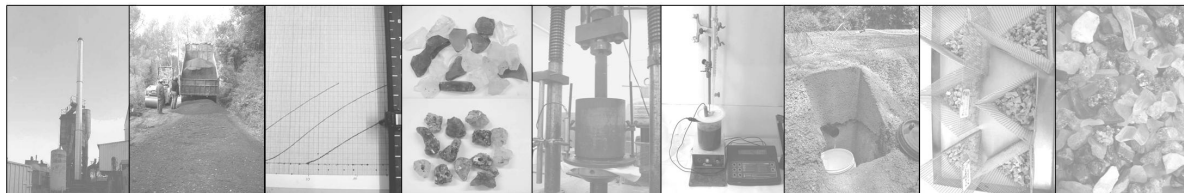




UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE CAMINS, CANALS I PORTS DE BARCELONA
Departament d'Enginyeria de la Construcció

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
INSTITUT DE CIÈNCIES DE LA TERRA "JAUME ALMERA"



Valorització d'escòries d'incineració de residus sòlids urbans en capes granulars del ferm

Aplicació al tram experimental de Tagamanent

Tesi Doctoral presentada per

Maria Izquierdo Ramonet

Per optar al grau de Doctora en Ciències

Directors

Xavier Querol Carceller
Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera"
CSIC

Enric Vázquez Ramonich
Departament d'Enginyeria de la Construcció
UPC

Barcelona, gener del 2005



Aquesta tesi s'ha desenvolupat gràcies al finançament rebut del projecte "Valorització i gestió integrada d'escòries i altres residus inorgànics de processos tèrmics per a la seva aplicació en la construcció", un projecte CIRIT-Medi Ambient que ha comptat amb la participació de l'ACEVERSU. La part experimental s'ha dut a terme a l'Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera" (CSIC) i al Departament d'Enginyeria de la Construcció (UPC).

La construcció del tram experimental de Tagamanent s'emmarca dins l'estudi de pavimentació econòmica i ecològica de camins rurals, promogut pel Departament de Política Territorial i Obres Públiques de la Generalitat i l'ITeC, i gràcies a la col·laboració amb diverses entitats.

Index

| | |
|-----------------|------|
| Agraïments..... | i |
| Resum | v |
| Resumen..... | ix |
| Abstract | xiii |

| | |
|--|-----------|
| I. Introducció | 1 |
| I.1 L'origen: els residus sòlids urbans | 2 |
| I.2 El procés: la incineració a Catalunya | 4 |
| I.2.1 Parts d'una planta incineradora | 4 |
| I.2.2 Mecanismes de generació dels subproductes | 6 |
| I.2.3 Característiques de les plantes incineradores | 10 |
| I.2.4 Situació actual de la incineració a Catalunya | 13 |
| I.2.5 El futur de la incineració a Catalunya | 15 |
| I.3 Els subproductes de combustió | 16 |
| I.3.1 Característiques | 16 |
| I.3.2 Aplicacions possibles | 28 |
| I.3.3 L'Escograva | 31 |
| I.4 L'aplicació: l'obra civil | 33 |
| I.4.1 La construcció de carreteres | 33 |
| I.4.2 Limitacions de la valorització | 35 |
| I.5 Marc legislatiu | 36 |
| I.5.1 Classificació com a residu | 37 |
| I.5.2 Legislació en matèria de medi ambient | 38 |
| I.5.3 Legislació en matèria de carreteres | 40 |
| II. Objectius | 43 |
| III. Metodologia | 45 |
| III.1 Estudi de les incineradores | 45 |
| III.2 Fase experimental al laboratori | 45 |
| III.2.1 Materials | 45 |
| III.2.1.1 Estudi preliminar de les escòries de totes les plantes incineradores de Catalunya | 45 |

| | | |
|---|---|------------|
| III.2.1.2 | Estudi exhaustiu de les escòries de les plantes de Tarragona, Mataró i Sant Adrià | 47 |
| III.2.2 | Mètodes..... | 51 |
| III.2.2.1 | Propietats de les partícules | 53 |
| III.2.2.2 | Propietats relacionades amb el procés de producció | 60 |
| III.2.2.3 | Propietats del material en l'aplicació..... | 63 |
| III.3 | Fase experimental al camp | 66 |
| III.3.1 | Característiques del tram experimental..... | 67 |
| III.3.2 | Execució de l'obra | 69 |
| III.3.3 | Seguiment | 77 |
| III.3.4 | Extracció de testimonis..... | 78 |
| III.4 | Valoració de l'aplicació proposada des de les perspectives mecànica i ambiental..... | 79 |
| IV. Caracterització física, química i mineralògica | | 81 |
| IV.1 | Propietats físiques de les escòries | 81 |
| IV.1.1 | Consideracions generals del mostreig..... | 81 |
| IV.1.2 | Granulometria..... | 82 |
| IV.1.3 | Identificació i quantificació dels constituents (materialogia) | 87 |
| IV.1.3.1 | Vidre d'origen domèstic | 88 |
| IV.1.3.2 | Material ceràmic i àrids..... | 91 |
| IV.1.3.3 | Components metàl·lics..... | 93 |
| IV.1.3.4 | Material combustible | 95 |
| IV.1.3.5 | Productes de fusió..... | 97 |
| IV.1.3.6 | Proporcions dels constituents a la fracció >2 mm | 100 |
| IV.1.4 | Estudi qualitatiu de les fraccions fines | 102 |
| IV.1.5 | Densitats de les escòries | 108 |
| IV.1.5.1 | Densitats de les fraccions sorra i grava de les escòries..... | 109 |
| IV.1.5.2 | Densitat dels productes de fusió..... | 111 |
| IV.1.5.3 | Variabilitat temporal de les densitats de les escòries..... | 112 |
| IV.1.5.4 | Comparació amb altres escòries d'incineració i altres àrids | 113 |
| IV.1.6 | Capacitat d'absorció d'aigua | 115 |
| IV.1.6.1 | Fraccions sorra i grava de les escòries | 115 |
| IV.1.6.2 | Variabilitat temporal de les capacitats d'absorció de les escòries .. | 116 |
| IV.1.6.3 | Comparació amb altres escòries d'incineració i altres àrids | 116 |
| IV.2 | Caracterització química..... | 118 |
| IV.2.1 | Consideracions respecte a la metodologia..... | 119 |
| IV.2.2 | Composició química de les escòries..... | 121 |
| IV.2.2.1 | Elements majoritaris | 123 |
| IV.2.2.2 | Elements minoritaris..... | 126 |
| IV.2.2.3 | Elements traça | 129 |
| IV.2.3 | Distribució dels elements en funció de la mida de partícula | 131 |
| IV.2.3.1 | Consideracions sobre la metodologia | 131 |
| IV.2.3.2 | Escòries de totes les plantes incineradores (any 2000) | 132 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| IV.2.3.3 | Escòries de Tarragona, Mataró i Sant Adrià (any 2001) | 136 |
| IV.2.4 | Composició química dels productes de fusió | 139 |
| IV.2.5 | Comparació entre les escòries i altres materials naturals | 141 |
| IV.3 | Caracterització mineralògica | 143 |
| IV.3.1 | Consideracions sobre la metodologia | 143 |
| IV.3.2 | Especiació dels elements: mineralogia de les escòries | 144 |
| IV.3.2.1 | Fracció vítria | 145 |
| IV.3.2.2 | Fracció cristal·lina | 146 |
| IV.3.3 | Distribució de les fases en funció de la mida de partícula | 151 |
| IV.3.4 | Influència de la maduració | 155 |
| IV.3.5 | Diferències entre escòries segons la procedència | 159 |
| IV.3.6 | Mineralogia dels productes de fusió | 160 |
| IV.4 | Conclusions | 161 |
| IV.4.1 | Propietats físiques | 161 |
| IV.4.2 | Caracterització química | 164 |
| IV.4.3 | Caracterització mineralògica | 166 |

V. Comportament mecànic **169**

| | | |
|------------|--|------------|
| V.1 | Geometria de les partícules | 170 |
| V.1.1 | Forma: índex de plaques | 170 |
| V.1.2 | Angulositat: cares de fractura | 173 |
| V.1.3 | Conclusions | 174 |
| V.2 | Durabilitat | 175 |
| V.2.1 | Resistència al desgast: coeficient de Los Angeles | 175 |
| V.2.2 | Resistència al gel-desgel: assaig de sulfat de magnesi | 178 |
| V.2.3 | Estabilitat volumètrica I: expansivitat per hidratació de fases | 180 |
| V.2.4 | Estabilitat volumètrica II: patologies derivades de sulfats i clorurs solubles | 181 |
| V.2.5 | Conclusions | 183 |
| V.3 | Propietats relacionades amb el procés de producció | 184 |
| V.3.1 | Plasticitat: límits d'Atterberg | 184 |
| V.3.2 | Neteja: coeficient de neteja i equivalent de sorra | 185 |
| V.3.3 | Qualitat del procés: pèrdua al foc a 500 °C | 186 |
| V.3.4 | Volum: densitat aparent | 187 |
| V.3.5 | Conclusions | 188 |
| V.4 | Comportament de les escòries en l'aplicació proposada | 189 |
| V.4.1 | Compactabilitat: compactació Proctor | 189 |
| V.4.1.1 | Corbes Proctor, densitats seques màximes i humitats òptimes | 189 |
| V.4.1.2 | Control de la compactació mitjançant la porositat | 192 |
| V.4.1.3 | Aspectes metodològics | 193 |
| V.4.1.4 | Degradació | 195 |
| V.4.2 | Capacitat portant: índex CBR | 196 |
| V.4.2.1 | Índexs CBR | 196 |
| V.4.2.2 | Inflaments | 198 |

| | | |
|------------|---|------------|
| V.4.2.3 | Evolució temporal..... | 198 |
| V.4.3 | Permeabilitat | 200 |
| V.4.4 | Conclusions | 201 |
| V.5 | Conclusions i recomanacions | 202 |
| V.5.1 | Qüestions generals i metodològiques | 202 |
| V.5.2 | Comportament..... | 204 |
| V.5.3 | Recomanacions | 207 |
| V.5.4 | Aplicacions addicionals | 208 |

VI. Lixiviació al laboratori **211**

| | | |
|-------------|---|------------|
| VI.1 | Escòries de totes les plantes: DIN 38414..... | 212 |
| VI.1.1 | Lixiviats de les escòries tot-u | 212 |
| VI.1.1.1 | Conductivitat i pH | 212 |
| VI.1.1.2 | Composició química..... | 212 |
| VI.1.2 | Influència de la mida de partícula en la lixiviació segons DIN 38414 | 216 |
| VI.1.2.1 | Conductivitat i pH | 216 |
| VI.1.2.2 | Composició química..... | 218 |
| VI.2 | Escòries de Tarragona, Mataró i Sant Adrià: altres tests de lixiviació | 220 |
| VI.2.1 | Test de disponibilitat: NEN 7341 | 220 |
| VI.2.1.1 | Conductivitat, pH i capacitat de neutralització àcida | 220 |
| VI.2.1.2 | Composició química..... | 221 |
| VI.2.2 | Test CEN 12457-2 | 227 |
| VI.2.2.1 | Conductivitat, pH i fracció soluble | 228 |
| VI.2.2.2 | Composició química..... | 230 |
| VI.2.2.3 | Influència de la mida de partícula en la lixiviació segons CEN 12457-2 | 236 |
| VI.2.3 | Test CEN 12457-3 | 240 |
| VI.2.3.1 | Conductivitat i pH | 241 |
| VI.2.3.2 | Composició química..... | 242 |
| VI.2.4 | Integració de les dades de lixiviació dels tests CEN i NEN | 245 |
| VI.2.5 | Comparació amb la legislació ambiental holandesa | 254 |
| VI.2.5.1 | Consideracions prèvies | 254 |
| VI.2.5.2 | Aplicació del DMC a les escòries de Tarragona, Mataró i Sant Adrià | 258 |
| VI.3 | Conclusions i recomanacions | 262 |

VII. Lixiviació al camp **269**

| | | |
|--------------|--|------------|
| VII.1 | Observacions de camp | 270 |
| VII.2 | Característiques dels lixiviats | 271 |
| VII.2.1 | Sot sud escòries tot-u..... | 272 |
| VII.2.1.1 | Conductivitat i pH | 273 |
| VII.2.1.2 | Composició química..... | 273 |

| | | |
|--|---|------------|
| VII.2.2 | Sot nord d'escòries tot-u | 277 |
| VII.2.2.1 | Conductivitat i pH | 277 |
| VII.2.2.2 | Composició química..... | 278 |
| VII.2.3 | Sot de calcària | 279 |
| VII.2.3.1 | Conductivitat i pH | 279 |
| VII.2.3.2 | Composició química..... | 279 |
| VII.3 | Extracció de testimonis..... | 280 |
| VII.3.1 | Composició química | 280 |
| VII.3.2 | Lixiviació..... | 281 |
| VII.4 | Aproximació a la relació L/S | 283 |
| VII.4.1 | Estimació del pes de sòlid : cubicació dels sots | 283 |
| VII.4.2 | Estimació del volum de líquid..... | 285 |
| VII.5 | Lixiviació al camp i relació amb els tests de laboratori | 286 |
| VII.5.1 | Emissions i nivells d'immissió..... | 287 |
| VII.5.2 | Tendències d'emissió dels elements al camp..... | 289 |
| VII.5.3 | Aproximació de les previsions de laboratori a les emissions i tendències d'esgotament..... | 296 |
| VII.6 | Conclusions..... | 298 |
| VIII. Conclusions i recomanacions | | 304 |
| VIII.1 | Conclusions..... | 304 |
| VIII.2 | Recomanacions sobre mesures per millorar la qualitat | 309 |
| VIII.3 | Recomanacions sobre mesures de protecció | 311 |
| VIII.4 | Recomanacions sobre la metodologia | 312 |
| VIII.5 | Propostes de recerca futura | 314 |
| IX. Referències bibliogràfiques | | 316 |

Agraïments

Finalment ha arribat el moment de fer un repàs de totes aquelles persones que m'han acompanyat durant aquests més de quatre anys. Hi ha molta gent a qui vull donar les gràcies pel seu suport i col·laboració, però la veritat és que mai no se m'ha donat massa bé expressar-ho; és per aquest motiu que agraeixo la possibilitat de poder-ho fer aquí, sobre paper, que sembla que se'm dona millor...

En primer lloc voldria expressar la meva gratitud als meus directors per la confiança que van dipositar en mi per dur a terme aquesta investigació. Al Dr. Enric Vazquez li estic molt agraïda per haver-me donat l'oportunitat de realitzar aquesta tesi i per les seves orientacions en el decurs de la fase experimental. Al Dr. Xavi Querol vull donar-li les gràcies per haver-me recolzat, ajudat, guiat, per haver-me transmès molts coneixements i el seu rigor científic, i molt especialment per la seva dedicació i la seva paciència amb mi.

El meu agraïment a l'Àngel López i el Josep Maria Chimenos per haver accedit a revisar aquesta tesi i per les seves valuoses suggerències i aportacions al respecte. Així mateix, a l'Alejandro Josa, per la seva mirada crítica sempre constructiva sobre alguns aspectes de la tesi, per resoldre alguns dels meus dubtes *geotècnics* i pel seu suport.

Vull donar a les gràcies al personal de les plantes incineradores que han facilitat l'accés a les seves instal·lacions per mostrejar i han proporcionat valuosa informació, així com a Pedreres Rusc i VECSA. Un agraïment també a l'Albert Roca, el meu company de viatge en tots els mostreigs que ens han portat a recórrer Catalunya. No voldria oblidar-me de totes les persones que han fet possible la construcció del tram experimental a Tagamanent: així, en primer lloc vull donar les gràcies a l'Ajuntament de Tagamanent per cedir el camí; a *Leiro*, per proporcionar medis humans i materials per dur a terme una empresa tan particular: gràcies a la seva gent per la paciència i el bon humor davant una obra poc convencional; a l'Antoni Pérez d'Àrids Pérez per permetre envair les seves instal·lacions amb un material poc atractiu a primera vista; al Genís Costa per proporcionar les escòries i a l'Albert Calsina i l'Antoni Pla de l'ITeC. Finalment, vull agrair especialment al Vicenç Baró els seus ànims, el seu interès per l'evolució d'aquesta tesi, les seves converses sempre divertides i alhora enriquidores, i donar-me l'oportunitat única de visitar *l'embrió* de la Torre Agbar i de l'IKEA.

A aquelles persones amb qui he conviscut a l'Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera": en la part experimental de la tesi ha estat necessària la col·laboració de la Mercè Cabanas, Rafel Bartrolí i Silvia Martínez, que des de l'ICP han viscut els inconvenients de

l'heterogeneïtat de les mostres. Al Josep, per haver-me ensenyat a interpretar espectres de DRX i la seva amabilitat i bona disposició a orientar-me amb els pics més *punyeters*. Així mateix gràcies al Felicià pels seus suggeriments en les interpretacions, i a l'Andrés. Als meus companys de despatx: la Fabiola amb qui he compartit alguns maldecaps i complicitat en la fase final de la tesi, la Sonia, l'Oriol, el Toni i l'Àlex, i a aquells que ja van anar marxant: al José Antonio i la Virgínia, per tantes bones estones que hem passat, i al Juan Carlos, per la seva disponibilitat absoluta, per les llarguíssimes xerrades cortesia d'Auna i per la seva ajuda quan més ho necessitava (gracias por estar siempre ahí!). I, com no, a les meves *xatis* del laboratori, la Sílvia i la Sandrita per la seva amistat, el seu recolzament i per ensenyar-me a fer les digestions sense perdre la paciència.

Agraeixo l'ajuda de la Laia (amb l'HPLC) i de l'Anna i el Ramon (amb el microscopi electrònic) dels Serveis Científicotècnics de la UB, així com al Servando Chinchón per la determinació de la sílice de les escòries.

No vull oblidar-me d'aquells amb qui he conviscut durant la meva estada al Laboratori de Materials de Construcció de la UPC: a la Verónica, amb qui he compartit tema de tesi, converses de temes molt diversos i feina en dies i hores intempestives; A l'Eufronio, pel seu assessorament al laboratori i pels sulfats solubles en àcid; al Manuel Antomil, que em va transmetre una manera de treballar amb precisió i exactitud encara que suposi invertir més temps; al Paco, per animar-me amb les històries de *señoras-con-traje-de-buzo* i per estar sempre disposat a donar-me un cop mà amb el pes; a la Mati pels dinars plegades, per la seva amistat, els cafès amb crema i la seva paciència amb l'HPLC i les meves mostres; al Carlos Camargos, *obligado* por contagiarme un poco de tu optimismo incluso un triste domingo de trabajo en el laboratorio, i a molts altres amb qui he compartit espai de treball i bromes: el Jose i el Joan del Laboratori de Camins, la Susanna Valls, el Corominas, la Bibiana, el Soberón (gracias por lo del WASCON), el Camilo i el Carlos del Laboratori de Tecnologia d'Estructures. Al personal del Laboratori de Geotècnia, l'Enrique, el José i el Tomás (gracias por el esquema del molde), pel seu assessorament en la determinació de la permeabilitat de les escòries compactades.

Al Francesc Àvila, li vull agrair el seu suport i molt especialment que hagi compartit amb mi tots els trucs dels assaigs que només s'adquireixen amb l'experiència i que tanmateix són tan necessaris. Gràcies per la teva companyia cada tarda durant dos anys, pel teu infatigable sentit de l'humor que fa menys pesat assajar àrids a quilos, i pels berenars de cafè soluble i *tarta Anciano*. Al Jose Marín (*Tornero*) mil gràcies per la seva valuosa assistència en qüestions de software i hardware, per l'ajuda logística amb les impressions i pels seus ànims i suport. Gràcies a tots dos per la vostra amistat i generositat.

Un agraïment molt especial a totes aquelles persones que m'han animat en tot moment: a la meva Bego, sempre preocupada per mi i interessant-se per l'estat de la tesi, gràcies per estar tant a prop (i per compartir amb mi les *Matthaus Passion* i similars). A l'Anabel i la Cristina (que han donat una mica de color al període de redacció de la tesi) així com la Meritxell i la

Maitè (pels llargs cafès), a totes elles els dono les gràcies pel seu suport i perquè sempre han aconseguit fer-me oblidar durant unes hores que tenia una tesi a mitges entre mans. A aquells que per les circumstàncies no he pogut veure sovint, com l'Adriana, la Laura, la Tània i el Rafa. A l'Ester, per la seva amistat malgrat la distància i perquè amb la seva vitalitat sempre m'ha intentat convèncer de que aquesta tesi no conté un experiment de laboratori utòpic sinó que veritablement pot ser aplicable a gran escala.

Al personal de les secretaries de l'Institut "Jaume Almera" i del Departament d'Enginyeria de la Construcció, per la seva amabilitat i l'assessorament en tràmits administratius. Així mateix, agraeixo enormement l'acurada revisió del text realitzada pel Servei de Llengües i Terminologia de la UPC, gràcies a la concessió d'un ajut per a la correcció de tesis doctorals redactades en català.

Una part d'aquesta tesi la dec a l'Àlex, que ha estat al meu costat aquests darrers anys recolzant-me, donant-me bons consells, discutint sobre *zahorras* i *pes-ges-tres*, i demostrant dia a dia que la seva generositat, la seva paciència i la seva disposició per ajudar són infinites i no tenen restriccions ni horàries ni de calendari. Gracias por todo, Àlex.

I finalment expressar la meva més profunda gratitud a la meva família: als meus pares, Pep i Carme, que ha estat patint molt especialment aquesta tesi (i que per fi aviat respiraran tranquils), que sempre m'han encoratjat i m'han ensenyat que en aquest món res no és impossible i que tot es pot aconseguir amb esforç i dedicació. Al Josep, per estar al meu costat i preocupar-se per mi encara que de vegades intenti fer veure el contrari. A la Mimí, per animar-me a estudiar més i recordar-me que a la vida hi ha temps per tot, a la Yayita pel seu immens afecte, i molt especialment a l'avi Pepe, que de petita va despertar en mi l'interès pel món de les Ciències de la Terra i a qui li dec haver trobat el meu camí.

Resum

Les escòries són el subproducte més abundant que s'obté en el procés d'incineració de residus sòlids urbans; constitueixen al voltant del 90 % en pes del producte sòlid resultant de la combustió. La producció anual a Catalunya fins a l'any 2002 era d'unes 150000 tones d'escòries, generades en set plantes incineradores localitzades a Tarragona, Mataró, Sant Adrià de Besòs, Montcada i Reixac, Malla, Girona i Vielha. El seu destí final ara com ara és l'abocament, juntament amb la utilització puntual en petites obres menors d'àmbit local i de forma poc regulada. Pel seu caràcter a primera vista *inert* i l'aspecte granular es considera que les escòries es podrien utilitzar en la construcció i reemplaçar els àrids naturals. Des de la mateixa administració s'imposen taxes de deposició amb l'objectiu de fomentar la valorització dels residus generats.

En aquest estudi es pretén avaluar la viabilitat de la valorització de les escòries d'incineració de residus sòlids urbans produïdes a Catalunya en capes granulars del ferm de carreteres, com a substitut d'àrids naturals. La valoració de la idoneïtat de les escòries ha de tenir en compte l'adequació a les normatives tècniques que regeixen aquesta possible aplicació: l'Ordre de 15 de febrer de 1996, sobre valorització d'escòries del Departament de Medi Ambient i l'article 510 sobre tot-u del PG-3/2004. Més enllà de les prescripcions, tanmateix, s'ha considerat necessari una caracterització de les escòries des de diverses perspectives i escales de treball per tenir un coneixement integral del material que permeti gestionar-lo correctament i treure'n el màxim profit possible. Finalment l'estudi es completa amb un tram experimental de camp a Tagamanent, amb l'objectiu de contrastar els resultats obtinguts al laboratori i al camp i determinar si el comportament de les escòries sota condicions de camp és diferent.

Aquest estudi s'ha desenvolupat en dues fases. En la primera, es va mostrejar escòries de les set plantes incineradores operatives a Catalunya l'any 2000 per tal de fer-ne una caracterització preliminar i triar tres plantes per fer un estudi més detallat de les seves escòries. El principal criteri de selecció ha estat la qualitat de l'escòria a escala macroscòpica, segons la qual s'han descartat les plantes de Montcada, Girona, Malla i Vielha, per l'absència de dispositius d'extracció de ferralla i/o la quantitat de material combustible no incinerat. Addicionalment s'ha recollit escòria acabada de sortir del forn i escòria envellida durant un

mínim de tres mesos, a fi de determinar-ne les diferències i poder establir quins són els fenòmens que tenen lloc durant el procés de maduració.

A les escòries hi coexisteixen tres paragènesis, conformades per materials de composició química, mineralogia i propietats diferents. La paragènesi preincineració inclou vidre domèstic (el component més abundant), fragments ceràmics, àrids, partícules metàl·liques i material combustible no incinerat. Els productes de fusió (sinincineració) són un material exclusiu de les escòries d'incineració de residus sòlids urbans, generat a partir de la fosa del forn i que des del punt de vista mineralògic i composicional es pot equiparar a una roca ultrabàsica molt enriquida en Fe. La paragènesi postincineració està constituïda per productes d'alteració, que es formen a causa de l'elevada reactivitat del residu en sortir de la cambra de combustió. Aquestes espècies de neoformació riques en sals posen de manifest que la mineralogia de les escòries és dinàmica i diferencien les escòries fresques de les envellides. Les proporcions relatives que s'estableixen entre les tipologies de materials són diferents i variables segons la mida de partícula considerada; aquesta particularitat és la clau de l'heterogeneïtat de les escòries.

Les escòries són un material granular amb una mida màxima nominal de fins a 20 mm i una granulometria contínua que sense cap intervenció expressa s'adapta al fus ZN20 que preveu el PG-3/2004. Poden assolir alts graus de compactació, que desemboquen en capacitats portants molt notables i totalment comparables a les que mostren àrids naturals, mentre que són lleugerament menys denses, més poroses i més fràgils que aquests, tot i que en general compleixen les prescripcions del PG-3/2004. Cal destacar l'escassa sensibilitat a l'aigua, l'elevada estabilitat volumètrica i l'adequada resistència a l'atac gel/desgel.

Si bé s'han identificat i determinat els continguts de més de 50 elements a les escòries, el principal component és el SiO_2 , que constitueix al voltant del 45 % del pes i es troba principalment en forma vítria. La resta d'elements majoritaris (>10000 mg/kg) són Si, Ca, Fe, Al, Na, C, Mg i K, elements comuns a materials naturals. Entre els minoritaris (1000-10000 mg/kg), alguns també són comuns en àrids naturals com S, Ti, Ba i Mn, però en canvi les escòries estan molt enriquides en Cu, Zn i Pb (concentracions d'entre 1000 i 7000 mg/kg). La resta d'elements determinats es presenten en concentracions clarament inferiors als 1000 mg/kg, dels quals destaca per l'interès ambiental els baixos continguts en Ni (100 mg/kg), Co (20 mg/kg), As (15 mg/kg), Se (10 mg/kg), Mo (8 mg/kg), Cd (5 mg/kg) i Hg (<0.1 mg/kg). Les escòries estan molt empobrides en els cinc darrers en comparació amb les cendres volants o els residus de depuració de gasos.

El comportament ambiental de les escòries envers la lixiviació s'ha avaluat mitjançant els tests de laboratori DIN 38414 i CEN 12457 (que permeten establir la fracció lixiviable), el NEN 7341 (amb el qual es determina la fracció disponible) i els sots experimentals del tram de camp de Tagamanent (fracció lixivuada i període d'esgotament). Les lixiviacions més importants des del punt de vista quantitatiu són les d'elements que constitueixen sals solubles; les de la resta d'elements —entre els quals hi ha molts metalls— són molt més

baixes, però no per això negligibles atesa la possible contaminació en cas que s'alliberin massivament al medi. La solubilitat de molts elements presents a les escòries depèn en gran mesura del pH del medi: els lixiviatos de les escòries són més o menys alcalins en funció essencialment del grau d'envelliment, i els de les escòries fresques són favorables a la mobilització d'elements amfòters.

Les fraccions disponibles de molts elements són molt baixes, ja que estan fermament lligats a les escòries; en d'altres és més palès l'efecte de la retenció química en el rang de pH característic d'una escòria envellida tipus (moderadament alcalí). Juntament amb l'anàlisi de les dades obtingudes, l'aplicació del Decret de materials de construcció holandès sobre les immissions calculades a partir de les emissions de laboratori i de camp permet identificar Cu, Mo, Se i Sb, així com Cl^- i SO_4^{2-} com els constituents potencialment conflictius des del punt de vista ambiental, amb lixiviacions tals que farien necessari imposar certes restriccions i aplicar mesures de protecció en la valorització de les escòries. La resta d'elements no han de suposar cap problema ambiental.

De la comparació dels tests de camp i de laboratori se'n pot concloure que els tests CEN realitzats permeten fer previsions realistes i ajustades de la fracció lixiviable de les escòries en un marc temporal relativament limitat (menys de 10 anys) a causa de la manca de recobriment del sistema i les consegüents altes taxes d'infiltració. En aquestes condicions la fracció lixiviable de la major part dels constituents ha conclòs el seu període d'esgotament en 2 anys.

Un cop identificats els possibles punts febles de les escòries per a una possible utilització, es recomanen algunes mesures correctores que incideixen tant sobre la millora de la qualitat del material com en el possible escenari d'aplicació. D'altra banda es fa un breu comentari sobre aspectes metodològics de l'estudi de les escòries, especialment els procediments d'assaig que s'utilitzen per a àrids naturals, que no semblen els més adequats per a materials no convencionals com les escòries.

Resumen

Las escorias son el subproducto más abundante que se obtiene en el proceso de incineración de residuos sólidos urbanos; constituyen alrededor del 90% en peso del producto sólido resultante de la combustión. La producción anual en Catalunya hasta el año 2002 era de unas 150000 toneladas de escoria, generadas en siete plantas incineradoras localizadas en Tarragona, Mataró, Sant Adrià de Besòs, Montcada i Reixac, Malla, Girona y Vielha. Su destino final es, por ahora, el vertido, juntamente con la utilización puntual en pequeñas obras menores de ámbito local y de manera poco regulada. Por su carácter a primera vista inerte y su aspecto granular se considera que las escorias se podrían utilizar en la construcción reemplazando áridos naturales. Desde la misma administración se imponen tasas de deposición con el objetivo de fomentar la valorización de los residuos generados.

En este estudio se pretende evaluar la viabilidad de la valorización de las escorias de incineración de residuos sólidos urbanos producidas en Catalunya en capas granulares del firme de carreteras, como sustituto de áridos naturales. La valoración de la idoneidad debe tener en cuenta la adecuación a las normativas técnicas que rigen esta posible aplicación: la Orden de 15 de febrero de 1996, sobre valorización de escorias del Departament de Medi Ambient y el artículo 510 sobre ahorros del PG-3/2004. Sin embargo, más allá de las prescripciones, se considera necesaria una caracterización de las escorias desde diversas perspectivas y escalas de trabajo para tener un conocimiento integral del material que permita gestionarlo correctamente y aprovecharlo al máximo. Finalmente el estudio se completa con un tramo experimental de campo en Tagamanent, con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos en el laboratorio y en el campo y determinar si el comportamiento de las escorias en condiciones de campo es diferente.

Este estudio se ha desarrollado en dos fases. En la primera, se realizó un muestreo de escorias de las siete plantas durante el año 2000 a fin de someterlas a una caracterización preliminar y seleccionar tres plantas para llevar a cabo un estudio más detallado de sus escorias. El principal criterio de selección ha sido la calidad de la escoria a escala macroscópica, según la cual se han descartado las plantas de Montcada, Girona, Malla y

Vielha, por la ausencia de dispositivos de extracción de chatarra y/o la cantidad de material combustible no incinerado. Adicionalmente se ha recogido escoria recién salida del horno y escoria envejecida durante un mínimo de tres meses, a fin de determinar las diferencias y establecer cuáles son los fenómenos que tienen lugar durante el proceso de maduración.

En las escorias coexisten tres paragénesis conformadas por materiales de composición química, mineralogía y propiedades diferentes. La paragénesis pre-incineración incluye vidrio doméstico (el componente más abundante), fragmentos cerámicos, áridos, partículas metálicas y material combustible no incinerado. Los productos de fusión (sin-incineración) son un material exclusivo de las escorias de incineración de residuos sólidos urbanos, generado a partir del magma del horno y que desde el punto de vista mineralógico y composicional se podría equiparar a una roca ultrabásica muy enriquecida en Fe. La paragénesis post-incineración esta compuesta por productos de alteración, que se forman a causa de la elevada reactividad del residuo al salir de la cámara de combustión. Estas especies de neoformación ricas en sales ponen de manifiesto que la mineralogía de las escorias es dinámica y marcan la diferencia entre escorias frescas y envejecidas. Las proporciones relativas que se establecen entre las tipologías de materiales son diferentes y variables según el tamaño de partícula considerada; esta particularidad es la clave de la heterogeneidad de las escorias.

Las escorias son un material granular con un tamaño máximo nominal de hasta 20 mm y una granulometría continua que sin intervención expresa se adapta al huso ZN20 del PG-3/2004. Pueden alcanzar altos niveles de compactación, que desembocan en capacidades portantes muy notables y totalmente comparables a las que muestran los áridos naturales, y son ligeramente menos densas, más porosas y más frágiles que éstos, aunque en general cumplen las prescripciones del PG-3/2004. Cabe destacar la escasa sensibilidad al agua, la elevada estabilidad volumétrica y la adecuada resistencia frente al ataque hielo/deshielo.

Se han identificado y determinado los contenidos de mas de 50 elementos en les escorias; el principal componente es el SiO_2 , que constituye alrededor del 45 % en peso y está principalmente en forma vítrea. El resto de elementos mayoritarios (>10000 mg/kg) son Si, Ca, Fe, Al, Na, C, Mg y K, elementos comunes a materiales naturales. Entre los minoritarios (1000-10000 mg/kg), algunos también son comunes en áridos naturales como S, Ti, Ba y Mn, pero sin embargo les escorias están muy enriquecidas en Cu, Zn y Pb (concentraciones de entre 1000 y 7000 mg/kg). El resto de elementos determinados se presentan en concentraciones claramente inferiores a los 1000 mg/kg, entre los cuales destaca por su interés ambiental los bajos contenidos en Ni (100 mg/kg), Co (20 mg/kg), As (15 mg/kg), Se (10 mg/kg), Mo (8 mg/kg), Cd (5 mg/kg) y Hg (<0.1 mg/kg). Las escorias están muy empobrecidas en estos cinco últimos en comparación con las cenizas volantes o los residuos de depuración de gases.

El comportamiento ambiental de las escorias frente la lixiviación se ha avaluado mediante los tests de laboratorio DIN 38414 y CEN 12457 (que permiten establecer la fracción lixiviable), el NEN 7341 (con el cual se determina la fracción disponible) y los baches experimentales del

tramo de campo de Tagamanent (fracción lixiviada y su período de agotamiento). Las lixiviaciones más importantes desde el punto de vista cuantitativo son las de los elementos que constituyen sales solubles; las del resto de elementos —entre los cuales hay muchos metales— son mucho más bajas, pero no por ello despreciables dada la posible contaminación en caso que se liberen masivamente al medio. La solubilidad de muchos elementos presentes en las escorias depende en gran medida del pH del medio: los lixiviados de las escorias son más o menos alcalinos en función esencialmente del grado de envejecimiento, y los de las escorias frescas son favorables a la movilización de elementos anfóteros.

Las fracciones disponibles de muchos elementos son muy bajas, ya que éstos están firmemente fijados en las escorias; en otros es más manifiesto el efecto de la retención química en el rango de pH característico de una escoria envejecida tipo (moderadamente alcalino). Junto con el análisis de los datos obtenidos, la aplicación del Decreto de materiales de construcción holandés sobre las inmisiones calculadas a partir de las emisiones de laboratorio y de campo permite identificar Cu, Mo, Se y Sb, así como Cl^- y SO_4^{2-} como los constituyentes potencialmente conflictivos desde el punto de vista ambiental, con lixiviaciones tales que harían necesario imponer ciertas restricciones y aplicar medidas de protección en la valorización de escorias. El resto de elementos no han de suponer ningún problema ambiental.

De la comparación de los tests de campo y de laboratorio se puede concluir que los tests CEN realizados permiten hacer previsiones realistas y ajustadas de la fracción lixiviable de las escorias en un marco temporal relativamente limitado (menos de 10 años) a causa de la falta de recubrimiento del sistema y les consecuentes altas tasas de infiltración. En estas condiciones la fracción lixiviable de la mayor parte de los constituyentes ha concluido su período de agotamiento en 2 años.

Un vez ha sido identificados los posibles puntos débiles de las escorias para una posible utilización, se recomiendan algunas medidas correctoras que inciden tanto sobre la mejora de la calidad del material como en el posible escenario de aplicación. Por otro lado se realiza un breve comentario sobre aspectos metodológicos del estudio de las escorias, especialmente los procedimientos de ensayo que se utilizan para áridos naturales, que no parecen ser los más adecuados para materiales no convencionales como las escorias.

Abstract

Bottom ash is the most significant byproduct arising from municipal solid waste incineration, since it accounts for 90% (in weight) of the solid product resulting from this combustion. The annual production in Catalonia until 2002 was about 150000 tonnes of bottom ash, produced in seven incinerator plants located in Tarragona, Mataró, Sant Adrià de Besòs, Montcada i Reixac, Malla, Girona and Vielha. Nowadays, bottom ash is mainly landfilled and only a reduced fraction is applied for engineering purposes on a small scale. Owing to its inert and granular characteristics, it is thought that bottom ash could be used in civil engineering applications, replacing natural aggregates. Currently the Government of Catalonia applies landfilling taxes for this type of material with the aim of promoting the valorisation.

The purpose of this study is to assess the suitability of the valorisation of municipal solid waste incineration bottom ash produced in Catalonia as a road material in granular unbound pavement layers, as a substitute of natural aggregates. Any assessment of the suitability for this application should take into account if bottom ash meets the technical regulations corresponding to the proposed application: the Catalan Specification for MSWI bottom ash valorisation (environmental requirements) and the Spanish Specifications for granular unbound layers of road pavements (physical and mechanical requirements). However, in addition to these technical requirements, a characterisation of bottom ash from different points of view is needed to achieve a comprehensive knowledge about bottom ash properties to support decisions on waste management and to obtain the highest possible benefit on its utilisation. Finally, the study includes an experimental field-test, in Tagamanent, carried out to compare laboratory and field data on leachability of major inorganic pollutants, and to determine if bottom ash has a different technical behaviour when compared with laboratory conditions.

This study was developed in two stages. Firstly, bottom ashes from seven incinerator plants were sampled to perform a preliminary characterisation. Three plants of them were selected to carry out subsequent detailed characterization studies. According to the main selection criterion, the macroscopic-scale quality, bottom ashes from Montcada, Girona, Malla and Vielha were rejected, owing to the frequent occurrence of metal pieces and/or unburned material that were not removed. Furthermore, fresh and 3-month-aged bottom ashes were collected to determine the differences with the purpose of studying the influence of weathering process on bottom ash properties.

Bottom ash is a granular and well-graded material with maximum nominal size up to 20mm. The grain size distribution is approximately in the accepted ranges for granular materials, as given by the Spanish Specifications for road construction. Bottom ash can achieve high compaction levels, giving rise to very remarkable bearing capacities which resembles those found in natural aggregates. However, in comparison with conventional aggregates, bottom ash is lighter, more porous and more fragile, but anyway mechanical requirements are fulfilled. A low water sensibility, high volumetric stability and optimal resistance to freezing and thawing are some features of bottom ash that may be emphasized.

The bulk contents of more than 50 elements were determined in all bottom ash samples. The main constituent, SiO_2 , accounts for the 45% in weight and it is mainly in glassy form. Other major elements (>10000 mg/kg) are Si, Ca, Fe, Al, Na, C, Mg and K, which are also common in natural materials. Some minor elements (1000-10000 mg/kg), such as S, Ti, Ba and Mn are also usually found in natural aggregates; however, bottom ash is enriched in Cu, Zn and Pb (1000-7000 mg/kg). The contents of rest of elements are below 1000 mg/kg. When compared with fly ash or APC residues, it has to be highlighted from an environmental point of view the low contents of a series of elements such as Ni (100 mg/kg), Co (20 mg/kg), as well as As (15 mg/kg), Se (10 mg/kg), Mo (8 mg/kg), Cd (5 mg/kg) and Hg (<0.1 mg/kg),

The environmental performance of bottom ash was assessed by means of the laboratory tests DIN 38414, CEN 12457 (to determine the leachable fraction), NEN 7341 (to calculate the acid available fraction) as well as by a field-test at Tagamanent (to yield data about the leached fraction and the corresponding depletion period). These elements occurring in soluble salts show the highest leached concentrations. The leachable concentration of rest of elements, such as most metals, is clearly lower, but still important because of the potential impact if released to the environment. Most of the minor and trace elements in bottom ash have a highly pH-dependent solubility. Leachates are more or less alkaline as a function of the aging degree, and fresh bottom ash leachates trend to increase the amphoteric mobility.

Acid available fractions (NEN 7341) of many elements are low, since these are tightly fixed into the bottom ash. In the case of other elements, the chemical retention is higher in the typical pH-range of aged bottom ash (moderately alkaline). Together with the emission and immission data obtained, the Dutch Building Materials Decree (BMD) was applied, and Cu, Mo, Se and Sb, as well as Cl^- and SO_4^{2-} were found to be the most potentially conflictive constituents of bottom ash from an environmental point of view. The BMD criteria for bottom ash valorisation are not fulfilled unless some isolating measures are applied. The releases of the other species should not involve any environmental impact.

The comparison of the results arising from the laboratory and field leaching tests shows that the results from the leaching tests carried out following CEN recommendations yielded leachable proportions for most elements equivalent to the fractions dissolved in a relatively short period when actual applications are considered. Thus it is expected that the CEN

leachable fraction is equivalent to the dissolved fraction for a period of 10 years for the field conditions tested (without protective non permeable overlying bed and a consequent high water infiltration rate). Under this field scenario most of the leachable fractions of the studied elements are depleted during the first 2 years from the application.

Once identified the major possible causes limiting potential applications of bottom ash, remediation strategies are recommended, both on the improvement of the starting material to obtain a better performance and on the possible application procedures. Additionally, some critical questions concerning methodological issues on the characterization procedures are also highlighted, especially the problems on the application of some specific tests usually applied for natural aggregates that have been also used for bottom ash without taking into account some limitations.

