

Capítol III

METODOLOGIA

III. Metodologia

III.1 ESTUDI DE LES INCINERADORES

Atès que la qualitat de les escòries depèn en gran part del sistema de combustió i de l'existència d'un acondicionament posterior, s'han estudiat les característiques de cada planta incineradora i les possibles repercussions que tenen sobre el producte. S'ha observat la trajectòria de les escòries, especialment les particularitats del tipus de forn, de l'evacuació de les escòries i del procés de maduració. Les dades s'han recollit mitjançant observacions directes a les mateixes plantes incineradores en les visites realitzades per al mostreig, informació facilitada pels responsables de les plantes i els documents que han proporcionat i, finalment, per la informació disponible de diverses entitats com l'ACEVERSU o la Junta de Residus (actualment Agència de Residus de Catalunya).

III.2 FASE EXPERIMENTAL AL LABORATORI

III.2.1 MATERIALS

III.2.1.1 Estudi preliminar de les escòries de totes les plantes incineradores de Catalunya

Es pretén fer una caracterització preliminar de les escòries produïdes a les set plantes incineradores operatives a Catalunya (Figura III-1) que permeti establir criteris de selecció per triar les tres plantes amb les escòries de millor qualitat, amb l'objectiu d'estudiar-les de manera més profunda i detallada.

En primer lloc, s'ha dut a terme una caracterització preliminar del material procedent de les set plantes. A cada planta es recullen uns 300 kg d'escòries fresques acabades de sortir del forn i 300 kg d'escòries envellides durant un mínim de tres mesos. La major part de les plantes emmagatzemen en piles a les pròpies instal·lacions totes o una part de les escòries generades amb l'excepció de Montcada, Sant Adrià i Vielha, que les duen a l'abocador. Es va

sol·licitar als responsables de les plantes incineradores de Sant Adrià i Montcada la possibilitat que de manera excepcional es reservés una petita quantitat de mostra, que seria recollida al cap de tres mesos, petició que va ser acceptada. Les quantitats reservades per a aquest efecte van ser de poc més d'una tona. Pel que fa a Vielha, el mostreig d'escòries envellides es va fer directament a l'abocador.



Figura III-1. Localització geogràfica de les set plantes incineradores de residus urbans de Catalunya fins el 2003 (actualment la planta de Malla no és operativa). Els noms en vermell indiquen les plantes triades per a la caracterització més detallada.

El mostreig es va realitzar durant la primera meitat de l'any 2000 i es van recollir mostres de totes les plantes. En cinc de les plantes es van agafar dos tipus de mostres:

- Escòries acabades de sortir del forn, les anomenades *escòries fresques*, recollides a peu de la cinta transportadora que surt de les basses de temperament i després de passar per l'electroimant si aquest hi era present.
- Escòries envellides, que havien estat madurant durant un mínim de tres mesos en les piles d'emmagatzematge que hi ha a cada una de les plantes.

Les escòries estudiades, la data de mostreig i el pes aproximat de mostra recollida es detallen a continuació (Taula III-1):

Taula III-1. Escòries estudiades a la fase preliminar, data del mostreig i quantitats.

PLANTA	MOSTREIG	ESCÒRIES ENVELLIDES	ESCÒRIES FRESQUES
Tarragona	març 2000	300 kg	-
Mataró	març 2000	300 kg	-
Montcada	juny 2000	300 kg	300 kg
Sant Adrià	juny 2000	300 kg	300 kg
Girona	juliol 2000	300 kg	300 kg
Malla	juliol 2000	300 kg	300 kg
Vielha	juliol 2000	300 kg	300 kg

El mostreig d'escòries fresques es va dur a terme a la pila acumulada al peu de la cinta transportadora que trasllada les escòries des de la zona de temperament fins a l'electroimant que n'extreu la ferralla. Es va procurar recollir material de diversos punts i a diferents alçades de la pila. Afortunadament l'elevat grau de saturació d'aigua del material disminueix els fenòmens de segregació del material en funció de la mida de partícula, de manera que és més fàcil mantenir la representativitat del material, almenys pel que fa a la granulometria.

Les mostres envellides s'emmagatzemen en forma d'acumulacions diferents segons les quantitats. Les plantes incineradores que emmagatzemen totes les seves escòries les conserven en apilaments d'alçades variables però de gran longitud. El mostreig es va realitzar utilitzant dotze cabassos, cada un dels quals amb uns 25 kg de capacitat, distribuïts al llarg de l'apilament amb una separació entre si d'1 m com a mínim. Amb l'ajuda de la pala es va apartar la capa més superficial de la pila, que va ser descartada del mostreig. Es va procurar extreure material de diferents alçades de la pila, incloent-hi la base, on s'acumulen les partícules més grosses, per assegurar la representativitat del material.

A aquelles plantes en què la quantitat d'escòria acumulada és molt menor, tan sols un con de material de poques tones, es va procedir de la mateixa manera, distribuïnt els dotze cabassos al llarg del perímetre de la pila.

Ja al laboratori, els continguts de cada cabàs es van estendre per barrejar la mostra i homogeneïtzar-la, així com per assecat-la a l'aire i disminuir així les possibles alteracions mineralògiques. Un cop seca, per obtenir mostres representatives, es va anar reduint la mida de la mostra mitjançant un quarterador. Això va proporcionar petites mostres representatives per als diferents assaigs de caracterització. El procés de quarteig es descriurà més endavant. Cal destacar que el mal estat de les escòries de Vielha (a causa d'una combustió molt deficient) va impossibilitar realitzar alguns assaigs.

Un cop feta la caracterització preliminar de les escòries de totes les plantes incineradores de Catalunya, duta a terme durant l'any 2000, se'n van seleccionar tres per fer un estudi més detallat de les seves característiques físiques i de les seves propietats mecàniques. Un dels criteris de selecció ha estat prioritzar les plantes que produeixen les escòries de més qualitat, són les que estan dotades com a mínim d'un sistema de separació magnètica (electroimant); aquesta condició elimina les plantes de Montcada, Girona, Vielha i Malla. També ha estat important en la tria la quantitat d'incrementats a la vista. Les tres plantes triades, Tarragona, Mataró i Sant Adrià (representades a la Figura III-1 en vermell), coincideixen amb les tres plantes amb una major producció d'escòries.

III.2.1.2 Estudi exhaustiu de les escòries de les plantes de Tarragona, Mataró i Sant Adrià

En aquesta fase es pretén aprofundir en les propietats de les escòries mitjançant assaigs enfocats a avaluar-ne la idoneïtat com a substitut d'àrids naturals. Per aquest motiu només es van recollir escòries envellides durant uns mesos, ja que cal suposar que seran a la pràctica

les que s'utilitzaran. Les escòries, la data aproximada de mostreig i la quantitat aproximada recollida es detallen a la Taula III-2.

Taula III-2. Quantitats d'escòries mostrejades i data de mostreig a la fase d'estudi exhaustiu.

	TARRAGONA	MATARÓ	SANT ADRIÀ
gener 2001	600 kg	600 kg	600 kg
març 2001	300 kg	300 kg	300 kg
juny 2001	300 kg	300 kg	300 kg
novembre 2001	-	300 kg	-

L'objectiu de tenir tres mostres d'una mateixa planta incineradora recollides en períodes de temps diferents és detectar aquelles propietats que mostren més variabilitat i intentar establir com a resultats definitius no pas un valor mitjà sinó un rang de variabilitat acceptable i aproximat, ateses les limitacions que suposa no disposar d'un nombre més gran i prou representatiu de mostres.

Reducció de mostres

El procés de reducció de mostres al laboratori és cabdal de cara a obtenir submostres representatives del total per a cada assaig. En aquest cas s'ha realitzat amb l'ajut d'un quarterador de dimensions dels que s'utilitzen habitualment per a balast. Les quantitats requerides per a cada assaig es fixen inicialment i, amb càlculs previs, es van alternant el mètode de divisió en meitats i el de divisió en tres quarts per atènyer la quantitat més ajustada possible a la necessària.

Mostreig any 2000

En el cas de les escòries de l'any 2000, el quarteig va ser molt simple perquè la quantitat de material necessari era petita, tan sols uns 12-15 kg per a la granulometria, 15-18 kg per a l'anàlisi química, pèrdua al foc, mineralogia i el test de lixiviació DIN 38414-S4, i 25 kg per separar-lo en diferents fraccions granulomètriques i de cada una determinar-ne la composició química, els constituents, la mineralogia i la lixiviació mitjançant el mateix test DIN.

Mostreig any 2001

La reducció de la mostra de laboratori va ser més complexa que en el cas anterior a causa de la major quantitat d'assaigs programats. El procediment es representa a la Figura III-2, amb quantitats aproximades, ja que les mostres que s'obtenen d'una divisió per quarteig no tenen exactament el mateix pes. L'esquema es divideix en tres parts. La zona esquerra i la del centre, corresponents als assaigs de caracterització bàsica i als de caracterització física addicional, respectivament, són comuns a totes les mostres. La part de caracterització mecànica és variable segons les mostres del gener o del març i juliol.

De les mostres corresponents al mes de gener, se'n van recollir 600 kg, amb l'objectiu de fer l'assaig d'expansió segons la norma UNE-EN 1744-1 i el Proctor normal, assaigs que no s'han repetit amb les mostres següents, del març i el juliol. Un altre tret diferencial és el consum de més material per al Proctor modificat, a causa del desconeixement inicial del material. En total es consumeix la meitat de la mostra. El procediment de quarteig seguit es detalla a la Figura III-2 amb el traç discontinu.

En les següents escòries recollides, corresponents als mostreigs del març i el juliol, la quantitat inicial és la meitat que en les anteriors, 300 kg, i la consumida és del 60 % aproximadament. El procediment de quarteig seguit es representa també a la Figura III-2, però en traç continu.

Finalment, el mes de novembre es va recollir la mostra de Mataró, amb la qual es construiria el tram experimental. El material es va agafar de la pila emmagatzemada a les instal·lacions de l'empresa Leiro una setmana abans de l'inici de l'obra amb l'objectiu de caracteritzar-lo. A causa d'una contaminació de la pila amb material aliè, només es van poder agafar uns 180 kg d'escòries netes. La poca quantitat de mostra va fer descartar els assaigs que necessiten un gran volum de mostra, com el coeficient de desgast de Los Angeles o l'expansió. En total es va utilitzar la meitat de la mostra inicial.

L'esquema de la Figura III-2 és vàlid per a totes les mostres en general, però hi ha algunes excepcions, assaigs puntuals que no s'han dut a terme de manera sistemàtica amb totes les mostres i per tant no es representen.

Determinació de la composició química, mineralogia i lixiviació

Atès que per a aquest tipus d'assaigs calen quantitats de mostra molt petites, és fonamental que el material sigui prou representatiu del total d'escòria. L'estudi s'ha realitzat sobre una submostra global d'escòries tal com són i sobre escòries separades en fraccions granulomètriques per detectar la influència de la mida de partícula en diverses propietats.

El quarteig ha estat lleugerament diferent en les escòries de l'any 2001 respecte a les de l'any 2000, ja que el procés de divisió de les mostres s'adapta a la quantitat i les característiques del material requerit per a cada assaig. Els tests de lixiviació seleccionats condicionen les quantitats i la mida màxima de les escòries i, per tant, el procés de divisió, com es detalla a la Figura III-3. La utilització del tamís de 125 µm està supeditada a aquelles mostres que s'han sotmetre al test de disponibilitat NEN 7341 (ja que la norma d'assaig fixa aquesta mida); per a la resta s'ha utilitzat el tamís de 100 µm. Una major mòlta del material permet obtenir mostres més homogènies i representatives, i es redueix la variabilitat dels resultats.

L'estudi de les escòries per fraccions granulomètriques també inclou divisions com les de la Figura III-3, però les quantitats de material inicial són variables en funció de la mida de partícula.

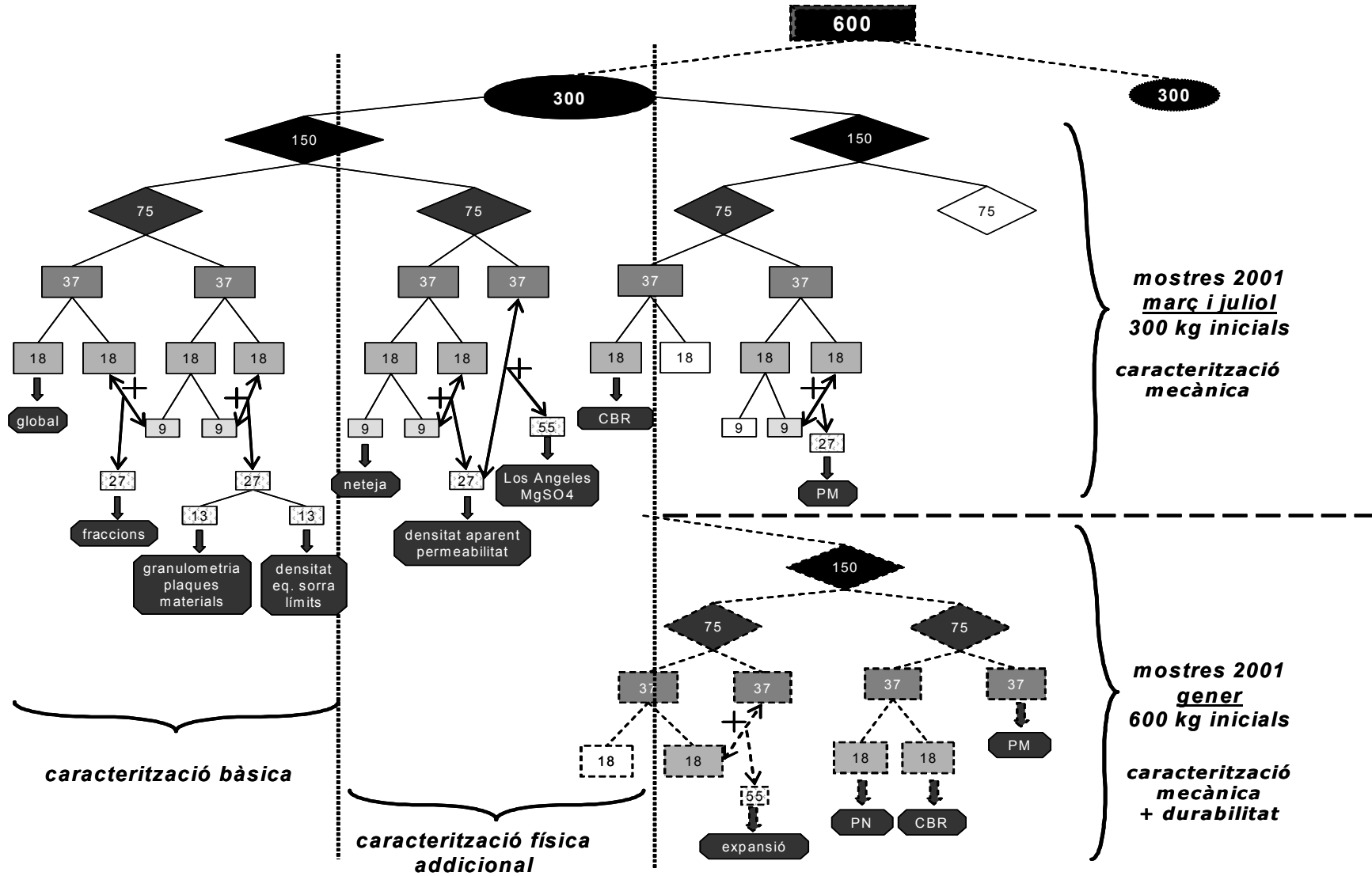


Figura III-2. Esquema del procediment de quarteig, combinant la divisió en meitats i en tres quarts. La caracterització bàsica i la caracterització física addicional són comunes en les escòries de tots els mostreigs, mentre que les diferències es localitzen a la dreta, on una línia separa el quarteig dut a terme sobre les escòries del gener (traç discontinu) i les del març + juliol (traç continu). Les caselles en blanc representen material descartat.

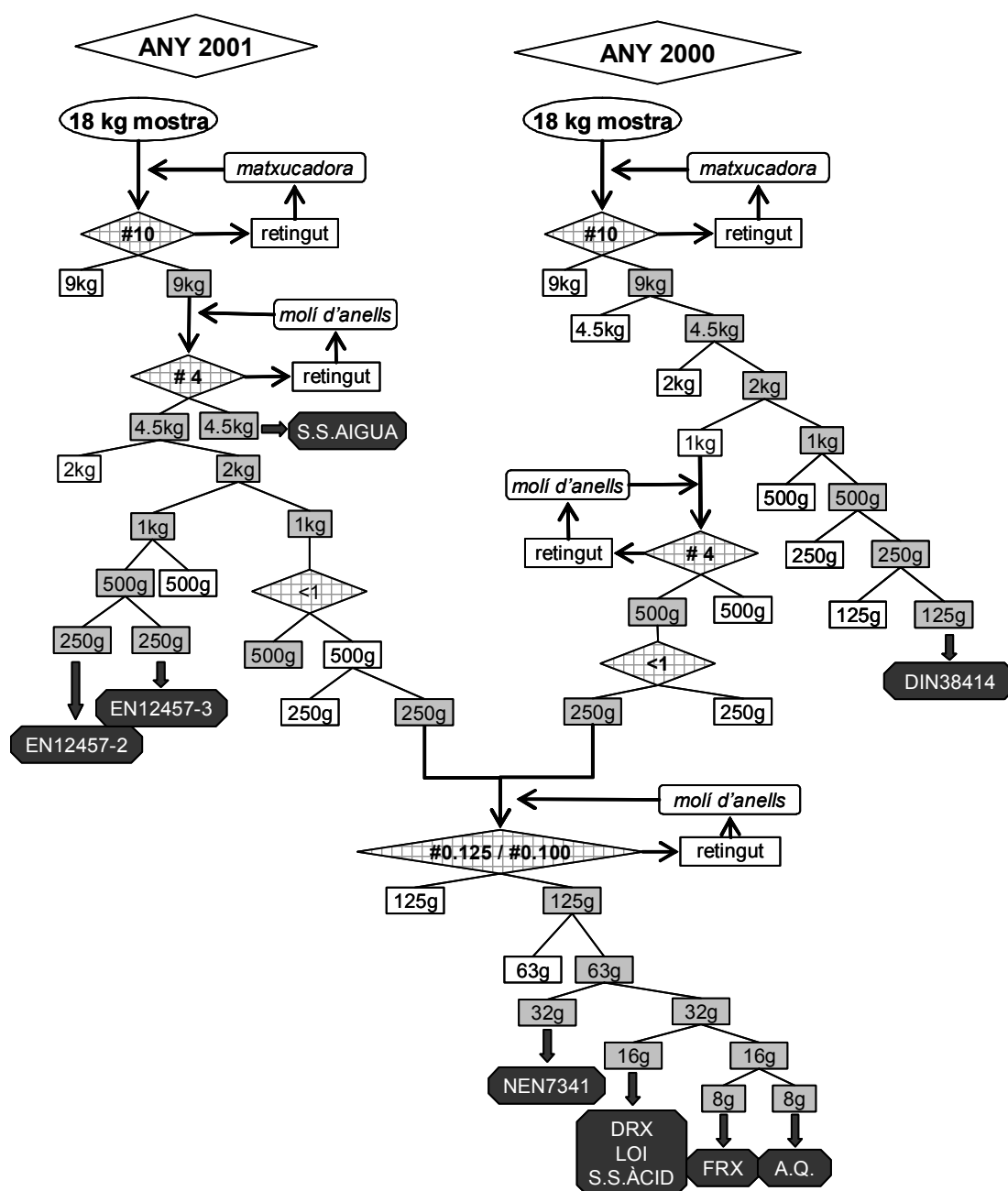


Figura III-3. Procediment de quarteig de les escòries per a l'obtenció de submostres representatives destinades a l'estudi de la composició química, mineralogia i lixiviació, entre altres. Els rombes representen trituració de material, el número de l'interior indica la mida en mm i el símbol # expressa que es tracta d'un tamís. Les caselles en blanc representen mostra descartada. NEN 7341, DIN 38414 i CEN 12457 són tests de lixiviació; DRX: difracció de raigs X; FRX: fluorescència de raigs X; LOI: pèrdua al foc; S.S. AIGUA: sulfats solubles en aigua; S.S. ÀCID: sulfats solubles en àcid; AQ: anàlisi química.

III.2.2 MÈTODES

Fins fa poc les especificacions tècniques per a la construcció de carreteres no diferenciaven entre àrids naturals i àrids alternatius i aquests darrers eren avaluats a partir d'aquells

materials naturals als quals s'assemblaven més i als quals pretenien reemplaçar. Actualment la tendència és facilitar la incorporació de nous materials i noves regulacions, especialment per a aquells residus que s'utilitzen tradicionalment de manera satisfactòria, com poden ser els àrids reciclats o els siderúrgics. Aquesta incorporació amb regulacions pròpies és encara molt incipient. En el context del tot-u, les noves especificacions controlen paràmetres com l'expansivitat de l'àrid siderúrgic, que es determina mitjançant un procediment d'assaig exclusiu i dissenyat especialment per a aquest material. Però això és un cas especial, i la resta de característiques i propietats s'han d'estudiar seguint els mateixos procediments d'assaigs que els àrids naturals als quals han de substituir.

Per avaluar el potencial d'aquesta possible substitució, s'han de comparar els resultats obtinguts amb els valors característics dels materials naturals seguint els mateixos procediments d'assaig.

Tant l'elecció dels assaigs que s'han de realitzar com els procediments d'assaig –les normes– estan òbviament condicionats pel domini d'aplicació de les escòries. L'estudi dels materials al laboratori és imprescindible per veure si compleixen les característiques exigides pels plecs de prescripcions. Però en aquest treball la intenció és fer una caracterització integral de les escòries en el marc de l'escenari triat (les capes granulars del ferm) i no limitar-se únicament a aquells aspectes que preveuen les especificacions actuals que en controlen l'aplicació.

Cal destacar l'existència d'un projecte de norma europea, PNE-EN 13242, amb títol *Áridos para materiales tratados con ligantes hidráulicos y materiales no tratados utilizados para los trabajos de ingeniería civil y para la construcción de carreteras*, segons l'AENOR (2002). Aquesta norma es pot prendre com a punt de partida, ja que és un recull dels assaigs més rellevants que es realitzen sobre àrids i en funció del resultat numèric de l'assaig els atorga una categoria. De moment aquesta norma es limita a classificar els àrids en diverses categories sense entrar en valoracions.

Val a dir que el rang d'assaigs tampoc no s'ha limitat als recollits a l'esmentat esborrany, sinó que s'ha ampliat la llista per cobrir el màxim d'aspectes possibles.

Els assaigs realitzats es poden estructurar en tres grups (Figura III-4):

- Aquells assaigs que avaluen les propietats inherents a les partícules d'escòria per la seva petrogènesi
- Aquells assaigs que avaluen propietats del material en conjunt i sense compactar, condicionades pel procés de producció (essencialment per l'existència d'un acondicionament posterior)
- Aquells assaigs que avaluen les propietats de les escòries en funcionament, en condicions compactades i assimilables a les del futur escenari: el comportament de l'aplicació

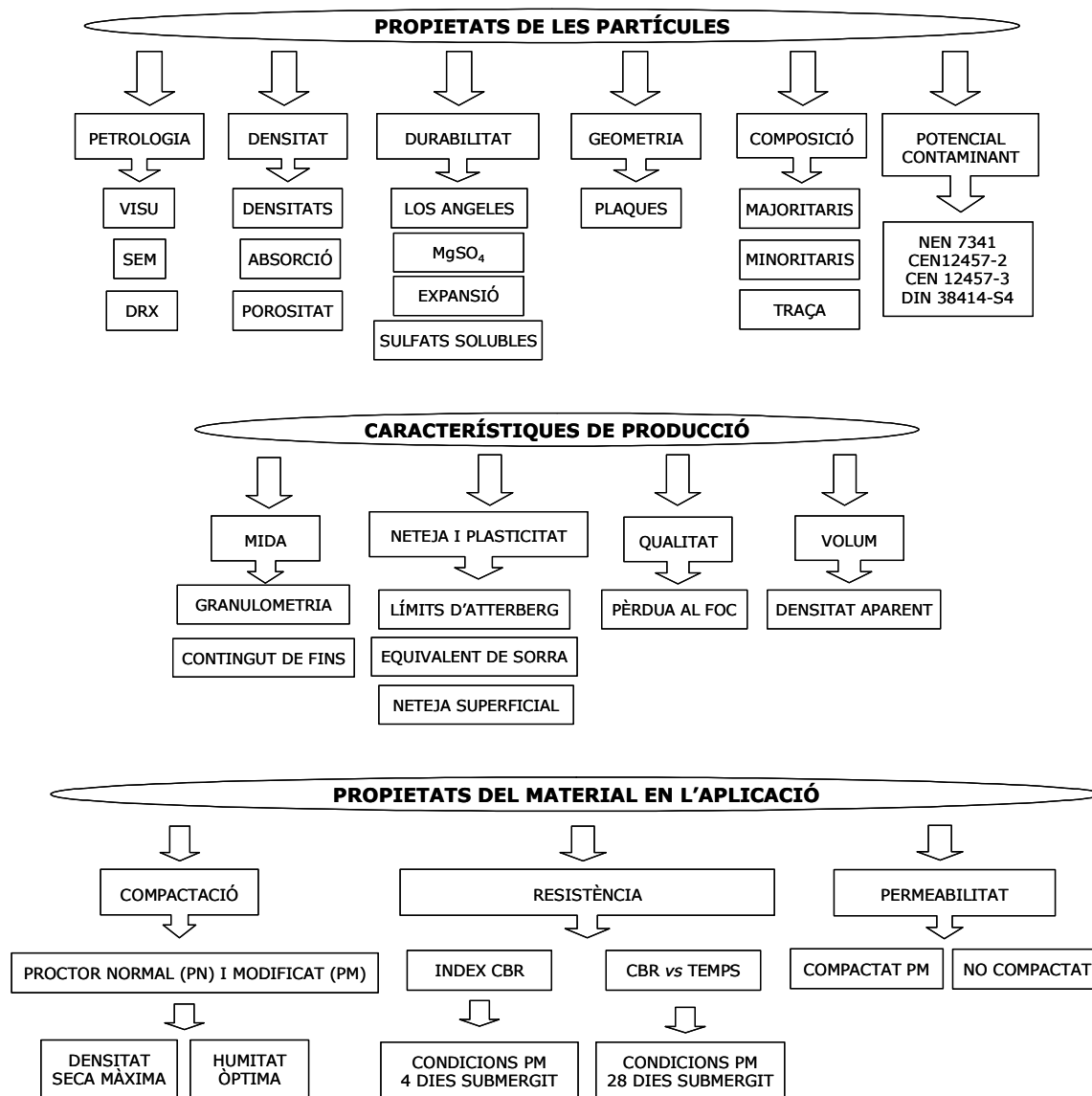


Figura III-4. Assaigs utilitzats per a l'estudi de les propietats de les escòries.

III.2.2.1 Propietats de les partícules

PETROLOGIA

La naturalesa geològica dels àrids es determina mitjançant la descripció petrogràfica. El procediment utilitzat és similar al detallat a la norma UNE-EN 932-3 (*Procedimiento y terminología para la descripción petrográfica simplificada*), però no s'ha seguit perquè aquesta està enfocada a àrids naturals i per tant la nomenclatura no s'adapta a materials secundaris.

Les escòries són un material força heterogeni constituït per components amb característiques diferents. Utilitzant les mostres originals sense moldre i/o mostres mòltes de manera que passin pel tamís de 100 µm, s'han realitzat les anàlisis de caracterització següents:

Morfologia de les partícules

S'ha estudiat la morfologia de les partícules grosses *de visu* i les fraccions més fines (<0.32 mm) amb microscòpia electrònica de rastreig (SEM). L'estudi s'ha dut a terme mitjançant un microscopi electrònic JEOL-JSM840. L'equip té acoblada una sonda EDS que permet fer una anàlisi puntual qualitativa per poder relacionar morfologia i composició de cada un dels constituents de les escòries.

Caracterització mineralògica

La caracterització petrogràfica es completa amb un estudi de les fases minerals presents. La tècnica utilitzada és la difracció de raigs X, emprant un difractòmetre Siemens 501 amb un monocromador de grafit, detector NaI(Tl) i radiació Cu K α . Per a l'estudi mineralògic s'han utilitzat submostres originals moltes (<100 μ m), així com escòries separades en diferents fraccions granulomètriques i també moltes per veure les diferents associacions minerals característiques de cada mida de partícula.

Identificació i quantificació dels constituents

S'han determinat les característiques i la proporció de cada una de les tipologies de material que contenen les escòries i la seva distribució en funció de la mida de la partícula. Les mostres utilitzades per a aquest assaig són les diverses fraccions granulomètriques obtingudes prèviament en l'assaig granulomètric. La reutilització de les mostres de la granulometria presenta l'avantatge que les partícules estan ja separades per fraccions, rentades i netes, fet que en facilita la identificació. La separació dels constituents de cada fracció granulomètrica és visual, de manera que no es pot aplicar a partícules menors d'uns 2 mm a causa de la dificultat de discernir-ne la naturalesa. Un cop separades les partícules corresponents a cada tipus de material, es pesen, ja que la determinació de la contribució de cada constituent al total es realitza en pes.

Les característiques i les quantitats dels constituents permeten avaluar l'impacte de les campanyes de recollida selectiva, l'eficiència de la combustió o de l'extracció de la fracció fèrrica, la qual cosa esdevé una eina per estimar la qualitat del producte. Per altra banda la petrografia condiona moltes característiques físiques, com la fragilitat.

DENSITATS I ABSORCIÓ

La determinació de la densitat de les partícules s'ha fet seguint les normes NLT 153/92 i NLT 154/92, atès que el procediment d'assaig difereix segons si es realitza sobre la fracció fina o la fracció grossa. En ambdós casos s'ha realitzat per duplicat. La nomenclatura de cada una de les densitats divergeix molt segons les normes NLT o les normes UNE antigues i pot donar lloc a confusions, motiu pel qual s'ha decidit utilitzar la nomenclatura proposada per la norma UNE-EN 1097-6, molt més clara. S'han determinat els paràmetres següents:

- Densitat de partícules assecades a l'estufa (correspon a la densitat relativa aparent de la norma NLT)
- Densitat de partícules aparent (correspon a la densitat relativa real de la norma NLT)

- Densitat de partícules amb saturació i assecatge de la superfície de l'àrid (correspon al terme densitat relativa aparent en estat de saturació superfície seca de la norma NLT)
- Absorció d'aigua
- Porositat connectada a l'exterior

La densitat és un paràmetre fonamental a l'hora de valorar les possibilitats de les escòries en aplicacions relacionades amb la construcció, i adquireix una rellevància especial en el càlcul de la dosificació del formigó i de les mescles bituminoses. En el cas de les capes granulars del ferm, també cal conèixer aquest paràmetre per avaluar les densitats que s'adquireixen al camp. La importància dels valors d'absorció d'aigua radica en el fet que la quantitat d'aigua que un àrid pot absorbir pot ser d'alguna manera un indicador de la resistència que mostrarà o, si més no, pot orientar sobre la possibilitat que l'àrid presenti certes susceptibilitats a les glaçades.

GEOMETRIA

Un dels paràmetres per caracteritzar les propietats geomètriques de les partícules és l'índex de plaques (segons la norma UNE-EN 933-3), que indica la proporció de partícules planes, amb una dimensió inferior a les altres dues. Per a l'assaig també s'ha reutilitzat les submostres obtingudes en la granulometria, que ja estan separades per fraccions. Cada fracció granulomètrica s'ha sotmès a un tamissatge sobre un tamís de barres, l'obertura del qual és la meitat de la mida màxima de les partícules de l'esmentada fracció. El % en pes que passa a través del tamís de barres respecte el total és l'índex de plaques, tot i que a la pràctica s'ha observat que dins també s'hi inclouen les agulles.

La geometria de les partícules afecta la seva compactabilitat i la resistència que presentarà la capa un cop compactada. La importància d'aquest índex rau en el fet que la quantitat de plaques ha de ser limitada perquè es poden trencar amb facilitat durant la compactació o sota l'acció del trànsit; les partícules amb una morfologia més cúbica tenen més resistència i, un cop compactat el material, pot crear una matriu més densa. Alhora, una gran proporció de plaques presenta certs problemes en la compactació durant la posada en obra perquè tendeixen a segregar-se. En general, es considera que no s'ha de excedir de l'ordre del 30 % en pes de partícules amb mala forma (Kraemer et al., 1999).

DURABILITAT

L'estudi de la durabilitat presenta algunes limitacions, a causa essencialment de la manca d'assaigs adequats per estudiar l'estabilitat a llarg termini de les escòries. És difícil preveure com evolucionaran durant l'alteració meteòrica, incloent-hi processos químics i físics. El comportament durant l'envelliment no està totalment cobert amb assaigs perquè això no era necessari per a àrids naturals. Els materials alternatius com les escòries, en canvi, poden experimentar reaccions químiques que comportin canvis en l'estabilitat del material. De tota manera, fins i tot en àrids naturals no hi ha cap assaig del qual s'hagi demostrat la validesa per avaluar la durabilitat segons Fookes et al. (1988) i Sampson (1991). Fookes et al. (1991)

proposen aproximació un indicador de durabilitat que estaria en funció de l'absorció, la densitat saturada amb la superfície seca, l'assaig de cristal·lització del sulfat de magnesi i el coeficient d'impacte, que només seria una possible aproximació.

Dins la categoria d'assaigs que avaluen la durabilitat del material s'hi pot incloure la determinació del coeficient de desgast de Los Angeles que pretén fer una estimació de la degradació del material sota les càrregues dinàmiques del trànsit. El material assajat (per duplicat) se sotmet a una combinació d'atrició i impactes de boles d'acer per determinar-ne la resistència intrínseca al desgast i la fragmentació. El coeficient de Los Angeles indica la pèrdua de massa entre el pes inicial i el final, expressat en tant per cent respecte al pes inicial. S'ha seguit la norma NLT 149/91 i la granulometria d'assaig utilitzada ha estat la granulometria B (2.5 kg 10-12.5 mm i 2.5 kg 12.5-20 mm), excepte la mostra del juliol de Sant Adrià, que per la seva granulometria més fina s'ha considerat més representatiu utilitzar la granulometria D (5 kg 2.5-5 mm). El coeficient de Los Angeles reflecteix el percentatge en pes de pèrdua, de manera que com més alts són els valors, més fràgil és el material en qüestió. En general s'accepta que els àrids amb un coeficient <20% són aptes per a qualsevol unitat d'obra, especialment per a capes de trànsit. Per contra, els àrids amb un coeficient més gran de 50% no es consideren adequats per a la construcció de carreteres (Kraemer et al., 1999).

Un altre dels assaigs disponibles que d'alguna manera mesuren possibles alteracions és l'assaig del sulfat de magnesi (UNE-EN 1367-2). Aquest assaig (realitzat per duplicat) pretén simular l'efecte del gel/desgel i, per tant, avalua la potencial degradació d'origen meteòric. El fonament consisteix a sotmetre les partícules d'escòria de 10-14 mm a cinc cicles de cristal·lització i rehidratació del sulfat de magnesi dins els porus de l'àrid mitjançant successives immersions en una solució d'aquesta sal i posteriors assecatges a 105 °C, i quantificar la disgregació produïda pels esforços tensionals repetitius mitjançant un garbellament sobre el tamís de 10 mm; el percentatge de massa retinguda al tamís respecte la massa inicial expressa el valor del sulfat de magnesi i tendeix a estar relacionat amb la capacitat d'absorció de l'àrid, ja que la fragmentació ocorre per les pressions que tenen lloc als porus connectats a l'exterior durant el creixement dels cristalls de sulfat de magnesi. El grau de destrucció depèn de l'estabilitat de l'àrid, però en realitat en aquest assaig es mesura el nombre de partícules friables d'un àrid que hi ha entre la resta de partícules estables, més que no pas el comportament general d'un àrid uniforme (Smith i Collis, 1994). Cal tenir en compte, però, que l'assaig no avalua els efectes de la formació de lletions dins l'estructura del ferm, ja que no s'aplica sobre material compactat.

Les escòries s'han sotmès també a l'assaig de determinació de l'expansivitat d'àrid siderúrgic detallat a la norma UNE-EN 1744-1 per observar eventuais expansions relacionades amb reaccions d'hidratació. El procediment operatori és el mateix: se separa les escòries en diverses fraccions granulomètriques, a partir de les quals es reconstrueix una nova granulometria estandarditzada que permet arribar a altes compacitats. L'únic paràmetre que

s'ha modificat ha estat el pes d'escòria necessari per a l'assaig, atès que té una densitat molt més baixa que l'àrid siderúrgic. De les dues modalitats d'assaigs s'ha triat la de cicle llarg, que consisteix en sotmetre les escòries a l'acció del vapor d'aigua durant 168 hores. Els assaigs es realitzen per duplicat.

Atès que la formació d'ettringita és un fenomen expansiu, s'ha determinat la concentració (per duplicat) de sulfats solubles en àcid i en aigua segons el procediment detallat a la norma UNE-EN 1744-1, a fi de fer una estimació del contingut de sulfats presents i de la fracció més mòbil d'aquests.

COMPOSICIÓ QUÍMICA

Pel que fa a la composició química de les escòries, s'ha determinat la concentració d'elements majoritaris, minoritaris i traça, en total més de 50 elements. Es tracta d'un tret característic dels materials secundaris o reciclats, ja que amb àrids naturals generalment s'acostuma a determinar només el contingut en matèria orgànica i de sulfats.

Els materials analitzats són submostres originals d'escòries moltes (<100 µm), així com diferents fraccions granulomètriques. Les mostres s'han digerit utilitzant un mètode de digestió en dues fases concebut especialment per a l'anàlisi d'elements traça en carbons i en residus de processos de combustió (Querol et al., 1995):

- La primera fase consisteix en la digestió dels elements volàtils de la mostra en un sistema tancat. Es pesen 0.1 g de mostra en una bomba de tefló PFA de 60 mL, s'hi afegeixen 2.5 mL d'àcid nítric i s'escalfa la bomba tancada a 90 °C durant 8 hores. Es recupera la solució i s'hi afegeix aigua (MilliQ, 18.2 MΩ cm), la mescla se centrifuga a 3000 rpm durant 15 minuts i es transfereix a un matràs. Aquesta operació de recuperació, rentatge i centrifugació es repeteix tres cops.
- La segona fase és la digestió dels elements no volàtils. El residu acumulat durant el procés de centrifugació es transfereix un altre cop a la bomba mitjançant l'addició de 7,5 mL d'àcid fluorhídric i 2.5 mL d'àcid nítric i la solució resultant s'escalfa durant 8 hores a 90 °C. A continuació s'hi afegeixen 2.5 mL d'àcid perclòric i es deixa evaporar a la placa calefactora a 250 °C. Un cop sec s'hi afegeixen 2.5 mL d'àcid nítric i es transfereixen al matràs on hi ha la solució obtinguda en la primera etapa de digestió, s'enrasa a un volum de 100 mL amb aigua MilliQ i s'obté una dissolució final amb una concentració d'àcid nítric al 5 %. El patró certificat utilitzat ha estat el City Waste Incineration Ash amb codi CRM 176, una cendra d'incineradora.

Aquest procediment de digestió no és adequat per a la determinació de la sílice perquè en evaporar l'àcid fluorhídric es formen compostos volàtils, i per tant s'ha mesurat directament sobre mostra sòlida amb un espectròmetre de fluorescència de raigs X Phillips.

Al marge del cas específic del silici, les concentracions dels elements majoritaris i d'alguns traça s'han determinat mitjançant espectrometria d'emissió atòmica amb plasma acoblat inductivament (ICP-AES), amb un equip Thermo Jarrell-Ash Iris Advantage Radial ER/S. Per

als elements traça s'ha utilitzat l'espectrometria de masses amb plasma acoblat inductivament (ICP-MS) mitjançant un equip VG-Plasma Quad PQ2. Les condicions analítiques utilitzades són les definides per Querol et al. (1995).

D'altra banda, per a la determinació de la concentració de mercuri s'ha utilitzat un analitzador de mercuri AMA-254, en el qual es descompon la mostra per combustió a 750 °C, i els productes de la descomposició són arrossegats fins a un amalgamador per sotmetre'ls a un atrapament selectiu de mercuri.

LIXIVIACIÓ

La legislació europea està menys avançada en el camp de l'avaluació de les propietats ambientals dels materials alternatius respecte a la gran disponibilitat de procediments per analitzar les propietats mecàniques. Tot just a finals del 2002 han aparegut les primeres normes de lixiviació d'abast europeu, la norma CEN-12457, que inclou quatre variants del procediment d'assaig lleugerament diferents.

És evident que la concentració dels productes potencialment perillosos en les escòries no constitueix en cap cas la mesura del risc ambiental que la seva aplicació pot comportar. El possible impacte ambiental depèn de les fases minerals presents, l'estat d'alteració, la mobilitat o les propietats de cada un dels components, l'alcalinitat del material, les propietats complexants del lixiviat i la temperatura, entre altres factors.

Els tests de lixiviació seleccionats són els que s'utilitzen en alguns països europeus per a materials granulars que es destinaran a aplicacions sense lligant. Les mostres analitzades són submostres d'escòries, així com diverses fraccions granulomètriques d'escòries per avaluar la lixivibilitat de cada fracció. Tots els tests s'han realitzat per duplicat, i les seves característiques es recullen a la Taula III-3.

Taula III-3. Particularitats dels tests de lixiviació realitzats sobre escòries.

	<i>NEN 7341</i>	<i>DIN 38414-S4</i>	<i>CEN 12457-2</i>	<i>CEN 12457-3</i>
Tipus	disponibilitat	per lots	per lots	per lots
Mida de partícula	<125 µm	<10 mm	<4 mm	<4 mm
Agent lixiviant	HNO ₃ 1M	Aigua MilliQ	Aigua MilliQ	Aigua MilliQ
Agitació	oberta, magnètica	tancada	tancada	tancada
Quantitat de mostra	0.016 kg	0.100 kg	0.100 kg	0.100 kg
Relació líquid/sòlid	100 L/kg acumulada	10 L/kg	10 L/kg	10 L/kg acumulada
Extraccions	2	1	1	2
Duració	3 h + 3 h	24 h	24 h	6 h + 18 h
Mostra	global	global + fraccions	global + fraccions	global

Tests de disponibilitat

S'ha seguit el procediment definit per la norma holandesa NEN 7341. Es tracta d'un test realitzat amb el material finament mòlt i amb un pH controlat, per determinar el màxim alliberament possible de contaminants. Es treballa a una relació líquid/sòlid (L/S d'ara en

endavant) acumulada de 100 L/kg (50 L/kg a cada fase), prou elevada per minimitzar les limitacions de solubilitat. S'aplica una agitació oberta de la mostra amb una dissolució d'àcid nítric que cal anar afegint per controlar un pH de 7 durant tres hores, amb l'objectiu d'optimitzar la lixiviació d'espècies oxianióniques. La segona extracció es realitza a un pH de 4 durant 3 hores més d'agitació, reproduint el pH límit inferior que s'acostuma a trobar en la natura. Es pot donar el cas d'ambients amb pH més àcids, com aigües de drenatge de dipòsits amb sulfurs, però aquests escenaris no s'acostumen a triar per a la valorització de residus (van der Sloot, 1991). Aquest test permet determinar la màxima lixivibilitat de cada un dels components de les escòries i es considera que indica quina fracció del total podria ser lixiviable en un llarg període de temps que s'estima entre 1000 i 10000 anys, excepte per a les espècies mòbils com les sals molt solubles (per exemple NaCl), per a les quals el marc temporal es redueix a alguns anys (Kosson et al., 1996; Chandler et al., 1997; Crannell et al., 2000). D'altra banda, a partir del consum d'àcid nítric per mantenir els pH es pot calcular la capacitat de neutralització àcida de la mostra.

Amb l'objectiu de determinar els canvis mineralògics que han experimentat les escòries durant el test i identificar les espècies sensibles als canvis de pH, s'han fet difraccions de raigs X del sòlid restant de la lixiviació, que prèviament s'ha assecat a 50 °C (per evitar canvis de fases) durant unes 72 hores.

Tests per lots d'una extracció

Es tracta d'un test de lixiviació sense control de pH en el qual la mostra és agitada en un recipient tancat amb aigua MilliQ durant 24 hores. S'utilitza una relació L/S de 10 L/kg. S'ha seguit la norma alemanya DIN 38414-S4. Cal destacar que a Catalunya aquest test és normatiu, la seva execució està prevista a l'Ordre de 15 de febrer de 1996 sobre valorització d'escòries per definir si una escòria es valoritzable o no (capítol I). A més, mitjançant aquest test es mesura la fracció soluble, un paràmetre que també s'utilitza com a criteri de valorització d'escòries. D'altra banda, també s'ha realitzat el test CEN 12457-2, molt similar al DIN 38414 però amb l'única diferència de la dimensió màxima del residu que s'ha d'assajar: en el DIN 38414 és de 10 mm, i la fracció que queda retinguda en el tamís s'ha de triturar fins que passi més del 95 % en pes. En el cas de la norma CEN 12457-2, la mida màxima és de 4 mm.

Test per lots de dues extraccions

El test CEN 12457-3 s'inicia introduint la mostra en un recipient amb aigua MilliQ amb una relació L/S de 2 L/kg i s'agita durant 6 hores; un cop transcorregudes es filtra la primera extracció i es retorna la mostra a l'envàs, que s'omple d'aigua fins a arribar a una relació L/S acumulada de 10 L/kg. És a dir, en aquesta segona fase es treballa amb una relació L/S de 8 L/kg, i s'agita durant 18 hores per completar el cicle de 24 hores. Malgrat que la norma recomana canviar el recipient a cada fase, en aquest cas s'ha utilitzat la mateixa ampolla per minimitzar les pèrdues de material que resta adherit a l'interior. Els resultats s'expressen com a quantitats (mg/kg) lixiviables a una relació L/S de 2 L/kg i quantitats lixiviables acumulades

a una relació L/S de 10 L/kg. Aquestes relacions s'interpreten generalment com els patrons d'alliberament a curt i a llarg termini, respectivament.

Els tres assaigs de lixiviació es complementen i permeten caracteritzar les propietats i el comportament de les escòries davant diverses condicions de lixiviació. En general, es considera que la lixiviació al laboratori es pot utilitzar per donar una estimació conservativa del costat de la seguretat, ja que en molts casos se sobreestima la lixiviació real (ALTMAT, 2001).

Dels lixiviats obtinguts i ja filtrats se n'ha mesurat el pH i la conductivitat; una porció s'ha acidificat a l'1 % d'àcid nítric per evitar la precipitació d'elements. Per a la determinació de la composició química dels lixiviats s'ha utilitzat ICP-AES per als elements majoritaris i ICP-MS per als traça, seguint el mateix procediment descrit anteriorment. L'anàlisi d'anions s'ha dut a terme sobre la fracció no acidificada de lixiviats i s'ha utilitzat la cromatografia iònica (injector automàtic Kontron-465, detector de conductivitat Wescan, detector d'UV/V Kontron 332 i columna Waters IC-PAK anions).

Adicionalment s'ha determinat la fracció soluble de les escòries i de les seves fraccions granulomètriques seguint el procediment estipulat a l'Ordre sobre valorització d'escòries. El fonament consisteix en introduir en un recipient una porció de lixiviat (d'uns 45 mL aproximadament), pesar-lo i evaporar el líquid a una placa calefactora fins que restin uns pocs mil·límetres, moment en el qual s'introdueix a l'estufa a 105 °C fins a pes constant. La diferència de pes, referida al pes d'escòria utilitzada en la lixiviació, al volum de lixiviat emprat en la determinació d'aquest paràmetre i el volum total de lixiviat obtingut en la lixiviació (noteu que, per tant, cal filtrar tot el lixiviat), indica el % en pes de fracció soluble.

III.2.2.2 Propietats relacionades amb el procés de producció

MIDA DE LES PARTÍCULES

Dins la mida de les partícules s'emmarca l'estudi de la distribució granulomètrica que mostren les escòries i el contingut de fins, entès com aquella proporció del material que passa pel tamís de 63 µm. El contingut en fins és una consideració important perquè aquesta fracció pot crear problemes de durabilitat per la seva absorció i, a més, sol presentar nivells superiors d'elements lixiviables. La distribució de la mida de partícula dels fins s'ha estudiat mitjançant la tècnica de granulometria làser, amb un aparell Malvern Mastersize i utilitzant com a medi dispersant un bany d'alcohol etílic per evitar dissolucions de fases solubles.

La granulometria necessària per a cada unitat d'obra està prevista als plecs de prescripcions i s'expressa en forma de fusos continus dins els quals s'ha d'encabir la corba granulomètrica del material considerat. És recomanable una granulometria contínua, amb àrids de totes les mides: si hi ha un excés de fins, no tindrà estabilitat; per contra, si hi ha una manca de fins, la capa serà molt porosa i es requeriran fins addicionals per reomplir els espais intersticials i

adquirir una bona estabilitat. Alhora, la falta d'àrids de mides intermèdies pot provocar una segregació.

La granulometria és una de les característiques més importants, ja que una granulometria adequada garanteix facilitat per compactar correctament el material i per assolir la màxima compacitat, alhora que confereix a la capa una bona estabilitat per suportar i distribuir les càrregues del trànsit imposades.

El procediment d'assaig s'ha realitzat a partir de les normes NLT 150/89 per a les mostres d'escòries de l'estudi preliminar i l'UNE-EN 933-1 per a les escòries de les tres plantes incineradores seleccionades, utilitzant la columna de tamisos sèrie bàsica + sèrie 2, especificades a la norma UNE 146130. El tamisatge es realitza sobre la sorra i la grava per separat, fent una separació preliminar de la mostra inicial en dues fraccions, de manera que la mostra >5 mm oscil·la entre els 5 i 7 kg. La fracció <5 mm que resta en la separació és de més de 6 kg i se sotmet a quarteigs successius mitjançant un quarterador de mida mitjana (combinant divisió en meitats i en tres quarts) per reduir la quantitat fins a obtenir una mostra representativa de 600 g d'àrid fi. El contingut en fins, és a dir, la fracció <63 μm i fracció <80 μm segons la norma UNE i NLT, respectivament, es determina per diferència de pes mitjançant un rentatge sobre el tamís corresponent. El tamisatge de cada fracció es dona per acabat quan cau menys d'un 1 % de la massa que queda retinguda després de realitzar un tamisatge manual durant un minut. La corba granulomètrica es reconstrueix a partir de les masses retingudes a cada tamís de les dues columnes de tamisos, la de l'àrid gros i la de l'àrid fi, així com la quantitat de fins eliminats en el rentat.

Un cop obtinguda la corba s'han determinat per a cada escòria els valors dels coeficients de concavitat i de curvatura, que donen informació sobre la bona graduació del material. Els paràmetres obtinguts en l'anàlisi granulomètrica, juntament amb els esmentats coeficients i els límits d'Atterberg, permeten classificar les escòries. Les classificacions consisteixen, de fet, en la divisió sistemàtica dels diferents tipus de sòls en una sèrie de grups amb característiques geomecàniques similars. Els diversos tipus de classificació són molt útils per avaluar de manera ràpida, aproximada i econòmica les característiques i propietats dels materials utilitzats a l'obra.

NETEJA I PLASTICITAT

La neteja i la plasticitat són paràmetres que indiquen la sensibilitat a la humitat d'un àrid. És fonamental que la superfície de les partícules estigui neta, ja que una capa granular d'àrids amb una neteja deficient pot desenvolupar sensibilitats a l'acció de l'aigua. El grau de neteja es qualifica a partir del coeficient de neteja superficial, i el procediment d'assaig seguit es detalla a la norma UNE 146130. Aquest assaig és específic per a àrids superiors a 2 mm destinats a l'ús en carreteres. Consisteix a separar per rentatge sobre un tamís les partícules inferiors a 0,5 mm que estan mesclades o adherides a la superfície dels àrids. Posteriorment

es calcula el percentatge de massa d'aquestes partícules, considerades impureses, referit a la mostra seca total assajada.

L'assaig de l'equivalent de sorra pretén fer també una estimació del grau de neteja, en aquest cas de l'àrid fi (mida sorra). S'introdueix la mostra en una proveta graduada amb una petita quantitat de solució floculant i s'agita per desenganxar el recobriment argilós de les partícules de sorra. A continuació s'irriga la sorra amb solució floculant addicional per afavorir la suspensió de les partícules fines per sobre de la sorra. Després d'un temps de repòs, es mesura l'alçada total del sediment + fins floculats i l'alçada de sorra. El procediment seguit és el d'NLT 113/87, i es realitza per triplicat. Es tracta d'un assaig molt utilitzat en control de qualitat en obra, ja que permet detectar ràpidament un excés de fins i comprovar la uniformitat de subministrament d'una planta de fabricació d'àrids.

Les prescripcions generals exigeixen que els fins tinguin una plasticitat limitada o pràcticament nul·la, precisament per garantir que no apareixerà cap mena de sensibilitat a la humitat que pugui induir desestabilitzacions en les capes del ferm. La plasticitat s'avalua mitjançant els límits d'Atterberg. S'ha avaluat la possible plasticitat de les escòries seguint la norma UNE 103104, amb la fracció <0,4 mm.

QUALITAT DEL PROCÉS

La qualitat del procés d'incineració es pot mesurar en termes de pèrdua al foc, entès com el percentatge de pèrdua de massa d'un material en sotmetre'l primer a 105 °C (per determinar la humitat) i després a 500 °C (per determinar la matèria orgànica). En aquest rang de temperatures la pèrdua de massa s'atribueix essencialment a la combustió de la matèria orgànica, ja que per sota de 105 °C es produeix l'evaporació de la humitat del material, i per sobre de 500 °C les pèrdues es podrien deure a la descomposició de la calcita (particularment abundant a les escòries) que té lloc al voltant dels 900 °C. Es considera que la pèrdua al foc determinada en aquest rang de temperatures expressa la quantitat de matèria orgànica que queda residual a les escòries malgrat que han passat per una combustió a uns 1000 °C, de manera que és un indicador de l'efectivitat del procés de combustió de cada una de les plantes incineradores.

De tota manera a 500 °C sí es descomponen alguns carbonats marginals i alguns sulfats, i es perd aigua estructural de diverses espècies, motiu pel qual cal tenir precaució a l'hora d'interpretar els resultats, malgrat que s'accepta que les pèrdues corresponen únicament al material combustible no incinerat i són un reflex de la qualitat de la incineració.

Per expulsar tota la humitat es requereix que la mostra estigui a 105 ± 5 °C durant 24 h fins a pes constant. A fi de determinar la pèrdua a 500 °C s'introdueix la mostra seca a la mufla fins a atènyer el pes constant (generalment són suficients unes 4-5 hores). L'assaig s'ha realitzat per duplicat i amb la mostra finament triturada, no tan sols per augmentar la representativitat del material d'assaig; d'aquesta manera s'evita que les bombolles de gas

atrapat a les vesícules d'algunes partícules esclatin en escalfar-se, amb la consegüent pèrdua de mostra (Chandler et al., 1997). La pèrdua al foc a 500 °C està inclosa en l'Ordre sobre valorització d'escòries com a criteri de valorització.

VOLUM

S'ha estudiat la densitat aparent de les escòries sense compactar, el volum que ocupa una pila d'escòries seques de massa determinada, mesurat seguint el procediment establert a la norma UNE-EN 1097-3, ja que aquest paràmetre té rellevància de cara a la seva comercialització, per estimar els costos de transport, per quantificar les piles emmagatzemades, etc. L'assaig s'ha dut a terme per triplicat i s'ha utilitzat com a recipient un motlle cilíndric de formigó, que compleix les característiques geomètriques estipulades per la norma. Per al calibratge del volum del motlle amb aigua a 20 °C s'han segellat les juntes amb silicona per evitar fuites de líquid i s'ha utilitzat una placa de vidre per expulsar l'excés d'aigua.

Cal ressaltar que la seva densitat aparent difereix de les dels àrids naturals per diverses raons, una de les quals és que es tracta d'un àrid a mig camí entre convencional i lleuger. El límit segons el projecte de norma PNE-EN 13242 està fixat en 1200 kg/m³.

III.2.2.3 Propietats del material en l'aplicació

COMPACTABILITAT

La compactabilitat d'un material granular s'avalua habitualment a partir de l'assaig de piconament de Proctor, que consisteix a compactar el material confinat en un motlle de dimensions determinades sota la caiguda lliure d'una maça. Amb aquest assaig es traça una corba d'humitat/densitat seca, de la qual s'obtenen dos paràmetres: la densitat seca màxima, que correspon a la màxima densitat de compactació que el sistema pot atènyer, i la humitat òptima, la humitat que possibilita que s'arribi a la densitat seca màxima. L'assaig s'ha realitzat seguint les normes NLT 107/98 i NLT 108/98, corresponents al Proctor normal i al Proctor modificat, respectivament. L'ús de cada un s'adapta al tipus d'obra: el modificat és el més comú en capes granulars i suposa una energia de compactació 4.5 cops més gran que el normal, l'aplicació del qual és més estesa en l'àmbit dels sòls.

No s'ha fet per duplicat però s'ha utilitzat una mostra diferent per obtenir cada punt de la corba, no tan sols per augmentar la representativitat dels resultats sinó perquè la reutilització, tot i que tolerada per les normatives, suposaria una modificació de la granulometria.

CAPACITAT PORTANT: CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

L'assaig CBR (*California bearing ratio*) és l'assaig més utilitzat a tot el món per fer una estimació de la capacitat de suport, la resistència i l'estabilitat d'un sòl o material granular

compactat. És un assaig de penetració que, addicionalment, permet mesurar eventuais expansions en submergir el material durant quatre dies. L'índex CBR expressa la proporció entre la càrrega necessària perquè un pistó penetri una certa profunditat a velocitat constant en el material compactat i la pressió corresponent a la mateixa penetració en una mostra patró (Kraemer et al., 1999), una grava de bona qualitat.

La determinació de l'índex CBR s'ha fet seguint les instruccions de la norma NLT 111/87, segons la qual es preparen tres provetes compactades al 100 % de la densitat obtinguda amb el Proctor modificat, se submergeixen durant 96 hores i se'ls col·loca una sobrecàrrega anular de 4.54 kg a sobre per simular les condicions de camp. Es considera que cada 15 cm de gruix de ferm convencional es correspon a un d'aquests anells de pes normalitzat. Un rellotge mesurador de deformacions verticals col·locat sobre un tríode llegeix els inflaments que es poden produir durant la immersió, l'objectiu de la qual és simular les pitjors condicions possibles.

És una pràctica molt habitual fabricar provetes compactades amb la humitat òptima definida per l'assaig de Proctor però cada una de les tres amb diferents densitats, aplicant diferents energies de compactació, com per exemple del 25 %, 50 % i 100 % respecte a les del Proctor modificat (s'aconsegueix exercint menys cops de maça per capa). D'aquesta manera es pot traçar una corba CBR/densitat seca que permet calcular el CBR real si la compactació a l'obra ha esta defectuosa. En el cas de les escòries, però, per a cada mostra s'han compactat les tres provetes amb les mateixes condicions del Proctor modificat, perquè s'ha prioritzat l'anàlisi de la variabilitat i la dispersió de l'índex CBR.

De manera experimental, s'han fabricat tres provetes d'escòries mostrejades el juliol del 2001 a la planta de Tarragona amb les condicions del Proctor modificat i s'ha aplicat un període d'immersió de 28 dies per veure l'evolució del CBR amb el temps, detectar possibles degradacions que comportin pèrdues de la resistència a l'esforç tallant i l'estabilitat i observar l'aparició i evolució dels possibles inflaments. També s'ha aplicat una sobrecàrrega anular de 4.54 kg per reproduir les condicions tan fidelment com sigui possible, amb l'objectiu d'avaluar la durabilitat de les escòries en condicions de saturació i des d'una perspectiva mecànica.

PERMEABILITAT

Dins l'àmbit de les propietats hidràuliques, una de les més importants és la permeabilitat, substancialment diferent segons que el material estigui compactat o no. Els valors de la permeabilitat, especialment en materials compactats, poden donar una idea de l'estat de saturació al qual es pot arribar en el ferm i del gradient hidràulic del sistema. L'interès de l'estudi del flux rau en la relació que té amb el moviment de contaminants al sòl, així com en la capacitat del material per drenar l'aigua.

S'ha estudiat la conductivitat hidràulica de les escòries en dos estats completament diferents: compactades a una densitat comparable a la Proctor i no compactades.

Permeabilitat d'escòries compactades

Les escòries s'han compactat a una densitat equiparable a la que es pot aconseguir a l'obra. La compactació ha estat estàtica, mitjançant una premsa. El motlle té una alçada de 14.7 cm i un diàmetre de 15.2 cm, amb una entrada d'aigua per la base protegida per una placa porosa. La tapa del motlle té incorporada una membrana que es connecta a una entrada d'aire a pressió i permet inflar-la de manera que s'exerceix una càrrega vertical regulable. Aquesta càrrega s'aplica per evitar eventuais moviments i desplaçaments de la mostra a causa de la pressió d'aigua exercida per la base, de manera que se'n dificulta el pas. Les càrregues s'apliquen inflant la membrana encaixada sobre la mostra, ja que li transmet l'esforç desitjat. La circulació del flux és ascendent a fi d'evitar la formació de bombolles d'aire. La tapa té una sortida per on s'expulsa l'aigua que circula a través de la mostra. La Figura III-5 mostra un esquema del motlle.

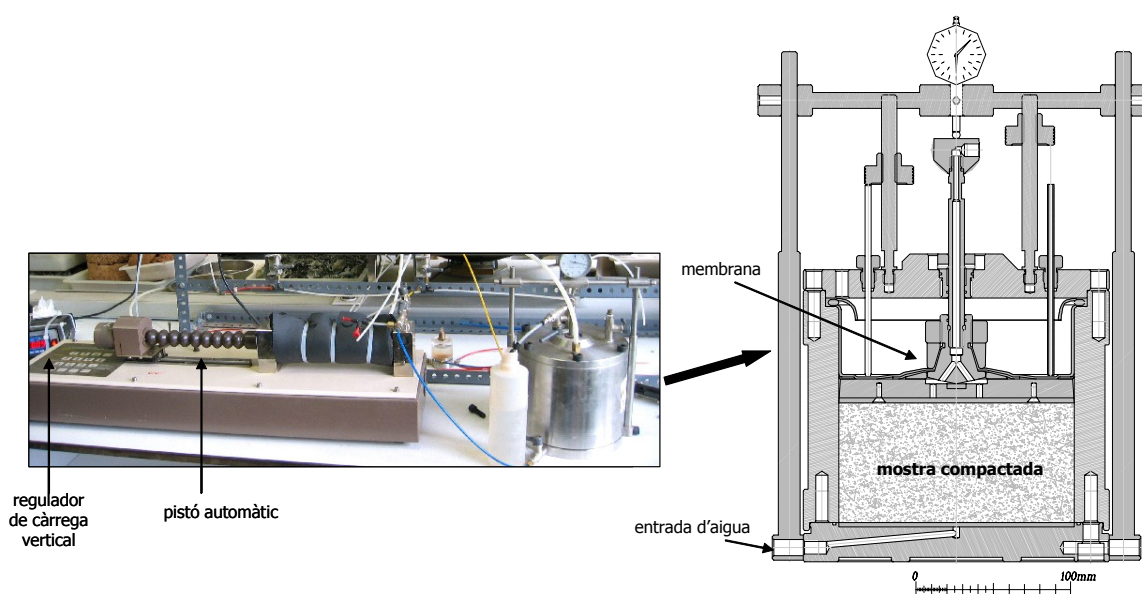


Figura III-5. Instal·lació emprada per mesurar la permeabilitat de les escòries compactades.

L'entrada d'aigua es realitza mitjançant un pistó automàtic GDS Instruments Ltd. controlat per un motor pas a pas, que permet regular la pressió o el volum d'aigua. Permet un control de pressió de 0 a 2000 kPa amb una resolució d'1 kPa i un control del volum d'aigua de fins a 0.5 mm³. En aquest cas s'ha treballat amb un cabal constant d'entrada a la base de la mostra de 500 mm³/s i l'equip ha registrat la pressió d'aigua que cal exercir per mantenir aquest cabal constant malgrat les variacions de càrrega vertical exercida per la membrana. L'experiment es regeix per la llei de Darcy (III-1):

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h} \quad (\text{III-1})$$

La pressió d'aigua mesurada es determina en kPa, que es tradueixen en cm d'alçada de columna d'aigua (1kPa = 10.01 cm). Així, coneguts Δh , Q (cabal constant de 0.500 cm³/s), L

(l'alçada de la mostra un cop compactada) i A (secció de la mostra, calculada amb les dimensions del motlle), s'obté el valor de la permeabilitat (K) en cm/s, i corresponent a la càrrega vertical aplicada en cada cas.

Permeabilitat d'escòries sense compactar

Com que es tracta d'un material granular sense compactar, l'assaig de permeabilitat sí que està normat, i el procediment es recull a la norma UNE 103403. El fonament de l'experiment és el mateix, però aquest cop el permeàmetre és una columna transparent on s'allotja el material solt i està connectat a tres tubs piezomètrics als quals es mesuren les variacions en l'alçada d'aigua.

III.3 FASE EXPERIMENTAL AL CAMP

La construcció d'un tram experimental amb la possibilitat de fer-ne un seguiment exhaustiu té una importància cabdal en la determinació del potencial que presenten les escòries com a substituïts d'àrids naturals en capes granulars del ferm i, en definitiva, en qualsevol aplicació en l'àmbit de la construcció.

Diversos estudis comparatius, com els recollits en el projecte ALTMAT (2001), evidencien que el comportament dels àrids alternatius com les escòries és significativament diferent del que mostren els àrids naturals, però de moment no hi ha les eines necessàries per avaluar exhaustivament aquestes diferències. Aquest desconeixement s'accentua quan s'intenta extrapolar les dades obtingudes al laboratori a les que teòricament serien esperables al camp. Són molt poques les experiències prèvies en ús d'escòries en carreteres de les quals es tingui una perspectiva temporal prou llarga i en general es limiten a ser estudis del comportament geotècnic *in situ*, prescindint en la majoria dels casos dels aspectes ambientals.

La rellevància d'una experiència d'aquest estil radica precisament en el fet que ofereix la possibilitat de contrastar les dades de laboratori amb les reals, ja que és impossible reproduir fidelment les condicions reals al laboratori. Aquesta limitació és especialment important en l'estudi de la lixiviació. Les previsions obtingudes al laboratori no reproduïxen ni les condicions reals de l'escenari (temperatura, precipitacions, esplanada, trànsit, etc.) ni les condicions reals en què es presenten les escòries (diferent granulometria, compactació o grau de saturació, per exemple). Una altra de les limitacions és que es mesuren les propietats de manera puntual, individualment i fora del context en què s'utilitzaran, mentre que en realitat totes les característiques s'interfereixen i s'interrelacionen. En aquest sentit, possiblement alguns aspectes són negligits i d'altres sobreestimats. Potser seria desitjable desenvolupar nous assaigs més relacionats amb el funcionament d'un material dins un ferm i que tinguin en compte tot el sistema.

III.3.1 CARACTERÍSTIQUES DEL TRAM EXPERIMENTAL

El tram experimental en qüestió es va construir el novembre de l'any 2001 amb escòries de la planta incineradora de Mataró. Aquestes escòries, com ja s'ha exposat al capítol I, són traslladades a les Pedreres Rusc, una planta de tractament on se sotmeten a un acondicionament. El volum de material emmagatzemat en les instal·lacions de Rusc garanteix una quantitat suficient per a la construcció d'aquest tram.

L'emplaçament se situa al terme municipal de Tagamanent, a la comarca del Vallès Oriental, just al límit amb el parc natural del Montseny. Es tracta d'un camí rural sense cap tipus de pavimentació que connecta dues urbanitzacions però que gairebé no era utilitzat pels veïns a causa d'una superfície molt irregular, especialment en època de pluges. Aquest fet és atribuïble a la inestabilitat del sòl argilós, d'intens color vermell. Les fàcies presents a la zona corresponen al Buntsandstein, amb una alternança de gresos i argiles vermelles. La Figura III-6 mostra la localització geogràfica del tram.

La construcció i el seguiment del tram experimental formen part d'un projecte que té més abast que aquesta tesi i consisteix a provar diverses solucions tècniques de pavimentació econòmica i ecològica de vies amb trànsit de baixa intensitat, així com un cas hipotètic de reparació de sots. La pavimentació econòmica i ecològica suposa la introducció de subproductes i una posada en obra amb maquinària convencional, via compactació amb corró vibrant. Totes les possibilitats proposades inclouen escòries com a constituent de diferents unitats d'obra i es poden subdividir en tres grans trams d'experimentació:

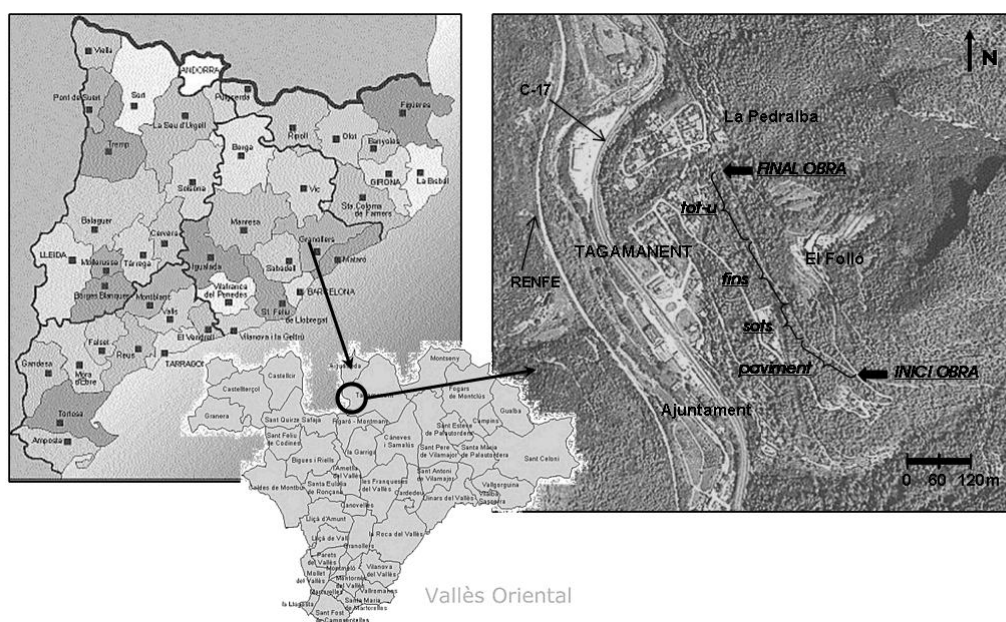


Figura III-7. Localització geogràfica del tram experimental de camp de Tagamanent.

Pavimentació de tota la superfície (tram marcat com a *paviment* a la Figura III-6)

En total es van construir 125 m de paviment amb lloses adjacents de diferent naturalesa o gruix, amb l'objectiu d'estudiar-ne el comportament mecànic i la resposta al trànsit. Tant el formigó com la grava-ciment contenen escòries només >5 mm, mentre que la fracció sorra és àrid natural. Les diverses solucions són, de sud a nord, les següents (Figura III-7):

- 25 m de paviment de formigó amb àrid natural compactat amb corró, gruix de 15 cm
- 25 m de paviment de formigó amb escòries compactat amb corró, gruix de 10 cm
- 25 m de paviment de formigó amb escòries compactat amb corró, gruix de 12 cm
- 25 m de paviment de formigó amb escòries compactat amb corró, gruix de 15 cm
- 25 m de grava-ciment amb escòries compactada amb corró, gruix de 15 cm

Reparació local de sots (tram marcat com a *sots* a la Figura III-6)

Inclou l'excavació de diversos sots de poc menys de 4 m d'ample per 5 m de llarg aproximadament, cada un dels quals s'ha reomplert amb diversos materials. La separació entre els sots és de 3 m. El tret més significatiu és la instrumentació d'alguns dels sots, instal·lant al fons de les cubetes tubs de recollida dels lixiviats generats per la infiltració de les aigües de pluja. Les solucions de reparació de sots construïdes, de sud a nord, es representen a la Figura III-8 i són les següents:

- un sot instrumentat de grava-ciment amb escòries
- dos sots instrumentats d'escòries com a material granular compactat i sense lligar
- un sot sense instrumentar d'escòries com a material granular compactat i sense lligar
- un sot instrumentat de referència, amb àrids naturals de naturalesa calcària
- un sot sense instrumentar de grava-ciment amb escòries
- dos sots sense instrumentar de formigó amb escòries

Extensió del rebuig (tram marcat com a *finis* a la Figura III-6)

Tant el formigó com la grava-ciment només contenen la fracció 5/20 de les escòries, mentre que la fracció <5 mm es va descartar i reemplaçar per àrids naturals. Això va generar un rebuig important, constituït per la mescla de les fraccions <5 mm i >20 mm, que es va decidir aprofitar per acabar de condicionar el camí. Es va estendre formant una capa d'uns 10 cm de gruix.

Extensió del tot-u (tram marcat com a *tot-u* a la Figura III-6)

Un cop utilitzat tot el rebuig d'escòria, encara restava un petit tram sense condicionar, que es va cobrir amb un tot-u calcari.

Els sots d'escòries i el del material de referència són els sots que han estat objecte d'estudi d'aquesta tesi. Els detalls d'un dels sots d'escòries instrumentats es poden veure al bloc diagrama de la Figura III-9. La cubeta s'excava directament sobre el substrat i es revesteix d'un teixit asfàltic per impermeabilitzar la base. Al fons de la cubeta s'hi situa un tub amb perforacions que travessa tot el sot i desemboca al voral (encerclat en taronja a la imatge superior esquerra de la Figura III-9), on es connecta, mitjançant un sistema de reduccions, una mànega que condueix els lixiviats a un bidó de polietilè (imatge inferior esquerra de la Figura III-9). El bidó s'allotja en una arqueta de formigó adossada al marge de la carretera i té una capacitat de 30 L. A la tapa del bidó s'hi han fet dues perforacions, una per connectar la mànega i una altra per instal·lar-hi un purgador d'aire.

A diferència del tram de pavimentació contínua, els sots no s'han deixat a la vista, sinó que s'ha estès a sobre una capa compactada de tot-u de naturalesa calcària de 15 cm de gruix. La bona compactació de la capa superior de tot-u calcari pot produir escolaments però difícilment evitarà la infiltració i percolació d'aigua de pluja a través de les capes amb escòria. Així, els tubs situats al fons de les cubetes excavades permeten recollir i controlar l'evolució dels lixiviats. Aquesta experiència és, almenys a Catalunya, pionera pel que fa al control de la lixiviació en capes de residus.

Prèviament a la construcció es va caracteritzar físicament i mecànicament la mostra que s'utilitzaria en l'obra per determinar diversos paràmetres importants com la humitat òptima (determinada mitjançant el Proctor modificat) o les dosificacions del formigó i la gravament.

III.3.2 EXECUCIÓ DE L'OBRA

La construcció de la carretera experimental la va fer l'empresa Leiro del 27 al 30 de novembre de 2001. L'execució en si mateixa va aportar informació molt valuosa sobre el comportament de les escòries durant la seva posada en obra, la seva facilitat de compactació i d'extensió o les possibles segregacions; en definitiva, sobre la seva treballabilitat. Les particularitats del procés constructiu del tram es detallen a continuació, amb les imatges i el text corresponent de les Figures III-10 a III-21, que il·lustren els esdeveniments.

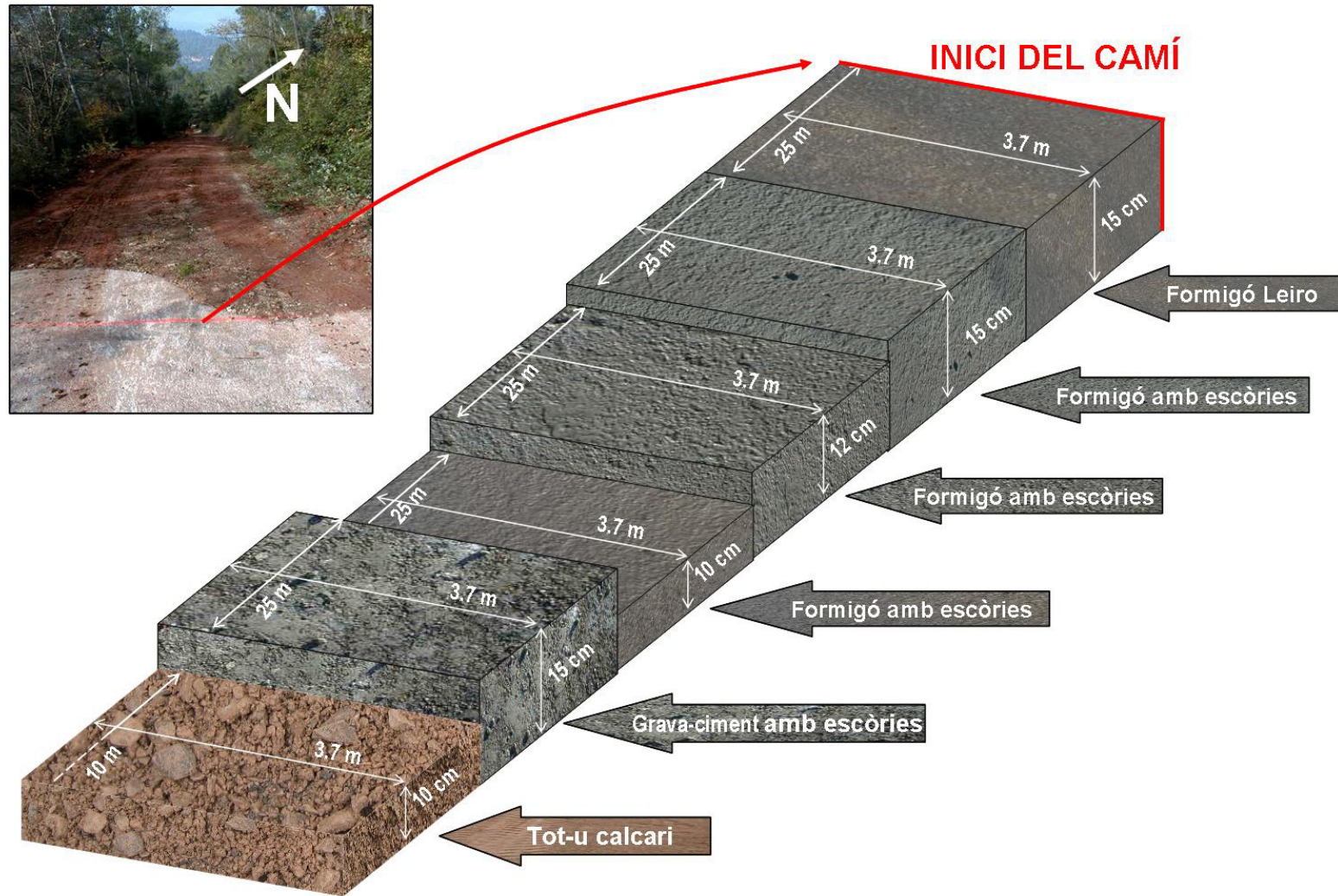


Figura III-7. Solucions aplicades al tram de pavimentació contínua.

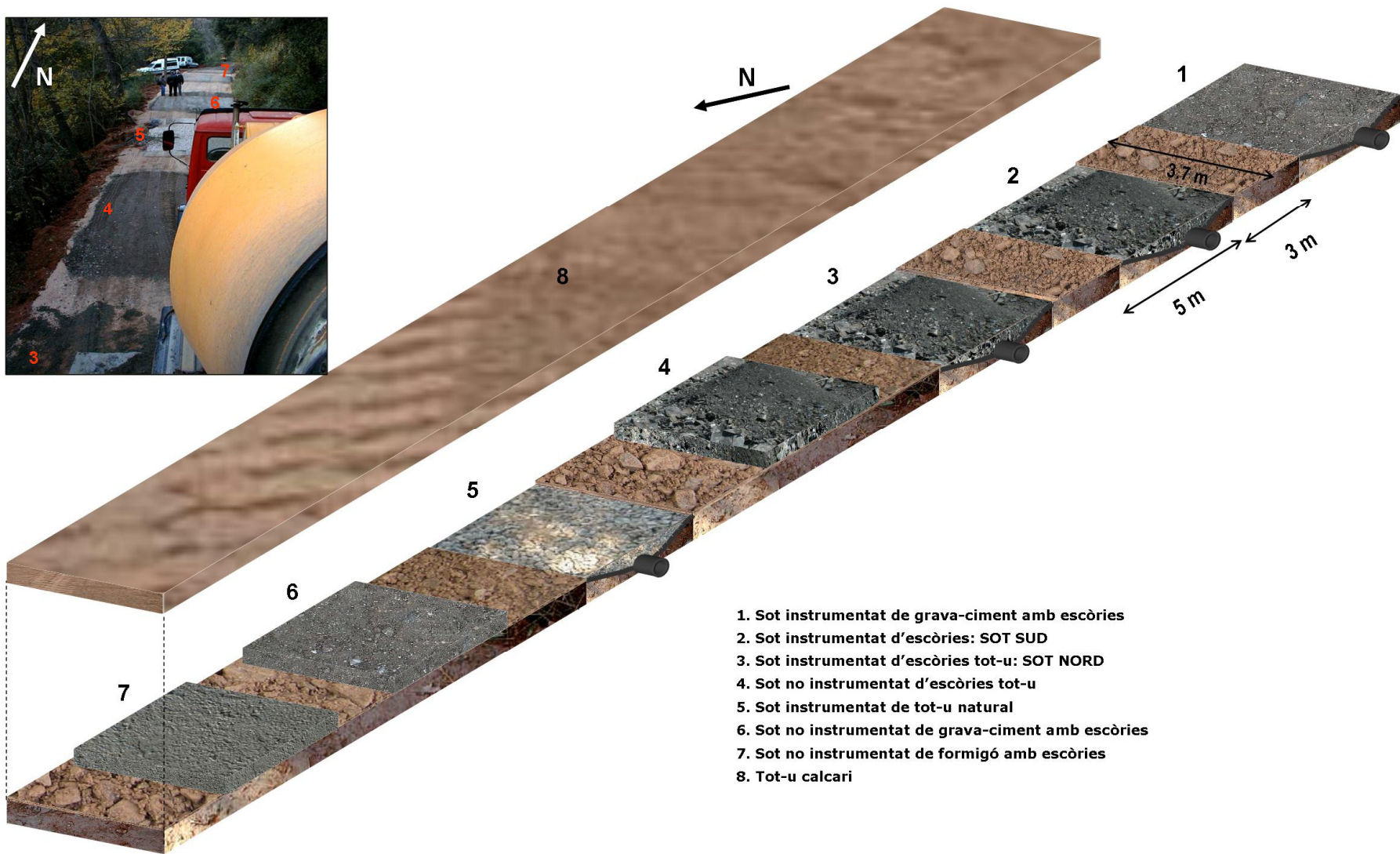
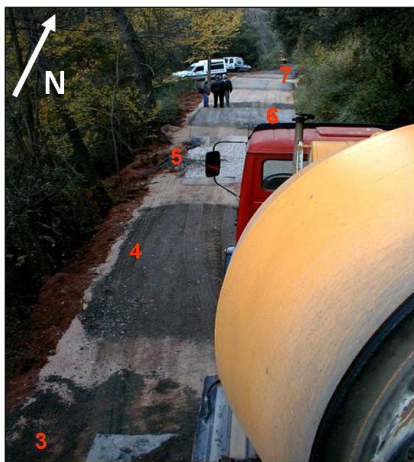


Figura III-8. Solucions aplicades al tram de simulació reparació de sots. Les 2, 3 i 4 corresponen a la utilització d'escòries no lligades.

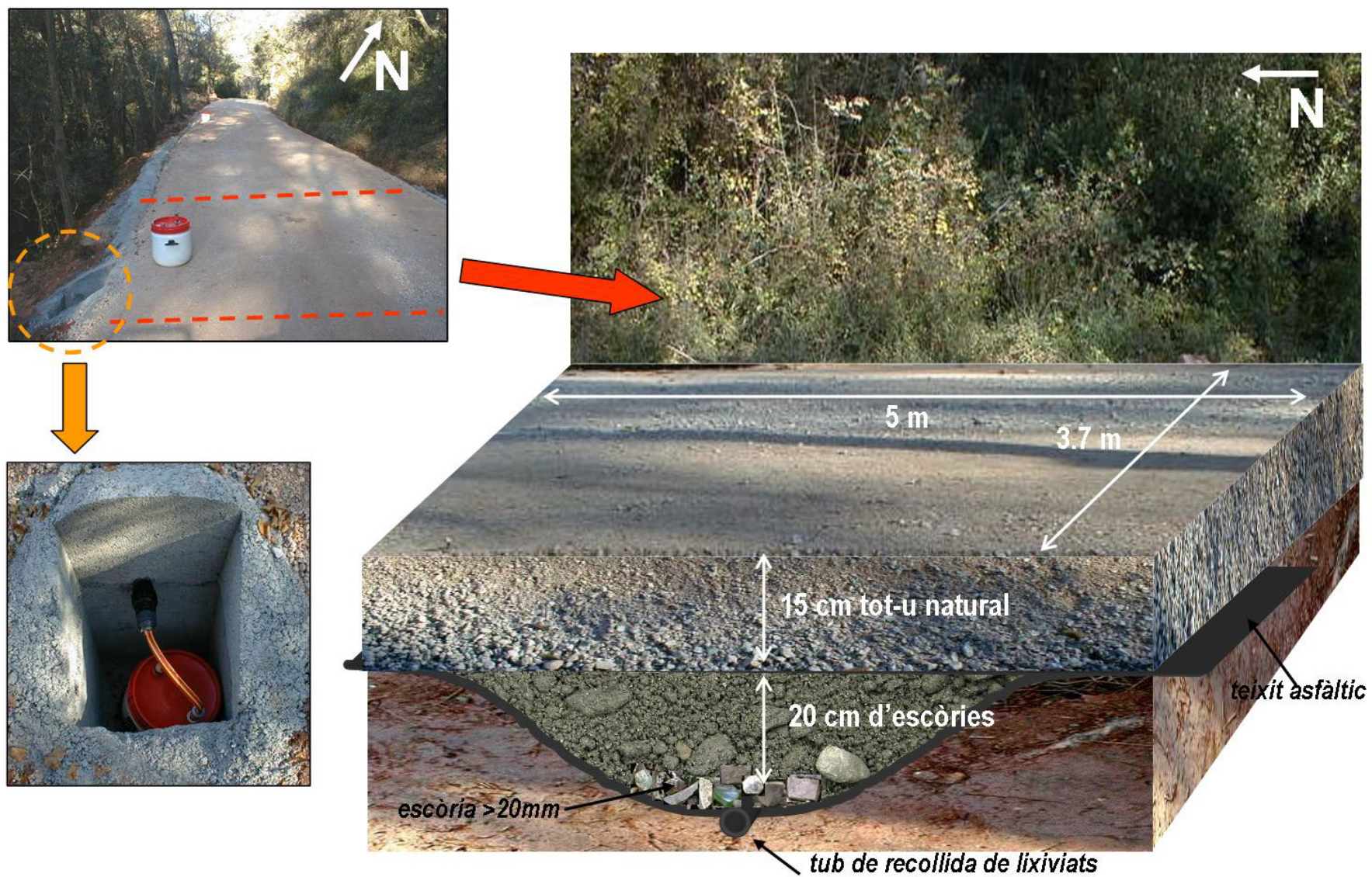


Figura III-9. Bloc diagrama d'un sot reomplert d'escòries compactades no lligades i aspecte d'una arqueta i un bidó amb la mànega i el sistema de reducció.

Les irregularitats del camí suposaven una gran dificultat per anivellar-lo. Per aquesta raó es va considerar preferible estendre sobre el camí una capa d'uns 10 cm de gruix de tot-u per anivellar-lo, sanejar-lo i construir-hi una bona plataforma de treball.



Figura III-10

L'extensió d'aquest material granular es va fer amb motoanivelladora Caterpillar i va anivellar tot el tram, que després es cobriria amb els diferents materials.



Figura III-11

Uns 135 m més enllà de la línia d'inici del camí, es van excavar les cubetes que constituïrien els sots instrumentats per recollir lixiviats. Les dimensions aproximades de les quatre cubetes excavades són de 5 m de longitud per 3.7 m d'amplada.



Figura III-12

Un cop excavades i aplanades les cubetes, es van recobrir amb un geotèxtil Gisolene 120 (UNE 53586-86) per impermeabilitzar-les. Els pendents interiors a les vores són d'uns 4 ° i la zona de màxima profunditat arriba a uns 40-45 cm. Al fons de les cubetes s'hi va col·locar el tub de drenatge perpendicular al traçat del camí, de manera que travessa el sot de banda a banda i desemboca en un extrem.



Figura III-13

El tub té 50 mm de diàmetre i presenta files de perforacions circulars de mig centímetre aproximadament. L'objectiu fonamental és recollir i controlar les aigües d'infiltració, és a dir, l'estudi dels lixiviats. La imatge correspon al sot de tot-u calcari, que servirà per comparar amb els altres sots que contenen escòries. Sobre el tub es va estendre una capa d'àrids grossos per retenir el material fi que poden arrossegar les aigües d'infiltració i evitar que s'obstrueixin les perforacions del tub.



Figura III-14

Al sot destinat a contenir escòries sense garbellar el tub també es va cobrir amb un nivell de grava, però en aquest cas es tracta d'escòries 20/40. S'ha aprofitat una fracció que es va generar durant el garbellament però que constituïa un rebuig. A sobre s'hi va anar estenent la capa d'escòries tot-u (la part més fosca).



Figura III-15

Un cop estès el material, es va iniciar el procés de compactació amb corró, anant amb molta cura perquè el material no estava confinat lateralment. A causa de les pluges dels dies anteriors, la humitat que presentaven les escòries el dia previst per a l'extensió era l'òptima per a la compactació, per la qual cosa no va caldre afegir-n'hi més.



Figura III-16

L'execució dels sots no instrumentats va ser més senzilla; va consistir únicament en l'extensió del material sobre la capa d'àrids naturals que s'havia estès sobre el camí i la posterior compactació.



Figura III-17

Atès que un dels costats del camí limita amb el vessant, es va confinar el material dels sots per evitar pèrdues pendent avall en cas de pluges. A la part esquerra de la imatge es pot veure formigó que limita el sot.



Figura III-18

Sota aquest petit mur de formigó s'hi van emplaçar les arquetes destinades a allotjar els recipients de recollida de lixiviats. Es tracta de bidons de polietilè de 30 litres connectats al tub de drenatge mitjançant un sistema de reduccions.



Figura III-19

Tot i que les escòries compactades no són sistemes gaire permeables, s'ha pogut fer un mostreig sistemàtic de lixiviats cada quatre mesos per veure l'evolució en la seva composició química. Com que durant els primers mesos de l'entrada en funcionament no va ser possible obtenir lixiviats, es va regar inicialment cada parcel·la amb aigua corrent per tenir una quantitat de dades suficientment representativa.



Figura III-20

El tram amb sots es va anivellar cobrint-lo amb una capa d'uns 15 cm de tot-u de Leiro.

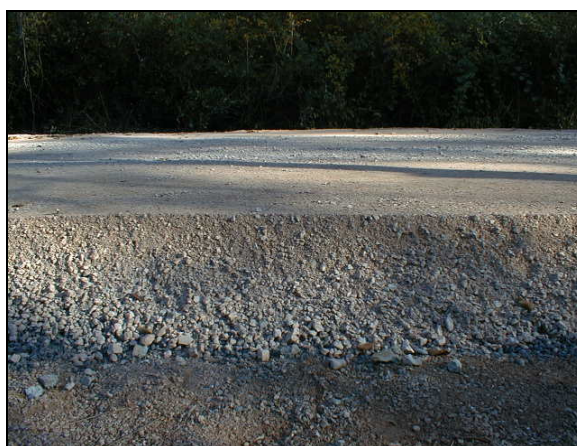


Figura III-21

III.3.3 SEGUIMENT

En primer lloc es va mesurar la densitat de les escòries compactades (abans d'estendre la capa superior d'anivellament). Els mètodes nuclears per determinar densitats *in situ* en escòries no són adequats perquè es produeixen algunes perturbacions a causa de la naturalesa del material (ALTMAT, 2001). Per aquest motiu es va determinar la densitat de compactació *in situ* utilitzant una aproximació del mètode de la sorra segons la norma UNE 103503. Consisteix a fer un sot, recuperar i pesar el material extret, i reemplaçar-lo per una sorra neta, seca i amb una densitat aparent que es coneix gràcies a un calibratge previ realitzat al laboratori.

Les dimensions reduïdes dels sots han dificultat la possibilitat de dur a terme un seguiment amb profunditat del rendiment des del punt de vista estructural i observar l'evolució mecànica del ferm: mesura de deflexions, assentaments, etc. De tota manera, s'han fet observacions periòdiques per detectar qualsevol símptoma de degradació.

No passa el mateix amb els aspectes ambientals, ja que el dispositiu de recollida de lixiviats sí que permet controlar l'evolució de la seva composició. S'ha observat que, malgrat que es produeixi infiltració d'aigua, cal una quantitat notable de pluja perquè s'acumuli prou aigua al fons de la cubeta i dreni pel tub. Això es pot atribuir a diversos factors, com un pendent insuficient de la base dels sots cap al vessant, una gran capacitat d'absorció de les escòries o una relativa impermeabilitat del material del ferm.

Els primers quatre mesos després de la construcció no van produir lixiviats i la pluja caiguda només va servir per saturar el material. Per aquest motiu es va decidir provocar les primeres lixiviacions mitjançant el reg dels sots amb aigua corrent. Es disposava d'una boca de reg (de Bombers) molt pròxima a la zona, de la qual l'Ajuntament de Tagamanent va facilitar la clau. El primer reg provocat, el febrer del 2002, es va fer buidant l'aigua de bidons amb l'ajut d'una mànega, a uns 250 L/hora. Per al següent reg provocat, el juny del 2002, ja es disposava de l'ajut d'un aspersor connectat directament a la boca de reg que estenia l'aigua a uns 650 L/hora. La Taula III-4 mostra les dates de mostreig i el tipus de lixiviats recollits, segons si es van produir espontàniament a partir de les precipitacions o si van ser provocats amb l'aigua de la boca de reg.

Taula III-4. Mostreig de lixiviats en cada sot del tram experimental. Les quantitats entre parèntesis són els litres d'aigua utilitzats en els regs provocats. L'asterisc indica que no es va recollir lixiviat.

MOSTREIG	SOT SUD ESCÒRIES	SOT NORD ESCÒRIES	TOT-U CALCARI
febrer 2002	provocat (600 L)	(1200 L*)	provocat (840 L)
juny 2002	natural provocat (700 L)	-	provocat (1200 L)
octubre 2002	natural	-	natural
febrer 2003	natural	natural	natural
juny 2003	natural	natural	-
octubre 2003	natural	natural	natural

Amb ambdós sistemes de reg es reparteix l'aigua en una àrea d'uns 16 m² fins que el tub comença a drenar i el bidó comença a recollir lixiviats; aleshores s'atura el reg i es repeteix la mateixa operació en un altre sot.

Cal destacar l'activitat anòmla del sot nord d'escòries: en el primer mostreig es va regar amb 1200 L d'aigua (Taula III-4) però el bidó va continuar buit. Es va atribuir a un defecte en el sistema de drenatge, sigui per una mala impermeabilització de les parets de la cubeta, amb la consegüent migració lateral de l'aigua, o bé per una instal·lació incorrecta del tub. Durant els mesos següents el bidó corresponent va romandre buit, motiu pel qual es va descartar dels mostreigs de lixiviats fins que un any i quatre mesos després va començar a drenar de manera natural i es van poder obtenir lixiviats.

Els lixiviats obtinguts s'analitzen amb la mateixa metodologia utilitzada per als lixiviats obtinguts al laboratori (vegeu-ne la descripció a l'apartat III.2.2), amb la diferència que aquests darrers es poden referir a la mostra sòlida i els primers no, si més no de manera directa. En efecte, un dels inconvenients que té el trasllat de les experimentacions a escala real és la dificultat de quantificar de manera exacta les escòries contingudes a cada sot i que, per tant, estan entrant en joc en la lixiviació. La solució és fer una aproximació tan precisa com sigui possible a partir de les dimensions de la cubeta, la humitat de les escòries el dia de la posada en obra i la densitat de compactació mesurada *in situ*. Aquestes dades permeten fer una estimació de la massa d'escòries seques que hi ha allotjades al sot i que entren en contacte amb l'aigua, és a dir, la dels kg d'escòria seca a què referir els mg lixiviats de cada element.

III.3.4 EXTRACCIÓ DE TESTIMONIS

Una altra alternativa per intentar mesurar les quantitats lixiviables de cada element ha estat l'anàlisi de testimonis del tram. L'extracció de testimonis es va dur a terme el febrer del 2003; el sot d'extracció triat va ser el sot sud, el sot d'escòries que ha produït lixiviats contínuament. Es va obtenir mostres de quatre punts diferents del sot (Figura III-22), es van mesclar i mitjançant el quarterador es van separar submostres per a la determinació de diversos paràmetres de manera similar al procediment detallat a la Figura III-3. La composició química dels testimonis (determinada per triplicat) es va contrastar amb la composició química de la mostra de Mataró abans de col·locar-se a l'obra, per quantificar quina havia estat la lixiviació real durant l'esmentat interval de temps. També amb aquest objectiu es va aplicar el test de lixiviació CEN 12457-2 per triplicat.

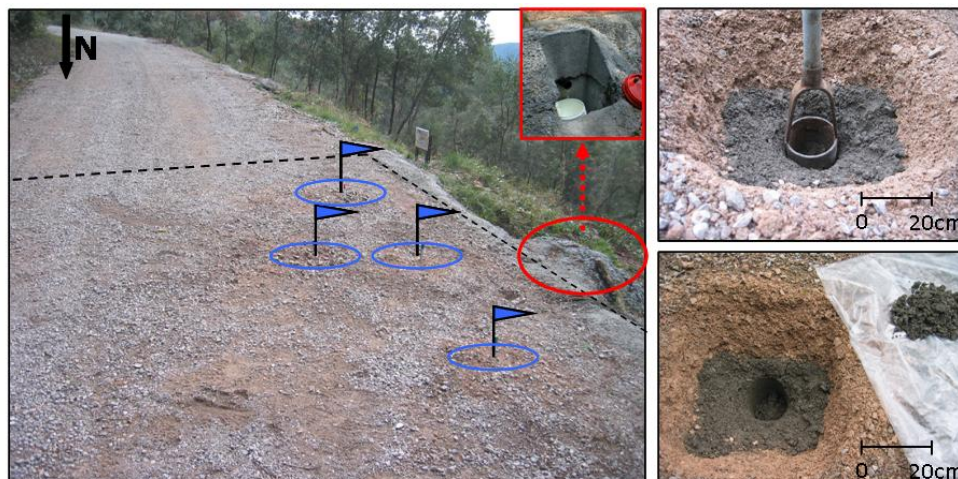


Figura III-22. Diversos aspectes de l'extracció de testimonis al sot sud d'escòries. En blau, els punts d'extracció dels testimonis.

III.4 VALORACIÓ DE L'APLICACIÓ PROPOSADA DES DE LES PERSPECTIVES MECÀNICA I AMBIENTAL

En aquest punt es pretén avaluar la viabilitat de la utilització de les escòries d'incineració de residus urbans en capes granulars del ferm des del punt de vista mecànic i ambiental. La idoneïtat de les escòries com a substitut d'àrids naturals en aquesta aplicació s'ha de demostrar a partir de la correlació entre les dades obtingudes al laboratori i al camp. Aquests valors s'han contrastat amb les sol·licitacions requerides per les normatives, tant les d'aquí com les d'altres països amb especificacions més restrictives. S'han comparat els resultats amb els valors habitualment observats en àrids naturals, els quals constitueixen el punt de referència perquè són el que es pretén substituir. Les propietats físiques i geotècniques dels àrids naturals són aspectes àmpliament estudiats i, per tant, no s'ha considerat necessari caracteritzar un tot-u calcari convencional des d'aquest punt de vista perquè es tenen valors de referència. En canvi, els aspectes ambientals no estan totalment coberts perquè tradicionalment els àrids naturals es consideren innocus. Per aquest motiu s'ha estudiat una mostra de tot-u calcari: se n'ha determinat la composició química i mineralògica seguint els procediments experimentals detallats a anteriorment per a escòries. A més, s'ha sotmès la mostra als tests de lixiviació CEN 12457-2 i CEN 12457-3.

També s'ha comparat puntualment alguns aspectes de les escòries amb altres tipus de residus generats en el procés d'incineració, com les cendres volants o els residus de depuració de gasos, així com amb altres residus de combustió, com els que provenen del carbó. La comparació s'ha realitzat a partir de la recopilació de les dades dels nombrosos estudis recents realitzats sobre aquests materials, especialment en el camp de la lixiviació.