteja posterior de les peces, per extreure les restes de sorra que hagin quedat adherides a la superfície i l'òxid que s'hi hagi pogut formar. Aquesta operació es pot realitzar mitjançant raspalls de pues metàl·liques, tambors giratoris on les peces es barregen amb estrelles de fosa dura, o bé mitjançant raig de granalla d'acer. Durant aquesta operació s'aspira la pols generada, que es compon de fins i de partícules metàl·liques. La pols és retinguda mitjançant filtres de màniga.

Posteriorment, es realitza una operació de desbarbatge, amb la finalitat d'eliminar les imperfeccions que pugui presentar la peça, per exemple a les zones on s'hagin tallat les massalotes i els canals d'entrada. Es fan servir cisells, moles o encuny amb premsa. En aquesta fase també cal un sistema d'aspiració amb filtres que retinguin les partícules metàl·liques i restes de material abrasiu.

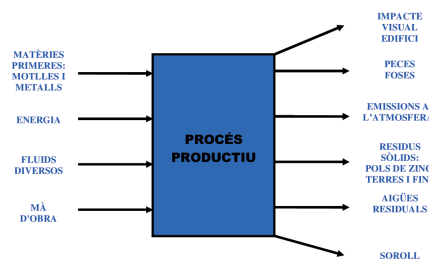
### 3.8 Tractament tèrmic / superficial

El tractament tèrmic no és habitual per a les peces de fosa, ja que aquestes no se sotmeten a deformació plàstica.

En cas que es vulgui protegir les peces contra la corrosió, s'hi pot aplicar un tractament superficial, com ara anodització, recobriments electrolítics, pintura o altres.

### 3.9 Entrades i sortides de matèria i energia del procés

En l'esquema de la figura 6 s'esquematitzen les diferents entrades i sortides de matèria i energia del procés:



**Figura 6.** Entrades i sortides del procés productiu de fosa amb motlle de sorra i vectors ambientals involucrats

#### *Entrades al procés*

Entrades de materials per a la fabricació de motlles

- a) Fabricació de caixes exteriors.
  - Terres noves per afegir a les usades.
  - Argila (bentonita) per aglomerar la terra de les caixes.
  - Grafit en pols.
  - Aigua.
- b) Fabricació de noios.
  - Terres.
  - Oli de llinosa o resina per aglomerar les terres dels noios.
  - Catalitzador: dimetiletilamina, per endurir la resina.
  - Pintures, que proporcionen un recobriments.
  - Magnetita, per evitar reaccions redox amb el metall.
- c) Fabricació de closques.
  - Terres.
  - Adhesius i cargols per al muntatge de les closques.
  - Resina per aglomerar les terres de la closca.
- d) Fabricació de caixes per emmotllament al CO<sub>2</sub>.
  - Silicat sòdic.
  - Diòxid de carboni.

- e) Fabricació de motlles pel sistema Mercast.
  - Mercuri per a la fabricació dels models.
- f) Fabricació de motlles per emmotllament a la cera perduda.
  - Cera per a la fabricació dels models.
- g) Fabricació de motlles amb model de poliestirè.
  - Poliestirè expandit per a la fabricació dels models.

#### *Entrades de metalls i aliatges*

- Fosa de Fe, alumini, bronze i llautons.
- Ferralla d'acer.
- Peces defectuoses de fosa.
- Ferroaliatges.

#### *Entrades d'energia per la fusió dels aliatges*

Segons el tipus de forn utilitzat poden ser:

- Carbó de coc.
- Gasos combustibles.
- Energia elèctrica.

#### *Entrades de fluids diversos*

- Aigua. El 25 % s'utilitza per a consum sanitari i la resta per refrigerar els forns de fusió i per refredar i humitejar la sorra d'emmotllament.
- Aire.

#### *Sortides del procés*

Peces foses

- Peces de Fe, Al, bronze i/o llautó.

#### *Emissió de fums*

Procedeixen de la combustió als forns de combustible o de la combustió de l'aglomerant orgànic (si en porta) i del negre de fosa a la fase de colada.

- O<sub>2</sub>
- SO<sub>2</sub>
- Altres

#### *Emissió de partícules*

- Carbó.
- Fins: són partícules de sorra molt fines produïdes per degradació d'aquesta a causa del xoc tèrmic provocat pel metall fos. Es poden aspirar i separar mitjançant filtres secs.
- Llots: són partícules recollides pels sistemes d'aspiració per via humida.

- Pols silícia: prové del tractament dels gasos d'emissió, del tractament de les terres usades (sorra + bentonita + closques d'aglomerant orgànic + formadors de carboni brillant), del granallatge (sorra + granalla de granulometria inferior + partícules procedents de l'abrasió del metall + òxids metàl·lics).
- Pols retinguda als filtres d'aspiració dels forns fusors, amb un contingut elevat de Zn i/o Fe.

Terres no reutilitzables

- Les terres més properes al metall fos són les que més es degraden i no es poden tornar a incorporar al procés de preparació de terres per reutilitzar-les. Cal substituir-les per terres noves.

*Residus metàl·lics*

- Restes metàl·liques procedents de la separació de canals d'entrada i massalotes de les peces.
- Peces defectuoses.

*Altres residus sòlids*

- Escòries i material refractari de les parets dels forns.
- Pols d'esmerilament.
- Resta d'additius.
- Envasos de matèria primera amb restes.
- Olis gastats.
- Residus assimilables a urbans.

*Sortida d'aigua sanitària i sobrant del procés*

- 25 % aigua sanitària.
- Aigua de depuració dels filtres per via humida.
- Xemeneies d'aspiració de l'areneria.
- Torres de refrigeració.

## **4. Metodologia**

El 1979, les Nacions Unides van definir una tecnologia neta o sense residus com «un mètode de fabricar productes en què totes les matèries primeres i l'energia s'utilitzin de la manera més racional i integrada possible en tot el cicle (matèries primeres – producció – consum – productes secundaris), de manera que l'impacte sobre el medi ambient sigui mínim».

Els residus generats per una empresa no només donen lloc a problemes ambientals, sinó que també provoquen pèrdues de matèries primeres i energia en els processos productius, així com una despesa per transvasar la contaminació d'un lloc a l'altre.

De manera aproximada, el total de residus sòlids generats en una foneria està format per:

- 75 % de residus de sorra en graus diferents.
- 25 % de pols i llots procedents de filtres.
- 10 % d'escòria, revestiments refractaris de forns i altres.

Les tècniques de prevenció, minimització i valorització representen una disminució de costos, tant de tractament a la planta industrial com de transport i eliminació fora de la planta.

#### 4.1 Prevenció

Una possible tècnica de prevenció de la generació de residus és el disseny de les caixes d'emmotllament amb el mínim volum de canals d'alimentació i massalotes, de manera que es perdi una quantitat mínima de metall.

#### 4.2 Minimització

En primer lloc, una correcta gestió d'existències farà disminuir la quantitat de matèries primeres perilloses utilitzades. També donarà lloc a la compra només de les matèries primeres necessàries, per evitar que caduquin i s'hagin d'eliminar com a residus.

En segon lloc, s'aconsella la revisió dels procediments d'operació i manteniment des de l'entrada de matèries primeres fins a l'emmagatzematge del producte acabat, per tal de detectar pèrdues.

D'altra banda, a les foneries, es reincorporen al procés productiu les peces defectuoses i les restes metàl·liques de canals d'alimentació i massalotes, per fusió al forn.

Pel que fa a les terres d'emmotllament, a les foneries se separa només una petita fracció de la sorra, mentre que la resta es torna a utilitzar. Així, habitualment les foneries disposen d'un circuit tancat de sorra que es renova permanentment mitjançant addicions de sorra nova i eliminació de fins. Freqüentment s'aprofita la sorra de mascles per a la renovació, però gairebé sempre es requereix a més l'addició de sorra nova.

Les principals etapes de preparació de les terres són les següents:

- Trituració dels terrossos de sorra usada i eliminació de partícules estranyes.
- Eliminació de la pols i els fins.
- Transport, refredament i emmagatzematge.
- Mesura, pesatge, dosificació i mescla amb sorra nova.

En la figura 7 s'observa un sistema d'eliminació de fins i el seu emmagatzematge en sacs:



**Figura 7.**  
Sistema d'eliminació de fins

Els principals contaminants que contenen les terres usades són els fenols, que presenten bona solubilitat en aigua i s'incorporen a la sorra a través de les resines fenòliques. Els hidrocarburs aromàtics policíclics (HAP) es formen per processos pirolítics durant la colada a partir dels formadors de carboni brillant, i també a partir de les resines. En general, els hidrocarburs es troben a concentracions tan baixes que no cal separar-los de la resta de terres. D'altra banda, les terres que contenen cromita ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) presenten elevades concentracions de crom, el qual, malgrat que és metall tòxic, en l'estat d'oxidació III es mobilitza amb dificultat en el medi ambient.

En algunes fonderies hi ha instal·lacions de recuperació de terres, de manera que poden ser utilitzades fins i tot per substituir la sorra nova. Són instal·lacions de regeneració, on s'extreuen de la terra els sediments, les restes d'aglomerants i les sorres de gra massa fi o massa gruixut. La regeneració de la sorra pot ser mecànica/pneumàtica o tèrmica.

Habitualment, les terres aglomerades amb resines es tracten mitjançant regeneració mecànica (equips de trituració) o pneumàtica (impulsió dels grans de sorra a través d'un corrent d'aire fins que la fricció provoca que es desprengui la closca del gra de sorra). Les instal·lacions mecàniques/pneumàtiques requereixen un assecatge previ de la sorra usada per tal que hi hagi fricció de gra contra gra.

La regeneració tèrmica permet la incineració total de les closques d'aglomerant, escalfant les terres usades fins a una temperatura situada entre 700 i 950 °C. Consta d'una fase prèvia de tractament per separació de metalls i trituració mecànica, la fase tèrmica principal i una depuració posterior que pot ser mecànica o pneumàtica.

### 4.3 Valorització

Permet eliminar o reduir els costos de disposició de residus en dipòsit controlat, així com els de matèria primera, i fins i tot obtenir ingressos per la venda de determinats residus.

D'una banda, els fins procedents de l'aspiració dels forns fusors, amb un contingut elevat en zinc (fins al 70 %) procedent del recobriments galvanitzats de les xapes de carrosseria emprades com a material de partida, són tractats per empreses especialitzades en la recuperació d'aquest metall. De l'altra, també es poden tractar els fins amb un contingut elevat en ferro. La venda d'aquest residu representa un ingrés econòmic per a la fonderia.

Les escòries del forn, que són blocs porosos amb un contingut elevat en silici que se separen del ferro colat líquid al forn, també es poden tractar per a la recuperació dels metalls que contenen.



Per intercanvi entre indústries es poden valoritzar les terres d'emmotllament, ja que es poden utilitzar com a matèria primera per la indústria del ciment o els totxos, com a base per construir carreteres o com a material estructural per al compostatge de la fracció orgànica dels residus urbans. En molts casos, la foneria paga a l'altra indústria per la gestió de les terres, malgrat que el cost de gestió és inferior al de portar el residu a un abocador.

La sorra que es fa servir per a la fabricació del ciment es pot substituir per terres d'emmotllament usades. Pel que fa a la seva composició, no hi ha límit per al carboni i la matèria orgànica, ja que aquests s'incineren completament si s'afegeixen directament a la zona calenta de la cimentera. En canvi, sí que hi ha límits quant al diòxid de silici, ferro i alumini, que modificaran la composició del ciment, i també respecte al clor i metalls pesants per exigències de la legislació. Tanmateix, si la terra s'afegeix premesclada amb la resta de materials, l'hulla i les restes de resines poden alliberar compostos orgànics volàtils i productes de piròlisi.

En el procés de fabricació de totxos es fan servir materials porògens, com retalls de paper, que poden ser substituïts per terres usades. Això pot donar lloc a un increment de les emissions de compostos orgànics volàtils, que s'eliminarà si es produeix una combustió tèrmica posterior.

Les terres usades també es poden utilitzar com a material per omplir sòls o per a la construcció de carreteres. També es poden afegir a barreges asfàltiques i en aquest cas es poden emprar terres amb més contingut en contaminants. Les escòries dels forns també s'utilitzen com a material de base per a carreteres.

La fracció orgànica dels residus municipals és habitualment densa i amb un percentatge elevat de compostos orgànics molt desagradables. A més, la seva proporció C/N no és adequada per al seu tractament directe mitjançant compostatge, ja que s'afavoreixen les condicions anaeròbiques, molèsties olfactivas, lixiviats i insectes, així com la pèrdua de nutrients. Per aquest motiu, convé barrejar la fracció orgànica amb algun material com la sorra, que hi aportï les característiques complementàries d'estructura i contingut en carboni. La concentració d'hidrocarburs aromàtics policíclics (HAP) i fenols es redueix per acció dels microorganismes responsables del compostatge.

#### 4.4 Aplicació a una empresa que produeix peces de fosa nodular en motlles de sorra

Per tal de detallar la tipologia dels residus generats, s'ha pres com a exemple una empresa de producció de peces de fosa nodular en motlle de sorra amb una producció neta de 20.000 Tm/any.

#### 4.5 Residus sòlids

En la taula 2 figuren les matèries primeres utilitzades durant un any:

**Taula 2.** Quantitats de matèries primeres utilitzades per l'empresa exemple durant un any

<b>Materials d'entrada</b>	<b>Quantitat</b>
Sorra nova	4.238 Tm
Bentonita	2.591 Tm
Material refractari per a revestiment de forns	177 Tm
Ferroaliatges	1.738 Tm
Hulla	1.231 Tm
Ferralla de ferro	15.829 Tm
<b>TOTAL MATERIAL ENTRADA</b>	<b>25.804 Tm</b>

I les quantitats de residus generats per la mateixa empresa es detallen en la taula 3:

**Taula 3.** Quantitats de residus generats per l'empresa exemple durant un any

<b>Residus gestió externa</b>	<b>Quantitat</b>
Pols del forn fusor (70 % Zn)	480 Tm. Ingrés: 48 euros/Tm (2004)
Sorra per a cimentera	9.481 Tm. Despesa: 8 euros/Tm (2004)
Sorra per a abocador	1.631 Tm. Despesa: 47 euros/Tm (2004)
Cartró	23 Tm
Envasos plàstics	55 Tm
Escòries a abocador	464 Tm. Despesa: 47 euros/Tm (2004)
Escòries per a base de carreteres	782 Tm. Despesa: 8 euros/Tm (2004)
Fusta	93 Tm
<b>TOTAL RESIDU SÒLID</b>	<b>13.009 Tm de residu sòlid</b>

#### 4.6 Aigües residuals

El consum d'aigua és de 40.000 m<sup>3</sup>/any, encara que la major part es perd per evaporació al llarg del procés productiu.

Els paràmetres de l'aigua residual de sortida (aigua de decantació dels filtres per via humida) es troben per sota dels límits de la legislació vigent.

#### 4.7 Emissions

Hi ha 15 focus d'emissió de partícules, amb valors per sota dels límits, i que es detallen a continuació:

- 2 aspiracions de rebaves.
- 4 granalladores.
- 2 filtres de mànegues del desemmotllament.
- 3 línies de refredament del filtre de mànegues.
- 4 forns d'inducció.

#### 4.8 Energia necessària per al funcionament dels forns

A l'empresa estudiada es fan servir quatre forns d'inducció de mitja freqüència: dos de 8 Tm i els altres dos, de 16 Tm de capacitat.

Es considera que 3.000 Tm de peces defectuoses es tornen a fondre. Per tant, la quantitat bruta de peces que es fonen en un any és de 23.000 Tm.

Energia necessària per fondre el material:

$$23.000 \text{ Tm fosa nodular/any} * 158.700 \text{ kcal/Tm Fe} * 4,7 \text{ kJ/kcal} = 15,22 * 10^9 \text{ kJ}$$

## 5. Qüestions

- a) Materials d'entrada al forn en un procés de fosa de ferro.
- b) Principals tipus d'aglomerants segons la seva composició i utilitat.
- c) Problemàtica ambiental de les terres d'emmotllament.
- d) Problemàtica ambiental dels residus d'aspiració dels forns.
- e) Principals oportunitats de minimització, reutilització i valorització dels residus sòlids.
- f) Principals motius de les elevades pèrdues d'aigua que tenen lloc a la foneria.

### 5.1 Determinació de l'índex de granulometria d'una sorra

Es vol determinar la granulometria d'una sorra d'emmotllament per tamisatge, seguint la metodologia següent:

- Es pesen 100 g de sorra nova que prèviament s'haurà assecat a  $110 \pm 5$  °C.
- Es pesen els tamisos, que tindran malles de 1.400, 1.000, 0,710, 0,500, 0,355, 0,250, 0,180, 0,125, 0,090 i 0,063 mm.
- Per la part superior de la tamisadora es deixa caure la sorra.
- Es posa en funcionament la tamisadora durant 15 minuts.
- S'atura la tamisadora.
- Es pesa cadascun dels tamisos amb la sorra que continguin.

$$\text{Índex granulometria} = \frac{\sum \{100 * ((PTA - PT) / P) * FACTOR_i\}}{100}$$

PTA és el pes de cada tamís amb sorra.

PT és el pes del tamís sense sorra.

P és el pes total de sorra.

FACTOR<sub>i</sub> és un número que correspon a cadascun dels tamisos.

En la taula 4 es detallen els factors que s'han d'utilitzar per a cada tamís en el càlcul de l'índex de granulometria:

**Taula 4.** Factors per a cadascun dels tamisos

Núm. tamís	Malla (mm)	Factor
1	1.400	6
2	1.000	9
3	0,710	15
4	0,500	25
5	0,355	35
6	0,250	45
7	0,180	60
8	0,125	81
9	0,090	118
10	0,063	164
	Fons	275

s aconsellable que com a mínim el 75 % de la sorra es trobi en tres tamisos consecutius, mentre que menys del 0,2 % de la mateixa sorra es trobi al tamís de 0,063 i al fons.

## 6. Bibliografia

[1] Decisió 2001/118/CE de la Comissió, de 16 de gener, que estableix la llista de residus.

[2] Decisió 2001/573/CE de la Comissió, de 23 de juliol, en què es modifica la classificació d'alguns residus.

[3] Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la cual se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

[4] VIVANCOS, J.; Argilés, R.; Pardo, A.; Sierra, C. (1998). Tecnologías de Fabricación. Procesos de fusión y moldeo y de deformación. Tom I (Volumen Texto) i Tom II (Volumen Figuras). CPDA-ETSEIB-UPC.

[5] Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Arenas de moldeo de fundiciones férreas (2000). Ihobe, SA (Sociedad Pública de Gestión Ambiental del País Vasco).

[6] MÉRIDA, E. Valorización de arenas de una fundición férrea. Proyecto final de postgrado en Ingeniería del Medio Ambiente. Universitat de Saragossa.

[7] SOLIVA, M. (2000). El compostatge com a activitat industrial aplicada a la gestió dels residus orgànics. Quarta jornada tècnica sobre la gestió de residus municipals. El compostatge. Col·lecció «Jornades Tècniques, 4». Universitat Politècnica de Catalunya.

[8] CASAS, J. M.; FONT, J.; BACARDIT, A. (1992). La contaminació del medi natural. «IV. Els residus urbans i industrials». Universitat Politècnica de Catalunya.

[9] <[www.feaf.es](http://www.feaf.es)> Federación Española de Asociaciones de Fundiciones.

[10] <[www.arc-cat.net](http://www.arc-cat.net)> Web de l'Agència Catalana de Residus.

## Capítol 26

# Gestió dels residus de tallers de mecanització de metalls

IRENE BUJ, LLUÍS COSTA I GAYETANO SIERRA  
Càtedra de Processos de Fabricació  
Departament d'Enginyeria Mecànica  
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

L'impacte ambiental de les indústries de deformació i mecanització de metalls està directament relacionat amb la utilització de fluids de tall, que donen lloc a residus considerats com a especials per la legislació vigent (Decisió 2001/118/CE de la Comissió, Decisió 2001/573/CE de la Comissió, Ordre MAM/304/2002). A més, també s'hi generen altres residus com ferritges metàl·liques, llots metàl·lics i ferralla.

En la taula 1 figuren els principals residus especials i no especials corresponents a aquestes indústries:

**Taula 1.** Principals residus especials i no especials de les operacions de deformació i mecanització de metalls

<b>Classificació del residu</b>	<b>Classificació del residu</b>	<b>Descripció</b>	<b>Procés associat</b>
Residus no especials	121101	Llimadures i llimalla de metalls ferris	Mecanització amb eines de geometria definida
	120102	Pols i partícules de metalls ferris	Mecanització amb eines de geometria definida
	120103	Llimadures i llimalla de metalls no ferris	Mecanització amb eines de geometria definida
	120104	Pols i partícules de metalls no ferris	Mecanització amb eines de geometria definida
	120115	Llots de mecanització diferents dels especificats en el codi 120114 (sense substàncies perilloses)	Mecanització amb eines de geometria no definida
	120117	Residus de granallatge o adollament diferents dels especificats en el codi 120116 (sense substàncies perilloses)	Granallatge de peces sotmeses a tractament superficial
	121121	Moles i materials d'esmerilament usats diferents dels especificats en el codi 120120 (sense substàncies perilloses)	Mecanització amb eines de geometria no definida.
Residus especials	120106	Olis minerals de mecanització que contenen halògens (excepte les emulsions o dissolucions)	Lubricació
	120107	Olis minerals de mecanització sense halògens	Lubricació
	120108	Emulsions i dissolucions que contenen halògens	Refrigeració
	120109	Emulsions i dissolucions de mecanització sense halògens	Refrigeració
	120110	Olis sintètics de mecanització	Lubricació
	120114	Llots de mecanització que contenen substàncies perilloses	Mecanització amb eines de geometria no definida
	120116	Residus de granallatge o adollament que contenen substàncies perilloses	Granallatge de peces sotmeses a tractament superficial
	120118	Llots metàl·lics (llots d'esmerilament, rectificació i lapidatge) que contenen olis	Mecanització amb eines de geometria no definida
	120119	Olis de mecanització fàcilment biodegradables	Lubricació
	120120	Moles i material d'esmerilament usats que contenen substàncies perilloses	Mecanització amb eines de geometria no definida

La producció neta consisteix en l'execució dels processos productius de manera que es generi la quantitat mínima de subproductes o residus no aprofitables internament amb el mínim consum de matèria primera.

Es basa en tres tipus d'accions diferenciades: prevenció, minimització i valorització.

La prevenció intervé en els processos que encara no han estat dissenyats, per tal d'escollir les alternatives que generin la mínima quantitat de residus.

La minimització o reducció s'aplica a processos que ja han estat dissenyats però en permeten la millora, per exemple, per disminuir la quantitat de residus generats o bé el consum de matèries primeres.

La valorització interna s'aplica quan ja no és possible prendre mesures de prevenció ni de minimització, per la qual cosa s'intenta utilitzar els residus com a matèria primera dins de l'empresa.

En cas que no es pugui dur a terme cap de les accions abans esmentades, caldrà lliurar el residu a un gestor autoritzat per tractar-lo. En alguns casos, serà possible una valorització externa del residu com a matèria primera d'algun altre procés productiu.

Els principals motius que donen lloc a la implantació de la producció neta a les empreses són els següents:

- Una legislació en temes mediambientals cada cop més estricta.
- L'augment dels costos de gestió externa dels residus.
- La creixent sensibilització ambiental dels consumidors.

## 2. Objectius

- Introduir el concepte de producció neta i les accions de prevenció, minimització i valorització dels residus.
- Presentar els diferents tipus de fluids de tall.
- Determinar els residus que es generen en una indústria de deformació i mecanització de metall i les seves principals vies de gestió.

## 3. Metodologia

Amb la finalitat de detallar els residus generats, així com la seva gestió correcta, s'ha pres com a exemple una empresa de deformació i mecanització de metall amb un consum de 8.000 tones de ferro i acer l'any.

En la figura 1 es presenta el diagrama bàsic de l'activitat:



**Figura 1.** Diagrama bàsic de l'activitat i fotografia del producte acabat

Els aspectes de l'impacte ambiental de l'empresa que s'han estudiat es refereixen a consum d'aigua, consum energètic, residus sòlids i líquids, emissions atmosfèriques i soroll.

### 3.1 Consum d'aigua

En general, l'aigua utilitzada a l'empresa procedeix de la xarxa pública, malgrat que per a la preparació dels fluids de tall en base aquosa (emulsions de tall) es fa servir aigua destil·lada.

Els principals usos de l'aigua són el sanitari i el de refrigeració de la instal·lació, tot i que també cal tenir en compte les operacions de neteja de la línia i el mateix procés productiu. Al llarg del procés es necessita aigua en quatre operacions diferents:

- Preparació de fluids de tall. Determinades operacions com el laminatge en fred, l'embotició, el foradament, el torneigament i el fresatge necessiten la utilització d'emulsions de tall, que s'obtenen per dilució de concentrats amb aigua destil·lada.
- Tractaments tèrmics. En tractaments com la recuita, el tremp i el reveniment es pot fer servir aigua en la fase de refredament de la peça.
- Desgreixatge. Si es fan servir fluids de tall en les operacions de conformació del material, posteriorment caldrà una etapa de rentatge i desgreixatge de les peces.
- Refrigeració. Determinats processos consumeixen aigua per a la refrigeració de transformadors, motors i maquinària en general, o bé per eliminar la càrrega tèrmica absorbida pel fluid de tall.

El consum d'aigua del procés productiu no és gaire elevat, ja que se solen reutilitzar les emulsions aquoses, així com els banys de refredament i rentatge.

### 3.2 Consum d'energia

Al sector de mecanització i deformació de metalls, la font d'energia principal és l'elèctrica, malgrat que també es fa servir gasoil o gas natural com a font secundària.

Els dos consums d'energia més importants són:

- Consum d'energia elèctrica per al funcionament de les màquines, equips complementaris, bombes, transmissions, ventiladors, etc.
- Consum de gasoil o gas natural per al funcionament dels forns emprats en els tractaments tèrmics.

### 3.3 Aigües residuals

Malgrat que les aigües residuals de les empreses del sector presenten una composició variada, es poden agrupar en quatre categories diferents:



- Aigües residuals dels processos de deformació i mecanització.
- Aigües procedents del sistema de refrigeració.
- Aigües procedents dels processos de desgreixatge.
- Aigües residuals del procés de neteja de les instal·lacions.

En cas que les aigües compleixin la legislació, es podran abocar directament a la llera pública. Per tal d'assegurar-ho, cal analitzar les aigües periòdicament en un laboratori extern homologat. Alguns dels paràmetres que es controlen són pH, matèries inhibidores, demanda química d'oxigen, matèries en suspensió, substàncies extraïbles, nitrogen total i fòsfor total.

En cas contrari, caldrà gestionar-les internament mitjançant un evaporador o bé externament per part d'una empresa especialitzada.

### 3.4 Residus

#### *Fluids de tall*

Les operacions de deformació i mecanització necessiten en molts casos la utilització de fluids de tall amb la finalitat de refrigerar i lubricar el sistema. A més, els fluids de tall també aporten altres beneficis, com l'extracció de ferritja, la disminució de forces de tall i requeriments de potència, i l'optimització de l'acabat superficial de les peces.

Atenent la funció que duen a terme, els fluids de tall es classifiquen en refrigerants i lubricants.

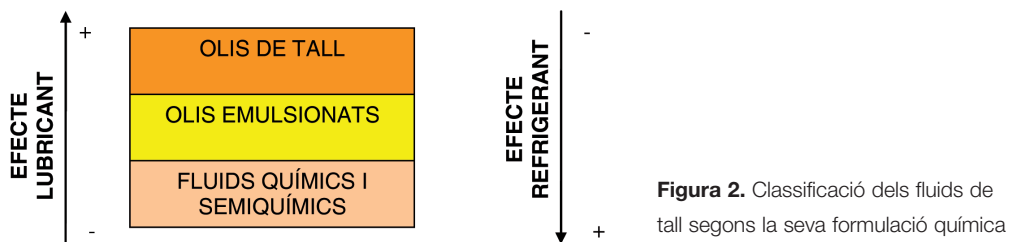
Els fluids refrigerants actuen extraient la calor generada, de manera que disminueix la temperatura de l'eina i de la peça, i així s'allarga la vida de l'eina. La capacitat d'un fluid de tall per reduir la temperatura depèn de les seves propietats tèrmiques, principalment la calor específica i la conductivitat tèrmica.

L'aigua presenta millors propietats tèrmiques que altres fluids, per la qual cosa es fa servir com a base per als refrigerants.

La finalitat dels fluids lubricants és reduir la fricció entre eina-ferritja i eina-peça. El seu component principal és oli. La seva manera d'operar és per lubricació de pressió extrema, que implica la formació d'una capa prima de sals sòlides sobre la superfície del metall per mitjà de reaccions químiques amb el lubricant. Aquestes reaccions són possibles a causa de la presència de compostos de sofre, clor i fòsfor.

Si es té en compte la formulació química dels fluids de tall, es distingeixen tres categories, tal com s'observa en la figura 2:

- olis de tall
- olis emulsionats
- fluids químics i semiquímics



Els olis de tall s'obtenen a partir de derivats del petroli. Els olis minerals són els més utilitzats. Per tal d'aconseguir la màxima capacitat de lubricació, sovint es combinen diferents tipus d'olis i es barregen amb additius químics.

Els olis emulsionats estan formats per suspensions de gotes d'oli en aigua, afavorides per un agent emulsionant. Com que contenen oli i aigua, combinen les propietats de lubricació i refrigeració.

Els fluids químics estan formats per compostos de sofre, clor i fòsfor dissolts en aigua. Presenten bones propietats refrigerants, però qualitats lubricants inferiors a les d'altres fluids. Els fluids semiquímics contenen, a més, una petita quantitat d'oli per millorar-ne les propietats lubricants.

Entre els additius amb més problemes ambientals o de seguretat i higiene es troben: dietanolamina i els seus derivats, nitrit sòdic, alquilfenols i àcid cresílic, parafines clorades, biocides, complexants, hidrocarburs aromàtics policíclics i derivats borats.

Amb el temps, els fluids de tall es contaminen per la presència de diferents substàncies: olis bruts (de màquina o hidràulics), brossa, ferritges, fongs, bacteris, etc. Això fa que els fluids no desenvolupin correctament les seves funcions i també que provoquin pudors i risc per a la salut, per la qual cosa cal renovar-los.

L'impacte ambiental dels fluids de tall es resumeix a continuació:

- Abocaments d'aigües residuals. Les emulsions de tall esgotades es consideren residus especials, per la qual cosa cal sotmetre-les a un tractament d'evaporació per separar-ne l'aigua de la resta. Si el tractament es duu a terme dins l'empresa, l'aigua es pot utilitzar per a la neteja del terra de la planta o bé s'aboca a la llera pública.
- Emissions a l'atmosfera, produïdes durant la incineració dels fluids de tall.
- Fugues i esquitxades. Cal considerar-les perquè amb el temps donen lloc a la contaminació del sòl.
- Arrossegaments en peces i ferritges. Els fluids de tall són arrossegats per les peces i la ferritja, per la qual cosa es van perdent. Aquest fenomen és més important en els olis que en les emulsions de tall, ja que són més viscosos.
- Boires i altres emissions ambientals.

Mesures de producció neta: minimització

- Utilització de la mecanització en sec (sense fluid de tall). Caldrà que les eines presentin una duresa elevada, resistència al desgast a temperatures elevades i poca tendència a l'adhesió amb la peça i la ferritja.
- Dipòsit centralitzat de subministrament. Requereix una xarxa de canonades per canalitzar el flux de fluid de tall, la qual cosa dificulta el canvi d'ubicació de les màquines.

- Unitats de manteniment. Són sistemes que eviten la permanència en el sistema d'elements aliens a aquest, com olis o partícules, de manera que es prolonga la vida útil del fluid.
- Implantació d'un pla de control del fluid de tall. Consisteix a mesurar diferents paràmetres de qualitat del fluid de tall per dissenyar-ne un pla de manteniment.
- Col·locació de barreres físiques a les màquines que impedeixin les projeccions de fluids de tall i en disminueixin les fugues i esquitxades.
- Implantació d'equips auxiliars de separació per minimitzar els arrossegaments en peces i ferritges.

Mesures de producció neta: reutilització interna

- Ús d'un evaporador per separar la fracció d'aigua de l'emulsió de tall, reduint el volum del residu que s'ha de tractar i reutilitzant l'aigua per netejar el terra de la planta.
- Sistema de reutilització de l'oli barrejat amb ferritja, que es diposita dins d'un contenidor amb recollida de l'oli pel fons. Abans d'utilitzar-lo, cal fer una anàlisi de les propietats de l'oli.
- Filtratge dels llots de rectificació que contenen oli per premsar-los posteriorment a fi de reutilitzar l'oli.
- Filtratge dels llots de rectificació que contenen emulsió de tall per tal de deixar-los escórrer sobre una reixeta i recuperar-ne l'emulsió de tall.

### *Ferralla i ferritges*

En els processos de deformació i mecanització es generen residus que provenen de peces defectuoses (ferralla) i del material tallat (ferritja). Presenten l'inconvenient que solen estar barrejats amb emulsions de tall o amb olis de tall.

Mesures de producció neta: prevenció

- Minimització dels sobregruixos de material.
- En alguns casos, disseny de processos alternatius a la mecanització, com la sintetització o la fosa de precisió a la línia.

Mesures de producció neta: reutilització externa

- Les ferralles i ferritges són gestionades pels recuperadors i es reciclen per fer-les servir principalment en acerries i foneries. En primer lloc, convé preveure la separació de la ferritja d'acer de la d'altres metalls, ja que el preu de venda al gestor disminueix si es barreja. En segon lloc, és important disposar de contenidors específics per a la ferritja barrejada amb oli o bé amb emulsió de tall, per poder reutilitzar els fluids de tall.

### *Llots metàl·lics*

Els llots es generen en els processos de rectificació, en què es fan servir eines de geometria no definida com les moles. Presenten una composició variable de petites partícules metàl·liques arrencades a les peces, fluid de tall i material abrasiu.

Habitualment, els llots es retenen mitjançant filtres bossa de cel·lulosa, que un cop plens es dipositen en contenidors especials per pretractar-los a l'empresa o bé per lliurar-los a una empresa gestora. Com que aquests llots són residus especials, normalment se sotmeten a un tractament d'incineració.

Mesures de producció neta: prevenció

- Disminució dels sobregruixos mecanitzats.

Mesures de producció neta: minimització

- Premsatge dels filtres que contenen llots amb oli per a la reutilització de l'oli.
- Col·locació dels filtres que contenen llots amb emulsió de tall sobre una reixeta per escórrer l'emulsió de tall dins d'un recipient.

### 3.5 Altres residus sòlids

Alguns exemples de residus sòlids són els filtres emprats per al manteniment dels fluids de tall, l'extracció de partícules i la filtració dels dissolvents de les operacions de desgreixatge. Per reduir la quantitat de residus, es poden fer servir filtres reutilitzables.

D'altra banda, a les indústries de mecanització també es generen diferents residus assimilables als urbans:

- Residus de paper o cartró. Principalment es tracta d'emalatges que no estiguin amarats d'oli o emulsió de tall i fulls de paper. Es dipositen en un contenidor específic per reciclar-los.
- Residus de plàstic. Són envasos o embalatges que no estan impregnats de fluids de tall. Es dipositen en un contenidor específic per reciclar-los.
- Vidre. El constitueixen els vidres i envasos, que també es reciclen.
- Cartutxos de tòner. Procedeixen d'impressores i fotocopiadores, i són gestionats per empreses especialitzades.
- Fusta. La major part dels residus de fusta procedeixen de palets que es retiren de les instal·lacions. Els que es troben en bon estat es reutilitzen i la resta se'ls emporta un gestor extern per reciclar la fusta.
- Residus elèctrics i electrònics. Cal separar-los en diferents contenidors. Entre els més contaminants hi ha els fluorescents i les làmpades de sodi. També cal separar les bateries elèctriques dels vehicles i el material informàtic obsolet.
- Runes de construcció. Si es fan obres, cal disposar d'un contenidor que serà enretirat per un gestor autoritzat.
- Envasos buits de matèries primeres. És convenient separar els bidons metàl·lics de les garrafes de plàstic i assegurar que estiguin buits abans de segregar-los com a residus.

### 3.6 Altres residus líquids

En moltes operacions de neteja s'utilitzen dissolvents per al desgreixatge i la protecció antioxidant de les peces. Quan el bany s'esgota, se substitueix mitjançant una bomba per a líquids inflamables. Els dissolvents són gestionats per una empresa especialitzada, i també poden ser tractats a l'empresa si es disposa d'un evaporador. Es recomana no utilitzar dissolvents halogenats.

En l'operació de tractament tèrmic de les peces es fa servir una emulsió aigua-oli. Per augmentar la vida útil d'aquest líquid, en primer lloc se separa la capa superior d'oli, que conté més impureses, amb una cinta. Posteriorment, se separa l'oli de l'aigua a un equip d'ultrafiltració. L'oli usat és gestionat per una empresa externa.

D'altra banda, quan es considera que el bany amb aigua i sabó d'una rentadora de peces esgota la seva vida útil, s'aspira amb una aspiradora de líquids i es transporta cap a la fosa de recollida per tractar-lo posteriorment en un evaporador.

### 3.7 Emissions a l'atmosfera

Les emissions que es produeixen als tallers de deformació i mecanització s'agrupen en quatre categories:

- Boires d'oli i compostos orgànics volàtils derivats dels fluids de tall.
- Compostos orgànics volàtils i vapor d'aigua derivats dels processos de desgreixatge.
- Emissions procedents dels forns de tractament tèrmic: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>.
- Partícules metàl·liques procedents del desgast d'estris i eines, ferritges, etc.

### 3.8 Soroll

Als tallers de deformació i mecanització és habitual el soroll a causa de la manipulació de material en brut (barres, perfils, xapes, etc.) als cremadors i ventiladors d'extracció dels forns, i al mateix funcionament de la maquinària de tall, doblegament i arrencament de ferritja, entre altres.

Atès que les operacions es realitzen generalment a l'interior d'una nau, habitualment no representen un problema a l'exterior de les instal·lacions.

Per tal de reduir el soroll a l'interior, a les màquines es poden aplicar mesures per esmorteir el soroll mitjançant pantalles acústiques, silenciadors i tancaments. A més, la normativa aplicable al disseny de màquines noves exigeix que es redueixin el soroll i les vibracions. D'altra banda, els treballadors han d'utilitzar equips de protecció individual.

### 3.9 Consum de matèries primeres i quantitats de residus generades

En la taula 2 figura el consum de matèries primeres de l'empresa:

**Taula 2.** Quantitats de matèries primeres consumides en un any

<b>Matèria primera</b>	<b>Consum (TM)</b>
Metanol	151
Nitrogen	300,5
Pintures	46,4
Dissolvents	13,1
Gasoil	9,5
Ferro i acers comuns	8.081
Alumini	306
Sabons i material de neteja	20
Olis i emulsió de tall	225

El metanol s'utilitza principalment a la fase de verificació de les peces rectificades, com a dissolvent per a la seva neteja. En aquesta fase també es fan servir altres dissolvents.

El nitrogen permet generar l'atmosfera inerta necessària per als tractaments tèrmics de les peces d'acer.

Les pintures es fan servir com a protecció contra la corrosió de les peces ja mecanitzades.

El gasoil serveix com a combustible per als forns de tractament tèrmic.

El ferro i l'alumini són les matèries primeres de les quals es parteix per a la fabricació de peces.

Els sabons i altres materials permeten la neteja i el desgreixatge de les peces.

Els olis i les emulsions de tall, com ja s'ha explicat anteriorment, es fan servir per millorar les operacions de mecanització.

Les quantitats de residus generades en un any per la mateixa empresa figuren en la taula 3.

**Taula 3.** Quantitats de residus generats en un any

Residu	Quantitat (TM)
Oli usat	41,4
Ferritja i ferralla	1.246
Dissolvents no halogenats	10,6
Emulsions aigua/oli	69,4
Llots de la cabina de pintura	18,7
Residus generals	66,2
Paper i cartró	59
Fusta	22,6
Llots dels dipòsits de tremp	0,56
Material de filtració i absorbents d'oli	2,62
Fluorescents i bombetes	0,2
Piles de mercuri	0,168
Tòner	0,02
Envasos de plàstic fins a 50 l	1,04
Contenidors de 1.000 l	0,56
Bidons metàl·lics de 200 l	3,96
Runa de construcció	40,97
Oli de cuina	0,18
Total	1.584,178

#### 4. Qüestions

Mesures que es poden adoptar per minimitzar l'impacte ambiental dels processos següents:

- Mecanització en tou amb emulsió de tall.
- Mecanització en tou amb oli.
- Rectificació d'engranatges refrigerada amb emulsió de tall.
- Rectificació d'engranatges refrigerada amb oli.
- Tractament tèrmic.
- Muntatge.
- Neteja de la nau.

## **5. Agraïments**

Sr. Robert Gilart, de Componentes Mecánicos, SA (COMESA).

## **6. Bibliografia**

[1] Decisió 2001/118/CE de la Comissió, de 16 de gener, que estableix la llista de residus.

[2] Decisió 2001/573/CE de la Comissió, de 23 de juliol, on es modifica la classificació d'alguns residus.

[3] Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la cual se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

[4] GROOVER, M. P. (1996). Fundamentos de manufactura moderna. Editorial Prentice Hall.

[5] Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Mecanizado del metal (1999). Ihobe.





## Capítol 27

# Estudi en model reduït d'un tram de riu. Cas de la riera de Rubí a l'entorn de les Fonts

MARTÍ SÁNCHEZ-JUNY

Grup de recerca en Dinàmica Fluvial i Enginyeria Hidrològica (FLUMEN)

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Objectiu

Amb aquesta pràctica es pretén justificar la necessitat dels estudis en model reduït, pel fet que no és possible una simulació numèrica acurada en cursos fluvials amb les singularitats que es mostren en el model triat. A més, per a la realització de la pràctica cal discutir aspectes com l'estabilitat de proteccions d'escullera, l'ajustament de la rugositat del model reduït o els nivells d'inundació que s'assoleixen als cabals d'avinguda fixats.

### 2. Fonaments

La zona d'estudi comprèn els darrers 105 m de la riera de Palau, els darrers 180 m de la riera de les Arenes i els primers 762 m de la riera de Rubí. A causa de les obres d'endegament realitzades en el passat, aigües amunt de la confluència les dues primeres rieres tenen una cota de fons molt superior a la de la riera de Rubí. Aquesta diferència de cotes se salva a la confluència amb una sèrie de caigudes i obres de dissipació d'energia. Aigües avall d'aquestes, tant el fons de la riera de Rubí com el marge dret (oposat a l'entrada d'aigua des de la riera de les Arenes) presenten unes fortes erosions.



**Figura 1.** Extrem aigües amunt de la zona d'estudi, que correspon a la confluència de la riera de Palau (esquerra) amb la riera de les Arenes (dreta), i es converteix en la riera de Rubí.

Aigües avall de la confluència, hi ha un tram curt amb una protecció d'escullera amb formigó al marge dret de la riera de Rubí. La resta de tram d'estudi actualment no té cap tipus de protecció davant l'erosió. El marge dret de la riera de Rubí està format per un talús coronat per un camí, mentre que al marge esquerre hi ha un altre talús al capdamunt del qual hi ha la zona del Pla parcial les Fonts. Uns 460 m aigües avall de la confluència hi ha una passarel·la per a vianants per accedir a l'estació del ferrocarril, que es recolza sobre dues piles als marges de la riera. A 650 m de la confluència, s'hi troba el pont del carrer Mossèn Perramon.



**Figura 2.** Plànol de situació



**Figura 3.** Imatge de la mateixa zona de les figures anteriors corresponent al model reduït

L'escala geomètrica escollida per a la construcció del model fou 1/50 i es va operar sota semblança de Froude.

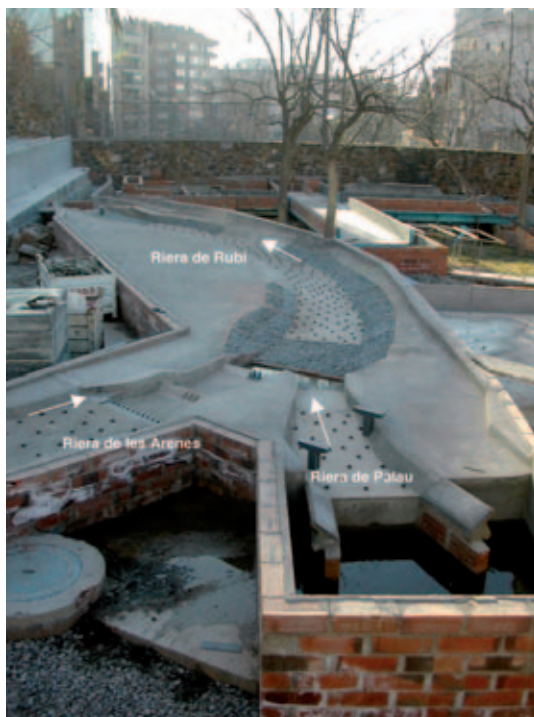
### 3. Condicions de treball

#### 3.1 Cabal de disseny

A proposta de l'ACA, els cabals utilitzats són 979 m<sup>3</sup>/s a la riera de Rubí, 441,5 m<sup>3</sup>/s a la riera de Palau i 527,3 m<sup>3</sup>/s a la riera de les Arenes.

#### 3.2 Rugositat

La rugositat de la llera s'ha avaluat mitjançant el coeficient de rugositat de Manning. S'ha considerat un únic coeficient per representar globalment la resistència al flux de les diferents zones que conformen la llera. El seu valor és 0,032.



**Figura 4.** Vista general del model reduït des d'aigües amunt fins a aigües avall

#### 3.3 Condicions de contorn

Mitjançant un estudi en model numèric que permet calcular el perfil de la làmina d'aigua per a un cabal i geometria donats, en condicions de flux unidimensional, es va observar que tant la riera de Palau com la de les Arenes funcionen en règim lent i passen a règim ràpid immediatament aigües avall, a l'entrada de les respectives obres de dissipació. D'aquesta manera no és necessari imposar cap condició en els calats a l'entrada del model. Per a la condició de sortida, s'aprofita el fet que 20 aigües avall del pont del carrer Mossèn Perramon hi ha un graó, que marca l'inici de l'endegament existent, i que correspon també a una secció de control, amb la qual cosa s'assegura la condició correcta de contorn aigües avall del tram d'estudi.

#### 3.4 Mesura dels nivells d'aigua

L'obtenció dels nivells d'aigua s'ha de fer mitjançant l'ús d'un limnímetre en les diferents seccions de mesura. Cal recordar que la mesura s'estableix com la diferència entre la lectura del limnímetre sobre

la superfície de l'aigua menys la que s'obté sobre la solera d'aquell punt de mesura.

## 4. Desenvolupament

Totes les respostes a les qüestions que es plantegin cal donar-les referides al prototip.

### 4.1 Assaigs previs. Ajustament del model

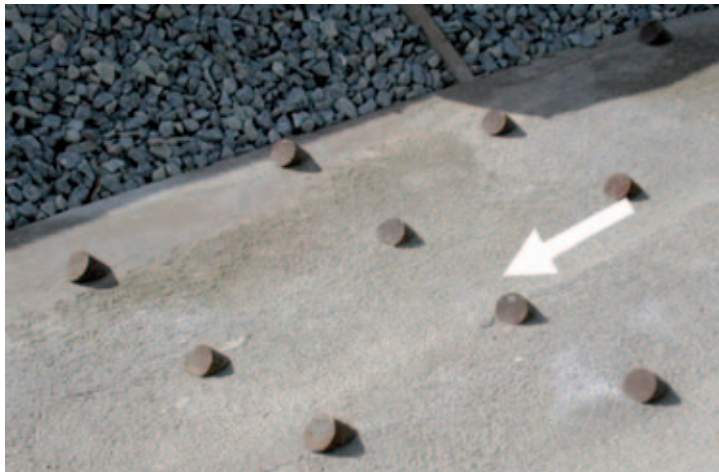
#### *Objectiu*

Discutir l'escala de rugositats i comprovar que el model reduït construït al laboratori no es correspon amb el coeficient de Manning estimat a la zona d'estudi en prototip. Per aquest motiu cal dur a terme una sèrie de tasques prèvies per ajustar el model a les condicions reals de funcionament hidràulic de la riera.

#### *Tasques al laboratori*

Essent el cabal disseny en prototip a la riera de les Arenes de 527 m<sup>3</sup>/s i a la riera de Palau de 441,5 m<sup>3</sup>/s, i essent l'escala del model  $\bar{\lambda} = 50$ , determineu els cabals que s'ha de fer passar en el model reduït (sota semblança de Froude).

A continuació, s'han de disposar al llarg del model una sèrie de peces metàl·liques especialment dissenyades per a aquesta finalitat. Les peces (vegeu la figura 5) consisteixen en un cilindre d'acer tallat a la base per un pla normal al seu eix i en l'altre extrem per un pla a 45° amb l'eix (forma de falca).



**Figura 5.** Disposició de peces a portell per a l'ajustament de la rugositat

Aquestes peces serveixen per donar rugositat addicional al model segons dues disposicions diferents. Cal fer passar el cabal de disseny i mesurar els nivells d'aigua en el tram de la riera de Rubí, per a les dues disposicions, pel cap baix en cinc seccions, que s'hauran decidit prèviament el dia de la pràctica (a escollir entre les que s'indiquen a la taula 1). Les dues disposicions que s'han d'estudiar són les següents:

1. Peces en files amb una separació entre cada una de 20 cm i a cada fila, una separació entre peces de 20 cm col·locades a portell.
2. Peces en files amb una separació entre cada una de 30 cm i a cada fila, una separació entre peces de 30 cm col·locades a portell.

Anàlisi de les tasques al laboratori

Com ja s'ha dit, en el prototip s'estima un coeficient de fregament de Manning de  $n_{prot} = 0,032$ . En canvi, el model reduït està construït en un formigó ben allisat i ben acabat ( $n = 0,014$ ).

- a) Quina és l'escala de rugositats si l'escala geomètrica és  $\bar{I} = 50$ ?
- b) Quin coeficient de Manning hauria de tenir el model reduït per simular correctament el prototip?

En la taula adjunta es presenten els valors estimats numèricament en el tram de la riera de Rubí, entre les abscisses 31 i 650. En la figura 3 es mostra la manera de localitzar en el model reduït la secció d'abscissa 48 m.

- c) De les dues disposicions de peces metàl·liques que s'han estudiat, trieu la que s'ajusta millor als resultats simulats numèricament en el tram de la riera de Rubí per la geometria del model i un coeficient de Manning de 0,032 que es mostren en la taula 1.

**Taula 1.** Cota de la làmina d'aigua estimada a partir de la simulació numèrica realitzada en el tram entre les abscisses 0 i 634.

Secció	Abscissa	Cota fons	Làmina d'aigua	Cota MD	Cota ME
31	183,81	188,70	191,5	193,5	
1r	48	183,60	187,01	191,17	193,5
2r	83	183,15	187,53	190,46	193,21
3r	118	181,81	187,43	189,97	191,6
4r	153	181,25	186,23	189,78	190,88
5r	188	180,75	185,99	189,48	190,03
6r	223	180,32	186,01	188,98	191,00
7r	258	180,51	185,86	188,32	190,40
8r	293	180,10	185,45	187,66	190,20
9r	319	180,23	185,31	187,00	190,10
10r	354	179,64	185,11	188,07	189,45
11r	389	179,47	184,93	188,00	188,70
12r	424	179,15	184,02	187,80	188,00
13r	459	178,68	183,45	187,40	187,00
14r	494	178,46	182,41	187,00	186,00
15r	529	178,42	181,71	185,80	185,00
16r	564	178,15	181,54	184,90	184,20
7r	599	177,76	181,20	184,80	183,00
18r	634	177,62	181,02	186,50	183,00

- d) Representeu en un gràfic el perfil longitudinal del tram de la riera de Rubí comparant el nivell de la làmina d'aigua simulat amb el model numèric i els nivells corresponents a les dues disposicions de rugositats estudiades.

- e) Descriu el comportament hidràulic de la zona de la confluència de les rieres de Palau i de les Arenes. Per què en aquest entorn no es pot aplicar un model numèric de càlcul de la làmina lliure (per exemple HEC-RAS)?

## 4.2 Anàlisi de l'estabilitat de les proteccions d'escullera dels marges

### Objectiu

Un dels motius de la construcció d'aquest model reduït fou el disseny de les proteccions de la riera davant possibles efectes erosius en cas d'avinguda.

### Tasques al laboratori

Al laboratori cal fer una primera estimació de quina de les dues disposicions de rugositat estudiades en l'apartat anterior és la més adequada. Aquesta s'ha d'estendre a la resta del model per continuar la pràctica.

Per al cabal de disseny, s'han d'anitzar dos aspectes diferents amb dues proteccions d'escullera en cada cas, 600 kg i 1.000 kg:

- L'estabilitat de la solera a la zona de confluència (extrem aigües amunt de la riera de Rubí), entre les abscisses 31 m i 83 m.
- L'estabilitat dels marges laterals a la zona de màxima curvatura de la corba entre les abscisses 223 m i 319 m.

Cal controlar els nivells d'aigua a cadascuna de les seccions esmentades per tal de poder-ho comparar amb la situació sense protecció, prenent mesures al centre de la secció i al costat dels marges dret i esquerre. També cal observar l'estabilitat de les proteccions a cada zona.

Anàlisi de les tasques al laboratori

Cal respondre les qüestions següents:

- a) La mida de l'escullera, afecta les mesures del nivell d'aigua? Compareu-les amb les mesures realitzades en els assaigs previs.
- b) Entre les abscisses 223 m i 319 m, analitzeu el peralt de la superfície lliure que s'hi forma. Compareu els resultats amb les formulacions típiques dels peralts a la superfície lliure de la làmina d'aigua:

$$\Delta y = \frac{v^2}{g} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \qquad \Delta y = \frac{v^2}{g} \frac{B}{r_m}$$

$\Delta y$  és la diferència de nivells d'aigua entre l'interior i l'exterior de la corba.

$v$  és la velocitat mitjana del flux a la secció.

$r_m$ ,  $r_1$  i  $r_2$  són els radis de curvatura mitjans, a l'interior i l'exterior respectivament.

$B$  és l'ample de la secció.

$g$  és l'acceleració de la gravetat.

- c) Quina de les dues mides de protecció estudiades cal escollir per assegurar l'estabilitat de cada tram?

- d) Feu una proposta per a la posada en obra de les proteccions en cada cas, on es defineixin els



gruixos d'escullera necessaris, les longituds del peu d'escullera, etc.

### 4.3 Anàlisi del comportament hidràulic del tram de la riera de Rubí

#### *Objectiu*

En aquest apartat es pretén entendre el comportament del flux sobre el tram estudiat. Això permetrà fer una anàlisi exhaustiva del flux estudiat, de com evolucionen variables hidràuliques com els nivells d'aigua, de velocitats mitjanes i de l'energia del flux.

#### *Tasques al laboratori*

Un cop col·locades les proteccions d'escullera que s'hagin considerat més estables, en l'apartat anterior, cal mesurar els nivells d'aigua en almenys la meitat de les seccions que es mostren en la taula 1.

Les mesures s'han de fer, per al cabal de disseny, en cinc punts de la secció transversal per tenir una estimació del comportament del flux transversalment al moviment.

#### *Anàlisi de les tasques al laboratori*

Un cop obtingudes les mesures dels nivells d'aigua en les seccions escollides, cal respondre les següents qüestions:

- a) Analitzeu l'evolució, al llarg del tram mesurat, dels calats (diferenciant entre nivell al centre de la riera o a cada marge), i les velocitats mitjanes.
- b) Determineu a cada secció una estimació del coeficient de Coriolis (vegeu la metodologia descrita en la pràctica «Estudi en model reduït d'un col·lector d'aigües pluvials. Cas del col·lector del torrent de Santa Maria al monestir de Montserrat»).
- c) Analitzeu l'evolució de la línia d'energia en tot el tram d'estudi.

## **5. Bibliografia**

[1] Use of Riprap for Bank Protection. Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular, Núm. 11. 1967.

[2] MAYNORD, S.T.; RUFF, J. F.; ABT, S.R. «Riprap Design». Journal of Hydraulic Engineering, vol. 115, núm. 7 (1989).

[3] DEHMA. Estudi hidràulic en model reduït de la riera de Rubí a la zona del Pla parcial de les Fonts (T. M. Terrassa). Estudi encarregat per l'ACA i signat pel prof. Josep Dolz, pel prof. Ernest Bladé i per l'enginyer tècnic Juan Pomares. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2004.





## Capítol 28

# Estudi hidràulic amb el model numèric HEC-RAS. Cas de la riera de Tossa a l'entorn de la Sureda

MARTÍ SÁNCHEZ-JUNY

Grup de recerca en Dinàmica Fluvial i Enginyeria Hidrològica (FLUMEN)

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introduccio i objectius

Es planteja l'estudi del comportament hidràulic del tram de la riera de Tossa a l'entorn de la zona coneguda com la Sureda (la Selva), amb l'aplicació del model de càlcul HEC-RAS. El tram d'interès que es vol analitzar, d'aproximadament un quilòmetre de longitud, es mostra en el plànol adjunt (figura 2) i correspon al tram situat entre els PK (que indiquen la distància al mar) 2873 i 1842. D'aquest tram de riera es disposa de la geometria necessària, que es facilitarà per a la realització de la pràctica.

Se sap que el cabal circulant, associat a una probabilitat que es produeixi de l'1 % és  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  (període de retorn de 100 anys), i que els coeficients de rugositat de Manning es poden considerar  $n = 0,020$  a la part de la llera central no ocupada per la vegetació i  $n = 0,035$  a la zona amb vegetació (vegeu la figura 1).



**Figura 1.** Riera de Tossa, secció característica a l'entorn del PK 1916

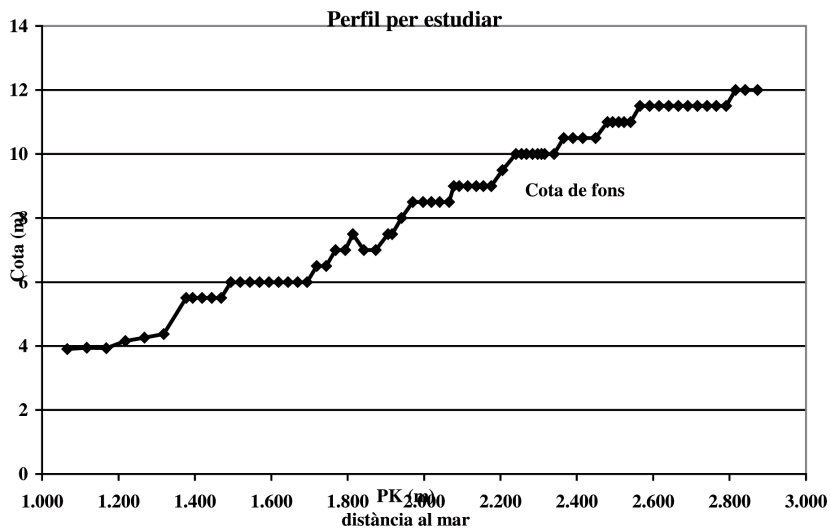
## 2. Metodologia i qüestions

Amb aquesta informació, es proposa analitzar les qüestions següents:

a) El tram de riera que es proposa estudiar és un tram relativament inalterat, en règim natural. Tenint en compte que el perfil de la geometria de què es disposa (figura 4) s'ha obtingut a partir d'una aplicació que permet extreure seccions transversals d'una base digital del terreny, discuteix breument la bondat d'aquesta geometria. La geometria que es proporciona, és coherent amb la d'un tram natural? Si escau, feu-ne de manera raonada les modificacions que es considerin pertinents.



**Figura 2.** Plànol topogràfic de la zona de la Sureda, a la riera de Tossa



**Figura 3.** Perfil del tram de la riera de Tossa per analitzar

b) Per determinar les condicions de contorn (aigües amunt i avall, si escau), s'ha aconseguit completar la geometria aigües avall de la zona d'estudi, fins al PK 1.066. Aquest és situat immediatament aigües amunt d'un pont que, per les seves característiques, permet assegurar el seu funcionament hidràulic com una secció de control. Estudieu la influència de les condicions de contorn en els nivells d'inundació del tram d'interès.

c) Analitzeu la sensibilitat dels resultats en funció de la interpolació de seccions entre cada dues de donades i decidiu la distància d'interpolació que es consideri més escaient.

d) Fins aquest punt, en la geometria que es proporciona, no s'ha considerat la variació del coeficient de Manning segons la llera central i les planes d'inundació. Analitzeu la influència d'aquesta divisió de les seccions en els resultats.

e) Determineu de manera aproximada, sobre el plànol de la figura 2, la taca d'inundació en el tram d'estudi (del PK 1.842 al 2.873), per al cabal analitzat.



## Capítol 29

# Estudi en model reduït d'un col·lector d'aigües pluvials. Cas del col·lector del torrent de Santa Maria al monestir de Montserrat

MARTÍ SÁNCHEZ-JUNY

Grup de recerca en Dinàmica Fluvial i Enginyeria Hidrològica (FLUMEN)

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

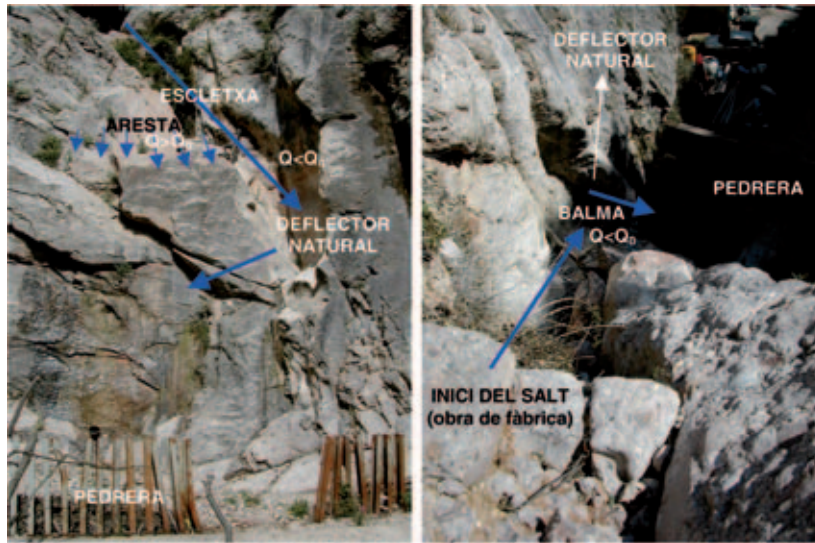
Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció i objectius

L'objectiu principal de la pràctica és analitzar el model reduït del tram de col·lector d'aigües pluvials per drenar el torrent de Santa Maria al Monestir de Montserrat (Bages). Cal utilitzar els coneixements de la hidràulica teòrica aplicats a un exercici experimental i verificar les diferents equacions i fórmules que es proposen en la teoria. Un altre objectiu d'aquest exercici experimental consisteix a observar fenòmens locals en el flux sobre una estructura esglaonada i a través d'estructures dissenyades per a la dissipació d'energia.

### 2. Metodologia

L'experiència es realitza aprofitant el model reduït a escala 15, del tram col·lector que va des de la seva capçalera fins a una longitud aigües avall de 69,07 m. El model serà operat sota semblança de Froude.



**Figura 1.** Entrada a la Pedrera del torrent de Santa Maria.  
Vistes des de la mateixa Pedrera (esquerra) i des de la secció on es produeix la caiguda (dreta).

## 2.1 Zona de la Pedrera

El torrent de Santa Maria arriba a la zona coneguda com la Pedrera (vegeu la figura 1), vessant des d'una altura aproximada de 18,5 m sobre la cota 720,2 m, a la qual es troba la superfície de la Pedrera.



**Figura 2.** Vista de la caiguda a la Pedrera

Tal com es pot apreciar en la imatge dreta de la figura 1, el torrent entra gairebé rasant a la paret de roca del marge esquerre. En aquesta paret es pot apreciar la formació d'una balma per l'acció erosiva de l'aigua en vessar des de l'obra de fàbrica. Aquesta última està totalment enterrada de sediments aigües amunt i fixa el punt de caiguda de l'aigua. En el model reduït s'ha pogut analitzar el comportament hidràulic d'aquesta caiguda. S'ha comprovat que existeix un cabal lliard (Q0) per sota del qual l'aigua cau ocupant únicament l'escletxa que s'aprecia a la figura anterior i per sobre del qual comença a vessar sobre l'aresta que es mostra a la imatge esquerra d'aquesta (figures 1 i 2).

Per assegurar una entrada adequada del cabal de projecte al col·lector, es van haver de dissenyar a la Pedrera els elements adequats per dissipar suficientment l'energia de l'aigua que hi arriba, i per evitar que hi entrin els elements sòlids, transportats pel flux, més grans d'una certa mida. Així, es va imposar que els sòlids d'una mida superior a 0,40 m fossin retinguts abans de l'embocadura del col·lector. El disseny realitzat es mostra a les figures 4 i 5.

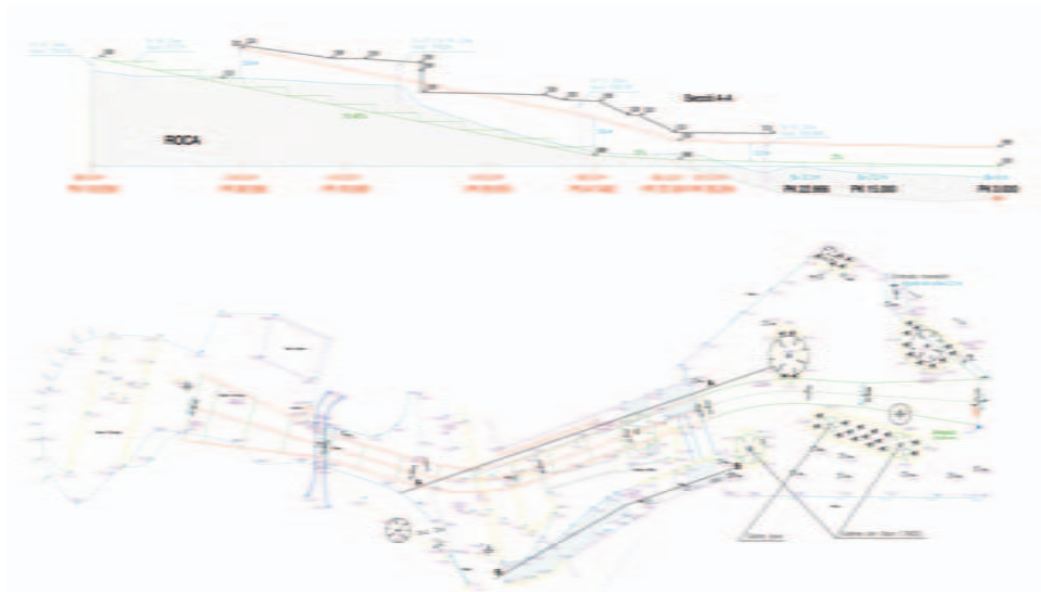
## 2.2 El col·lector. Fase II

El seu extrem aigües avall es troba a la plaça de l'Abat Oliva i connecta amb la fase I, que ja està construïda. El seu extrem aigües amunt, i l'entrada al col·lector, es troba a la zona coneguda com la Pedrera, ja descrita. L'origen de les distàncies en aquesta fase II s'ha pres en el primer salt que troba l'aigua un cop al tram de la fase I.

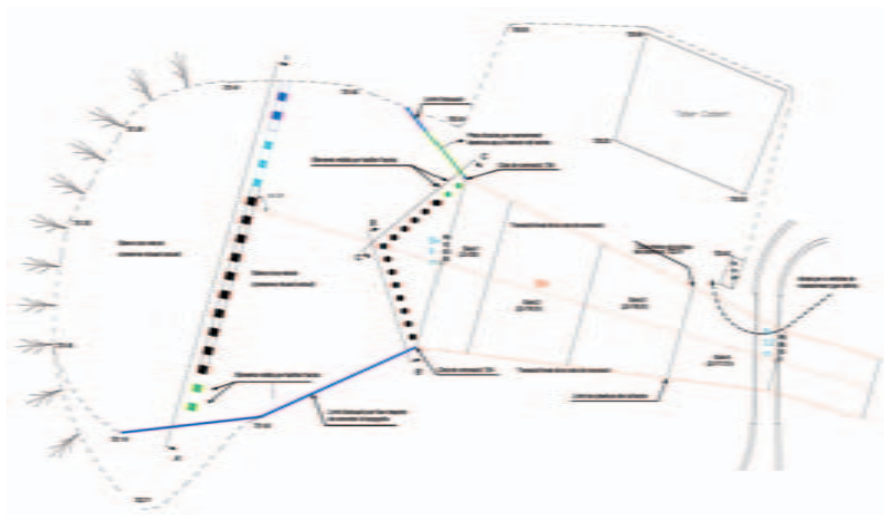
Hi ha certes característiques geomètriques del tram objecte d'estudi que responen als condicionants topogràfics i geomètrics de l'entorn:

- Entre el PK 0 i el PK 37.491 el col·lector consisteix en un calaix rectangular de 3,2 m d'ample i 2 %, de pendent des de la cota 707,26 m fins a la cota 708 m. Aquest tram ja està construït en la primera fase d'execució del col·lector i en el seu extrem aigües amunt (PK 37.491) s'hi connectarà el nou tram, objecte d'estudi en aquesta pràctica.
- Des del PK 37.491, situat a la cota 708 m, cal sortir a la Pedrera a la cota 720 m, tenint en compte que l'eix ja existent del col·lector a la primera fase amb l'eix que dona l'orientació de l'embocadura dins de la Pedrera formen un angle de 144°, mesurat en sentit antihorari des del primer cap al segon. Aquesta desalineació obliga que hi hagi una corba que en planta se situa des del PK 59.615 fins al PK 76.599.
- El desnivell esmentat en el darrer punt se salvarà amb un seguit de salts, l'altura dels quals es va fixar, a partir de les observacions en el model reduït, en 1 m.
- Finalment, la necessitat de compatibilitzar l'embocadura del col·lector amb el pas de maquinària de neteja a la Pedrera permet dimensionar l'entrada al col·lector (PK 106.556) de 9 m d'ample. Això obliga a l'existència d'una contracció suau (de 18 m de longitud) fins als 3,2 m d'ample al PK 88.556.

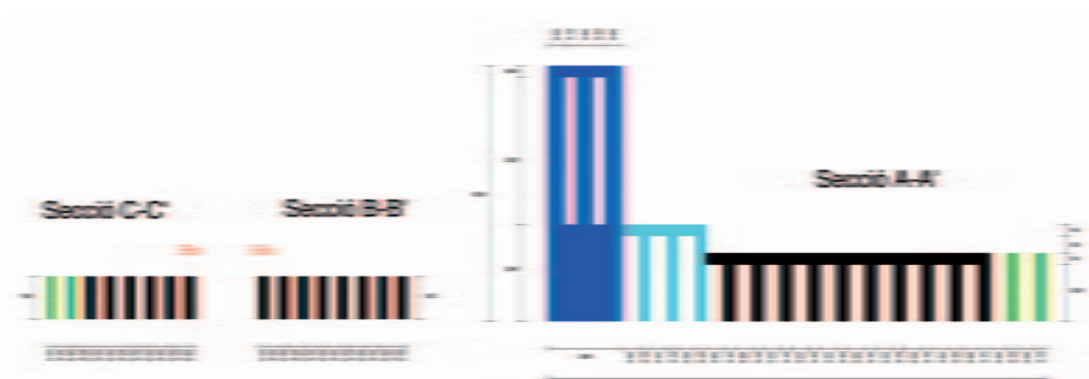




**Figura 3.** Vista de perfil i en planta del col·lector per estudiar



**Figura 4.** Vista en planta de l'embotadura del col·lector a la zona de la Pedrera. Les seccions AA', BB' i CC' es mostren a la figura següent.



**Figura 5.** Alçat de les seccions AA', BB' i CC' de la figura anterior



### 3. Condicions de treball

#### 3.1 Cabal de disseny

El cabal de disseny correspon a un període de retorn de 500 anys, i val  $48 \text{ m}^3/\text{s}$  procedents del torrent de Santa Maria, aigües amunt de la Pedrera.

Per estudiar el funcionament del col·lector en aquest cas, s'han de fer diferents assaigs per a cabals inferiors al de projecte.

#### 3.2 Condicions de contorn

Ateses les característiques geomètriques de la zona de la Pedrera, on el cabal accedeix amb una caiguda lliure ja descrita (vegeu l'apartat 2.1), s'ha simulat en el model l'aproximació del torrent de Santa Maria a la caiguda lliure i tota la zona contigua.

#### 3.3 Mesura dels nivells d'aigua

S'ha d'utilitzar un equip de mesura de nivells consistent a introduir dins del fluid dues varetes metàl·liques que actuen com a ànode i càtode, i es mesura la resistència elèctrica que hi ha entre totes dues. En funció de l'altura d'aigua, la resistència varia i aquesta variació és registrada per l'ordinador.

Per tant, prèviament caldrà definir les característiques de mostreig.

### 4. Desenvolupament

Totes les respostes a les qüestions que es plantegin s'han de donar referides al prototip.

#### 4.1 Assaigs previs

##### *Objectiu*

Es tracta de familiaritzar-se amb l'equip de mesura de nivells i discutir la bondat dels registres realitzats.

##### *Tasques al laboratori*

S'han de dur a terme els assaigs previs següents:

1. S'ha de fer un calibratge del sistema que permeti obtenir la relació entre nivells d'aigua i resistivitat elèctrica. Aquest calibratge és essencial per poder transformar les lectures de resistivitat elèctrica en nivells.

Es col·loquen les sondes en un punt de mesura qualsevol i se n'analitzen dos aspectes previs importants per definir els assaigs: durada de registre i freqüència d'adquisició.

2. Pel cap baix s'han de prendre tres registres diferents a tres freqüències d'adquisició diferents, per exemple 40 Hz, 80 Hz i 200 Hz, en assaigs que durin entre 1 i 2 minuts.

3. S'ha de fixar una freqüència d'adquisició i s'ha de realitzar un assaig prou llarg, d'uns 5 minuts de durada.

### *Anàlisi de les tasques al laboratori*

Cal discutir els aspectes següents:

Determinar la influència de la freqüència d'adquisició en les mesures: veure si la mitjana i la variància de l'assaig depenen de la freqüència.

Anàlitzar l'estabilitat de la mesura: veure com la mitjana i la variància depenen de la durada de l'assaig. S'arriben a establir els dos estadístics? En cas afirmatiu, a partir de quin instant?

Estudiar si la sèrie temporal registrada s'ajusta bé a una distribució normal.

## 4.2 Anàlisi del comportament hidràulic de la zona de la Pedrera

### *Objectiu*

L'objectiu d'aquesta part de la pràctica és visualitzar la incorporació de l'aigua al col·lector i realitzar consideracions sobre l'eficiència del disseny elaborat en el procés de dissipació d'energia abans de la incorporació al col·lector.

### *Tasques al laboratori*

S'han de dur a terme les tasques següents:

1. S'ha de visualitzar el comportament general de la zona de la Pedrera per a cabals creixents, fins a arribar al cabal de projecte.
2. Fixat el cabal de projecte, s'ha de mesurar el calat d'aigua a l'aproximació al salt.
3. Mitjançant els sensors resistius s'han de mesurar els nivells d'aigua com a mínim en sis (6) punts transversalment a la secció aigües amunt de la incorporació del col·lector.
4. S'han de repetir els punts 2 i 3 almenys per a dos cabals més, inferiors al del projecte.

### *Anàlisi de les tasques al laboratori*

Discutiu els aspectes següents:

Descriviu el comportament general de la incorporació a la zona de la Pedrera. Definiu el valor del cabal  $Q_0$  que s'ha descrit en l'apartat 2.1.

Determineu l'energia del flux abans del salt d'aigua a la Pedrera, en funció del cabal.

Anàlitzeu en la secció, abans de la incorporació al col·lector, els nivells mesurats. Definiu-ne els estadístics més representatius (valors mitjans, desviació típica, etc.).

Determineu l'energia del flux en aquesta secció en funció del cabal.

Calculeu els nombres de Reynolds i de Froude en la secció abans de la incorporació al col·lector.

Recordeu que l'energia en una secció, en un flux en làmina lliure, es defineix a partir del valor del trinomi de Bernoulli:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$z$  representa l'energia potencial per unitat de pes i es mesura a partir de la cota de fons de la secció respecte d'un pla de referència arbitrari.

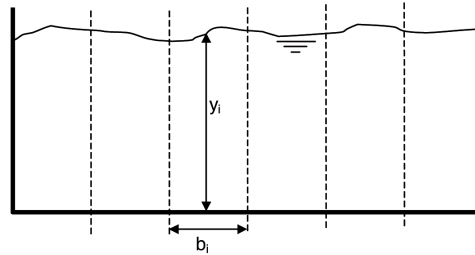
$p/\gamma$  és l'energia de pressió per unitat de pes i es mesura a partir del valor del calat mitjà ( $y$ ) mesurat.

$v^2/2g$  correspon a l'energia cinètica per unitat de pes i es determina a partir d'una aproximació a la velocitat mitjana a la secció.

$\alpha$  és el coeficient de Coriolis, que corregeix l'efecte que la distribució de la velocitat en la secció no sigui uniforme. S'obté de la relació següent:

$$\alpha = \frac{\int v^3 \cdot dA}{\bar{v}^3 \cdot A} ; \frac{\sum_i v_i^3 \cdot A_i}{\bar{v}^3 \cdot A}$$

El coeficient de Coriolis es pot determinar, en una primera aproximació, a partir de les mesures del calat en la secció transversal realitzades:



Es considera que cada nivell mesurat ( $y_i$ ) és representatiu d'una porció de secció d'ample  $b_i$ . Així es pot fer una estimació del repartiment del cabal a través de cada porció d'ample  $b_i$ , en funció de la velocitat mitjana associada ( $v_i$ ) i la porció d'àrea corresponent ( $A_i$ ):

$$Q_T = \sum_i Q_i = \sum_i v_i \cdot A_i \quad Q_i = \frac{1}{n} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot R_{Hi}^{\frac{2}{3}} \cdot A_i$$

$n$  és el coeficient de rugositat de Manning de la secció.

$I$  és el valor del pendent motriu a la secció.

$R_{Hi}$  és el radi hidràulic de cada porció considerada, que depèn del valor  $y_i$  mesurat.

$A_i$  és l'àrea de cada porció que també depèn de  $y_i$ .

A partir d'aquestes relacions se sol escriure:

$$Q_i = K_i \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad \text{on} \quad K_i = \frac{1}{n} \cdot R_{Hi}^{\frac{2}{3}} \cdot A_i$$

I per tant el numerador de la definició del coeficient de Coriolis queda:

$$v_i^3 \cdot A_i = \frac{Q_i^3}{A_i^2} \Rightarrow v_i^3 \cdot A_i = \frac{K_i^3 \cdot I^{\frac{3}{2}}}{A_i^2}$$

La relació amb el cabal total circulant permet escriure que:

$$Q_T = \sum_i Q_i = \sum_i K_i \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

Si es determina un valor de  $K_T$  global a tota la secció, quedarà:

$$K_T \cdot I^{\frac{1}{2}} = \sum_i K_i \cdot I^{\frac{1}{2}} \Rightarrow K_T = \sum_i K_i$$

Que permet escriure el denominador de la definició del coeficient de Coriolis:

$$\bar{v}^3 \cdot A = \frac{Q_T^3}{A^2} \Rightarrow \bar{v}^3 \cdot A = \frac{K_T^3 \cdot I^{\frac{3}{2}}}{A^2}$$

I per tant el coeficient de Coriolis es pot aproximar fent:

$$\alpha ; \frac{\sum_i v_i^3 \cdot A_i}{\bar{v}^3 \cdot A} = \frac{\sum_i \frac{K_i^3}{A_i^2}}{\frac{K_T^3}{A^2}}$$

### 4.3 Anàlisi del comportament hidràulic del col·lector

#### *Objectiu*

L'objectiu d'aquesta part de la pràctica és assolir un bon coneixement del comportament hidràulic del tram de col·lector. Es pretén caracteritzar tant nivells com velocitats pel cabal de projecte, en certs punts que es consideren d'interès.

#### *Tasques al laboratori*

S'han de dur a terme les tasques següents per a almenys tres cabals diferents: cabal de projecte i dos més inferiors a aquest.

1. S'han de col·locar els sensors resistius en cinc seccions de mesura: a l'extrem aigües amunt de col·lector (PK 106,5), al final de la contracció (PK 88,5), a l'entrada de la corba (PK 76,5), a la sortida de la corba (PK 59,6) i al final del tram esglaonat (PK 47). Les mesures s'han de fer en tres punts de la secció transversal: al marge dret, al centre i al marge esquerre.
2. Anotar el cabal circulat.
3. Prendre notes per fer una descripció qualitativa del flux.

#### Anàlisi de les tasques al laboratori

Discutir les qüestions següents:

- a) Descriviu el comportament general del col·lector. Quines diferències s'aprecien en el comportament hidràulic per a cabals creixents fins que s'assoleix el cabal de disseny?
- b) Coneguts el cabal circulat i les mesures dinàmiques dels nivells en les cinc seccions definides anteriorment, determineu l'energia del flux en cadascuna. Dibuixeu com evoluciona l'energia al llarg de la ràpida per als diferents cabals.
- c) A partir de l'energia del flux a la zona de la Pedrera estimada en l'apartat 4.2 i de l'energia a la sortida de la zona esglaonada (PK 47), estimeu el coeficient de fregament de Darcy-Weisbach equivalent per a tot el tram estudiat per cada cabal estudiat.
- d) Determineu l'evolució dels nombres de Reynolds i de Froude al llarg del col·lector.
- e) Únicament en el cas del cabal de projecte i a partir de les mesures realitzades en la secció situada immediatament a la corba (PK 59,6), determineu a quina de les dues expressions analítiques s'ajusta millor el peralt mesurat ( $\Delta y$ ) que forma la làmina d'aigua a la corba:

Cal tenir en compte que la primera expressió sorgeix d'una anàlisi que parteix de les hipòtesis que la distribució de velocitats en la secció és uniforme i que el radi de curvatura és variable per a totes les

línies de corrent. La segona expressió resulta de considerar també una distribució uniforme de velocitats en la secció, però en canvi el radi de curvatura és constant per a totes les línies de corrent. El resultat obtingut és coherent amb aquestes consideracions?

#### 4.4 Funcionament del col·lector amb cabal sòlid

##### *Objectiu*

L'objectiu d'aquesta part de la pràctica és discutir l'eficiència de l'estructura dissenyada a la zona de la Pedrera com a trampa dels sediments de mida superior a 0,40 m. Els sòlids de mida inferior als 0,40 m podran ser arrossegats pel flux i circular aigües avall.

##### *Tasques al laboratori*

S'han de dur a terme les tasques següents:

1. S'ha de preparar una aportació sòlida en sec segons les especificacions, en prototipus, de la taula 1.

**Taula 1.** Mides característiques, en prototip, del material usat en les experiències amb càrrega sòlida

<b>Pes (T)</b>	<b>Tant per cent en pes</b>	<b>Mida característica (mm)</b>
189	57,1%	150
94,5	28,6%	300
47,25	14,3%	600
330,75	100%	–

2. En el cas de cabal de projecte, s'ha de llençar al flux des de la capçalera del model (aigües amunt de la zona de la Pedrera) durant un temps, en prototip, no inferior a 1 h.
3. S'han de prendre notes per fer una descripció qualitativa del flux.
4. Un cop es finalitzi l'assaig, s'ha d'aturar el pas d'aigua i s'han de pesar en cada zona del model els àrids retinguts.

##### *Anàlisi de les tasques al laboratori*

Discutiu les qüestions següents:

- a) Descriu el comportament general del col·lector treballant amb càrrega sòlida.
- b) Definiu l'eficiència de retenció dels sòlids per a cada granulometria, en funció del quocient entre pes de material retingut / pes de material llençat.

## 5. Bibliografia

[1] DEHMA (2002). Estudi hidràulic en model reduït del tram sota l'estació del cremallera del col·lector a construir al torrent de Santa Maria (monestir de Montserrat). Estudi encarregat per l'ACA i signat pel prof. Josep Dolz, pel prof. Martí Sánchez-Juny i per l'enginyer tècnic Juan Pomares. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

[2] DEHMA (2004). Estudi hidràulic en model reduït de la fase II del col·lector a construir al torrent de Santa Maria (monestir de Montserrat). Estudi encarregat per l'ACA i signat pel prof. Josep Dolz, pel prof. Martí Sánchez-Juny i per l'enginyer tècnic Juan Pomares. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.



## Capítol 30

# Introducció a la química verda

MIQUEL ROVIRA I XAVIER MARTÍNEZ-LLADÓ

Departament d'Enginyeria Química

CTM – Centre Tecnològic

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

La química verda permet dissenyar productes químics i processos per tal de minimitzar els impactes negatius per a la salut humana i el medi ambient, o dit d'una altra manera, és la utilització de la química per a la reducció de la contaminació.

La química verda contribueix a fer més sostenibles els processos industrials, però també troba aplicació al laboratori de química i a les aules. De ben segur que els conceptes i les metodologies de la química verda prendran cada vegada més protagonisme, per la qual cosa és important que els tingueu presents a partir d'ara tant en les assignatures de química com en les que hi tenen relació.

Cal tenir present que els processos químics impliquen molts beneficis per a la nostra societat. Però també és cert que de vegades provoquen accidents i també tenen impactes ambientals. Així doncs, és important que la química i l'enginyeria química tinguin progressivament més responsabilitat en aspectes ambientals i això pot començar al mateix laboratori de química. D'entrada, aquesta pràctica només requereix la utilització de «llapis i paper», de manera que s'evita el consum de reactius al laboratori i la generació de residus. Tot i que les quantitats que es manipulen al laboratori són molt petites, l'impacte mai no és negligible, sobretot si es té en compte el que crea tota una classe sencera. Per fer-vos-en una idea, només cal que mesureu el volum total de residus generats al llarg d'una pràctica qualsevol de química tant per vosaltres com pels vostres companys... Ah! i no us oblideu de tenir en compte les característiques i la perillositat dels residus.

## 2. Objectius

Introduir el concepte de química verda mitjançant exemples pràctics que no requereixen experimentació al laboratori, fet que al mateix temps té una acció sensibilitzadora i formativa.

## 3. Metodologia

La química verda es basa en dotze principis, alguns dels quals s'enumeren a continuació.<sup>[1]</sup>

- **Prevenió.** És millor prevenir la generació de productes contaminants que haver-ne de fer el tractament.
- **Economia atòmica.** Els processos de síntesi s'han de dissenyar de manera que sigui possible incorporar el màxim d'àtoms dels reactius en els productes finals del procés.
- **Síntesi de productes menys tòxics i més segurs.** Els processos de síntesi han d'emprar en la mesura que es pugui reactius i dissolvents innocus, i han de generar productes que compleixin la finalitat perseguida però que alhora siguin com menys tòxics millor. Al mateix temps cal tenir en compte els aspectes relacionats amb la seguretat, és a dir, accidents, fuites, explosions, risc d'incendis, etc.
- **Eficiència energètica.** Els processos químics s'han de desenvolupar, sempre que sigui viable, a temperatura ambient i a pressió atmosfèrica.
- **Ús de catalitzadors.** La utilització de catalitzadors és preferible a la dels reactius estequiomètrics.
- **Disseny per a la degradació.** Els productes químics s'han de dissenyar tenint en compte el seu comportament al final de la seva vida útil. És ideal la situació en què els productes es degraden i generen compostos no perjudicials per al medi.

## 4. Desenvolupament

La pràctica consisteix a fer exercicis, que es divideixen en dues parts. En la primera part, es treballarà en grups de 2 a 4 alumnes, i caldrà cercar informació abans de la classe pràctica per tal d'emplenar la taula 1. Els resultats s'han de discutir amb la resta de companys de la classe.

La segona part es duu a terme a la mateixa aula, també en grups de 2 a 4 alumnes, i convé resoldre diferents casos relacionats amb la química verda.

## 5. Qüestions

### 5.1 Primera part

Completeu la taula següent i discutiu-ne els resultats juntament amb la resta de companys i el professor. Escolliu dos contaminants, els que vulgueu, i especifiqueu-ne les característiques al final de la taula.



**Taula 1.** Utilització i impactes de diversos compostos químics

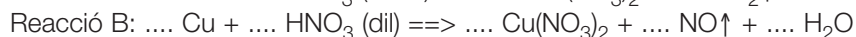
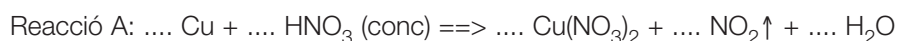
Compost/element	Fórmula/símbol	Origen/utilització	Impactes
Clorur de vinil			Càncer de fetge
	CHCl <sub>3</sub>		
Aroclor 1260	C <sub>12</sub> H <sub>n</sub> Cl <sub>10-n</sub>		Probablement provoca càncer
Arsènic			
Nitrats			
	CO <sub>2</sub>		
Níquel		Recobrint de metalls, aliatges, bateries, pigments	Cancerigen en dosis elevades
Cobalt a nivells traça		Natural	
	NO <sub>x</sub>		Pluja àcida, boirum fotoquímic
Seleni		Carbó i petroli. Minería del Cu	
Benzè			Leucèmia
	Cr(VI)		
Policlorur de vinil			
	PET		

## 5.2 Segona part

Resoleu els casos pràctics que es plantegen a continuació tenint en compte els conceptes de la química verda. Convé justificar les respostes.

### Síntesi de Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

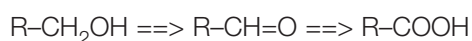
Igualau les reaccions següents i escolliu quina és la millor reacció síntesi de Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> des del punt de vista d'economia atòmica. Suposeu en els vostres càlculs que volem preparar 10 kg de Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. És aconsellable fer un recompte dels àtoms involucrats en cada una de les reaccions.



Com s'explica el diferent comportament del HNO<sub>3</sub> en funció de la seva concentració? Sabeu si existeix alguna altra ruta de síntesi?

### Oxidació d'alcohols primaris

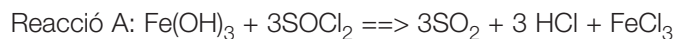
Escolliu la millor opció de reacció des del punt de vista de la química verda per a l'oxidació dels alcohols primaris.



Emprant com a catalitzador l'opció A (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>) o bé l'opció B (MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>).

### Preparació de clorurs anhidres

Quina de les següents reaccions per preparar 1 mol de  $\text{FeCl}_3$  escolliríeu atenent el principi d'economia molecular?

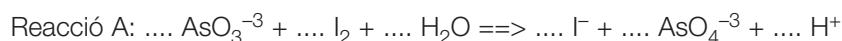


### Velocitat de reacció

Una determinada reacció química a 25 °C triplica la seva velocitat en emprar un catalitzador de Pt, que com ja sabeu és un metall preciós escàs i molt car. Si la reacció té una energia d'activació de  $15.200 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ , quant convindria augmentar la temperatura de treball respecte a 25 °C per assolir la mateixa velocitat? Quines seran les condicions de treball més recomanables?

### Estandardització de iode

Igualau les dues reaccions redox i escriviu-ne les semireaccions corresponents. Quina de les opcions (A o B) escolliríeu per a l'estandardització de iode tenint en compte els principis de la química verda?



### Els clorofluorocarbonis i hidroclorofluorocarbonis

Els clorofluorocarbonis i hidroclorofluorocarbonis es designen amb les lletres CFC i HCFC respectivament, seguides d'un número, el qual permet formular el compost. Per fer-ho cal sumar-hi 90, de manera que s'obté un nombre XYZ en què:

X = nombre d'àtoms de C

Y = nombre d'àtoms de H

Z = nombre d'àtoms de F

El nombre d'àtoms de Cl es troba amb l'expressió  $2(X + 1) - Y - Z$

Formuleu els compostos següents: CFC-11, CFC-12 i HCFC-22

Quina és la seva aplicació? Són tòxics? Quins són els seus efectes perjudicials per al medi ambient?

## 6. Bibliografia

[1] HJERESSEN, D. J.; SCHUTT, D. L.; BOESE, J. M. «Green Chemistry and Education». Journal of Chemical Education (77) 12/2000.

[2] CANN, M. C.; DICKNEIDER, T. A. «Infusing the chemistry curriculum with green chemistry using real-world examples, web modules, and atom economy in organic chemistry courses». Journal of Chemical Education (81) 7/2004.

[3] LIDE, D. R. (ed., 2005). Handbook of chemistry and physics. CRC Press.

## Capítol 31

# Obtenció de l'òxid de coure (II) i recuperació com a coure metàl·lic

LOURDES ROSET, NATIVITAT SALVADÓ CABRÉ I EMILIA PAPIOL VERA

Departament d'Enginyeria Química

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG)

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

Es presenta una pràctica des del punt de vista de fonament i experimentació química al laboratori. Es pretén familiaritzar l'alumne amb la síntesi inorgànica, les diferents operacions i els muntatges experimentals.

S'hi introdueixen diferents operacions experimentals amb el seu corresponent concepte químic: pesada, muntatges per minimitzar reactius i gasos, dissolució de metalls, precipitació, separació de sòlid d'una dissolució.

Es pretén que l'alumne conegui les substàncies pel que fa a reactivitat i el seu grau de toxicitat, manipulant adequadament els reactius i el material utilitzats, així com les normes de seguretat que s'han de tenir en compte:

- Elecció adequada de la protecció individual al laboratori (ulleres de seguretat, guants...).
- Elecció de l'espai de treball (campana de gasos i altres).
- Tractament i classificació de residus.

La pràctica s'inicia amb l'oxidació del metall coure mitjançant un muntatge que permeti la dissolució completa del metall, així com la recuperació del gas tòxic alliberat: diòxid de nitrogen. Després d'una sèrie d'operacions, s'aconsegueix precipitar l'ió coure com a carbonat bàsic de coure. Finalment es calcina aquest últim compost fins a arribar a l'obtenció de l'òxid de coure(II).

La pràctica es completa amb la recuperació de l'òxid de coure(II) obtingut a coure metall. L'òxid de coure(II) es dissol en medi àcid i es redueix a coure metall per l'acció reductora del zinc metall.

Mitjançant la pràctica s'incideix en el compliment dels aspectes mediambientals següents: la importància de la recuperació dels reactius i productes, la manipulació correcta de les substàncies involucrades, la prevenció de riscos quant a toxicitat de productes, i la classificació, l'emmagatzematge i el tractament dels residus generats.

## 2. Objectius

La pràctica persegueix diferents objectius. El primer objectiu és l'obtenció de l'òxid d'un metall a partir de coure (restes de cables i tubs) i la posterior recuperació a l'estat metàl·lic. El segon és l'estudi de la reactivitat química del metall: les reaccions d'oxidació-reducció i les reaccions de precipitació. El tercer és la determinació del rendiment en les substàncies obtingudes. Finalment, l'avaluació i el tractament del residus generats.

## 3. Fonaments

La pràctica es basa en els fonaments següents:

1. Reaccions d'oxidació-reducció de metalls en medi àcid amb els corresponents potencials de reducció estàndard. Espontaneïtat de les reaccions químiques redox a partir de la variació de l'energia lliure de Gibbs i de l'equació de Nernst.
2. Propietats físiques i químiques del gas tòxic emès.
3. Reaccions de precipitació usant com a reactiu el carbonat de sodi; influència de la reacció de l'anió carbonat en el medi aquós (reacció d'hidròlisi).
4. Procés d'assecatge: eliminació d'aigua d'humitat i d'aigua d'hidratació.
5. Reaccions de descomposició tèrmica dels sòlids per calcinació.
6. Càlculs dels rendiments de la reacció.

## 4. Metodologia

### 4.1 Mesures de prevenció de riscos i seguretat del laboratori

Lloc de treball: campana extractora de gasos.

Equips de protecció individual: bata, guants i ulleres.

## 4.2 Material

Balança electrònica (+/- 0,01 g)  
Bomba de buit  
Bec de Bunsen  
Barreta agitadora  
Estufa  
Embut de Büchner  
Càpsula de porcellana  
Comptagotes  
Embut de forma alemanya  
Espàtula  
Flascó rentador d'aigua destil·lada  
Gomes adaptadores de l'embut de Büchner  
Matrassos d'Erlenmeyer de 250 mL  
Matràs de fons rodó de 250 mL  
Matràs de Kitasato de 500 mL  
Paper de filtre de porositat normal  
Paper indicador de pH  
Pinça i nou  
Provetes de 25 mL, 100 mL i 250 mL  
Suport  
Tap de goma amb un forat  
Tres peus  
Tub de goma prim per fer la sifonació  
Vasos de precipitats de 100 mL, 250 mL, 400 mL

## 4.3 Reactius

Acetona  
Àcid sulfúric concentrat  
Aigua destil·lada / gel  
Amoníac concentrat  
Carbonat de sodi decahidratat  
Zinc en pols  
Coure (cable o ferralla)

## 4.4 Recollida de residus

D'acord amb el Pla integral de recollida selectiva de residus a l'EPSEVG, els residus tòxics i perillosos generats als laboratoris de l'Escola reben un tractament diferenciat de la resta de residus. Per a aquest cas existeix un contracte amb una empresa de tractament de residus especials, l'empresa TQMA (Tecnologia Química i Medi Ambient). Els residus dels laboratoris de química se separen en vuit tipus que s'emmagatzemen en bidons especials proporcionats per l'empresa TQMA. Cada bidó o recipient especial porta un espai per enganxar-hi una etiqueta que identifica el tipus de residu que conté. Quan hi ha una quantitat apreciable de residus emmagatzemats, es truca a l'empresa TQMA i aquesta els passa a recollir. L'empresa TQMA els classifica i els porta a les plantes de tractament autoritzades per la Junta de Residus.

En el cas d'aquesta pràctica, un cop classificats i separats els residus generats en recipients del laboratori, se'ls fan unes proves (anàlisi de pH i propietats físiques...) i un tractament (neutralització, filtra-

ció...), si es considera oportú, abans de la ubicació dels residus en els recipients definitius de recollida de l'empresa TQMA.

Grup 3 de solucions aquoses (etiqueta blava) en envasos de polietilè estàndard:

Solucions aquoses bàsiques (amoníac).

Solucions aquoses inorgàniques (acetat de sodi): si tenen el pH adequat (5-8) es llencen per la pica de l'aigüera diluint amb molta aigua de l'aixeta. Si no el tenen, es fa una neutralització amb les substàncies àcides o bàsiques adequades.

Solucions aquoses orgàniques de metalls pesants –totes les sals de coure(II) procedents de la identificació de l'etanal.

Solucions aquoses orgàniques de crom(III) procedents de la destil·lació.

Grup 4 d'àcids (etiqueta vermella) en envasos de polietilè estàndard:

Aquest grup correspon als àcids inorgànics i les seves solucions aquoses concentrades (més del 10 %).

Solucions d'àcid sulfúric 1 M. Aquests residus s'acostumen a guardar per usar-los per neutralitzar solucions salines. També es poden abocar directament a la pica diluint amb molta aigua.

Solucions d'àcid sulfúric concentrat. Aquests residus s'acostumen a guardar per netejar el material de vidre. També s'acostumen a guardar per usar-los per neutralitzar solucions salines.

Grup 6 de sòlids (etiqueta groga) en envasos de polietilè estàndard o de cartró:

Sòlids inorgànics sintetitzats –òxid de coure(II) i coure(0). Aquests residus, si no estan en quantitats abundants, s'aprofiten per fer pràctiques l'any següent.

Grup 8 de vidre contaminat (sense etiqueta) en envasos de cartró:

Aquest grup correspon al material de vidre contaminat amb restes de productes químics. Dins d'aquest grup s'inclouen ampolles de vidre buides tancades amb restes de productes químics. El material de vidre net o no contaminat amb productes químics no és un producte perillós, sinó que s'inclou dins dels residus banals.

## 5. Desenvolupament

### 5.1 Obtenció de l'òxid de coure(II)

1. Preparació de 40 mL de  $\text{HNO}_3(\text{aq})$  6 M a partir de  $\text{HNO}_3$  concentrat. Prepareu 40 mL  $\text{HNO}_3$  6 M a partir de  $\text{HNO}_3$  concentrat, tenint en compte les dades de densitat i percentatge de l'àcid concentrat, i fent la corresponent dilució amb aigua destil·lada.

2. Addició de 20 mL  $\text{HNO}_3(\text{aq})$  6 M a un matràs d'Erlenmeyer de 250 mL que conté 3 g de cable elèctric (ferralla).

3. Muntatge per evitar pèrdues del  $\text{NO}_2$ . Damunt del reactor (matràs d'Erlenmeyer) se situa un embut de forma alemanya i, evitant que quedi tancat hermèticament, es posa al damunt un matràs de fons rodó que contingui una mescla de gel i d'aigua per permetre que els vapors de  $\text{NO}_2$  tornin a condensar i no escapin a l'atmosfera.

4. Escalfament per activar la reacció.



**Figura 1.** Muntatge per a la producció de  $\text{NO}_2$

5. Dissolució total del coure. Si la reacció s'atura i encara queda coure per dissoldre, es fa una nova addició de més  $\text{HNO}_3(\text{aq})$  6 M.

6. Ebullició de la solució del matràs d'Erlenmeyer uns 15 minuts per eliminar l'excés d'àcid.

7. Refredament de la solució i dilució amb uns 100 mL d'aigua.

Preparació de la solució de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ : es dissolen 10,5 g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  en 225 mL. Si la solució és tèrbola, es filtra.

8. Addició de la solució de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (aq.) damunt de la solució aquosa de coure(II), molt lentament i agitant, fins que la solució sobrenedant tingui un pH dèbilment bàsic.

9. Sedimentació del precipitat obtingut,  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , el temps necessari.

10. Eliminació de les aigües mares de  $\text{NaNO}_3$  per sifonació del líquid sobrenedant.

Sifonació: és una operació física que consisteix a separar les aigües mares que es troben barrejades amb un sòlid que ens interessa obtenir mitjançant l'aplicació del buit. Abans de sifonar, s'ha de deixar sedimentar el sòlid durant una estona fins que quedi al fons d'un vas de precipitats. Per fer la sifonació s'usa un matràs de Kitasato i es tanca el matràs amb un tap amb un forat per on s'acobla un trosset de tub de goma amb un comptagotes a l'extrem. Es connecta el buit pel tub lateral del matràs i s'introdueix el comptagotes al vas on hi ha la solució, per tal d'anar xuclant amb molta cura el líquid que volem eliminar.

Rentatge del precipitat quatre vegades amb aigua destil·lada.

Rentatge del precipitat: en cada rentada s'afegeix el mateix volum d'aigua que el volum inicial d'aigües mares sifonat, s'agita bé, es deixa reposar fins que sedimenti bé i se sifona.

11. Filtració amb l'embut de Büchner.

12. Assecatge del precipitat (en càpsula de porcellana) a  $100^\circ\text{C}$  a l'estufa.

13. Calcinació del precipitat.

Calcinació: és una operació química que consisteix a descompondre un sòlid per escalfament a una certa temperatura. En aquesta operació la substància sòlida inicial es descompon en altres substàncies que poden estar en qualsevol dels tres estats físics. Si la temperatura d'escalfament no és gaire alta i no hi ha producció de líquid, aquesta operació s'acostuma a fer en una càpsula de porcellana.

Un cop s'ha escalfat el sòlid, el residu que queda es deixa refredar i es pesa. Això es repeteix fins a pes constant per tal d'assegurar la finalització de l'operació química proposada.

## 5.2 Recuperació del coure metàl·lic a partir de l'òxid de coure(II)



**Figura 3.** La calcinació

1. Introducció en un vas de precipitats d'1 g del CuO obtingut.
2. Preparació  $\text{H}_2\text{SO}_4$  3 M. A partir del  $\text{H}_2\text{SO}_4$  6 M preparat. Abans es fa la dilució corresponent.
3. Addició de petites quantitats de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  3 M fins a la dissolució del sòlid negre.
4. Filtració i recollida de la solució de  $\text{CuSO}_4$  en un matràs d'Erlenmeyer.
5. Addició de petites quantitats de zinc en pols. Aparició de coure en estat sòlid. Comprovació de l'absència de l'ió  $\text{Cu}^{2+}$ . S'afegeix una gota de la solució (on probablement ja no queda ió  $\text{Cu}^{2+}$ ) a un tub d'assaig que conté 1 mL de  $\text{NH}_3$  concentrat. Si encara queda ió  $\text{Cu}^{2+}$ , apareixerà un color blau del complex  $\text{Cu}(\text{NH}_3)^{2+}$ .
6. Addició de 30 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  3 M per eliminar el zinc que ha quedat en excés. El coure metàl·lic no reacciona en aquestes condicions.
7. Separació del coure de la solució aquosa per decantació. Rentatge del sòlid amb petites fraccions d'aigua destil·lada, repetint la decantació cada vegada. I rentatge posterior del sòlid amb petites fraccions d'acetona, repetint la decantació cada vegada.  
  
Decantació: és una operació física que consisteix en la separació d'un sòlid que inicialment es troba dispers en una solució. Perquè es pugui aconseguir la separació del sòlid, cal que prèviament el sòlid s'hagi deixat reposar un cert temps per tal que s'hagi quedat sedimentat al fons del recipient. A partir d'aquest moment s'inclina lentament el recipient per tal que el líquid o solució vagi lliscant per les parets del recipient fins que s'aconsegueixi tenir únicament el sòlid en el recipient.
8. Assecatge del sòlid a l'aire.
9. Pesada del sòlid i càlcul del rendiment del coure recuperat.

## 6. Qüestions

- a) Càlculs necessaris per preparar 40 mL de  $\text{HNO}_3$  6 M a partir de l'àcid concentrat.
- b) Importància que el matràs no quedi completament tancat quan es fa l'atac del coure amb  $\text{HNO}_3$ .
- c) Aspectes mediambientals que es tenen en compte en la pràctica.
- d) Reaccions químiques.
- e) Gas que s'allibera. Propietat física que l'identifica.
- f) Descripció d'un procediment per eliminar totalment l'emissió del gas tòxic.
- g) Objectiu de la sifonació i el rentatge del carbonat bàsic de coure(II).
- h) Manera d'eliminar les aigües d'humitat i d'hidratació del carbonat bàsic de coure(II).



- i) Objectiu de la calcinació.
- j) Propietats electroquímiques del coure i del zinc.
- k) Càlcul dels rendiments dels productes obtinguts: CuO i Cu.
- l) Classificació dels residus generats: separació dels residus i recollida en recipients adequats.

## 7. Bibliografia

- [1] LEE, J. R. Concise inorganic chemistry (4a edició). Ed. Chapman&Hall.
- [2] SZAFRAN, Z.; PIKE, R.; SINGH, M. (1991). Microscale Inorganic Chemistry. Ed. Wiley & Sons.
- [3] ADAMS, D. M.; RAYNOR, J. (1965). Advanced Practical Inorganic Chemistry. Ed. Wiley & Sons.
- [4] SCHLESSINGER, G. (1962). Inorganic Laboratory Preparation. Chem. Pub. Co. New York.



## Capítol 32

# Propietats i reactivitat de l'etanol

LOURDES ROSET, NATIVITAT SALVADÓ CABRÉ I EMILIA PAPIOL VERA

Departament d'Enginyeria Química

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG)

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

Es presenta una pràctica des del punt de vista de fonament i experimentació química en el laboratori. Es vol familiaritzar l'alumne amb la reactivitat de grups funcionals de compostos orgànics, operacions unitàries i muntatges experimentals.

S'introdueixen diferents operacions experimentals amb el seu corresponent concepte químic: pesada, mesura de volums, dissolució de sòlids en medi àcid, reaccions redox en matràs rodó esmerilat, reaccions redox en condicions més enèrgiques de contacte líquid-vapor amb el muntatge de reflux, operacions de separació per destil·lació amb el muntatge corresponent i anàlisi del destil·lat amb reaccions qualitatives d'identificació en tubs d'assaig. S'aprofita l'ús de la destil·lació per parlar dels procediments industrials actuals que poden contaminar: refineries i petroquímiques en general.

Es pretén que l'alumne conegui les substàncies a nivell de reactivitat i el seu grau de perillositat (toxicitat, corrosivitat, inflamabilitat...), manipulant adequadament els reactius i el material utilitzats, així com les normes de seguretat que s'han de tenir en compte:

- Elecció adequada de la protecció individual al laboratori (ulleres de seguretat, guants, etc.).
- Elecció del material i dels aparells (manta calefactora...) i decisió de l'espai de treball (campana de gasos...).
- Tractament i classificació dels residus generats.

La pràctica s'inicia amb l'oxidació suau de l'etanol a etanal mitjançant l'oxidant dicromat de sodi en medi àcid, amb un muntatge que posteriorment permetrà la destil·lació i la separació de l'etanal. A continuació s'identifica el caràcter reductor de l'etanal obtingut amb les proves de Fehling –sals de

coure(II) i tartrats alcalins en medi bàsic– i del mirall de plata.

La pràctica es completa amb l'oxidació enèrgica de l'etanol a àcid etanoic (àcid acètic) amb el mateix oxidant i amb un muntatge de reflux durant un cert temps. A continuació se separa l'àcid etanoic per destil·lació amb el muntatge adequat. Novament s'identifica el caràcter àcid del producte obtingut amb un medi bàsic adequat (carbonat de sodi).

A través de la pràctica s'incideix en el compliment dels aspectes mediambientals següents: la importància de la minimització dels reactius i la recuperació dels productes, la manipulació correcta de les substàncies involucrades, la prevenció de riscos quant a toxicitat i inflamabilitat dels productes, i la classificació, l'emmagatzematge i el tractament de residus generats.

## 2. Objectius

La pràctica persegueix diferents objectius. El primer objectiu és l'estudi de la reactivitat química dels diferents grups funcionals: alcohol, aldehid i àcid. El segon és l'oxidació de l'etanol en diferents condicions: augment de la concentració del medi oxidant i optimització del contacte líquid-vapor per reflux. El tercer és la separació dels productes per destil·lació simple i la identificació dels productes separats. El quart és l'estudi i la localització de tots els punts que poden generar un impacte ambiental (manipulació de productes de diversa perillositat, vapors tòxics, risc elèctric, despesa energètica, consum d'aigua...). Finalment, l'avaluació i el tractament dels residus generats.

## 3. Fonaments

La pràctica es basa en els fonaments següents:

1. Reactivitat química dels diferents grups funcionals. Oxidació d'etanol a etanal i oxidació posterior a àcid etanoic. Estudi de les característiques de l'oxidant usat.
2. Propietats físiques de l'etanal i de l'àcid etanoic, que permetran la seva separació del medi de reacció: volatilitat, punt d'ebullició, pressió de vapor.
3. Operació unitària de transferència de matèria i de calor: destil·lació.
4. Operació unitària de transferència de calor: condensació del vapor.
5. Anàlisi de les propietats físiques i químiques dels destil·lats. Reaccions qualitatives d'identificació del producte.
6. Avaluació dels punts de risc del muntatge, toxicitat i inflamabilitat dels diferents reactius, mesures de seguretat.

## 4. Metodologia

### 4.1 Mesures de prevenció de riscos i seguretat del laboratori

Lloc de treball: campana extractora de gasos.

Equips de protecció individual: bata, guants i ulleres.

### 4.2 Material

Balança electrònica (+/- 0,01 g)

Bec de Bunsen

Manta calefactora

Cèrcol de suro

Barreta agitadora

Comptagotes

Espàtula

Flascó rentador d'aigua destil·lada

Material porós (ebullició no violenta)

Matrassos d'Erlenmeyer de 250 mL

Matràs esmerilat de fons rodó de 250 mL

Paper indicador de pH

Peça de vidre esmerilada adaptadora per a l'extrem del refrigerant

Peça de vidre esmerilada amb 2 bifurcacions (cap de destil·lació)

Pinça i nou

Provetes de 10 mL, 25 mL i 100 mL

Refrigerant esmerilat

Suport

Termòmetre d'òpal esmerilat de 150 °C

Tres peus

Tubs d'assaig

Tubs de goma prims per conduir l'aigua del refrigerant

Vasos de precipitats de 100 mL, 250 mL i 400 mL

### 4.3 Reactius

Àcid sulfúric concentrat 1 M

Aigua destil·lada

Amoníac concentrat 2 M

Etanol

Carbonat de sodi decahidratat

Dicromat de sodi

Hidròxid de sodi 2 M

Reactiu de Fehling 1 –solució sulfat de coure(II)

Reactiu de Fehling 2 –solució de tartrats alcalins en medi bàsic

Solució de nitrat de plata 0,05 M

### 4.4 Recollida de residus

D'acord amb el Pla integral de recollida selectiva de residus a l'EPSEVG, els residus tòxics i perillosos generats als laboratoris de l'Escola reben un tractament diferenciat de la resta de residus. Per a

aquest cas existeix un contracte amb una empresa de tractament de residus especials, l'empresa TQMA (Tecnologia Química i Medi Ambient). Els residus dels laboratoris de química se separen en vuit tipus, que s'emmagatzemen en bidons especials proporcionats per l'empresa TQMA. Cada bidó o recipient especial porta un espai per enganxar-hi una etiqueta que identifica el tipus de residu que conté. Quan hi ha una quantitat apreciable de residus emmagatzemats, es truca a l'empresa TQMA i aquesta els passa a recollir. L'empresa TQMA els classifica i els porta a les plantes de tractament autoritzades per la Junta de Residus.

En el cas d'aquesta pràctica, un cop classificats i separats els residus generats en recipients del laboratori, se'ls fan unes proves (anàlisi de pH i propietats físiques...) i un tractament (neutralització, filtració...), si es considera oportú, abans de la ubicació dels residus en els recipients definitius de recollida de l'empresa TQMA.

#### *Grup 3 de solucions aquoses (etiqueta blava) en envasos de polietilè estàndard*

- Solucions aquoses bàsiques (amoníac).
- Solucions aquoses inorgàniques (acetat de sodi). Si tenen el pH adequat (5-8) es llencen per la pica de l'aigüera diluint amb molta aigua de l'aixeta. Si no el tenen, es fa una neutralització amb les substàncies àcides o bàsiques adequades.
- Solucions aquoses orgàniques de metalls pesants –totes les sals de coure(II) procedents de la identificació de l'etanal.
- Solucions aquoses orgàniques de crom(III) procedents de la destil·lació.

#### *Grup 4 d'àcids (etiqueta vermella) en envasos de polietilè estàndard*

Aquest grup correspon als àcids inorgànics i les seves solucions aquoses concentrades (més del 10 %).

- Solucions d'àcid sulfúric 1 M. Aquests residus s'acostumen a guardar per usar-los per neutralitzar solucions salines. També es poden abocar directament per la pica diluint amb molta aigua.
- Solucions d'àcid sulfúric concentrat. Aquests residus s'acostumen a guardar per netejar el material de vidre. També s'acostumen a guardar per usar-los per neutralitzar solucions salines.

#### *Grup 7 especials (etiqueta lila) en envasos de polietilè estàndard o de cartró*

A aquest grup pertanyen els productes químics que per la seva toxicitat o perillositat no poden ser inclosos en cap dels altres grups.

- Sòlids inorgànics (dicromat de sodi).

#### *Grup 8 de vidre contaminat (sense etiqueta) en envasos de cartró*

Aquest grup correspon al material de vidre contaminat amb restes de productes químics. Dins d'aquest grup s'inclouen ampolles de vidre buides tancades amb restes de productes químics. El material de vidre net o no contaminat amb productes químics no és un producte perillós sinó que s'inclou dins dels residus banals.

## 5. Desenvolupament

### 5.1 Oxidació de l'etanol a etanal

1. Addició de 10 ml d'àcid sulfúric 1 M, 3 g de dicromat de sodi i 2-3 trossets de material porós (per evitar l'ebullició violenta i no homogènia) a un matràs rodó esmerilat de 250 ml.

2. Agitació suau fins a la dissolució total del sòlid i obtenció d'un medi homogeni de color taronja.

3. Addició acurada de 5 ml d'etanol (INFLAMABLE) al matràs rodó. Immediatament es tanca el matràs i s'adapta al muntatge del punt següent.

4. Muntatge de l'operació de destil·lació (figura 1). El matràs rodó es col·loca en una manta calefactora i es fixa a un suport amb una pinça i una nou. Es connecta una peça de vidre esmerilada amb dues bifurcacions damunt del matràs rodó amb els objectius següents: adaptar un termòmetre esmerilat a la part superior del matràs i connectar un refrigerant esmerilat a la part lateral del matràs. El refrigerant també es fixa a un suport amb una pinça i una nou. Al final del refrigerant es col·loca una peça adaptadora esmerilada que té per objectiu portar el destil·lat a un matràs d'Erlenmeyer col·lector. Es fa circular aigua de l'aixeta a contracorrent pels dos orificis de la camisa exterior del refrigerant.



**Figura 1.** Muntatge de la destil·lació

5. Connexió de la manta calefactora i posada en marxa de la destil·lació: es destil·la la mescla del matràs per tal de separar el producte obtingut, amb escalfament molt suau, fins que es recullin uns 3 ml de líquid destil·lat. S'olora el destil·lat amb cura i es compara amb l'olor de l'etanol. Es comprova l'evolució de la temperatura mentre dura la destil·lació. S'observa el canvi de coloració de la mescla.

Destil·lació simple: és una operació unitària física que consisteix en la separació de les substàncies aprofitant el seu diferent punt d'ebullició, la seva diferent pressió de vapor o la seva diferent volatilitat.

6. Identificació del caràcter reductor de la funció aldehid present en el producte obtingut.

#### *Prova de Fehling*

Preparació del reactiu: es necessita el catió  $\text{Cu}^{+2}$  en solució bàsica. En un tub d'assaig s'addiciona 1 ml de solució de Fehling I (solució de sulfat de  $\text{Cu}^{+2}$ ), i s'hi afegeix, gota a gota, solució de Fehling II (solució de tartrat en medi alcalí) fins a redissoldre el precipitat blau d'hidròxid de coure(II) i obtenir la solució blava fosca alcalina del complex de  $\text{Cu}^{+2}$  amb l'ió tartrat en medi bàsic. Es posa 1 ml de destil·lat en un tub d'assaig i s'hi afegeix la solució de Fehling preparada. Es fa bullir lleugerament la mescla en un bany d'aigua i s'espera (s'han d'anar anotant tots els canvis) fins a l'aparició d'un sòlid de color vermell fosc. Observa les diferents coloracions del precipitat abans d'arribar al color definitiu.

#### *Prova del mirall de plata*

Preparació del reactiu: es necessita el catió  $\text{Ag}^{+}$  en solució bàsica. En un tub d'assaig molt net es posen 5 ml d'una solució de nitrat de plata 0,05 M i s'hi adiciona 1 gota d'hidròxid de sodi 2 M; en aparèixer el precipitat, es va afegint amoníac 2 M, gota a gota, fins que es forma una solució incolora del complex de  $\text{Ag}^{+}$  amb l'amoníac en medi bàsic. S'addicionen de 3 a 5 gotes de destil·lat al tub d'assaig que

conté el complex de plata i s'escalfa amb suavitat en un bany d'aigua. S'espera fins a observar l'aparició d'una fina capa de plata metàl·lica damunt les parets del tub. No emmagatzemeu aquesta mescla perquè pot arribar a ser explosiva per evaporació. Llenceu-la diluint-la amb molta aigua.

## 5.2 Oxidació de l'etanol a àcid etanoic (àcid acètic)

1. Addició de 10 ml d'àcid sulfúric 1 M, 5 g de dicromat de sodi i 2-3 trossets de material porós (per evitar l'ebullició violenta i no homogènia) a un matràs rodó esmerilat de 250 ml.

2. Agitació suau fins a la dissolució total del sòlid i obtenció d'un medi homogeni de color taronja.

3. Addició lenta de 2 ml d'àcid sulfúric concentrat (CORROSIU).

4. Refredament del matràs.

5. Addició acurada d'1 ml d'etanol (INFLAMABLE) al matràs rodó. Immediatament es tanca el matràs i s'adapta al muntatge del punt següent.

6. Muntatge de l'operació de reflux (figura 2). El matràs rodó es col·loca en una manta calefactors i es fixa a un suport amb una pinça i una nou. Es connecta un refrigerant damunt del matràs rodó. El refrigerant també es fixa a un suport amb una pinça i una nou. Es fa circular aigua de l'aixeta pels dos orificis de la camisa exterior del refrigerant.



**Figura 2.**  
Muntatge del reflux

7. Connexió de la manta calefactors i posada en marxa del reflux. Es fa bullir la mescla suaument a reflux durant 20 minuts. Es deixa refredar el matràs. S'observa el canvi de coloració de la mescla.

Reflux: és una operació física que consisteix a optimitzar el contacte líquid-vapor dels reactius. Es genera un vapor dels reactius i aquest torna a condensar, i per tant torna a posar-se en contacte amb la mescla inicial líquida. En la pràctica aquesta optimització del contacte millora el temps de contacte i possibilita la formació de l'etanal a àcid etanoic.

8. Modificació del muntatge: realització de l'operació de destil·lació (figura 1) per tal de separar el producte obtingut. El matràs rodó es col·loca en una manta calefactors i es fixa a un suport amb una pinça i una nou. Es connecta una peça de vidre esmerilada amb dues bifurcacions damunt del matràs rodó amb els següents objectius: adaptar un termòmetre esmerilat a la part superior del matràs i connectar un refrigerant a la part lateral del matràs. El refrigerant també es fixa a un suport amb una pinça i una nou. Al final del refrigerant es col·loca una peça adaptadora esmerilada que té per objectiu portar el destil·lat a un matràs d'Erlenmeyer col·lector. Es fa circular aigua de l'aixeta a contracorrent pels dos orificis de la camisa exterior del refrigerant.

9. Connexió de la manta calefactors i posada en marxa de la destil·lació. Es destil·la la mescla del matràs, amb escalfament molt suau, fins que es recullin uns 3 ml de líquid destil·lat. S'olora el destil·lat amb cura i es compara amb l'olor de l'etanol. Es comprova l'evolució de la temperatura mentre dura la destil·lació.

10. Identificació del caràcter àcid en el producte obtingut. Es posen unes gotes de destil·lat damunt del paper indicador de pH lleugerament humitejat. S'observa el canvi de color i es calcula el pH apro-



ximat del destil·lat. S'addicionen unes gotes de destil·lat a 1 g de carbonat de sodi sòlid que es troba en un vidre de rellotge. S'observen els canvis produïts i s'interpreten amb les equacions químiques corresponents.

## 6. Qüestions

- a) Quina de les reaccions de l'etanol produeix un agent reductor? Anoteu l'equació química corresponent.
- b) Quina de les reaccions de l'etanol no produeix un agent reductor? Anoteu l'equació química corresponent.
- c) Per què el color taronja del dicromat esdevé verd? Justifiqueu-ho amb la semiequació de reducció corresponent.
- d) Aspectes mediambientals que es tenen en compte a la pràctica.
- e) Quines condicions i proporcions relatives de reactius cal usar per oxidar l'etanol i afavorir la formació a etanal i a àcid etanoic?
- f) Quin grup funcional hi haurà en el producte de deshidratació de l'etanol?
- g) Característiques físiques i químiques dels compostos obtinguts en els destil·lats de les dues destil·lacions. Equacions químiques corresponents.
- h) Utilització dels productes obtinguts en la indústria química.
- i) Classificació dels residus generats: separació dels residus i recollida en recipients adequats.
- j) Importància de l'operació de reflux en l'obtenció de l'àcid etanoic i en els processos en general.
- k) Explicació de l'ús de la destil·lació en aquesta pràctica.
- l) Descripció (reactius, muntatges, recursos, despeses...) d'una destil·lació amb poques incidències mediambientals. Comparació amb una altra que produeixi molt impacte ambiental. Inspireu-vos en l'exemple de la mateixa pràctica.
- m) Explicació de l'ús de la solució de Fehling II en medi bàsic.
- n) Explicació de la necessitat d'usar una sal de plata en medi bàsic en la caracterització de l'etanal.

## 7. Bibliografia

[1] PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; ENGEL, R. G. (1999). Introduction to organic laboratory techniques (3a edició). Brooks Cole.

[2] PEAVY, H. S.; ROWE, D. R.; TCHOBANOGLOUS, G. (1985). Environmental Engineering. Ed. McGraw-Hill.

[3] COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. (1988). Ingeniería Química I y II. Ed. Reverté.

[4] MCCABE, W. L. (2002). Operaciones unitarias en ingeniería química (6a edición). Ed. McGraw-Hill.

## Capítol 33

# V·LAB3D. L'aprenentatge mitjançant la pràctica: simulació virtual i interactiva en 3D d'un laboratori de química

IGNASI CASAS I PONS I MANUEL AGUILAR SANJUAN

Departament d'Enginyeria Química

Universitat Politècnica de Catalunya

### 1. Introducció

A partir de la idea inicial de millorar amb la simulació virtual el treball pràctic de laboratori de química dels alumnes, hem desenvolupat un programa informàtic en què ens situem en un entorn virtual animat i en tres dimensions que reproduïx un laboratori de química i en què es pot interaccionar amb una sèrie d'elements per dur a terme una pràctica de laboratori. La versió actual permet realitzar valoracions àcid-base, tot i que actualment estem treballant en una segona fase en què s'inclourà una pràctica de precipitació d'ions metàl·lics. No descartem en un futur, si es donen les condicions adients, anar ampliant el ventall de possibilitats que el programa ofereix actualment.

Com a pas previ d'aquest programa, cal dir que ja vam desenvolupar anteriorment un programa informàtic de càlcul en un entorn Windows que permet la resolució de problemes complexos de sistemes químics en equilibri. El pas següent ha estat voler mostrar els resultats d'aquest programa (inicialment en forma de números i de gràfics) en la forma macroscòpica en què s'observen els canvis que tenen lloc en produir-se les reaccions químiques (per exemple, canvis de colors, mesures de pH, etc.). D'aquesta manera, un dels punts que per a nosaltres era prioritari en començar el projecte, i que podem dir que hem assolit, és que amb aquest programa l'alumne no assisteix a una simple demostració animada, més o menys agradable de disseny, sinó que el que fa és interactuar de manera efectiva amb el material de laboratori i realitzar una sèrie d'experiències, en alguns casos guiades i amb ajuts (etapa de formació) i en altres casos sense cap ajut informàtic (etapa de «test»).

L'ambició objectiu final que ens plantejem amb el nostre treball és poder acostar al màxim possible i de manera efectiva l'alumne a problemes i a situacions representatius tant del seu hipotètic futur àmbit professional com mediambiental, amb un aprenentatge basat en una situació tant propera a la real com sigui possible. Així mateix, si tenim en compte els plantejaments de l'espai europeu d'educació superior, es fa evident la necessitat d'un programa com el que s'ha desenvolupat, que permet l'aprenentatge actiu per part de l'estudiant sense la necessitat de la presència del professor, i que li permet realitzar l'experimentació d'una manera interactiva que el porti a resoldre les situacions amb què es pugui anar trobant. No pretenem en cap cas substituir la feina real d'un laboratori de química, però sí donar a l'alumne una base que, davant una situació real, li permeti sortir-se'n de manera més efectiva gràcies a l'aprenentatge que ja haurà rebut.

## 2. Objectius

La major part de les assignatures de Química que s'imparteixen tant a primer com a segon cicle de les titulacions d'Enginyeria Industrial i Enginyeria Química inclouen un nombre relativament elevat d'hores de pràctiques de laboratori, imprescindibles per a la formació en una disciplina de gran aplicació pràctica.

De tota manera, es constata clarament el fet que el nombre i la superfície d'equipaments docents necessaris per realitzar aquests treballs pràctics no es corresponen amb l'elevat nombre d'alumnes que necessiten dur a terme les experiències de laboratori. Això comporta, com es pot demostrar, que en els darrers cursos el nombre de pràctiques que els alumnes fan al laboratori ha anat disminuint any rere any, en detriment de la seva formació més aplicada.

A aquest primer problema, s'hi afegeix l'elevada inversió econòmica necessària per a la realització de les experiències de laboratori, tant en l'adquisició d'equipaments com en el manteniment d'aquests, així com en la compra de reactius i material fungible.

Finalment, encara que no menys important, la consciència ecològica dóna un nou motiu de preocupació atesa la producció de residus contaminats que comporten els experiments químics, de difícil gestió i recuperació, que implica, a més a més, una nova i important despesa econòmica.

Per tant, la finalitat del projecte realitzat es pot resumir en els punts següents:

- Millorar la formació pràctica dels alumnes.
- Adaptar l'ensenyament actual a les noves tecnologies multimèdia semipresencials o no presencials.
- Reduir les despeses tant de compra de material com de gestió dels residus generats.
- Retallar de manera dràstica la generació de residus al laboratori.
- Aportar una important ajuda en la docència de pràctiques de química i en aplicacions industrials i mediambientals relacionades amb la química.

Així mateix, el programa es planteja amb un apartat d'aprenentatge i ajuda, de manera que després d'una necessària etapa de formació (guiada o no per part del professor), l'alumne podrà continuar el seu treball d'aprenentatge de manera totalment independent. Finalment, un cop l'alumne cregui que ja ha assolit els ensenyaments que s'hi proposen, el mateix programa podrà ser utilitzat per fer l'avaluació de la qualitat i la quantitat de coneixements adquirits per l'alumne.

En definitiva, als objectius específics presentats més amunt encara se n'hi poden afegir altres, com ara:

- Familiaritzar l'alumne amb la utilització de bases de dades hidroquímiques i amb els càlculs fisicoquímics.
- Facilitar l'aprenentatge directe de les característiques del material bàsic de laboratori.
- Ajudar a seleccionar els elements que s'han d'utilitzar en un determinat experiment.
- Permetre reproduir les etapes de treball i proporcionar elements de càlcul, simultanis amb l'experimentació.
- Evitar, en molts casos, la mala utilització i el trencament del material.
- Aconseguir una disminució del temps d'experimentació per pràctica, en comparació a les experiències reals.

### 3. Metodologia

Per poder apreciar amb més claredat el treball fet, a continuació es presenten una sèrie de captures de pantalla comentades de diferents parts del programa.

En l'inici, ens apareixen les pantalles de benvinguda (figures 1 a) i 1 b)), en què podem optar per accedir, amb unes pestanyes, a uns fulls de resum dels fonaments científics del treball de laboratori que utilitzarem, o bé a uns ajuts d'utilització del programa.

Si no ens trobem en cap dels dos casos, amb la pestanya inferior de color taronja passarem a seleccionar la pràctica que volem dur a terme.



Figura 1. Pantalles de benvinguda del programa

Com s'ha explicat més amunt, a continuació podem seleccionar diferents fases del programa en funció de la formació de l'usuari. Així, en el nivell més bàsic de tots, coneixerem pràcticament totes les dades de la pràctica i a més rebrem missatges d'ajut en el transcurs d'aquesta. En l'apartat de més complexitat no rebrem aquests ajuts ni tindrem informació de la mostra virtual que el programa ens proposa analitzar.

Un cop feta la selecció pertinent, podem, amb la pestanya taronja inferior, accedir al laboratori (figura 2 a)). En aquest punt, una seqüència animada «ens introdueix» al laboratori des d'una perspectiva general fins a apropar-nos a la taula de treball on ens trobarem la mostra problema que s'ha d'analitzar (figura 2 b)). Un cop identificada, el pas següent serà dirigir-nos al magatzem a recollir tot el material que ens caldrà per dur a terme la pràctica.

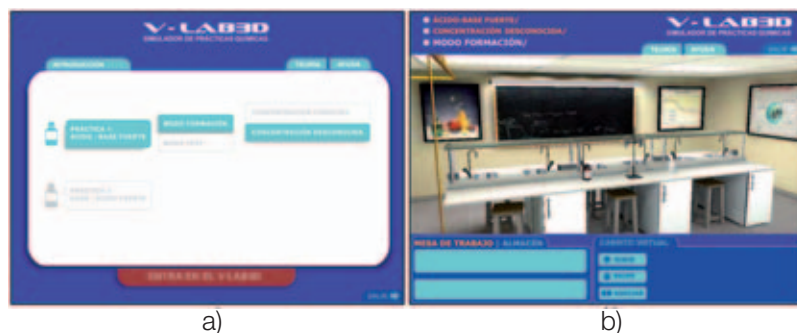


Figura 2. Laboratori virtual

El magatzem es troba classificat en quatre apartats diferents: en un dels apartats podrem escollir el material (figura 3 a)); en un altre (figura 3 b)), el reactiu (en aquest cas, com que l'espècie química que hem escollit valorar és un àcid, seleccionem una base); en un tercer apartat, si volem realitzar la identificació del punt final de la valoració de manera visual, necessitarem un indicador que ens canviarà de color en el moment oportú (sempre que hagi estat seleccionat l'indicador correcte en funció de l'àcid o la base que valorem); finalment, tindríem un quart apartat, on seleccionariem un àcid com a reactiu, en cas que l'espècie química problema fos una base.

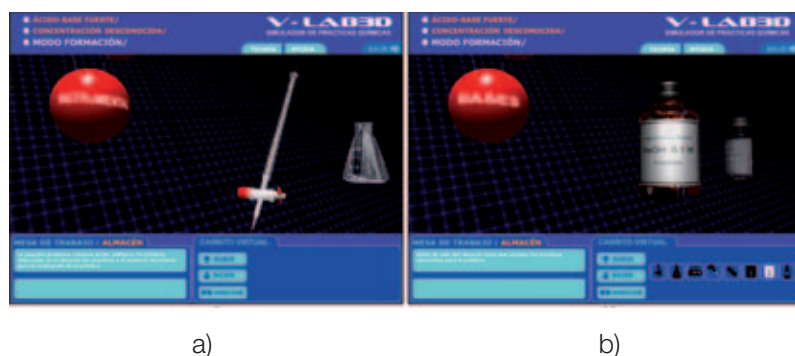


Figura 3. Magatzem virtual

Finalitzada la selecció, retornem al laboratori, disposem el material sobre la taula i associem els elements oportuns i, en alguns casos, interaccionem també en la selecció de volums que volem transvasar (figures 4 a) i 4 b)).



Figura 4. Representació de la taula del laboratori

Finalment tenim una visió neta de la taula, on només queden els elements necessaris per a l'inici de la valoració (figura 5 a)). En la figura 5 b) s'observa un cursor en el quadrant superior dret de la pantalla, que és l'eina utilitzada per obrir més o menys la clau de pas de la bureta per addicionar el valorant dins del matràs d'Erlenmeyer. Així mateix, dins del cercle, tenim una visió ampliada del nivell del líquid a la bureta, que ens permet «llegir» el volum total afegit a cada moment.



a) b)  
**Figura 5.** Representació d'una valoració

Si la mostra problema té una concentració desconeguda, pot passar que el reactiu seleccionat al laboratori no sigui l'adequat. El programa preveu aquest cas i aleshores l'usuari haurà de preparar una nova dissolució amb una sèrie d'elements nous que haurà anat a buscar de nou al magatzem.

Finalment, una de les parts més característiques del programa és la seva capacitat d'interacció amb càlculs reals i no presentar una mera simulació, tal com s'ha dit ja anteriorment. El programa de càlcul, que ja havíem desenvolupat en fases anteriors, es diu VCHEM, i encara que no és objecte d'aquesta convocatòria, se'n mostren algunes captures de pantalla en la figura 6.

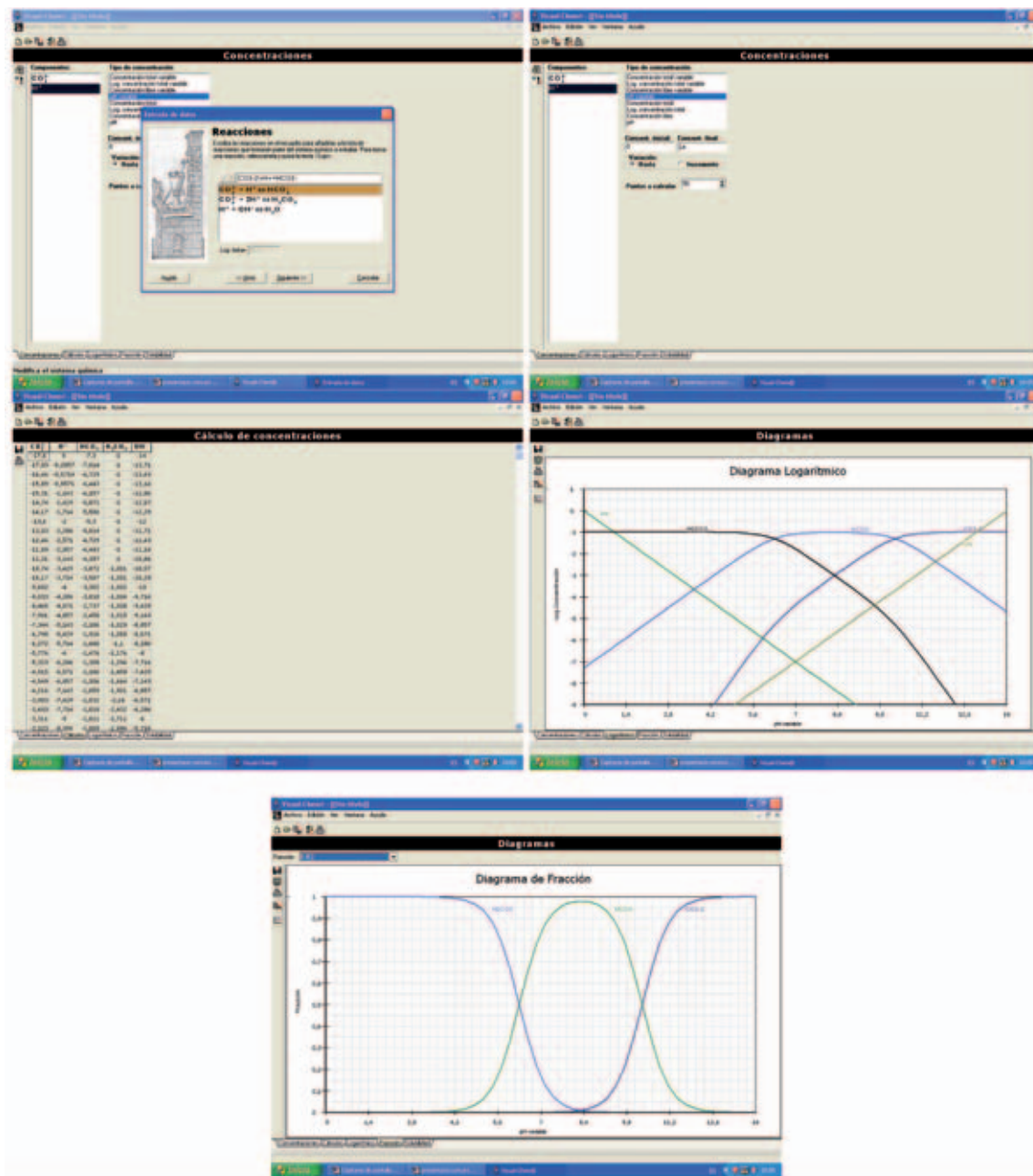


Figura 6. Finestres del programa de càlcul VCHEM

De manera molt resumida, direm que en les imatges anteriors es pot observar el procés d'entrada de dades (reaccions i constants d'equilibri), la resolució del problema en les condicions de concentracions escollides i la presentació de resultats tant en forma de llistat de resultats numèrics com de diverses representacions gràfiques. Aquesta informació, més especialitzada, de tipus microscòpic, podríem dir, s'observa en la vida quotidiana en forma de canvis macroscòpics. En el cas que ens ocupa, arribat el moment adient, la dissolució assoleix un pH en el qual l'indicador fa que la dissolució canviï de color (figura 7).





**Figura 7.** Canvi de color de la dissolució al final de la valoració

Arribat el moment precís del canvi de color, podem llegir el volum de reactiu gastat i, com que en coneixem la concentració i tenim els coneixements de teoria adients (o els hem llegit en l'apartat d'introducció), podem determinar la de la mostra problema. Aquest valor ens el demanarà el programa. Farà una sèrie de valoracions d'aquest valor, en comparació amb el valor que té emmagatzemat a la memòria i acabarà per presentar-nos un full de resultats en què es resumeixen els passos que hem fet al llarg de la pràctica i els resultats que hem introduït, juntament amb el que ens havia d'haver donat.

Per acabar aquest apartat, només cal dir que els canvis que van tenint lloc en la reacció es poden mostrar també en forma de la seqüència de valors de pH a cada gota de reactiu que hi afegim. En aquest cas, en comptes d'un indicador visual, utilitzarem un mesurador de pH (pH-metre).

També en aquest cas l'usuari, amb els coneixements de teoria adients, podrà extreure del llistat de parells de valors volum-pH la informació necessària per determinar la concentració desconeguda de la mostra problema.

## 4. Procediment

Hem cregut que una de les millors i més objectives maneres d'avaluar el treball realitzat és la de les mateixes imatges de la utilització del programa per part dels alumnes.

La pràctica consta de dues parts, una de «real» i una de «virtual». L'exercici que es planteja (un d'entre els molts que es podrien dur a terme) té l'enunciat següent:

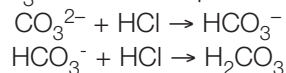
### Práctica 1: valoracions àcid-base

Determinació experimental de  $\text{CO}_3^{2-}$  i  $\text{HCO}_3^-$  d'una mescla.

#### Fonament

Es determina la concentració d'una mescla de bases utilitzant àcid clorhídric de concentració coneguda com a valorant i dos indicadors visuals: fenolftaleïna i ataronjat de metil.

En valorar una mescla de  $\text{CO}_3^{2-}$  i  $\text{HCO}_3^-$  amb HCl es produeixen les reaccions següents:



La valoració potenciomètrica d'aquest tipus d'espècies assenyalava dues variacions brusques de pH a valors de 8 i 4, és a dir, dos punts d'equivalència. S'utilitza aquesta informació per fer la valoració amb indicadors visuals. S'inicia la valoració en presència de fenolftaleïna. En afegir-hi HCl, quan s'arriba a pH = 8, es produeix el viratge del rosa pàl·lid a l'incolor. Seguidament s'hi afegixen unes gotes d'ataronjat de metil i es prossegueix la valoració. A valors de pH pròxims a 4 aquest indicador vira de groc a vermell i aquest és el punt final de la valoració.

Amb la fenolftaleïna es determina l'alcalinitat deguda al carbonat i amb l'ataronjat de metil es determina l'alcalinitat total ( $\text{CO}_3^{2-}$  i  $\text{HCO}_3^-$ ).

### Procediment

En 10 ml de la dissolució problema s'afegeixen unes gotes de fenolftaleïna i es valora amb HCl 0,1 M de concentració exactament coneguda fins que la dissolució sigui transparent. Seguidament s'hi afegeixen unes 2 gotes d'ataronjat de metil i es prossegueix la valoració fins que l'indicador viri de groc a vermell. Aquest procés s'ha de fer per triplicat.

### Qüestions

- Calculeu la concentració ( $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) de  $\text{CO}_3^{2-}$  i  $\text{HCO}_3^-$  en la mostra.
- Construiu el diagrama logarímic del sistema, on es representin els intervals de viratge dels indicadors utilitzats.

Determinació virtual de  $\text{CO}_3^{2-}$  d'una mostra.

### Procediment

Amb el programa d'ordinador de simulació VLAB3D, valoreu una mostra problema de carbonat de concentració desconeguda amb HCl 0,1 M, i seguiu l'evolució de la valoració amb un pH-metre. Anoteu parells de valors volum-pH per dibuixar la corba de valoració.

### Qüestions

- Representeu la corba de valoració. Dibuixeu-hi els intervals de pH de viratge dels indicadors.
- Determineu mitjançant mètodes gràfics el valor del volum del punt d'equivalència.
- Calculeu la concentració del protòlit valorat.

### Utilització del programa VLAB3D

En obrir el programa, seleccioneu la pràctica dins «base-ácido fuerte» i «modo test».

Dirigiu-vos al laboratori i observeu la mostra proposada. Es pot seleccionar una segona opció amb el botó «no». Heu d'aconseguir una mostra de  $\text{CO}_3^{2-}$ . Si el programa no us la proposa cap de les dues vegades, haureu de sortir del programa i tornar a entrar les vegades que calguin fins que el programa us proposi una mostra problema de carbonat de concentració desconeguda. Aleshores premeu «Sí».

Dirigiu-vos a «almacén», on, amb l'ajut de les fletxes esquerra-dreta i amunt-avall, podeu seleccionar els reactius i els materials necessaris. Marqueu el que voleu i ho baixeu al «carrito virtual». Un cop teniu tot el material i els reactius, torneu a la «mesa de trabajo».

Pugeu a la taula el contingut del «carrito virtual» i feu el muntatge experimental utilitzant la comanda «asociar» entre els elements que han d'interaccionar (exemple: «asociar» el flascó amb la mostra problema i la pipeta). L'acció no es durà a terme si falten elements per pujar a la taula (en l'exemple anterior, també ens caldrà un got de precipitats i el matràs d'Erlenmeyer). Seleccioneu un volum per pipetejar.

A continuació, introduïu l'elèctrode del pH-metre en el matràs d'Erlenmeyer, ompliu la bureta amb l'àcid clorhídric i, finalment, col·loqueu el matràs sobre l'agitador magnètic.

Comenceu la valoració afegint HCl amb la bureta i anotant valors pH-volum.

ATENCIÓ: si en acabar d'afegir el volum total de la bureta (50 ml) no heu arribat al volum d'equivalència, vol dir que la concentració de carbonat proposada és molt elevada. Necessitareu preparar una dissolució de HCl més concentrada «nuevo valorante»: torneu al magatzem, seleccioneu HCl 2 M, matrassos aforats, gots, pipeta... per preparar una nova dissolució.

Al final, el programa demana que introduïu el volum d'equivalència obtingut i la concentració de carbonat problema. Es generarà un full de resultats que haureu d'imprimir i adjuntar en l'informe de la pràctica.

En el cas concret que es mostra d'exemple (figures 8-10), el programa estava instal·lat en uns ordinadors portàtils que es van dur al laboratori de química en l'assignatura Experimentació en Química II (titulació d'Enginyeria Química).



**Figura 8.** En la imatge s'observa el moment que els alumnes s'han dirigit al magatzem virtual, on seleccionen el material que després els caldrà per dur a terme la pràctica. Concretament, es troben en el moment de selecció d'un dels reactius que necessitaran per fer la valoració àcid-base.



**Figura 9.** Part animada d'interacció amb el programa en què se li indica que aboqui un determinat volum, elegit per l'usuari, en el recipient adient. Encara ens trobem en la fase de preparació de la pràctica.



**Figura 10.** Desenvolupament de la valoració

En la figura 10 es mostra el moment en què, amb tot el material ja correctament col·locat a la taula de laboratori, es va addicionant el reactiu sobre la mostra que s'ha de valorar. El volum que es va addicionant és elegit per l'usuari i per cada addició va rebent del programa la resposta a la seva actuació, bé sigui en forma d'un valor de pH o bé, si s'escau, d'un canvi de color, segons una opció que prèviament ha seleccionat l'usuari. En el cas que es mostra, la casella petita de color blanc més pròxima a la cantonada inferior esquerra de la pantalla va mostrant el valor de pH en funció del volum addicionat. Els alumnes van recollint aquests parells de valors que posteriorment els serviran per, a partir dels càlculs adequats, determinar la concentració, en principi desconeguda, de la mostra que estan valorant. En finalitzar la valoració, el programa els demanarà que entrin aquest valor i es generarà un full de resultats que es pot imprimir i en què, entre altres coses, es mostra a l'usuari el valor que ha entrat comparat amb el valor «real», que és una dada que el programa havia generat a l'inici de la pràctica de manera aleatòria, entre uns valors límits restringits per simular situacions properes a la realitat i que mantenia desat a la memòria.