



Universitat
de Girona

Seminaris de Ciència dels Materials

Reciclatge dels Materials

Pere Roura Grabulosa

Departament de Física



Universitat de Girona, 2012
1a ed. català
Edició electrònica

Ressenya:

Aquest text pretén ser una guia útil per als estudiants interessats en l'impacte ambiental dels materials. El document s'estructura en tretze seminaris organitzats en cinc blocs. El primer bloc és una introducció a conceptes generals referents a la gestió de residus i al reciclatge. Els blocs següents tracten sobre el reciclatge del vidre, dels plàstics i del paper. Finalment, dediquem el darrer seminari a fer una comparació de l'impacte ambiental associat a l'ús de diversos envasos per a begudes. Al final de tot s'inclou una col·lecció de qüestions. Aquests apunts pretenen ser una breu recopilació de continguts bàsics. La bibliografia recomanada pot ajudar a desenvolupar més exhaustivament la matèria.

I. Generalitats: l'impacte ambiental dels materials	1
1. El cicle de vida dels materials	2
Breu història dels materials	2
Brevíssima història del reciclatge	3
El reciclatge en el marc de l'anàlisi del cicle de vida (ACV)	3
La bondat ambiental del reciclatge	4
2. Les raons del reciclatge	5
Introducció	5
Raons econòmiques	5
Estalvi de recursos naturals	5
L'escassetat de matèries primeres i l'economia del reciclatge	6
L'estalvi d'energia	7
Reducció de residus	8
II. Fabricació i reciclatge del vidre	9
3. Fabricació del vidre	10
Etapas en la fabricació del vidre	10
Les matèries primeres	11
La fusió	11
L'afinament	11
Extracció i conformació	12
El color del vidre dels envasos	14
4. Tecnologia de reciclatge del vidre	15
Esquema general d'una planta de reciclatge	15
Separació magnètica de materials ferromagnètics	16
Separació de metalls per corrents de Foucault (o d'Eddy)	18
Separació manual	20
Trituració	20
Classificació granulomètrica	22
Selecció	22
Tecnologies de reciclatge del vidre i «benefici» dels minerals	23
Reciclatge o reutilització del vidre	23
5. Beneficis ambientals del reciclatge del vidre	25
Balanç de masses al forn de fusió	25
Estalvi energètic en les matèries primeres	26
Estalvi energètic en la fusió	26
Estalvi d'emissions contaminants	28
Estalvi de matèries primeres	29
III. Obtenció i reciclatge dels plàstics	31
6. Generalitats sobre el reciclatge de plàstics	32
Cal reciclar els plàstics?	32
Classificació dels residus plàstics	33
Tipus de reciclatge	34
Eficiència de la recuperació	35
7. Les barreres per al reciclatge de plàstics	36
Identificació de polímers	36
Sistema avançat d'identificació	37
Separació	37
Qualitat dels plàstics reciclats	38
Aplicacions alternatives dels plàstics reciclats	39
Rendibilitat econòmica	40
Estabilitat dels preus	42
Recomanacions de les empreses del sector	42
Política per al reciclatge i legislació	42

8. <i>Tecnologies de reciclatge mecànic</i>	44
Reciclatge mecànic	44
Reciclatge d'ampolles de PET	44
Separació del PET i el PVC	45
Reciclatge de plàstics barrejats	46
Separació mecànica de plàstics barrejats	48
Separació «química» de plàstics barrejats	48
9. <i>Reciclatge químic i recuperació d'energia</i>	50
Reciclatge químic (reciclatge terciari)	50
Termòlisi	50
Piròlisi i gasificació	51
Solvòlisi	51
Comentari general	52
Recuperació energètica (reciclatge quaternari)	52
Recuperació quimicoenergètica	53
10. <i>Beneficis ambientals del reciclatge de plàstics</i>	54
Reciclatge / dipòsit en abocador	54
Reciclatge / recuperació d'energia	54
Impactes ambientals del reciclatge. Anàlisi del cicle de vida (ACV)	55
Alguns dels impactes que se solen quantificar són els següents:	55
Impacte ambiental dels processos de reciclatge químic i mecànic	55
IV. <i>Obtenció i reciclatge del paper</i>	59
11. <i>Obtenció del paper</i>	60
Estructura del paper	60
Estructura de la fusta	60
Obtenció de pastes cel·lulòsiques	61
Fabricació del paper	61
Contaminació produïda per la indústria paperera	63
12. <i>Recuperació i reciclatge del paper</i>	64
Recuperació del paper usat	64
Reutilització i reciclatge	64
Tecnologia del paper reciclat	65
Reptes del reciclatge de paper	66
Beneficis ambientals	67
V. <i>Continguts complementaris</i>	69
13. <i>Impacte ambiental dels envasos per a begudes</i>	70
El pes dels envasos	71
Impacte ambiental dels envasos	72
L'energia dels envasos	74
Conclusions	76
Qüestions	77
Bibliografia	78

I. Generalitats: l'impacte ambiental dels materials

1. El cicle de vida dels materials

Objectiu:

Situar l'activitat de reciclatge de materials en un context històric i en el context del cicle de vida dels materials.

Breu història dels materials

Tot i que ens pot fer l'efecte que els materials d'ús corrent han existit des de fa molt de temps, això no és necessàriament cert. Molts materials no existien abans del segle XX i potser el lector seria capaç de recordar la introducció d'algun «nou material». En particular, l'autor recorda que un dia van aparèixer bosses de plàstic que ja no eren tan transparents i que feien un soroll característic (eren les bosses de polietilè d'alta densitat – HDPE en anglès).

Fem un repàs històric dels materials que tenen més pes en l'activitat recicladora. En la figura 1 indiquem la data aproximada d'aparició d'aquests materials.

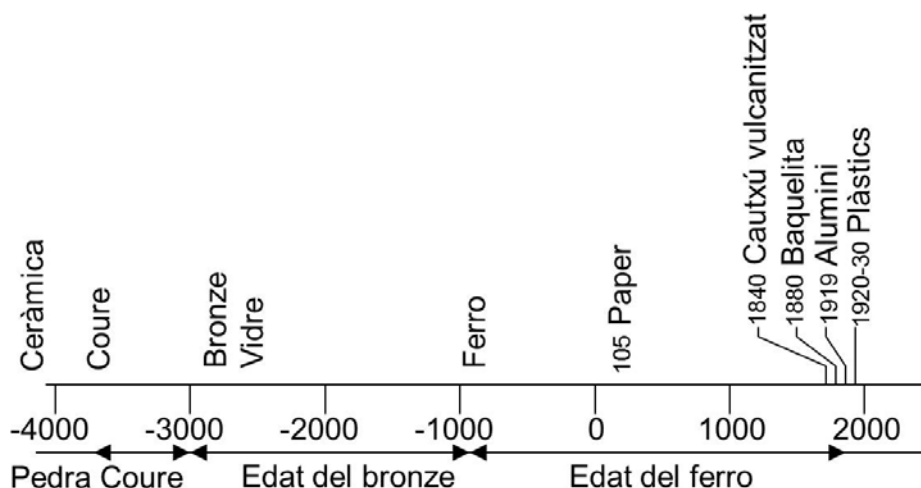


Figura 1. Any aproximadament d'aparició de diversos materials corrents

L'aparició de materials nous sol anar lligada a la capacitat tècnica per produir-los. Vegem-ho en el cas dels metalls. El coure es va explotar inicialment perquè, com passa amb l'or, es pot trobar a la natura en estat metàl·lic (coure nadiu). També es podia obtenir desoxidant els sulfurs de coure amb carbó vegetal a temperatures moderades. Més endavant, es va descobrir que la barreja amb minerals d'estany produïa un aliatge que fonia a una temperatura inferior i, a més a més, presentava propietats mecàniques millors (el bronze). Pel que fa al ferro, la seva producció va trigar més a desenvolupar-se perquè, tot i que es desoxidava fàcilment amb carbó vegetal a uns 1.200°C, a aquesta temperatura no fonia i, per tant, el ferro quedava barrejat amb l'escòria. Va ser cap a l'any 1.000 aC quan es va trobar la manera de separar l'escòria tot colpejant la «pasta» calenta. Aquest procés (la farga catalana) va continuar fins als anys 1750-1850, quan es va implantar la tecnologia dels alts forns, que assolien temperatures prou elevades per fondre el ferro. En el cas de l'alumini, la desoxidació tèrmica és impracticable. Cap al 1910 es va obtenir industrialment a partir de processos

electroquímics. Per sorprenent que pugui semblar, resulta que un metall tan corrent com l'alumini no existia al segle XIX.

La família de materials més jove és la dels polímers. Tot i que ja s'utilitzaven materials polímers d'origen natural (fusta, fibres vegetals) des de sempre, el primer polímer artificial (la baquelita) no va aparèixer fins al 1880 i la immensa majoria dels plàstics són del segle XX.

Brevíssima història del reciclatge

Podríem dir que l'activitat recicladora comença el mateix moment que la fabricació del material. El valor intrínsec del material d'un objecte usat en fomentava el reciclatge, ja que així s'estalviava treball i energia. Sens cap dubte, les primeres raons del reciclatge eren estrictament econòmiques. Resultava massa car de fabricar el ferro per no reaprofitar-lo.

De tota manera, probablement l'activitat sistemàtica de recollida de materials usats no va començar fins que la producció no es va dur a terme a escala industrial, i, en molts casos, això no va passar fins molt tardanament. Per exemple, els envasos de vidre per contenir productes d'ús quotidià (vi, oli...) no es van generalitzar fins al segle XVIII.

Un aspecte nou que apareix amb la producció a gran escala és el del material com a residu. La producció d'envasos a un preu cada vegada més baix no justifica les raons econòmiques tradicionals per a la seva recuperació. Al segle XX, apareixen els envasos no retornables de llauna, alumini, vidre, paper, plàstic, etc. El volum és tal que el seu reciclatge no és necessari tant per una qüestió econòmica com per un problema de gestió de residus. Probablement, aquesta és la raó principal del reciclatge en l'actualitat.

El reciclatge en el marc de l'anàlisi del cicle de vida (ACV)

Darrerament es posa un gran èmfasi en la importància del reciclatge, com si aquesta activitat acabés estalviant gran part dels impactes ambientals relacionats amb els materials o objectes de consum. Tanmateix, si volem fer una anàlisi seriosa de la importància del reciclatge, hem de veure quin lloc ocupa dins del cicle de vida del material (des de l'extracció de les matèries primeres fins que es converteix en residu, «del bressol a la tomba»). Tal com indica la figura 2, totes les etapes del cicle de vida produeixen un impacte ambiental en forma de consum de matèries primeres i energia i de generació d'emissions i residus. D'altra banda, al final de la vida útil d'un objecte s'han de plantejar les tres alternatives per a la gestió del material:

- a) *Dipòsit en un abocador.* Es perd tot el valor que pugui conservar, encara, el material. Tant el material en si mateix (àtoms, molècules) com l'energia invertida a fabricar-lo queden enterrats sense que sigui previsible que es puguin aprofitar en un futur.
- b) *Incineració.* L'objectiu principal és la reducció del volum de residus. Quan la incineració es fa amb recuperació d'energia, es recupera una part del valor contingut en el material.
- c) *Reciclatge.* Permet tornar a posar en ús el material dins la forma del mateix objecte degudament tractat (*reutilització*) o bé com a substitut de les matèries primeres (*reciclatge* pròpiament dit).

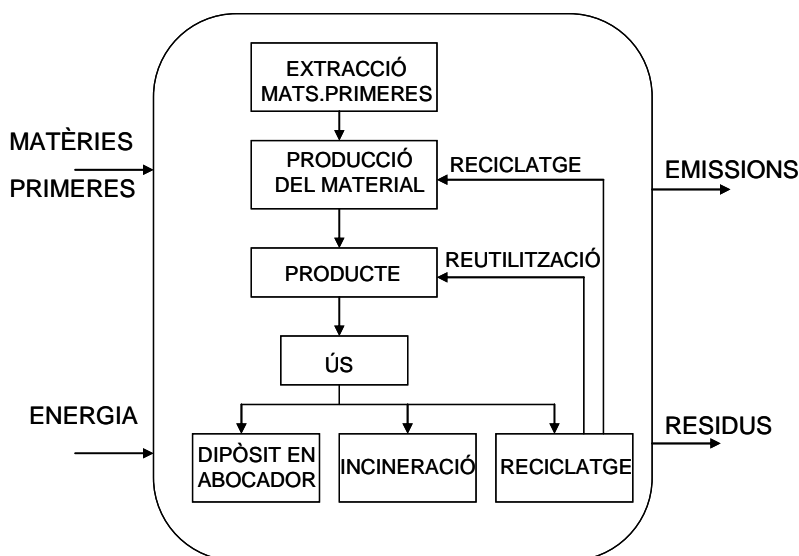


Figura 2. Esquema del cicle de vida d'un material

Amb aquest esquema queda clar que el reciclatge és una estratègia (no pas única) de gestió de residus sòlids.

La bondat ambiental del reciclatge

La consideració social que ha adquirit l'activitat del reciclatge com a opció més benigna ambientalment no s'ajusta pas exactament a la realitat de les coses. El reciclatge, com tota activitat humana, necessita consumir energia (transport, trituració, neteja...) i genera emissions i residus. Per tant, també representa una càrrega sobre el medi ambient. *A priori*, podríem pensar que el reciclatge de qualsevol material és preferible a les altres dues opcions (la incineració o l'abocador). Tanmateix, és l'anàlisi del cicle de vida de cadascuna d'aquestes opcions la que ens dirà quina és més correcta ambientalment.

Pensem en el cas de les bosses de plàstic que tirem a les escombraries. Actualment, no es reciclen o se'n recicla només una petita part. La raó és simplement econòmica: no resulta rendible. Tanmateix, podria ser que amb la tecnologia actual tampoc fos l'opció més «ecològica».

Un cas molt sorprenent és el del reciclatge de paper. Resulta que una anàlisi del cicle de vida del paper reciclat als països nòrdics de final dels anys noranta va portar a la conclusió que era menys perjudicial per al medi ambient fabricar paper amb pasta de fusta verge que no pas amb paper reciclat. Resultava, doncs, que en aquests països era més correcte ambientalment incinerar amb recuperació d'energia el paper utilitzat (com a contrapunt direm que un treball recent, elaborat sobre una vasta mostra de països, empreses i qualitats de paper, indica que en general el reciclatge és preferible ambientalment).

Aquest exemple ens indica que les condicions «locals» són determinants a l'hora de plantejar una estratègia de gestió de residus. Una determinada opció pot ser correcta ambientalment en un context, però no pas en un altre.

2. Les raons del reciclatge

Objectius:

Reflexionar sobre les raons que han portat a l'impuls modern de l'activitat del reciclatge i sobre els prejudicis que abunden sobre aquest tema.

Introducció

En aquest seminari, analitzarem quines deuen ser les raons que expliquen la gran importància actual de l'activitat del reciclatge. D'entrada, podríem pensar en les quatre raons següents:

- raons econòmiques
- estalvi de matèries primeres
- estalvi d'energia
- reducció del volum de residus

Raons econòmiques

Sens cap mena de dubte, els materials que tradicionalment s'han reciclat són aquells per als quals el reciclatge representava una activitat lucrativa. La perspectiva del negoci és suficient per impulsar i mantenir unes determinades activitats de reciclatge. Per exemple, el benefici econòmic explica per què el reciclatge de l'acer de maquinària industrial no s'ha de fomentar, mentre que el de llaunes de conserva, sí. També explica que el reciclatge de llaunes d'alumini resulti més atractiu que no pas el de llaunes d'acer.

Podríem dir que aquesta ha estat la raó principal que ha fomentat tradicionalment les activitats de reciclatge. Tanmateix, la situació és molt diferent en l'actualitat, ja que constatem, per exemple, que el reciclatge d'envasos es fa malgrat que l'activitat no seria rendible si no fos per l'aportació de recursos de les administracions.

Estalvi de recursos naturals

La dècada dels anys setanta va viure una profunda crisi econòmica desencadenada per l'increment sobtat del preu del petroli. En aquella època, els països productors, agrupats en l'OPEP, varen fixar quotes de producció, amb la qual cosa controlaven els preus. Paral·lelament, el Club de Roma va alertar sobre l'escassetat imminent de recursos naturals que s'esdevindria amb l'increment continuat de la població i el consum. Segons el seu informe, el petroli s'esgotaria a la primera meitat del segle XXI. També donava dates relativament precises per a l'esgotament d'altres recursos minerals. L'efecte sobre l'opinió pública i la classe política va ser considerable. Potser va ser l'avís sobre la finitud del nostre planeta i la impossibilitat d'un creixement econòmic continuat que ha tingut més ressò. És, precisament, d'aquesta època que arrenca l'interès per les energies renovables i pel reciclatge dels polímers, i també el desenvolupament de tecnologies que optimitzen l'ús de l'energia.

No obstant això, cap de les prediccions catastròfiques del Club de Roma s'ha complert. S'han descobert noves reserves de petroli i de minerals. Els preus de les matèries primeres s'han mantingut en uns nivells que no han compromès el seu ús intensiu. De

tota manera, l'objectiu de reduir el consum de recursos no renovables, predicat en l'informe, continua semblant desitjable.

Element	Recurs		Durada (anys)
	Estat	Tones	
CH _x	Carbó, petroli, gas	10 ¹³	2.5·10 ³
P	Roca de fosfats	1.6·10 ¹⁰	1.3·10 ³
Si	Sorra, pedra arenosa	2·10 ¹⁵	4·10 ⁶
Ca	Pedra calcària	2·10 ¹⁵	4·10 ⁶
Fe	Basalts, laterites	1.8·10 ¹⁵	4.5·10 ⁶
Al	Argila, bauxita	1.7·10 ¹⁵	2·10 ⁸
Mg	Mar	2·10 ¹⁵	4·10 ⁸
Mn	Nòduls marins	10 ¹¹	1.3·10 ⁴
S	Guix, mar	10 ¹⁵	3·10 ⁷

Taula I. Previsió de la durada de diversos recursos si s'explotessin al ritme de l'any 1968 (H. F. Göler i A. M. Weinberg. *Science*, 20/02/1976)

A l'altra banda de l'espectre d'opinions, trobem la d'autors extremament optimistes. Com la dels autors de la taula I, en la qual es demostraria que de petroli, carbó i gas n'hi hauria encara per a 2500 anys (i, amb tot, seria el recurs que s'esgotaria primer). Un altre autor, encara més optimista, es va dedicar a analitzar els metalls continguts en un cub de granit de 3 x 3 x 3 m³ (unes 100 tones). El resultat el detallem en la taula II.

Metall	Kg	Metall	Kg
Al	8000	Ni	18
Fe	5000	V	14
Mn	500	W	45
Cu	80	Sn	9

Taula II. Contingut en diversos metalls d'un cub de 3 x 3 x 3 m³ de granit (100 t)

Tot i l'escepticisme amb què podem llegir aquestes anàlisis, sí que és veritat que l'argument de l'escassetat de recursos per fomentar el reciclatge, en molts casos, està mancat de fonament. Vegem-ne dos exemples clars:

Exemple 1. El vidre està format principalment per silicats. Aquests minerals són els més abundants de l'escorça de la Terra.

Exemple 2. Els polímers se sintetitzen del petroli. El reciclatge d'aquests materials té una influència mínima sobre la conservació de les reserves de petroli. En efecte, només el 4% del petroli extret s'utilitza per a la síntesi de polímers. O sigui que si recicléssim el 100% dels plàstics (tasca impossible) allargaríem en només el 4% la vida de les reserves de petroli.

L'escassetat de matèries primeres i l'economia del reciclatge

Tot i que les fonts més optimistes parlen de recursos enormes, s'ha de valorar la disponibilitat d'aquests recursos. Pot ser que un recurs no es pugui explotar si extreure'l és molt costós o tècnicament inviable.

Els jaciments de petroli que es van explotar, primer eren molt a la vora de la superfície de la terra. Es diu que, històricament, a la península Aràbiga el petroli formava basses. Fins ben entrat el segle XX, en molts pous de petroli, aquest pujava sense necessitat de bombar-lo, ja que es trobava a pressió. Ara bé, a mesura que aquests jaciments s'han

anat esgotant, se n'han d'explotar d'altres de més difícils: a una fondària més gran dins dels oceans, de viscositat més gran (és el cas de reserves enormes a Veneçuela) o bé les sorres bituminoses del Canadà. Els costos d'extracció augmentaran necessàriament, amb una incidència directa sobre el preu dels plàstics verges. A part del cost econòmic, l'impacte ambiental d'aquestes extraccions sol ser molt superior.

La qualitat d'una *mena metàl·lica* es mesura pel seu contingut en metall (la *lleï*). A mesura que s'exploten les reserves minerals, es fa necessari treure el metall de menes menys riques. La conseqüència principal és un increment de l'energia necessària per extreure el metall dels seus minerals. Com que el cost del metall verge s'incrementarà, això afavorirà el reciclatge. Una idea dels costos energètics relacionats amb l'extracció dels metalls ens la dona la figura 1. El cost energètic de l'extracció és inversament proporcional a la lleï (fixeu-vos que, en l'escala logarítmica, el pendent és -1). D'altra banda, l'energia augmenta quan canviem el tipus de mena, i és evidentment mínima per a menes al·luvials (metalls nadius).

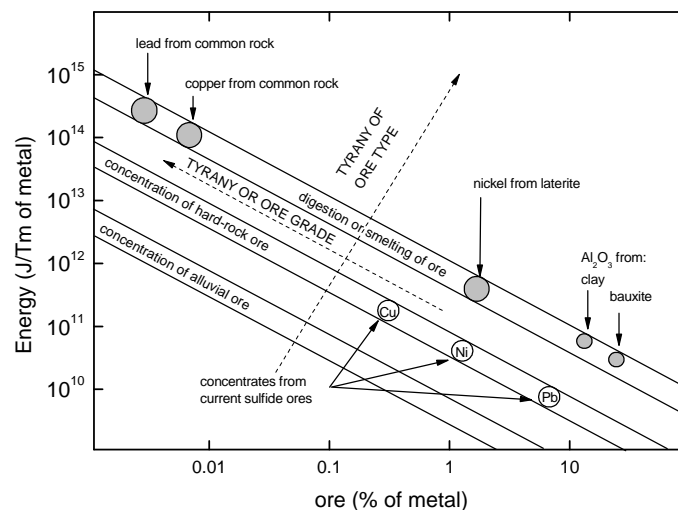


Figura 1. Consum d'energia per a l'extracció de menes metàl·liques en funció de la seva lleï (*ore grade*)

L'estalvi d'energia

Atès que actualment l'energia prové principalment de fonts no renovables, podem considerar que el consum d'energia necessari per fabricar materials és un consum de recursos. En la taula III s'indica aproximadament l'energia necessària per produir 1 kg de material. Aquesta energia conté dos termes. Un terme, evident, que correspon a l'energia consumida durant els processos de fabricació, ja sigui en forma d'electricitat o de combustible. L'altre terme, important en el cas dels plàstics i nul per als altres materials, és l'energia que obtindríem de la matèria primera necessària per obtenir el material si la creméssim.

Podem comprovar com els metalls són els materials que necessiten més energia per a la seva producció. Hom esperaria, doncs, que l'estalvi energètic fos superior en el reciclatge dels metalls que no pas, per exemple, en el dels vidres. I és així.

Material	Energia (MJ/kg)
vidre	12
paper	60-80
acer al carboni	30
alumini	160
estany	320
plàstics	70-100

Taula III. Energia per produir els materials

La despesa d'energia per al forn de *vidre* és de 5.0-5.5 MJ/kg si s'utilitzen només matèries primeres, mentre que és de 3.5-4.0 MJ/kg per al vidre reciclat. Per tant, l'estalvi per kg de vidre és només d'1.5 MJ/kg. En el cas de l'obtenció d'*alumini*, l'estalvi és unes 100 vegades superior. Es gasten 270 MJ per kg d'alumini verge i, només, 3 MJ per kg d'alumini reciclat.

Aquest gran estalvi energètic en el reciclatge dels metalls és una de les raons que probablement explica que aquests materials s'han recuperat i reciclat des de sempre sense cap necessitat d'incentius legals. Sense cap mena de dubte, l'estalvi energètic representa un estalvi econòmic important.

Reducció de residus

Probablement, la reducció de residus que s'assoleix amb el reciclatge és la raó principal de l'activitat del reciclatge d'avui en dia. El dipòsit en abocadors d'un volum de residus creixent crea problemes seriosos pel que fa a la ubicació i el manteniment dels espais dedicats a aquesta finalitat. En general, la instal·lació d'un abocador o la seva ampliació genera un gran rebuig social i representa un impacte ambiental considerable.

El reciclatge (a part de preservar recursos valuosos) disminueix el volum de residus. De retruc, acaba representant un estalvi econòmic per a les comunitats (ajuntaments, consells comarcals) i empreses, que, així, han de pagar menys en concepte d'abocador. Un antic estudiant explicava que una de les seves responsabilitats com a cap de seguretat i higiene d'una empresa era la reducció dels residus d'abocador tot fomentant el reciclatge. Malgrat que per a alguns materials l'empresa havia de pagar perquè se'ls emportessin, el balanç global era econòmicament favorable.

Aquest incentiu per a l'activitat del reciclatge (la reducció de residus) és més important en àrees superpoblades, com és el Japó, on no hi ha espai per a abocadors i els residus s'han d'incinerar o bé transportar a llargues distàncies. En general, el preu del dipòsit en abocador es va incrementant continuadament, la qual cosa pot fer més rendible en el futur l'activitat del reciclatge. Tornem, doncs, a les raons econòmiques.

II. Fabricació i reciclatge del vidre

3. Fabricació del vidre

Objectius:

- Comprendre la composició bàsica dels vidres per a envasos.
- Aprendre el procés de fabricació a partir de matèries primeres per tal de poder-lo prendre com a referència a l'hora de valorar el reciclatge del vidre.
- Entendre l'origen dels colors dels vidres dels envasos.

El vidre és el material ceràmic reciclable al 100%. Li dedicarem tres seminaris: fabricació, reciclatge i beneficis ambientals del reciclatge. Comencem, ara, pel capítol en què descriurem el procés de fabricació. Tret que no diguem el contrari, ens referirem sempre al vidre més corrent: el sòdic-càlcic. Correspon al vidre dels envasos, plats i finestres.

Etales en la fabricació del vidre

En la fabricació del vidre es distingeixen tres etapes:

- a) fusió de les matèries primeres;
- b) afinament, que consisteix en l'eliminació de partícules sòlides i bombolles;
- c) extracció i conformació.

El moment de cadascuna d'aquestes etapes es pot apreciar millor si analitzem la figura 1, en la qual es mostren esquemàticament les diverses parts d'un forn de vidre. La fusió es produeix a la zona de càrrega del forn, on la temperatura és més elevada (zona F). A la mateixa zona de fusió i a la zona que la segueix (zona A), es produeix l'afinament a mesura que la temperatura va disminuint. Finalment, el vidre surt a la temperatura adequada per a la seva conformació (zona R).

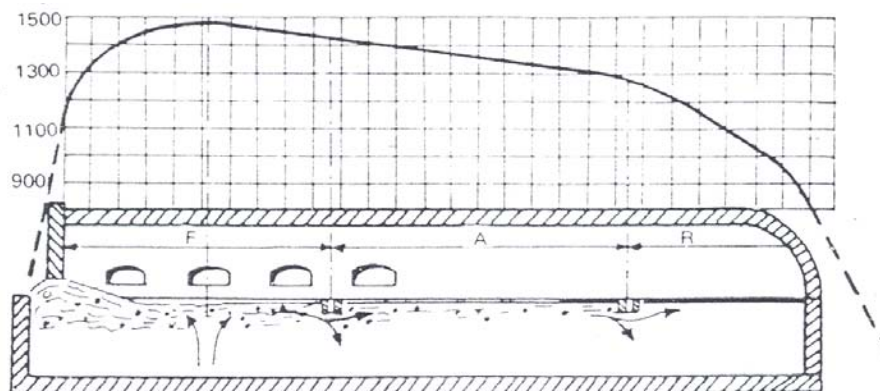


Figura 1. Tall vertical d'un forn de vidre amb indicació de la temperatura del vidre (en °C) a mesura que aquest avança

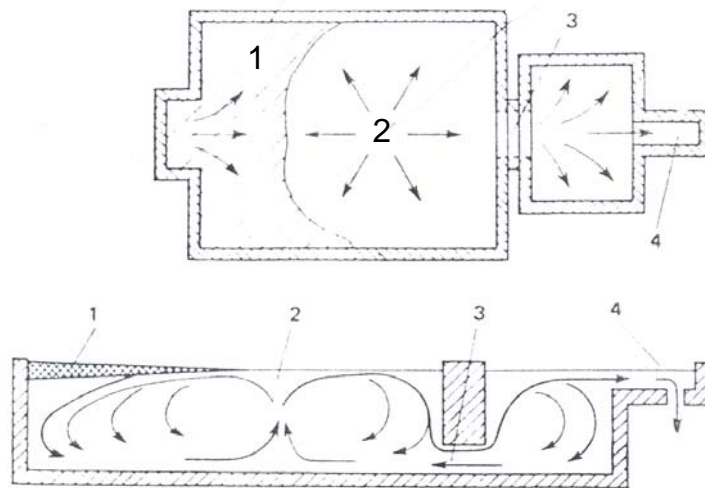


Figura 2. Projecció en planta d'un forn de vidre i tall longitudinal que indica els moviments convectius al si del líquid

Les matèries primeres

La major part de les matèries primeres del vidre són minerals que s'extreuen de pedreres: sorra i quars, feldspats i pedra calcària. També s'utilitza un reactiu sintètic, la sosa. Detallem tot seguit el paper que té cadascun d'aquests materials:

1. Sorra i quars: aporten el component principal del vidre, el SiO_2 (la sílice).
2. Feldspats: aporten ions metàl·lics addicionals com són el Al^{3+} , el Na^+ o el K^+ i ajuden a la fusió de la mescla.
3. Pedra calcària: químicament és carbonat càlcic (CaCO_3); aporta l'ió Ca^{2+} .
4. Sosa (Na_2SO_4): igualment com els feldspats, ajuda a la fusió del quars; per aquesta raó se l'anomena *agent fundent*.

La fusió

Tot sol, el quars fondria a uns 1700°C . Tot i que els fundents fan possible la fusió per reacció química a temperatures d'uns 1.100°C , la zona de fusió del forn està a uns 1.500°C (figura 1). Aquesta temperatura tan elevada és necessària per obtenir un líquid prou fluid, que es pugui homogeneïtzar bé i afinar a l'etapa següent.

Tot i que es parla de fusió pel fet que l'estat que s'obté és un estat líquid, els processos que ocorren en aquesta etapa no són simplement la fusió dels diversos components, sinó que es produeix una reacció química entre ells. És precisament aquesta reacció entre el quars i els fundents el que fa possible la fusió del primer a una temperatura relativament baixa.

L'afinament

Durant l'etapa de fusió es generen gasos que, en part, es dissolen al líquid i, en part, formen bombolles. Per a la majoria de gasos presents, la solubilitat augmenta a mesura que el líquid es refreda. Aquest fet explica que l'afinament es faci amb dos mecanismes que depenen de la temperatura.

A temperatura elevada, la solubilitat és baixa. Per tant, el gas deixa la dissolució i fa créixer les bombolles, les quals pugen per efecte de l'empenta del líquid. Quan arriben a la superfície lliure exploten. En aquest mecanisme les bombolles petites no es poden eliminar, ja que l'empenta les fa ascendir molt lentament (vegeu el quadre explicatiu).

Forces que actuen sobre una bombolla:

$E(\text{empenta}) = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \rho_v$

ρ_v : densitat del vidre fos v : velocitat η : viscositat

$S(\text{força de Stokes}) = 6\pi R \cdot v \cdot \eta$

Les bombolles arriben ràpidament al règim estacionari on $v = ct$. Val a dir que la força de Stokes iguala exactament l'empenta, $E = S$. D'aquesta condició podem obtenir fàcilment la velocitat de la bombolla:

$$v = \frac{2}{9} \frac{R^2 \rho_v}{\eta},$$

que ens diu que les bombolles grans ascendeixen molt més ràpidament que no pas les petites. Una bombolla de radi doble pujarà a una velocitat quatre vegades més gran. D'altra banda, les bombolles pugen més fàcilment a temperatura elevada, ja que la viscositat és inferior.

A temperatura més baixa, les bombolles s'eliminen per dissolució. Això és així perquè la solubilitat augmenta a baixa temperatura. Amb aquest mecanisme s'eliminen les bombolles més petites (anomenades *llavors*). Tanmateix, no es poden eliminar les bombolles grans que han sobreviscut a l'etapa anterior d'afinament perquè es dissolen més lentament que les petites. Podem veure-ho amb un càlcul molt senzill. La massa de gas que conté una bombolla, M , és proporcional al radi al cub (volum de la bombolla):

$$M = \rho_G \frac{4}{3} \pi R^3,$$

on ρ_G és la densitat del gas. La superfície de la bombolla (superfície de reacció entre el gas i el líquid), A , és proporcional al radi al quadrat:

$$A = 4\pi R^2.$$

El temps necessari per a la dissolució serà proporcional a M i inversament proporcional a A . Per tant:

$$t_d \propto \frac{M}{A} \propto R.$$

O sigui que les bombolles grans triguen més a dissoldre's.

Extracció i conformació

El líquid afinat s'extreu del forn a una temperatura que dependrà del tipus de producte que es vulgui fabricar. Si es necessita un vidre més fluid, s'extraurà a temperatura elevada, i viceversa. El producte també determinarà el procediment mecànic utilitzat en l'extracció. L'extracció per gravetat s'utilitza per fabricar peces bufades (p. e. ampolles)

o emmotllades (p. e. gots). En la figura 3 veiem un esquema de fabricació de peces emmotllades. L'extracció es pot fer, també, cap amunt. Aquest seria el cas de la fabricació de vidre pla (figura 4).

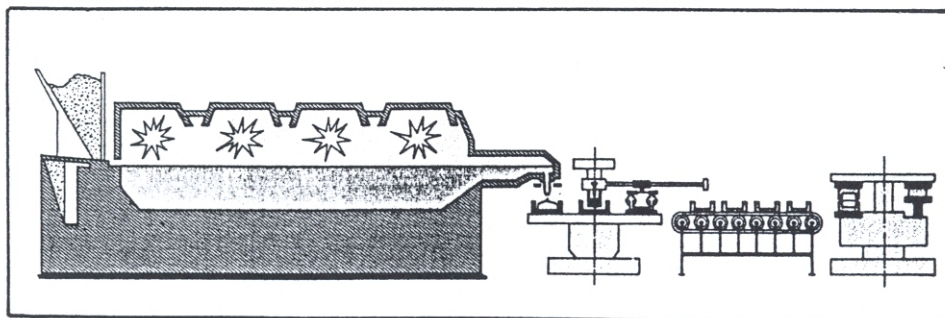


Figura 3. Extracció del vidre per gravetat i fabricació de peces emmotllades (Enciclopèdia Catalana)

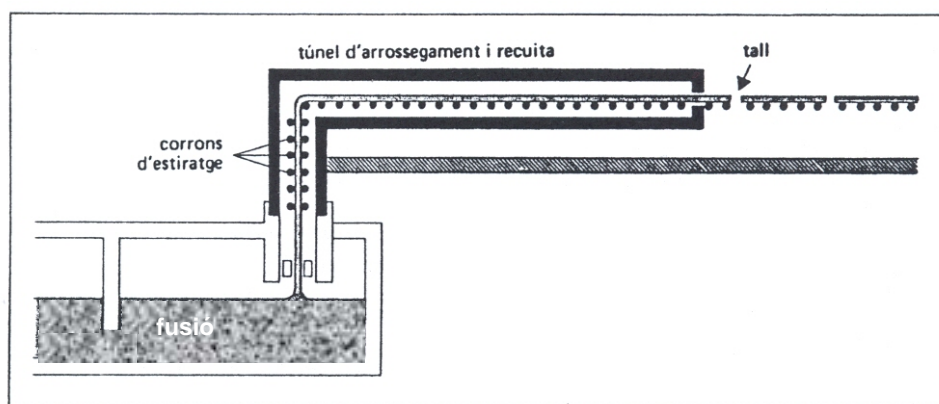


Figura 4. Extracció vertical del vidre i fabricació de vidre pla (Enciclopèdia Catalana)

Aprofitem aquest apartat per mostrar com es fabrica el vidre armat (figura 5). Evidentment, les tècniques de conformació són molt variades i, per tant, una descripció detallada queda fora de l'objectiu d'aquest seminari.

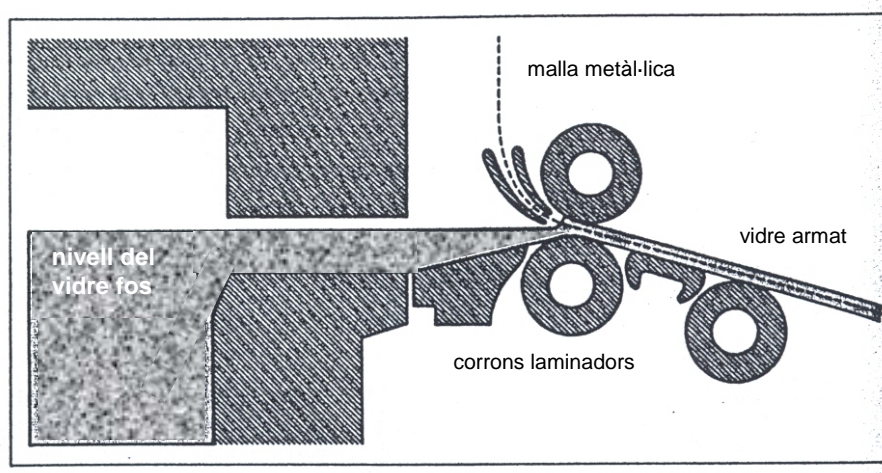


Figura 5. Fabricació de vidre armat (Enciclopèdia Catalana)

El color del vidre dels envasos

Si el vidre només contingués els ions metàl·lics detallats en l'apartat de matèries primeres (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Al^{3+}), seria completament incolor (blanc). El color dels vidres prové, doncs, d'altres ions metàl·lics. En absència de colorants introduïts expressament per donar colors molt vistosos, com són el blau o el vermell intens, la gamma de colors del vidre és limitada i depèn, en gran manera, de l'estat d'oxidació del Fe. Aquest metall és una impuresa omnipresent a les matèries primeres naturals.

Depenent de les condicions d'oxidació/reducció del forn (nombre redox), el color del vidre pot canviar encara que la composició química sigui la mateixa. Això ho podem apreciar en la taula I. Els colors indicats en aquesta taula corresponen a la gamma de colors que se sol trobar als envasos de vidre.

$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}_{\text{total}}$	Nombre redox	oxidació \uparrow \downarrow reducció	Color
0.10-0.40	+20 - 0		blanc/groguenc
0.40-0.60	0 - (-15)		verd
0.60-0.75	(-15) - (-25)		groc / verd fulla morta
0.75-0.90	(-25) - (-30)		marró (ambre)

Taula I. Color del vidre dels envasos en funció de l'estat d'oxidació del ferro.
El nombre redox fa referència a les condicions del forn

4. Tecnologia de reciclatge del vidre

Objectius:

Entendre les operacions unitàries que van des de la recepció dels envasos de vidre fins a l'obtenció del vidre reciclat apte per a la producció d'objectes nous.

En aquest capítol analitzarem els passos que se segueixen per produir vidre triturat net, apte per fabricar vidre nou, a partir d'envasos recuperats. L'objectiu d'una planta de reciclatge és recuperar el vidre dels envasos (vidre reciclat). Aquest ha de ser d'una qualitat suficient per poder-lo afegir, en proporcions elevades, a les matèries primeres en el procés convencional de fabricació del vidre. Fixem-nos que el concepte de «reciclabilitat» està relacionat directament amb el de «qualitat».

Esquema general d'una planta de reciclatge

Els envasos de vidre solen passar per una cinta transportadora al llarg de la qual el material segueix diverses operacions, detallades en la figura 1.

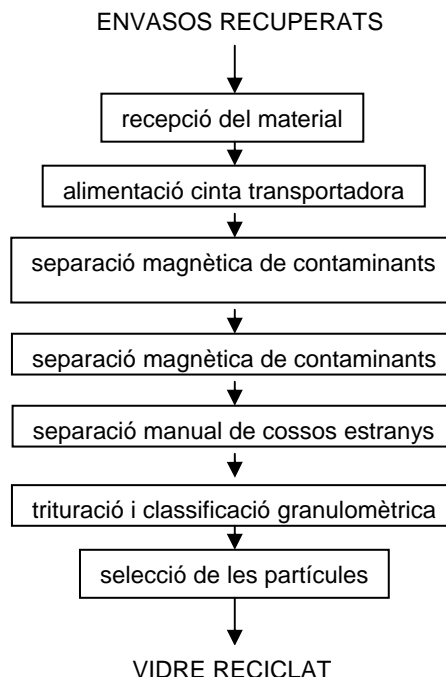


Figura 1. Procés del reciclatge d'envasos de vidre

Fixeu-vos que, en aquest procés, no hi ha cap operació de rentatge. De fet, abans que els envasos no entrin a la cinta transportadora solen estar uns dies (o setmanes) a la intempèrie. En contacte amb l'atmosfera, els residus orgànics que contenen s'evaporen o es descomponen. El resultat és que, pel que fa a aquests contaminants, els envasos entren en el procés de reciclatge relativament nets. Aquest tipus de tractament

s'anomena *en sec*. S'ha proposat un procés de tractament en humit, el qual començaria amb la neteja dels envasos. Tanmateix, els inconvenients que comporta, com ara la necessitat d'assecar el vidre reciclat al final del procés o tractar l'aigua després de la neteja, no són compensats per una millora substancial de la qualitat del producte.

Separació magnètica de materials ferromagnètics

Els materials ferromagnètics són aquells que són atrets intensament per un imant. Els únics metalls ferromagnètics són el ferro, el cobalt i el níquel. En aquesta etapa s'eliminaran, principalment, els aliatges de base ferro, com són els acers ordinaris, els ferros colats i els acers inoxidable ferrítics (recordem que els acers inoxidable austenítics no són ferromagnètics).

A diferència del que podríem pensar, la força d'atracció d'un imant no depèn només de la intensitat del camp magnètic que crea, \vec{B} , sinó de la seva variació a l'espai, segons la fórmula:

$$\vec{F} \propto \chi_s V \nabla \vec{B} \cdot \vec{B} \quad (1)$$

on V és el volum del material que és atret per l'imant i χ_s , la susceptibilitat magnètica. Per al Fe, $\chi_s \approx 10^6$, mentre que és negligible per als materials no ferromagnètics ($\chi_s(Cu) = -1 \cdot 10^{-5}$; $\chi_s(Al) = 2 \cdot 10^{-5}$). Queda clar que només els materials ferromagnètics interaccionen apreciablement amb el camp magnètic. Per tal d'incrementar la variació de \vec{B} a l'espai, se solen col·locar diversos imants propers amb polaritats invertides (figura 2).

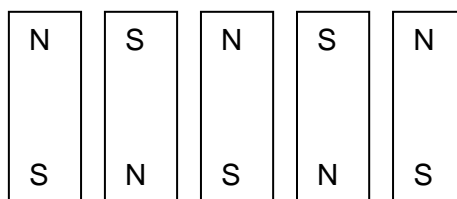


Figura 2. Disposició característica per incrementar la capacitat d'un imant per atraure objectes

Els diversos equips de separació magnètica se solen classificar depenent de si serveixen per separar objectes de mida gran (*trampes magnètiques*) o bé partícules petites barrejades amb el material ja triturat. Detallarem, tot seguit, alguns dels equips que s'utilitzen.

La politja magnètica (figura 3a) es diferencia del tambor magnètic (figura 3b) pel fet que en el primer cas l'imant es mou amb la cinta transportadora, mentre que en el segon l'imant és fix.

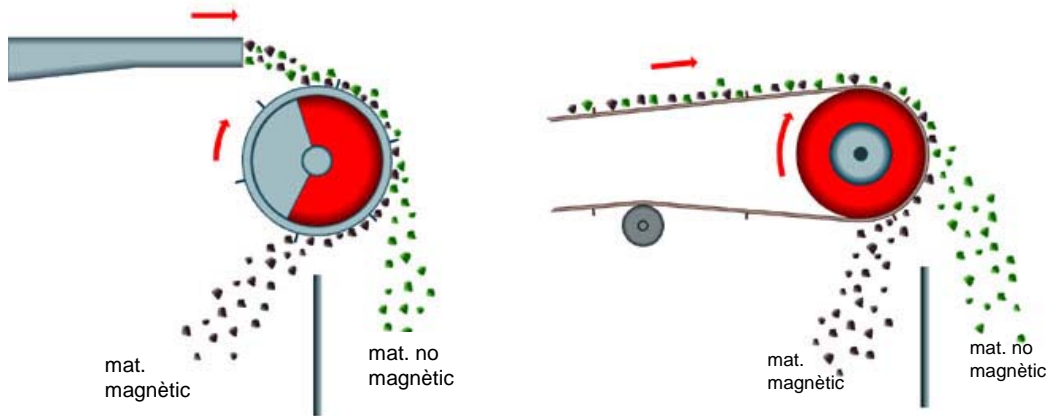


Figura 3. a) Tambor magnètic (l'imant és fix), b) Politja magnètica (l'imant és mòbil)

Pel que fa als imants «rectangulars», podem veure dues disposicions característiques en la figura 4. Solen utilitzar-se per separar objectes ferromagnètics grans.

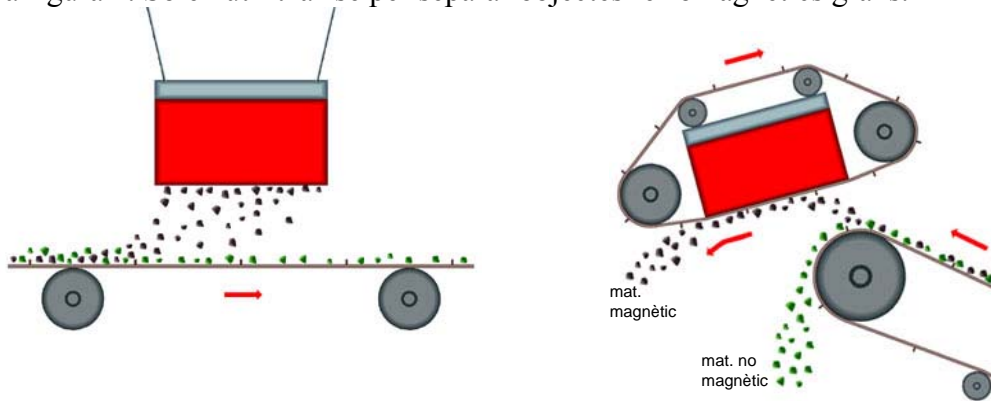


Figura 4. a) Imant rectangular autonetejador i b) plat magnètic (sgm-magnetics.com)

Finalment, en la figura 5 mostrem l'esquema d'una reixa magnètica. El material triturat s'aboca per la part superior i les partícules magnètiques queden atrapades a les barres de la reixa. Periòdicament s'haurà de netejar la reixa.

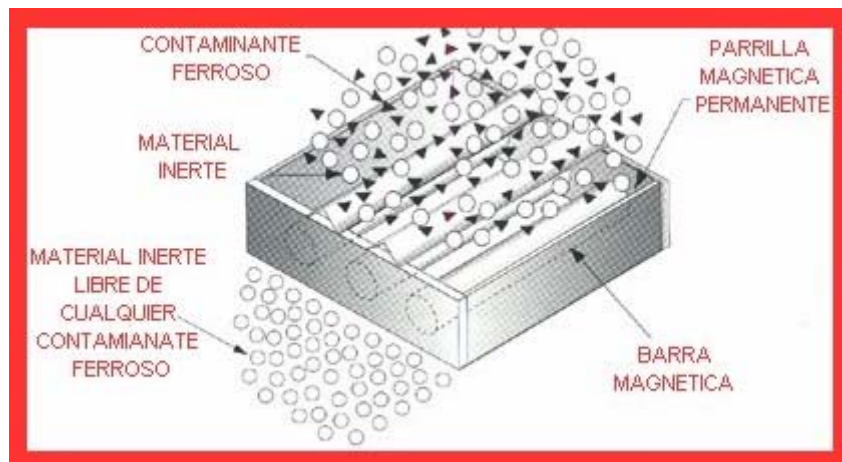


Figura 5. Reixa magnètica (centromagnetico.com)

Separació de metalls per corrents de Foucault (o d'Eddy)

Els metalls que no són ferromagnètics es poden separar per aquesta tècnica que també utilitza un imant. En aquest cas, però, és necessari que el camp magnètic variï ràpidament amb el temps. Aquestes variacions generen uns corrents dins del material conductor (els corrents de Foucault) que tendeixen a oposar-se a la variació del camp magnètic que els ha generat. Com a resultat, la força d'interacció és sempre de repulsió. En els aparells comercials, la variació del camp magnètic s'aconsegueix fent girar els imants ràpidament al voltant d'un eix (figura 6).

La força repulsiva és proporcional a la velocitat amb què varia el camp magnètic i, per tant, amb la freqüència de gir de l'eix, f , tal com indica la fórmula:

$$F \propto \sigma f V B^2 \quad (2)$$

on σ és la conductivitat elèctrica del metall i V , el volum de l'objecte. Podem modificar lleugerament la fórmula (2) tot introduint la densitat del metall, ρ :

$$F \propto m \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) f B^2 \quad (3)$$

on m és la massa de l'objecte. L'interès de la fórmula (3) és que ens diu com varia la força de repulsió per a objectes de massa igual (de pes igual) i de metalls diferents. La força és proporcional al quocient σ/ρ . O sigui que la repulsió no serà màxima per als metalls més bons conductors, sinó per a aquells que presentin un valor més gran d'aquest quocient. El metall que se separarà millor (Al) presenta una conductivitat sensiblement inferior a la dels millors conductors elèctrics (Cu i Ag) (vegeu la taula I).

	σ ($10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$)	ρ (kg/m^3)	σ/ρ ($\text{m}^2 \Omega^{-1} \text{kg}^{-1}$)
alumini	3.8	2700	14000
coure	6.0	8900	6700
plata	5.9	10500	6000
zinc	1.7	7140	2200
or	4.2	17000	1700
bronze	1.2	8700	1400
estany	0.91	7300	1200
plom	0.49	11300	400

Taula I. Conductivitat elèctrica (σ) i densitat (ρ) de diversos metalls.
La força de Foucault per unitat de massa és proporcional al seu quocient

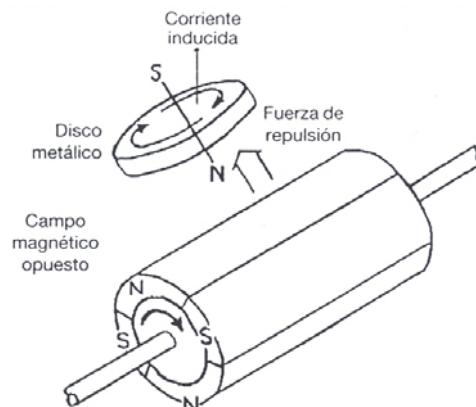


Figura 6. Generació de les forces de Foucault a causa del moviment dels imants al voltant d'un eix. Quan el pol nord de l'imant s'acosta al disc metàl·lic, es crea un corrent induït de sentit tal que aquest adquireix un pol nord encarat al de l'imant (Duran)

En principi, doncs, les forces de Foucault servirien per separar els metalls dels materials no conductors (vidre, plàstics, etc.), tal com indica la figura 7a. Tanmateix, es pot aprofitar el mateix imant per separar els aliatges de base ferro dels altres metalls (figura 7b). Una configuració molt corrent és la de la figura 8, en la qual veiem que primer se separen els objectes de base ferro amb un imant estàtic, mentre que els altres metalls se separen en una etapa posterior.

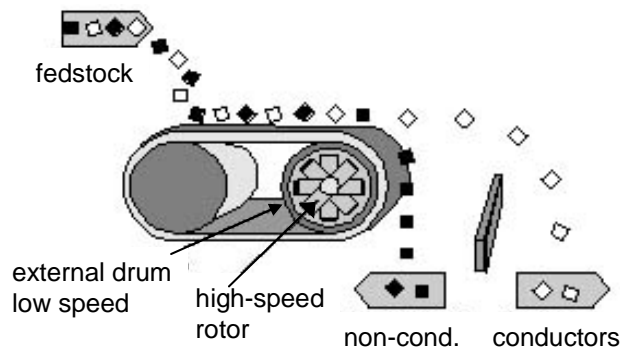


Figura 7a. Separador per corrents de Foucault

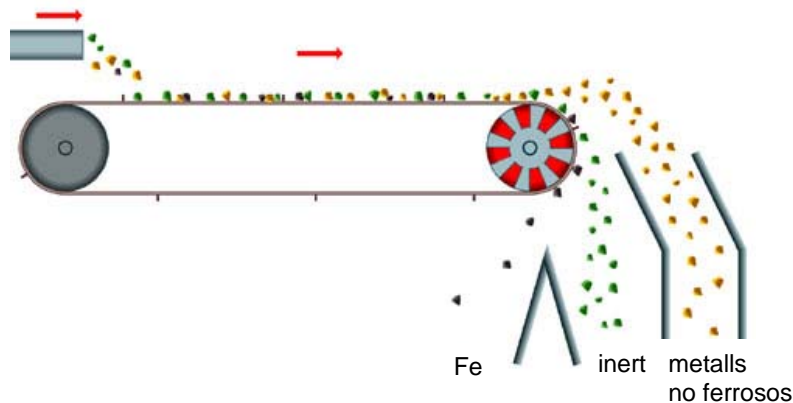


Figura 7b. Separador per corrent de Foucault. El rotor que conté els imants gira molt més ràpidament que no pas el corró que arrossega la cinta (sgm-magnetics.com)

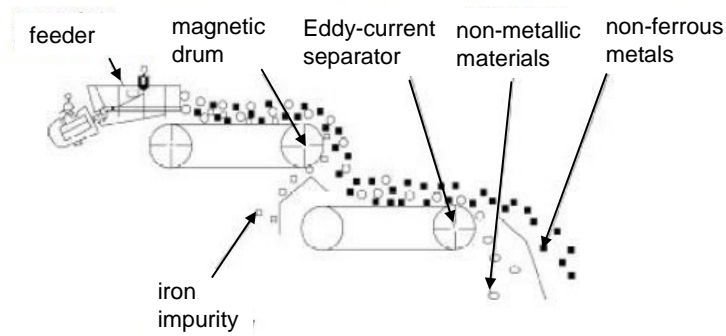


Figura 8. Separació en dues etapes dels aliatges de base ferro dels metalls i dels materials no conductors

Separació manual

Sol ser una etapa posterior a la separació automàtica de metalls que es duu a terme abans de la trituració. S'extreuen objectes estranys: ampolles de porcellana, pedres, etc. Si no s'eliminen abans de la trituració, el vidre reciclat pot quedar seriosament contaminat.

Trituració

Amb la trituració es redueix la mida de partícula del material. Se sol parlar de dos tipus de trituració depenent de la mida final de les partícules: *a*) en la *tritració* pròpiament dita s'obtenen partícules de més de 5 mm, mentre que en *b*) la trituració fina o *mòlta* són inferiors a 5 mm. Quan es tracta del reciclatge de vidre, l'objectiu de cada etapa és diferent. En la *tritració* es pretén que es desprenguin els materials que vénen units a l'envàs de vidre (plàstics, taps...). A aquesta etapa la segueix una etapa de selecció granulomètrica. En la *mòlta*, l'objectiu és assolir una granulometria adequada als requeriments del procés de fabricació de vidre (barreja amb les matèries primeres i fusió).

La reducció de la mida de la partícula s'aconsegueix, essencialment, per dos mecanismes diferents: per compressió i per impacte. En la *tritració per compressió*, les partícules són comprimides entre dues superfícies dures que s'acosten progressivament fins que es crea una força prou elevada per trencar-les. Normalment, la mida de les partícules que surten de la màquina és regulada per l'obertura de la sortida. En la figura 9 veiem l'esquema d'un triturador de mandíbules. Un altre exemple seria el molí de corrons de la figura 10.

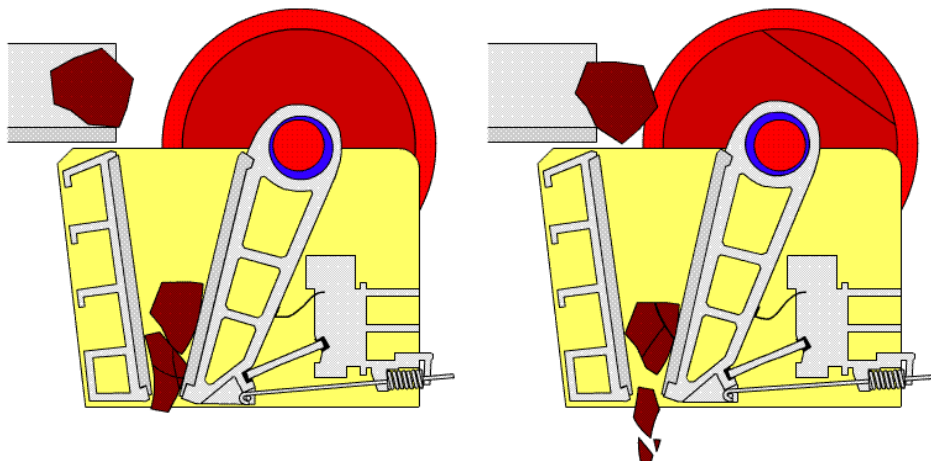


Figura 9. Trituradora de mandíbules (s'obren i es tanquen gràcies a l'acció de l'excèntrica)
(www.agregados.biz)

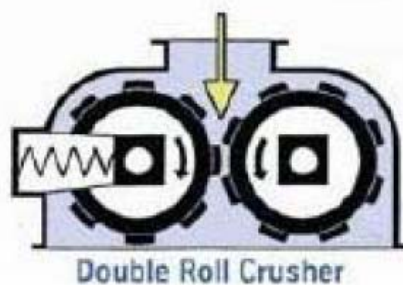


Figura 10. Molí de dos corrns dentats

En la *tritració per impacte*, les partícules es trenquen quan són colpejades contra una superfície dura a gran velocitat. L'energia de l'impacte serà proporcional a l'energia cinètica (és a dir, a la velocitat al quadrat). Per tant, es tracta de molins on les velocitats són molt elevades. En els molins de martells, les partícules són impulsades per unes barres que giren al voltant d'un eix a gran velocitat (figura 11). La superfície on es produeix l'impacte està sotmesa a unes condicions molt dures. Aquest inconvenient es pot reduir amb el molí de la figura 12, en el qual les partícules xoquen sobre les mateixes partícules. Les partícules que baixen pel centre i van a parar al rotor són accelerades a gran velocitat (fins a uns 300 km/h) en direcció a la carcassa del molí. Tanmateix, la fracció de les partícules que baixa per la part externa s'interposa en la trajectòria i l'impacte és finalment entre partícules. Amb aquest tipus de molí s'assoleixen mides de partícula petites (1-2 mm), les quals es poden ajustar controlant els diversos paràmetres de treball (flux de material d'entrada, fracció del material que va al rotor, velocitat del rotor, etc.).

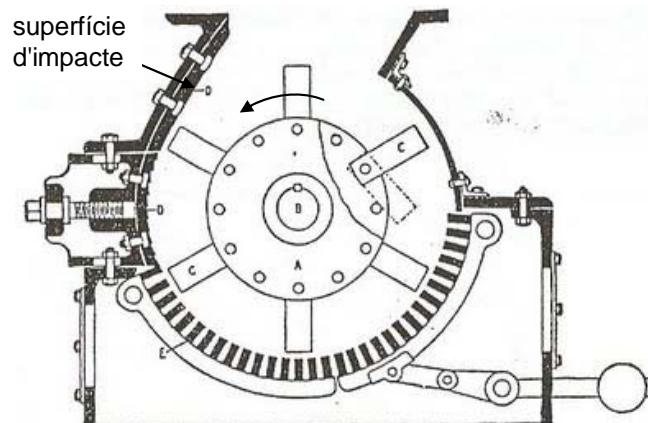


Figura 11. Molí de martells en el qual es controla la mida de la partícula amb una reixa

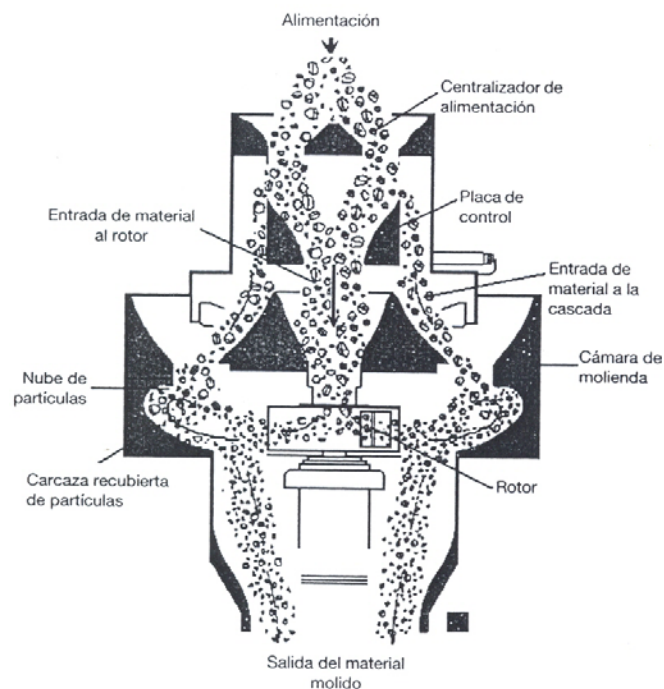


Figura 12. Molí per impacte. Les partícules que baixen «en cascada» protegeixen la carcassa de l'impacte de les partícules que surten del rotor

Classificació granulomètrica

Un cop triturat, el material es pot separar en fraccions corresponents a una mida de partícula determinada. És el que s'anomena *classificació*. Aquesta operació és més necessària quan la sortida de la trituradora o molí és lliure.

Selecció

La selecció és l'operació amb què se separen del conjunt les partícules de materials diferents o aquelles que són de vidre d'un color que no interessa. No sembla pas que la selecció manual de partícules sigui una operació conceptualment diferent de la dels cossos estranys abans de la trituració. Tanmateix, si analitzem els sistemes automatitzats de selecció, sí que la diferència és evident. Aquests consten de dues etapes: la detecció i l'ejecció.

En la *detecció* es tracta d'identificar les partícules que interessa treure del conjunt. Aquesta identificació sol ser per alguna propietat física:

- pel color, la transparència o la reflectivitat (p. e. vidres de color diferent)
- per l'absorció a l'infraroig (se sol utilitzar per separar pedres o ceràmiques)

L'inconvenient d'aquests dos mètodes és que tant les partícules com l'ambient han de ser prou nets.

- per la conductivitat elèctrica. Una partícula metàl·lica modificarà el corrent elèctric que circula per un solenoide.

L'*ejecció* consisteix a treure la partícula detectada. El mètode més corrent és un raig d'aire que desvia la partícula. Cada ejector actua d'acord amb el senyal generat per un detector. En l'amplada típica d'una cinta transportadora (1 m) s'hi poden instal·lar fins a 100 ejectors (i els detectors corresponents). Atès que la selecció és una tècnica molt més lenta que les tècniques de separació descrites anteriorment, només s'utilitza després d'aquestes, quan el material conté només una petita fracció de partícules contaminants.

Tecnologies de reciclatge del vidre i «benefici» dels minerals

Les operacions de benefici dels minerals són aquelles que tenen com a objectiu separar del mineral la fracció rica en la substància que interessa (separar el *mineral* de la *ganga*). Es tracta, per tant, d'operacions sobre les matèries primeres per obtenir el material. En el cas del vidre, els envasos recuperats, per exemple, dels residus sòlids urbans constitueixen la matèria primera de la qual se separarà allò que no és vidre. Atès aquest paral·lelisme, no ens hauria pas d'estranyar que la majoria de processos de reciclatge del vidre ja s'haguessin desenvolupat prèviament en el camp de la metal·lúrgia extractiva. Val a dir, com a exemple, que les figures representatives de les màquines de reciclatge de vidre les hem extretes d'empreses que venen sobretot a la indústria minera.

Reciclatge o reutilització del vidre

Al final de les operacions descrites en aquest seminari s'obtenen trossos de vidre recuperat d'alguna font de residus. Es tracta de trossos de vidre que han estat més o menys classificats segons el color i exempts d'elements estranys. Tot i que aquest producte l'anomenem *vidre reciclat*, el cicle del reciclatge encara no s'ha tancat. No podem considerar-lo pròpiament vidre reciclat fins que no formi part de la substància d'algun objecte útil. Veurem en el seminari següent que aquests trossos de vidre normalment es barregen amb matèries primeres, de manera que és difícil trobar productes fets amb vidre 100% reciclat.

La major part del vidre recuperat es destina a la fabricació de productes idèntics als originals (*reciclatge*). Tanmateix, una fracció del vidre recuperat no serà apta per a aquesta finalitat per raons diverses. Per exemple:

- trossos de colors barrejats,
- vidres de composició química poc corrent,
- excés temporal en l'oferta de vidre reciclat.

Resulta d'interès, doncs, buscar usos alternatius del vidre reciclat que en molts casos representen un *down cycling*, o sigui aplicacions de qualitat menor. Es tracta d'una *reutilització* del vidre que no representa pròpiament un reciclatge. Hi ha tota una sèrie d'usos alternatius per al vidre reciclat:

- substància mineral inerta per al drenatge

- sorra artificial per a restauració de platges
- àrid per a materials de construcció (formigó i una mena d'asfalt que s'anomena asfalt vidrat, *glassphalt* en anglès)
- pintura reflectora per a senyals
- abrasius
- llana i fibra de vidre

El lector podrà pensar que hem fet una relació molt optimista.

5. Beneficis ambientals del reciclatge del vidre

Objectius:

Analitzar com la utilització de vidre reciclat redueix l'impacte sobre el medi ambient. Posarem un èmfasi especial en la quantificació de l'estalvi energètic.

No hi ha cap mena de dubte que el reciclatge del vidre és una activitat més respectuosa amb el medi ambient que no pas la fabricació del vidre a partir de minerals. En aquest capítol analitzarem de manera sistemàtica aquests «beneficis ambientals». Els estructurarem d'acord amb els punts següents:

- a) estalvi d'energia
- b) disminució d'emissions contaminants
- c) estalvi de matèries primeres

Balanç de masses al forn de fusió

L'eficiència dels processos de producció de l'enginyeria química se sol analitzar a partir del balanç de masses i del balanç d'energia. En general, un balanç de masses detallarà les entrades de materials $IN1$, $IN2$... i els residus o subproductes generats, RES , per a la producció, P , d'un material determinat (vegeu l'esquema de la figura 1). La conservació de la massa implica, necessàriament, que:

$$IN1 + IN2 + \dots = P + RES \quad (1)$$

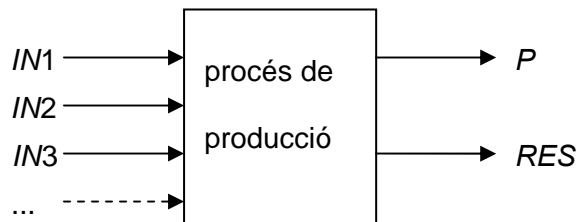


Figura 1. Diagrama de la conservació de la massa

Diguem, de passada, que els grups ambientalistes i les persones sensibilitzades amb la degradació del medi ambient tendeixen a fixar-se en els residus (RES) generats, tot oblidant moltes vegades el benefici (el producte, P) que s'obté de l'activitat. Tanmateix, si el producte és necessari, llavors l'anàlisi correcta ha de passar, per exemple, per la comparació de la relació RES/P de les diverses alternatives de fabricació del producte. Vist d'aquesta manera, les diverses alternatives seran més o menys correctes ambientalment i en podrem establir una gradació amb criteris objectius.

L'objectiu del balanç de masses és optimitzar els processos de tal manera que per a una producció P donada, el volum de residus i, per tant, el volum de matèries primeres sigui mínim. En la figura 2 es detalla el balanç de masses en la producció de vidre quan una part de les matèries primeres és substituïda per vidre reciclat. Expliquem els termes que surten a la figura. El forn es carrega amb una barreja de matèries primeres (M) i de vidre reciclat que pot provenir d'un proveïdor extern (C_e) o bé de peces defectuoses dins de la mateixa fàbrica (C_i). Tanmateix, la massa de vidre que s'extreu del forn (E) no serà igual a la càrrega (T), sinó que en el procés de fusió es produirà una pèrdua de massa

per descomposició del carbonat de Ca i del sulfat de Na (fundent) (L_m). Les pèrdues L_m són inevitables i, típicament, representen el 10%-20% de M . Finalment, la producció P serà inferior al vidre que s'extreu del forn a causa de: *a*) les pèrdues de vidre que no es poden reaprofitar (L_g) i *b*) el vidre que sí que es pot tornar a fondre (C_i).

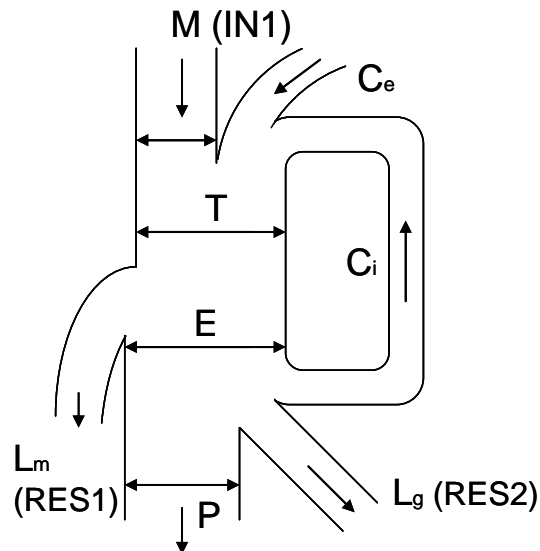


Figura 2. Balanç de masses al forn de fusió del vidre (els diversos termes estan explicats al text)

Des d'un punt de balanç de masses, la incorporació de vidre reciclat extern (C_e) millora l'eficiència del procés per dues raons: es redueix el consum de matèries primeres (M) i es disminueixen, proporcionalment, les pèrdues per fusió (L_m).

Estalvi energètic en les matèries primeres

La reducció en l'ús de matèries primeres comporta, també, una disminució de l'energia necessària per produir el vidre. Considerem les tres etapes en el processament de les matèries primeres: *a*) l'extracció, *b*) la trituració i *c*) el transport.

Com que el vidre reciclat també necessita que el triturem i el transportem, considerarem que l'estalvi energètic lligat a la reducció de matèries primeres provindrà, principalment, de l'extracció. De les matèries primeres utilitzades (sorra, carbonat i sulfat de Na), el sulfat és el que necessita més energia per a la seva producció: 10 MJ/kg de Na_2SO_4 . Com que, de mitjana, el 23% de les matèries primeres és sulfat de Na, s'estalviaran, aproximadament, 2 MJ/kg de vidre reciclat que entri al forn.

Estalvi energètic en la fusió

El procés de fusió de les matèries primeres necessita aportació d'energia per diversos conceptes:

1. *Mantenir la diferència de temperatura* desitjada entre el forn i l'ambient, ΔT :

$$Q_R = \frac{\Delta T}{R},$$

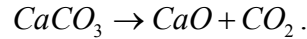
on R és la resistència tèrmica entre el forn i l'ambient.

2. *Escalfar els minerals* des de la temperatura ambient fins a la temperatura màxima del forn (1500 °C):

$$Q_c = mc_p(T_{\max} - T_{\text{amb}}),$$

on m és la massa que s'ha d'escalfar i c_p , la calor específica de les matèries primeres. Q_c val, aproximadament, 4,8 MJ/kg de vidre.

3. *Descompondre el carbonat càlcic segons la reacció:*



Com que la calor d'aquesta reacció és de 177.8 kJ/mol (1.8 MJ/kg de carbonat), i per 1 kg de vidre verge es consumeixen uns 150 g de carbonat, resulta que per aquest concepte es gastaran aproximadament 0,3 MJ/kg de vidre.

4. *Fondre els minerals cristal·lins* requereix una despesa d'energia proporcional a la calor latent de fusió, L_f .

$$Q_f = mL_f$$

Per al conjunt de minerals utilitzats, $Q_f = 0,8$ MJ/kg de vidre.

Quan s'utilitza vidre reciclat, ens estalviem tant la calor de descomposició (Q_d) com la calor de fusió (Q_f). Aquest segon terme no és necessari per a un vidre reciclat, perquè el vidre és, de fet, com un líquid de viscositat molt elevada. Pròpiament hem de dir que, quan l'escalfem, el vidre no es fon, sinó que es reblaneix. Si agrupem els estalvis d'aquests dos termes, arribem a la conclusió que la introducció de vidre reciclat estalviarà:

$$\text{estalvi d'energia} = 1.1 \frac{(C_i + C_e)}{E} \text{ (MJ / kg de vidre)},$$

on els paràmetres que figuren a la fórmula són els de la figura 2.

D'altra banda, els altres dos termes (Q_c i Q_R) tindran valors semblants encara que introduïm vidre reciclat al forn. Podem apreciar l'estalvi d'energia en la figura 3, on es representa l'energia consumida al forn de fusió en funció del percentatge de vidre reciclat.

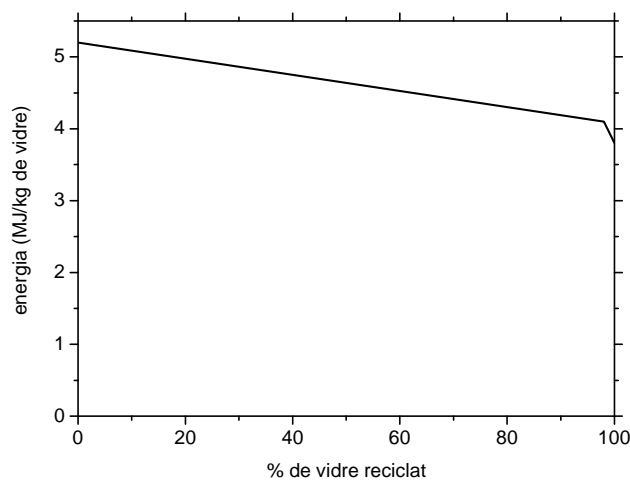


Figura 3. Energia gastada al forn de fusió en funció del percentatge de vidre reciclat

La disminució addicional que s'observa prop del 100% és deguda al fet que si s'utilitza només vidre reciclat no cal una temperatura tan elevada, de manera que hi haurà un

estalvi addicional que provindrà d'una reducció de Q_c i Q_R . Amb només vidre reciclat, la temperatura del forn és més baixa per dues raons: no s'han de fondre els grans de quars i l'afinament és més ràpid.

L'energia per produir 1 kg de vidre ha anat disminuint monòtonament al llarg dels anys (figura 4). Una part d'aquest estalvi s'ha d'atribuir a la utilització del vidre reciclat (sobretot els estalvis més recents). S'ha de dir, tanmateix, que els estalvis espectaculars entre els anys cinquanta i setanta van ser deguts a una millora en el disseny dels forns (ús d'aïllants millors i recuperació de la calor).

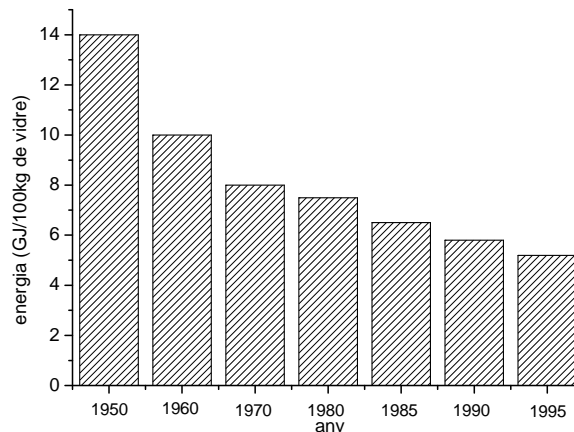


Figura 4. Evolució de l'energia gastada al forn de vidre al llarg dels anys

Ens podem fer una idea de la importància del reciclatge del vidre si diem que l'any 2000 el contingut en vidre reciclat dels envasos era del 53% a Holanda.

Estalvi d'emissions contaminants

El terme *emissions* fa referència als gasos o partícules sòlides que s'emeten a l'atmosfera. En la taula I detallem les emissions més importants que es generen durant la producció de vidre. Veiem que la disminució d'emissions quan s'utilitza vidre reciclat provindrà tant de l'estalvi d'algunes matèries primeres com de l'estalvi d'energia (essencialment la disminució en el consum de fuel).

El vidre 100% reciclat no necessita carbonat càlcic. Podríem pensar, erròniament, que les emissions de CO_2 cauen a zero amb el vidre reciclat. Tanmateix, això no és així, atès que el 90% del CO_2 emès en la producció del vidre verge prové de la combustió del fuel.

El cas dels òxids de sofre (SO_x) és diferent. Tot i que una part prové del fuel, majoritàriament es generen durant la descomposició del sulfat de Na. Com que aquesta substància no s'utilitza amb el vidre reciclat, les emissions de SO_x disminueixen dràsticament.

Tot i que els gasos corrosius HCl i HF també s'emeten amb el vidre reciclat, l'emissió disminuirà perquè el forn treballa a una temperatura inferior.

La pols generada és superior amb el vidre verge perquè aquesta és arrossegada cap a l'exterior pels gasos que es desprenen durant els processos de descomposició dels minerals. Amb el vidre reciclat es genera menys pols i, el que és més important, la pols que es genera conté menys partícules fines.

En conjunt, la reducció de contaminants que s'assoleix amb el vidre reciclat se circumscriu principalment a l'etapa de producció del vidre, ja que els envasos de vidre dipositats en un abocador constitueixen un material inert que no genera cap mena de contaminants.

Estalvi de matèries primeres

Com que per fabricar 100 kg de vidre es necessiten uns 120 kg de minerals (recordem que les pèrdues per descomposició dels carbonats i sulfats són el 20%), aquest serà l'estalvi «directe» en matèries primeres. D'altra banda, com que l'energia prové principalment de fonts no renovables, un estalvi d'energia significa, també, un estalvi de matèries primeres.

III. Obtenció i reciclatge dels plàstics

6. Generalitats sobre el reciclatge de plàstics

Objectius:

Analitzar críticament les raons que se solen donar per fomentar el reciclatge de residus plàstics. Classificar els tipus de residus, i també els tipus de tecnologies de reciclatge. Veurem com la taxa de reciclatge és molt baixa.

Cal reciclar els plàstics?

En aquest apartat més aviat pretenem suscitar preguntes que no donar respostes. L'objectiu és fomentar el debat. Per tal de reflexionar sobre si cal o no cal reciclar els residus plàstics, analitzarem algunes de les raons que se solen repetir en les campanyes de foment del reciclatge i veurem què hi ha de veritat darrere els eslògans publicitaris.

Estalvi de matèries primeres

Tot i que els polímers es poden sintetitzar tant a partir del petroli com del gas natural, ens fixarem en el primer cas. Resulta que el 95% del petroli s'utilitza com a carburant. Per tant, només el 5% del petroli s'utilitza a la indústria petroquímica per a la síntesi de substàncies diverses (figura 1).



Figura 1. Ús del petroli

En la taula I trobem un detall dels productes petroquímics. Realment el petroli és una matèria primera de la qual s'obtenen infinitat de substàncies útils en molts sectors econòmics.

Aplicació	Percentatge	Aplicació	Percentatge
1. Automobilisme	17	5. Plàstics injectats	10
2. Agricultura	16	6. Fibres sintètiques	7
3. Cautxú	14	7. Explosius	3
4. Matèries per a pintures	12	8. Diversos	21

¹Anticongelants, additius per a lubricants i combustibles, antiincrustants, etc. ²Fertilitzants nitrogenats (amb NH₃), pesticides. ³Elastòmers que supleixen la inestabilitat de la producció del cautxú natural. ⁴Resines tipus alquílic, acrílic i vinílic. Copolímers butadiè-estirè. Dissolvents i plastificants. ⁵Plàstics conformats per emmotllament. ⁶Derivades de C₂H₂, C₂H₄, nitril acrílic, més CNH, NH, i p-xilè, que són coproductes per a la seva síntesi. ⁸Inclou tensioactius alquílics-arílics, etc.

Taula I. Productes de la indústria petroquímica (Vian)

Com que menys del 4% del petroli es destina a la síntesi de polímers, encara que es recicli el 100% dels plàstics, la incidència sobre la conservació dels recursos petrolers seria mínima.

Estalvi d'energia

Per tal d'avaluar aquest possible estalvi, prenem el polietilè d'alta densitat (HDPE) com a exemple. L'energia calorífica de la *nafta* necessària per fabricar 1 kg de polímer és de

71.4 MJ/kg HDPE. Durant la polimerització, la formació d'enllaços nous representa una pèrdua d'energia calorífica de 17.9 MJ/kg HDPE. Per tant, l'energia calorífica que recuperariem tot cremant HDPE seria de 53.5 MJ/kg HDPE. En el cas dels plàstics, doncs, la incineració amb recuperació d'energia representa un aprofitament interessant del residu.

Suposem ara (s'hauria de verificar) que l'energia que s'ha d'aportar externament per fabricar HDPE és poca si la comparem amb els 17,9 MJ que es perden amb la síntesi d'1 kg de HDPE. Llavors resultaria que amb el reciclatge d'1 kg estalviariem els 71,4 MJ de la matèria primera. Aquesta és una quantitat superior a la que s'estalvia amb el reciclatge d'1 kg d'acer.

La diferència d'energia estalviada entre el reciclatge i la recuperació d'energia és del 25%. En termes generals, podem afirmar, doncs, que l'alternativa reciclatge-incineració no té una opció clarament avantatjosa.

Prevenió de l'efecte hivernacle

Tant el reciclatge com la incineració comporten un estalvi energètic important. Com que a la nostra societat l'energia s'obté, en una proporció important, per combustió dels hidrocarburs, un estalvi d'energia comporta una emissió menor de CO₂. L'estalvi d'energia és més important amb el reciclatge. Per tant, des d'aquest punt de vista, aquesta alternativa serà millor que no pas la incineració.

Reducció del volum dels abocadors

Aquí sí que el reciclatge o la incineració representen una millora important. Hem de tenir en compte simplement que els plàstics representen el 7%-8% en pes i el 20% en volum dels residus sòlids urbans a Europa (any 1999).

Economia

El reciclatge de la majoria de residus plàstics no és econòmicament rendible. Veurem més endavant que, si l'evolució del cost de l'abocador continua augmentant, el reciclatge resultarà rendible per a una fracció cada vegada més gran dels residus plàstics.

Classificació dels residus plàstics

Els residus plàstics se solen classificar depenent del seu origen en:

- a) *Residus*: són els que es generen al final del cicle de vida.
- b) *Rebuig plàstic (plastic scrap)*: són els que es generen a les mateixes indústries transformadores del plàstic en el procés de fabricació de peces. Es tracta de retalls, peces defectuoses, etc. Aquests residus ja tenen una tecnologia per al seu tractament ben establerta i uns canals ben definits per al seu reciclatge.

Aquí cal remarcar que una empresa podria vendre un producte de plàstic amb l'etiqueta «verda» de 100% de «plàstic reciclat» que no hagués estat mai pròpiament *residu* sinó únicament *rebuig*.

Per tenir una idea de les activitats econòmiques que generen més residus plàstics, podem analitzar quin és el consum de plàstics per sectors (figura 2). S'ha de tenir en compte que el volum de material que es convertirà en residu variarà molt depenent de la vida del producte. Així, la contribució dels embalatges als residus de plàstic serà superior al 40% que indica el gràfic, ja que la vida d'aquests productes és molt curta.

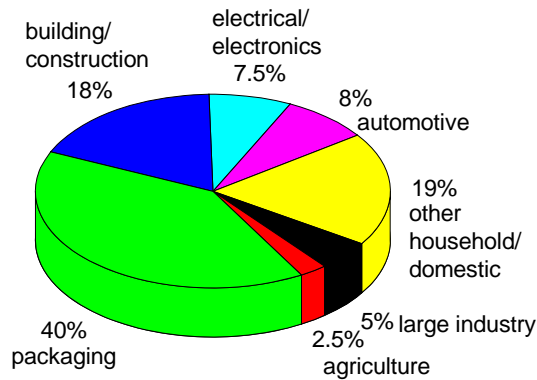


Figura 2.- Consum de plàstics per sector a l'Europa occidental el 1999

Tipus de reciclatge

Depenent del tipus de residu tractat i també del procediment seguit per reciclar-lo, se sol parlar de:

- Reciclatge primari.* Converteix el rebuig plàstic en productes de qualitat equivalent a la dels plàstics verges.
- Reciclatge secundari.* Converteix el rebuig plàstic o residus en productes de qualitat inferior.
- Reciclatge terciari.* És el *reciclatge químic* amb el qual s'obtenen productes químics o combustibles.
- Reciclatge quaternari.* Incineració amb recuperació d'energia.

Els dos primers tipus de reciclatge s'anomenen, també, *reciclatge mecànic* ja que comporten, simplement, la trituració del residu, fusió i nova conformació. En la figura 3 s'indica el destí dels residus plàstics. Veiem que la taxa de recuperació al final del cicle de vida és molt petita: al voltant del 30% si hi incloem la incineració i només del 10% sense incineració. Fins i tot el rebuig de plàstic no es recicla totalment: el 40% surt de la cadena de producció.

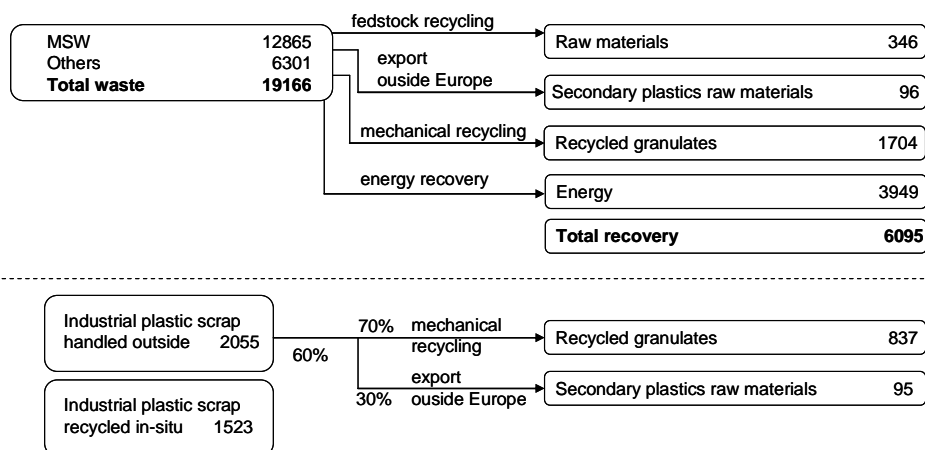


Figura 3. Destí dels residus plàstics a Europa occidental el 1999

Eficiència de la recuperació

Amb l'excepció notable d'Alemanya, a Europa la taxa de recuperació dels plàstics d'embalatge és molt baixa (taula II).

	1997		1998
	Residus (10 ³ tones)	Reciclat (%)	Reciclat (%)
Àustria	180	20	22
Bèlgica	208	25	--
Dinamarca	183	6	--
Finlàndia	90	10	10
França	1571	6	8
Alemanya	1502	45	--
Itàlia	1777	9	11
Luxemburg	7	---	--
Holanda	611	12	10
Espanya	1215	5	--
Suècia	1501	14	--
Regne Unit	13561	7	9

Taula II. Volum de residus plàstics i taxa de recuperació a Europa occidental

Pel que fa als tipus de plàstic, les dades d'Austràlia de la taula III indiquen clarament que el PET és el plàstic que més es recupera.

Polímer	Consum (tones/any)	Recuperació (%)
PET	28000	20
HDPE	140000	3.3
PS	46000	1.4
PVC	170000	0.2
LDPE	121000	0.6
PP	160000	0.2

Taula III. Reciclatge de plàstics a Austràlia el 1992

7. Les barreres per al reciclatge de plàstics

Objectius:

Entendre que la baixa taxa actual de reciclatge dels residus plàstics és deguda a l'existència d'unes barreres que dificulten aquesta activitat.
Analitzar quines són aquestes barreres i com es poden abaixar.

En aquest seminari indicarem alguns dels factors que dificulten la viabilitat del reciclatge dels plàstics i que, per tant, constitueixen una barrera que s'hauria de superar si es vol incrementar la taxa de reciclatge.

- a) Identificació i separació de polímers
- b) Qualitat dels plàstics reciclats
- c) Rendibilitat econòmica

Identificació de polímers

La identificació d'un polímer és possible amb tècniques de la química analítica (principalment espectroscòpia d'absorció a l'infraroig - IR). Tanmateix, la seva utilització resulta problemàtica en un procés de separació automàtica. La identificació a través de l'aspecte visual per personal expert està subjecta a una gran incertesa, per diverses raons:

- La utilització d'additius, sobretot colorants, modifica substancialment l'aspecte del plàstic pur. El mateix objecte fabricat amb plàstic diferent pot semblar idèntic.
- Els plàstics purs podrien distingir-se per la transparència, fragilitat, duresa. Tanmateix, aquestes qualitats (sobretot la transparència) es poden veure molt afectades per les condicions de conformació o la rugositat de les superfícies.

Aquesta barrera es pot superar parcialment amb l'ús de codis identificatius. El codi més conegut és l'utilitzat inicialment per als envasos (figura 1), el qual té en compte, només, els 6 plàstics principals.



Figura 1. Codi per a la identificació genèrica dels plàstics d'envasos.
Cada nombre va associat a un plàstic determinat:
1, PET; 2, HDPE; 3, V (PVC); 4, LDPE; 5, PP; 6, PS; 7, altres

Aquest sistema s'ha estès a una varietat més àmplia de plàstics i el trobem identificant productes molt diversos: des de petits electrodomèstics fins a peces d'automòbil. En aquesta codificació ampliada el símbol se simplifica (triangle equilàter sense nombre) amb indicació expressa del tipus de polímer (figura 2). Fixem-nos que la identificació s'amplia a altres polímers i que s'indica si es tracta d'aliatges (PVC/PA) o si contenen càrregues («GF» significa 'fibres de vidre'). Tot i això, aquest codi continua tenint una sèrie de limitacions:

1. L'acrònim (p. e. «PVC») és el polímer «genèric»; sota aquest nom s'agrupen polímers de pes molecular diferent i polímers purs i amb additius.
2. Hi ha molts productes per a l'embalatge que són «multimaterial»: brics (cartró, alumini, plàstic), films coextrudits (en què capes de diversos polímers estan adherides).
3. Encara hi ha molts fabricants que no identifiquen els plàstics per descuit o bé per evitar la «còpia» del producte (normalment aquesta prevenció no té sentit, ja que la identificació és només «genèrica»).

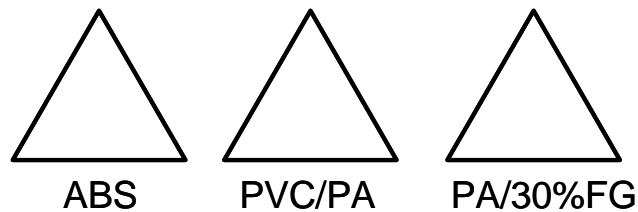


Figura 2. Codi identificatiu generalitzat

Atesa la facilitat de marcar a la superfície dels objectes de plàstic aquests codis, hom es pregunta com és possible que molts fabricants continuïn produint envasos sense identificar.

Sistema avançat d'identificació

Una proposta molt innovadora i prometedora és la següent: consisteix a utilitzar *marcadors interns*. Cada polímer contindria un additiu que es podria detectar automàticament (p. e. per fluorescència). En una previsió optimista, fins i tot es podrien marcar diferents «graus» del mateix polímer. Es tracta d'un sistema en estat de desenvolupament. Per assegurar-ne l'èxit, la seva utilització hauria de ser universal.

Complementàriament a la identificació, s'hauria de tendir a disminuir el nombre de polímers utilitzats per a uns determinats productes. Aquesta és una tendència molt remarcable en el món de l'automòbil, probablement promoguda per la directiva europea que responsabilitza el productor del reciclatge dels materials al final del seu cicle de vida. Tanmateix, el cas més destacat és el de les ampolles de begudes gasoses: totes són de PET. Aquest fet, juntament amb el preu elevat d'aquest polímer, fa que sigui el plàstic que es recicla més, tal com hem pogut constatar en el seminari anterior.

Separació

Complementàriament a la identificació del polímer dels objectes sencers i la seva separació, es pot separar els diversos polímers després d'una operació de trituració. En principi es podrien separar els 6 polímers principals per la seva densitat diferent, tal com s'indica en la figura 3.

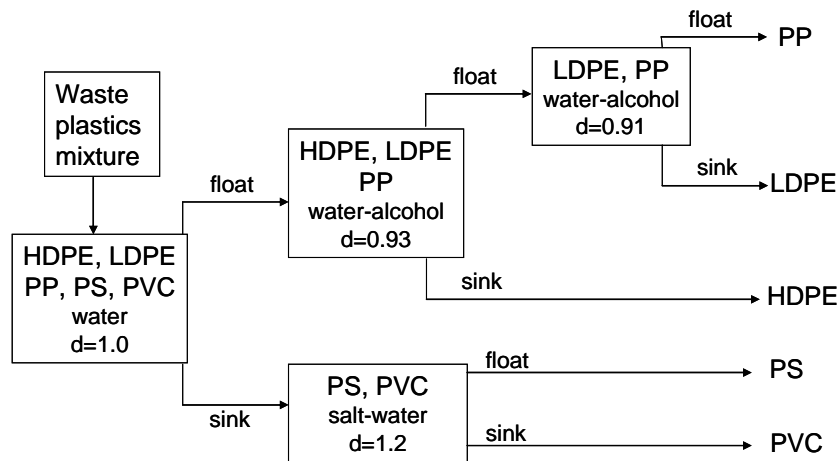


Figura 3. Esquema de la separació per diferències de densitat

Aquesta separació teòrica d'una barreja arbitrària de plàstics és una visió molt optimista de la realitat. A la pràctica és una tècnica que serveix per separar petites quantitats de plàstic contaminant d'un plàstic majoritari (p. e. l'LDPE de les anelles dels taps de les ampolles de PET). En la taula I s'indiquen possibles sistemes de separació de plàstics prèviament triturats.

Method	Mode of separation	Advantages	Disadvantages
Flotation tanks	Separation in liquid by means of differences of polymer densities	Can effect coarse separation	Needs at least two stages for good separation. Problems if polymers have similar densities
Hydrocyclone	Pressurized separating fluid containing polymer particles from vortex. Separation effected by centrifugal force (250 times the force of gravity)	Better separation than static flotation tanks	Problems with polymers of similar densities or with very different particle size and shape
Compressed air	Rotating drum with air flow to fluidise light component (plastic film/paper labels/cloth)	Better separation than flotation tanks	Problems with polymers of similar densities
Micronising	Pulverising and sieving utilising the possibility that different polymers have different grinding characteristics	PET in PVC can be reduced from 2% to 0.2%. Improvements with cryogenic grinding	The economic and environmental costs of cryogenic grinding
Electrostatic separation	Charged polymer flakes fall between charged plates and separated according to the retained charge	Good for residual contamination from PET or PVC	Critical dependence on the pretreatment of flake surface to achieve reproducible change

Taula I. Mètodes de separació de polímers triturats

Qualitat dels plàstics reciclats

El reciclatge mecànic dels plàstics no sol recuperar la qualitat del material. Encara que s'aconseguís un subministrament de plàstic recuperat lliure d'additius i contaminants,

les propietats del plàstic reciclat solen ser pitjors. En la figura 3 es veu com el reciclatge afecta diverses propietats dels plàstics: el mòdul elàstic, l'allargament per termofluència, la facilitat de fluència del fos (una propietat inversa a la viscositat) i l'allargament a la fractura.

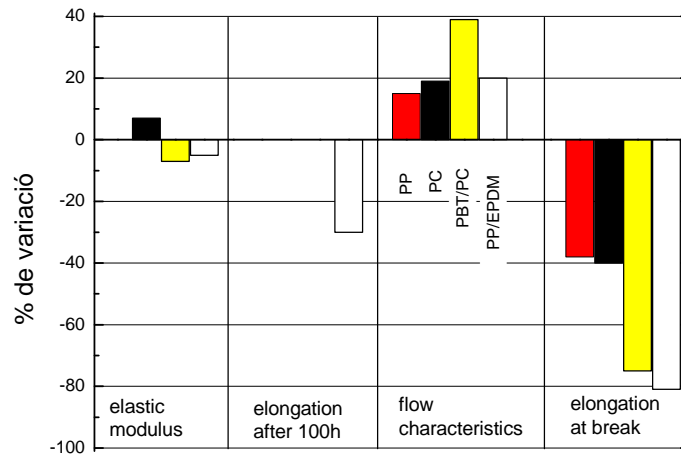


Figura 4. Variació percentual d'algunes propietats dels plàstics reciclats respecte dels plàstics verges

Les propietats que varien més són la viscositat, que disminueix, i l'allargament a la fractura, que també disminueix. Aquesta variació és deguda al fet que les molècules del plàstic reciclat són més curtes. El reciclatge mecànic trenca les molècules per efecte del treball mecànic (esforços tallants sobre el polímer fos) i la degradació tèrmica. Afegit a aquest efecte intrínsec del reciclatge mecànic trobem l'efecte perniciosos dels contaminants: fibra de paper (de les etiquetes), plàstics diferents, additius diversos...

La pèrdua de qualitat en el reciclatge mecànic ha portat a un descrèdit excessiu del plàstic reciclat. Alguns fabricants tenen com a norma la utilització de material verge 100%; així asseguren els seus estàndards. Tanmateix, val a dir que per a moltes aplicacions el plàstic reciclat pot ser equivalent al verge.

La barrera lligada a la qualitat es podria superar totalment amb els processos de reciclatge químic, ja que s'obtenen productes de baix pes molecular més fàcils de separar (ho descriurem en el seminari corresponent). Essent optimistes, podríem pensar que aquestes tècniques evitarien la necessitat de seleccionar els residus per tipus de plàstic. Les limitacions actuals són, principalment, de rendibilitat econòmica.

Aplicacions alternatives dels plàstics reciclats

La disminució de qualitat que resulta del reciclatge mecànic comporta que s'hagin de buscar aplicacions pròpies del plàstic reciclat. Vegem-ne dos exemples.

a) El PET de les ampolles

A diferència del vidre o l'alumini, el PET recuperat no es reutilitza en la fabricació d'ampolles, sinó que aproximadament el 60% s'utilitza en la fabricació de fibres tèxtils (el PET és un polièster). Una de les aplicacions principals és el farciment de fibra d'anoracs. És una aplicació en què el material verge es pot substituir pel 100% de material reciclat sense que això comporti una pèrdua de qualitat del producte.

b) Extrusió de plàstics barrejats

És un cas extrem de *down cycling* en el qual una barreja de plàstic s'extrudeix a pressions elevades per obtenir perfils gruixuts (les propietats mecàniques no són determinants) destinats a aplicacions «noves»: tanques de jardí, mobiliari urbà, etc. Es tracta d'un producte realment «nou» que no ha de competir amb el plàstic verge. És un exemple del «mercat verd» que només serà «ambientalment correcte» si es demostra que l'impacte ambiental és menor que les alternatives.

Rendibilitat econòmica

Els processos de recuperació i reciclatge de polímers tenen uns costos associats que en pocs casos resulten inferiors als del material verge. Per a la majoria de polímers, el reciclatge és antieconòmic o bé genera només beneficis marginals. En la figura 5 es detalla el cost depenent de l'origen del residu. Veiem que els costos principals van associats a la recollida i transport (*logistics costs*), mentre que el reciclatge (reciclatge mecànic) presenta un cost molt menor. Evidentment, la rendibilitat dependrà críticament del preu del plàstic verge. Per tant, del preu del petroli.

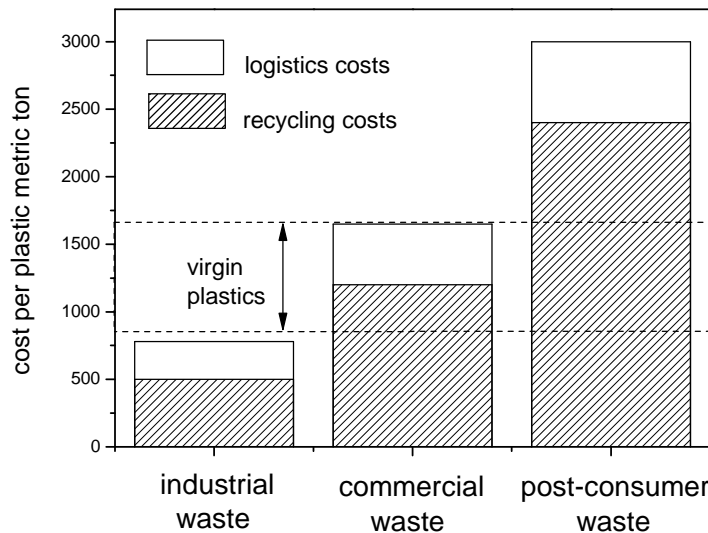


Figura 5. Comparació dels costos per obtenir plàstics a partir de residus amb els dels plàstics verges

Pel que hem vist, una de les causes de la manca de rendibilitat és el preu elevat de la recollida, principalment en el cas dels residus sòlids urbans (RSU). Aquest aspecte millora quan el sistema de recollida té en compte tot el conjunt de reciclables (vidre, metalls, paper i plàstic). Per tant, sembla que la rendibilitat milloraria en una estructura de reciclatge que integrés moltes activitats: la recollida, la classificació i el reciclatge de materials diferents. Aquest és un dels objectius que persegueix la directiva europea de l'embalatge.

Una de les eines «legals» que s'utilitza per fomentar el reciclatge és el cost de l'abocador. El seu increment progressiu pot fer viables les activitats de reciclatge, tal com s'indica en la figura 6. El reciclatge de qualsevol tipus d'envàs és més viable a mesura que augmenta el cost de l'abocador, ja que amb el reciclatge ens estalviem aquest cost. Per això, les línies de tots els envasos tenen un pendent negatiu.

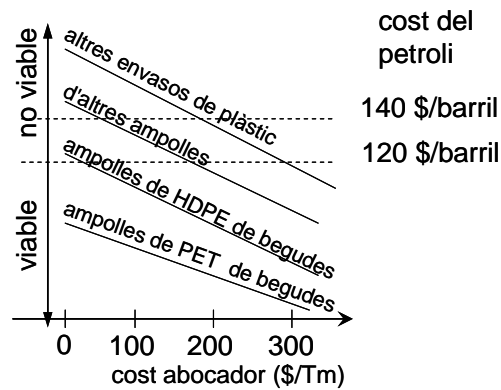


Figura 6. Viabilitat del reciclatge de diversos envasos en funció del cost de l'abocador, dependent del preu del petroli

La línia puntejada marcaria a partir de quin cost del reciclatge aquest seria viable. Evidentment, aquesta línia dependrà del preu del petroli. Veiem que dels plàstics dels RSU actualment resulten viables les ampolles de PET i HDPE. Els altres productes de plàstic (films, envasos de iogurt...) resulten molt cars de reciclar. Per tant, probablement s'ha d'admetre que la taxa de recuperació té un límit. No és previsible que s'acosti progressivament al 100%. Hi ha una taxa de recuperació per sobre de la qual l'activitat no serà mai rendible. Vegem-ho en el gràfic següent, en el qual el «cost d'abocador compensat» significa quin hauria de ser el cost de l'abocador per tal que l'activitat de recollida fos viable econòmicament.

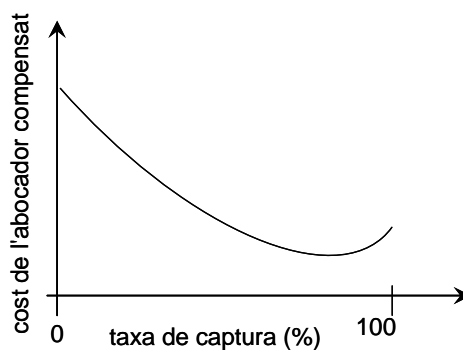


Figura 7. Cost de l'abocador per tal que la recollida fos rendible

Si la taxa de captura és baixa, no s'arriba a pagar la inversió ni la mà d'obra. Veiem que el punt òptim no es troba per a una taxa del 100%. Aquesta conclusió és comparable a la d'un estudi basat en Europa en el qual es van examinar diverses alternatives.

- A: 100% abocador
- B: 15% reciclatge (12% mecànic); 15% recuperació d'energia;
70% abocador
- C: 15% reciclatge (mecànic); 85% recuperació d'energia
- D: 25% reciclatge (15% mecànic); 75% energia

L'alternativa més viable econòmicament resultava ser la B (actualment, la situació deu haver variat, ja que la fracció que va per recuperació d'energia és molt superior a la majoria de països). En aquest punt, val la pena recordar el que ja havíem apuntat al

començament d'aquests seminaris: el reciclatge és una de les opcions per al tractament dels residus que es complementa amb la incineració i l'abocador.

Estabilitat dels preus

Un fet que frena les inversions per a l'activitat de reciclatge és la inestabilitat del preu del plàstic reciclat. Als anys noranta, el preu del PET reciclat va experimentar unes variacions enormes. En la figura 8 observem que a l'increment espectacular del preu l'any 1995, va seguir una davallada molt considerable l'any següent. S'explica que la davallada del 1996 va ser deguda curiosament a l'èxit del reciclatge, ja que l'entrada en funcionament de més fàbriques de reciclatge va fer caure el preu del polímer reciclat (i, també, el del polímer verge).

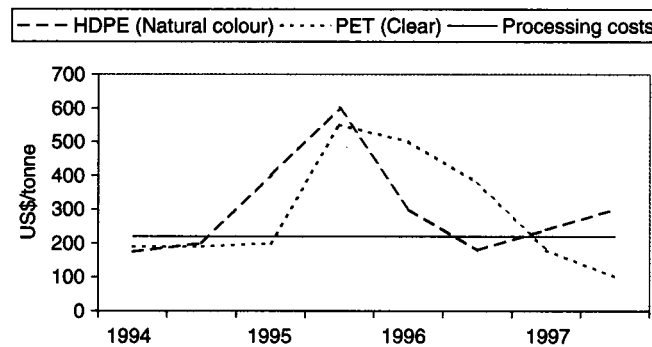


Figura 8. Variació dels costos de producció del PET reciclat als EUA

Recomanacions de les empreses del sector

Recollint moltes de les constatacions que acabem de fer sobre les barreres al reciclatge dels plàstics, l'any 1999 l'Associació Europea de Transformadors de Plàstics (APME) va publicar unes recomanacions per millorar la competitivitat del reciclatge de plàstics. En detallem algunes.

- Minimitzar al màxim el dipòsit a l'abocador al final del cicle de vida.
- Dissenyar els productes procurant facilitar-ne el reciclatge (ecodisseny).
- Incrementar la recollida selectiva per tal d'obtenir un flux homogeni de reciclables al menor cost possible.
- Desenvolupar estàndards europeus per als residus reciclables i per als plàstics reciclats.
- Estimular la demanda de plàstics reciclats per a aplicacions de «paret gruixuda» en les quals els requeriments mecànics no són tan estrictes.
- Estimular el reciclatge i l'ús de plàstics reciclats a través d'incentius fiscals.

Política per al reciclatge i legislació

Queda clar que el mercat tot sol no pot generar, a curt termini, les condicions que facin el reciclatge viable econòmicament. Per tant, es necessiten incentius externs que promoguin aquesta activitat. Per exemple:

- a) Obligació d'un contingut mínim de material reciclat.
- b) Política de compres que prioritzin el material reciclat.
- c) Responsabilitat sobre el productor.
- d) Política integrada (coordinació de les polítiques de la UE).

- e) Incentius econòmics per al reciclatge (crèdits, fiscalitat).
- f) Impostos sobre el material verge.
- g) Programes de «productes retornables».
- h) Increment del cost de l'abocador.

8. Tecnologies de reciclatge mecànic

Objectius:

Descriure diversos processos industrials de reciclatge mecànic de plàstics.
Reciclatge d'ampolles de PET i reciclatge de plàstics barrejats.
Separació química de polímers.

Les principals tecnologies per al reciclatge de plàstics s'agrupen en:

- a) reciclatge mecànic
- b) reciclatge químic
- c) recuperació d'energia

Dedicarem aquest seminari al reciclatge mecànic.

Reciclatge mecànic

El reciclatge mecànic no altera voluntàriament l'estructura química del material. El procés és molt diferent en termoplàstics i en termostables. En el cas de plàstics *termostables*, el material es tritura i es reutilitza com a càrrega inerta. En el millor dels casos pot millorar alguna propietat mecànica del nou material. En canvi, els *termoplàstics* es trituren i es tornen a fondre. Els termoplàstics reciclats se solen vendre en forma de gransa. Tanmateix, poden fabricar-se productes sense passar per aquest estat intermedi.

En aquest seminari, només tractarem el reciclatge mecànic dels termoplàstics, que il·lustrarem amb dos exemples: el reciclatge d'ampolles de PET i el reciclatge de plàstics barrejats.

Reciclatge d'ampolles de PET

Probablement, el reciclatge de les ampolles de PET constitueix el cas més reeixit. Considerem que l'alimentació consisteix en un subministrament d'ampolles de PET perfectament seleccionades que normalment estaran formades pels diversos components que indica la figura 1.



Figura 1. Components d'una ampolla de PET

Tot seguit descriurem un procés patentat per al reciclatge d'aquestes ampolles. Per entendre'l ens remetem a l'esquema de la figura 2.

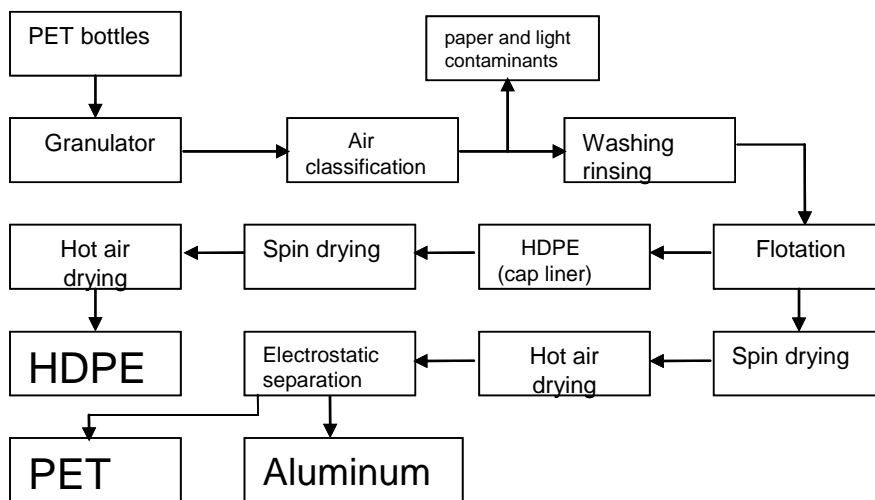


Figura 2. Esquema d'un procés patentat de reciclatge d'ampolles de PET

Comentem alguns aspectes del procés:

- *Etiquetatge*. Normalment és preferible el plàstic, ja que en alguns processos el paper es pot disgregar en fibres que acaben dispersades al plàstic fos. D'altra banda, les etiquetes necessiten adhesiu, el qual és un contaminant problemàtic.
- *Flotació per diferències de densitat (flotation)*. En aquest cas és una tècnica que funcionarà bé ja que s'han de separar pocs materials.

Separació del PET i el PVC

El reciclatge mecànic que hem descrit produirà PET de qualitat sempre que el plàstic estigui net de contaminants i no s'hi barregin altres plàstics. El PVC té un aspecte molt semblant al PET. Per tant, un examen visual pot resultar insuficient per separar-los. D'aquí que es recorri a sistemes d'identificació i separació relativament sofisticats.

Separació d'ampolles senceres

Podem entendre aquest sistema a partir de l'esquema de la figura 3. El punt clau és que el PVC conté l'àtom de clor en la seva molècula. Aquest àtom es detecta per una tècnica anomenada *fluorescència de raigs X*.

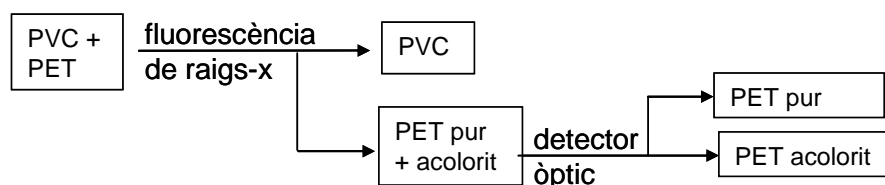


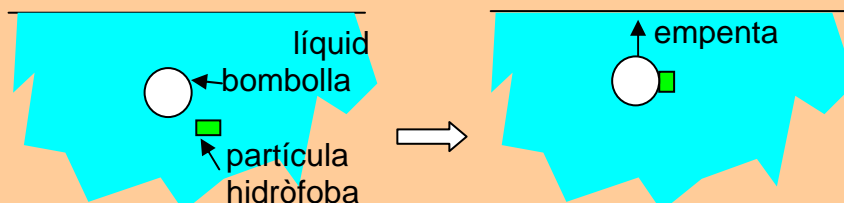
Figura 3. Detecció del Cl per separar el PET del PVC

Separació per flotació després de la trituració

Com que la densitat d'ambdós plàstics és semblant, la separació per densitat resulta inviable. S'ha adaptat el mètode de flotació selectiva utilitzat a bastament per l'enginyeria química (vegeu el requadre) a aquest problema concret.

Flotació selectiva:

És una de les tècniques generals de separació utilitzades en molts camps de l'enginyeria química (mineria, indústria paperera, etc.). En un bany de flotació selectiva es produeix una gran quantitat de bombolles per agitació mecànica.



Una partícula hidròfila tendeix a mullar-se perquè l'energia de la interfície aigua-sòlid és menor que la de l'aigua-aire. Per tant, «repel·leix» les bombolles. El contrari ocorre amb una partícula hidròfoba, la qual s'adhereix a les bombolles que l'empenyen cap amunt pel principi d'Arquímedes. Com a resultat, el bany queda cobert per una escuma en la qual surten les partícules hidròfobes, mentre que les hidròfiles queden al fons.

Com que tant el PET com el PVC són hidròfobs, tots dos tendeixen a capturar bombolles i surarien. Per evitar-ho se sotmet la barreja de plàstics a un tractament en una dissolució 1%-3% de NaOH a 80°C (vegeu la figura 4). El resultat és una disminució de la hidrofobicitat del PET que, ara, no capturarà les bombolles. Aquest serà, doncs, el plàstic que quedarà al fons del tanc de flotació, mentre que el PVC surarà amb l'escuma.

Aquest procediment és tan eficient que s'arriba a obtenir gairebé el 100% de PET amb una barreja inicial amb el 70% de PVC.

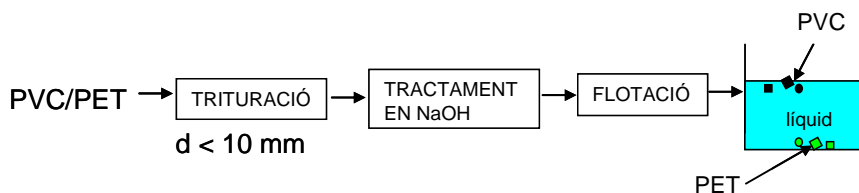


Figura 4. Flotació selectiva de PET i PVC

Reciclatge de plàstics barrejats

Del conjunt de plàstics reciclables que se separen amb la recollida selectiva, les garrafes i ampolles de HDPE i les ampolles de PET es recuperen fàcilment i es reciclen. La fracció que queda constitueix encara un volum important que resulta difícil de separar per la varietat tant de productes com de plàstics. Hi ha tècniques per processar aquests plàstics barrejats i obtenir-ne productes de plàstic de secció molt gruixuda (figura 5).



Figura 5. Les llates del banc són perfils extrudits de plàstics barrejats

El procés patentat REVIVE, que detallem en la figura 6, admet una barreja de plàstics lliure de ferro, material orgànic, vidre i pedres. Tanmateix, tolera una concentració d'impureses (alumini, paper) de < 5%.

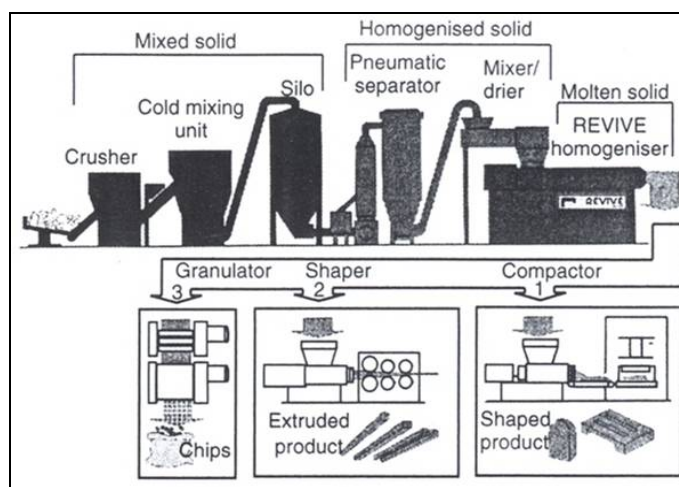


Figura 6. Esquema del procés patentat de reciclatge de plàstics barrejats REVIVE

Probablement, una part del paper i paper d'alumini s'extreu amb el separador pneumàtic, però essencialment el conjunt del material triturat i barrejat entra a la unitat de fusió, on la fracció plàstica fon. Com que els diversos plàstics no es dissolen entre si, són perfectament identificables en l'estructura del producte final, tal com es veu en la figura 7, que correspon a la fotografia d'una secció del material (zones clares i fosques).

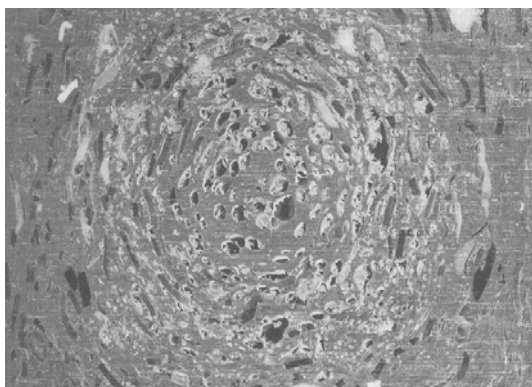


Figura 7. Tall transversal d'un perfil extrudit de plàstics barrejats. Fixeu-vos en la gran quantitat de porus a la part central

El material té un aspecte de «conglomerat» (*lumper*) en el qual destaca el nucli més porós. Aquests porus es generen durant la solidificació. No és tant una característica de la barreja de plàstics com de la gran secció de la peça (també apareixerien en objectes de plàstic verge si la secció fos prou gran).

Separació mecànica de plàstics barrejats

La fabricació de «conglomerats» de plàstic pot servir per reutilitzar la fracció menys valuosa dels plàstics reciclables. Tanmateix, la qualitat del material és molt inferior. Hi ha processos de separació «mecànica» automatitzats en fase de desenvolupament. El de la figura 8 n'és un exemple.

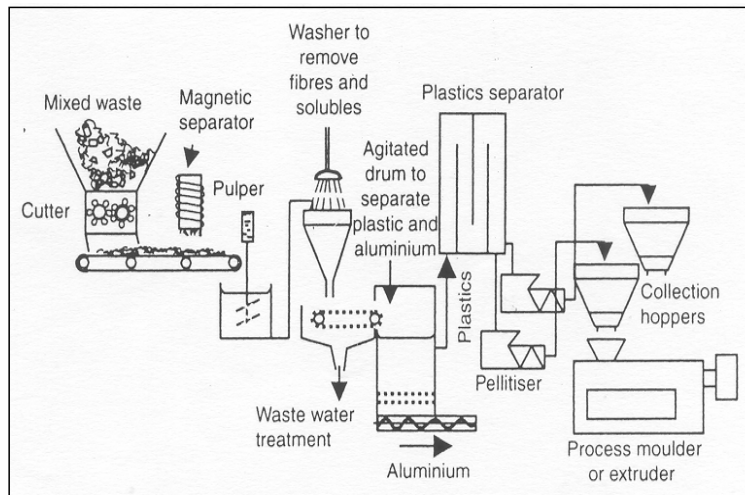


Figura 8. Esquema d'un procés de separació automàtica de reciclables

Podem intuir com se separen els diversos components:

- Ferro: separació magnètica
- Paper: per desintegració (*pulping*)
- Alumini: per densitat
- Plàstics:
 - PVC - per electrostàtica
 - PS - per densitat
 - PP, PE, PET?

L'inconvenient principal és que es tracta d'un sistema complex que necessita una inversió inicial elevada. Per poder-la recuperar s'ha d'assegurar un subministrament regular de reciclables. Aquesta és una dificultat compartida amb els sistemes de reciclatge químic que comentarem en el seminari següent.

Separació «químic» de plàstics barrejats

Consisteix a dissoldre selectivament els diversos plàstics. Des del punt de vista de la qualitat del material, és la tècnica idònia per les raons següents:

- es recuperen els polímers purs,
- es recuperen els additius.

Una barreja de PVC, PS, PP, LDPE, HDPE i PET es pot separar amb una eficiència del 99% dissolent-los en xilè a mesura que la temperatura es va incrementant per etapes. En la taula I indiquem les temperatures utilitzades per a la dissolució selectiva en xilè dels diversos polímers.

Polímer	Temperatura °C
---------	----------------

PS	ambient
LDPE	75
HDPE	105
PP	120
PVC	138
PET i insolubles	---

Taula I. Temperatura de dissolució de diversos polímers en xilè

Recentment, la indústria del PVC ha desenvolupat un procés de dissolució selectiva que s'ha aplicat amb èxit als residus de cablejat elèctric. Es recupera el 70% de tot el material: polímer, coure, càrregues, i segons l'empresa el cost és equiparable al de l'abocador.

Tot i que aquest mètode s'anomena *separació química*, no es tracta de cap tècnica de reciclatge químic, ja que no s'altera voluntàriament l'estructura de les molècules del polímer.

9. Reciclatge químic i recuperació d'energia

Objectius:

Classificar les diverses tècniques de reciclatge químic.
Entendre els avantatges i inconvenients de cadascuna i a quins tipus de residus s'apliquen.

Reciclatge químic (reciclatge terciari)

Amb el reciclatge químic (reciclatge terciari), el plàstic es converteix en productes químics que, normalment, són el resultat del trencament de les macromolècules. Es pot aplicar tant a termoplàstics com a termostables. El conjunt de tècniques és molt variat i es pot ordenar segons l'esquema de la figura 1.

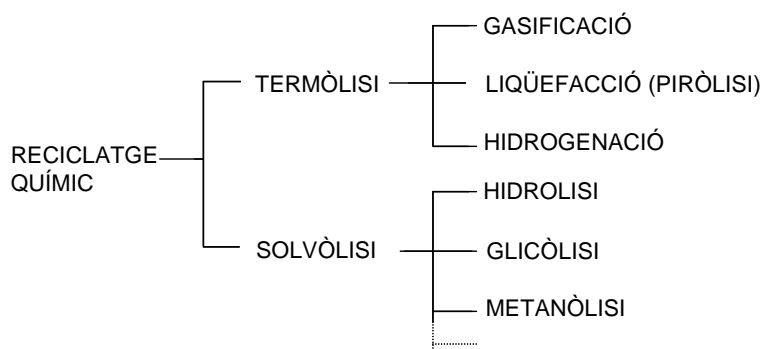


Figura 1. Classificació dels processos de reciclatge químic

Termòlisi

La *termòlisi* consisteix en la descomposició del polímer per efecte de la temperatura. Són tècniques que admeten plàstics barrejats i, per tant, útils en el tractament de residus. En la taula I veiem alguns dels plàstics que es poden reciclar amb aquesta tècnica.

Resina	Vendes als EUA (%)
LDPE	20.0
HDPE	15.1
PVC	15.0
PP	13.4
PS	10.0
ABS	1.8
Acrílics	1.1
Total	76.4

Taula I. Importància comercial dels polímers que es poden reciclar per termòlisi

Piròlisi i gasificació

La *piròlisi* es fa en absència d'oxigen. Per tant, el plàstic es descompon sense reaccionar. El producte és una mena de petroli sintètic que es pot refinar. La fracció gasosa que es produeix s'utilitza per a la mateixa instal·lació.

La *gasificació* es fa a temperatura més elevada i en presència d'oxigen. El producte és un gas sintètic que conté, principalment, CO i H₂. Un cop separats, aquests dos gasos són valuosos.

En la figura 2 presentem un esquema en el qual estan integrades diverses operacions. Veiem que els productes químics es poden reutilitzar per obtenir de nou polímers (i així es tanca el cicle).

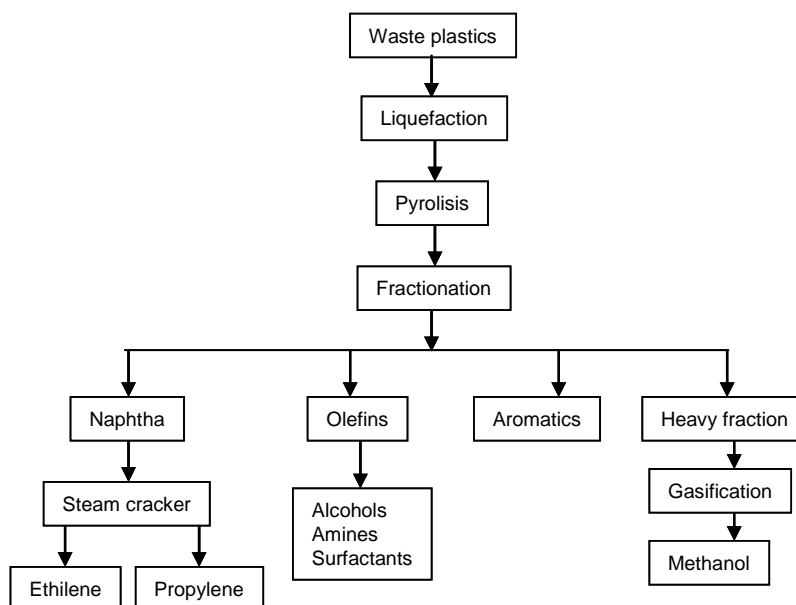


Figura 2. Esquema de les operacions d'una planta de piròlisi per al tractament de plàstics barrejats

Solvòlisi

En la *solvòlisi*, el polímer es descompon per reacció química. El resultat de la reacció són monòmers o oligòmers; és a dir, polímers amb un grau de polimerització molt baix. D'alguna manera, la solvòlisi consisteix a invertir la reacció de polimerització:



Podem veure l'exemple concret del fenol-formaldehid, anomenat també *baquelita* (figura 3). La solvòlisi serà, en aquest cas, una reacció amb aigua (hidròlisi) que invertirà la reacció de polimerització.

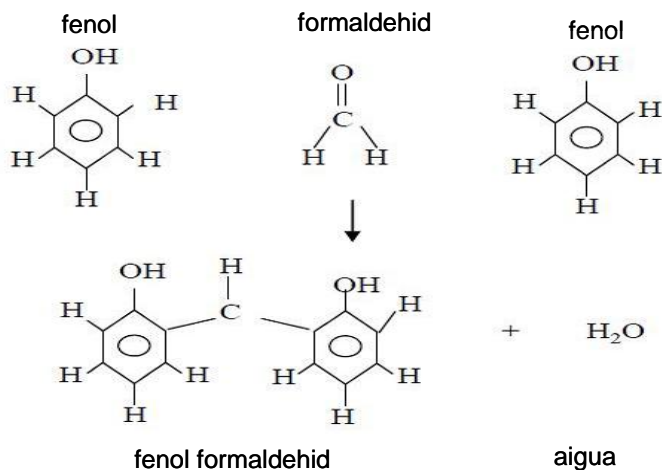


Figura 3. Reacció de polimerització de la baquelita

La solvòlisi és més eficient en plàstics separats prèviament. També presenta una tolerància baixa als contaminants. Per això és una tècnica més adequada per al tractament de «rebuig» que no pas de residus, ja que el tractament de residus comportaria una etapa prèvia i costosa de separació i neteja. En la taula II indiquem alguns dels polímers als quals s’aplica aquesta tècnica. Molts d’aquests plàstics s’utilitzen per fabricar grans estructures reforçades amb fibres de vidre (per exemple, les pales dels aerogeneradors). Se solen reciclar per solvòlisi.

Resina	Vendes als EUA (%)
PUR	5.0
PET	4.0
Fenòliques	4.0
U/F, M/F	2.5
Epoxídiques	<1.0
Total	15.5

Taula II. Importància comercial dels plàstics que es poden reciclar per solvòlisi

Destaquem el fet que la solvòlisi es pot aplicar al tractament de termostables, el reciclatge mecànic dels quals no sembla gaire prometedori.

Comentari general

Des del punt de vista del material, el reciclatge químic sembla l’opció ideal, ja que no es perden propietats. Tanmateix, aquest no és l’únic criteri (ni el més important). Les dificultats principals del reciclatge químic provenen de les elevades inversions inicials.

Recuperació energètica (reciclatge quaternari)

En el reciclatge quaternari el material desapareix. En aquest sentit no podem parlar pròpiament de reciclatge del material. El benefici que se n’obté (l’energia produïda) és contrarestat parcialment per l’emissió de gasos nocius: CO₂, CO, HCl (del PVC), NO, HF, dioxines. Algunes d’aquestes emissions es poden minimitzar optimitzant les condicions de combustió. D’altres, amb el tractament posterior dels gasos.

Pel que hem dit fins ara, queda clar que una fracció (important) dels plàstics no té un altre destí que la incineració o el dipòsit a l'abocador:

- plàstics barrejats
- productes de separació difícil
- termostables

S'ha demostrat que la introducció addicional de plàstics en una incineradora de residus sòlids urbans afavoreix les condicions de combustió i millora les emissions gasoses. També hem de dir que, en molts casos, la incineració no es duu a terme en una instal·lació construïda expressament, sinó als forns d'empreses destinades a la fabricació de materials. A Catalunya, una fracció important dels plàstics barrejats es crema en forns de ciment portland. També es pot incinerar als alts forns de la indústria siderúrgica (vegeu l'apartat següent).

Recuperació quimicoenergètica

En la producció de ferro a partir dels seus minerals s'utilitza un agent reductor. Tradicionalment, carbó. Dins de l'alt forn el carbó s'oxida parcialment a CO, en aquest procés s'allibera la calor necessària per escalfar el material i el CO reacciona amb els òxids de Fe per obtenir ferro metàl·lic. Aquestes dues funcions (aportació d'energia i potencial reductor), les pot fer el plàstic.

10. Beneficis ambientals del reciclatge de plàstics

Objectius:

- Quantificar els impactes ambientals de les diverses opcions de reciclatge.
 - Comparar el reciclatge químic i la incineració amb l'abocador.
 - Comparar el reciclatge mecànic amb el químic.
-

En el seminari número 6 ens preguntàvem si realment calia reciclar els plàstics. Ara ens proposem analitzar les càrregues ambientals que comporten les diverses opcions en casos de gestió de residus concrets. Fem primer algunes consideracions generals a les dues alternatives al reciclatge: el dipòsit en abocador i la incineració.

Reciclatge / dipòsit en abocador

Socialment, el dipòsit en abocador no està ben vist. Si fem cas, doncs, de l'opinió de la gent, l'alternativa no té comparació. Ara sembrarem el dubte amb la consideració següent:

«Un residu plàstic a l'abocador representa un dipòsit de carboni que no es transforma en CO₂ i, per tant, que no incrementa l'efecte hivernacle. Amb el reciclatge, l'energia que s'ha de consumir comporta una generació de CO₂ important. En particular, els processos de gasificació transformen part del polímer en CO₂.»

Podríem argumentar amb la rèplica següent:

«Tot i que el reciclatge genera CO₂, també produeix un producte (polímer, productes químics) que, si no fos pel reciclatge, s'hauria de produir mitjançant activitats alternatives que també generarien CO₂. Aquesta emissió de CO₂ s'estalvia amb el reciclatge.»

La pregunta clau que queda per respondre és si el dipòsit a l'abocador més l'obtenció dels productes químics per la via convencional generen més CO₂ o no que l'obtenció d'aquests productes a partir dels residus plàstics.

Reciclatge / recuperació d'energia

La particularitat dels residus plàstics respecte dels altres materials és que els plàstics es poden reutilitzar com a font d'energia. La incineració genera CO₂; tanmateix, s'hi ha de descomptar el CO₂ que es generaria per produir la mateixa quantitat d'energia. Des d'aquest punt de vista, potser resultarà que la incineració és més correcta ambientalment del que normalment es pensa.

Per la banda del reciclatge, es pot tenir el dubte de si l'energia lligada a les operacions de transport, separació, trituració, granulació, etc. no resulta massa elevada en comparació del benefici que se n'obté. En particular, pensem en la piròlisi, la qual, a primer cop d'ull, semblaria el mètode de reciclatge «ideal», ja que, tal com s'indica en la figura 1, tanca efectivament el cicle en el seu punt més alt (el petroli). La recuperació d'energia química per part del material només és possible si s'ha gastat energia d'una altra font. Com que el rendiment de cap procés no és mai del 100%, s'haurà de gastar

energia en excés. Per tant, depenent d'aquest rendiment, la càrrega ambiental del cicle serà més o menys elevada.

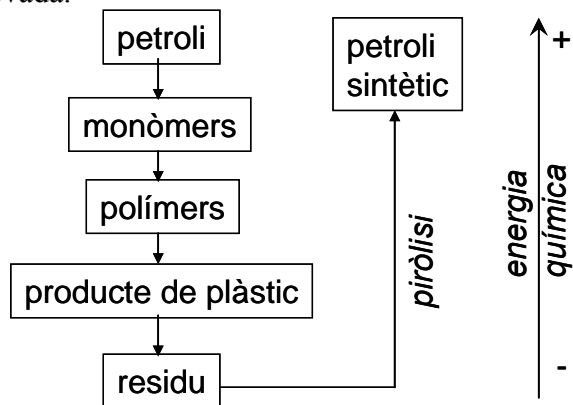


Figura 1. Variació d'«energia química» durant el cicle de vida d'un polímer i la seva piròlisi

Impactes ambientals del reciclatge. Anàlisi del cicle de vida (ACV)

Fixem-nos que hem passat del títol optimista del seminari sobre el vidre («Beneficis ambientals...») al títol més realista «Impactes ambientals...». Això és així perquè qualsevol activitat humana comporta un impacte ambiental. Això val també per al reciclatge. Vist des d'aquest punt de vista, l'opció millor seria aquella que provoqués un impacte menor. Hi ha una metodologia (*anàlisi del cicle de vida*) que permet analitzar l'impacte ambiental des d'un punt de vista global. «Global» en un doble sentit:

- a) té en compte els impactes de totes les etapes del cicle,
- b) té en compte els impactes que es generarien per fabricar el mateix producte si no es reciclés (impactes estalviats).

Alguns dels impactes que se solen quantificar són els següents:

- a) Potencial d'*escalfament global* (en kg equivalents de CO₂). Se sumen totes les emissions de gasos que provoquen l'efecte hivernacle (CO₂, N₂O, CH₄ i CFCs). Cada gas es multiplica per un factor que correspon a la seva eficiència a absorbir l'infraroig.
- b) Potencial d'*acidificació* (en kg equivalents de SO₂). Se sumen tots els gasos que provoquen pluja àcida (SO₂, NO_x, HCl, NH₃, HF), multiplicats pel factor corresponent.
- c) Potencial d'*eutrofització* (en kg de PO₄). Està relacionat amb les substàncies que contaminen el sòl i les aigües residuals per la incorporació excessiva de fertilitzants (NO_x, NH₄, N, PO₄...).
- d) Residus tòxics (en kg)
- e) Residus (en kg)

Impacte ambiental dels processos de reciclatge químic i mecànic

En aquest apartat volem donar dos exemples d'avaluació de l'impacte ambiental de diverses alternatives de gestió de residus plàstics. La intenció és mostrar que el reciclatge (mecànic o químic) no és pas sempre la millor opció. Segons l'anàlisi següent deduïm que, en determinats casos, no es poden descartar la incineració amb recuperació d'energia o el dipòsit en un abocador com a alternatives correctes ambientalment.

Exemple 1 – Impacte ambiental de la incineració i termòlisi de residus plàstics d’embalatge

Els residus plàstics recollits a Alemanya el 1995 tenien la composició següent:

- 9 % embalatge
- 7.5 % envasos
- 58.4 % plàstics barrejats
- 25.1 % rebuig

En el gràfic següent (figura 2) es mostren els impactes generats en el tractament d’un kg dels plàstics d’embalatge tot comparant-los amb l’impacte de dipositar-los en un abocador (un valor zero indicaria que l’impacte és idèntic al de l’abocador, mentre que un valor positiu indicaria un impacte superior).

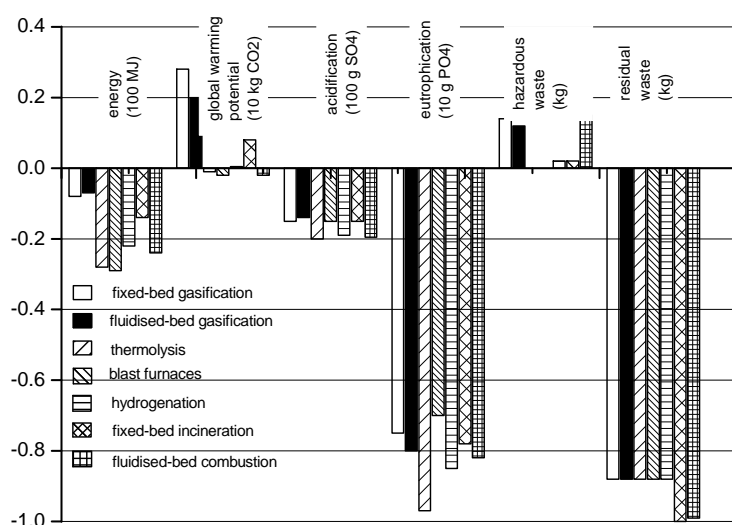


Figura 2. Impactes generats durant el cicle de vida d’un kg de bosses de plàstic tot considerant diverses opcions de reciclatge químic i de recuperació d’energia. Es pren com a referència (zero) el dipòsit en abocador

Analitzem alguns dels impactes individuals:

- *L’ús d’energia* és inferior a zero. Per tant, en tots els processos s’estalvia energia respecte de l’abocador.
- *Escalfament global.* Els processos de gasificació i la incineració del llit fix generen més CO₂ que l’abocador.
- *Residus perillosos:* pràcticament tots els processos generen més residus que l’abocador.

En aquest punt ens podríem fer la pregunta: Si la termòlisi és un procés endotèrmic i, per tant, consumeix energia, com s’entén l’estalvi d’energia d’uns 30 MJ/kg respecte de l’abocador (el qual no consumeix energia)? Aquesta contradicció aparent es resol si tenim en compte l’energia que s’hauria de gastar per obtenir els mateixos productes si deixéssim els residus en un abocador.

Comparem ara els processos de termòlisi amb la incineració/combustió. Contràriament al que hom esperaria d’entrada, els processos de gasificació són més perjudicials ambientalment que la recuperació d’energia. Això és així en *tots* els impactes analitzats.

Pel que fa a la combustió en un llit fluiditzat, el resultat és semblant als millors processos de reciclatge químic.

Exemple 2 – Comparació entre reciclatge mecànic i processos de termòlisi

Considerem ara la fracció de residus plàstics apta per ser separada i reciclada mecànicament. Ens preguntem si aquesta opció és millor o no a les millors opcions de termòlisi. Considerant les quatre possibilitats de reciclatge mecànic indicades en la figura 3, la conclusió és que, en conjunt, el reciclatge mecànic és ambientalment millor. L'opció de fabricar bosses d'escombraries (*refuse sacks*) és l'única que produeix un impacte ambiental lleugerament superior a la termòlisi, mentre que la fabricació de cable destaca clarament com l'opció més benigna ambientalment.

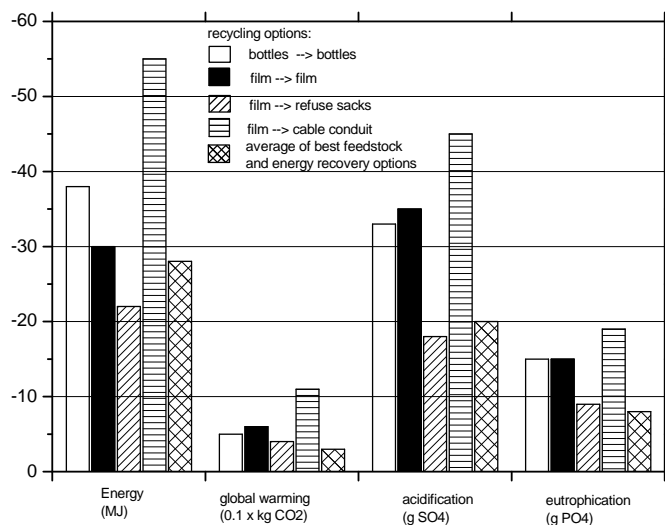


Figura 3. Comparació dels impactes generats durant el reciclatge d'un kg d'ampolles o de film per a diverses opcions de reciclatge mecànic i la mitjana de les millors tecnologies de reciclatge químic i incineració (els valors negatius indiquen que l'impacte és sempre menor que el dipòsit en un abocador)

IV. Obtenció i reciclatge del paper

11. Obtenció del paper

Objectius:

Descriure l'estructura del paper.

Entendre com es fabrica a partir de la matèria primera principal (la fusta) i els impactes ambientals que comporta.

Estructura del paper

En un full de paper podem distingir-hi els constituents següents:

a) Fibres de cel·lulosa. És el constituent principal. Les fibres s'encavalquen entre elles, amb la qual cosa donen consistència al material i determinen, en gran manera, la resistència mecànica.

b) Elements de farciment. Serveixen per omplir els forats de l'estructura fibrosa. Són partícules minerals (talc, guix, caolí, etc.) que a la vegada poden actuar com a pigments (diòxid de titani). També s'utilitzen polímers sintètics. En general, tenen un efecte important sobre una sèrie de propietats com ara la densitat, l'opacitat, la porositat, la blancor, etc.

c) Additius. Serveixen per modificar propietats específiques. Les *coles* disminueixen l'afinitat a l'aigua i poden incrementar la resistència mecànica. Els *colorants* donen color. A diferència dels pigments, són solubles en aigua.

Veiem, doncs, que el constituent principal és la cel·lulosa, la qual té un origen vegetal: palla de cereals, bambú, espart, canya de sucre, fusta... La qualitat és superior si s'obté de la fusta.

Estructura de la fusta

La fusta es pot considerar com un material compost en el qual trobem fibres de polímers lineals (cel·lulosa i hemicel·lulosa) dins d'una matriu termostable (lignina) que uneix les fibres. Ara descriurem l'estructura molecular de cada component.

a) Cel·lulosa. Constitueix el 40%-50% del pes de la fusta. És un polímer lineal de cadenes molt llargues ($n = 5000-10000$) la fórmula química de la qual és la de la figura 1.

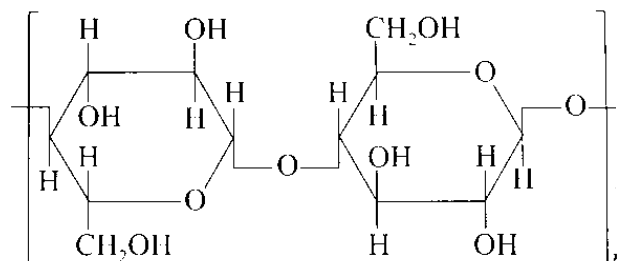


Figura 1. Estructura molecular de la cel·lulosa

b) Hemicel·lulosa. Constitueix el 20%-25% del pes de la fusta. És un polímer ramificat de molècules molt més curtes ($n = 100-200$). Tant la cel·lulosa com l'hemicel·lulosa són hidrats de carboni.

c) Lignina. Constitueix el 20%-30% de la fusta. Són molècules de polímers aromàtics d'estructura tridimensional. El seu pes molecular va de 1.000 a 20.000.

Per fabricar el paper només és útil la part fibrosa (cel·lulosa).

Obtenció de pastes cel·lulòsiques

És el conjunt d'operacions mitjançant les quals se separen les fibres de la lignina. Se segueixen diverses fases:

- a) *Obtenció de la pasta.* Segons el procediment, les pastes s'anomenen *mecàniques* o *químiques*.
- b) *Condicionament i blanqueig.* S'eliminen els elements estranys, la lignina i els components acolorits.

Les *pastes mecàniques* s'obtenen per l'acció abrasiva d'una superfície dura que disgrega les fibres. Amb aquest mètode, les partícules de lignina es mantenen dins la pasta. S'obtenen rendiments molt elevats (90%-95% en pes) perquè la lignina no s'elimina.

Les *pastes químiques* s'obtenen per mitjà d'una mena de dissolució selectiva. Amb aquesta via les fibres són de més qualitat i es blanquegen millor. Per aquesta raó, les pastes químiques són les més corrents. Tanmateix, presenten l'inconvenient que una fracció de la cel·lulosa és atacada pels dissolvents. D'aquí que el rendiment sigui menor que a les pastes mecàniques. En la taula I es detalla la producció de pasta de paper a Espanya durant l'any 1991.

Pastes mecàniques	146 10 ³
Pastes químiques	1390 10 ³
Pastes de palla, espart...	108 10 ³

Taula I. Producció de pastes de paper a Espanya (en t) (any 1991)

Durant el *condicionament* s'eliminen amb sedassos les restes de fusta i materials estranys. El blanqueig té com a objectiu incrementar la «brillantor» de la pasta. Les pastes mecàniques són menys brillants que les químiques a causa de la presència de lignina. A més a més, aquesta substància tendeix a enfosquir-se amb el temps. El blanqueig s'aconsegueix amb substàncies oxidants. Per exemple, l'aigua oxigenada.

En el procés d'obtenció de les pastes, les fibres es mantenen en suspensió en aigua. Aquesta suspensió s'anomena *polpa*. D'aquí ve el nom de *pulping* en anglès. La fabricació de pasta de paper exigeix una despesa d'aigua enorme (entre 40 i 400 m³/t de paper) amb els impactes ambientals consegüents.

Fabricació del paper

El diagrama de flux de la figura 2 indica les operacions que se segueixen per fabricar el paper. La pasta blanquejada seca es transporta en bales fins a la fàbrica de paper. Allí es transforma per mitjà de les operacions següents:

1. *Desintegració.* La pasta es dispersa amb una mena de batedora en un volum molt gran d'aigua (0,5% de sòlids). S'obté la polpa.

2. *Refinatge*. Sota l'acció d'esforços tallants, la fibra es refina fins al diàmetre desitjat. Depenent de la qualitat del paper, el refinatge és menys o més intens. L'efecte principal del refinatge és l'activació dels ponts d'hidrogen entre les fibres, els quals donen consistència mecànica al paper.

3. *Regulació i barreja*. S'hi afegeixen els additius i càrregues necessàries: cola, colorants, opacificants, etc.

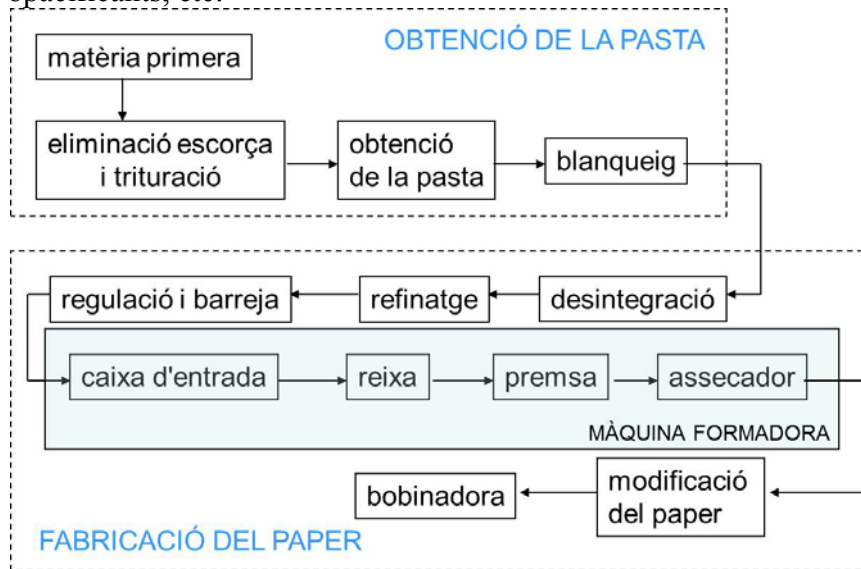


Figura 2. Esquema de les operacions per a la fabricació del paper

A partir d'aquest punt, la pasta entra a la màquina de fer el paper, en la qual la polpa s'estén sobre una reixa metàl·lica i s'asseca progressivament per diversos mecanismes (una il·lustració de com és la màquina la podem veure en la figura 3).

4. *Formació del full*. La polpa surt de la «caixa» com un raig que abasta tota l'amplada d'una tela metàl·lica transportadora («reixa»). Per vibració transversal les fibres es dipositen de manera homogènia i una part de l'aigua es perd per gravetat. L'extracció d'aigua s'afavoreix, també, per succió amb un sistema de buit situat sota la reixa. S'arriba a un contingut en sòlids del 80%-85%. En aquest punt el full es pot separar de la tela metàl·lica.

5. *Premtatge*. El full es premsa per mitjà de corròns, fins que la humitat baixa al 5%.

6. *Assecatge*. L'aigua que queda s'evapora en contacte amb corròns calents.

7. *Operacions auxiliars*. Consten de tractaments superficials que donaran al paper l'aspecte final (per exemple, setinat o brillant).

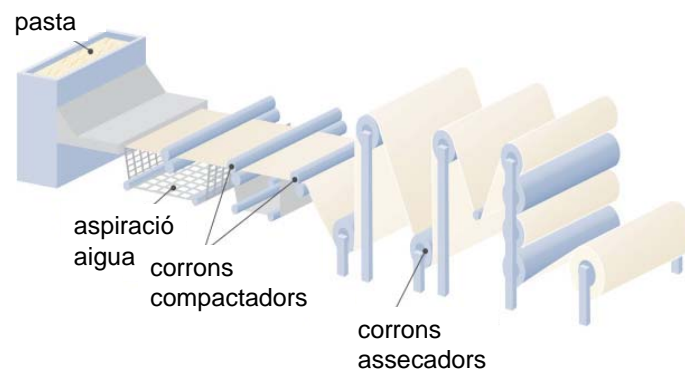


Figura 4. Màquina de formació del full de paper

Contaminació produïda per la indústria paperera

Per tal que, més endavant, puguem avaluar l'interès ambiental del reciclatge del paper, primer hauríem d'analitzar la contaminació produïda en les diverses operacions. Les dades fan referència a la pasta química més corrent, la pasta kraft (el 85% de la producció actual de paper). Per obtenir aquesta pasta, la lignina es dissol en una dissolució que conté Na_2S i NaOH .

a) Emissions gasoses

Una part del sulfur reacciona amb la lignina i acaba donant com a resultat compostos de sofre d'una olor ofensiva: $\text{CH}_3\text{-SH}$ i CH_3SCH_3 . Segons les condicions de la desintegració, fins al 3% del sofre utilitzat pot arribar a formar aquests gasos. En la taula II es veu com un control adequat de les emissions pot mitigar considerablement aquest problema.

Font	kg S/t	
	sense control	amb control
evaporador	7-10	0.05-1
forn de recuperació	0.1-1	0.05-1
digestors i evaporadors	1.0-1.5	0.0-0.3
TOTAL	8.1- 12.5	0.1-2.3

Taula II. Emissions de compostos de sofre durant l'obtenció de pasta kraft

b) Efluents

Ja hem dit que la fabricació de pasta de paper consumeix quantitats d'aigua enormes, i el consum és superior si es blanqueja la pasta. En la taula III es detalla el consum d'aigua a cada etapa, així com les característiques de les aigües residuals. La major part dels sòlids en suspensió es poden convertir en llots en un clarificador. El pH es pot ajustar afegint-hi H_2SO_4 o NaOH . La demanda biològica d'oxigen (DBO_5) és un indicador del contingut en matèria orgànica en descomposició. Es pot reduir per mitjà dels procediments habituals de depuració, com ara tractaments biològics, llots actius, etc. Finalment, la capacitat escumant, i també el color, que prové dels compostos de la descomposició de la lignina, es poden reduir amb calç apagada o carbó actiu.

	Procés			
	Eliminació de l'escorça	Desintegració	Blanqueig	Fabricació del paper
Volum (m^3)	12	33	72	4
Sòlids en suspensió (kg)	12	10	2	0.7
pH	7	7.5	2.5	5.5
DBO_5 (kg)	3.5	10	11	0.5
Color (unitats ALPHA)	500	1250	1250	Baix
Escuma	ocasional	ocasional	Alta	Absent

Taula III. Efluents del procés de fabricació del paper kraft (per t de paper)

12. Recuperació i reciclatge del paper

Objectius:

- Descriure la tecnologia de reciclatge del paper i entendre els reptes a què ha de fer front aquesta activitat per mantenir una bona qualitat del material.
- Avaluar la bondat ambiental del reciclatge.

Recuperació del paper usat

Tradicionalment, el paper i el cartró es recollien de fonts (oficines, mercats, fàbriques...) que proporcionaven material de qualitat homogènia i amb poc contingut de contaminants. Un cop recollit es classificava segons unes categories (més de 50!). Per exemple: paper d'oficina, diaris vells, guies telefòniques, cartró corrugat vell, etc. Les característiques de cada categoria s'especificaven amb detall segons una fitxa semblant a la de la taula I.

Diaris	
<i>Diaris embalats amb < 5% d'altres papers</i>	
Materials prohibits:	< 0.5%-1%
Rebuig:	< 2%

Taula I. Exemple de fitxa per a la categoria «diaris»

Els «materials prohibits» fan referència a aquells que poden perjudicar els equips de reciclatge (grapes, clips, pedretes...) i també a materials aliens (plàstics). El «rebuig» fa referència a papers que, pel seu estat o característiques, resulten incompatibles amb la categoria especificada.

La tendència actual és la recollida de papers barrejats a causa de la importància creixent del paper reciclat dels residus sòlids urbans (RSU) i perquè es recull el paper d'unitats més petites (per exemple, petites oficines). Aquesta tendència pot incrementar la taxa de recuperació; tanmateix, té un impacte clar sobre la qualitat, disminuint-la.

El paper recuperat que arriba a la instal·lació de processament es classifica segons una de les categories i s'embala. Depenent de la puresa del paper recuperat i de la demanda es pot fer una operació de separació.

Reutilització i reciclatge

No tot el paper recollit és apte per fabricar paper reciclat. Al voltant del 80% es recicla. La resta es reutilitza en aplicacions molt diverses: *a)* recuperació d'energia, *b)* objectes de pasta de paper emmotllada, *c)* jaç per al bestiar, *d)* aïllament tèrmic, etc. Detallem, tot seguit, quin és el percentatge de fibra reciclada que, de mitjana, contenen diversos productes:

- contenidors de paper emmotllat (43%)
- paper tissú (79%)
- diaris (47%)
- paper per escriure i imprimir (20%)

Tecnologia del paper reciclat

En aquest apartat, resumim el procés de reciclatge de paper utilitzat en una fàbrica dels EUA per a la fabricació de cartró. Tot i que es tracta d'un exemple concret, una gran part de les operacions unitàries són comunes a qualsevol planta de reciclatge de paper.

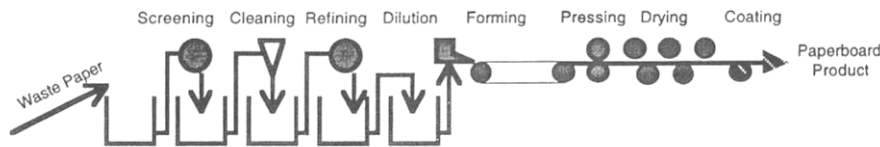


Figura 1. Diagrama d'un procés industrial de reciclatge de paper

En la figura 1 indiquem la successió d'operacions unitàries del procés en qüestió. Descriurem cadascuna de les operacions.

1 i 2) *Garbellament i depuració (screening and cleaning)*. Són les operacions que es duen a terme just després de la desintegració del paper. L'objectiu és separar la major part de contaminants amb unes pèrdues de fibra mínimes i evitant danyar-les. La polpa (amb contingut en sòlids del 4%-5%) manté en suspensió les fibres individuals del paper, i també els contaminants. Aquests s'eliminen, principalment, amb una sèrie de sedassos (*screening*) d'obertura progressivament menor. En la figura 2 s'indica esquemàticament un mètode per evitar que els sedassos quedin obturats. Quan les partícules contaminants que queden són molt petites (poliestirè expandit, adhesius, cera...) se separen de la fibra en un hidrocicló (figura 3) per diferències de densitat. La densitat de la fibra inflada d'aigua és d' 1.2 g/cm^3 , mentre que els contaminants solen ser de densitat inferior, propera a 1.

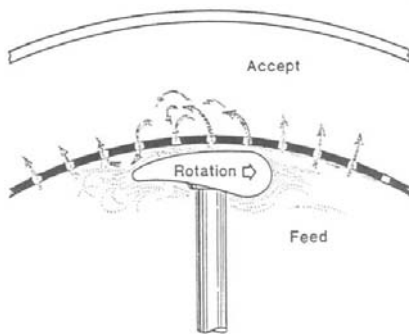


Figura 2. Sedàs

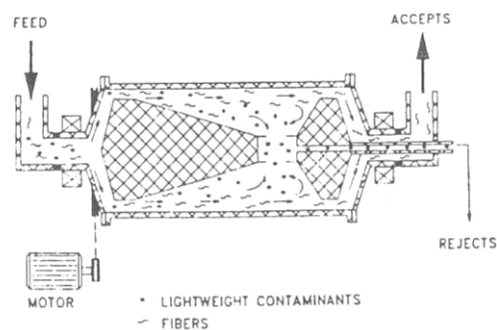


Figura 3. Esquema d'un hidrocicló
(«Rejects» significa les partícules contaminants)

3) *Refinatge*. Les fibres dins de la polpa se sotmeten a esforços tallants importants. Així s'incrementa l'absorció d'aigua i millora el seu potencial per establir enllaços entre les fibres (ponts d'hidrogen). Aquesta operació és essencial per obtenir una bona resistència i rigidesa del paper.

4) *Dilució*. La polpa es dilueix fins al 0,75% en sòlids i, en aquest estat, ja està en condicions per entrar a la màquina de formació del paper. És en aquesta etapa de dilució que es poden barrejar fibres de procedència diversa.

5) *Conformació*. El cartró d'aquest procés industrial particular s'obté pel dipòsit de tres capes de fibra (figura 4); les dues capes externes, *top* i *bottom plies*, més primes, i la capa central, *filler ply*, més gruixuda.

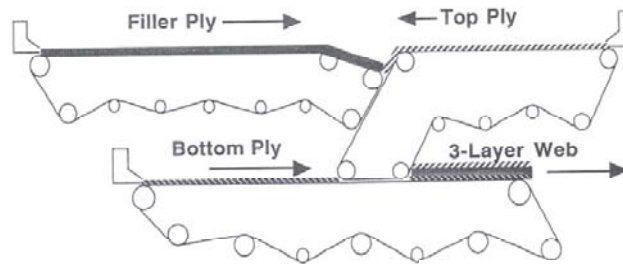


Figura 4. Formació del cartró de tres capes

Per tal de millorar la resistència del paper es juga amb l'orientació de les fibres. Com a regla general, convé saber que la resistència en una direcció determinada s'incrementa a mesura que hi ha més fibres orientades en aquesta direcció. L'orientació es pot controlar, dins d'uns certs límits, amb la velocitat de la «reixa» (on es dipositen les fibres) i la velocitat a què surt la polpa de la «caixa» (vegeu el seminari anterior). Si la reixa es desplaça molt ràpidament, la resistència longitudinal ($R_{||}$) serà superior a la transversal (R_{\perp}) (figura 5). Sempre $R_{||} > R_{\perp}$. Com que R_{\perp} es pren com el valor de la resistència del paper, el repte és incrementar el valor de R_{\perp} .

6) *Fabricació del cartró*. El procés continua amb l'assecatge progressiu i acaba amb el dipòsit d'una o diverses capes superficials per tal de donar al cartró una textura suau i color blanc. El contingut d'aquestes capes sol ser argila blanca més diòxid de titani (rutil, TiO_2) i un aglomerant.

L'estructura en capes és típica del cartró de moltes capes. Si hom el secciona, o simplement l'estripa amb els dits, veurà que l'interior és de color fosc (indicació que la capa central no ha estat blanquejada). Fins i tot, de vegades es poden distingir diversos colors provinents del paper recuperat. La cara vista del cartró sol ser blanca i llisa gràcies al dipòsit mineral aplicat.

Reptes del reciclatge de paper

El gran repte del reciclatge de paper es pot resumir amb la frase següent, la qual es podria aplicar al reciclatge de qualssevol dels materials estudiats fins aquí: «S'ha d'incrementar tant la taxa de recuperació com la qualitat dels productes reciclats.»

Per tal de poder valorar les dificultats d'aquest repte veurem quins aspectes del reciclatge comprometen la qualitat:

a) Contaminació de la fibra

El contingut en contaminants s'incrementa amb el contingut de fibra reciclada utilitzat per a un producte determinat. Es tracta de separar aquests contaminants de la fibra sense danyar-la.

b) Efectes del reciclatge sobre la fibra

Amb el reciclatge, les fibres sofreixen una degradació en diversos aspectes: 1) es perden polisacàrids, 2) es trenquen algunes molècules de cel·lulosa i 3) disminueix la interacció entre les fibres (menor nombre d'enllaços per ponts d'hidrogen).

El resultat global és que la resistència del paper disminueix. Tanmateix, aquesta disminució no és pas deguda a un trencament de les fibres individuals. Aquestes fibres mantenen la longitud i resistència. El que succeeix és un canvi químic de les molècules que constitueixen aquestes fibres. No obstant això, l'efecte del reciclatge depèn del tipus de pasta: la resistència disminueix en pastes químiques, però augmenta en pastes mecàniques.

c) Qualitat del producte reciclat

El repte apuntat més amunt serà més difícil de complir a llarg termini a mesura que les fibres hauran passat ja per uns quants cicles de reciclatge (diverses vides). Podem dir, per tant, que l'èxit a curt termini no assegura l'èxit a llarg termini.

Beneficis ambientals

Amb l'ús de paper reciclat l'impacte ambiental és menor per diverses raons:

- a) Es tala menys arbres
- b) Menys contaminació de l'aire (reducció del 75%)
- c) Menys contaminació de l'aigua (reducció del 35%)
- d) Menys consum d'aigua

Tot i que de vegades s'ha posat en dubte que el reciclatge del paper sigui favorable des d'un punt de vista ambiental, un estudi recent,¹ que abasta indústries papereres d'arreu del món, fonts diverses de paper recuperat i diversos productes de paper reciclat, mostra que, pràcticament en qualsevol d'aquestes condicions particulars, el reciclatge de paper és preferible.

¹ A. Villanueva and H. Wenzel. *Paper waste - Recycling, incineration or landfilling? A review of existing life cycle assessments*. *Waste Management*, **27**, S29-S46 (2007).

V. Continguts complementaris

13. Impacte ambiental dels envasos per a begudes

Objectius:

Comparar l'impacte ambiental dels envasos i ampolles fabricats amb diferents materials.

Entendre que la reciclabilitat no pot ser l'únic criteri ni el principal, sinó que una avaluació objectiva ha de recórrer a l'anàlisi del cicle de vida.

Avaluar l'eficiència energètica dels envasos.

Fa uns anys, vàrem plantejar-nos si l'impacte ambiental dels diversos envasos que s'utilitzen per comercialitzar begudes era molt diferent d'un tipus d'envàs a un altre. Vàrem elaborar l'estudi en el marc d'un projecte final de carrera els resultats principals del qual exposarem tot seguit.¹

El rebuig social a la instal·lació d'abocadors nous ha orientat la política de gestió de residus cap a la reducció del seu volum. Amb els contenidors de colors diversos, la recollida selectiva aplicada tant als residus orgànics com als envasos és, sens dubte, la part més visible del procés. En aquest context, la paraula clau és el *reciclatge*, ja que per fomentar la col·laboració ciutadana se sol posar l'èmfasi en les virtuts del reciclatge dels materials i envasos. Els eslògans publicitaris parlen de la millora del medi ambient, la preservació dels recursos naturals i, fins i tot, de l'estalvi econòmic («Qui tria estalvia»). No ens ha d'estranyar, doncs, que en la consciència ciutadana es consideri que l'envàs més benigne per al medi ambient sigui aquell més fàcilment reciclable.

Tanmateix, una valoració acurada és necessàriament més complexa. D'una banda, l'envàs s'ha de fabricar, la qual cosa genera un consum de matèries primeres (parcialment substituïbles per material reciclat), un consum d'energia i unes emissions associades al medi ambient (a l'atmosfera, a l'aigua i al sòl). De l'altra, l'envàs i el producte envasat s'han de transportar. Aquí l'optimització del volum ocupat per l'envàs i el seu pes són essencials per minimitzar el consum de combustible del camió i les emissions de CO₂ a l'atmosfera. Finalment, un cop s'ha consumit el producte, l'envàs s'haurà de reciclar, incinerar o dipositar en un abocador. Aquí, evidentment, la reciclabilitat representa un mèrit indubtable.

Aquesta aproximació al problema, que té en compte totes les etapes de la vida de l'envàs (fabricació, ús i gestió del residu), s'anomena *anàlisi del cicle de vida* (ACV). És una aproximació rigorosa que utilitza bases de dades internacionals que quantifiquen els diversos impactes ambientals de les activitats industrials i que gaudeixen d'una àmplia acceptació entre els especialistes. L'ús de l'ACV permet una visió de conjunt, dins la qual es pot valorar comparativament l'impacte ambiental de cada etapa de la vida d'un envàs.

¹ Alienor Ligoña. *Impacte mediambiental dels envasos utilitzats en la comercialització dels aliments*. [Projecte final de carrera]. UdG, 2009.

El nostre estudi, basat en l'ACV, s'ha centrat en els envasos per a begudes, ja que són molt característics (ampolla de vidre o plàstic, envàs de cartró i llauna). D'altra banda, aquests envasos constitueixen la fracció principal dels contenidors de vidre i d'envasos lleugers. Hem analitzat tres aspectes: *a*) el pes dels envasos, *b*) el seu impacte ambiental i *c*) l'energia de l'envàs comparada amb el contingut energètic de l'aliment.

El pes dels envasos

Des d'instàncies que es preocupen pel medi ambient, se sol recomanar la compra de begudes en envasos grans. S'argumenta que quan el volum és més gran s'estalvia material. Sembla evident, per exemple, que el pes d'una ampolla de PET de 1 L és inferior que el de 3 ampolles petites de 330 mL. Ara veurem fins a quin punt aquesta recomanació s'ajusta a la realitat.

Comencem tot considerant el pes d'un conjunt d'ampolles de PET d'aigua mineral sense gas de diferents marques de volums diferents. En la figura 1 veiem que, tot i la dispersió evident observada, el pes de l'ampolla s'incrementa a mesura que el volum augmenta. D'aquesta figura ens interessa destacar sobretot el fet que, per a un mateix volum, el pes varia molt d'una marca a una altra. Per exemple, una ampolla d'1,5 L pot variar més del 50%. Podem afirmar, doncs, que algunes marques malbaraten plàstic per envasar l'aigua. La massa per sobre del valor mínim indicat en la figura 1 (corba contínua) és innecessària.

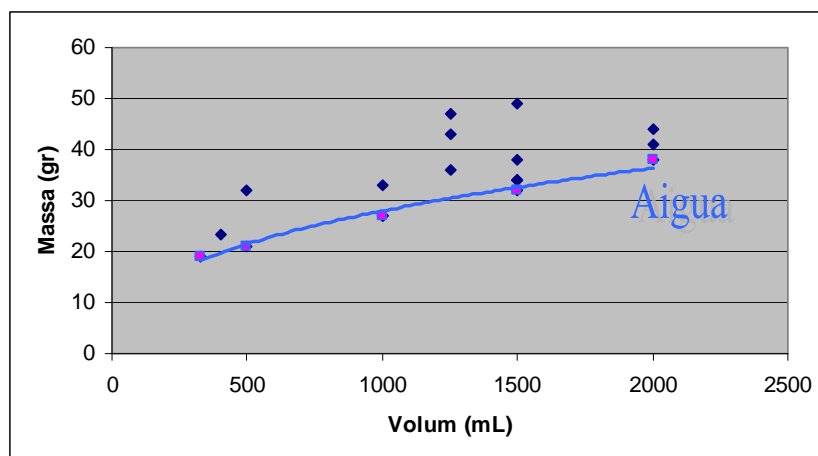


Figura 1. Pes del PET de diverses ampolles d'aigua mineral en funció del volum. La línia representa el pes mínim que hem mesurat

Tanmateix, si volem respondre a la pregunta plantejada («És millor comprar ampolles grans?»), hem de dividir la massa de les ampolles pel volum d'aigua que contenen. El resultat el trobem en la figura 2, en la qual hem afegit garrafes de volum considerable (fins a 8 L). Fins a 2 L, l'estalvi de material és evident i considerable. Per exemple, si en lloc de comprar 6 ampolles de 330 mL comprem una ampolla de 2 L, gastem 3 vegades menys de plàstic. Tanmateix, per sobre de 2 L no s'observa cap estalvi apreciable.

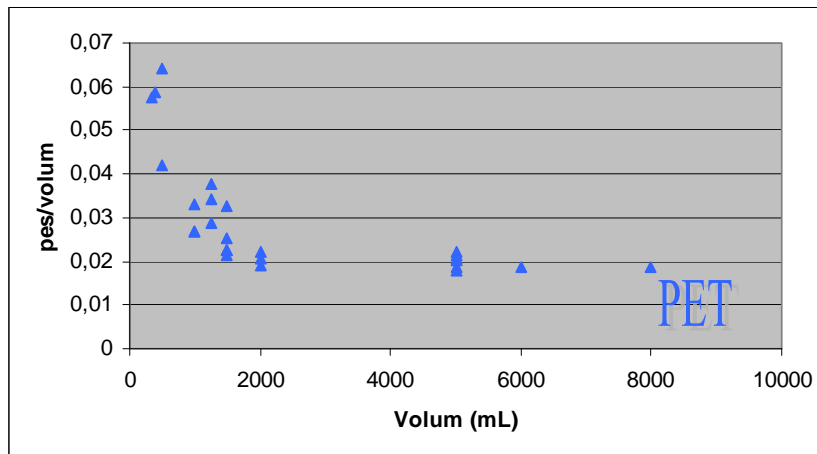


Figura 2. Ídem que la figura 1 però dividint la massa pel volum de l'ampolla

La situació varia considerablement quan considerem els envasos de cartró (tipus Tetra Brik™). En aquest cas, l'estalvi de material per unitat de volum és molt menor (figura 3). L'estalvi de material no arriba al 50% quan comprem un envàs gran de 2 L.

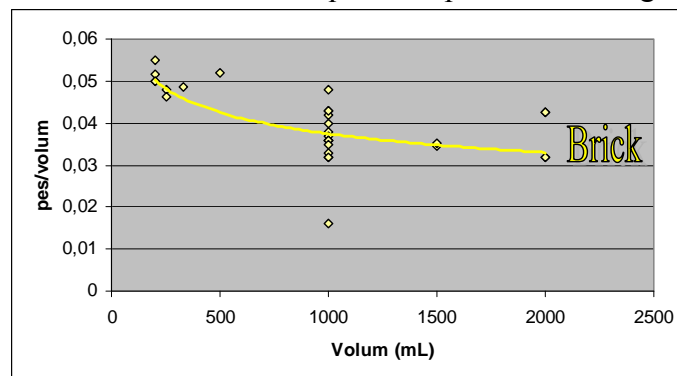


Figura 3. Pes per unitat de volum dels envasos de cartró laminat

Impacte ambiental dels envasos

Si féssim una enquesta entre els alumnes sobre quin creuen que és l'envàs més respectuós amb el medi ambient (vidre, plàstic o cartró), probablement la resposta majoritària seria el de vidre. La raó que donarien seria que es tracta d'un material 100% reciclable. D'altra banda, la dificultat de reciclar els envasos de cartró situaria aquesta mena d'envasos al darrer lloc. Un altre argument que se sol esgrimir en contra d'aquests envasos és que contenen una làmina d'alumini; un metall que requereix una despesa enorme d'energia per produir-lo.

En la figura 4 resumim alguns dels impactes ambientals per unitat de massa dels diversos materials utilitzats en la fabricació d'ampolles o recipients per a begudes (ja sigui material del cos de l'envàs, del tap, de l'etiqueta, etc.). Queda clar que l'alumini presenta uns impactes considerables que, malgrat això, tenen una incidència petita en l'impacte del material laminat dels envasos de cartró («bric» en la figura). Això és així perquè l'alumini representa, de mitjana, només el 5% del pes d'aquests laminats (el 65% és paper i el 30%, HDPE).

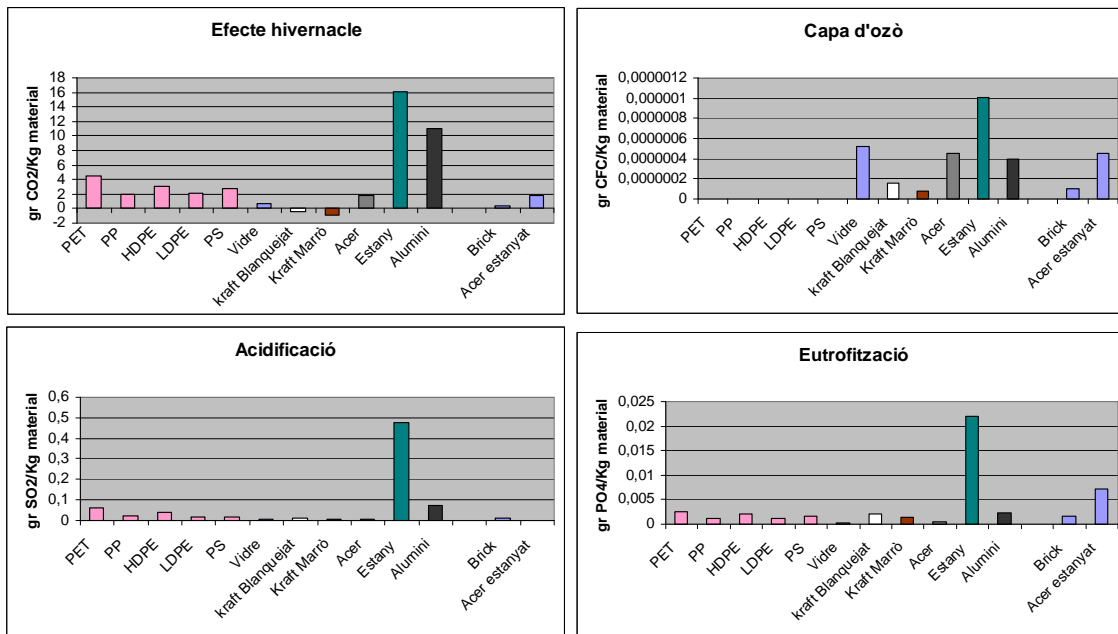


Figura 4. Impactes ambientals dels materials utilitzats en la fabricació d'ampolles i contenidors per a líquids

Tanmateix, aquest encara no és l'impacte de l'envàs, ja que hem de considerar el seu pes. En aquest punt, els envasos de cartró laminat i de plàstic presenten un avantatge clar respecte de les ampolles de vidre: el seu pes és molt inferior (figura 5).

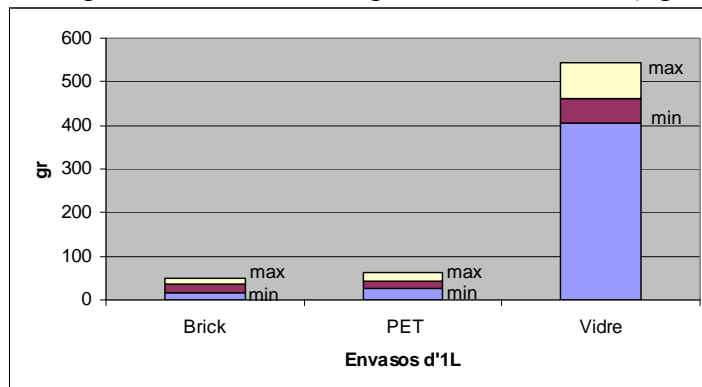


Figura 5. Pes dels envasos d'1 L de cartró laminat, PET i vidre

Quan multipliquem els impactes dels materials (figura 4) pel pes dels envasos, el resultat no deixa de ser sorprenent. En la figura 6 detallem el resultat per a envasos d'1 L. Fixem-nos que, contràriament al que podríem pensar de bell antuvi, les ampolles de vidre comporten impactes molt considerables (superen el de les ampolles de PET en tots els impactes tret de l'acidificació – g de SO₂). Més sorprenent, encara, és el fet que el bric sempre ocupa la banda baixa dels impactes ambientals.

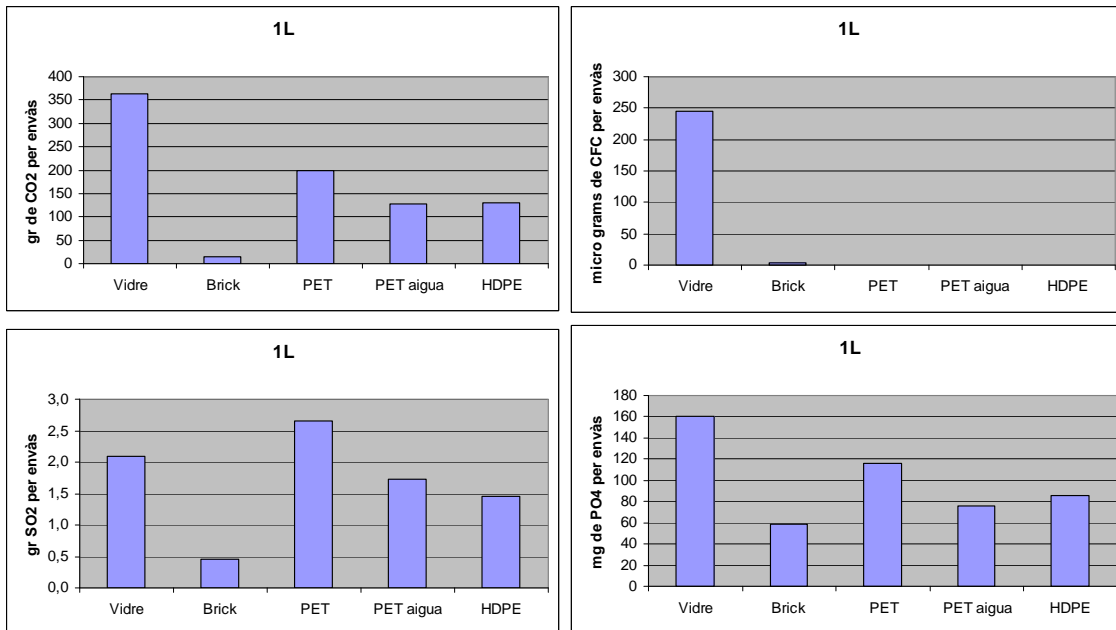


Figura 6. Impacte ambiental dels envasos per a begudes més corrents. «PET» i «PET aigua» signifiquen ampolles de begudes gasoses i d'aigua, respectivament

Els impactes quantificats fins aquí no tenen en compte la reciclabilitat dels diversos materials. Quan es té en compte aquest paràmetre, l'impacte de les ampolles de vidre millora sense que canviïn, tanmateix, les conclusions a què hem arribat.

Queda clar que prendre la reciclabilitat com a criteri principal de la bondat ambiental d'un envàs pot portar a conclusions (i decisions polítiques) completament errònies.

L'energia dels envasos

Per produir qualsevol material s'ha de gastar energia. En el cas dels metalls, els seus minerals s'han d'extreure de les mines o pedreres i triturar, i els compostos minerals s'han de reduir per mètodes tèrmics o electroquímics. Per obtenir els plàstics s'ha d'extreure el petroli del subsòl. Tanmateix, la major part de l'energia dels plàstics és aquella que es manté en l'estructura del material mentre aquest no es crema. En general, la quantitat d'energia necessària per produir qualsevol material és enorme, tal com es pot constatar en la figura 7.

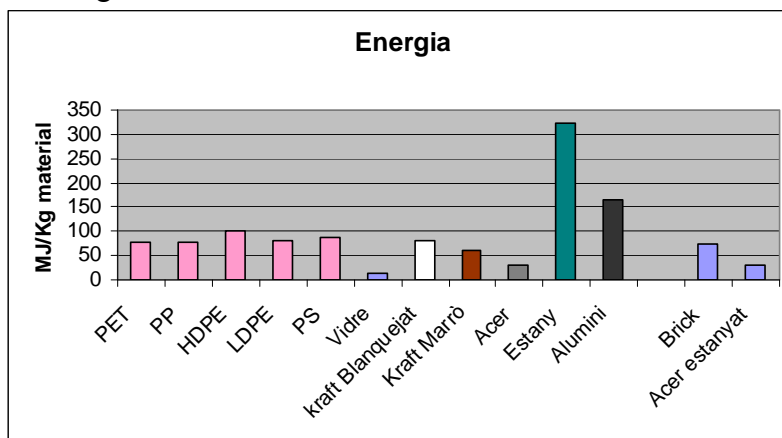


Figura 7. Energia necessària per a la producció d'1 kg de material («kraft» és el nom del paper de pasta química)

Si multipliquem aquesta energia pel pes d'un envàs, obtindrem l'energia necessària per fabricar-lo (les operacions que donen forma al material comporten una despesa d'energia molt inferior a la d'obtenció del mateix material). L'energia de diversos envasos està indicada en la figura 8 amb línies horitzontals. Fixem-nos que l'ampolla de vidre és la que necessita més energia per ser fabricada.

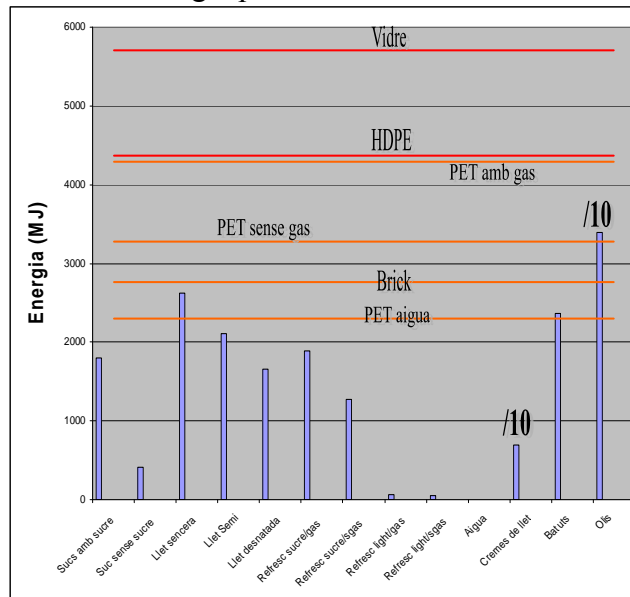


Figura 8. Contingut energètic d'1 L de diversos aliments (barres verticals) comparat amb l'energia dels envasos

A la mateixa figura hi hem representat el contingut energètic de diversos aliments (sucs, llets, olis, etc.). L'energia dels aliments que contenen molts greixos (olis, cremes de llet) és molt elevada (per això hem hagut de representar aquest valor dividit per 10). Resulta que, tret d'aquests aliments, en tots els casos l'energia dels envasos és superior (llets, sucs ensucrats) o molt superior (begudes *light* i sucs sense sucre) a la de l'aliment. Podem posar de manifest més clarament aquest fet representant el que anomenem *eficiència energètica de l'envàs*, definida com el quocient entre l'energia de l'aliment i la de l'envàs. En la figura 9 veiem que, tret dels batuts i olis, l'eficiència energètica és inferior a 1. Aquest resultat ens dóna una idea de la gran dependència de la nostra societat respecte de l'energia.

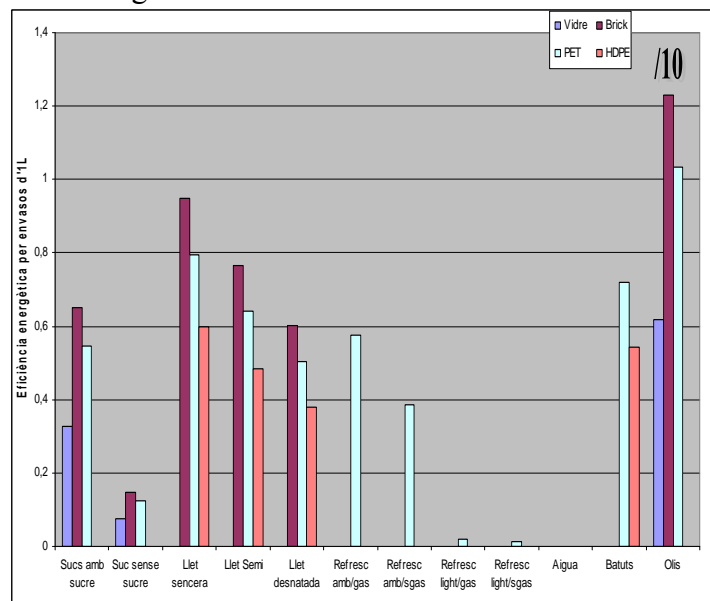


Figura 9. Eficiència energètica dels envasos de PET, HDPE, cartró laminat i vidre per a diversos aliments

Conclusions

En aquest seminari hem pogut constatar que:

- a) Tot complint la seva funció, el pes de molts envasos comercials es podria reduir substancialment.
- b) Mentre sol ser més correcte ambientalment comprar begudes en envasos grans, hi ha algunes excepcions com ara les ampolles i garrafes de PET de volum superior a 2 L i els envasos de cartró laminat.
- c) Contràriament al que se sol pensar, les ampolles de vidre tenen un impacte ambiental més elevat que no pas els altres envasos; d'on deduïm que
- d) la reciclabilitat no pot ser el criteri principal per avaluar la bondat ambiental d'un producte.
- e) L'energia dels envasos és, en general, superior a l'energia de l'aliment que contenen.

Qüestions

1. Doneu tres exemples que posin en dubte la veracitat de l'afirmació següent: «El reciclatge és indispensable per preservar els recursos naturals.»
2. Quina és la raó principal de l'interès actual pel reciclatge?
3. Quines són les alternatives al reciclatge així que un producte arriba al final del seu cicle de vida?
4. Enumereu les matèries primeres per fabricar vidre i el paper que hi té cadascuna.
5. D'on provenen els principals estalvis d'energia relacionats amb el reciclatge del vidre?
6. Indiqueu quins són els metalls que se separen per corrent de Foucault i quins per separació magnètica.
7. Indiqueu la composició química de la fusta. Quina és la part més útil per fabricar el paper?
8. Com s'explica que les fibres de paper es mantinguin adherides entre si, dotant el paper de la seva resistència mecànica?
9. Per quines raons la qualitat del paper reciclat sol ser inferior a la del paper verge?
10. En quin sentit dos objectes de plàstic amb la identificació «HDPE» són del mateix material? Limitacions d'aquesta codificació.
11. Per què el reciclatge mecànic deteriora la qualitat dels plàstics? Quines són les propietats mecàniques que es degraden més ràpidament?
12. El 1999, la producció de plàstics en el sector de l'embalatge va representar el 40% de la producció total. Què podeu dir respecte a la contribució d'aquests productes al total de residus plàstics?
13. Quina és la tècnica més senzilla per separar els plàstics de gran consum? I per separar el PET i el PVC?
14. Quina tecnologia de reciclatge és la més adequada per tractar plàstics barrejats, la gasificació o la hidròlisi?
15. Com és que, tot i els gasos que es desprenen durant la combustió dels plàstics, es pot afirmar que la seva incineració no genera més CO₂ que el seu dipòsit en un abocador?

Bibliografia

Bibliografia general:

- Callister. *Introducción a la ciencia de los materiales*. Reverter, 2000.
- Lund, H. F. [ed.]. *Manual McGraw-Hill de reciclaje*. Madrid: McGraw-Hill, 1996.
- Vian Ortuño, A. [ed.]. *Introducción a la química industrial*. Reverté, 1998.

Bibliografia específica:

- Azapagic, A.; Emsley, A.; Hamerton, I. *Polymers, the environment and sustainable development*. Wiley, 2003.
- Ehrig, R. J. [ed.]. *Plastics recycling*. Hanser, 1992.
- Fernández Navarro, J. M. *El vidrio*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas: Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Madrid, 2003.
- Mari, Eduardo A. [et al.]. *El Vidrio reciclado en la fabricación de envases*. Red Iberoamericana sobre Ciencia y Tecnología de Materiales Vítreos (CYTED VIII-E), 2000.
- Navarro Sentanyes, A. *Vidre per a la indústria i laboratori*. UPC, 1992.
- Rader, Charles P. [et al.] [eds.]. *Plastics, rubber and paper recycling*. Vol. 609. ACS Symposium Series, 1995.

A

abocador, 3, 9, 33, 40, 43, 53, 54, 55, 68

C

cicle de vida, 2, 3, 4, 33, 37, 55, 56, 68

E

energia (estalvi), 3, 8, 27, 29, 32, 33, 56

M

matèries primeres, 3, 6, 7, 11, 12, 15, 21, 24, 26, 27,
30, 32, 59

P

propietats, 15, 39, 52, 59

Q

qualitat, 8, 17, 24, 34, 38, 39, 48, 60, 65

R

recuperació d'energia, 3, 33, 41, 52, 54, 55, 63
recursos naturals, 6, 7, 9, 32, 68
residus sòlids urbans (RSU), 40, 41, 63

S

separació, 17, 19, 37, 45, 48, 63