



Capítol I

INTRODUCCIÓ

I. Introducció

Les escòries constitueixen el subproducte més abundant que s'obté en el procés d'incineració de residus sòlids urbans, i suposen al voltant del 90 % del producte sòlid resultant de la combustió. La incineració redueix considerablement el volum del residu i la seva massa. La producció a Catalunya és d'unes 100000-150000 tones d'escòries anuals que es duen majoritàriament a l'abocador (Agència de Residus de Catalunya, dades del 2003). Prenent en consideració criteris de conservació ambiental, minimització de consum de recursos naturals i estalvi de recursos energètics, sembla clara la necessitat i conveniència d'estudiar la viabilitat de l'ús de les escòries, un residu produït en quantitats importants, en el camp de la construcció, a causa de l'elevat volum d'àrids naturals que es consumeixen en aquest sector i la gran similitud existent entre aquest tipus de residu i els materials convencionals.

Les escòries es presenten com un material granular, *inert* i compactable, cosa que fa que ofereixin –a priori– un gran potencial com a substitut d'àrids naturals en el camp de la construcció i especialment en l'àmbit de les carreteres. Ja que el sector de la construcció de carreteres és un dels majors consumidors d'àrids, l'aprofitament de les escòries en aquesta aplicació reemplaçant àrids naturals reduiria notablement (o fins i tot eliminaria) la quantitat de residus que finalment han de ser abocats.

Des del punt de vista mecànic i estructural, les escòries s'haurien d'utilitzar sempre que el funcionament del ferm resultant no quedés compromès. Per emprar aquests materials és fonamental determinar-ne les propietats, com poden ser utilitzats i quines limitacions poden estar associades al seu ús. Però l'obstacle més important per a la normalització de l'aprofitament de les escòries en carreteres és el potencial impacte ambiental. Resulta necessari, doncs, fer un estudi exhaustiu de les característiques físiques, químiques, mineralògiques i mecàniques de les escòries per garantir que la seva utilització en capes granulars es durà a terme de manera tècnicament i ambientalment correcta.

Les escòries d'incineradora, com altres residus, són un material que mostra una certa variabilitat, tant en el temps com en funció de la localització geogràfica. Hi ha diversos paràmetres que intervenen en la seva formació i la seva evolució i és important tenir-los en

compte per entendre el comportament de les escòries i optimitzar les possibilitats potencials de valorització.



La composició dels residus sòlids urbans depèn de diversos factors, entre els quals hi ha les característiques i el nivell de vida de la població. Un estudi dels constituents de les escombraries pot ser indicatiu d'un model de desenvolupament i de sistema de producció, d'hàbits i costums, etc. Les diferències en els residus de regions diferents com la UE, els EUA i Espanya són bastant significatives com es mostra a la Figura I-1, especialment quant a la proporció d'embalatges i de matèria orgànica. La tendència a Europa s'aproxima al model dels EUA, amb grans quantitats de paper i cartró en detriment de restes orgàniques, més que no pas a la situació a Espanya.

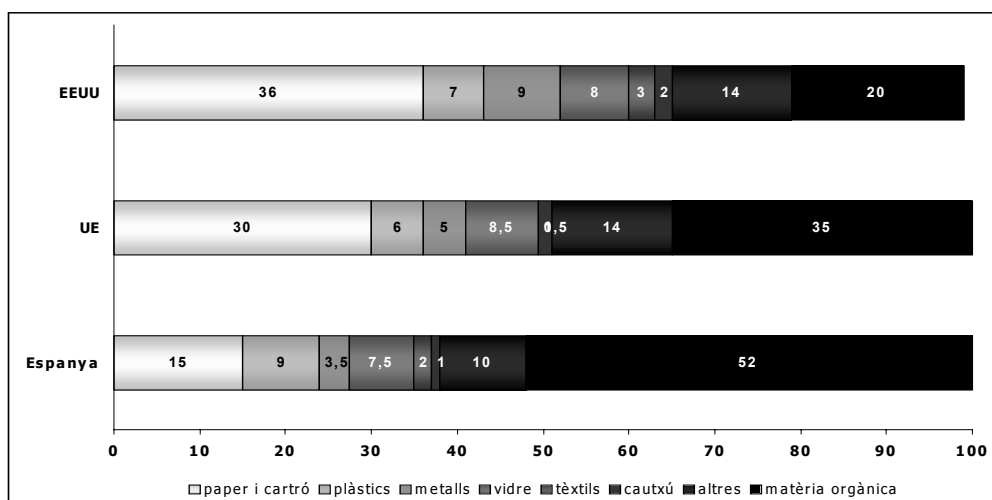


Figura I-1. Composició dels RSU als EUA, la UE i Espanya, en kg de constituent per 100 kg de RSU (Ojeda, 2000).

Als nuclis urbans la quantitat de cartró, vidre i plàstics és més gran, la qual cosa reflecteix un major consum d'aliments preparats, envasos i embalatges. En els residus rurals, per contra, predomina la matèria orgànica. L'època de l'any també condiona la quantitat i la qualitat dels residus: els residus augmenten de manera estacional en aquelles zones que són destins turístics, com és el cas de Vielha, on la producció de brossa en temporada alta a l'hivern pot doblar els valors habituals. Un altre exemple de la variabilitat seria l'increment significatiu d'embalatges observat per Nadal. Un cas anecdòtic d'aquesta variabilitat temporal relacionada amb certs hàbits l'il·lustren les dificultats per mantenir la flama constant a les cambres de combustió de les plantes incineradores de Malla i Montcada els dilluns, quan una gran proporció dels residus està constituïda per la gespa de jardins tallada el cap de setmana (segons comunicació personal dels operaris responsables).

La tendència actual és un lent increment de la fracció metàl·lica i l'augment de la presència de materials lleugers (alumini) en detriment de fèrrics. Els plàstics i els vidres tenen també un augment significatiu a causa de diversos factors com un ús més estès d'envasos sense retorn o d'un sol ús. Aquesta tendència també s'ha detectat en papers i cartró (EUPM, 2003). Malgrat aquesta variabilitat, es pot aproximar la composició general dels residus de Catalunya a la que s'expressa a la Figura I-2. Segons l'Agència de Residus de Catalunya (2004), el rati del residu domèstic és d'1.39 kg per habitant i dia.

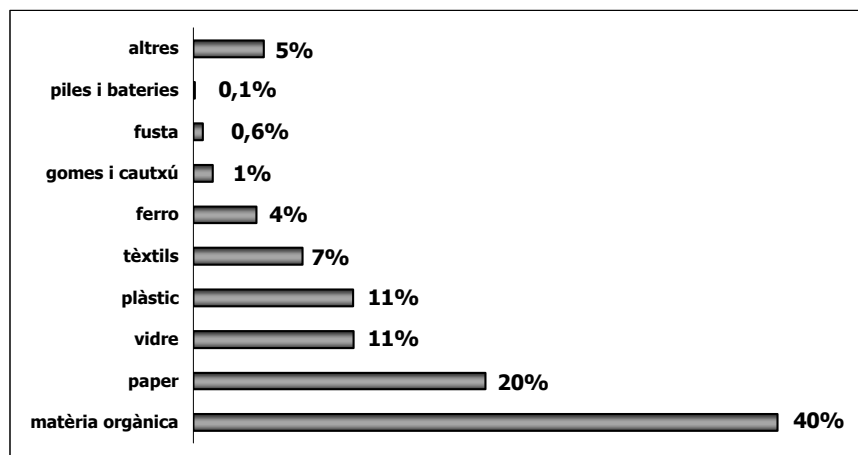


Figura I-2. Composició mitjana dels residus sòlids urbans segons dades de l'EUPM (2003).

A les plantes de valorització energètica –almenys teòricament– no hi van a parar tots els residus generats, sinó només aquells que no han superat els processos de recollida selectiva i de reciclatge. A la pràctica aquests dos processos tenen una efectivitat que l'aspecte de les escòries resultants posa en evidència, i es pot dir que la composició de les escòries depèn fonamentalment de la composició dels residus domèstics que genera la població, perquè la influència de la recollida selectiva encara és poc important.

I.2 EL PROCÉS: LA INCINERACIÓ A CATALUNYA

I.2.1 PARTS D'UNA PLANTA INCINERADORA

La incineració és, en essència, la combustió controlada en instal·lacions adequades per a aquest efecte. Es produeix fonamentalment un procés d'oxidació del material combustible contingut en un residu, del qual resta pràcticament inalterada la fracció inert, com el vidre, ceràmica o metalls. La incineració suposa una reducció del volum del residu al voltant d'un 90 % i del seu pes en un 70 % (Chimenos et al., 1999).

Un esquema tipus d'unes instal·lacions de valorització energètica inclouria, a grans trets, les parts següents (ACEVERSU, 2002; Agència de Residus de Catalunya, 1997), representades a la Figura I-3 (imatge de Greenpeace, 2004).

FOSSA DE RECEPCIÓ

Els residus sòlids urbans arriben a les plantes d'incineració en camions de caixa tancada que, després de ser pesats, són descarregats per caiguda lliure a la fossa (punt 1 de la Figura I-3). Les grans fosses excavades al terra i recobertes de formigó (punt 2) per evitar la contaminació del sòl i de les aigües subterrànies són un element habitual només en les

plantes incineradores de més entitat, i tenen capacitat per acollir i emmagatzemar la brossa entre tres dies i una setmana. A les incineradores més modestes la fossa és molt més petita.

Durant el procés d'entrada a la fossa es controla l'estat i la naturalesa dels residus, de manera que es puguin refusar aquells residus per als quals s'ha previst una altra destinació. S'intenta homogeneïtzar els residus abans d'introduir-los a les línies d'incineració. Les males olors s'eviten amb un ventilador que aspira l'aire i el condueix cap al forn.

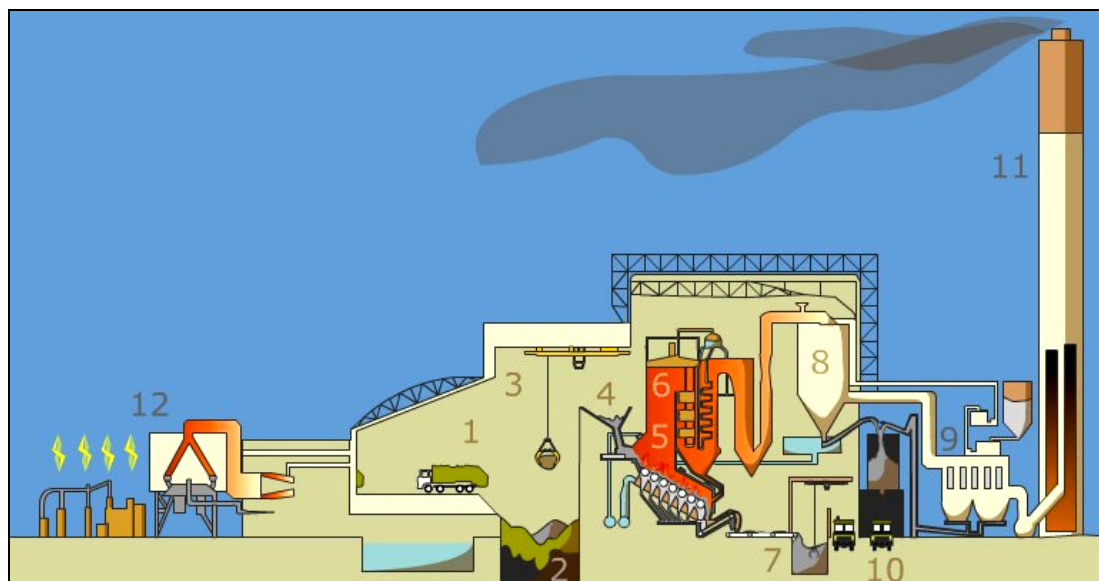


Figura I-3. Esquema d'una planta incineradora de residus sòlids urbans (imatge de Greenpeace, 2004). 1 i 2- fossa de recepció; 3 a 6- forn; 12- generador; 8 i 9- depuració de fums; 11- xemeneia (emissió de gasos ja nets); 7 i 10- recollida de cendres i escòries.

FORN

Una gronxa (punt 3) diposita material a les tolves (4) que alimenten el forn, al qual s'injecta aire addicional per aportar-hi oxigen en excés. Aquest aire, anomenat *primari*, és el que procedeix directament de la fossa.

Hi ha quatre tipus de forns (punts 5 i 6): de graelles mòbils, de graelles de rodets (el que correspondria al de la Figura I-3), forns rotatoris i de llit fluïditzat. Tots quatre sistemes compleixen les mateixes funcions, però difereixen en el funcionament, l'eficàcia i la capacitat de càrrega. El tipus més estès és el forn de graelles: els residus s'introdueixen al forn, on se'ls fa circular per un tren de graelles de material refractari que estan exposades a l'acció de l'aire de combustió. Al final del recorregut del tren de graelles es recullen les escòries que resten dels residus incinerats. Aquest tipus de forn permet una gran capacitat de càrrega en poc temps. La tècnica més recent és la del llit fluïditzat, on un llit de sorra proporciona una temperatura homogènia, però encara no s'ha introduït a cap planta incineradora de Catalunya.

La temperatura a l'interior dels forns no pot ser inferior als 850 °C per aconseguir una combustió correcta dels residus i dels gasos i així evitar la formació de dioxines i furans. Tampoc no és convenient que sobrepassi els 1100 °C perquè es podria malmetre el material refractari que recobreix el forn.

GENERADOR

La calor produïda al forn es transmet a la caldera, que produeix vapor sobreescalfat, i, mitjançant una turbina (punt 12), s'acciona un generador elèctric. La potència del turboalternador varia per a cada planta incineradora segons diversos paràmetres. Aquest aprofitament energètic, en alguns casos, és superior al d'alguns tipus de carbó i el procés resulta, comparativament, més net ambientalment que el funcionament de les centrals convencionals (Agència de Residus de Catalunya, 1997).

EQUIP DE DEPURACIÓ DE FUMS

Els gasos i les partícules en suspensió resultants de la combustió són sotmesos a un sistema de depuració (punts 8 i 9) que reté les partícules sòlides i determinats contaminants gasosos abans de ser emesos a l'atmosfera a través d'una xemeneia. Les partícules en suspensió són recollides mitjançant filtres i altres sistemes com ciclons i precipitadors electrostàtics, i s'anomenen *cendres volants*. Certs contaminants gasosos com SO₂, NO_x, HCl, CO₂ o les dibenzo-p-dioxines policlorades i dibenzofurans policlorats, d'ara endavant PCDD i PCDF (*policlorinated dibenzo-p-dioxines* i *policlorinated dibenzofurans*, respectivament) són retinguts per procediments diversos (lletades de calç, filtres de mànegues o filtres de carbó actiu) per minimitzar les emissions atmosfèriques. Finalment els gasos ja depurats són emesos per la xemeneia (punt 11).

RECOLLIDA DELS PRINCIPALS RESIDUS GENERATS

Les escòries se submergeixen en basses d'aigua per temperar-les (punt 7) i es dipositen en una cinta transportadora que les porta a l'exterior i les fa passar per un electroimant que n'extreu la ferralla. Les escòries no necessiten cap tractament addicional i d'aquí es poden dur a l'abocador de residus no especials directament. Les cendres volants i els residus de depuració de gasos també es recullen (punt 10) però la legislació ambiental en suggereix una inertització prèvia a la disposició.

I.2.2 MECANISMES DE GENERACIÓ DELS SUBPRODUCTES

Els fenòmens que tenen lloc durant el procés d'incineració són els responsables de les característiques dels residus resultants i en condicionen en gran mesura les propietats.

A la base del forn hi ha un gradient de temperatura des de l'entrada del residu per la tolva d'alimentació fins a l'altra banda de les graelles. El perfil de temperatures es pot veure a la Figura I-4. Inicialment es produeix un assecatge del residu, després del qual s'inicia la piròlisi

dels compostos orgànics. Al voltant de 500 °C s'inicia la combustió i durant un llarg tram (segons el temps de residència) es deixa que el residu continuï cremant entre 700 °C i 1100 °C per assegurar-ne una combustió completa.

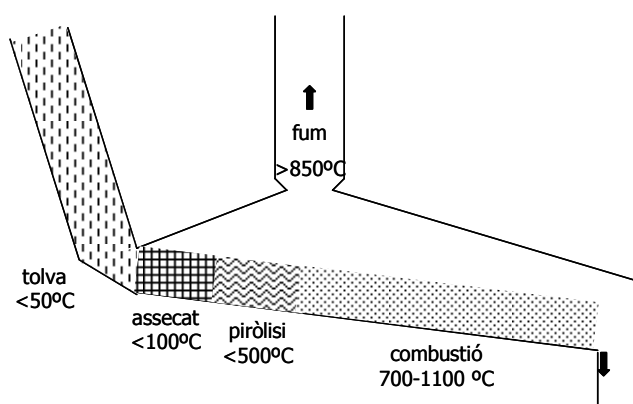


Figura I-4. Gradient de temperatures a la cambra de combustió (Chandler et al., 1997).

Segons Chandler et al. (1997), les temperatures al llarg de la zona de combustió són el factor que més influeix en la composició química de cendres i escòries. La temperatura del material no és homogènia, a causa probablement d'una distribució irregular de les característiques del residu sòlid urbà o de localitzacions concretes en què s'introdueix aire a través de les graelles. Així, a la graella apareixen punts calents amb temperatures d'uns 1500 °C (amb la consegüent fusió de molts constituents) i zones més fredes (Eusden et al., 1999).

Altres paràmetres que també exerceixen una certa influència en la partició dels elements (entesa com la redistribució dels elements introduïts inicialment dins el residu sòlid urbà que alimenta el forn en cada un dels subproductes que integren el procés d'incineració) són la distribució de l'aire, la química i la mineralogia del residu sòlid urbà originari i la presència de HCl. Quantitats significatives de HCl redueixen les temperatures de volatilització de certs elements com Ni, Ag, Tl, Pb, Cd i Bi, i així esdevé un factor molt important en la partició dels metalls pesants (Linak et al., 1993; Thipse, 2002; Greenberg, 1978). Les concentracions de HCl en els gasos de combustió són de 100 a 1000 mg/m³, suficientment grans per modificar el comportament dels metalls i formar clorurs metàl·lics a la cambra de combustió (Wei et al., 1998).

Les temperatures dins la cambra de combustió condicionen la redistribució (partició i especiació) dels diferents elements en funció de la seva pressió de vapor i la dels seus compostos corresponents. Així, a la fracció pesant –escòries– hi resten els elements litòfils amb baixes pressions de vapor. Aquests elements no volàtils poden romandre en productes originaris que no han tingut canvis apreciables, en espècies que sí que han experimentat transformacions durant la combustió (reaccions per formar compostos de més estabilitat mitjançant processos de sinterització, reaccions controlades per difusió o simples canvis d'estructura cristal·lina) o bé incorporar-se a la fosa. De fet, les escòries consisteixen en dos grans grups de materials: els productes refractaris no assimilats i els productes generats a

partir de la fusió de material al forn (Eusden et al., 1999; Krzanowski et al., 1998; Eighmy et al., 1994). Segons Krzanowski (1998) i Eighmy et al. (1994), aquest darrer grup pot arribar a conformar el 85 % de l'escòria.

Les escòries són expulsades del forn cap a basses d'aigua on són temperades, ja que d'una altra manera la combustió continuaria, alimentada per la matèria orgànica residual que encara hi resta. Al marge de les escòries, al forn hi resta un altre residu generat, anomenat *residu de graelles*, constituït per dos residus diferents: la fracció que queda retinguda a les graelles un cop ha finalitzat la combustió i el material que s'escola a través de les graelles durant la combustió. Generalment es descarreguen juntament amb l'escòria al dipòsit on es realitza el refredament, de manera que queden incloses dins el terme *escòria* (Chandler et al., 1997; Chimenos et al., 1999; Kosson et al., 1996).

Els elements volàtils, a diferència dels litòfils, són alliberats del residu a la fase gasosa. Aquests es poden classificar en dos tipus: els elements que formen gasos àcids com els halògens o el sofre (que donen lloc a HCl, HF, HI, HBr, CO₂, SO₂, SO₃ o NO_x) i els metalls volàtils, entre els quals hi ha As, Cd, Hg, Pb, Sb, Zn i Tl. Tot i que aquests metalls no són estables en estat metàl·lic a altes temperatures, durant el refredament una fracció pot quedar en estat vapor i condensar parcialment sobre partícules en suspensió, la qual cosa explicaria la major concentració de formes metàl·liques de metalls a les cendres respecte a les escòries (Chandler et al., 1997).

El flux gasós que ascendeix del forn arrossega material en fase sòlida, líquida i vapor. Inicialment té temperatures de 900 °C i se sotmet a un refredament ràpid, de manera que quan surt de la caldera està a uns 220 °C. Els tubs de la caldera interrompen la trajectòria dels gasos de combustió i tenen les parets molt més fredes. Aquests dos mecanismes, la caiguda de la temperatura i l'aparició d'obstacles que redueixen la velocitat del corrent gasós, afavoreixen dos fenòmens:

- La condensació d'algunes espècies gasoses arrossegades pel corrent, principalment al voltant de partícules fines en suspensió que actuen com a nuclis de condensació.
- La sedimentació de partícules prou denses o prou grosses que deixen d'estar en suspensió.

El resultat de tots dos fenòmens és la sedimentació i condensació de partícules a les superfícies de la caldera, els anomenats *residus de recuperació de calor*, cendres de caldera o pols de caldera (segons el Catàleg Europeu de Residus). Per aquest motiu, tot i que la funció de la caldera és la conversió de calor, actua de manera secundària com un primer sistema d'extracció de partícules en suspensió, ja que només les partícules més fines no són interceptades en aquest punt i continuen movent-se arrossegades pel corrent, donant lloc posteriorment a les cendres volants. Atès que les partícules més fines tenen superfícies reactives més grans, la fracció més fina de les cendres està generalment més enriquida en material condensat, és a dir, en espècies volàtils (Chandler et al., 1997).

Les cendres de la caldera tradicionalment es combinen amb les escòries, juntament amb el residu de graelles (Kosson et al., 1996; Hjelmar, 1996; Chandler et al., 1997), però a gran part de les plantes incineradores europees cada cop es tendeix més a barrejar-les amb els residus de la depuració de gasos (Wiles, 1996), amb els quals tenen més similituds. La caldera se sotmet periòdicament a operacions de manteniment que netegen les partícules que han sedimentat, així com la capa de material fos solidificat que revesteix totes les parets de la cambra i els tubs intercanviadors de calor.

Després de passar per la caldera, els gasos de la combustió es dirigeixen a precipitadors electrostàtics que capturen les partícules fines anomenades *cendres volants*. Les cendres volants inclouen material transportat pels gasos des de la cambra de combustió primària, així com partícules que s'han format posteriorment durant el refredament dels gasos de combustió (condensats).

L'extracció de les cendres volants es pot dur a terme abans de l'addició de qualsevol mena de reactiu (en plantes sense sistemes de depuració de gasos o amb sistemes d'extracció de partícules situat abans de l'equip de neteja de gasos àcids) o bé després, de manera que les cendres volants quedarien incloses en els residus generats durant el procés de depuració de gasos, els anomenats *residus de depuració de gasos*.

La depuració dels gasos de combustió consisteix en la introducció d'un neutralitzador, normalment CaO o Ca(OH)₂. El procés de neteja es pot fer per tres vies, que generen productes lleugerament diferents (Chandler et al., 1997):

- Via seca: el procés té lloc a alta temperatura. S'injecta CaO sec i polvoritzat en el corrent de gas i després es fa passar per un sistema de filtres de mànegues o precipitadors electrostàtics que en recullen les partícules. El residu generat consisteix en una barreja de cendres volants (que poden ser el component més abundant), els productes de la reacció (amb CaCl₂ com a producte predominant) i CaO sense reaccionar.
- Via semiseca: el procediment operatiu és molt similar al de la via seca, però es treballa a temperatures més baixes que en el cas anterior i s'injecta Ca(OH)₂ barrejat amb aigua en forma de lletada, o bé Ca(OH)₂ sòlid i aigua per separat. Els productes resultants són pràcticament els mateixos que els de la via seca excepte pel fet que mostren menys CaO sense reaccionar gràcies a una millor efectivitat de la reacció. Una altra alternativa d'introducció dels reactius és afegir CaCO₃ a la caldera per tal que es descompongui en CO₂ i CaO, però aquesta solució té l'inconvenient de consumir espai.
- Via humida: s'utilitza una suspensió de Ca(OH)₂ i es realitza a baixa temperatura. Els residus generats són, d'una banda, cendres volants i, de l'altra, aigües de rentatge molt enriquides en sals i en metalls pesants que, un cop tractades, esdevenen llots de filtració amb continguts d'aigua variables.

Després de la neutralització els gasos de combustió es depuren encara més, se n'extreuen les partícules sòlides en suspensió (mitjançant precipitadors electrostàtics, filtres de mànegues o ciclons), així com el mercuri i els PCDD/F (mitjançant filtres de carbó actiu).

I.2.3 CARACTERÍSTIQUES DE LES PLANTES INCINERADORES

Fins el 2003 hi havia a Catalunya set plantes d'incineració de residus sòlids urbans (Figura I-5) agrupades en l'Associació Catalana d'Empreses de Valorització Energètica de Residus Sòlids Urbans (ACEVERSU) des del 1998. Aquesta associació inclou les companyies i mancomunitats següents:

- Serveis d'Incineració dels Residus Sòlids Urbans, SA (SIRUSA), Tarragona.
- Tractament i Revalorització de Residus del Maresme, SA (TRMSA), Mataró.
- Servei Municipal d'Incineració de Residus Sòlids Urbans i Industrials (IRSUSA), Girona, Salt i Sarrià de Ter.
- Tractament i Eliminació de Residus, SA (TERSA), Sant Adrià de Besòs i Montcada i Reixac.
- Consell General d'Aran, Vielha.
- Mancomunitat Intermunicipal Voluntària de Serveis La Plana, Malla, actualment (any 2004) no operativa.



Figura I-5. Localització geogràfica de les plantes incineradores de Catalunya estudiades.

L'ACEVERSU estudia i discuteix les qüestions relatives al tractament de residus sòlids urbans mitjançant procediments tèrmics amb valorització energètica. Aporta dades sobre els coneixements tècnics i operatius dels associats per tal de donar suport a l'elaboració o la modificació de la legislació, la reglamentació i l'actualització tècnica. L'objectiu és obtenir una millor gestió i una major difusió del seu funcionament i esforçar-se a millorar la conservació del medi ambient.

Les xifres presentades per l'Agència de Residus de Catalunya (2004) indiquen que entre totes les plantes incineren una quantitat estable de gairebé 700000 tones/any de residus sòlids urbans, com es desprèn del registre de dades (any 1998: 658187 tones; any 1999: 687704

tones; any 2000: 712609 tones; any 2001: 694540 tones). Tres plantes assumeixen el 85 % d'aquesta quantitat de residus: les incineradores de Tarragona, Mataró i Sant Adrià; són les plantes amb més potència i més capacitat, superior a 6 tones/hora per línia. La resta de plantes són més modestes i tenen una capacitat d'entre 1 i 3 tones/hora. Les temperatures de combustió oscil·len entre 900 i 1080 °C (ACEVERSU, 2002). Les dades tècniques de cada una de les instal·lacions es detallen a la Taula I-1.

No totes les instal·lacions tenen les mateixes prestacions i, consegüentment, els subproductes resultants del procés diferiran lleugerament d'una planta a l'altra. Les variables del procés que influeixen les característiques de les escòries es poden classificar en dos grups: les del procés d'incineració i les dels possibles tractaments postincineració.

Factors relacionats amb el procés d'incineració

- Tipus de forn

El tipus de forn condiciona, entre altres coses, la granulometria resultant, ja que els forns de graelles són dinàmics, eviten la formació de grans aglomerats de partícules en estat proper a la fusió i sotmeten el material a una certa fragmentació. També exerceix una considerable influència en la quantitat d'incrementats. El tipus de forn de cada una de les plantes es detalla a la Taula I-1.

- Qualitat de la combustió

La qualitat de la combustió es pot mesurar en termes de temps de residència del residu dins el forn i temperatura que s'ateny. El temps de residència no és un valor establert per cap normativa com en el cas dels gasos, sinó que l'estableix un operari en funció de les característiques del residu que alimenta el forn, tenint en compte alguns paràmetres com per exemple la quantitat d'aigua del residu (si hi ha una gran proporció de residus orgànics) o de la humitat en cas que hagués estat sotmès a la pluja. És, doncs, un valor variable que, segons s'ha consultat als responsables de les incineradores, és com a mínim de 15', i oscil·la fins a 3 hores. La temperatura mitjana de combustió també es detalla a la Taula I-1, i varia entre 900 °C i 1050 °C. És desitjable una bona efectivitat en la combustió per obtenir escòries lliures de materials incrementats.

Factors postincineració

- Extracció de ferralla amb electroimant (normatiu)

L'extracció de la fracció fèrrica de les escòries suposa retirar grans quantitats de ferralla que en alguns casos pot atènyer grans dimensions. La utilització d'electroimants aporta beneficis directes en la venda de la ferralla per reciclar i alhora contribueix a millorar la qualitat de l'escòria resultant, ja que n'amplia el ventall de possibles aplicacions. Les instal·lacions equipades amb electroimant s'indiquen a la Taula I-2. La incineradora de Montcada no disposa d'electroimant, però envia les seves escòries un cop surten del forn a les instal·lacions de Sant Adrià, on sí que en tenen (val a dir que totes dues plantes pertanyen a la mateixa empresa, TERSA).

Taula I-1. Dades tècniques de les set plantes incineradores en funcionament a Catalunya (ACEVERSU, 2002).

	TARRAGONA	SANT ADRIÀ	MATARÓ	MONTCADA	GIRONA	MALLA	VIELHA
Hores/any operació	8200 (màxim)	7600 (màxim)	8000	8200 (màxim)	8760	8200 (màxim)	8200 (màxim)
Tipus de residus	RSU	RSU	RSU + RI assimilables	RSU	RSU	RSU i RDF	RSU
Línies actuals	2	3	2	2	2	1	1
Capacitat d'incineració/línia	9.6 t/h	12.5 t/h de PCI 1800 kcal/kg	10 t/h de PCI 2000 kcal/kg	2.8 (mitjana) t/h de PCI 1800 kcal/kg	2.5 t/h	1 t/h	1 t/h
Tipus de forn	graella amb rodets DBA	graelles lliscants	graelles mòbils de barrots	graelles lliscants	graella mòbil de retrocés	pont ceràmic estàtic semipirolític	estàtic amb barres mòbils
Temperatura de combustió (mitjana)	950/1000 °C	900 °C	1080 °C	1050 °C	1050 °C	nd	900/950 °C
Potència màxima	7.4 MW/h	17.7 MW/h	11 MW/h	760 kW/h	1.9 MW/h	620 kW	nd
PCI combustible	1500/2000 kcal/kg	1700/2100 kcal/kg	1300/3000 kcal/kg	1700/2000 kcal/kg	1200/2000 kcal/kg	4000 kcal/kg (màxim)	3200 kcal/kg (màxim)
Tones incinerades any 2001	148950 t	300593 t	161842 t	45009 t	31406 t	2666 t	4688 t
Tipus de condensador	aerorefrigerant	aigua de mar	aerorefrigerant	aerocondensador	aigua de depuradora	aerocondensador	nd
Sistema de depuració de gasos	semisec amb filtre de mànegues	semisec amb electrofiltres i filtre de mànegues	semisec amb filtre electrostàtic	semisec amb electrofiltre i filtre de mànegues	sec amb electrofiltre i filtre de mànegues	sec amb filtre de mànegues	Sec filtre de mànegues
Reactiu	CaO	CaO	CaO	CaO	Ca(OH) ₂	CaO	Ca(OH) ₂
Sistema d'injecció de carbó actiu	si	Si	Si	Si	si	nd	nd

RSU: residus sòlids urbans; RI: residus industrials; RDF: plàstics; PCI: poder calorífic inferior; nd: valors no disponibles.

Taula I-2. Tractaments postincineració i destí de les escòries

INSTAL·LACIONS	ELECTROIMANT	TRACTAMENT POSTERIOR	DESTÍ
Tarragona	sí	sí (des del març del 2001)	VECSA
Mataró	sí	sí	Pedrerres Rusc
Sant Adrià	sí	no	abocador Garraf
Montcada	no	no	Inc. Sant Adrià
Malla	no	no	abocador
Girona	no	no	emmagatzematge
Vielha	no	no	abocador

- Tractament posterior

El tractament posterior de les escòries es realitza en unes instal·lacions independents de la planta incineradora i sota la direcció d'una altra empresa. A Catalunya hi ha dues empreses que es dediquen a l'acondicionament de les escòries, dels quals resulta un producte anomenat *Escograva*, que es descriurà més endavant. Aquestes empreses i la procedència de les escòries que processen s'indiquen a la Taula I-2. El tractament inclou un processament i una maduració, un envelliment durant un cert període de temps.

Les escòries resultants tenen diferents destins segons la planta incineradora considerada (Taula I-2). Les de Tarragona i Mataró són conduïdes a les plantes d'acondicionament i d'aquí es dipositen en piles esperant ser col·locades en petites obres. Les escòries de Montcada (pas previ per l'electroimant de Sant Adrià), Sant Adrià, Malla i Vielha van a parar fonamentalment a l'abocador, excepte petites proporcions destinades a l'obra civil de manera puntual. Les escòries de la incineradora de Girona fins fa poc s'acumulaven en piles a les mateixes instal·lacions, però sembla que darrerament tota la producció es col·loca com a material de rebliment.

I.2.4 SITUACIÓ ACTUAL DE LA INCINERACIÓ A CATALUNYA

L'operació de tractament de residus per incineració està restringida als residus que estableix la legislació vigent en el que pertoca a la seva valorització prèvia, i és el Catàleg de Residus de Catalunya (Agència de Residus de Catalunya, 2004) el que orienta uns residus o altres a aquesta operació d'incineració. Es considera que la utilització d'un material residual com a combustible o com un altre mitjà de generar energia és una operació o una via de valorització, l'anomenada *valorització energètica*, i no pas una operació d'eliminació.

A Catalunya totes les plantes incineradores de residus estan obligades per llei a aprofitar la calor obtinguda de la combustió dels residus sòlids urbans per generar energia. El procés d'incineració de residus és el normal d'una combustió, malgrat que no totes les plantes d'incineració utilitzen les mateixes tecnologies en la combustió i en la neteja dels gasos resultants. Els gasos generats resten un mínim de dos segons a 850 °C, per obligació legal.

Es considera el temps i la temperatura necessaris per destruir-ne els components nocius (essencialment PCDD/F).

A la pràctica s'ha aconseguit l'autoabastament energètic de totes les instal·lacions; el poder calorífic inferior dels residus és suficient per poder prescindir de fuel per mantenir en funcionament la combustió. Algunes plantes subministren electricitat a la xarxa de distribució de l'àrea d'influència de la incineradora. Per exemple, les plantes de Montcada i Reixac i la de Sant Adrià de Besòs, a més de reaprofitar l'energia calorífica, produeixen energia elèctrica (1000 MW/h/any i 105000 MW/h/any, respectivament, segons l'ACEVERSU, 2002). La planta de Montcada i Reixac també subministra vapor per a ús industrial.

Atès que es tracta d'una solució que comporta un procés industrial que, si no s'adoptessin les mesures correctores oportunes, tindria un impacte directe en el medi ambient de la zona, aquestes plantes disposen de sistemes de depuració d'emissions gasoses a l'aire que s'han anat millorant fins a aconseguir els màxims nivells de protecció mediambiental. Les dades de les emissions atmosfèriques de contaminants sòlids i gasosos procedents de les plantes incineradores de Catalunya estan controlades permanentment per la Direcció General de Qualitat Ambiental de la Generalitat.

La tècnica de valorització energètica –incineració– no està exempta de polèmica, especialment entre aquelles poblacions properes a alguna de les plantes incineradores, així com per part de diversos grups ecologistes, com a exemples de l'anomenada síndrome NIMBY (abreviació de *not in my backyard*, no al meu pati del darrere). Després d'un temps durant el qual la incineració es propugnava com un mètode de qualitat dubtosa i, per tant, amb una tendència a desaparèixer, molts països industrialitzats estan optant per aquesta opció com la més profitosa. Gran part de la controvèrsia que envolta les incineradores se centra en les emissions de PCDD i PCDF.

D'altra banda, la significativa reducció de volum i pes del residu, la possibilitat de generació d'energia i el poc espai físic requerit són algunes de les raons que avalen aquest mètode com una opció molt vàlida, i més des que els avenços tecnològics disminueixen les emissions nocives. Demostren aquest fet les grans quantitats de residus incinerats en alguns països com Suïssa, Dinamarca i Luxemburg (Figura I-6), en els quals el 75 % dels residus es destinen a la valorització energètica. Aquests, juntament amb el Japó (72 %) i Suècia (55 %), són els països amb les taxes d'incineració més altes.

La tendència actual és no considerar la incineració com una operació excloent de les altres, sinó com una més del cicle de tractament integral dels residus, que comença per una minimització en origen, una recollida selectiva, el reciclatge, la incineració i finalment l'aprofitament del residu de la incineració.

A Espanya la proporció de residus que s'incineren és molt baixa, en contrast amb altres països de la UE. A Catalunya la taxa d'incineració triplica la d'Espanya (10 %) i dona servei a 1600000 habitants (ACEVERSU, 2002).

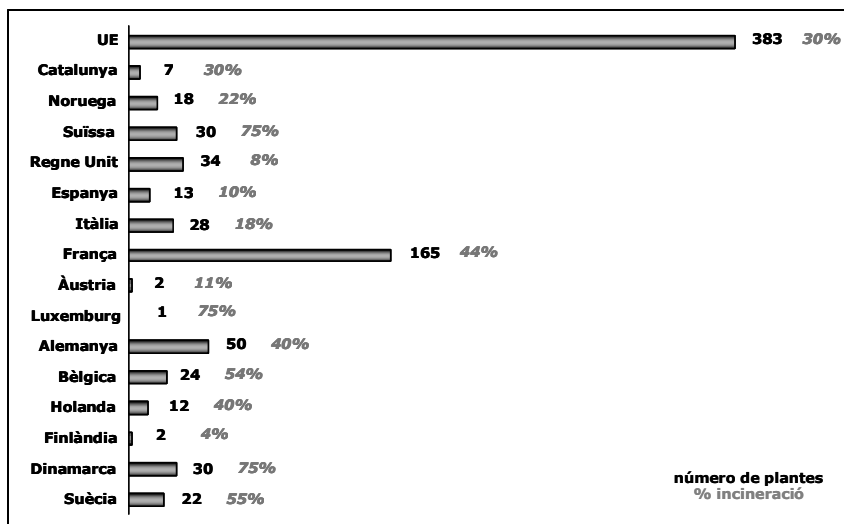


Figura I-6. Quantitat de plantes incineradores de residus sòlids urbans a diferents països (en negra) i taxes d'incineració (en gris i cursiva). Modificat de l'ACEVERSU (2002).

Als EUA la majoria dels residus generats en el procés d'incineració són enterrats, però en alguns països europeus, com Alemanya, Holanda, Dinamarca i França, una proporció considerable és utilitzada com a material de construcció.

I.2.5 EL FUTUR DE LA INCINERACIÓ A CATALUNYA

El 2 de febrer de 2000 es publicava el Pla nacional de residus urbans de l'Estat, en el qual es recullen uns objectius d'incineració, expressats en el Pla com a valorització energètica, del 9 % a finals del 2001 i del 17.7 % l'any 2006 del total de residus urbans. Això suposaria la construcció de noves incineradores de residus urbans i l'augment de les tones incinerades a les instal·lacions que actualment són operatives. En aquest sentit, el mateix pla inclou un augment del volum incinerat del 80 % en la majoria de les incineradores en funcionament durant el període 2001-2006. Estarem parlant d'un total de 3192000 tones de residus urbans incinerats el 2006. Tot i que aquestes dades són d'àmbit estatal, el seu efecte es faria palès a Catalunya, atès que una gran part de les plantes incineradores a Espanya es concentren al territori català. La conseqüència directa seria, doncs, un augment considerable d'escòries resultants d'aquest procés.

Ja en l'àmbit de Catalunya, l'aplicació del Programa metropolità de gestió de residus municipals (PMGRM), aprovat el 1997 (Entitat Metropolitana del Medi Ambient, 2002) i amb vigència fins a l'any 2006, significarà passar a reciclar un 60 % dels residus que es produeixen a l'àrea metropolitana, de manera que disminuirà el total de residus generat.

Algunes de les actuacions que inclou són la millora dels sistemes de tractament de residus i la racionalització i modernització del sistema d'incineració. Actualment totes les instal·lacions s'estan dotant de les tecnologies més eficients per minimitzar-ne l'impacte ambiental. El Programa considera la incineració com un sistema de tractament que cal incloure en el cas d'aquells residus que són una barreja de materials orgànics i inorgànics. La Figura I-7 mostra les previsions establertes pel PMGRM, on la incineració es manté com a opció de tractament dels RSU, i fins i tot augmenta lleugerament.

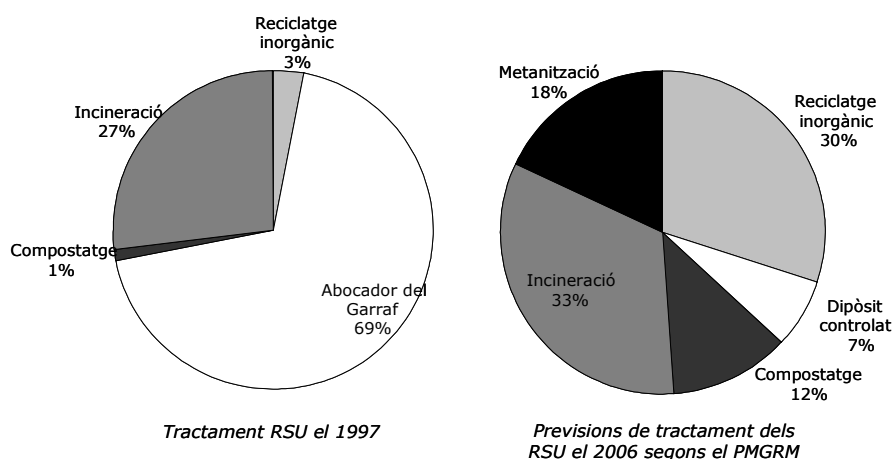


Figura I-7. Evolució de les diferents opcions de tractament dels residus sòlids urbans (RSU) prevista pel Programa metropolità de gestió de residus municipals (PMGRM). Modificat de l'Entitat Metropolitana del Medi Ambient.

Integrant els objectius dels dos plans, l'estatal i l'autonòmic, es pot preveure en el futur un augment de la quantitat d'escòries generades. Les previsions de 3192000 tones de residus municipals incinerats el 2006 a Espanya equivaldrien a unes 600000 tones d'escòries. Aquesta quantitat és suficientment significativa per considerar les escòries com un subproducte que pot esdevenir un nou recurs si se sotmet a tècniques de tractament adequades, i es podrien constituir com un nou material de múltiples aplicacions en l'enginyeria civil.

I.3 ELS SUBPRODUCTES DE COMBUSTIÓ

I.3.1 CARACTERÍSTIQUES

Els principals tipus de residus generats en una planta incineradora ja s'han presentat breument en l'apartat I.2.2, en el qual es descriuen els processos responsables de la seva formació. Els més importants des del punt de vista quantitatiu són les escòries, les cendres i la ferralla. La Figura I-8, amb dades de l'ACEVERSU (2002), mostra a grans trets el balanç de masses del procés, amb les proporcions relatives de cada un dels subproductes que s'obtenen en la incineració d'una tona de residus sòlids urbans.

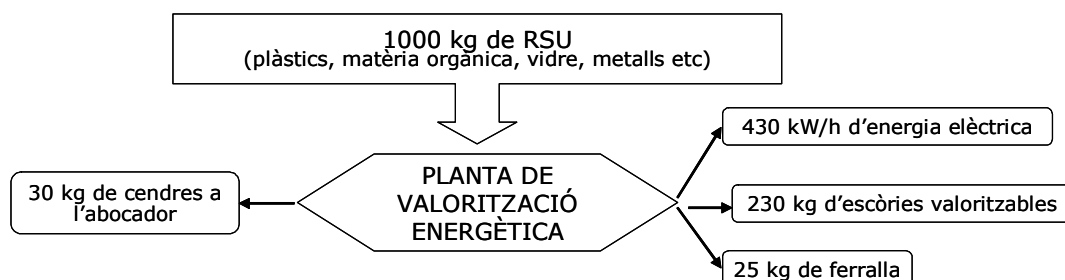


Figura I-8. Balanç de masses de la incineració, valors mitjans (ACEVERSU, 2002).

De manera més detallada, la proporció relativa de cada un dels residus produïts en diferents punts del procés es mostra a la Figura I-9. Aquesta Figura també reflecteix els efectes de la incineració d'una tona de residus sòlids urbans i les quantitats de cada tipologia de producte que se'n deriven, expressats en kg de producte residual per tona de residu inicial.

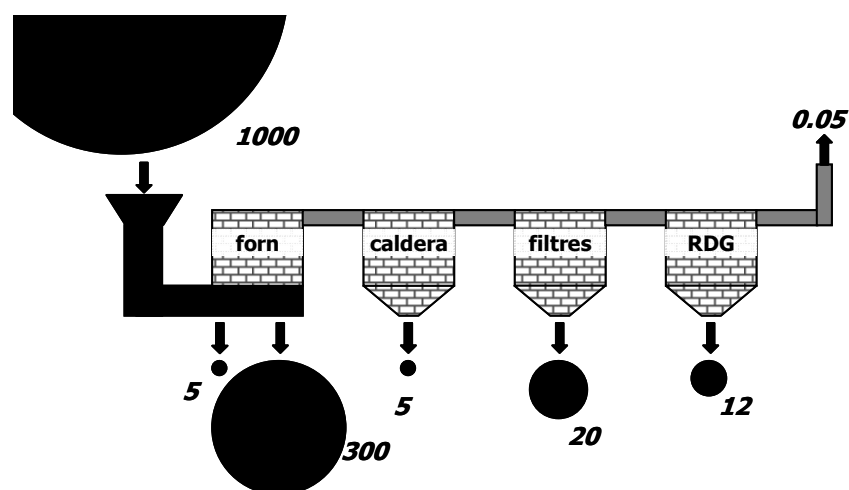


Figura I-9. Quantitats mitjanes de cada una de les tipologies de residus que es generen en la combustió d'una tona de residus sòlids urbans. RDG: residus de depuració de gasos. Totes les dades estan en kg de producte per tona de residu incinerat (Chandler et al., 1997).

Productes del forn: escòries i residu de graelles

Les escòries són el subproducte més important quantitativament que s'obté en la incineració de residus sòlids urbans, ja que constitueixen del 80 % al 95 % del producte sòlid resultant de la combustió (Chandler et al., 1997; Wiles, 1996; Chimenos et al., 1999). S'obtenen de 250 kg a 420 kg d'escòries per cada tona de residu incinerat (Chandler et al., 1997). La producció actual a Catalunya és d'entre 100000 i 150000 tones/any d'escòries (dades dels anys 2001 i 2002 recollides per l'Agència de Residus de Catalunya el 2004).

L'Ordre de 15 de febrer de 1996, sobre valorització d'escòries (Departament de Medi Ambient, 1996) defineix:

“Escòries: són els residus industrials de naturalesa principalment inorgànica que resten en el forn un cop acabat el procés tèrmic i una vegada separada la fracció fèrrica.”

El mateix terme *escòries*, doncs, exclou de la seva definició la fracció fèrrica que s'extreu mitjançant electroimants, per bé que certes plantes incineradores de Catalunya l'any 2001 encara no estaven proveïdes d'aquest dispositiu, concretament les de Girona, Malla i Vielha (la planta de Montcada tampoc no en té, però trasllada les escòries a la planta de Sant Adrià per fer aquesta operació). Val a dir també que es tracta de les plantes amb menys capacitat d'incineració. La ferralla es recicla en la indústria de l'acer. En algunes plantes incineradores aquest tractament és més complet i inclou, per exemple, l'extracció i posterior reciclatge de la fracció metàl·lica no fèrrica.

Les escòries es presenten com un material granular de granulometria i dimensió màxima variable. A tot arreu, un cop surten del forn, es refreden en basses amb aigua. Malgrat que aquesta pràctica està molt estesa, alguns estudis com el de Selinger (1997) posen de manifest els beneficis de no mullar-les abans del processament; l'aigua dificulta la separació de partícules, tant des del punt de vista físic (el material saturat és com una pasta) com des del punt de vista químic, ja que tan bon punt comencen les hidratacions alguns metalls com el ferro o l'alumini formen hidròxids i ja no poden ser reciclats.

Les escòries es poden classificar com un sistema multicomponent de diversos materials de naturalesa diferent, particularitat que els confereix una gran heterogeneïtat. Es poden diferenciar cinc grans grups de materials de naturalesa diferent (Chimenos et al., 1999; Chandler et al., 1997; Eusden et al., 1999; Hartlen i Lundgren, 1991; Nonneman et al., 1991):

- Fragments de ceràmica, formigó, porcellana, totxos i guix.
- Vidre d'origen domèstic.
- Metalls fèrrics (peces d'acer i de ferro, generalment oxidades) i no fèrrics (alumini, coure, plom).
- Residus no cremats fruit d'una combustió incompleta en el procés d'incineració: carbonissa, paper, cotó, fibres sintètiques i fragments ossis.
- Material generat a partir de la fusió al forn.

La quantitat de cada constituent depèn de la composició de l'alimentació del forn (és a dir, del residu sòlid urbà incinerat), del sistema i l'efectivitat de la combustió i de l'existència d'un subsegüent tractament del material previ al seu emmagatzematge, disposició o utilització. Al marge d'aquestes variables, s'han pogut determinar tendències generals en les proporcions de cada un dels constituents, i predominen clarament el material de fusió i el vidre domèstic (Chimenos, et al., 1999, Eusden et al., 1999).

Quan una peça de metall oxidable entra a la cambra de combustió, l'oxidació comença per la superfície exterior, que forma una capa d'òxid. Aquesta capa és una estructura densa que en alguns casos pot inhibir els fenòmens de difusió i protegir l'interior del metall de l'oxidació. Com a conseqüència, alguns metalls passen a través de la combustió aparentment inalterats pel procés i són recollits en l'escòria. Pertanyen a aquest grup Al, Sb, Cu, Fe, Ni, Ti i Pb. En el cas dels metalls amb punts de fusió relativament baixos, tot i formar-se la capa protectora, el nucli metàl·lic pot fondre's abans de l'oxidació i formar gotes que s'acumulen a les graelles (Chandler et al, 1997).

Una gran proporció dels productes generats durant la fusió es presenten en forma de vidres amorfs, atès que el temperament és molt sobtat. L'escòria, inicialment a més de 1000 °C, se sotmet a un refredament força ràpid, de manera que en uns 20 minuts la temperatura ha davallat fins als 300 °C, moment en què se submergeix en les basses de temperament. Per aquest motiu moltes de les reaccions que estan tenint lloc són *congelades* i el producte final té una composició mineralògica molt complexa amb fases metastables (Eusden et al., 1999; Krzanowski et al., 1998). El refredament sobtat també és el responsable de les textures vesiculars que presenta aquesta fracció de les escòries, assimilables a les habituals en roques volcàniques. Eighmy et al. (1994) estimen que les vesícules constitueixen entre un 10 % i un 25 % del volum total de les partícules. Això confereix a les escòries un elevat grau de porositat connectada a l'exterior i, per tant, una gran superfície específica, d'entre 3 i 46 m²/g (Chandler et al., 1997). Aquests valors són considerats molt alts per a un material granular i diversos ordres de magnitud per sobre de sòls convencionals, però típics de cendres volants.

La Taula I-3 mostra els rangs de composició d'escòries d'incineració d'arreu del món. Aproximadament el 80 % - 90 % en pes de l'escòria consisteix en òxids de Si, Fe, Ca, Al, Na, i K, juntament amb O i C. Hi ha un clar predomini de Si, Ca, Al i Fe, elements que conformen les fases més abundants. Des del punt de vista composicional, aquestes fases es podrien classificar com a aluminosilicats fortament alcalins. Pel que fa als elements majoritaris, aquells que es presenten en concentracions >10000 mg/kg, les concentracions en què apareixen a les escòries són comparables a les de l'escorça o els sòls. Per contra, les escòries i encara més les cendres estan molt enriquides en metalls i en traces (elements amb concentracions <1000 mg/kg) respecte als materials naturals (Chandler et al., 1997).

La solubilitat en aigua és un paràmetre molt important per decidir les opcions disponibles per al tractament, la disposició o la possible utilització. La solubilitat en aigua dóna una idea del potencial alliberament dels components. En el cas de les escòries, la solubilitat (atribuïble a la dissolució de sals com NaCl o CaCl₂) és força baixa, del 3 % al 14 % (Wiles, 1996; Kosson et al. 1996).

Les principals fases i les més esmentades en la bibliografia com a constituents habituals de les escòries es detallen a la Taula I-4.

Taula I-3. Rangs composicionals per a diversos subproductes d'incineració de residus sòlids urbans. Les dades són de Chandler et al. (1997), Hjelmar (1996), Kosson et al. (1996) i Johansson i van Bavel (2003). RDG: residus de depuració de gasos. Tots els valors estan en mg/kg excepte els compostos orgànics, que estan en µg/kg, i la pèrdua al foc, en g/kg.

<i>Element</i>	<i>escòries</i>	<i>cendres volants</i>	<i>RDG vies seca i semiseca (inclou cendres volants)</i>	<i>RDG via humida llots+cendres volants</i>
Ag	0.29-36.9	2.3-100	0.9-60	53
Al	21900-72800	49000-90000	12000-83000	71000-81000
As	0.12-189	37-320	18-530	130-190
B	38-510	-	-	-
Ba	400-3000	330-3100	51-14000	330-1900
Be	-	-	0.5-0.9	1.5-1.9
Ca	50000-123000	74000-130000	110000-350000	93000-110000
Cd	0.3-70.5	50-450	140-300	220-270
Cl	800-4190	29000-210000	62000-380000	48000-71000
Co	6-350	13-87	4-300	14-22
Cr	23-3710	140-1100	73-570	390-660
Cu	190-8240	600-3200	16-1700	1000-1400
Fe	4120-150000	12000-44000	2600-71000	14000-18000
Hg	0.02-7.75	0.7-30	0.1-51	38-390
K	750-16000	22000-62000	5900-40000	35000-58000
Mg	400-30000	11000-19000	5100-14000	18000-23000
Mn	83-2400	800-1900	200-900	1400-2400
Mo	2.5-276	15-150	9.3-29	20-38
Na	2870-42000	15000-57000	7600-29000	28000-33000
Ni	7-4280	60-260	19-710	67-110
P	1400-6400	4800-9600	1700-4600	6000-7400
Pb	98-13700	5300-26000	2500-10000	5900-8300
S	1000-5000	11000-45000	1400-25000	11000-26000
Sb	10-432	260-1100	300-1100	-
Se	0.05-10.0	0.4-31	0.7-29	12
Si	91000-308000	95000-210000	36000-120000	120000
Sn	2-380	550-2000	620-1400	1000
Sr	85-1000	40-640	400-500	200
Ti	2600-9500	6800-14000	700-5700	5300-8400
V	20-122	29-150	8-62	62
Zn	613-7770	9000-70000	7000-20000	20000-23000
PAH µg/kg	0.23-3589	30-110	18-5600	-
PCDD µg/kg	0.2-10	115-140	0.7-1000	260
PCDF µg/kg	0.44-4.5	48-69	1.4-370	120
CB µg/kg	6.7-45	50-890	220	-
LOI 550°C g/kg	5.9-50	11-45	28-19	-

PAH: hidrocarburs policíclics aromàtics; PCDD: dioxines; PCDF: furans; CB: clorobenzens; LOI: pèrdua al foc a 550°C.

Els estudis d'Eusden et al. (1999), Eighmy et al. (1994) i Krzanowski et al. (1998) sobre la petrogènesi de les escòries, i centrats especialment en el material de fusió, indiquen que la seqüència paragènica es podria assimilar a la de roques ígnies melilitiques, descrites mitjançant el sistema CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Na₂O-FeO, en el qual les foses es formen a 1200 °C. Els productes fosos consisteixen en vidres i minerals cristal·lins que van formant-se durant la incineració a partir de la fosa: vidre opac, vidre isòtrop, minerals del grup de les espinel·les i minerals del grup de la melilita (sèrie gehlenita-akermanita), formats a

temperatures diferents. Sembla que es produeix un fraccionament entre els dos tipus de vidres petrogràficament i composicionalment diferents, ja que al vidre opac és on presumiblement es concentren els metalls pesants. A més dels productes de fusió, hi resten els productes refractaris o preexistents. Aquests són els que s'ha esmentat a l'apartat de constituents de les escòries: vidre, peces metàl·liques sovint amb les textures relictas (ferro, coure), matèria orgànica (in cremats) i altres fases.

Taula I-4. Caracterització mineralògica de les escòries. Dades de Chandler et al. (1997), Eighmy et al. (1994), Pfrang-stotz et al. (2000), Freyssinet et al. (2002), Kirby et al. (1993), Krzanowski et al. (1998), Eusden et al. (1999) i Bodenau et al. (2000).

<i>silicats</i>	<i>òxids/hidròxids</i>	<i>carbonats</i>	<i>sulfats</i>	<i>clorurs</i>	<i>elements natis</i>	<i>altres</i>
quars	magnetita	calcita	guix	halita	alumini	vidre
feldspat potàssic	hematites	dolomita	bassanita	silvita	coure	fases del ciment (C ₂ S - Iarnita)
plagiòclasi	hercinita	siderita	anhidrita	ZnCl ₂	ferro	apatita
gehlenita-akermanita	cromita	magnesita	ettringita		taenita (Fe,Ni)	pirita
mul·lita	rútil		PbSO ₄		grafit	pirrotina
crystalita	wüstita		Na ₂ SO ₄			
diòpsid	CaO		K ₂ SO ₄			
augita	ilmenita					
wol·lastonita	portlandita					
zeolites	gibbsita					

En general les escòries es presenten com un material granular amb una distribució contínua de mida de partícula, és a dir, ben graduat. L'abundància tant d'àrid fi com d'àrid gruixut és important de cara a la compactació de les escòries i al seu potencial com a substitut d'àrids naturals.

Algunes corbes granulomètriques recollides a la bibliografia es representen a la Figura I-10. Els pendents de les corbes són més aviat suaus i indiquen una granulometria contínua. Dins d'aquesta continuïtat, però, hi ha notables diferències en les proporcions de cada fracció, especialment per a mides intermèdies. Per exemple, la proporció de material que passa pel tamís de 5 mm oscil·la entre el 38 % i el 60 %, una variació de més del 20 %. En canvi, pel que fa a les partícules fines (<63 µm), encara que relativament la proporció pot variar, aquesta sempre es manté entre el 4 % i el 8 %. També presenten poques divergències les proporcions de material gruixut: del 89 % al 100 % de les partícules són menors de 20 mm, i del 95 % al 100 % són menors de 25 mm.

Tradicionalment es considerava que les escòries d'incineració de residus urbans eren un material inert, però darrerament han aparegut molts estudis que revelen el contrari i posen de manifest una certa reactivitat durant el període de maduració (Alkemade et al., 1994; Chandler et al., 1997; Pfrang-Stotz et al., 2000; Freyssinet et al., 2002; Meima i Comans, 1997; Speisser et al., 2000; Zevenbergen et al., 1998). Les escòries són termodinàmicament inestables en condicions atmosfèriques perquè es formen a altes temperatures i se sotmeten

un refredament sobtat. Aquesta inestabilitat química provoca processos de meteorització i d'alteració que en canviaran les característiques mineralògiques durant l'emmagatzematge, és a dir, l'especiació tant dels elements majoritaris com dels minoritaris i traces.

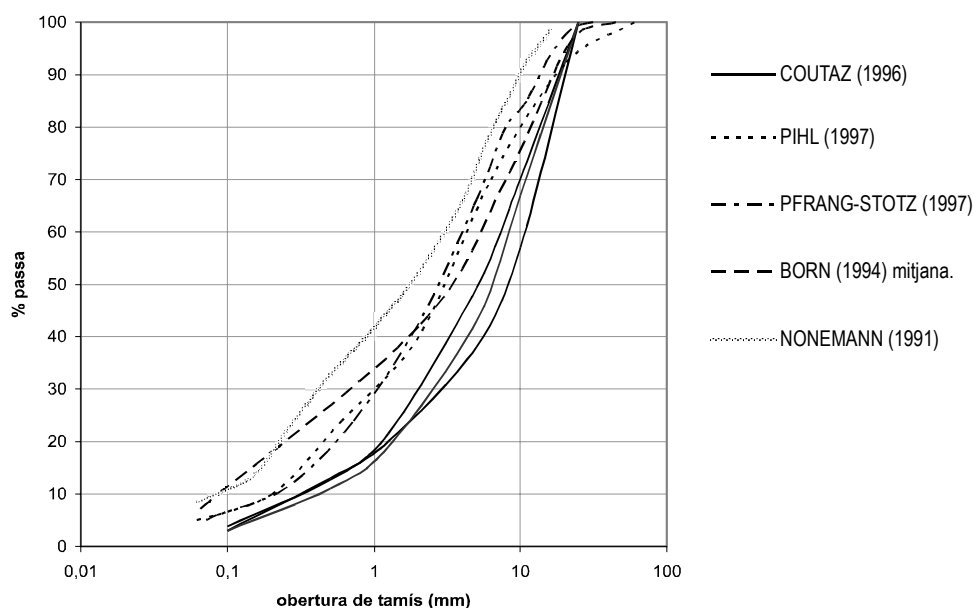


Figura I-10. Corbes granulomètriques d'escòries segons diversos autors (Born, 1994; Nonneman et al., 1991; Coutaz, 1996; Pihl, 1997; Pfrang-Stotz i Reichelt, 1997).

Després del temperament, les escòries s'acumulen en piles sotmeses als agents atmosfèrics, dins les quals tenen lloc processos de transformació de fases anomenades *d'envelliment* o *maduració*. Gran part de les reaccions són exotèrmiques i comporten un augment de la temperatura a les piles de fins a 60 °C – 70 °C (Alkemade et al., 1994). Algunes de les reaccions que tenen lloc i que modifiquen profundament les característiques i el comportament de les escòries són les següents (Pfrang-Stotz et al., 2000):

- Hidratació dels òxids.
- Carbonatació de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formació de calcita amb la consegüent davallada del pH (Meima i Comans, 1997).
- Oxidació dels metalls.
- Reaccions hidràuliques de la portlandita amb altres òxids, de manera similar a aquelles que tenen lloc durant la formació del formigó (Selinger, 1997).
- Formació de silicats càlcics hidratats (CSH) i d'altres fases pròpies del ciment com l'ettringita, amb el consegüent desenvolupament de fenòmens expansius (Alkemade et al., 1994; Pecqueur et al., 2001).
- Neoformació de minerals de l'argila a les vores de gra dels vidres (Zevenbergen et al., 1994 i 1998), a llarg termini.
- Reaccions que involucren Al metàl·lic i que poden desencadenar fenòmens expansius per acumulacions de gas (Chandler et al., 1997; Alkemade et al., 1994; Pecqueur et al., 2001).
- Reaccions del ferro (reaccions lentes).

- Dissolucions.
- Reaccions amb sulfats: pas d'anhidrita a bassanita i formació directa de bassanita.

Un altre producte generat al forn és el residu de graelles. Aquesta fracció constitueix un percentatge molt baix, d'uns 5 kg per tona de residu sòlid urbà (Figura I-9). És una pràctica molt habitual barrejar el residu de graelles amb les escòries, fet que explicaria la manca de dades disponibles sobre les característiques d'aquest residu, especialment sobre les seves propietats físiques, ja que la separació de les graelles és variable.

Les observacions realitzades per Chandler et al. (1997) mostren que el material està constituït essencialment per partícules de naturalesa variable però prou fines per escolar-se entre les graelles, així com gotes de metalls fosos. Aquests darrers es presenten en acumulacions de gotes fosos de coure, alumini, zinc i plom. La Taula I-5 mostra els rangs de composició química de cribes de graelles mostrejades durant una setmana a la planta incineradora de Burnaby (Canadà).

Les dades mostren un enriquiment significatiu en Al, Cu, Pb i Zn en forma elemental. Es calcula que el 40 % del Pb total contingut a les escòries prové de la contribució del residu de graelles. El residu de graelles es barreja amb l'escòria i hi contribueix aproximadament entre un 1 % i 3 % en pes (Wiles, 1996; Kosson et al., 1996; Chandler et al., 1997).

Taula I-5. Rangs de concentració d'alguns elements en el residu de graelles (WASTE Program, 1993).

ELEMENT	RANG mg/kg	ELEMENT	RANG mg/kg
Al	38000-63000	Cu	2347-25215
As	2-65	Hg	<0.02-5.39
B	98-232	Ni	169-468
Ba	1349-2629	Pb	5600-34000
Be	<3.0	Sb	130-570
Cd	<5.0-14.6	Sn	171-946
Cr	278-562	Zn	2450-5334

L'existència d'alumini metàl·lic pot ser el desencadenant d'alguns problemes. Quan es barreja el residu de graelles amb les escòries i es traslladen al tanc de temperament es pot produir la formació de $\text{Al}(\text{OH})_3$ i l'alliberament de H_2 , motiu pel qual les plantes incineradores haurien d'estar dotades d'una ventilació apropiada al tanc per evitar el perill del gas. L'altre problema potencial pot sorgir quan les escòries es destinen a la utilització en carreteres. La formació de $\text{Al}(\text{OH})_3$ desemboca en una expansió del material, que, juntament amb les acumulacions de H_2 , podria causar aixecaments no desitjats en àrees localitzades. Aquests desavantatges donen suport a les recomanacions de recollir separadament els dos materials, especialment si les escòries han de ser aprofitades (Chandler et al., 1997).

Productes de la caldera

Els residus de recuperació de calor o cendres de caldera mostren una granulometria fina i bastant variable, que oscil·la entre 2 i >200 µm. La granulometria està molt condicionada pel sistema de combustió, l'entrada d'aire i les turbulències, la configuració de la caldera i fins i tot per les característiques del residu que alimenta el forn, especialment en casos en què els residus de demolició o sòls són particularment abundants. També la quantitat produïda (Figura I-9) és variable i depèn en gran mesura de tots aquests factors, oscil·la aproximadament entre 2 kg i 12 kg per tona de residu sòlid incinerat (Chandler et al., 1997).

Es poden diferenciar cinc tipologies de partícula diferents dins aquestes cendres, les característiques i l'abundància relativa de les quals es recullen a la Taula I-6.

Taula I-6. Rangs de concentració d'alguns elements en el residu de graelles (WASTE Program, 1993).

MORFOLOGIA	PROPORCIÓ %	MIDA µm	PARTICULARITATS
Esferes foses	15	2-100	Esferoides amb inclusions gasoses o sòlides
Cristalls	10	5-140	Irregulars, partícules de calcita o quars
Policristal·lines	30	5-200	Agregats densos de partícules irregulars
Opaques	30	5-300	Partícules individuals irregulars opaques
Partícules fibroses negres	15	10-400	Matèria orgànica pirolitzada

Els residus de recuperació de calor es poden classificar en dos tipus en funció de les característiques de l'acumulació: el material en forma de capes foses a les parets de la caldera i els dipòsits de material pulverulent sedimentat a les superfícies. La composició de les dues tipologies de productes de la caldera és lleugerament diferent, com es pot veure a la Taula I-7. A títol comparatiu, la taula inclou també la composició química del material arrossegat pels gasos de combustió abans que tingui lloc cap procés de condensació o sedimentació. Mostren un clar enriquiment en diversos constituents respecte al valor mitjà de les partícules, principalment en espècies volàtils. L'enriquiment té lloc per la prolongada interacció entre les cendres i els gasos de combustió, que afavoreix un augment significatiu dels continguts en SO_4^{2-} , HCl, K_2O i ZnO en detriment principalment del Al_2O_3 i la SiO_2 . L'enriquiment més significatiu del SO_4^{2-} en els dipòsits de gra fi és atribuïble a una major superfície específica disponible per a l'adsorció en comparació amb el material fos, així com amb l'efectivitat de la calç per formar sulfat càlcic. L'adsorció de clor és menys important perquè la seva temperatura de condensació és més baixa.

Les cendres de caldera generalment no contenen tantes substàncies volàtils com les altres cendres que es produeixen posteriorment (les cendres volants, per exemple), perquè les temperatures encara relativament elevades de la caldera limiten la condensació. En cas que es produeixi condensació, es concentra a la superfície de les partícules més fines perquè són les que tenen més superfície específica (Chandler et al., 1997).

Taula I-7. Valors mitjans de concentració d'alguns elements expressats en òxids en els productes de la caldera (Chandler et al., 1997).

Òxids %	<i>partícula</i>	fusió	pol·s
Al ₂ O ₃	14.0	6.41	5.75
SiO ₂	28.1	11.1	12.9
PO ₃	2.36	1.20	1.47
SO ₃	7.25	22.1	26.9
HCl	2.51	11.1	5.44
K ₂ O	3.72	10.3	11.7
CaO	26.7	23.8	18.2
Cr ₂ O ₃	0.64	0.57	0.55
Fe ₂ O ₃	5.2	3.40	5.21
ZnO	2.42	4.80	6.44

Productes dels filtres

Les cendres volants recollides en electrofiltres es presenten en forma de material fi (pulverulent) de color gris o marró a quasi negre (segons la composició i el grau de combustió), sense pràcticament humitat. Dins les cendres volants es poden diferenciar les mateixes cinc tipologies de partícula que apareixen en les cendres de caldera: esferes foses, cristalls, partícules policristal·lines, opaques i material carbonós pirolitzat.

D'entre aquestes tipologies destaquen les esferes foses, partícules de granulometria fina i de composició silicatada. La seva formació és la conseqüència d'un escalfament diferencial del residu per diferents transferències de calor segons el material; partícules silicatades irregulars fines inicien el canvi de l'estructura cristal·lina quan tot just la resta del residu està finalitzant la fase de pèrdua d'humitat. El canvi de morfologia respon a un reajustament energètic: l'acció de la tensió superficial sobre les arestes de la partícula les força a desaparèixer per adquirir una forma esfèrica. Les energies interfacials de les fases presents al sistema, el residu (sòlid), els silicats (líquid) i el vapor, i les relacions que s'estableixen entre sí fan que l'angle de mullada de les gotes de líquid silicatat sigui superior a 90 °C. Es tendeix a formar una esfera amb una àrea interfacial petita perquè aquesta és la configuració d'equilibri que s'ajusta a la mínima energia interfacial total. A l'interior de les esferes s'hi desenvolupen reaccions químiques que poden produir bombolles de gas i donar lloc a esferes buides o cenoses (Raask, 1985).

La composició química de les cendres volants de diverses plantes incineradores europees i americanes es recull a la Taula I-3. Les dades indiquen que els elements majoritaris són pràcticament els mateixos per a tots els residus: Al, Ca, Fe, K, Mg, Na i Si. Altres elements com Cl, S i Zn també són constituents majoritaris, excepte per al cas de les escòries, en les quals es mostren concentracions corresponents a la categoria de minoritaris, entre 1000 i 10000 mg/kg. A grans trets, des del punt de vista composicional, les cendres volants s'assimilen molt més als residus de depuració de gasos que a les escòries. Respecte a aquestes, mostren un clar enriquiment en elements volàtils com Cd, Hg, As, Se, Pb i Zn

(constitueixen material condensat a la superfície de les partícules), així com S i Cl, que es fixen a partir de gasos àcids. S'observa, en contraposició, un cert empobriment en metalls clarament no volàtils com Ni, Cu, Cr o Fe, que tendeixen a acumular-se en les escòries. Val a dir que la composició química de les cendres volants no és homogènia, sinó que varia amb la mida de gra considerada, de manera que les fraccions més fines de les cendres (menys de 200 µm) presenten majors concentracions de Cd, Zn i Pb. La solubilitat en aigua de les cendres volants es pot considerar moderada, d'entre el 20 % i el 25 % en pes (Chandler et al., 1997; Hjelmar, 1996).

La caracterització mineralògica de les cendres volants d'incineradora és un aspecte poc estudiat i encara resten algunes incerteses pel que fa a la identificació de les fases presents. Algunes fases cristal·lines es recullen a la Taula I-8.

Taula I-8. Principals fases cristal·lines presents a les cendres volants segons Henry et al. (1982), Giordano et al. (1983) i Lin et al. (2003).

quars	guix
calcita	bassanita
anhidrita	$KAl(SO_4)_2$
halita	K_2ZnCl_4
silvita	$PbSO_4$
$CaCl_2$	$CaCl_2 \cdot Ca(OH)_2 \cdot H_2O$
gehlenita	espinel·les
microclina	anortita

Productes de la depuració de gasos

En els darrers deu anys les legislacions ambientals s'han tornat molt més restrictives pel que fa a emissions a l'atmosfera, fet que ha afavorit l'aparició de residus fruit de la depuració dels gasos de combustió en quantitats que no deixen d'augmentar.

Es poden classificar com un material pulverulent amb més del 50 % de les partícules amb dimensions per sota de les 80 µm. Les característiques varien en funció de la metodologia utilitzada en la depuració, sigui via seca, semiseca o humida. Les dues primeres són les utilitzades per les plantes incineradores de Catalunya. Les quantitats que s'obtenen en la combustió d'una tona de residu sòlid urbà són extremadament variables. En els residus de depuració via humida els valors són de 2-4 kg de llot sec per tona, als quals cal afegir 5-12 kg de sals solubles per tona per arribar a les quantitats totals. El càlcul en el material residual de les vies seca i semiseca és menys precís i molt més variable perquè els sistemes operen de manera poc estequiomètrica i el residu resultant total depèn de la quantitat de reactius afegits en excés que finalment no han reaccionat. En tot cas, les quantitats esperades són superiors a les resultants de la via humida.

El color és variable i depèn, en el cas dels residus de les vies seca i semiseca, essencialment del contingut de CaO en excés, així com de l'eficiència de la combustió i del contingut en

cendres volants; oscil·la entre gris, marró i negre. El residu obtingut pel procés humit és molt diferent: es presenta com un llot de tractament d'aigües residuals de color marró. Tot i que els continguts d'aigua són molt variables segons la tecnologia utilitzada, els fangs tenen continguts habituals d'entre el 65 % i el 75 % en pes (Chandler et al., 1997).

El rang de composicions químiques habituals d'aquest material es recull a la Taula I-3, on es mostren els rangs de residus de depuració obtinguts per les vies seca i semiseca i dels residus de la via humida. Tots els tipus de residus inclouen la fracció corresponent a les cendres volants.

Els dos elements més abundants són Cl i Ca, seguits de Si, Al, Na, K, S, Zn i Fe. De fet, si es compara els valors dels elements traça dels residus de depuració de gasos amb els de les cendres volants, es pot determinar la gran contribució que suposen les cendres volants a la composició química total, ja que molts d'aquests elements hi estan associats. El Hg n'és una excepció, com es pot detectar per l'enriquiment especialment significatiu en els residus de depuració obtinguts per via humida. L'acumulació del Hg en els residus de depuració de gasos estaria associada a la injecció de Na_2S amb l'objectiu de capturar el Hg i fixar-lo com a HgS. En el cas dels residus de la via humida, el contingut de Cl és bastant més baix perquè no s'acumulen als llots sinó que s'alliberen amb les aigües residuals depurades.

El constituent principal dels residus de depuració de gasos àcids és el CaCl_2 (>60 % de la massa total dels residus de les vies seca i semiseca). Aquest compost confereix al material propietats molt higroscòpiques. Altres productes de les reaccions que tenen lloc durant la depuració dels gasos àcids són CaSO_3 o CaSO_4 , ambdós fruit de la neutralització del SO_2 , així com fluorurs, carbonats i altres sals en poques quantitats. La Taula I-9 mostra algunes de les fases presents en la fracció cristal·lina del residu, moltes de les quals estan relacionades amb el CaCl_2 i amb el reactiu que s'ha afegit en excés, sigui CaO o Ca(OH)_2 .

Taula I-9. Fases cristal·lines presents als residus de depuració de gasos segons Chandler et al. (1997), Braymand et al. (2000) i Abbas et al. (1999).

calcita	KCaCl_3
portlandita	CaClOH
anhidrita	halita
silvita	quars

Com cal esperar de la seva especial composició, els residus generats en la depuració dels gasos àcids presenten solubilitats en aigua molt més elevades que les d'escòries o cendres volants. Les fases més solubles són els productes de les reaccions de neutralització dels gasos àcids, com CaCl_2 , així com els reactius excedents de les reaccions i alguns productes de condensació dels gasos. Una certa proporció dels constituents solubles són metalls traça. Els valors de solubilitat de residus de depuració de gasos per les vies seca i semiseca estan entre el 30 % i el 40 % (Hjelmar, 1996).

I.3.2 APLICACIONS POSSIBLES

Productes del forn: escòries i residu de graelles

Les escòries, almenys a Catalunya i Espanya, principalment s'aboquen en abocadors controlats, però sembla que la tendència actual a tot Europa és implementar polítiques de gestió de residus que en potenciïn la valorització respecte a l'abocament i fomentin l'ús de materials alternatius. Això es tradueix en la introducció –o a considerar la possibilitat d'introduir– taxes d'abocament o fins i tot taxes sobre àrids naturals o inercials per recuperar aquests materials secundaris i potenciar-ne la utilització. D'altra banda, els mateixos productors d'escòries estan interessats en la valorització, ja que l'abocament suposa una despesa molt important per a les plantes incineradores i, per tant, és important trobar una sortida econòmicament viable.

Segons les dades aportades per Wiles (1996), les taxes d'utilització d'escòries d'incineració són variables: pràcticament nul·les al Canadà, 10 % al Japó, 26 % a Suïssa, aproximadament el 50 % a Alemanya, 64 % a França, 72 % a Dinamarca i 95 % a Holanda (Born, 1994).

Les aplicacions més típiques són la construcció de carreteres i terraplens. La dimensió d'alguns terraplens fa necessari que les plantes incineradores que proporcionen el material hagin d'acumular grans quantitats d'escòries. Mank et al. (1991) fan el seguiment d'un terraplè amb 400000 tones d'escòries situats al seu nucli, envoltades d'una capa impermeabilitzant d'una barreja de sorra i bentonita per evitar infiltracions i possibles contaminacions de les aigües subterrànies. Els resultats indiquen que l'aplicació d'escòries no va provocar cap problema mecànic: la compactació no va disminuir malgrat l'ús del terraplè i només es van detectar alguns assentaments marginals.

Algunes carreteres en les quals s'ha experimentat la substitució d'àrids naturals per escòries amb èxit són estudiades per Pihl (1997) i ALTMAT (2001). A Dinamarca el 1993 es va construir una carretera de trànsit intens amb 30 cm de subbase d'escòria d'incineradora. La inspecció es va dur a terme el 1998 i se'n va poder determinar unes bones condicions estructurals, un bon funcionament i molt poques irregularitats, tot i haver sofert l'efecte del gel-desgel. Els tests de lixiviació duts a terme sobre mostres extretes demostren que compleixen els estàndards danesos per a ferms amb una certa impermeabilització superior, però no per a zones sense recobriment. Les inspeccions fetes sobre dos trams a França (Le Mans i La Teste) amb subbase d'escòries no lligades són encara més satisfactòries des del punt de vista mecànic i ambiental, malgrat que fa 20 anys que funcionen amb un trànsit mitjà-intens. En ambdós països es complien amb escreix els límits de contaminació, que es concentraven als primers centímetres de l'esplanada i no arribaven a més profunditat.

Hernández (1985) ja va posar de manifest que és més fàcil que una escòria falli per inestabilitat química que per debilitat mecànica, i detalla el cas de la pavimentació del carrer

Gran Vista de Barcelona amb una subbase de 12 cm d'escòries i un tram amb una secció estructural equivalent però amb àrid natural per a fins comparatius. Després de 3 anys de servei, les deflexions verticals amb biga Benkelman determinades eren molt similars en ambdós casos i molt baixes.

A més de les aplicacions en forma de material granular compactat, una altra alternativa de valorització d'escòries en l'àmbit de la construcció consisteix en l'addició d'un conglomerant hidràulic o lligant bituminós. Atesa la composició aluminosilicatada de les escòries, no és estrany que en principi es considerin molt aptes per utilitzar-les en aplicacions que impliquin l'ús de ciment o betum. La majoria de les aplicacions suposen la substitució d'àrids naturals per escòries en paviments de formigó, però també s'han utilitzat en blocs per a esculleres (Chandler et al., 1997). Cal destacar també la gran quantitat de projectes pilot realitzats amb escòries també lligades, però en forma de mescla bituminosa (Grees et al., 1991; Nonneman et al., 1991; Eymael et al., 1994). En tots els casos se n'ha fet un seguiment i no s'ha detectat cap signe de deteriorament directament relacionable amb l'ús d'escòries.

De fet, generalment en totes les aplicacions realitzades els resultats des del punt de vista mecànic han estat molt satisfactoris. Encara resten, però, moltes incerteses sobre el possible impacte que poden tenir sobre l'entorn, especialment a llarg termini. Les investigacions estan molt més avançades en el camp del comportament geotècnic. En canvi, en l'àmbit dels possibles impactes ambientals que la utilització d'un residu pot suposar, els coneixements es restringeixen als comportaments del material sota condicions de laboratori. Per pal·liar aquesta mancança, s'està començant a treballar amb lisímetres i cambres climàtiques (ALTMAT, 2001). En tot cas, es recomana que les escòries destinades a valoritzacions en la construcció no continguin cap altre tipus de residus, com passa als EUA, on és una pràctica molt habitual –i qüestionada darrerament– barrejar cendres i escòries per formar el que anomenen *cenbra combinada*. La introducció dels altres residus té repercussions directes en la disminució del potencial d'utilització de l'escòria.

Els tractaments són l'alternativa possible quan les escòries incompleixen les especificacions i no poden ser valoritzades de manera directa. Un dels problemes dels tractaments són, òbviament, els alts costos operatius i l'elevada inversió. Els processos de tractament d'interès es poden classificar a grans trets en estabilitzacions, solidificacions i tractaments tèrmics.

La solidificació i estabilització es duen a terme clàssicament amb el ciment com a lligant. Un altre mètode d'estabilització possible és l'addició de PO_4^{3-} soluble. Les fases fosfatades que contenen els metalls pesants mostren una solubilitat significativament més baixa que les fases que es generen en els tractaments amb ciment o calç. L'objectiu és aconseguir formar noves fases menys solubles que immobilitzin els metalls pesants i que siguin més estables geoquímicament en els escenaris en què es produeix la lixiviació. Més de 30 elements poden reaccionar amb el PO_4^{3-} i formar al voltant de 300 minerals que apareixen a la natura. Els estudis dels fosfats metàl·lics que es presenten associats a zones d'oxidació de cert tipus de

dipòsits minerals demostren que aquests compostos són estables respecte al pH, Eh i la diagènesi mineral en condicions superficials. S'aconsegueix reduir la disponibilitat per lixiviar en un 52 % per al Ca, un 98 % per al Cu i un 99 % per al Pb, per exemple (Crannell et al., 2000).

El tractament tèrmic implica la fusió de residus a elevades temperatures des de 1200 °C fins a 1500 °C per transformar-los en vidre (vitrificació). Així es destrueixen ràpidament els components orgànics. La seva limitació és fonamentalment econòmica, ja que és el mètode més car de tots els que s'utilitzen actualment. Nishida et al.(2001) proposa sotmetre les escòries a una fusió a 1400 °C – 1450 °C dins un forn on la fosa s'agita constantment per homogeneïtzar el producte. La fosa es refreda lentament per facilitar la nucleació i el creixement de cristalls i obtenir un material cristal·lí a partir d'escòries amorfes. Els principals cristalls de les roques produïdes són de gehlenita i augita, i sembla que la seva presència inhibeix la lixiviació. El nou producte reté amb molta efectivitat els metalls pesants i presenta molt bones propietats mecàniques, millors que les de l'escòria precursora: més resistència a l'abradió, millor coeficient de neteja, bona capacitat portant, etc.

En la mateixa línia, Suzuki et al. (2001) escalfen una mescla de cendra i escòria que, incorporant-hi alguns reactius, desemboca en una separació de productes diferents: una fosa d'escòria, una fosa de ferro metàl·lic que incorpora amb altres metalls reduïts que són absorbits pel ferro però no per l'escòria fosa i metalls volàtils com cadmi o zenc, així com altres elements com potassi, sodi i clor, que tornen a concentrar a les cendres volants. L'escalfament en atmosfera reductora i amb l'addició d'alguns reactius afavoreix els processos de separació dels metalls; s'obté una fosa de ferro amb la qual altres metalls, com el coure i el crom, tenen molta afinitat. La fosa d'escòria que s'obté està molt empobrida en metalls. L'extracció de les dues foses per separat és possible, de manera que l'escòria pot ser utilitzada en diverses aplicacions sense cap problema ambiental, ja que el contingut en components metàl·lics és extremadament baix, segons aquests autors.

L'objectiu dels experiments presentats per Selinger (1997) és molt similar, però es treballa just per sota del punt de fusió de les escòries, les temperatures es mantenen en el rang de 700 °C a 1065 °C, en el qual es produeixen diversos fenòmens: un creixement de les partícules (processos de sinterització), destrucció de carboni orgànic i formació de noves fases minerals que presenten més estabilitat respecte a la lixiviació. Els efectes d'aquest tractament són, doncs, molt beneficiosos.

Productes de la caldera i dels filtres

Les cendres volants tenen moltes limitacions per ser utilitzades en el sector de la construcció, a causa no tan sols del seu alt contingut en elements potencialment conflictius –especialment els metalls pesants volàtils–, sinó per la seva mobilitat i per la proporció lixiviable de diversos constituents perillosos. Malgrat tot, s'estan investigant alternatives a l'abocament.

Una de les poques aplicacions tolerades arreu d'Europa és la utilització com a fíl·ler (pols mineral) en mescles bituminoses, tot i que aquesta pràctica s'està qüestionant darrerament (Lamers i Born, 1994) i els percentatges de valorització són força baixos. Les legislacions ambientals de molts països classifiquen les cendres volants com a residu perillós. Actualment les investigacions tendeixen a intervenir sobre el producte per millorar-ne la capacitat de retenció dels constituents conflictius mitjançant rentatges, eliminació de PCDD/F (per escalfament), pel·letitzacions, immobilitzacions (encapsulacions o estabilitzacions químiques) en matrius inorgàniques com ciment pòrtland o aluminós, sinteritzacions o vitrificacions (Alba, 1998; Lamers i Born, 1994; Born, 1994).

Productes de la depuració de gasos

Les altes solubilitats en aigua dels residus de depuració de gasos suposen un cert impediment per a les alternatives d'utilització en l'àmbit de la construcció, ja que implicarien degradacions del material i alhora un potencial impacte sobre l'entorn pels considerables alliberaments de sals. Aquest fet s'agreuja en cas que es tracti de sals solubles que continguin metalls pesants.

Considerats també un residu conflictiu, les tècniques de millora en què s'està investigant inclouen també possibles immobilitzacions i vitrificacions (Lamers i Born, 1994).

I.3.3 L'ESCOGRAVA

A Catalunya es coneixen dues empreses dedicades a l'acondicionament de les escòries procedents de la incineració de residus sòlids urbans: Pedreres Rusc (a partir de les escòries d'incineració de Mataró) i VECSA (escòries de Tarragona). Aquestes empreses generen un producte anomenat *Escograva*, controlat per la normativa del Departament de Medi Ambient, mitjançant l'Ordre de 15 de febrer de 1996 sobre valorització d'escòries. Segons aquesta ordre, les escòries d'incineradora valoritzades són aptes per utilitzar a l'obra pública com a material destinat a subbases de carreteres, anivellament de terrenys i terraplenament, rebliments i restauració d'àrees degradades per activitats extractives.

El que es pretén amb aquest tractament postincineració és valoritzar les escòries al nivell tècnic més alt possible i ampliar-ne les aplicacions potencials, mitjançant la millora de la qualitat del producte. En essència, l'escograva és escòria a la qual un processament ha millorat les propietats i l'ha fet esdevenir més apta per a les aplicacions esmentades. Les operacions de tractament són les següents:

- S'han eliminat les partícules molt grans de les escòries mitjançant un garbellament i s'ha triturat el rebuig del garbellament per tornar-lo a incorporar al processament. El tall ha estat de 30-40 mm.
- Se n'ha extret la fracció fèrrica mitjançant separació magnètica.

- Se n'ha extret la fracció metàl·lica no fèrrica mitjançant un sistema de corrents de Foucault (EDDY).
- Se n'han extret els incremats mitjançant una separació per corrents d'aire i s'han tornat al forn.
- S'han deixat madurar durant uns mesos. La maduració suposa un envelliment de l'escòria en piles d'emmagatzematge sotmeses als agents atmosfèrics. Les reaccions químiques que hi tenen lloc beneficien les característiques del producte.

Es realitza un control regular del material amb una incidència especial en els paràmetres ambientals, com el contingut en incremats, la pèrdua al foc o el comportament davant la lixiviació, que s'avalua mitjançant el test DIN 38414-S4. El resultat és un àrid depurat que compleix les especificacions de l'Ordre de valorització d'escòries i que pot ser utilitzat en la construcció.

Les característiques i propietats d'algunes mostres d'escograva generada per les plantes de tractament esmentades es recullen a les Taules I-10 i I-11. Les dades pertanyen a informes realitzats per controlar la qualitat del material que s'està produint.

Taula I-10. Característiques químiques i ambientals d'una mostra d'escograva de Pedreres Rusc.

<i>PEDRERES RUSC, GENER 2001</i>	
Pèrdua entre 105 °C i 500 °C	4.50 %
Incremats	3.00 %
<i>Paràmetres sobre DIN 38414-S4</i>	
Fracció soluble	0.97 %
As	<0.01 mg/L
Cu	0.71 mg/L
Pb	<0.20 mg/L
Cd	<0.02 mg/L
Cr VI	0.06 mg/L
Zn	<0.11 mg/L

Taula I-11. Característiques físiques i geotècniques de mostres d'escograva de Pedreres Rusc i VECSA.

<i>PROPIETATS</i>	<i>RUSC octubre 2001</i>	<i>RUSC valors mitjans</i>	<i>VECSA març 2001</i>	<i>VECSA valors mitjans</i>
Mida màxima nominal mm	20	<40	20	20
Plasticitat	no plàstic	no plàstic	no plàstic	no plàstic
Desgast de Los Angeles %	41.5	35 a 50	32	42
Equivalent de sorra	65	41	58	53
Humitat òptima %	10.1	-	14.8	14.4
Densitat seca màxima Mg/m ³	1.77	1.70	1.72	1.76
Índex CBR %	65	153	24	41

El fet que les seves propietats mecàniques i ambientals estiguin regulades i, per tant, garantides, facilita que s'incorporin al mercat. Així, el nombre d'obres en què s'ha utilitzat és significatiu, i algunes de considerable envergadura, com els terraplens de la Pota Sud (Prat de Llobregat) construïts a principis del 1997 i que suposen gairebé 20000 m³ d'escograva. En

general l'escograva s'ha col·locat en esplanades de pàrquings i deixalleries o camins secundaris amb el vistiplau dels ajuntaments de les poblacions corresponents. Cal destacar també la utilització d'escograva en emplaçaments com la N-II a l'altura de Mataró o a les obres de Diagonal Mar (comunicació personal del responsable de Pedreres Rusc).

I.4 L'APLICACIÓ: L'OBRA CIVIL

Per mantenir els nivells de desenvolupament i de construcció i, alhora, reduir la utilització d'àrids naturals, hi ha dues opcions principals: optimitzar l'ús de materials naturals i/o utilitzar materials alternatius. Aquestes dues possibilitats no són excloents, sinó que s'haurien d'aplicar de manera simultània.

Una de les aplicacions potencials que es considera, atès que les escòries es presenten com un material granular i compactable, és la substitució d'àrids naturals en l'àmbit de l'obra civil. El gran volum d'escòries produïdes requereix una gestió o una disposició i podrien ser reciclades completament en aquest sector per les seves propietats mecàniques.

La quantitat d'àrids utilitzats anualment pel sector de l'enginyeria civil és molt gran i comporta pèrdues considerables dels recursos naturals i la degradació del medi ambient. La utilització de les escòries en el camp de l'enginyeria civil reemplaçant materials naturals suposaria molts beneficis:

- Es valoritzaria i es reutilitzaria un subproducte que d'una altra manera seria disposat com un residu, s'eliminaria la problemàtica de l'emplaçament d'aquesta matèria i s'allargaria la vida dels abocadors. S'evitaria el creixement de piles d'escòries i fins i tot es podrien fer desaparèixer aquestes piles utilitzant el material emmagatzemat.
- Es contribuiria –encara que de manera modesta, perquè la producció d'escòries és massa limitada per reemplaçar tot el consum de material natural– a reduir l'extracció de recursos naturals finits, ja que es consumirien menys àrids naturals i es reduiria l'impacte ambiental que produeixen les extraccions d'àrids. Una disminució de l'activitat a les pedreres repercuteix en una disminució del soroll, de la pols i del consum de territori.

I.4.1 LA CONSTRUCCIÓ DE CARRETERES

El sector de la construcció de carreteres és un dels majors consumidors d'àrids naturals, principalment sorra, grava i material de pedrera. Estudis recents han demostrat que a tot Europa el consum d'àrids de pedrera i de gravera en capes no lligades del ferm és d'uns 750 milions de tones per any (CoURAgE, 1999). A partir d'aquest valor es pot fer una estimació d'un consum total anual d'àrids en carreteres del voltant d'un bilió de tones a

Europa (Hill et al., 2001). En molt països els productes bituminosos o el formigó són els materials més importants en els ferms de les carreteres amb trànsit més pesant, però en trànsits més moderats s'utilitzen freqüentment capes granulars. En carreteres rurals, el ferm inclou un tot-u cobert només amb una capa superficial molt prima.

La major part dels ferms de carreteres construïts majoritàriament amb materials no lligats suporten només nivells de trànsit moderats a lleugers, però la seva importància rau en el fet que representen una proporció molt gran del total de la xarxa viària (ALTMAT, 2001). En efecte, una gran part dels ferms de les carreteres d'Europa consisteixen en una mescla bituminosa que cobreix les capes estructurals de material granular no lligat, que suposen, com a valor mitjà, més del 75 % d'aquests ferms (CoURAgE, 1999). Aquesta configuració correspondria a un ferm de tipus flexible (vegeu la Figura I-11).

A grans trets, un ferm flexible consisteix en capes granulars no lligades, sobre les quals se situa un paviment bituminós de menys de 15 cm de gruix (altrament es tractaria d'un ferm semiflexible).

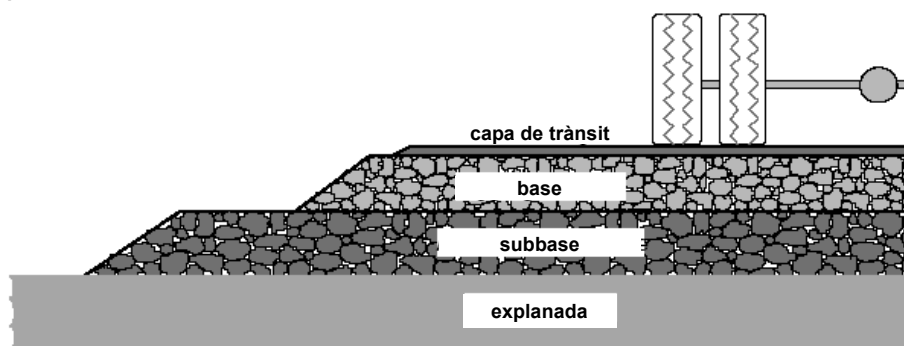


Figura I-11. Esquema del perfil d'un ferm flexible (CoURAgE, 1999).

En molts països europeus només la partícula més alta del ferm, els 80-100 mm més superficials, està fet de mescles bituminoses. La resta, amb un gruix que pot oscil·lar entre 300 i 1500 mm, és material granular no lligat (CoURAgE, 1999). A Espanya les xifres són similars i els gruixos depenen del nivell de trànsit i de la categoria de l'esplanada. En esplanades bones (categoria E3) i per a trànsits pesants intensos (T00, T0, T1 i T2) el gruix mínim de tot-u artificial estipulat per la Norma 6.1-IC *Seccions de ferm* de la Instrucció de Carreteres (Ordre FOM/3460/2003) és de 25 cm. Prenent una amplada del vial d'uns 6 m i una densitat de compactació de 2100 kg/m^3 , aquestes dades equivalen a una quantitat d'aproximadament 3000 tones d'àrids per quilòmetre de carretera. En cas que l'esplanada sigui de mala qualitat (E1), la quantitat gairebé es duplica perquè cal augmentar el gruix de les capes granulars.

Les dades sobre el consum de recursos naturals en l'àmbit de la construcció de carreteres són, doncs, prou significatius per justificar un estudi en profunditat sobre la viabilitat del reemplaçament dels àrids naturals que conformen les capes granulars del ferm per àrids alternatius com les escòries.

L'esquema de la Figura I-11 no és l'única configuració possible en què s'utilitzin materials granulars no lligats. De fet, les combinacions d'unitats d'obra són nombroses i estan recollides a la gamma de solucions proposades per la Instrucció de Carreteres a la Norma 6.1-IC. Les seccions estructurals es classifiquen segons les categories de l'esplanada i del trànsit. Per a trànsits moderats a intensos les capes granulars intervenen en algunes configuracions possibles de fermes juntament amb mesclades bituminoses; constitueixen fermes flexibles de gruix de tot-u d'entre 25 i 40 cm segons l'esplanada. Però el tot-u no és una unitat d'obra exclusiva de fermes flexibles, sinó que es pot combinar amb formigó vibrat, especialment en trànsits més lleugers (T32 a T42). L'elecció de la secció més adequada la fa el projectista seguint criteris tècnics i econòmics.

Els materials de cada unitat d'obra estan subjectes a unes especificacions concretes, ja que cada capa requereix un material amb unes propietats físiques i mecàniques específiques segons la funció que ha de desenvolupar en l'estructura del ferm. Els requeriments són definits pel Plec de prescripcions tècniques generals per a obres de carreteres i ponts (PG-3), concretament l'article 510 sobre tot-u, la darrera modificació del qual és l'Ordre FOM/891/2004.

En general, les especificacions en matèria de construcció de carreteres són més restrictives i exigents pel que fa als aspectes mecànics dels materials que conformaran les capes més superiors del ferm, atès que estan dissenyades per suportar i experimentar tensions més elevades. Es tendeix a utilitzar materials amb una resistència decreixent en profunditat anàlogament a la disminució de les tensions transmises des de la superfície, ja que les càrregues ja arriben esmorteïdes. En principi un material de molta qualitat no s'hauria d'utilitzar on un àrid d'una qualitat menor pot demostrar un rendiment igual de satisfactori, però des d'un punt de vista mecànic i estructural, els materials alternatius com les escòries haurien de ser utilitzats sempre que la integritat estructural del ferm resultant no quedi compromesa.

Consideracions de tipus econòmic, ambiental, energètic i d'eventual escassetat d'àrids naturals en les proximitats de l'obra poden conduir a la utilització d'àrids artificials. Cada cop s'imposa per raons ambientals i econòmiques la necessitat d'aprofitar els materials locals. Amb estudis especials i tractaments especials, hi ha la possibilitat d'emprar aquests àrids, almenys en carreteres secundàries.

I.4.2 LIMITACIONS DE LA VALORITZACIÓ

Hi ha encara diversos aspectes que dificulten la utilització de les escòries d'incineració de residus urbans en el camp de la construcció de manera generalitzada. A Europa les escòries s'han utilitzat de forma puntual com a substitut d'àrids naturals en la construcció de carreteres i terraplens des de fa uns 20 anys (ALTMAT, 2001). El seu ús, però, encara és molt

reduït i local, a causa de certs impediments que dificulten la generalització de la seva valorització i l'acceptació de les possibles aplicacions.

Factors econòmics com el transport i el tractament encara limiten l'ús de materials alternatius, particularment en països amb grans reserves d'àrids naturals. En zones d'Europa on els àrids naturals estan fàcilment disponibles, l'ús de subproductes als quals s'ha d'aplicar un cert processament no és econòmic. En altres llocs el factor dominant són els costos de transport i s'utilitzen només a prop de la font de producció.

D'altra banda, encara hi ha la percepció que materials alternatius com les escòries, sent residus i no provenint de fonts convencionals, són, per tant, de categoria inferior. La gran variabilitat amb què es presenten n'agreuja la poca acceptació i posa en relleu el desconeixement del material.

Des del punt de vista de funcionament mecànic, encara resten algunes incerteses, especialment respecte al funcionament a llarg termini. La naturalesa i la composició de les escòries són significativament diferents de les dels materials convencionals, però les especificacions tècniques utilitzen els mateixos procediments d'assaig per a materials naturals i alternatius, i de moment els materials alternatius són avaluats segons els materials naturals als quals s'assemblen més. Hi ha, per tant, alguns aspectes físics i mecànics que queden descuidats o no valorats suficientment. Però les potencials conseqüències ambientals que pot comportar l'ús de les escòries i, en definitiva, dels materials alternatius constitueixen l'obstacle més gran. Les preocupacions sobre el potencial impacte ambiental de les escòries, principalment per la lixiviació de contaminants, són un impediment per al seu reconeixement com a material valoritzable. Tot i que la utilització comporta molts beneficis ambientals, hi ha la preocupació que puguin alliberar certs constituents que contaminin les aigües superficials i subterrànies, en definitiva, tot l'entorn de l'escenari d'aplicació.

Tot i que hi ha regulacions establertes que pretenen normalitzar la valorització d'escòries, els contractistes i els projectistes encara tenen moltes reticències a proposar-ne l'ús, ja que la incertesa que les envolta fa no s'arrisquin. Resulta necessari, doncs, fer un estudi exhaustiu de les característiques físiques, químiques, mineralògiques, mecàniques i ambientals de les escòries per garantir que la utilització es durà a terme de manera tècnica i ambientalment correcta. La idoneïtat de les escòries s'ha d'avaluar en funció dels requeriments físics i mecànics necessaris, les qüestions ambientals i les consideracions econòmiques.

I.5 MARC LEGISLATIU

Cal contemplar les escòries des de tres perspectives diferents pel que fa als aspectes legislatius que ara com ara defineixen les pautes que cal seguir per valoritzar-les:

- Com a residu industrial generat: Catàleg de Residus de Catalunya i Catàleg Europeu de Residus (Agència de Residus de Catalunya, 2004).
- Com a residu industrial valoritzable: Ordre de 15 de febrer de 1996, sobre valorització d'escòries (Departament de Medi Ambient, 1996).
- Com a material granular per a la construcció de carreteres: Article 510 "Zahorras" (tot-u), del Plec de prescripcions tècniques generals per a obres de carreteres i ponts (d'ara endavant PG-3/2004).

I.5.1 CLASSIFICACIÓ COM A RESIDU

El Catàleg de Residus de Catalunya i el Catàleg Europeu de Residus no només codifiquen i classifiquen els residus en funció de les seves característiques i el seu origen, sinó que també orienten sobre la correcta gestió de cada un. La valorització és la forma de gestió prioritària, i els dos catàlegs proposen, en cas de ser possible, les diferents opcions de valorització que l'esmentat residu pot tenir, ja sigui comercialització, reutilització o reciclatge. També indiquen quins són els sistemes òptims de tractament i de disposició del rebuig per a cada residu, ordenant de més a menys segons l'aplicació òptima. En el cas de les escòries d'incineració de residus urbans, així com dels altres residus que es generen en els diferents processos que integren la incineració, la seva classificació segons el Catàleg de Residus de Catalunya es recull a la Taula I-12, i la classificació segons el Catàleg Europeu de Residus, que és lleugerament diferent, es detalla a la Taula I-13.

Taula I-12. Classificació de les escòries segons el Catàleg de Residus de Catalunya. CLA: classificació del residu en inert, especial, no especial. VAL: vies de valorització. TDR: tractament i disposició del rebuig.

19 RESIDUS D'INSTAL·LACIONS TRACTADORES DE RESIDUS I DE PLANTES DE TRACTAMENT D'AIGÜES I D'AIGÜES RESIDUALS				
1901 RESIDUS D'INCINERACIÓ				
DESCRIPCIÓ	ORIGEN	CLA	VAL	TDR
Escòries i cendres no volants	Forn	no especial	V71 V84	T12
Materials metàl·lics separats de les cendres i escòries del fons del forn	Forn	inert	V41	T12
Pols i cendres volants	Filtració de gasos	especial	-	T13/T33
Residus líquids de tractament de gasos	Depuració i rentatge de gasos	especial	-	T31
Llots i residus sòlids de tractament de gasos	Depuració dels gasos	especial	-	T13/T33
Catalitzadors usats (p. ex., procedents de l'eliminació de NOx)	Catalització per destruir productes tòxics	no especial	V48	-
Carbó actiu usat procedent de tractament de gasos	Adsorció i esgotament del material	especial	V47	T21 T13
Llots de tractament d'efluents (pretractaments, depuradores)	Tractament dels efluents	especial	-	T12 T33
Residus no especificats anteriorment	-	-	-	-

V41: reciclatge i recuperació de metalls o compostos metàl·lics; V47: regeneració de productes que serveixen per captar contaminants; V48: recuperació de catalitzadors; V71: utilització en la construcció; V84: rebliment de terrenys (restauració d'activitats extractives); T12: deposició de residus no especials; T13: deposició de residus especials; T31: tractament fisicoquímic i biològic; T33: estabilització; T21: incineració de residus no halogenats

Taula I-13. Classificació de les escòries d'incineració de residus urbans segons el Catàleg Europeu de Residus. CLA: classificació del residu en inert, especial, no especial. VAL: vies de valorització. TDR: tractament i disposició del rebuig.

19 RESIDUS DE LES INSTAL·LACIONS PER AL TRACTAMENT DE RESIDUS DE LES PLANTES EXTERNES DE TRACTAMENT D'AIGÜES RESIDUALS I DE LA PREPARACIÓ D'AIGUA PER A CONSUM HUMÀ I D'AIGUA PER A ÚS INDUSTRIAL

1901 - Residus de la incineració o piròlisi de residus

Materials ferris separats de la cendra de fons de forn	no especial	V41	T12
Tortó de filtració del tractament de gasos	especial	-	T33 T13
Residus líquids aquosos del tractament de gasos i altres residus líquids aquosos	especial	-	T31
Residus sòlids del tractament de gasos	especial	-	T33 T13
Carbó actiu usat procedent del tractament de gasos	especial	V47	T21 T13
Cendres de fons de forn i escòries que contenen substàncies perilloses	especial	-	T33 T13
Cendres de fons de forn i escòries diferents de les especificades en el codi 190111	no especial	V71 V84	T12
Cendra volant que conté substàncies perilloses	especial	-	T33 T13
Cendra volant diferent de l'especificada en el codi 190113	no especial	-	T33 T12
Pols de caldera que conté substàncies perilloses	especial	-	T33 T13
Pols de caldera diferent de l'especificada en el codi 190115	no especial	-	T33 T12
Residus de piròlisi que contenen substàncies perilloses	especial	-	T33 T13
Residus de piròlisi diferents dels especificats en el codi 190117	no especial	-	T33 T12
Sorra de llits fluiditzat	no especial	-	T33 T12
Residus no especificats en cap altra categoria	no especial	-	-

V41: reciclatge i recuperació de metalls o compostos metàl·lics; V47: regeneració de productes que serveixen per captar contaminants; V71: utilització en la construcció; V84: rebliment de terrenys (restauració d'activitats extractives); T12: deposició de residus no especials; T13: deposició de residus especials; T31: tractament fisicoquímic i biològic; T33: estabilització; T21: incineració de residus no halogenats

En ambdós catàlegs les opcions de valorització proposades per a les escòries són la V71 "Utilització en la construcció" i la V84 "Utilització per a rebliment de terrenys" (restauració d'activitats extractives). Pel que fa a la deposició, es proposa l'opció T-12 "Deposició de residus no especials", com correspon a la naturalesa del material. No es considera un residu perillós, ja que no està inclòs en la Llista de residus perillosos. Es tracta, doncs, d'un residu no especial.

I.5.2 LEGISLACIÓ EN MATÈRIA DE MEDI AMBIENT

El possible reaprofitament de les escòries de residus sòlids urbans està regulat per l'Ordre de 15 de febrer de 1996, sobre valorització d'escòries, del Departament de Medi Ambient (Departament de Medi Ambient, 1996).

Segons la composició química, així com pel seu comportament davant el test de lixiviació, aquesta Ordre classifica les escòries en:

- Escòries valoritzables: són aquelles escòries que compleixen les característiques especificades a l'annex 1 de l'Ordre.

- Escòries no valoritzables: són aquelles que no compleixen alguna de les característiques especificades a l'annex 1. Aquestes escòries han de ser gestionades a través d'un abocador degudament autoritzat d'acord amb la seva classificació segons la normativa vigent.

En l'annex 1 esmentat es detallen els paràmetres i els valors admissibles per valorar la possibilitat d'utilització d'escòries. Les escòries seran valoritzables quan no sobrepassin els valors indicats a la Taula I-14.

Taula I-14. Valors màxims admissibles segons l'Ordre de 15 de febrer de 1996 sobre valorització d'escòries.

Paràmetres a determinar sobre els llixiviats d'escòries segons el test DIN 38414-S4		Paràmetres a determinar sobre la mostra sòlida	
<i>element</i>	<i>concentració límit</i>	<i>paràmetre</i>	<i>valor límit</i>
As	0.1 mg/L	Pèrdua 105 °C / 500 °C	5 %
Cd	0.1 mg/L	Incrementats	5 %
Cu	2 mg/L	Fracció soluble	3 %
Cr	0.1 mg/L		
Pb	0.5 mg/L		
Zn	2 mg/L		

DIN 38414-S4 test de llixiviació a una relació líquid/sòlid de 10 mL/g de mostra, 24 h d'agitació, sense control de pH

Les escòries valoritzables podran ser utilitzades per a les següents finalitats, d'acord amb les especificacions de l'Ordre sobre valorització d'escòries: subbase de carreteres, anivellaments de terreny i terraplenament, rebliments i restauració d'àrees degradades per activitats extractives, i altres que siguin autoritzades per la Junta de Residus.

L'Ordre estableix algunes condicions per a la seva utilització, de manera que totes les possibles aplicacions de les escòries han de tenir en compte les prohibicions següents:

- No s'utilitzaran en zones inundables.
- No s'utilitzaran a menys de 30 m de distància de rius ni de torrents.
- No s'utilitzaran en terrenys que tinguin el nivell freàtic a menys de 5 m de la superfície del sòl.
- No s'utilitzaran a menys de 100 m de distància de cap explotació d'aigües subterrànies per a abastaments d'aigua potable a poblacions. Si hi ha pous d'abastament dintre del seu radi d'influència que puguin quedar afectats, caldrà un estudi del seu comportament potencial per a la seva autorització.
- Les escòries no es podran emprar en zones amb importants guixos dels materials següents:
 - Materials consolidats amb elevada permeabilitat per carstificació o per intensa fissuració.
 - Materials porosos no consolidats com ara dipòsits al·luvials i planes costaneres actuals, terrasses i dipòsits al·luvials antics poc cimentats.
 - Capes d'alteració superficial de materials originalment poc permeables.

L'Ordre també estableix certes limitacions per a cada una de les aplicacions proposades. En el cas de la utilització d'escòries com a subbase de carreteres, és necessari que la capa d'escòries utilitzada no sobrepassi un gruix de 50 cm i que la carretera tingui una capa mescla bituminosa en superfície.

I.5.3 LEGISLACIÓ EN MATÈRIA DE CARRETERES

Si es preveu la possibilitat d'utilitzar les escòries en alguna de les unitats d'obra que constitueixen el ferm, han de complir la mateixa normativa que els materials als quals pretenen substituir, a falta de normativa específica.

Les especificacions sobre tot-u vigents actualment són les que apareixen a l'article 510 sobre tot-u ("Zahorras") del PG-3, article que ha estat recentment actualitzat mitjançant l'Ordre FOM/891/2004, d'1 de març, per la qual es deroguen els anteriors articles 500 (tot-u natural) i 501 (tot-u artificial). Una de les novetats que presenta aquesta unitat d'obra és la possibilitat d'incorporar nous materials en substitució dels àrids naturals en fermes sotmesos a categories de trànsit pesant T2 a T4, és a dir, de moderat a lleuger. Es preveu la utilització de materials granulars reciclats, àrids siderúrgics, subproductes i productes inerts de rebuig, sempre que les condicions de tractament i aplicació estiguin fixades expressament al Plec de prescripcions tècniques particulars, on també es poden recollir especificacions tècniques addicionals. Es requereix demostrar que, en cas d'utilitzar materials no convencionals, no es produiran dissolucions o lixiviacions que puguin contaminar o malmetre estructures o altres capes del ferm.

Tant per a tot-u natural com per a tot-u artificial, es tracti d'àrids convencionals o de subproductes, els materials han de complir unes condicions mínimes. S'exigeix una certa forma mesurada a partir de l'índex de plaques i les cares de fractura, una duresa mínima mesurada amb el coeficient de Los Angeles, un grau de neteja avaluat mitjançant el coeficient de neteja i l'equivalent de sorra i una plasticitat nul·la o en algun cas menor a certs valors. Es regula també la quantitat total de sofre, especialment important en aquells casos en què el tot-u pot entrar en contacte amb capes tractades amb ciment, ja que els sulfats en presència de ciment pòrtland convencional poden comportar problemes de durabilitat amb la consegüent degradació del ferm. Els valors límits d'aquests requeriments es detallen a la Taula I-15.

La granulometria del material ha d'estar compresa en un dels diversos fusos proposats, representats a la Figura I-12. Dos d'aquests, ZN20 i ZA20, apareixen en negreta perquè són els que més s'adapten a la granulometria de les escòries. La denominació ZN i ZA indica si es tracta de fus de tot-u natural o de tot-u artificial, respectivament; aquest darrer és més

restrictiu. El número que l'acompanya fa referència a la mida màxima nominal del material, entesa com l'obertura del primer tamís que reté més d'un 10 % en pes.

Taula I-15. Prescripcions recollides a l'article 510 del PG-3/2004.

	TOT-U NATURAL	TOT-U ARTIFICIAL
Contingut total de S		<1%
	<0.5% si contacte en capes lligades	
Partícules grosses fracturades %	-	100 (T00 T0) >75 (T1 T2) >50 (T3 T4)
Índex de plaques %	-	<35
Desgast Los Angeles %	<35-40 (T00 a T2) <40-45 (T3 T4)	<30 (T00 a T2) <35 (T3 T4)
Coefficient de neteja %	-	<2
Equivalent de sorra	-	>40 (T00 a T1) >35 (T2 a T4, vorals T00 a T2) >30 (vorals T3 a T4)
Plasticitat	NP (T00 a T3) LL<25 IP<6 (T4)	NP

NP: no plàstic

LL: límit líquid

IP: índex de plasticitat

T0 a T1: categories de trànsit pesant de molt intens (00) a intens (1)

T2 a T4: categories de trànsit pesant de moderat (2) a lleuger (4)

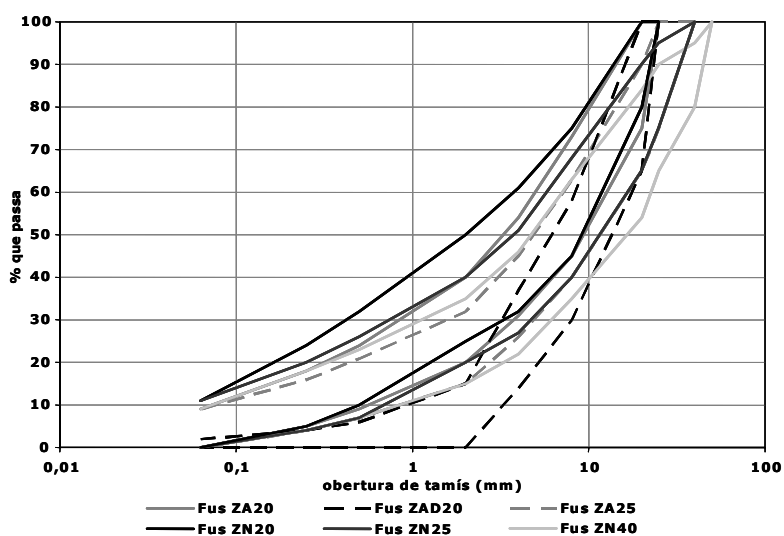


Figura I-12. Representació gràfica dels fusos per a tot-u segons el PG-3/2004.

La darrera modificació de l'Article 510 sobre tot-u del PG-3/2004 és particularment permissiva en el valor del coeficient de Los Angeles en cas d'utilitzar residus, i accepta per a tot-u natural en alguns casos valors fins a 10 punts per sobre dels estipulats per a tot-u artificial segons la Taula I-15.