

Informes de Difusión de Proyectos

# Utilización de los Estériles del Carbón en la Construcción de Tierra Armada

(C-24-345)

**Titular: HUNOSA** 





Informes de Difusión de Proyectos

25

# Utilización de los Estériles del Carbón en la Construcción de Tierra Armada

(C-24-345)

Titular: HUNOSA



Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Depósito Legal; M-4557-1998 ISSN: 1138-7041

NIPO: 238-98-004-6

# THE USE OF COAL MINING WASTES IN BUILDING REINFORCED EARTH. (C-24-345)

ABSTRACT: This project was aimed at evaluating the technical appropriateness of coal mining wastes for its possible use as filling material in reinforced earth structures of roads and highways, etc., and to establish the acceptance, implementation and quality control criteria, which can be included in the Spanish General Technical Standard of Road and Bridges Works (PG-3).

With that aim, four types of coal mining wastes were selected out of an inventory and several corrosion tests were conducted with different types of reinforcements and following the results, the most appropriate coal mining wastes, the acceptance limits and the quality control tests to be applied to the materials obtained from coal mining wastes as filling material in reinforced earth structures were established.

A real scale reinforced earth structure was erected using coal mining wastes as filling material and different types of reinforcements. It was tested under normal traffic conditions, carrying out thermal controls, and controls regarding the rolling and the corrosion of the reinforcements.

The results proved that coal mining wastes can be used in general as filling material for building earth structures with polymeric reinforcements.

As a result of this study 150,000 tons of coal mining wastes were used for building reinforced earth structures in different works carried out in the Principado de Asturias.

### 1. INTRODUCCIÓN

La industria extractiva del carbón genera anualmente grandes cantidades de residuos -estériles- los cuales se han venido acumulando desde hace muchos años en escombreras, algunas de las cuales llegan a constituir verdaderas montañas. Asímismo, dichos estériles plantean diversos problemas tanto desde el punto de vista de su almacenamiento como desde el del medio ambiente, por lo que, en la mayoría de los países productores de carbón se están llevando a cabo diversos estudios encaminados hacia la búsqueda de nuevas aplicaciones que permitan minimizar los mencionados problemas.

Aunque si bien los estériles del carbón se están empleando actualmente en diversas aplicaciones industriales: terraplenes de carreteras y autovías, fabricación de ladrillos, obtención de clínquer de cemento, rellenos, etc., debido a que con dichas utilizaciones no se soluciona totalmente el problema de los estériles y a que éstos poseen otras características que no se están aprovechando, es necesario encontrar nuevas aplicaciones con el fin de conseguir un aprovechamiento integral de los estériles del carbón.

Por ello, HUNOSA, la Dirección General de Carreteras, el CEDEX (Laboratorio de Geotecnia) y la Universidad de Oviedo, realizaron conjuntamente un estudio, financiado por OCICARBON y FICYT, que permitiese determinar la naturaleza y propiedades de los estériles del carbón para su posible utilización como materiales de relleno en estructuras de tierra reforzada de carreteras, autovías, etc., y establecer los criterios de recepción, puesta en obra y control de calidad que permitiese la inclusión de los mismos

en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y cuyos resultados se exponen a continuación.

# 2. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Para llevar a cabo el proyecto se elaboró un programa de trabajo a desarrollar en tres años y que, en síntesis, consistió en:

# a) Recopilación bibliográfica

Además del análisis de la documentación ya existente, se llevó a cabo una recopilación exhaustiva de las publicaciones relacionadas con el tema.

## b) Inventario de estériles

Dado que no era factible ensayar todos los tipos de estériles generados en las distintas zonas productoras de carbón, se hizo un muestreo de los mismos (se previeron unas 30 tomas de muestras) a partir de las cuales se preseleccionaron 12 muestras en las que se realizaron ensayos de: granulometría, plasticidad, equivalente de arena, compactación etc.. A la vista de los resultados se seleccionaron 4 tipos de estéril que resultaron representativos de las condiciones más comunes o envolventes de los mismos.

### c) Ensayos

Las muestras se sometieron a los ensayos que se

### relacionan a continuación:

### c.1) Ensayos químicos y mineralógicos

- Análisis inmediato (cenizas, materias volátiles, carbono fijo, humedad), poder calorífico, azufre, pérdidas por calcinación.
- Ensayos químicos (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO)
- Análisis mineralógicos y petrográficos.

### c.2) Ensayos de recepción y caracterización

- Humedad
- Granulometría
- Peso específico de los componentes esenciales
- Límites de Atterberg

### c.3) Ensayos geotécnicos

Con los 4 tipos de estériles seleccionados se hicieron ensayos detallados para juzgar su idoneidad como materiales de préstamos y en particular en lo referente a:

- Compactabilidad
  - \* Proctor Normal y Modificado
- Resistencia y capacidad portante
  - \* CBR
  - \* Resistencia al corte
  - \* Triaxiales
- Deformabilidad en edómetro
- Arrancamiento
- Alterabilidad y desgaste

- \* Slake durability test
- \* Los Angeles
- \* Índice de lajas y agujas
- Resistividad

Como conclusión de esta campaña de ensayos se establecieron los límites de aceptación, los criterios de recepción y los ensayos de control de calidad a aplicar a los estériles para su empleo en tierra reforzada.

### d) Pruebas de corrosión

Al objeto de comprobar la existencia o inexistencia de corrosión de las armaduras por parte de los estériles, se efectuaron pruebas de enterramiento en cajas de madera con diferentes tipos de armadura en cada uno de los cuatro tipos de estériles seleccionados y un material convencional (arena) y a la vista de los resultados de laboratorio se escogieron tres tipos de armaduras para su estudio en un tramo de ensayo.

### e) Tramo de ensayo

Se construyó en Asturias un tramo de estructura de tierra armada, utilizando dos tipos de estéril como material de relleno y como armadura de refuerzo se utilizaron las bandas de material polimérico tipo Freyssinet y las geomallas. Además se introdujeron también flejes de acero galvanizado pero solamente enterrados (sin tensión).

Este tramo experimental tenía 2,46 m de altura y

una longitud de 20 m con dos rampas de acceso.

Para su construcción se utilizaron en total unos  $1.000\ \mathrm{m^3}$  de estéril.

El tramo de ensayo se auscultó adecuadamente, para lo cual se realizaron las pruebas siguientes:

- control de la compactación "in situ" por métodos directos.
- medida de la capacidad portante mediante placas de carga.
- control de la temperatura mediante termopares introducidos en las diferentes tongadas realizadas en su construcción.

Una vez terminado el muro de tierra armada se extendió un firme, se cubrió con una capa de aglomerado y se sometió el tramo de ensayo al tráfico. El seguimiento consistió en el control de la regularidad superficial (blandones, roderas, etc.) para diversos tiempos y tráficos.

Una vez terminado el paso de tráfico, la estructura de tierra armada se dejó 3 meses a la intemperie y, a continuación, se levantó tomándose muestras de los materiales, tanto de los estériles como de los refuerzos para su observación y análisis.

### f) Memoria final

Los resultados de todos los trabajos realizados se recogen en la Memoria final en la cual se incluyen como conclusión, las recomendaciones para la utilización de los estériles del carbón en tierra reforzada, abriendo con ello la posibilidad de que sean incluidos, o recogidos al menos sus untos esenciales, si la autoridad pertinente (en este caso la Dirección General de Carreteras) lo considera oportuno, en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras, Carreteras y Puentes.

# 3. LOS ESTÉRILES DEL CARBÓN

# 3.1. CLASIFICACIÓN

Si bien los estériles se pueden clasificar en función del objetivo que se persiga, en este trabajo se ha seguido la siguiente clasificación:

- estériles de minas. Son las rocas procedentes de la perforación de galerías en el interior de las minas
- estériles de lavadero. Son los residuos que se obtienen en el proceso de separación del carbón y, a su vez, se dividen, en:
  - . gruesos, tamaños mayores de 150 mm
  - . granos, tamaños comprendidos entre 150 y 10 mm
  - . menudos, tamaños comprendidos entre 10 y 1 mm
  - . finos, tamaños menores de 1 mm
  - estériles de escombrera. Son los procedentes del almacenamiento de los estériles de mina y lavadero. Se clasifican en:
    - . negros, los que no han combustionado
    - . rojos, los que han combustionado

### 3.2. PRODUCCIÓN

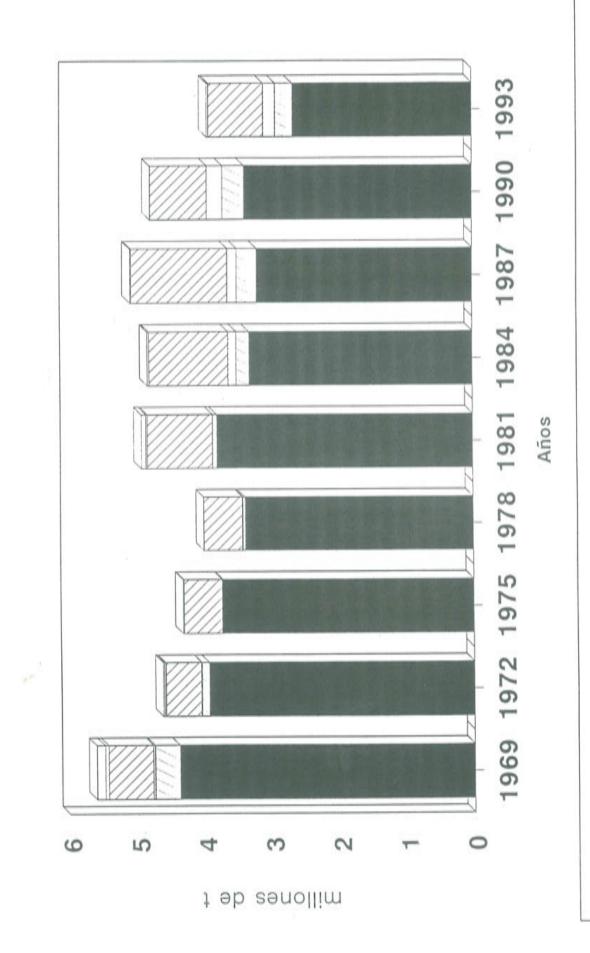
En los Gráficos 1 y 2 se recogen las producciones de estériles de hulla y antracita (no se tienen en cuenta los de mina ni los originados en las explotaciones a cielo abierto, salvo que se produzcan en el lavado del carbón) y en los cuales se puede ver la gran cantidad de estériles que se producen ya que, en el período 1968-1993 se han generado más de 142 millones de toneladas, de las cuales 114 millones corresponden a la explotación de hulla y los 28 millones restantes a la extracción de antracita. Aunque, por ejemplo, en las minas de hulla del Norte de España se emplea un 40% de dichos estériles para el relleno de las propias minas, las cantidades que se tienen que almacenar son todavía muy considerables. Además, a la producción se deben añadir las cantidades originadas en los años anteriores a 1968 y que están almacenadas en las escombreras que, como en el caso de Asturias, se pueden evaluar en más de cien millones de toneladas.

# 3.3. CARACTERÍSTICAS PETROGRAFICAS, MINERALOGICAS Y OUÍMICAS

Para este estudio se ha hecho un inventario de caracterización de estériles, tomando un total de 63 muestras (51 de estériles de hulla y 12 de antracita) en las provincias de Asturias (35), León (16), Palencia (7), Córdoba (3) y Ciudad Real (2). Con las muestras se realizaron numerosos ensayos de identificación cuyos resultados principales se indican a continuación.

Desde el punto de vista petrográfico, los estériles del carbón están formados por areniscas, pizarras

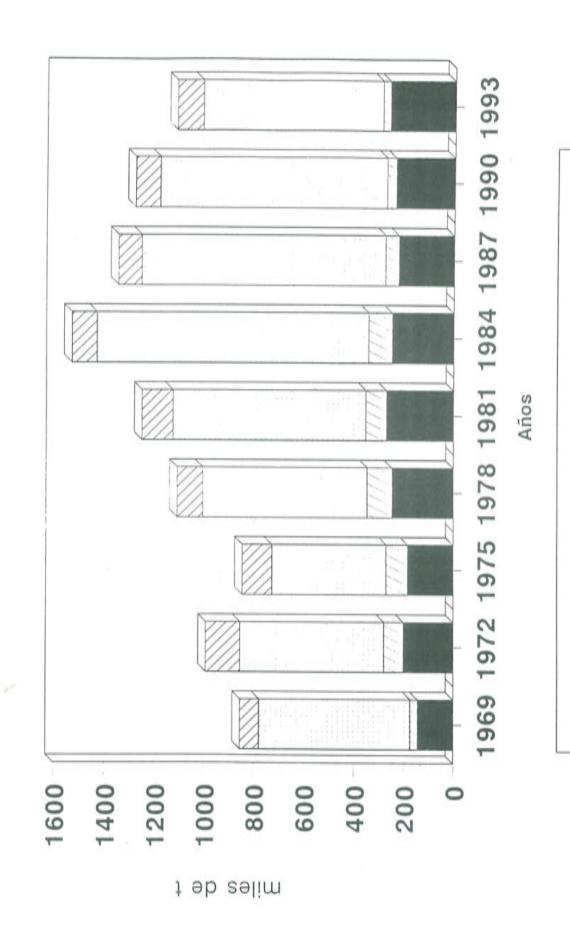
Gráfico 1
PRODUCCION DE ESTERILES DE HULLA POR
PROVINCIAS





Asturias 🛮 Córdoba 🗀 León 🕅 Palencia

Gráfico 2
PRODUCCION DE ESTERILES DE ANTRACITA
POR PROVINCIAS



arenosas y carbonosas, así como por arcillas y rocas ferruginosas. En general, en los estériles de mina predominan las areniscas y en los estériles de lavadero son más abundantes las pizarras.

Mineralógicamente, en los estériles del carbón, tanto de hulla como de antracita, predominan los componentes arcillosos sobre los de cuarzo. Así, los estériles presentan porcentajes de cuarzo entre el 7 y el 57%, 01 disminuyendo contenido con su encontrándose los menores valores en los estériles de antracita. El contenido de ilita oscila del 20 al 60%, con una tendencia respecto al tamaño inversa a la del cuarzo. El porcentaje de caolinita suele ser inferior al 25% y el de clorita inferior al 7%. Existen también porcentajes inferiores al 20% de interestratificados y otros minerales.

Desde el punto de vista químico, los estériles poseen un elevado porcentaje de SiO<sub>2</sub> (40-70%) correspondiendo los mayores tanto por ciento a los estériles de mina, y una importante proporción de alúmina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (8-30%) correspondiendo los menores porcentajes a los estériles de mina y los mayores a los estériles de finos y rojos. Asímismo, presentan contenidos variables de óxido de hierro (III), óxido de titanio, óxido de potasio, óxido de calcio, etc., dependiendo del tipo de estériles y de la zona de producción.

3.4. CENIZAS, MATERIAS VOLÁTILES, PODER CALORÍFICO, AZUFRE, CARBONO FIJO Y PERDIDA POR CALCINACIÓN

El contenido de cenizas de los estériles de hulla varía entre el 70 y el 92% y el de los estériles de antracita entre el 64 y el 88%. El mayor contenido de cenizas suele corresponder a Asturias aunque las diferencias con otras provincias son pequeñas.

El contenido de materias volátiles oscila del 5,5 al 15,2%.

El poder calorífico superior se encuentra, en su mayoría, entre 150 y 2.360 kcal/kg, mostrando una buena correlación con el porcentaje de cenizas.

El contenido de azufre varía del 0,01 al 3,68%, si bien la mayor parte de las muestran quedan por debajo del 1%. Los mayores valores corresponden a Palencia y Ciudad Real.

El carbono fijo en los estériles, una vez descontadas las cenizas y volátiles, varían entre el 0,6 y el 16% en los estériles de hulla y entre el 5,8 y el 27% en los de antracita.

Las pérdidas por calcinación han oscilado entre el 8 y 29,9%.

### 4. ENSAYOS ESPECIALES: LIXIVIACION Y COMBUSTION

Aunque si bien los estériles pueden cumplir las prescripciones técnicas requeridas para su empleo en una determinada aplicación, debe comprobarse que no producen contaminaciones o contengan elementos que ataquen a otros elementos.

Por ello y como, además, en el uso de los estériles existe el riesgo de la autocombustión, se efectuaron ensayos para comprobar el mismo y también la lixiviación.

### 4.1 LIXIVIACION

En los ensayos de lixiviación realizados se comprueba que a su paso por los estériles las aguas aumentan su contenido en Mg, Al, cloruros y sulfatos, el cual va disminuyendo a través del tiempo, como se puede ver en Gráfico 3 donde se representan las concentraciones de SO,\* en el lixiviado frente al tiempo.

Sin embargo, las aguas no arrastran contaminantes que puedan resultar nocivos para las aguas superficiales o profundas, por lo que de acuerdo con los valores exigidos en la Ley de aguas (Ley 29/1985) se puede deducir que los estériles no son materiales contaminantes.

Cuando los estériles están en contacto con el agua períodos importantes de tiempo ( en los ensayos unos 8 días) se produce una degradación de los mismos, con aumento de productos arrastrados o disueltos. Ello obliga a adoptar precauciones en la base de las estructuras que puedan quedar inundadas largo tiempo.

### 4.2 COMBUSTIÓN

Dado que en la combustión de los estériles, además de intervenir el azufre también interviene el carbón, se determinó el contenido de carbón de los estériles por medio de flotación en un líquido de 1,60 de densidad, encontrándose valores, en las muestras analizadas, entre 0 y 5,5% para ambos tipos de estériles, variando entre 0 y 5,5% los de hulla y entre 0 y 4,4% los de antracita. El mayor porcentaje se encontró en los estériles de hulla de la provincia de León.

Asimismo se efectuaron pruebas para provocar la

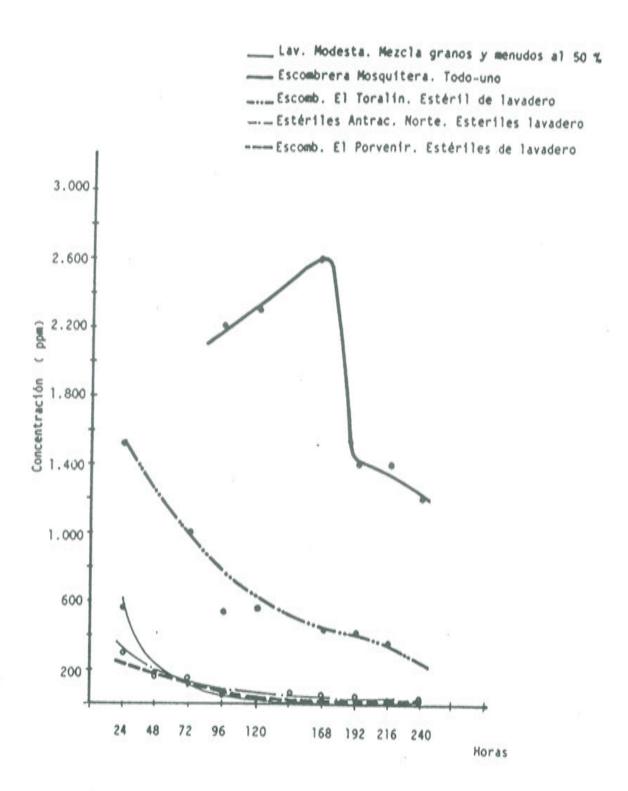


Gráfico 3. Concentraciones de SO, en el lixiviado

combustión de los estériles, pero a pesar de someterlos a un intenso calentamiento en condiciones mas críticas que las previsibles en una obra, no se observaron signos de comienzo de autocombustión en ninguna de las muestras probadas. A este efecto también se han efectuado ensayos en diversos países sin haber conseguido un método para predecir la predisposición de un determinado material a arder espontáneamente.

Por ello y si se efectúa una correcta compactación, es poco probable que exista riesgo de autocombustión salvo en aquellos casos en que el contenido en azufre sea elevado.

### 5. PROPIEDADES GEOTECNICAS

Se han investigado las propiedades geotécnicas de un amplio número de muestras de estériles, pudiendo acotarse la siguiente gama de variación:

Peso especifico de las partículas Tamaño máximo Tamaño medio % de finos (< 0,08 mm) Ausencia de plasticidad En el caso de finos plásticos	2,40 - 2,80 t/m³ < 200 mm 2 - 50 mm 0 - 14% 40%
. Límite líquido	< 30
. Índice de plasticidad	< 12
Colapsabilidad de estériles	~ 12
compactados	- 0 48
Cohesión efectiva	< 0,4% 0 - 2 t/m²
Ángulo de rozamiento interno	0 - 2 0/111
efectivo	30-35°
Proctor Normal	30-33
. Densidad máxima	1,68-2,10 t/m3
	7 - 18%
. Humedad óptima Proctor Modificado	/ = 100
	7 74 2 75 5/2
. Densidad máxima	1,74-2,15 t/m³
. Humedad óptima	5,5-16,5%

C.B.R.

. Proctor Normal 9 - 30 . Proctor Modificado 9 - 113 Índice de durabilidad Medio-Alto

En cuanto a las propiedades electroquímicas, los estériles del carbón presentan:

Resistividad eléctrica . en seco > 12.800  $\Omega$  cm . en húmedo 16-3500  $\Omega$  cm pH 5 - 10 Sales solubles . sulfatos 0,03-0,5 % . cloruros 0,007-0,014 %

Aunque existen diferencias apreciables de unas escombreras a otras puede indicarse que los estériles se clasifican típicamente como GP-GC según Casagrande. Corresponderían también al grupo A-2-4 (IG = 0) de la H-R-B.

De los resultados obtenidos en los ensayos para la determinación de las propiedades geotécnicas y electroquímicas, se deduce que los estériles del carbón se pueden emplear como materiales para rellenos en estructuras de tierra reforzada:

- . en obras en seco
- en obras inundables, donde su empleo puede ser más problemático, deberán efectuarse las correspondientes pruebas con cada estéril en particular para determinar su validez

### 6. PRUEBAS DE CORROSIÓN

Se han llevado a cabo pruebas de corrosión de armaduras en cajas de madera, donde se estudió la interacción entre diferentes tipos de estériles:

negros y rojos de escombrera, así como de una arena de la zona empleada en este tipo de rellenos y diversas armaduras: flejes metálicos, geomalla de material polimérico, bandas Paraweb (Freyssisol) y goma de bandas transportadoras.

El contenido en humedad de las pruebas fue el correspondiente a un grado de saturación del 60% para una densidad seca del 94% del Proctor Normal.

El estéril se colocó en la cajas de madera -que contenían un plástico en su interior para evitar la salida de agua- hasta la mitad de la altura de la caja, a continuación se colocaron los diferentes tipos de armadura, como se puede ver en las Fotos  $n^{\text{os}}$  1, 2, 3 y 4, y después de terminar de rellenar la caja con estériles se colocó el plástico por la parte superior y se cerraron las cajas.

Parte de las cajas se abrieron a los 3 meses y otra parte al año, con el fin de comprobar si existían variaciones a través del tiempo. Se efectuaron ensayos de control en las armaduras; pérdida o ganancia de peso, aspecto, ensayos de esfuerzo antes y después de las pruebas al objeto de determinar si sufrían alguna variación debido a los estériles.

De los resultados obtenidos se deduce que:

- en las armaduras metálicas los estériles del carbón pueden producir ligeras corrosiones, al igual que la arena, material tradicionalmente empleado
- en el resto de armaduras: geomallas, bandas Paraweb (Freyssisol) y goma de cintas

transportadoras, no se ha observado ninguna corrosión.

## 7. ESTRUCTURA EXPERIMENTAL DE TIERRA ARMADA A ESCALA REAL

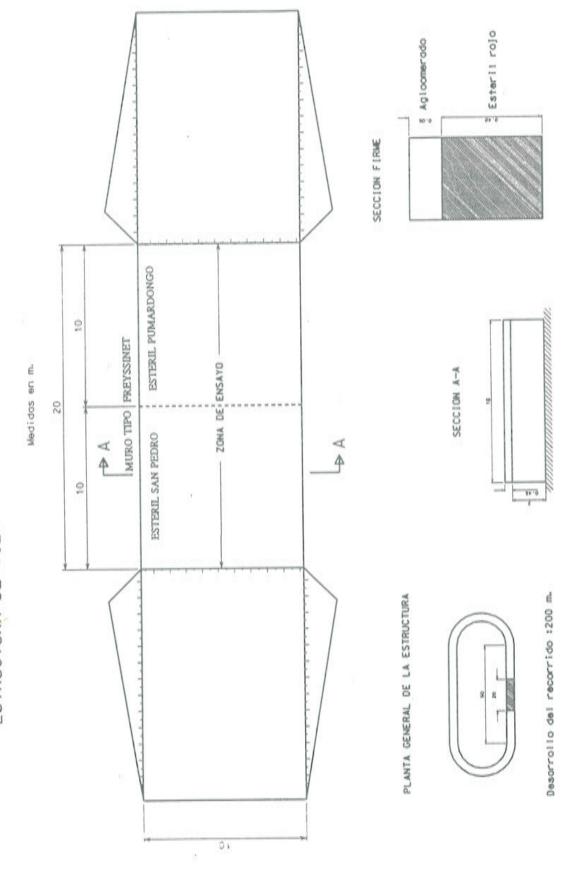
Una vez definidas las condiciones óptimas de puesta en obra se construyó sobre la Escombrera San Pedro (Asturias) una estructura de tierra reforzada a escala real empleando estériles del carbón como material de relleno. Para ello se levantó un muro de escamas tipo Freyssinet de 20 m de longitud y 2 m de altura, que se rellenó con los estériles de dos escombreras (San Pedro y Pumardongo) con lo cual la zona de ensayo se subdividió en dos zonas de 10 m cada una, en tongadas de 40 cm, Planos n $\stackrel{\circ s}{=}$  1 y 2. Entre las diferentes tongadas se colocaron las distintas armaduras: flejes metálicos, geomallas y bandas Paraweb (Freyssisol). Asimismo, a diferentes alturas del relleno y en cada una de las subzonas se colocaron termopares para controlar la temperatura que alcanzaba el mismo. Sobre el relleno se vertieron dos capas de 20 cm cada una de estériles rojos y sobre éstos una capa de 6 cm de aglomerado asfáltico. Asimismo también se construyeron dos rampas de acceso con los mismos estériles que se emplearon en las pruebas. La estructura estuvo sometida a los agentes atmosféricos durante seis meses y se sometió a 3.085 pasadas de un camión con un eje de 10,5 t. En las Fotos  $n_{\underline{}}^{os}$  5, 6, 7 y 8 se pueden ver diferentes aspectos de la estructura experimental de tierra reforzada.

El comportamiento de la estructura ensayada ha sido completamente satisfactorio.

Las medidas de temperatura en el relleno indican una

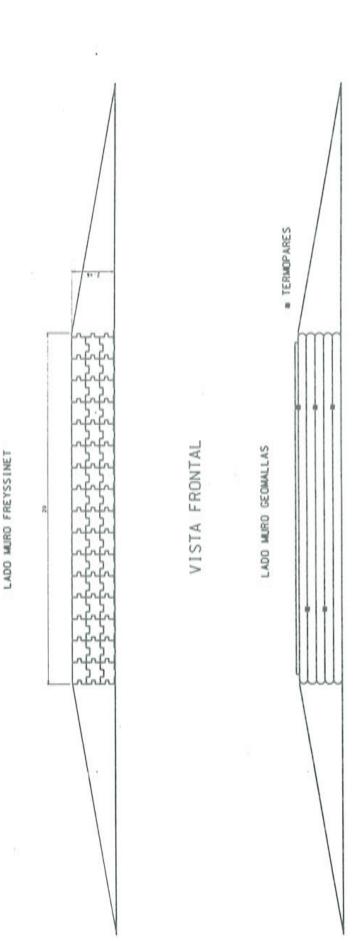
Plano N° 1

ESTRUCTURA DE TIERRA ARMADA CON ESTERILES DEL CARBON



Plano N° 2

ESTRUCTURA DE TIERRA ARMADA CON ESTERILES DEL CARBON



Medidas en m. Escala=1:200

inercia térmica considerable respecto al ambiente exterior. En general, las temperaturas en el núcleo del relleno oscilan menos que las exteriores y rara vez se aproximan a éstas, no habiéndose medido nunca temperaturas superiores a 30 °C. Ello excluye la existencia de procesos exotérmicos o de combustión interna en la masa de los estériles.

### 8. CONCLUSIONES

Las pruebas de durabilidad en cajas y la ejecución del relleno a escala real han puesto de manifiesto que, en general, los elementos metálicos presentan síntomas de inicio de alteración superficial y posible pérdida de galvanizado, tanto con los estériles rojos, como con los negros y en la arena utilizados en estas pruebas. Por el contrario, los elementos de refuerzo de poliéster recubiertos de polietileno y los de caucho sintético, no han presentado signos de alteración han dado pérdidas se Tampoco superficial. resistencia o cambios de comportamiento mecánico en rotura (por ejemplo un proceso de rigidización con el envejecimiento) en los ensayos realizados sobre las muestras de geomalla enterradas distintos períodos de tiempo en los estériles, tanto en las cajas como en el muro de geomallas en el relleno experimental.

Puede concluirse, que, los estériles de escombrera, en general, pueden utilizarse en estructuras de tierra reforzada con refuerzos poliméricos: para los estériles de escombrera negros y parte de los rojos, no se han encontrado inconvenientes ni mecánicos ni de agresividad, que desaconsejen su utilización en rellenos y muros de tierra reforzada que eviten los elementos metálicos y se substituyan por otros de

naturaleza polimérica como los aquí descritos.

Por lo que respecta a los muros tradicionales de tierra reforzada con flejes metálicos de galvanizado, algunos estériles de escombrera (particularmente negros) podrían ser empleados en obras no inundables en virtud de los resultados de los análisis electroquímicos llevados a cabo (por las características fisicomecánicas en general válidos). Debe tenerse en cuenta que puede haber diferencias en los resultados entre unas muestras y otras de una misma escombrera y que, por lo tanto, debería llevarse a cabo un reconocimiento exhaustivo de la zona de la escombrera que se guisiera aprovechar para tal fin. Todo esto indica que es preferible acudir a sistemas de tierra reforzada con refuerzos de naturaleza polimérica, que han sido ideados y diseñados en los últimos años, precisamente con el fin de poder utilizar suelos potencialmente agresivos hacia las armaduras metálicas.

Se ha redactado una propuesta de artículo para un posible Pliego de Condiciones para la utilización de los estériles en obras de tierra reforzada en carreteras.

Lo anterior viene corroborado, puesto que en la carretera Ujo-Caborana de la Comunidad Autónoma de Asturias se ha construido una estructura de tierra armada de unos 700 m de longitud donde se han empleado, aproximadamente, 120.000 t de estériles, tal y como se puede ver en la Foto nº 9, usando como armaduras las bandas tipo Paraweb (Freyssisol).

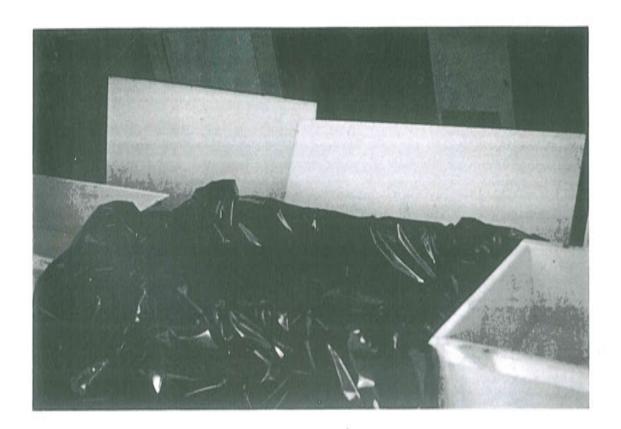


Foto 1. Caja de madera recubierta de plástico.

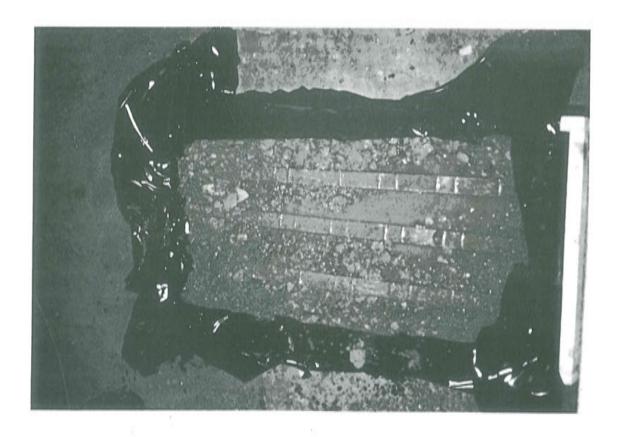


Foto 2. Esteril rojo. Flejes metálicos.

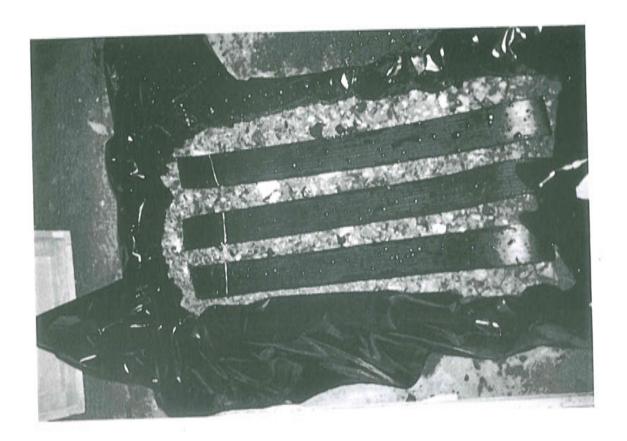


Foto 3. Esteril rojo. Bandas paraweb.

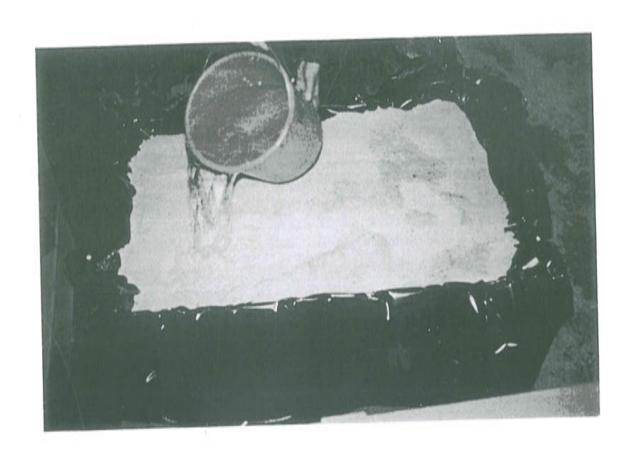


Foto 4. Arena. Adición de agua.

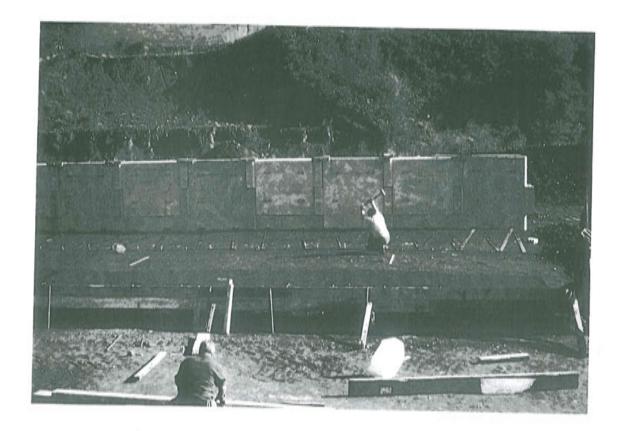


Foto 5. Estructura de tierra reforzada. Diferentes armaduras.

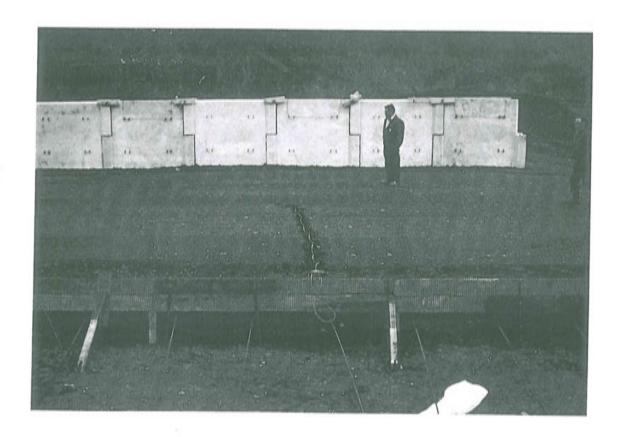


Foto 6. Estructura de tierra reforzada. Instalación de termopar.

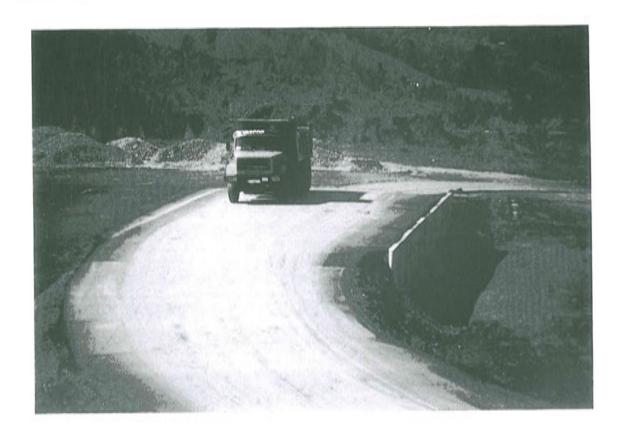


Foto 7. Estructura de tierra reforzada. Generación de tráfico.

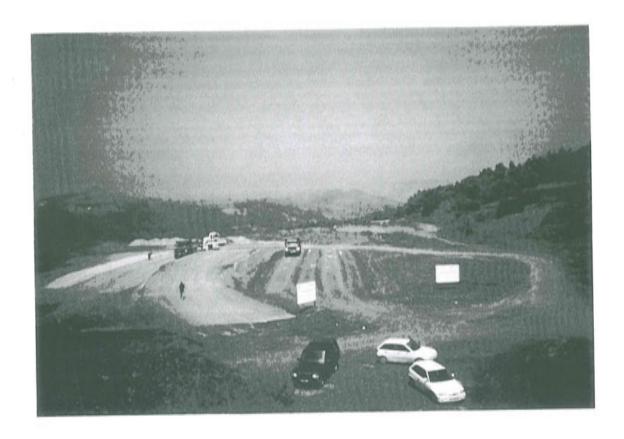


Foto 8. Vista general de estructura y circuito de tráfico.

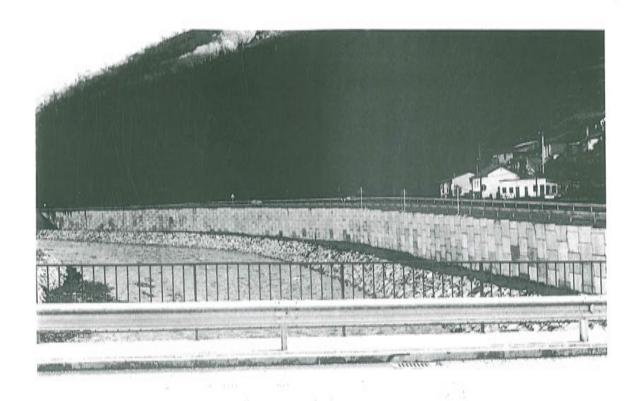


Foto 9. Carretera Ujo - Caborana. Vista parcial de estructura de tierra reforzada.





Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Miner