



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Estudio del uso de neumáticos fuera de uso (NFU) como material para la construcción de terraplenes. Aplicación a la ampliación del vertedero de residuos controlado de les Borges Blanques (Lleida)

Presentado por

Denguir, Younes

Para la obtención del

Grado en Ingeniería de Obras Públicas

Curso: 2020/2021

Fecha: Valencia, Julio 2021

Tutor: Martínez Ibañez, Víctor

Cotutor: Carlos Hidalgo, Signes



ESQUEMA DEL DOCUMENTO

El presente trabajo académico se estructura en tres diferentes secciones:

- Memoria.
- Referencias bibliográficas.
- Anejos.

A su vez, la memoria se encuentra compuesta por capítulos, los cuales serán descritos brevemente a continuación:

- Capítulo I. "Introducción": es la parte introductoria, con carácter general. En este capítulo se realiza una explicación del enfoque del trabajo y los objetivos que se quieren alcanzar con él. También se hace referencia al material de construcción que se va a analizar y a la infraestructura objeto de estudio, incluyendo su localización geográfica. Además, se especifica la documentación empleada para la obtención de la información y el software utilizado para los análisis necesarios.
- Capítulo II. "Estudios previos": éste contiene la clasificación del vertedero analizado y los estudios que han sido necesarios para poder entender las características de la zona de trabajo y los condicionantes que conlleva.
- Capítulo III. "El neumático fuera de uso (NFU)": este capítulo se centra en el estudio de las características de los NFU y su aplicación en la ingeniería civil.
- Capítulo IV. "Marco geológico": esta parte del trabajo se compone en dos partes. La primera parte se centra en el análisis de la geología regional de la zona de ubicación del vertedero analizado, mientras que la segunda parte supone un estudio de la geología detallada de la ubicación exacta del vertedero.
- Capítulo V. "Caracterización geotécnica": se centra en el análisis de los datos obtenidos en la campaña geotécnica por la empresa encargada de ejecutar el proyecto.
- Capítulo VI. "Estudio de estabilidad de los taludes": en este capítulo se realiza el análisis de la estabilidad de los taludes de los terraplenes de contención que constituyen el perímetro del vaso del vertedero.



- Capítulo VII. "Análisis de asientos": se analizan los asientos estimados de los terraplenes objeto del análisis y en sus correspondientes cimentaciones.
- Capítulo VIII. "Conclusiones": se realiza un resumen de las conclusiones que se han ido recogiendo a lo largo del trabajo y se propone la alternativa más efectiva entre las analizadas.

ÍNDICES

MEMORIA

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES..... | 9 |
| 1.1. Introducción | 10 |
| 1.2. Objeto del trabajo | 11 |
| 1.3. Antecedentes | 12 |
| 1.4. Encuadre geográfico..... | 14 |
| 1.5. Documentación utilizada..... | 15 |
| 1.6. Software empleado | 15 |
| CAPÍTULO II. ESTUDIOS PREVIOS..... | 17 |
| 2.1. Introducción | 18 |
| 2.2. Cartografía y topografía | 18 |
| 2.3. Clasificación del suelo | 19 |
| 2.4. Climatología e hidrología | 19 |
| 2.4.1. Climatología..... | 19 |
| 2.4.2. Hidrología | 21 |
| 2.5. Estudio de residuos recogidos en el vertedero..... | 22 |
| 2.6. Clasificación del vertedero | 22 |
| CAPÍTULO III. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU) | 23 |
| 3.1. Generación, reciclaje, reutilización y almacenamiento | 24 |
| 3.2. Composición y propiedades de los NFU..... | 26 |
| 3.2.1. Propiedades físicas..... | 27 |
| 3.2.2. Propiedades químicas | 27 |
| 3.2.3. Propiedades mecánicas..... | 27 |
| 3.3. Aplicaciones de los NFU en la ingeniería civil | 28 |
| 3.3.1. Capas de goma en áreas recreativas..... | 28 |
| 3.3.2. Carreteras..... | 28 |
| 3.3.3. Protección de costas y arrecifes artificiales | 29 |
| 3.3.4. Edificación y obra pública..... | 30 |
| 3.3.5. Vertederos..... | 31 |
| 3.3.6. Obras de tierra y terraplenes | 32 |



| | |
|---|-----------|
| 3.4. Evaluación económica de la reutilización de NFU..... | 33 |
| CAPÍTULO IV. MARCO GEOLÓGICO..... | 35 |
| 4.1. Geología Regional..... | 36 |
| 4.1.1. Geología general | 36 |
| 4.1.2. Lito-estratigrafía | 37 |
| 4.1.3. Tectónica | 39 |
| 4.1.4. Condiciones hidrogeológicas..... | 40 |
| 4.1.5. Condiciones sísmicas | 41 |
| 4.2. GEOLOGÍA DETALLADA..... | 43 |
| 4.2.1. Lito-estratigrafía | 43 |
| 4.2.2. Columna estratigráfica | 46 |
| 4.2.3. Vaso del vertedero | 46 |
| CAPÍTULO V. ESTUDIO GEOTÉCNICO..... | 48 |
| 5.1. Campaña geotécnica del proyecto..... | 49 |
| 5.1.1. Trabajos de campo | 49 |
| 5.1.2. Ensayos de laboratorio..... | 50 |
| 5.2. Clasificación geomecánica..... | 51 |
| 5.2.1. Niveles litológicos diferenciados | 51 |
| 5.2.2. Caracterización de los materiales | 53 |
| 5.3. Caracterización del macizo rocoso..... | 58 |
| 5.4. Caracterización hidrogeológica | 58 |
| 5.4.1. Niveles freáticos | 58 |
| 5.4.2. Ensayos de permeabilidad | 59 |
| 5.5. Conclusiones..... | 60 |
| CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES..... | 61 |
| 6.1. Introducción | 62 |
| 6.2. Estudio de la estabilidad de los taludes de los diques del vertedero | 62 |
| 6.3. Tipologías de roturas..... | 66 |
| 6.3.1. Roturas rotacionales o circulares | 66 |
| 6.3.2. Roturas traslacionales | 67 |
| 6.4. Elección del factor de seguridad | 68 |
| 6.5. Métodos de cálculo | 70 |
| 6.5.1. Método de las dovelas | 71 |
| 6.6. Casos de estudio y análisis de resultados | 73 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO VII. ANÁLISIS DE ASIENTOS | 76 |
| 7.1. Introducción | 77 |
| 7.2. Revisión teórica previa | 77 |
| 7.3. Análisis de asientos y obtención de resultados: | 80 |
| CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES..... | 84 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 89 |
| ANEJO I. PLANO DE SITUACIÓN..... | 93 |
| ANEJO II. PLANO DE EMPLAZAMIENTO..... | 95 |
| ANEJO III. PLANO TOPOGRÁFICO | 97 |
| ANEJO IV. PLANO URBANÍSTICO | 99 |
| ANEJO V. MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA E: 1/50.000. Hoja nº 389 de Tàrrega | 101 |
| ANEJO VI. ANÁLISIS DE RESIDUOS ADMITIDOS EN EL VERTEDERO | 103 |
| A. Tipos de residuos admitidos | 104 |
| B. Cantidades de residuos recibidos | 105 |
| ANEJO VII. TRABAJOS DE CAMPO..... | 109 |
| A. REGISTROS DE LOS SONDEOS Y FOTOGRAFÍAS DE LAS CAJAS | 110 |
| B. REGISTROS DE LOS POZOS O CALICATAS Y FOTOGRAFÍAS..... | 119 |
| C. REGISTROS DE LAS PRUEBAS DE PENETRACIÓN DINÁMICA SUPERPESADA (DPSH) Y FOTOGRAFÍAS..... | 128 |
| ANEJO VIII..... | 133 |
| A.MUESTRA 1: CALICATA Nº 1 DE 1 m A 2m..... | 134 |
| B.MUESTRA 2: CALICATA Nº 3 A 1 m | 142 |
| C.MUESTRA 3: SONDEO Nº 3 DE 2,80 m A 5,90 m..... | 145 |
| D.MUESTRA 4: CALICATA Nº 4 DE 0,20 m A 3,10 m..... | 147 |
| E.MUESTRA 5: SONDEO Nº 3 DE 1,50 m A 1,80 m | 154 |
| F.MUESTRA 6: CALICATA Nº 1 DE 0,30 m A 1,2 m | 156 |
| ANEJO IX.ESTABILIDAD DE TALUDES. SALIDAS GRÁFICAS DEL SOFTWARE SLIDE..... | 159 |
| ANEJO X.ANÁLISIS DE ASIENTOS. SALIDAS GRÁFICAS DEL SOFTWARE SETTLE 3D | 176 |
| ANEJO XI.CÁLCULO HIDROLÓGICO. DISEÑO DE CUNETAS DE DRENAJE | 181 |
| A. Introducción..... | 182 |
| B. Determinación de las áreas de las cuencas..... | 182 |
| C. Determinación de la precipitación de cálculo (P_d)..... | 183 |
| D. Cálculo del tiempo de concentración (T_c) | 183 |
| E. Coeficiente I/I_D | 184 |
| F. Intensidad de precipitación(I) | 185 |



| | |
|--|-----|
| G. Coeficiente de escorrentía..... | 186 |
| H. Cálculo del caudal (Q) | 187 |
| ANEJO XII.OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE | 189 |

ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1 Vertedero al límite de su capacidad (Fuente: Google)..... | 13 |
| Ilustración 2 Segunda ampliación del Vertedero (Fuente: Google) | 14 |
| Ilustración 3 Encuadre geográfico del vertedero | 15 |
| Ilustración 4 Clasificación del suelo..... | 19 |
| Ilustración 5 Datos meteorológicos Lleida (Fuente: meteoblue)..... | 19 |
| Ilustración 6 Esquema lito-estratigráfico regional (Fuente: IGME)..... | 37 |
| Ilustración 7 Mapa sísmico de España (FUENTE: NCSE-02)..... | 40 |
| Ilustración 8 Hoja geológica nº 389 de Tàrrega (Fuente: IGME)..... | 42 |
| Ilustración 9 Columna estratigráfica de Tàrrega (Fuente: IGME)..... | 44 |
| Ilustración 10 Perfil del talud PK 0 + 160..... | 60 |
| Ilustración 11 Perfil del talud PK 0 + 460..... | 63 |
| Ilustración 13 Perfil PK 0 + 160 ejecutado con hipótesis 1. Estabilidad..... | 74 |
| Ilustración 14 Perfil PK 0 + 540 ejecutado con hipótesis 1. Estabilidad..... | 75 |
| Ilustración 15 Valores orientativos del Módulo de Young (Fuente: Blog de V. Yepes).. | 78 |
| Ilustración 16 Valores orientativos del coef. de Poisson (Fuente: Blog de V. Yepes).... | 78 |
| Ilustración 17 Principio de superposición (Fuente: Blog de Víctor Yepes)..... | 79 |
| Ilustración 18 Perfil PK 0 + 160. Hipótesis 1. Asientos..... | 83 |
| Ilustración 19 Perfil PK 0 + 160. Hipótesis 1. Asientos..... | 83 |

TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Composición media (%) de los neumáticos en la UE (Fuente: Cedex) | 26 |
| Tabla 2 Precios de adquisición NFU (Fuente: SIGNUS) | 34 |
| Tabla 3 Cotas del nivel litológico 1 | 52 |
| Tabla 4 Cotas del nivel litológico 2..... | 52 |
| Tabla 5 Cotas del nivel litológico 3..... | 53 |
| Tabla 6 Ensayos de la muestra 17315M1..... | 54 |
| Tabla 7 Ensayos de la muestra 317315M2..... | 54 |
| Tabla 8 Ensayos de la muestra 317315M3..... | 54 |
| Tabla 9 Ensayos de la muestra 317315M4..... | 54 |
| Tabla 10 Ensayos de la muestra 317315M5..... | 54 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 11 Ensayos de la muestra 317315M6..... | 55 |
| Tabla 12 Parámetros geotécnicos del nivel litológico 2..... | 56 |
| Tabla 13 Parámetros geotécnicos del nivel litológico 3..... | 57 |
| Tabla 14 Parámetros geotécnicos de arcillas, gravas, arenas y limos..... | 64 |
| Tabla 15 Parámetros geotécnicos de NFU | 64 |
| Tabla 16 Parámetros geotécnicos de las rocas | 65 |
| Tabla 17 Factores de seguridad globales y probabilidad de rotura | 68 |
| Tabla 18 Factores de seguridad mínimos..... | 69 |
| Tabla 19 Factores de seguridad mínimos requeridos en el proyecto de Escombreras | 69 |
| Tabla 20 Resultados FS perfil PK 0+160 | 73 |
| Tabla 21 Resultados FS perfil PK 0+540 | 74 |
| Tabla 22 Valores del coeficiente de influencia (Fuente: Blog de Víctor Yepes)..... | 80 |
| Tabla 23 Características geotécnicas de tierra vegetal..... | 81 |
| Tabla 24 Características geotécnicas de arcilla..... | 81 |
| Tabla 25 Características geotécnicas de roca arenisca | 81 |
| Tabla 26 Características geotécnicas de roca margosa..... | 81 |
| Tabla 27 Asientos perfil PK 0+160..... | 82 |
| Tabla 28 Asientos perfil PK 0+160..... | 82 |
| Tabla 29 Conclusiones FS PK 0+160 | 86 |
| Tabla 30 Conclusiones FS PK 0+540 | 86 |
| Tabla 31 Conclusiones Asientos PK 0+160 | 87 |
| Tabla 32 Conclusiones Asientos PK 0+540 | 87 |
| Tabla 38 Áreas de cuencas hidrológicas..... | 182 |
| Tabla 39 Tiempos de concentración | 184 |
| Tabla 40 Tiempos de concentración definitivos..... | 184 |
| Tabla 41 Coeficiente I/ID..... | 185 |
| Tabla 42 Intensidades de precipitación | 185 |
| Tabla 43 Umbrales de escorrentía | 187 |
| Tabla 44 Coeficientes de escorrentía..... | 187 |
| Tabla 45 Caudales de las cuencas hidrológicas..... | 187 |

MEMORIA

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES



1.1. Introducción

Actualmente, la sostenibilidad ambiental es un objetivo prioritario y protagonista de muchas discusiones, y cada día somos más conscientes de la gravedad que presenta la emergencia climática existente.

El neumático es un componente esencial en el ámbito de la movilidad, debido al importante papel que presenta en el funcionamiento de los automóviles. Sin embargo, gran parte de los problemas ambientales se encuentran en relación con este elemento, cuya composición química los convierte en materiales difícilmente biodegradables y fácilmente combustibles.

Una vez alcanzada la vida útil de los neumáticos, mayor parte de estos pasan a ser catalogados como neumáticos fuera de uso (en adelante, NFU) y depositados en vertederos. En España, se genera una cantidad aproximada de 300.000 toneladas anualmente de NFU, estando situado como el quinto país que más neumáticos fuera de uso genera en la Unión Europea.

Debido a su tamaño y composición podemos ver que presentan grandes inconvenientes a la hora de ser almacenados, como la ocupación del espacio de los depósitos de residuos, que conlleva el acortamiento de la vida útil del vertedero, y un riesgo elevado de incendio al tratarse de un material combustible.

Aunque existen diversos métodos de eliminación de los NFU, estos conllevan otros efectos negativos en el medio ambiente y suponen costes elevados. Por esta razón, aproximadamente, el 50% de los NFU acaban depositados en vertederos o acumulados al aire libre, que es la forma de deposición que más efectos negativos conlleva. De esta forma, los neumáticos depositados facilitan la concentración de las aguas pluviales en su interior y se convierten en zonas habitables por insectos que pueden producir enfermedades dañinas a la salud pública. Además, en caso de que los NFU sean quemados en un incendio, se producen grandes emisiones de sustancias tóxicas a la atmósfera en el humo negro, cuya extinción es muy complicada.

Al mismo tiempo, podemos ver algunas alternativas de uso de estos materiales que presenta un comportamiento favorable hacia el medio ambiente. Entre ellas podemos encontrar su beneficio en la industria cementera, procesos de recuperación de energía y aplicaciones en la ingeniería civil.

Uno de los usos más importantes que se da a los NFU en la ingeniería civil es su combinación con el suelo, empleándolos como materiales para el refuerzo de taludes o como material para la composición de terraplenes.

En este trabajo académico, se va a estudiar una alternativa para la ejecución de los muros de contención necesarios en la segunda ampliación del vertedero controlado de residuos de les Borges Blanques. Se trata de un depósito perteneciente al Consell Comarcal de les Garrigues y está clasificado como vertedero de residuos no peligrosos.

Siendo más específicos, se van a analizar dos alternativas de muro de contención que crean el perímetro del vaso del vertedero. Dichas alternativas son: (1) muro de contención compuesto por un bloque de neumáticos cubierto de suelo y (2) muro de contención compuesto por una alternancia de una capa constituida por NFU triturado y otra de suelo.

1.2. Objeto del trabajo

El presente Trabajo Final de Grado (TFG) tiene como objetivo utilizar los neumáticos fuera de uso (NFU) como material para la construcción de terraplenes, con el fin de disminuir el riesgo que presentan para el medio ambiente. Se estudiará el comportamiento del NFU en los muros de contención mediante el análisis de la estabilidad de sus taludes y el estudio del asiento que experimentan.

El estudio está mayormente orientado hacia una aplicación práctica de este tipo de material. Para ello, se ha realizado una propuesta de aplicación en el proyecto anteriormente mencionado, llevado a cabo por la empresa KREUM.

Los principales objetivos de este trabajo se encuentran estructurados del siguiente modo:



- ✓ Estudio de las características de los NFU y su posible uso en los muros de contención.
- ✓ Estudio geológico y geotécnico de la zona de las obras.
- ✓ Clasificación del vertedero objeto de estudio y caracterización de los residuos que recoge.
- ✓ Análisis de estabilidad de taludes compuestos por NFU y cálculo de asentos.
- ✓ Estudio técnico-económico y ambiental de las alternativas propuestas.

1.3. Antecedentes

El depósito controlado de residuos de les Borges Blanques es un vertedero de titularidad pública que actualmente se encuentra en funcionamiento. Este vertedero es perteneciente Al Consell Comarcal de les Garrigues.

La Comarca de les Garrigues es perteneciente a la zona de las Comarcas de Poniente, que es especialmente caracterizada por la cantidad de depósitos y la larga vida útil para los que se diseñan estos. En esta zona podemos encontrar dos depósitos: el de les Borges Blanques y el de la Granadella, ambos dirigidos por el mismo Consejo Comarcal.

El depósito de les Borges Blanques ha sido inaugurado en el año 1993 con el fin de recoger los residuos municipales, así como los residuos originados en la industria y en el comercio catalogados como no peligrosos. La primera fase del vertedero estaba prevista para una vida útil de 9 años, desde el año 1993 hasta el año 2001. Posteriormente, en el año 2002, se ejecutó una ampliación para recibir un volumen de 61.000 metros cúbicos adicionales.

En el año 2013 el vertedero se encontraba al límite de su capacidad, por lo que el Consejo Comarcal adoptó el 7 de febrero del 2013 el acuerdo de adjudicación de contrato para la redacción del proyecto de la segunda ampliación del depósito Controlado de les Borges Blanques a la empresa KREUM, S.A.

Este proyecto de ampliación se trataba de una actuación urgente, debido a que los residuos depositados superaban la cota de coronación del vaso del vertedero desde hace un 1 año.



Ilustración 1 Vertedero al límite de su capacidad (Fuente: Google)

Además de la ejecución del vaso del vertedero, el proyecto de ampliación supone una serie de infraestructuras para el correcto funcionamiento de este complejo. Entre ellas podemos ver las siguientes:

- Viales de acceso a los diferentes servicios.
- Caminos perimetrales y caminos de explotación.
- Recogida y sistemas de tratamiento de gases.
- Drenajes y balsas de lixiviados.
- Balsa de aguas semi netas.
- Piezómetros de control del vaso.
- Instalación eléctrica.
- Báscula.
- Instalaciones para la prevención y protección de incendios.
- Zona de limpieza de ruedas.
- Nave para maquinaria, vestuarios y caseta de recepción.

- Punto limpio.

La situación actual del vertedero es la que se puede ver en la siguiente ilustración:



Ilustración 2 Segunda ampliación del Vertedero (Fuente: Google)

El presupuesto del proyecto ascendía a un valor de tres millones ciento veinte siete mil quinientos trece euros y setenta y ocho céntimos (3.127.513,78 €) bajo el cargo del Consejo Comarcal. Parte del presupuesto ha sido financiado por la Agencia de Residuos de Cataluña (ARC) por un valor de ochocientos mil euros (800.000 €), en concepto de subvención directa.

1.4. Encuadre geográfico

Geográficamente, el vertedero de les Borges Blanques se encuentra situado en el término municipal de les Borges Blanques, perteneciente a la Comarca de les Garrigues. Esta comarca forma parte de las comarcas del llano meridional de Lérida, hallándose próximas, y en algunas zonas incluso dentro de la ribera del Ebro.

Este vertedero se localiza a una distancia de 3 kilómetros del centro de les Borges Blanques y es accesible a través de las carreteras LV-7031, LV-2012, N-242 y del puente que atraviesa la carretera nacional mencionada.

En la siguiente ilustración se puede apreciar de forma esquematizada la ubicación del municipio de les Borges Blanques en el territorio español, al igual que la localización del vertedero analizado.

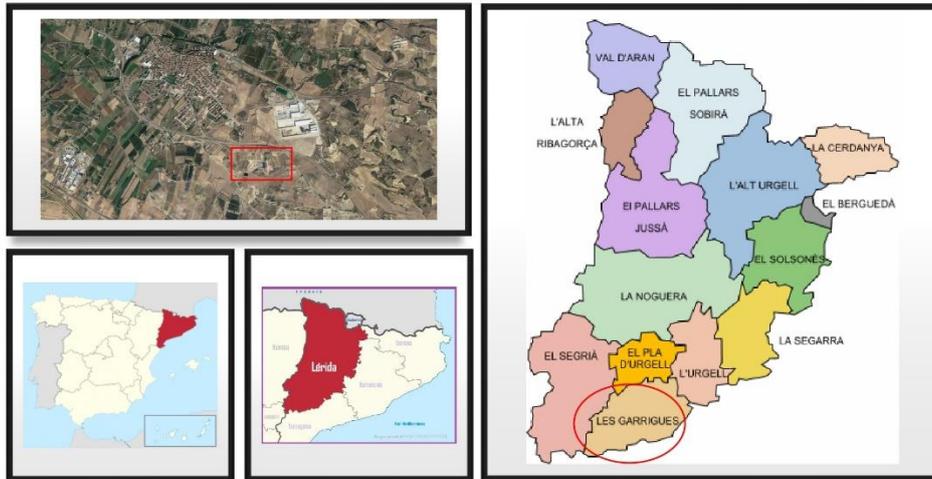


Ilustración 3 Encuadre geográfico del vertedero

1.5. Documentación utilizada

Para la elaboración del consiguiente trabajo académico, se ha utilizado principalmente el proyecto original de la ampliación del vertedero controlado de residuos de les Borges Blanques elaborado por la empresa KREUM s.l. Este proyecto ha sido consultado principalmente para la obtención de los datos de la campaña geotécnica, para la visualización fotográfica del vertedero y para la consulta de los planos del proyecto.

Para la obtención de la información acerca de los NFU y su empleo en obras de tierra y terraplenes, se ha hecho principalmente uso de documentación del CEDEX y numerosos artículos científicos, al igual que otros trabajos académicos que se encuentran referenciados en la bibliografía de este TFG.

1.6. Software empleado

En primer lugar, para la visualización de la zona de estudio se ha empleado los softwares Google Earth y Google Maps. Estos dos programas también han sido usados para la obtención de imágenes.

En segundo lugar, para el análisis del comportamiento de los muros de contención, se han empleado los siguientes softwares:

- Slide 2D, para el análisis de la estabilidad.
- Settle 3D, para el cálculo de los asentos.

CAPÍTULO II. ESTUDIOS PREVIOS



2.1. Introducción

Este capítulo reúne los estudios previos que han sido necesarios para la comprensión de las características medio ambientales que presenta la zona de estudio, al igual que para conocer los factores condicionantes y poder realizar una propuesta de actuación adecuada. Gran parte de la información de estos estudios ha sido extraída del proyecto original de la ampliación del vertedero de les Borges Blanques.

En cuanto al análisis de los vertidos y la clasificación del depósito de residuos, se ha obtenido la información por parte de los organismos competentes del sector correspondiente, como la Agencia de Residuos de Cataluña (ARC).

2.2. Cartografía y topografía

Para la correcta comprensión de la superficie del terreno en la zona de estudio, se ha hecho uso de la cartografía 1:5000 del Instituto Cartográfico de Cataluña, así como el levantamiento topográfico llevado a cabo por la empresa Kreum, que se encuentra disponible en su proyecto.

La cartografía empleada se puede observar en el plano denominado "Plano topográfico", que se encuentra adjunto en el Anejo Nº 1 "Planos".

Una vez analizada la información anterior, se ha llegado a la conclusión de que el municipio de les Borges

Blanques se extiende por el sector septentrional de la comarca, en la zona de contacto entre la llanura regada por el canal de Urgell, al Norte, y las mesetas de la Depresión Central, al Sur. Esta zona se encuentra drenada por los barrancos de las Comes de Vinaixa, d'Estiràs y de Puigpelat. Además, es importante mencionar que la zona estudiada resulta incluida en la partida COMARDÈVOL, que es una pequeña elevación a través de la cual discurren al sur, la autopista A-1, el tren de Alta velocidad, y al Norte la carretera Nacional N-240.

Por otra parte, se han detectado 85,4 ha pertenecientes al espacio de interés natural de los Bessons.



2.3. Clasificación del suelo

Para determinar la clasificación del suelo en el cual se encuentra ubicado el suelo y su uso permitido, se ha recurrido al visor del mapa urbanístico de Cataluña. En la siguiente ilustración (Ilustración 4. Clasificación del suelo), se puede observar con más detalle, la denominación de dicho suelo:

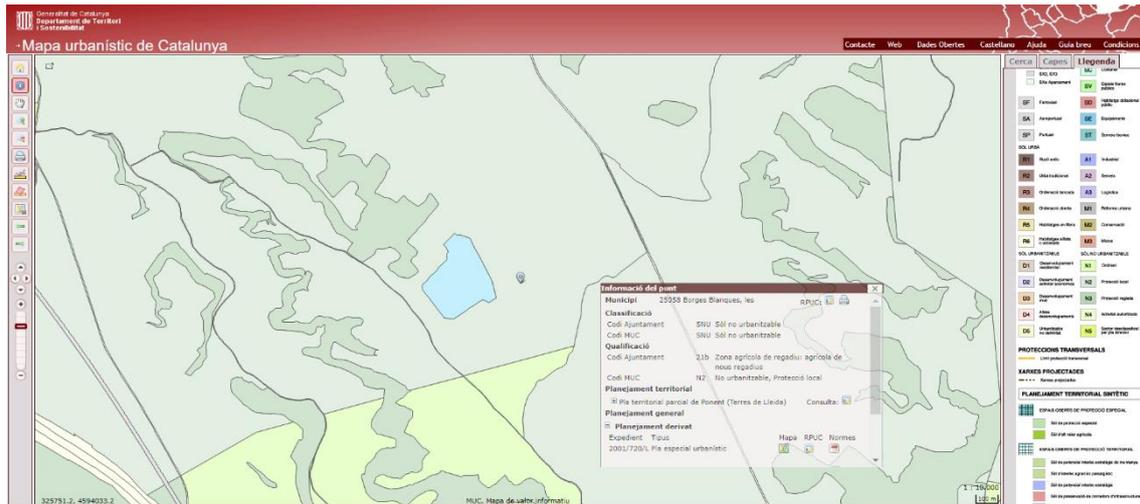


Ilustración 4 Clasificación del suelo

Como se puede observar, el vertedero se encuentra ubicado en un suelo no urbanizable (SNU), tratándose de una zona agrícola de regadío. De esta forma, se entiende que queda totalmente prohibida la urbanización de dicho terreno, pero no la edificación, según el planeamiento urbanístico disponible.

En el Anejo Nº1 "Planos", se encuentra adjunto el "Plano urbanístico" a escala 1:50.000 que incluye la zona de estudio e identifica los tipos de suelo disponibles en el mapa.

2.4. Climatología e hidrología

2.4.1. Climatología

Para caracterizar la zona de climatología de la zona de actuación, se ha analizado los datos de precipitación, temperatura, humedad y vientos facilitados por la Agencia Estatal de meteorología (AEMET) durante el año 2020.

Dichos datos son provenientes de una estación meteorológica ubicada en Lleida, a 3 km aproximadamente de la zona de estudio. La identificación climatológica de la estación empleada es 9771C, y se encuentra ubicada a una Altitud equivalente a 185 metros, Latitud a 41º 37' 34" N y Longitud a 0º 35' 53" E.

Una vez analizados los datos facilitados por la AEMET, se llega el clima de les Garrigues es Mediterráneo Continental Seco, con una precipitación media anual escasa, entre 300 y 350 mm, dándose los máximos en primavera y otoño, y los mínimos en invierno y en verano. En cuanto a la temperatura, se alcanza una temperatura mínima de 2,5 °C durante los meses de diciembre y enero, y una temperatura máxima de 25 °C durante los meses de julio y agosto. El período que se encuentra libre de heladas va desde el mes de junio al mes de septiembre.

En la siguiente ilustración (Ilustración 5 Datos meteorológicos Lleida), se puede observar cómo evolucionan los datos de las temperaturas, precipitaciones y vientos durante el año 2020 en Lleida:



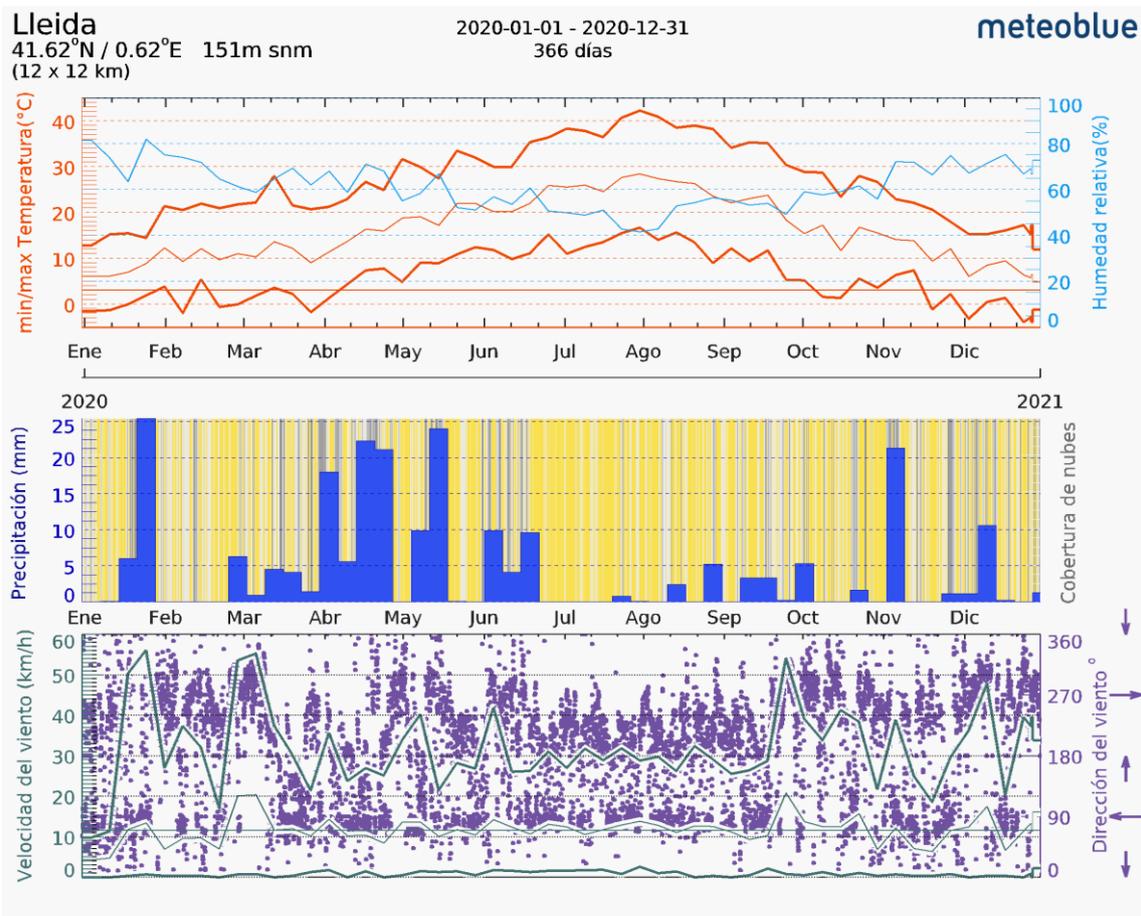


Ilustración 5 Datos meteorológicos Lleida (Fuente: meteoblue)

2.4.2. Hidrología

La zona donde se ubican las obras es perteneciente a la cuenca hidrográfica del Ebro. Dicha cuenca se encuentra situada en el Noreste de la Península Ibérica, limitando con las cuencas hidrográficas del Norte, Duero, Tajo Júcar y Pirineo Oriental.

La extensión de esta cuenca hidrográfica asciende a los 85.534 km², que la hace la más extensa de España y se corresponde con el 17% de la superficie del territorio nacional. A lo largo de esta superficie podemos apreciar importantes variaciones de altitud, siendo la altitud máxima en esta zona de 3.352 m y una mínima de 210 m (*c_ebr_1.pdf*, s. f.).

Esta cuenca hidrográfica es drenada por el río Ebro que discurre en sentido NO-SE, comenzando en las montañas Cantábricas y finalizando en el Mediterráneo.

2.5. Estudio de residuos recogidos en el vertedero

En el Anejo correspondiente, Anejo nºVI "Análisis de residuos admitidos en el vertedero" se ha dedicado una primera parte a la clasificación de los diferentes residuos admitidos en el vertedero controlado de les Borges Blanques. En base al Catálogo Europeo de Residuos, estos deshechos son considerados como no peligrosos.

En cuanto a la cantidad de residuos recibida en el vertedero, asciende a una cifra media de 5.234.378 kg anuales.

2.6. Clasificación del vertedero

Una vez identificados y clasificados los residuos recogidos en el vertedero objeto del estudio, y en base a la normativa recogida en el Anejo I del Decreto 1/97 sobre la disposición de los residuos en depósitos controlados, el vertedero de les Borges Blanques es considerado de clase II.

CAPÍTULO III. EL NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU)



3.1. Generación, reciclaje, reutilización y almacenamiento

Hoy en día, el neumático es un componente cuyo rol en la movilidad es indispensable. Además, con el significativo desarrollo de la industria en los últimos años, el volumen de neumáticos usados ha ido aumentando exponencialmente. Aproximadamente mil millones de neumáticos usados son generados anualmente en el mundo. Según el Ministerio de Transición Ecológica, en el año 2017, se generaron alrededor de 250 millones de neumáticos en EE. UU y en el mismo año, España ha producido aproximadamente 200.000 toneladas de NFU (González Rodrigo, 2020).

En el año 2017, aproximadamente el 17% de los NFU todavía se depositaban en vertederos, siendo esta práctica prohibida desde el año 2003 (Hidalgo Signes, 2017). Esta forma de almacenamiento de NFU supone numerosas desventajas, siendo estas las más significantes: la retención de aguas, la ocupación por insectos portadores de enfermedades y los incendios (Ahmed, 1993) . Además, el almacenamiento de neumáticos en vertederos supone la reducción de su vida útil, debido al gran volumen que ocupan y la resistencia a compactación que presentan (Tafreshi & Norouzi, 2015).

Los neumáticos están compuestos principalmente por caucho reforzado con fibras sintéticas y acero de alta resistencia, lo que los convierten en un material con propiedades únicas (elevada resistencia a tracción, una gran flexibilidad y elasticidad y una elevada resistencia a la fricción). Sus propiedades mecánicas prácticamente son inalterables, incluso después de su fecha de expiración (Garga & O'Shaughnessy, 2000). Debido a estas características que lo hacen un material difícilmente biodegradable y los problemas medioambientales y económicos que conlleva su generación, la búsqueda de soluciones para su reciclaje y reutilización ha sido objeto de investigación durante muchos años.

Analizando los datos de los años anteriores referentes al reciclaje y reutilización de los NF, podemos ver que en la actualidad aproximadamente el 66% de los neumáticos desechados son tratados en lugar de depositados en vertederos (Hossain & Jayawickrama, 2000). Sin embargo, el porcentaje restante sigue siendo una cifra preocupante.



Hoy en día, existen numerosas técnicas de tratamiento de los NFU, pero todas suponen elevados costes y procesos duraderos. Las técnicas más usadas son las siguientes (Hossain & Jayawickrama, 2000):

- Recauchutado para su nuevo uso como neumáticos: esta técnica se ve cada vez marginada, debido a la evolución de los neumáticos.
- Generación de energía: los neumáticos pueden ser quemados como combustible en centrales eléctricas, en fábricas de cemento y como combustible de generadores de vapor. En los EE. UU, se usan aproximadamente 114 millones de neumáticos anualmente en esta práctica.
- Combustible derivado de neumáticos (conocido por sus siglas en inglés TDF): es la técnica más empleada para la eliminación de los NFU. Esta metodología consiste en la trituración del neumático para la extracción del cable presente en su composición. Cuanta más elevada es la cantidad de cable removido, más combustible es extraído de este. Esta técnica presenta una eficiencia del 80%, por lo que la convierte en una práctica muy comprometedor para la eliminación de estos materiales.
- Pirólisis: consiste en la descomposición térmica del material orgánico bajo la exclusión del Oxígeno. Esta técnica da como resultado la generación de gases, aceites, negro de baja calidad y acero.

Las técnicas de reutilización y reciclaje anteriores también suponen efectos adversos al medioambiente, especialmente debido a los contaminantes producidos a la hora de ser quemados.

En cambio, se han descubierto numerosas aplicaciones en la ingeniería civil, que suponen costes mínimos al no necesitar de tratamientos previos y no conllevan daños al medio ambiente. Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) estos materiales pueden ser usados en aplicaciones ambientales de forma totalmente segura. Algunos ejemplos claros de estas aplicaciones son en las gomas para superficies, en el asfalto modificado con goma y en capas de césped artificial. Además de las aplicaciones anteriores, podemos encontrarlos como materiales utilizados para disminuir las



vibraciones producidas por el ferrocarril (Hidalgo Signes, 2017) y como soluciones geotécnicas (Garga & O'Shaughnessy, 2000).

3.2. Composición y propiedades de los NFU

Los principales materiales que se usan para la composición del neumático son el caucho, el negro de carbono, el acero, el textil, los aditivos químicos, el óxido de zinc y el azufre.

Podemos ver una variación en cuanto a la composición según la normativa aplicable en cada país. En nuestro caso, la normativa aplicable es de la Unión Europea, la cual establece la siguiente composición media para los neumáticos:

| TIPO | Peso (kg) | Caucho y elastómeros | Negro de carbono | Metal (acero) | Textil | Aditivos y otros |
|--------------------------|-----------|----------------------|------------------|---------------|--------|------------------|
| Turismos | 6,5-9 | 48 | 22 | 15 | 5 | 10 |
| Vehículos pesados | 55-80 | 43 | 21 | 27 | 0 | 9 |

Tabla 1 Composición media (%) de los neumáticos en la UE (Fuente: Cedex)

Como se puede ver a partir de la composición de los neumáticos establecida en la UE, en ambos tipos de neumáticos, los componentes más abundantes son el caucho y los elastómeros. La cantidad de cada uno de ellos depende del uso y del ambiente en el cual el neumático va a ser explotado.

El negro de carbono es utilizado principalmente para fortalecer el caucho en los neumáticos y con su aplicación se consiguen variaciones en la rigidez, en la resistencia a tracción y en la abrasión. Este componente es aplicado en diferentes partes del neumático.

En cuanto a los metales usados en el neumático, su aplicación se reduce al empleo de alambres de acero que convierten la carcasa en una capa rígida, resistente y flexible. En la misma parte del neumático, se añaden los textiles, que como se puede ver, son usados únicamente en los turismos. Los textiles normalmente empleados son el nylon, rayón y el poliéster.

El uso de aditivos en el caucho y el negro de carbono tiene como objetivo la modificación de la dureza y la resistencia que presentan y el incremento de su resistencia a la



abrasión, aceites, oxígeno, disolventes químicos y al calor. Entre los aditivos químicos más usados se encuentran las cargas, plastificantes, estabilizantes, agentes colorantes, acelerantes y retardantes.

Por último, hay que mencionar la importancia del uso del azufre, que tiene como objetivo fundamental mejorar la durabilidad del neumático.

A continuación, se pueden ver las propiedades de los NFU facilitadas por el CEDEX de forma detallada.

3.2.1. Propiedades físicas

Como el caucho es el material más abundante en la composición de los neumáticos, hace que estos presenten unas características de permeabilidad elevadas, un peso reducido y una gran resistencia a la compactación.

3.2.2. Propiedades químicas

Una de las propiedades químicas principales de los neumáticos es la baja biodegradabilidad, de la cual han surgido numerosos problemas medioambientales. Además, presenta una reactividad baja frente a gases y líquidos y una elevada resistencia a la intemperie. De este modo, al no ser un material reactivo, los lixiviados no son contaminantes.

3.2.3. Propiedades mecánicas

Debido a la forma tórica que presentan y a su elasticidad, los NFU son difícilmente compactables y presentan una elevada flexibilidad, característica que les permite la absorción de elevadas vibraciones. Además, según ensayos triaxiales, estos tienen una elevada resistencia a corte.

En cuanto a los ángulos de fricción interna, se han determinado sus valores entre 19 y 16°, según los resultados facilitados por el laboratorio geotécnico del CEDEX. Mientras que los valores de cohesión se han valorado entre 4.3 y 11.5 kPa. Por último, en base a los ensayos de compresibilidad, se han determinado módulos de elasticidad entre 770 y 1.200 kPa.

3.3. Aplicaciones de los NFU en la ingeniería civil

Los neumáticos fuera de uso pueden ser empleados tanto en obras estructurales como no estructurales, con el fin de sustituir los materiales habitualmente utilizados y evitar los perjuicios que conlleva su almacenamiento para el medioambiente. Como se ha dicho anteriormente, el uso de los NFU en las obras de ingeniería civil no necesita de previos tratamientos en la mayoría de los casos, lo cual concluye en sobrecostes, largos tiempos y contaminación.

3.3.1. Capas de goma en áreas recreativas

Con el fin de evitar lesiones, las superficies de los recreos de las zonas de juego para niños y las superficies deportivas se cubren con una capa de gránulos de caucho. Los NFU triturados en tamaños comprendidos entre 1/4 y 5/8 pulgadas son aptos para sustituir el árido normalmente empleado. Entre los beneficios que conlleva el uso de estos materiales en este caso podemos encontrar: protección frente a golpes, una mayor durabilidad y un menor desgaste. Además son materiales que presentan un comportamiento muy efectivo en cuanto al drenaje de las aguas, y el coste de adquisición es muy competitivo al tener una vida útil mayor (Hossain & Jayawickrama, 2000)

3.3.2. Carreteras

La aplicación de los NFU en las infraestructuras viales es una de las más desarrolladas. En numerosas ocasiones ya se pueden encontrar los NFU en forma granular empleados



para la fabricación de betunes. Con esta técnica se pretende sustituir a los áridos habitualmente usados en las mezclas bituminosas.

La adición de partículas de NFU en mezclas asfálticas produce modificaciones positivas. Hay numerosos estudios y literatura que demuestran los beneficios del uso de NFU en las carreteras. Uno de los más destacados es de Khalili et al. (2019) y de Kim et al. (2010), que demuestra que el empleo del caucho como modificador aumenta la viscosidad de la mezcla, reduce los modos de falla de los materiales a valores aceptables, mejora la elasticidad y aumenta la rigidez. Por otra parte, podemos concluir de la investigación elaborada por Mashaan y Karim (2013) acerca la influencia del caucho granulado sobre el asfalto modificado, que, a mayor cantidad de caucho empleado, mayor es el módulo de cizalladura y mayor es el módulo de almacenamiento.

Según Sadique Hossain y W. Jayawickrama (2000), el uso de NFU en este tipo de infraestructuras da lugar también a la mejora de las propiedades de deshielo, reducción del ruido del tráfico y una vida útil significativamente mayor y, por lo tanto, un menor coste del ciclo de vida.

España es considerada líder europeo en uso de mezclas asfálticas mejoradas con caucho procedente de NFU. Se estima que 1.200 kilómetros entre las autopistas del territorio nacional, las carreteras convencionales y los viales urbanos han sido pavimentados con esta técnica.

Además de su uso en la composición de los pavimentos, podemos encontrar su empleo en sistemas de seguridad vial y en pantallas antruido.

3.3.3. Protección de costas y arrecifes artificiales

Los neumáticos en actuaciones costeras han sido usados desde la década de los años setenta. Estos presentan un funcionamiento muy efectivo, funcionando como rompeolas, con el fin de proteger puertos o costas de fuertes impactos (Hossain & Jayawickrama, 2000).



También podemos encontrar neumáticos empleados en la constitución de arrecifes artificiales para incrementar las concentraciones de especies marinas (Hossain & Jayawickrama, 2000). Los neumáticos presentan buenas características en esta práctica debido a su bajo coste, mayor vida útil, su gran tamaño y su facilidad de diseño y construcción. Además, es un método para deshacerse de grandes cantidades de los vertederos (Ahmed, 1993). Existe un experimento desarrollado por la oficina de deportes, pesca y vida silvestre de los EE. UU (BSFW) en el cual se demuestra que la formación de todos los arrecifes artificiales necesarios podría absorber todos los NFU disponibles en los EE. UU. Sin embargo, no hay que dejar de lado los efectos adversos que conlleva esta práctica hacia el medio marino.

3.3.4. Edificación y obra pública

Hasta hoy en día, existen estudios que demuestran el uso efectivo de los NFU en este campo únicamente como árido para el hormigón. Podemos ver un estudio desarrollado por Aiello & Leuzzi (2010) en el cual se ensayaron varias muestras de hormigón compuestas por partículas de caucho como sustituto del material granular. Como resultados principales se han obtenido que el NFU provoca una reducción del peso específico de la mezcla, mejora su trabajabilidad y el comportamiento de post-fisuración. Otros resultados de este mismo estudio han demostrado que también se producen modificaciones en el hormigón como la reducción de la resistencia a compresión y flexión (Hidalgo Signes, 2017). Según el Cedex, esta disminución de la resistencia a compresión puede alcanzar el 85% en los casos que el NFU se emplee sustituyendo el árido grueso, y el 65% cuando se sustituye el árido fino, mientras que la resistencia a tracción puede sufrir una bajada máxima del 50% en ambos casos.

El CEDEX indica que debido a la pérdida de resistencia que conlleva la introducción del caucho en las dosificaciones de hormigón, no conviene la sustitución de un porcentaje superior a 20 del total de los áridos por partículas de neumáticos. En cambio, existen técnicas para mejorar la resistencia del hormigón modificado por NFU, como bañando



las partículas de caucho en pasta de cemento, con el fin de mejorar la adhesión entre estas y la matriz.

3.3.5. Vertederos

Una de las aplicaciones de los NFU con más éxito es su empleo en los vertederos. El Departamento de Reciclaje y Recuperación de Recursos de California (CIWMBD), ha aprobado una serie de aplicaciones de neumáticos en los depósitos de RSU, que se pueden ver a continuación (Kuo et al., 2003):

- **Cubierta diaria:** consiste en el empleo de una capa constituida por NFU en la cara del vertedero con el fin de evitar los malos olores, el fuego y el movimiento de insectos. Con esta técnica es posible el uso de tres millones de neumáticos por vertedero municipal.
- **Capa de base:** es obligatorio el uso de capas de base constituidas de materiales apropiados que faciliten el drenaje en los vertederos clausurados. Como se ha mencionado anteriormente, los NFU presentan un excelente comportamiento en cuanto al drenaje de líquidos. Además, existen numerosos estudios desarrollados por GeoSyntec Consultants que demuestran la eficacia de los NFU en para esta práctica.
- **Sistema de recolección de gases del vertedero:** la técnica de conducción de gases del vertedero ha sido demostrada por SCS Engineers (Penoyer et al., 2006). Esta consiste en el transporte de los gases reunidos en el vertedero a través de capas horizontales compuestas por neumáticos hasta las instalaciones requeridas para su vertido.
- **Sistema de drenaje de lixiviados:** el drenaje de lixiviados es un requerimiento en todos los vertederos de residuos urbanos. El empleo de sistemas de drenaje a base de NFU supone el mismo resultado que sistemas constituidos por materiales agregados. Hay numerosos estudios que demuestran la efectividad de esta técnica.



3.3.6. Obras de tierra y terraplenes

Según el Departamento de transporte de la Federal Highway Administration, los NFU pueden ser usados como materiales de relleno en terraplenes y en muros de contención. Además, pueden ser empleados de forma independiente o mezclados con tierra (Yeşiller et al., 2018).

Hoy en día, al menos 15 estados han utilizado el neumático triturado como material de relleno en los terraplenes, y muchos de ellos ya han establecido especificaciones para este uso. En España, el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, gracias a su participación como consorcio en un proyecto I+D+i cooperativo para la construcción de un terraplén experimental en el Ramal 3 del Enlace 1 de la Autopista AP-46, Alto de las Pedrizas (Málaga), compuesto por dos tramos: uno relleno de NFU troceados y otro relleno de mezcla NFU-tiempo, ha redactado una "Guía para el proyecto y ejecución de rellenos viarios con NFU troceados" para la Delegación General de Carreteras.

Analizando los datos existentes, podemos encontrar 70 proyectos exitosos, basados en esta aplicación, siendo un porcentaje muy reducido en el cual se han experimentado problemas. Tres proyectos desarrollados en los EE. UU han experimentado problemas de combustión, que, según las investigaciones preliminares, fueron causados por el calor liberado. Sin embargo, existen numerosas técnicas para la prevención de incendios en este tipo de casos.

Existe bastante bibliografía sobre la incorporación de NFU en los terraplenes. Uno de los estudios más destacados es el desarrollado por Vinod K. Garga y Vince O'Shaughnessy (2000). En esta investigación se ha estudiado el comportamiento de un terraplén de dimensiones 57x17 metros, en el que se ha hecho uso de aproximadamente 10.000 neumáticos enteros con la extracción de uno de sus lados, para su relleno con tierra, y unidos entre sí mediante cuerdas de polipropileno de 9,4 mm de diámetro. Tras numerosos experimentos, se ha demostrado que no se han producido daños significativos en el terraplén, incluso tras la circulación de vehículos pesados sobre estos, en los casos de uso de suelo cohesivo. Otras de las importantes demostraciones de este

estudio, es la capacidad de reducción del empuje y consigo evitar la fricción negativa mediante la inclinación de los taludes hasta un ángulo de 70º como máximo.

El uso de neumáticos para la construcción de terraplenes presenta varias ventajas. Una de las ventajas más destacables es su ligero peso, lo cual permite su construcción incluso sobre áreas de baja resistencia. Debido a sus propiedades explicadas anteriormente, este material ofrece buenas características térmicas para resistir la penetración de las heladas y presenta un buen comportamiento drenante, siendo tan permeable como un suelo granular grueso. Por otro lado, su uso en los terraplenes requiere el empleo de grandes volúmenes, lo que permite su rápida eliminación, y el equilibrio que existe entre su coste de adquisición y su ciclo de vida en comparación con el de los suelos habitualmente empleados en este tipo de obras, lo convierte en un material muy competitivo (Epps, 1994).

3.4. Evaluación económica de la reutilización de NFU

Como se ha mencionado anteriormente, los usos alternativos de los NFU han presentado comportamientos muy positivos, tanto en el aspecto técnico como en el aspecto económico. En este apartado se pretende la identificación de los costes de adquisición de este material en el territorio español y el coste de las actividades necesarias para su puesta en obra. De esta forma, se hace posible la obtención de una estimación del coste de la solución propuesta.

El Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados (SIGNUS) es una entidad sin ánimo de lucro, encargada de gestionar el reciclado de los neumáticos tras el periodo de su vida útil en España. Esta entidad también se ocupa de la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones de estos productos, por eso establece sus precios de adquisición que se encuentran recogidos en la siguiente tabla:

| CATEGORÍA | DESCRIPCIÓN | PESO (kg) | PRECIO/UD |
|-----------|------------------------------------|-----------|-----------|
| A | Moto, scooter y ciclom. | - | 0,86 € |
| B | Turismo | - | 1,44 € |
| C | Camioneta, 4x4, todo terreno y SUV | - | 2,31 € |



| | | | |
|----|--|------------------|---------|
| D | Camión y autobús | - | 10,65 € |
| E1 | Manutención, macizo, quad, kart y jardinería | ≤ 5 kg | 0,25 € |
| E2 | | > 5 y ≤ 25 kg | 1,95 € |
| E3 | | > 25 y ≤ 50 kg | 5,06 € |
| E4 | | > 50 y ≤ 100 kg | 10,89 € |
| E5 | | > 100 kg | 25,27 € |
| F1 | Agrícola | < 50 kg | 4,78 € |
| F2 | | ≥ 50 y < 100 kg | 11,40 € |
| F3 | | ≥ 100 y < 200 kg | 17,25 € |
| F4 | | ≥ 200 kg | 46,64 € |
| G1 | Obra pública e industrial | < 50 kg | 4,30 € |
| G2 | | ≥ 50 y < 100 kg | 10,08 € |
| G3 | | ≥ 100 kg | 22,79 € |

Tabla 2 Precios de adquisición NFU (Fuente: SIGNUS)

En base al análisis de los datos mostrados en la tabla anterior se llega a la conclusión de que el coste de adquisición es aproximadamente de 1,875€, en el caso de usar neumáticos provenientes de turismos, camionetas, 4x4, todo terreno y SUV.

Teniendo en cuenta la solución adoptada en este trabajo, los neumáticos no requieren de tratamientos previos a su utilización en la composición de los terraplenes. Dichos materiales serían depositados uno junto al otro y unidos mediante una cuerda resistente al fuego.

CAPÍTULO IV. MARCO GEOLÓGICO



4.1. Geología Regional

4.1.1. Geología general

Para el estudio geológico de la zona analizada se ha hecho uso del mapa geológico nº 389 de Tárrega, a escala 1:50.000 facilitado por el Instituto Geológico y Minero de España, en el cual se encuentra situado el municipio de les Borges Blanques. Se puede observar la reproducción de este mapa en el Anejo nº X adjunto a este documento.

La hoja de Tárrega se ubica en el Sector central de la Cuenca del Ebro en una posición intermedia entre el Pirineo y la cadena costera catalana. Esta cuenca corresponde a los últimos estadios de evolución de la cuenca de antepaís meridional del orógeno pirenaico, aunque sus márgenes meridional y oriental estuvieron afectados por la actividad tectónica de la Cordillera Ibérica, y de la Cordillera Costero Catalana.

En el sector centro-septentrional, abunda un relieve llano que configura el Pla de Urgell, del que sobresalen algunos cerros, preservados de la erosión plio-cuaternaria, como el de Sant Eloi, con 390 m de altitud. Sin embargo, en la parte meridional podemos identificar un relieve tabular, que configura la sierra de Tallat, cuya altitud asciende a los 678 metros en Sant Roc.

Los materiales que constituyen el territorio incluido en la Hoja son de edad oligocena y cuaternaria. En primer lugar y en el sector norte de la hoja, los materiales de Oligoceno están constituidos por arcillas y areniscas de origen fluvial, mientras que, en el sur, estos mismos alternan con areniscas y calizas de origen lacustre. En segundo lugar, en la composición de los materiales cuaternarios, ver diferentes materiales según el nivel: en los primeros niveles dominan los conos de deyección de los ríos d'Ondara y Corb, a continuación, se encuentran los materiales de edad oligocena que abundan en la parte centro-septentrional de la hoja y finalmente el resto de los depósitos cuaternarios que se corresponden a rellenos de "vales" y a coluviones de diferente extensión.

El sector sureste se caracteriza por el buzamiento generalizado de unos 4º hacia el noroeste que presentan los materiales oligocenos. También podemos ver un buzamiento hacia el oeste en los materiales situados en el sector norte.



Podemos encontrar dos áreas de aporte a lo largo del mapa geológico de Tárrega: los materiales fluviales de la zona norte son de procedencia pirenaica, mientras que los materiales fluviales del sector meridional, existe una elevada probabilidad de que su procedencia sea de los Catalanices.

4.1.2. Lito-estratigrafía

Como se ha señalado en el apartado anterior, en la zona territorial comprendida en la Hoja geológica de Tárrega, se encuentran materiales terciarios y cuaternarios.

En cuanto a los primeros, correspondientes a depósitos continentales que colmataron la Depresión Central Catalana durante el Oligoceno, podemos encontrar su proporción más antigua aflorada en la parte superior de la Formación Calizas e Tárrega, situada en la zona este de la hoja. Esta parte de la formación está compuesta por una alternancia de capas tubulares de calizas lacustres y areniscas y arcillas de origen fluvial. Por encima de estos materiales se encuentran las facies fluviales pertenecientes a la Formación Urgell (Riba et al., 1967) y en la parte meridional de la hoja, estas se juntan con facies lacustres detríticas. Dichos cambios estratigráficos, notifican un notable cambio paleogeográfico en este sector de la cuenca.

Es de vital importancia mencionar la abundancia de los materiales detríticos rojos de origen fluvial en la zona. Estos afloran en el sector septentrional de la hoja y tienen un origen pirenaico. En cambio, los materiales del mismo origen situados en el sur de la hoja se encuentran intercalados entre las facies lacustres, presentan una composición petrográfica diferente a los anteriores, y se hallan en continuidad física, y muy próximos geográficamente a los sedimentos conglomeráticos procedentes de la Cadena Costero-catalana.

Por encima de las calizas de Tárrega se ha determinado una ordenación vertical rítmica de los sedimentos según la sucesión estratigráfica, compuesta por alternación de niveles de depósitos fluviales en la base y por sedimentos de ambientes lacustre-palustres en

los techos. En esta hoja existen 6 niveles rítmicos y se denominan "unidades genético-sedimentarias".

Encima de la Unidad Tárrega, se encuentran las dos unidades más antiguas de la zona Vallbona y Omells), ocupando el sector septentrional de la Hoja. Estas formaciones están constituidas principalmente por sedimentos fluviales coronados en el techo por un paleosuelo de tipo calcimorfo.

Haciendo referencia a las unidades de los materiales terciarios, se ha determinado que la parte superior de la Unidad Tárrega compuesta por los niveles calcáreos de El Talladel, es del Oligoceno inferior alto, biozona de *Theridomys* major. En cuanto a los sedimentos carbonatados del Pla del Pepe, se ha atribuido una edad Chattiense a los materiales más altos estratigráficamente presentes en la hoja y una edad Estampiense-Chattiense al resto de materiales disponibles en la hoja.

Con relación a los materiales cuaternarios, en su composición sobresalen los depósitos de conos de deyección ocupando diversos niveles, pertenecientes a los Ríos d'Ondara y Corb, depósitos de "vales" y sedimentos coluviales de diferente entidad.

En la siguiente ilustración, se pueden observar de forma gráfica los materiales anteriormente mencionados y su distribución a lo largo del territorio de la hoja.

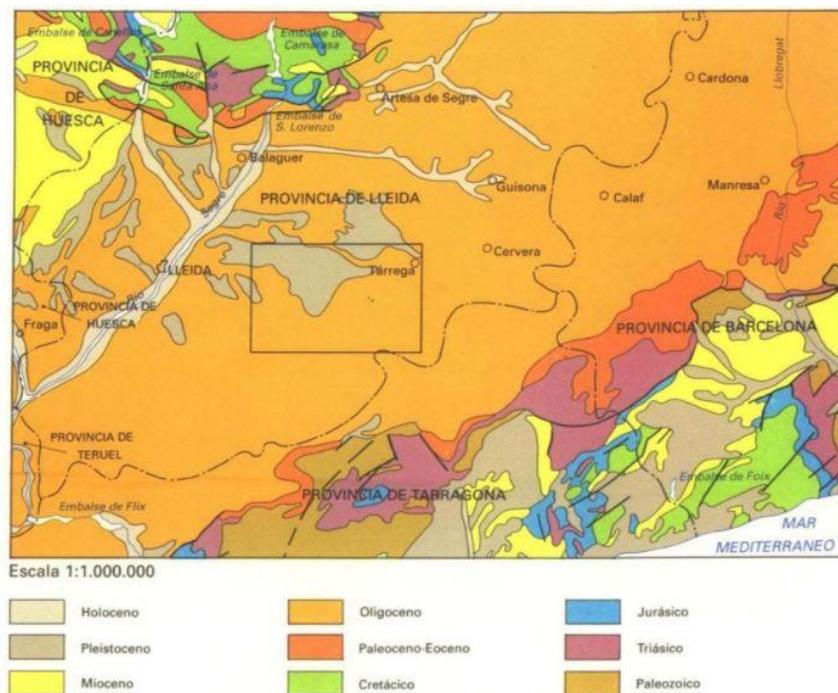


Ilustración 6 Esquema lito-estratigráfico regional (Fuente: IGME)

4.1.3. Tectónica

Como ya se ha hecho referencia en los apartados anteriores, la Hoja Geológica de Tárrega se encuentra ubicada el sector oriental de la Cuenca del Ebro. En el ámbito tectónico, esta cuenca pertenece a los últimos estados evolutivos de la cuenca de antepaís de la Cordillera Pirenaica.

Los sedimentos terciarios, que forman el sustrato de la Cuenca del Ebro son de edad triásica y jurásica, con retazos cretácicos aislados, excepto en la parte oriental, predomina mayoritariamente el zócalo. Se puede apreciar una inclinación general de la parte superior de esta superficie hacia el Norte, llegando a alcanzar profundidades superiores a 3500 metros bajo el nivel del mar en su sector septentrional. En la zona meridional esta profundidad no excede los 1000 metros.

Según la edad de los rellenos sedimentarios, se conoce que los depósitos más antiguos afloran en los sectores septentrional y oriental y los más modernos en las áreas meridionales y orientales.

Además, al existir en los bordes de esta hoja la unidad alóctona pirinaica y la catalánide, se pueden encontrar en la estratigrafía facies molásicas con una distribución de paleocorrientes que oscila desde la zona pirenaica hasta la zona catalánide.

Por último, cabe destacar que, en esta Hoja Geológica, apenas se determinan estructuras cartografiables, estando las capas dispuestas con una ligera y constante inclinación de 2 a 3°. De esta forma, se concluye que la estructura general de la hoja es un sinclinal muy laxo de orientación este-oeste, con ligera inmersión hacia el oeste. El flanco septentrional de este pliegue se continúa al norte de la hoja.

4.1.4. Condiciones hidrogeológicas

La zona comprendida en esta Hoja Geológica se encuentra situada en la cuenca del Ebro y atravesada por diferentes ríos, siendo el principal de ellos el Corb. Otro río de menor magnitud, pero importante es el d'Ondara.

En cuanto a las condiciones hidrogeológicas, existen diferentes comportamientos en función del nivel de materiales en el que nos encontramos situados.

En primer lugar, en los cuaternarios, destacan los conos de deyección que forman el acuífero de las "Gravas de Urgell", alcanzando una extensión de 100 km². En esta formación de depósitos se da la mejor circulación de aguas subterráneas, ya que su litología característica es de gravas más o menos cementadas en una matriz arenoso-limosa.

Las recargas de agua se ejecutan en mayor proporción por la infiltración directa de la precipitación y por los excedentes de regadío, y en menor proporción por los ríos que atraviesan el acuífero. Mientras que las descargas se dan fundamentalmente a través de pozos y galerías, y en con el desagüe directo hacia el río Segre. Se pueden identificar un total de 27 puntos de agua con esta formación, siendo la mayoría de ellos pozos excavados a poca profundidad.

Los depósitos cuaternarios también se manifiestan en la zona de los ríos Corb y d'Ondara, siendo en este caso su litología principal una composición en la cual abunda la arcilla, con niveles de grava y arenas, espesores de 5 metros y anchuras entre 100 y 500 metros. En este caso, encuentra explotado únicamente el acuífero del río d'Ondara.

En cuanto al resto de depósitos de la zona catalogados como cuaternarios, no tienen una considerable influencia en el ámbito hidrogeológico, debido a su reducida extensión y la abundancia de limos en su litología.

En segundo lugar, en los depósitos terciarios, podemos ver más variedad de comportamiento hidrogeológico. En este caso se pueden diferenciar dos tipos de formaciones según dicho comportamiento: el de una formación carbonatada de las calizas de Tàrrega, que aflora en la parte oriental de la hoja geológica, y el de las facies detríticas con niveles de areniscas de la Formación Urgell.

La formación de las calizas funciona como acuífero multicapa debido a su composición alternante de niveles carbonatados con arcillas y areniscas. Mientras que el resto de las zonas donde abundan estas formaciones no resultaron útiles en cuanto a extracción de agua, excepto a uno que abastece a la población de Omells.

4.1.5. Condiciones sísmicas

La peligrosidad sísmica del territorio español se encuentra determinada en el mapa sísmico de la norma sismorresistente NCSE-02, proporcionado por el Ministerio de Movilidad, Transportes y Agenda Urbana.

En dicho mapa se muestra la aceleración sísmica básica a_b , que expresa un valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno, y el coeficiente de contribución K, que hace referencia a la influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto.

Teniendo en cuenta el siguiente mapa sísmica y la ubicación de la zona de estudio, les Borges Blanques se encuentra ubicado en una zona, cuya aceleración sísmica básica

equivale a 0,04g. Como este valor, se encuentra en el rango $0,04g \leq a_b < 0,08g$, tomamos el valor 0,08g para los cálculos, al ser el mayor.



Ilustración 7 Mapa sísmico de España (FUENTE: NCSE-02)

En cuanto a la aceleración sísmica de cálculo, se obtiene a partir de la siguiente expresión establecida en NCSE-02:

$$a_c = S \times \rho \times a_b$$

Donde:

- a_b : aceleración sísmica básica.
- ρ : coeficiente adimensional de riesgo, en función de la probabilidad aceptable de que se exceda a_c en el período de vida para el que se proyecta la construcción.

Toma los siguientes valores:

- construcciones de importancia normal $\rightarrow \rho = 1,0$.
- construcciones de importancia especial $\rightarrow \rho = 1,3$.
- S : coeficiente de amplificación del terreno. Toma el valor:
 - Para $\rho \times a_b \leq 0,1g$

$$S = \frac{C}{1,25}$$

- Para $0,1g < \rho \times a_b < 0,4g$

- $S = \frac{C}{1,25} + 3,33(\rho \times \frac{a_b}{g} - 0,1) (1 - \frac{C}{1,25})$

- Para $0,4g \leq \rho \times a_b$

$$S = 1,0$$

- C: coeficiente de terreno. En este caso al tratarse de un terreno tipo III (suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia muy firme", la normativa establece un valor de C equivalente a 1,6.

De este modo, la aceleración sísmica de cálculo resulta:

$$\rho \times a_b = 1 \times 0,08g = 0,08g < 0,1g \rightarrow S = \frac{C}{1,25} = \frac{1,6}{1,25} = 1,28$$

$$a_c = S \times \rho \times a_b = 1,28 \times 1 \times 0,08g = 0,102$$

4.2. GEOLOGÍA DETALLADA

4.2.1. Lito-estratigrafía

La zona objeto de análisis se encuentra ubicada en la esquina suroeste de la Hoja Geológica de Tàrrega. A continuación, se puede observar un fragmento de dicha hoja, facilitada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME):

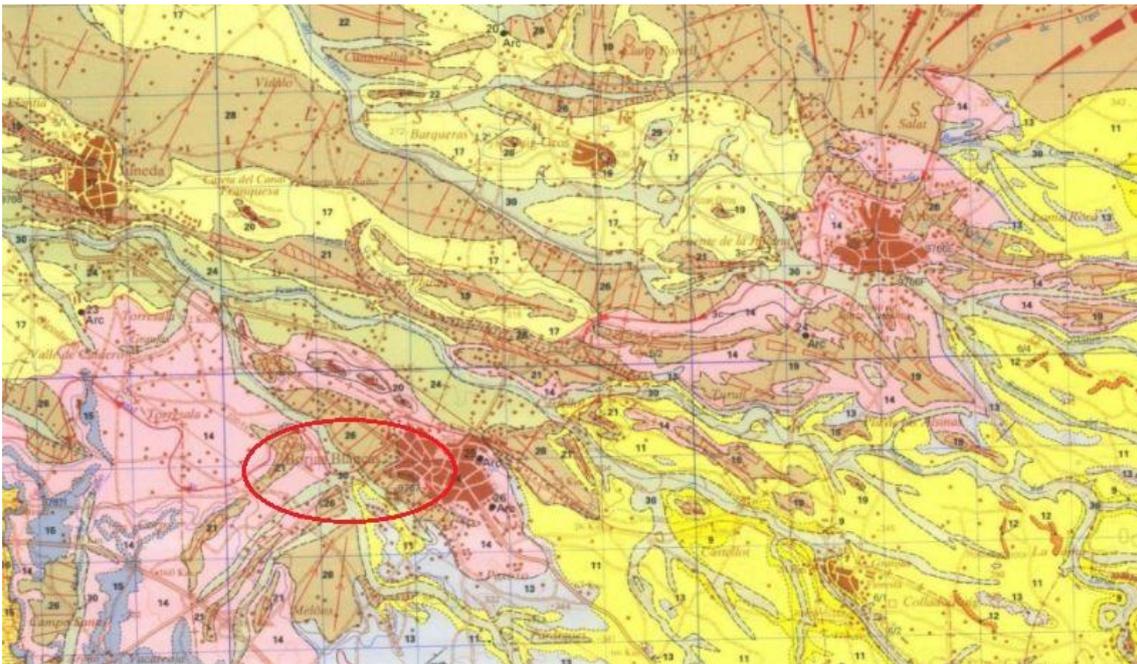


Ilustración 8 Hoja geológica nº 389 de Tàrraga (Fuente: IGME)

Haciendo referencia a las características litológicas, el vertedero se sitúa sobre materiales terciarios y cuaternarios. Estos materiales se encuentran definidos por el IGME en la memoria asociada al mapa geológico de España a escala 1:50.000 "segunda serie – primera edición", hoja geológica de Tàrraga.

En cuanto a los materiales terciarios encontramos:

- (11) Margas y arcillas ocras con intercalaciones de areniscas y de calcisiltitas (Estampiense-Chattiense): este nivel presenta una potencia de 40 metros aproximadamente. Consiste en un tramo margo-arcilloso con abundantes intercalaciones de areniscas grisáceas de grano grueso y medio, estando las areniscas organizadas en ciclos de facies de 0,5 a 2,5. A techo de alguno de estos ciclos se encuentran litosomas de areniscas de geometría canaliforme y ocasionalmente, entre las margas, se intercalan capas de calcisiltitas. Perteneciente a la unidad Floresta.
- (14) Arcillas rojizas con intercalaciones de areniscas (Estampiense-Chattiense): corresponde a dos tramos arcillosos separados por un tramo de areniscas y calizas, ambos de potencias aproximadas de 50 metros. Esta unidad se compone por arcillas de tonos rojizos, con intensa bioturbación y marcadas señales de



marmorización. Entre las pelitas se intercalan capas de arenisca de hasta 1 m de espesor y en algunas zonas, las arcillas presentan un enrejado de venas de yeso fibroso.

- (21) Gravas calcáreas cementadas y limos. Abanicos aluviales (Pleistoceno): esta es una de las unidades que recubren la mayor parte de los recubrimientos cuaternarios que constituyen el Pla d'Urgell y puede alcanzar espesor de 7 metros. Se encuentra compuesta por cantos subangulares heredados de las calizas de Tàrraga, con centiles de hasta 25-30 cm y tamaños medios de 4-5 cm, a menudo envueltos por una matriz limo-arenosa de tonos anaranjados. Además, tienen cemento carbonatado, generalmente de tipo noduloso y/o multiacintado, desarrollándose auténticos caliches que preservan los materiales de la erosión-

En cuanto a los materiales cuaternarios encontramos:

- (26) Limos con cantos dominantes calizos "Coluviones" y limos y cantos calcáreos "Glacis subactual" (Holoceno): ambas unidades provienen de depósitos de vertiente y presentan espesores de unos 2 metros. Su composición litológica son limos y arcillas de tonos pardos y ocre que engloban cantos subangulares de calizas y areniscas con escasa organización interna. Podemos notar la diferencia entre ambos en cuanto a las pendientes que presentar, siendo de los primeros depósitos mucho más mayores.
- (38) Gravas, limos y arcillas. Aluviales y fondos de valle (Holoceno): esta unidad cartográfica engloba tanto los sedimentos de los de los cauces activos de la zona, provenientes de los ríos Cord, d'Ondara y Arroyo Femosa, como los rellenos de las "vales" o valles de fondo plano con dinámica de aportes mixta entre aluvial y de laderas. En cuanto a la composición, los fondos aluviales son depósitos de gravas y cantos de naturaleza calcárea, de subangulosos a subredondeados, con abundancia de limos arcillas arenosas, mientras que en la de los depósitos de fondo de "vale" predominan los limos y arcillas de tonos pardos que engloban cantos de calizas y areniscas sin organización interna.



4.2.2. Columna estratigráfica

A continuación, se puede observar la columna estratigráfica que representa los techos y muros de cada uno de los niveles disponibles en la Hoja Geológica de Tàrrega:

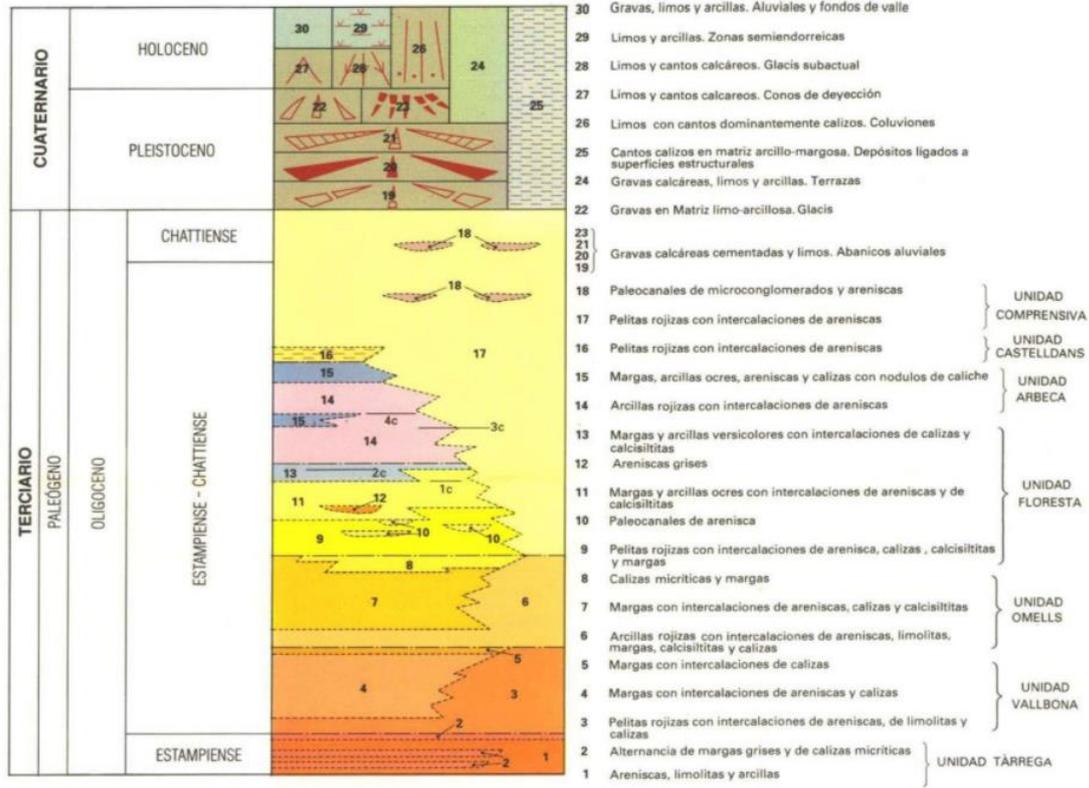


Ilustración 9 Columna estratigráfica de Tàrrega (Fuente: IGME)

4.2.3. Vaso del vertedero

Para la determinación de las características geológicas de la ubicación exacta donde se sitúa el vaso del vertedero objeto del análisis, se ha hecho uso del mapa geológico de la zona de estudio elaborado por la empresa IGEO y de dos cortes del terreno, longitudinal y de cerrada, que se encuentran adjunto en el proyecto original.

En base a la información facilitada en el proyecto original, se ha determinado que el vaso se ubica sobre margas y arcillas ocreas con intercalaciones de areniscas y de calcisitas (11), que han sido definidas en el apartado 1 "lito-estratigrafía". Dichos materiales pertenecen a la unidad de Floresta, de edad del Oligoceno y constituyen niveles de 1

metro de potencia, excepto en el fondo del vaso del vertedero, donde alcanzan los 7 metros.

En resumen, el "val" cual quedará delimitado por el vaso del vertedero, está compuesto por niveles de materiales cuaternarios, compuestos principalmente por limos y arcillas.

CAPÍTULO V. ESTUDIO GEOTÉCNICO



5.1. Campaña geotécnica del proyecto

El objetivo de este apartado es determinar las características de los materiales presentes en la zona de influencia del proyecto analizado. Para ello, la empresa representante del proyecto de ampliación del vertedero controlado de residuos de les Borges Blanques ha encargado a la empresa IGEO 2, s.l., el estudio geotécnico, bajo el cumplimiento de lo señalado en el Decreto 1/1997, del 7 de enero, de la Generalitat de Cataluña, sobre la disposición de desperdicios de los residuos en depósitos controlado.

Para ello, se han realizado una serie de trabajos de campo y ensayos de laboratorio que se pueden observar con más detalle en los siguientes apartados de este estudio.

Como datos de partida de este estudio, se ha hecho uso de la siguiente documentación:

- Plano de situación de les Borges Blanques, adjuntado en el Anejo correspondiente.
- Hoja nº 389 de Tàrrega, facilitada por el IGME y que se encuentra adjunta en el Anejo correspondiente.
- Información facilitada por la empresa IGEO 2, s.l.:
 - Plano de localización de los trabajos de campo.
 - Actas e informes de resultados de ensayos realizados.
 - Documentación fotográfica de las muestras de suelo y del macizo rocoso.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3).

5.1.1. Trabajos de campo

Para los trabajos de campo se han tomado una serie de muestras de diferentes maneras, al igual que se han desarrollado numerosos ensayos in situ. Dichos trabajos se han realizado durante los días 30 de abril y 9 de mayo del año 2013.

- 3 sondeos mecánicos (más en adelante, S) a rotación con extracción continua, junto a diversos ensayos de penetración (S.P.T) a distintas profundidades para determinar la capacidad portante del terreno.



- 4 pozos o calicatas mecánicas, según las recomendaciones de las Normas Tecnológicas de Edificación (NTE), de las cuales se ha estudiado las litologías presentes en los diferentes niveles del suelo analizado.
- 2 pruebas de penetración dinámica superpesada (DPSH), según la Norma UNE 103801/94. A partir de dichas pruebas se ha estimado la resistencia dinámica del terreno.

En el Anejo correspondiente, se encuentran adjuntos los registros de sondeos y las fotografías de sus cajas, los perfiles estratigráficos y los resultados de los ensayos, además de la situación de cada uno de ellos en el croquis de situación.

5.1.2. Ensayos de laboratorio

Para la determinación de las características de los materiales presentes en la zona objeto del estudio y conocer su comportamiento para su futuro uso en las obras, se han realizado los siguientes ensayos en el laboratorio por la empresa encargada:

- (1) Análisis granulométrico de suelos por tamizado s/Norma UNE 103101:1995.
- (2) Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa s/Norma UNE 103300:1993.
- (3) Determinación del límite líquido de un suelo, método de Casagrande, s/Norma UNE 103103:1994.
- (4) Determinación del límite plástico de un suelo s/Norma UNE 103104:1993
- (5) Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de suelo, s/Norma UNE 103201:1996, y determinación del pH según el anejo 5 de la EHE-08.
- (6) Determinación del contenido en materia orgánica de un suelo, s/Norma NLT-118:1191 / UNE 103204/93 Y Err.
- (7) Determinación del contenido en sales solubles de un suelo, s/Norma NLT-114:1999.
- (8) Determinación del contenido en yeso de un suelo, s/Norma NLT-115/99.



- (9) Ensayo de proctor modificado, s/Norma UNE 103501/94.
- (10) Determinación del índice CBR, s/Norma UNE 103502/95.
- (11) Ensayo de colapso en suelos: NLT-254/99.
- (12) Ensayo de hinchamiento libre en el edómetro, s/Norma UNE 103601:1996.
- (13) Ensayo de permeabilidad en laboratorio bajo carga variable, s/Norma UNE 103403.
- (14) Ensayo de corte directo de un suelo, s/Norma UNE 103401/98.

Además de estos ensayos, se han llevado a cabo otros para determinar la permeabilidad de los materiales presentes en la zona de estudio. Dichos ensayos se detallan en el apartado correspondiente, denominado "caracterización hidrogeológica".

5.2. Clasificación geomecánica

Una vez realizados las visitas de campo y los ensayos de las muestras extraídas, se ha obtenido suficiente información para la diferenciación de los diferentes niveles litológicos presentes en la ubicación del proyecto, a partir de la detección de los muros y techos de cada uno de ellos. Además, una vez identificados dichos niveles, se han obtenido sus parámetros geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos, necesarios para futuros cálculos.

5.2.1. Niveles litológicos diferenciados

En base a los ensayos y trabajos de campo desarrollados, se han diferenciado los siguientes 3 niveles litológicos en el perfil del terreno estudiado:

Nivel 1. Terreno vegetal

En la composición de este nivel abundan los materiales arcillosos que de vez en cuando se alternan con materiales arcillosos arenosos de color marrón oscuro con raíces a techo.

Las cotas de los techos y los muros detectados para este nivel en cada uno de los trabajos de campo llevados a cabo son los reunidos en la siguiente tabla:

| ENSAYOS | C-1 | C-2 | C-3 | C-4 | S-1 | S-2 | S-3 | DPSH1 | DPSH2 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TECHO (m) | 306 | 318 | 327 | 320 | 306,5 | 314 | 324 | 327 | 317,5 |
| MURO (m) | 305,8 | 317,7 | 326,8 | 319,8 | 306,3 | 313,7 | 323,8 | 326,6 | 317,1 |

Tabla 3 Cotas del nivel litológico 1

Nivel 2. Arcillas / limos / arenas / gravas (coluvial)

En la composición de este nivel litológico predominan las arcillas en algunas zonas del área estudiado y la combinación de arcillas y limos en otras zonas. Este cambio de composición entre puntos del terreno deja definida una ligera variación en la litología según la ubicación. También se ha identificado que el contenido en cantos dispersos en este nivel es muy reducido, siendo inexistente en la mayoría de los ensayos desarrollados. Sin embargo, se ha dado un caso especial en el sonde nº 1 (S-1), en el cual se ha experimentado un aumento considerable de número de cantos a partir 2,80 metros de profundidad hasta el muro de este nivel. Dicho subnivel ha sido asociado con depósitos de origen coluvial.

Las cotas de los techos y los muros detectados para este nivel en cada uno de los trabajos de campo llevados a cabo son los reunidos en la siguiente tabla:

| ENSAYOS | C-1 | C-2 | C-3 | C-4 | S-1 | S-2 | S-3 | DPSH1 | DPSH2 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TECHO (m) | 305,8 | 317,7 | 326,8 | 319,8 | 306,3 | 313,7 | 323,8 | 326,6 | 317,1 |
| MURO (m) | - | 316,8 | 325,6 | 316,9 | 300,6 | 308 | 316,8 | 326,2 | 309,9 |

Tabla 4 Cotas del nivel litológico 2



Nivel 3. Roca

Este nivel consiste en una alternancia entre dos diferentes tipos de roca: (1) roca arenisca grisácea blanquecina, cuya granulometría va de fina a media, y (2) roca margosa versicolor (desde tonos verdosos a marrones ocre).

Las cotas de los techos y los muros detectados para este nivel en cada uno de los trabajos de campo llevados a cabo son los reunidos en la siguiente tabla. Los resultados no presentados en dicha tabla son debido a que no han podido ser identificados, ya que presentan potencias muy grandes, al igual que ha sido especificado en el estudio geológico.

| ENSAYOS | C-1 | C-2 | C-3 | C-4 | S-1 | S-2 | S-3 | DPSH1 | DPSH2 |
|--------------|-----|-------|-------|-----|--------|-------|-------|-------|-------|
| TECHO (m) | - | 316,8 | 325,6 | - | 300,6 | 308 | 316,8 | 326,2 | 309,9 |
| MURO (m) | - | 316 | 325,2 | - | 299,07 | 305,8 | 316,8 | - | 309,5 |

Tabla 5 Cotas del nivel litológico 3

5.2.2. Caracterización de los materiales

Para la caracterización geotécnica y la determinación de los parámetros geotécnicos y químicos de los materiales identificados en la zona de estudio, se han desarrollado los ensayos mencionados en el apartado "1.2. Ensayos de laboratorio" de este capítulo, para 6 muestras pertenecientes a los niveles litológicos 2 y 3 (el nivel 1 tierra vegetal no tiene una considerable influencia en el estudio). Entre dichos parámetros se encuentran algunos que, por experiencias en materiales similares analizados en infinidad, ya se encuentran establecidos. Para dichos casos, se hará uso del sistema unificado de clasificación de suelos (más en adelante, SUCS). Este sistema fue presentado por Arthur Casagrande, y es posible su aplicación a la mayoría de los materiales sin consolidar.

A continuación, se indican los ensayos desarrollados para cada una de las muestras, según la enumeración establecida para cada uno de estos en el apartado 1.2:

Muestra 317315M1, procedente de C-1 y perteneciente al nivel 2

| ENSAYOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |

Tabla 6 Ensayos de la muestra 17315M1

Muestra 317315M2, procedente de C-3 y perteneciente al nivel 2

| ENSAYOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| X | X | X | X | | | | | X | | | | | |

Tabla 7 Ensayos de la muestra 317315M2

Muestra 317315M3, procedente de S-3 y perteneciente al nivel 3

| ENSAYOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| X | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 8 Ensayos de la muestra 317315M3

Muestra 317315M4, procedente de C-4 y perteneciente al nivel 2

| ENSAYOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X |

Tabla 9 Ensayos de la muestra 317315M4

Muestra 317315M5, procedente de S-3 y perteneciente al nivel 3

| 1 | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| | | X | X | X | | | | | | | | | |

Tabla 10 Ensayos de la muestra 317315M5



Muestra 317315M6, procedente de C-2 y perteneciente al nivel 2

| ENSAYOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| | | | | | | | | X | | | | X | |

Tabla 11 Ensayos de la muestra 317315M6

En base a los valores especificados en el SUCS y los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, se han determinado los siguientes parámetros geotécnicos y químicos para los niveles de litológicos analizados:

Nivel 2. Arcillas / limos / arenas / gravas (coluvial)

| | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Humedad (%) | 6,5 / 11,8 / 13,6 | | |
| Densidad, ρ (g/cm ³) | 1,80 – 2 | | |
| Límites de Atterberg (%) | L. Líquido (w_p) | L. Plástico (w_L) | I. Plasticidad (I_p) |
| | 32,3 / 32,7 / NO | 17,5 / 18,5 / NO | 14,2 / 16 / NP |
| Hinchamiento libre (%) | 3,81 / 3,84 | | |
| Colapsabilidad (%) | -0,34 / -0,36 | | |
| Cohesión, C' (kp/cm ²) | 0,14 – 0,15 | | |
| Ángulo de rozamiento interno, Φ' (°) | 16,8 – 28,6 | | |
| Ensayo Próctor | Densidad máx. (g/ cm ³) | Humedad óptima (%) | |
| | 1,87 / 1,88 / 1,92 / 2,03 | 12,9 / 13,6 / 10,6 / 8,2 | |
| ÍNDICE CBR | 95% compactación | 1,8 / 3,8 | |
| | 98% compactación | 3,5 / 5,3 | |
| | 100% compactación | 5,7 / 6,2 | |
| Módulo de deformación, E_0 (kp/cm ²) | 80 – 400 | | |
| Ensayo de penetración N_{20} DPSH (Rp) | Mín de 3 y máx de 18 | | |
| Meteorización | Alta a media | Ripabilidad | alta |
| Sulfatos solubles en agua (%) | 2,68 / 2,94 | | |



| | |
|--|-------------|
| Contenido en sales solubles incl. Yeso (%) | 5,80 / 6,35 |
| Contenido en Yeso (%) | 5,77 / 6,32 |
| Contenido en M.O. (%) | 0,39 / 0,45 |

Tabla 12 Parámetros geotécnicos del nivel litológico 2

En base a los resultados obtenidos de los ensayos se ha procedido a clasificar el suelo, según SUCS y según lo establecido en el PG-3.

Para el primer caso (SUCS) y las características que presenta el material ensayado, este es clasificado como arcillas inorgánicas de baja compresibilidad (CL) y arena mal gradada con limo (SM).

Mientras que para el segundo caso (PG-3), se ha comprobado si el suelo cumple las siguientes condiciones establecidas para que un suelo pueda ser clasificado como tolerable:

- Contenido en materia orgánica inferior al dos por ciento ($MO < 2\%$), según UNE 103204.
- Contenido en yeso inferior al cinco por ciento ($yeso < 5\%$), según NLT 115.
- Contenido en otras sales solubles distintas del yeso inferior al uno por ciento ($SS < 1\%$), según NLT 114.
- Límite líquido inferior a sesenta y cinco ($LL < 65$), según UNE 103103.
- Si el límite líquido es superior a cuarenta ($LL > 40$) el índice de plasticidad será mayor del setenta y tres por ciento del valor que resulta de restar veinte al límite líquido ($IP > 0,73 (LL-20)$).
- Asiento en ensayo de colapso inferior al uno por ciento (1%), según NLT 254, para muestra remoldeada según el ensayo Próctor normal UNE 103500, y presión de ensayo de dos décimas de megapascal (0,2 MPa).
- Hinchamiento libre según UNE 103601 inferior al tres por ciento (3%), para muestra remoldeada según el ensayo Próctor normal UNE 103500.

Como los resultados mostrados en la tabla anterior no cumplen dichos requisitos, se ha verificado el cumplimiento de los requisitos de un suelo marginal, que se pueden observar a continuación:

- Contenido en materia orgánica inferior al cinco por ciento ($MO < 5\%$), según UNE 103204.



- Hinchamiento libre según UNE 103601 inferior al cinco por ciento (5%), para muestra remoldeada según el ensayo Próctor normal UNE 103500.
- Si el límite líquido es superior a noventa ($LL > 90$) el índice de plasticidad será inferior al setenta y tres por ciento del valor que resulta de restar veinte al límite líquido ($IP < 0,73 (LL-20)$).

Una vez comparados los valores establecidos en la normativa y los obtenidos del SUCS y de los ensayos, se ha clasificado el suelo como marginal.

Nivel 3. Roca

| | | | | |
|--|----------------------|-----------------------|---------------------------------|----|
| Densidad, $g (g/cm^3)$ | 2,30 – 2,40 | | | |
| Límites de Atterberg (%) | L. Líquido (w_p) | L. Plástico (w_L) | I. Plasticidad (I_p) | |
| | 38,6 | 27 | 11,6 | |
| Hinchamiento libre (%) | Bajo a medio | | | |
| Colapsabilidad (%) | Baja a media | | | |
| Cohesión, $C_u (kp/cm^2)$ | 3 – 5 | | | |
| Ángulo de rozamiento interno, $\Phi (^\circ)$ | 40 – 50 | | | |
| Cohesión, $C' (kp/cm^2)$ | 1 – 3 | | | |
| Ángulo de rozamiento interno, $\Phi' (^\circ)$ | 30 - 40 | | | |
| Módulo de deformación, $E_0 (kp/cm^2)$ | 1000 - 4000 | | | |
| Ensayo de penetración | N_{20} D.P.S.H. | N_{30} D.P.S.H. | Compresión simple (kg/cm^2) | 25 |
| | 25 - Rzo | 39 - Rzo | | |
| Meteorización | Alta a media | Ripabilidad | baja | |
| Sulfatos solubles en agua (%) | 1,24 | | | |

Tabla 13 Parámetros geotécnicos del nivel litológico 3

En este caso, como el material es roca, la clasificación ha sido realizada en base a lo establecido en el sistema de Casagrande. En base a dicha información, se ha concluido que se trata de arcillas con limos, ambos de baja plasticidad (CL – ML).



5.3. Caracterización del macizo rocoso

La empresa IGEO 2, s.l. ha facilitado la información litológica de los afloramientos rocosos observados en la zona de estudio, a través de visitas de geólogos especializados y con el uso de estaciones geomecánicas.

Se han planteado dos estaciones geomecánicas para dicho estudio, de las cuales se han identificado unas litologías con características similares. Los resultados obtenidos indican que la composición consiste en estratos de una arenisca (arenita calcárea) blanquecina a techo de los tramos y estratos de roca margosa gris a ocre meteorizable en la parte restante de dichos tramos hasta sus correspondientes muros. Además, se ha concluido que la estratificación es horizontal con dos familias de diaclasas ortogonales entre sí.

Se ha identificado que debido a la diferente resistencia a la meteorización que presentan los dos niveles identificados y la presencia de diaclasas, el agua de escorrentía y de lluvia se infiltra a través de las discontinuidades hasta llegar a los niveles margosos, que debido a las características de impermeabilidad que presentan, frenan el avance de dichas aguas, dando lugar a una erosión diferencial. La evolución de dicha erosión concluye en el desgaste completo del material margoso y de las areniscas, y al quedar estas colgando, se fracturan y asientan a favor de la dirección de las diaclasas.

EL comportamiento descrito del macizo rocoso puede concluir en el vuelco de algunas partes de este. Sin embargo, tras las visualizaciones de los afloramientos rocosos en las zonas de estudio, se ha determinado que los bloques que podrían desestabilizarse son de pequeña magnitud. De este modo, no se corre ningún peligro.

5.4. Caracterización hidrogeológica

5.4.1. Niveles freáticos

Según la información facilitada por la empresa encargada de desarrollar el estudio geotécnico del proyecto, no se han detectado niveles freáticos durante los días en los que se han realizado los trabajos de campo. Sin embargo, hubo presencia de agua en el sondeo nº 3, en los días posteriores a su realización.



El nivel de agua determinado se encontraba a 4,20 metros de profundidad, perteneciendo al nivel rocoso. Además, se ha indicado que, durante los días previos a los trabajos de campo, se dieron lluvias significativas, por lo que el agua detectada es proveniente de escorrentías o de sobresaturación del terreno.

De la información anterior, se concluye que no existe ningún nivel freático permanente en la zona objeto del estudio.

5.4.2. Ensayos de permeabilidad

Para la determinación de la permeabilidad del terreno y el conocimiento de si los materiales presentes presentan características aptas para la permeabilidad del vaso de un vertedero de residuos no especiales catalogado como clase II, se han llevado a cabo dos tipos de ensayos de permeabilidad, uno in situ y otro en laboratorio.

En cuanto al ensayo de permeabilidad en laboratorio, se ha realizado el de carga variable, según la Norma UNE 103403/99, sobre pastilla de muestra remoldeada al 100% del Proctor Modificado. A partir de este ensayo se han analizado dos muestras del nivel 2 de arcillas / limos / arenas/ gravas (para la diferenciación de los niveles litológicos, ver apartado 2.1. niveles litológicos diferenciados), de las cuales se han obtenido los siguientes valores de permeabilidad: $6,10 \times 10^{-8}$ m/s y $8,95 \times 10^{-8}$ m/s. Las actas de este ensayo se encuentran adjuntas en el Anejo correspondiente.

En cuanto al ensayo de permeabilidad in situ, se han analizado tres diferentes muestras: dos pertenecientes al coluvial limoso cuaternario y una perteneciente al nivel rocoso. Los valores de permeabilidad obtenidos de dichos ensayos son $7,02 \times 10^{-7}$ m/sg, $9,81 \times 10^{-7}$ m/s y $1,37 \times 10^{-8}$ m/s, respectivamente.

Teniendo en cuenta los requerimientos exigidos para un vertedero de residuos no especiales de clase II, la permeabilidad exigida de los materiales es igual o inferior a 10^{-9} m/s. Como los resultados obtenidos en los dos ensayos anteriores representan valores superiores al establecido por la normativa, los materiales ensayados son considerados como no aptos para la permeabilización.

5.5. Conclusiones

Una vez determinadas las características geotécnicas, químicas e hidrológicas de los materiales y de la zona analizada, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Se ha identificado mediante ensayos de laboratorio de las muestras de suelo la presencia de yesos en una proporción considerable. Este material puede presentar graves inconvenientes de cara al proyecto. Sin embargo, es posible la impermeabilización artificial del terreno y el uso de materiales impermeables como las arcillas. Adicionalmente, se tendría que instalar una red de drenaje para impedir la acumulación de aguas en el área del vertedero.
- Una vez realizada la diferenciación de los niveles litológicos del terreno analizado, uno de los componentes del nivel 2 determinado ha resultado la arcilla. Debido a la presencia de este material, se experimentarán notables asentamientos a la hora de compactarlo y con la acumulación de residuos en el vaso del vertedero. En cambio, el nivel litológico que se ha determinado a continuación de este está compuesto de roca, lo cual impedirá la continuidad de los asentamientos.
- Dado que la zona del proyecto se encuentra fuera de la unidad hidrogeológica, no hay impacto sobre la hidrología.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES



6.1. Introducción

En este capítulo se recoge el análisis de la estabilidad de los taludes del vertedero de les Borges Blanques que podrían presentar problemas de estabilidad debido a sus características geométricas o por las condiciones de las superficies de cimentación sobre las que se encuentran ubicados.

Los taludes objeto del análisis son los siguientes:

- Perfil del PK 0 + 160, con una elevada altura que asciende a 11,8 metros, siendo la mayor sección del vertedero.
- Perfil del PK 0 + 460, con una altura de 4,7 metros y una ubicación sobre una media vertiente.
- PK 0 + 540, estando cimentado sobre un plano inclinado 18°.

Para el correcto análisis de estos perfiles, se explicarán los métodos de cálculo en los cuales se basa el análisis y se realizará la elección del factor de seguridad más conveniente según las recomendaciones de la normativa correspondiente.

6.2. Estudio de la estabilidad de los taludes de los diques del vertedero

Dado que el presente trabajo académico tiene como objetivo principal la propuesta de la ejecución de taludes compuestos por una combinación de neumáticos fuera de uso (NFU) y tierra en la ampliación del vertedero de les Borges Blanques, este estudio analizará su estabilidad planteando las siguientes dos alternativas:

- Terraplenes compuestos por un bloque de neumáticos cubierto con tierra.
- Terraplenes compuestos por la alternancia de una capa de neumático y otra de tierra.

Para la realización de los cálculos de la estabilidad de los taludes, se han analizado tres perfiles, siendo los más susceptibles de presentar problemas de estabilidad. Hay que señalar que los cálculos llevados a cabo dejan fuera al perfil ubicado en el PK 0 + 460, debido a que presenta un menor riesgo de deslizamiento que los otros dos. De este



modo, en caso de que dichos taludes sean estables, este presentará un comportamiento aún más fiable. A continuación, se puede observar una descripción gráfica de los taludes objeto del análisis:

Perfil PK 0 + 160, con una elevada altura que asciende a 11,8 metros, siendo la mayor sección del vertedero.

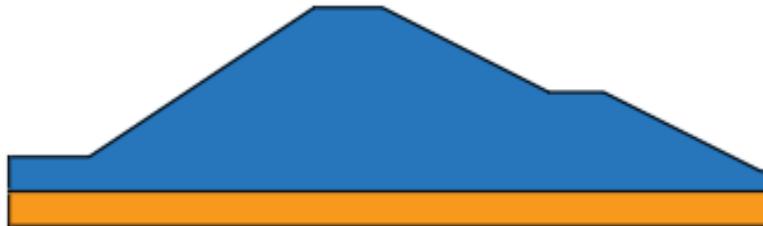


Ilustración 10 Perfil del talud PK 0 + 160

Perfil PK 0 + 460, con una altura de 4,7 metros y una ubicación sobre una media vertiente.



Ilustración 11 Perfil del talud PK 0 + 460

Perfil PK 0 + 540, estando cimentado sobre un plano inclinado 18°.

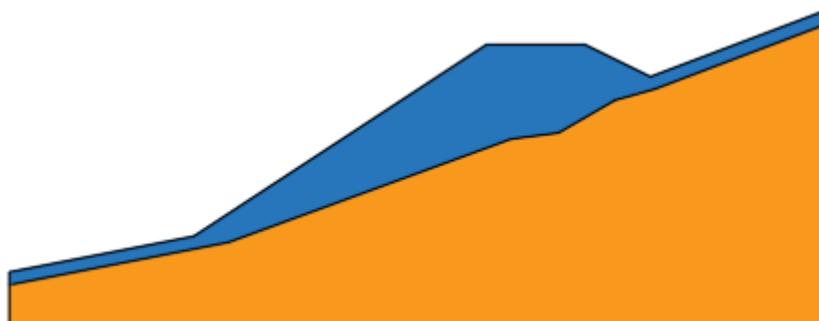


Ilustración 12 Perfil del talud PK 0 + 540

Todos los perfiles anteriores presentan taludes similares, siendo estos de 3H:2V en el intradós y de 2H:1V en el trasdós y una coronación de 5 metros.

Una vez determinadas las secciones críticas con su correspondiente geometría para el análisis de la estabilidad, se procede a identificar los materiales que componen los terraplenes y los afectados por la construcción de estos, al igual que sus características geotécnicas necesarias para estos cálculos.

Como se ha mencionado anteriormente, los materiales que intervienen en la composición del terraplén son los siguientes:

Arcillas, gravas, arenas y limos:

Estos materiales son los procedentes de la excavación y pertenecen al nivel litológico 2, identificado en el estudio geotécnico de este trabajo. De los trabajos de campo y ensayos de laboratorio llevados a cabo, se han determinado los siguientes parámetros:

| | |
|--|-------|
| Peso específico (KN/m ³) | 19,62 |
| Cohesión efectiva (KN/m ²) | 15 |
| Ángulo de rozamiento efectivo (º) | 20 |

Tabla 14 Parámetros geotécnicos de arcillas, gravas, arenas y limos

NFU:

Los parámetros geotécnicos de estos materiales han sido extraídos de su ficha técnica facilitada por el CEDEX:

| | |
|--------------------------------------|------|
| Peso específico (KN/m ³) | 15,5 |
| Cohesión, C' (KN/m ²) | 10 |
| Ángulo de rozamiento efectivo (º) | 27,5 |

Tabla 15 Parámetros geotécnicos de NFU

Los materiales afectados por la construcción de los terraplenes y que componen la superficie de cimentación de estos varían según el perfil analizado. De este modo, resultan los siguientes:

Perfil PK 0 + 160: los trabajos de campo llevados a cabo en el área de este perfil son los referentes al sondeo 2. Este sondeo se ha llevado a cabo en la base del talud, del cual se ha identificado el nivel litológico 2 formado por arcillas, limos, arenas y gravas. Los parámetros que se emplearán en los cálculos para este nivel litológico son los descritos anteriormente.

- **Arcillas, gravas, arenas y limos:** descrito anteriormente.

Perfil PK 0 + 460: los materiales presentes en la cimentación de este perfil se han identificado mediante el sondeo 3. Esta parte se encuentra constituido por un tramo de 60 cm de potencia perteneciente al nivel litológico 2, seguido de al menos 5 metros de roca perteneciente al nivel litológico 3.

- **Arcillas, gravas, arenas y limos:** descrito anteriormente.
- **Roca:** se trata del nivel litológico 3 identificado mediante los trabajos de campo. Sus características geotécnicas han sido especificadas en el estudio geotécnico, resultando las siguientes:

| | |
|--------------------------------------|-------|
| Peso específico (KN/m ³) | 22,55 |
| Cohesión, C' (KN/m ²) | 100 |
| Cohesión, Cu (KN/m ²) | 300 |
| Ángulo de rozamiento efectivo (º) | 40 |

Tabla 16 Parámetros geotécnicos de las rocas

Perfil PK 0 + 540: los materiales identificados en la cimentación de este perfil pueden verse en el sondeo 3 y en la calicata 3, siendo los mismos que forman la cimentación del perfil anterior.

- **Arcillas, gravas, arenas y limos:** descrito anteriormente.
- **Roca:** descrito anteriormente.

Para el correcto estudio del comportamiento de los taludes analizados, se han realizado los cálculos para dos diferentes situaciones:

- En fase de explotación: los cálculos se han realizado sin tener en cuenta el empuje que producen los residuos acumulados en el depósito y la capa de clausura del vertedero.
- En clausura: teniendo en cuenta los empujes producidos por los residuos depositados y la capa de clausura sobre la cara interior de los terraplenes.

6.3. Tipologías de roturas

Las roturas de taludes son movimientos que se producen al superarse la resistencia al corte del material y tienen lugar a lo largo de una o varias superficies o a través de una franja relativamente estrecha del material.

Estos movimientos pueden darse de forma progresiva, produciéndose inicialmente una rotura local, que puede no coincidir con la superficie de rotura general, causada por una propagación de la primera.

Se pueden distinguir dos tipos de rotura en los taludes compuestos por suelos: roturas rotacionales o circulares, y roturas traslacionales.

6.3.1. Roturas rotacionales o circulares

Este tipo de roturas mayoritariamente se experimentan en taludes de suelo. Estos taludes rompen a favor de superficies curvas, con forma diversa condicionada por la morfología y estratigrafía del talud. Este tipo de roturas se da a lo largo de una superficie de deslizamiento interna, de forma aproximadamente circular y cóncava. El movimiento tiene una naturaleza más o menos rotacional, alrededor de un eje dispuesto paralelamente al talud.

La salida de las superficies circulares sobre las que se produce la rotura puede originarse en tres partes diferentes del talud, según las características resistentes del material, altura e inclinación del talud.

En base a las salidas de las superficies circulares, se pueden distinguir los siguientes tipos de rotura rotacional:

- Rotura circular de pie: se da cuando la salida se produce por el pie del talud y queda por encima de su base. Suele darse cuando el talud está formado por terreno homogéneo o por varios estratos de propiedades geotécnicas homogéneas.
- Rotura circular profunda: en este caso la rotura pasa bajo el pie del talud con salida en la base de este y alejada del pie.
- Superficie de rotura de talud: en este tipo la superficie de rotura corta al talud por encima de su pie.

6.3.2. Roturas traslacionales

Este es un tipo de rotura característico de los macizos rocosos. En este tipo de roturas la masa de terreno se desplaza hacia afuera y abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o suavemente ondulada, con pequeños movimientos de rotación. Comúnmente el movimiento de la masa deslizada hace que ésta quede sobre la superficie original del terreno.

Este tipo de roturas se dan principalmente debido a discontinuidades (estratificación, esquistosidad, diaclasas, fallas, etc.), influyendo la variación de la resistencia al corte entre estratos de diferente naturaleza, diferente grado de meteorización, distintos tipos de discontinuidades, etc.

A continuación, se pueden ver dos de las roturas traslacionales más comunes:

- Rotura según una poligonal: si se dan determinadas condiciones en el talud, como la existencia de estratos o capas de diferentes características, puede darse este tipo de rotura a favor de una superficie plana o de una superficie poligonal formada por varios tramos planos.



- Rotura plana: las roturas de taludes en suelos a favor de un único plano paralelo al talud son prácticamente inexistentes, aunque este modelo puede ser válido en el caso de laderas naturales con recubrimientos de suelos sobre rocas.

6.4. Elección del factor de seguridad

El cálculo de la estabilidad de un talud, tanto en desmonte como en terraplén, y tanto en estado natural como construido artificialmente, permite sintetizar en un solo concepto, el factor de seguridad, la seguridad global del talud.

El factor de seguridad representa de una manera sintética, concretando en un solo valor, el margen de confianza que se posee con el diseño efectuado. Para ello, analizando el problema de taludes planteado en este trabajo y teniendo en cuenta las recomendaciones prácticas recogidas en el Manual de Ingeniería de Taludes facilitado por el Instituto Geológico y Minero de España, se ve que los rangos de estos factores se encuentran entre 1,1 y 1,5, considerándose este último valor como límite superior aceptable para garantizar la estabilidad frente al deslizamiento. En cambio, los valores inferiores a 1,1 pueden acarrear riesgos de que se produzcan deslizamientos.

Entre las aplicaciones prácticas recogidas en el Manual mencionado anteriormente, podemos ver las siguientes:

- MEYERGOD, 1985. Cort. De National Research Council (Canadá):

Tabla X.1
FACTORES DE SEGURIDAD GLOBALES Y PROBABILIDAD DE ROTURA
(MEYERHOF, 1985. Cort. de National Research Council (Canadá))

| Tipo de proyecto | Factor de seguridad global | Probabilidad de rotura |
|---|----------------------------|------------------------|
| Terraplenes | 1,3-1,5 | 10^{-2} |
| Estructuras de contención de tierras y excavaciones | 1,5-2 | 10^{-3} |
| Cimentaciones | 2-3 | 10^{-4} |

Tabla 17 Factores de seguridad globales y probabilidad de rotura



- TERZAGHI Y PECK, 1967. Cort. De John Wiley & Sonas:

Tabla X.6
FACTORES DE SEGURIDAD MINIMOS
(TERZAGHI Y PECK, 1967. Cort. de John Wiley & Sons)

| Tipo de rotura | Tipo de problema | Factor de seguridad |
|----------------|---------------------------------------|---------------------|
| Corte | Trabajos de tierra | 1,3-1,5 |
| | Estructuras de tierra | 1,5-2 |
| | Cimentaciones | 2-3 |
| Filtraciones | Levantamientos | 1,5-2,5 |
| | Erosión interna, salida del gradiente | 3-5 |

Tabla 18 Factores de seguridad mínimos

- AYALA CARCEDO Y RGUEZ. ORTIZ, 1986:

Tabla X.4
FACTORES DE SEGURIDAD MINIMOS REQUERIDOS EN EL PROYECTO DE ESCOMBRERAS
(AYALA CARCEDO Y RGUEZ. ORTIZ, 1986)

| CASO I | | | |
|---|--|-----------------|-----------------|
| Implantaciones sin riesgo para personas, instalaciones o servicios. | | | |
| $H \leq 15$ m ó $V \leq 25.000$ m ³ ó $H > 15$ m en escombreras en manto | Pueden constituirse con el ángulo de vertido de los escombros (FS = 1) | | |
| | FS ₁ | FS ₂ | |
| $15 < H \leq 30$ m; talud conformado para | 1,20 | 1,10 | |
| $H > 30$ m, talud conformado para | 1,30 | 1,20 | |
| CASO II | | | |
| Implantaciones con riesgo moderado. | | | |
| | FS ₁ | FS ₂ | FS ₃ |
| $H \leq 15$ m ó $V \leq 25.000$ m ³ | 1,20 | 1,15 | 1,00 |
| ó $H > 15$ m, en escombreras en manto | | | |
| $15 < H \leq 30$ m | 1,35 | 1,25 | 1,10 |
| $H > 30$ m | 1,45 | 1,30 | 1,15 |
| CASO III | | | |
| Implantaciones con riesgo elevado. | | | |
| Se proscriben las escombreras en manto sin elementos de contención o desviación al pie. | | | |
| | FS ₁ | FS ₂ | FS ₃ |
| $H \leq 20$ m | 1,40 | 1,20 | 1,10 |
| $H \geq 20$ m | 1,60 | 1,40 | 1,20 |

Tabla 19 Factores de seguridad mínimos requeridos en el proyecto de Escombreras

Haciendo referencia al problema de estabildades planteado en este trabajo académico y las recomendaciones anteriores, se toma un factor de seguridad equivalente a 1,2, siendo este un valor intermedio que no supone excesos en los costes ni riesgos de deslizamiento elevados.



6.5. Métodos de cálculo

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se clasifican en dos tipos: métodos de cálculo en deformaciones y métodos de equilibrio límite. En cuanto a los primeros, se consideran en el cálculo las deformaciones del terreno además de las leyes de la estática y su metodología de resolución está basada en la aplicación de los métodos finitos u otros métodos numéricos. Mientras que los segundos se encuentran basados exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable, sin tener en cuenta sus deformaciones y suponiendo que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

A su vez, los métodos de equilibrio límite se subdividen en dos subgrupos:

- Métodos exactos: basados en la aplicación de las leyes de la estática que proporciona una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite. Es posible su aplicación únicamente en casos de geometría sencilla.
- Métodos no exactos: en los casos que no es posible determinar una solución exacta mediante el método anterior, debido a una geometría compleja, se da lugar a un problema hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución.

En los métodos de equilibrio límite no exactos, también se pueden distinguir dos tipos, siendo los siguientes:

- Método del equilibrio global de la masa deslizante: en este caso la hipótesis previa suele hacerse respecto a la distribución de tensiones normales en la superficie de deslizamiento. Hoy en día, este método se encuentra en desuso.
- Método de las dovelas: este método considera la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales. En este caso la distribución de tensiones normales en la superficie de deslizamiento no es un dato del problema sino un resultado de su resolución. Las hipótesis que se plantean generalmente en esta metodología se refieren a las fuerzas laterales entre las dovelas. Este es el



método empleado para resolver el problema de estabilidad planteado en este trabajo.

6.5.1. Método de las dovelas

Como se ha mencionado previamente, el método de las dovelas es el que ha sido empleado para la resolución de los problemas de estabilidad en este TFG. Este método es de equilibrio límite no exacto y considera el problema de estabilidad de taludes como bidimensional, por lo que el análisis se realiza en una sección transversal del mismo. De este modo, la zona del terreno se divide en una serie de fajas verticales estudiándose el equilibrio de cada una de ellas.

Además, el problema planteado para este método de resolución es hiperestático y para que sea posible su resolución, se tiene que realizar alguna simplificación previa. Para ello, se puede proceder mediante las siguientes dos metodologías:

- Métodos aproximados: no cumplen todas las ecuaciones de la estática. Entre estos métodos destacan los de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.
- Métodos precisos o completos: cumplen todas las ecuaciones de la estática. Entre estos métodos destacan los de Morgenstern-Price, Spencér y Bishop riguroso.

En gran parte de los métodos de equilibrio límite la seguridad referente a la estabilidad del talud analizado se evalúa a través de un factor de seguridad (FS), que equivale al cociente entre la resistencia a corte en la superficie de deslizamiento y la necesaria para mantener el equilibrio de la masa deslizante. En la mayoría de los casos se desconoce la superficie de rotura, por lo que se calculan los FS correspondientes a un cierto número de posibles superficies de rotura y se define dicho factor a partir del mínimo valor obtenido. En estos casos, el cálculo se realiza a través de tanteos que llegan a delimitar la superficie de rotura pésima.

En este caso, los cálculos de estabilidad de los taludes han sido realizados con el uso del software Slide 7.0, de la casa Rocscience, en base a los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado, que a continuación se explican con más detalle.

6.5.1.1. Método ordinario de Fellenius

Este método fue propuesto por Fellenius en el año 1927 y es válido únicamente para superficies de deslizamiento circulares. Esta metodología es basada en la hipótesis de que la resultante de las fuerzas laterales en las caras de las rebanadas actúa paralelamente a la base de estas (Posse, 1987). Se caracteriza por satisfacer el equilibrio de momentos, por lo que, al considerar esta condición, se tiene que el producto de las fuerzas movilizadas sobre el centro del círculo de la falla es igual momento que resulta al actuar las fuerzas resistentes sobre ese mismo centro. Para la determinación del FS, se tienen que realizar sucesivos intentos, cada vez ubicando el centro en una posición diferente (Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes, 2013).

6.5.1.2. Método simplificado de Bishop

Este método fue propuesto por Bishop en el año 1955 y analiza la estabilidad de los taludes considerando el efecto de las fuerzas entre dovelas. En este caso se supone que las fuerzas en las caras laterales son horizontales (Posse, 1987). Además, considera dentro de sus hipótesis fundamentales, que las fuerzas de contacto entre dos dovelas si se toman en cuenta, pero producen ningún efecto influyente, puesto que se encuentran en equilibrio (Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes, 2013). En este caso sólo se satisface el equilibrio de momentos y no el de fuerzas horizontales.

6.5.1.3. Método de Janbu

Janbu ha extendido la aplicación del método de Bishop a superficies de deslizamiento de cualquier forma en el año 1954. Esta metodología se basa principalmente en que las



fuerzas entre dovelas son solo horizontales y que las fuerzas cortantes no tienen influencia. La aplicación de este método no cumple el equilibrio de momentos y sí el de fuerzas.

6.6. Casos de estudio y análisis de resultados

El análisis de estabilidad de los taludes objeto del estudio se ha realizado a través del software Slide 7.0. Para ello se han analizado los tres perfiles indicados anteriormente y se han estudiado dos diferentes alternativas de composición de los terraplenes. En cuanto a las acciones sísmicas, estas no han sido consideradas al no tener un efecto importante en la ubicación del estudio.

De este modo, los casos fruto de análisis han sido los siguientes para cada uno de los perfiles estudiados:

HIPÓTESIS 1:

Sobrecarga en coronación por el paso de los camiones, 65 kN/m / eje.

Alternativa analizada: bloque de neumáticos cubierto de una capa de tierra.

HIPÓTESIS 2:

Sobrecarga en coronación por el paso de los camiones, 65 kN/m / eje.

Alternativa analizada: alternancia de capas de neumáticos y capas de tierra.

Los factores de seguridad obtenidos como datos de salida del software son los que se pueden ver a continuación:

Perfil PK 0 + 160

| HIPÓTESIS | FS FELLENIUS | FS BISHOP | FS JANBU |
|-----------|--------------|-----------|----------|
| 1 | 1,826 | 1,894 | 1,761 |
| 2 | 1,541 | 1,660 | 1,426 |

Tabla 20 Resultados FS perfil PK 0+160

Perfil PK 0 + 540



| HIPÓTESIS | FS FELLENIUS | FS BISHOP | FS JANBU |
|-----------|--------------|-----------|----------|
| 1 | 1,795 | 1,884 | 1,670 |
| 2 | 1,480 | 1,539 | 1,409 |

Tabla 21 Resultados FS perfil PK 0+540

Una vez determinados los factores de seguridad en cada uno de los perfiles objeto del análisis según cada una de las hipótesis planteadas (solución basada en una capa de neumático cubierta de tierra y solución basada en la alternancia de capas de neumático y de tierra) mediante los métodos de cálculo explicados anteriormente, podemos ver que en ambos perfiles la hipótesis 1 presenta un mayor factor de seguridad, lo cual significa mayor estabilidad. También podemos observar de los datos obtenidos que los valores determinados por el método de Bishop, son superiores a los obtenidos por los métodos de Fellenius y Janbu. De este modo, según el criterio de factor de seguridad, la propuesta de actuación del proyecto se ejecutaría con la hipótesis 1, al presentar mayor seguridad en comparación con la hipótesis 2. Dicha solución consiste en la ejecución de los terraplenes de contención compuestos por un bloque de neumáticos cubierto de una capa de tierra.

Los círculos de rotura obtenidos en el programa Slide 7.0. para los casos estudiados pueden ser observados a continuación:

Perfil PK 0 + 160 ejecutado con hipótesis 1

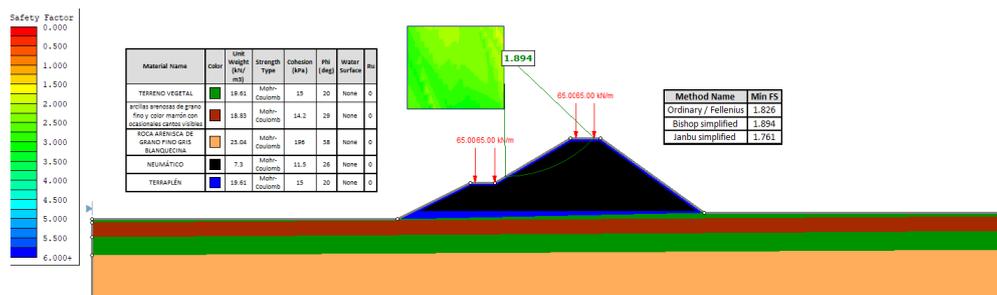


Ilustración 13 Perfil PK 0 + 160 ejecutado con hipótesis 1. Estabilidad

Perfil PK 0 + 540 ejecutado con hipótesis 1

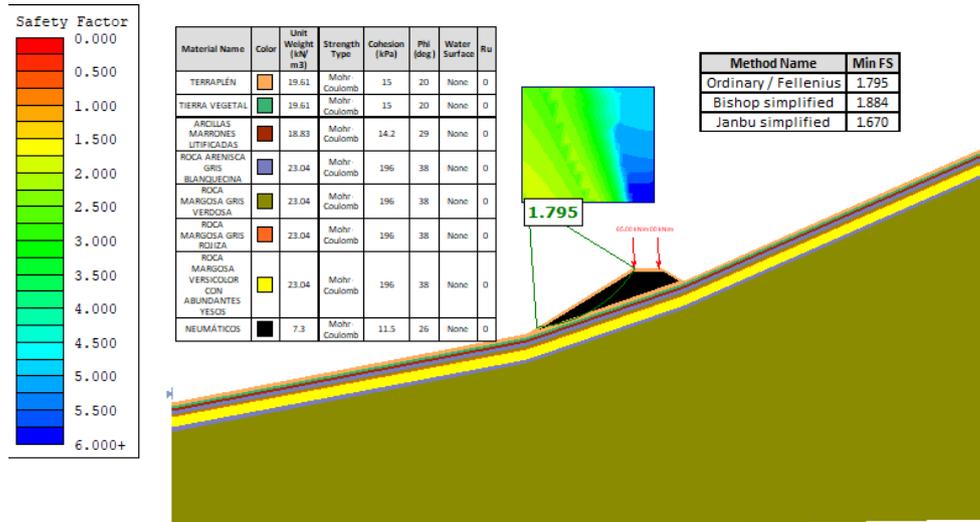


Ilustración 14 Perfil PK 0 + 540 ejecutado con hipótesis 1. Estabilidad

CAPÍTULO VII. ANÁLISIS DE ASIENTOS



7.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo la determinación de los asientos que se producirían en la superficie de cimentación sobre las cuales se ubicarán los terraplenes. Para ello, se ha hecho uso del software Settle, de la casa Rocscience. Este programa de determinación de asientos se basa en la teoría del matemático francés Joseph Boussinesq.

Para un completo estudio referente a los asientos, se han analizado dos de los perfiles de terraplenes que son los que presentan mayor riesgo debido a su geometría y a los materiales presentes en su losa. Dichos perfiles son los ubicados en las siguientes posiciones:

- Perfil del PK 0 + 160, con una elevada altura que asciende a 11,8 metros, siendo la mayor sección del vertedero.
- PK 0 + 540.

Haciendo referencia a las características geométricas de estas obras de tierra, estas presentan unas dimensiones de 50 metros de ancho y 62 metros de largo.

7.2. Revisión teórica previa

El método planteado por Boussinesq se basa en una expresión matemática que permite determinar el incremento de esfuerzo en una masa semi-infinita producido por la aplicación de una carga puntual en su superficie. De este modo y para su resolución, se plantean las siguientes hipótesis:

- El semi-espacio es infinitamente grande.
- El semi-espacio es un medio homogéneo, elástico lineal e isótropo.

Con el planteamiento de las hipótesis anteriores, es posible la aplicación de la teoría de la elasticidad que permite la obtención de los asientos generados en una carga rectangular. Además, la hipótesis de considerar el semi-espacio como un medio elástico lineal, permite la validez del principio de superposición, lo cual indica que "si se tienen



dos estados de tensiones y deformaciones correspondientes, al estado tensional suma le corresponde el estado de deformación suma”.

Ahora bien, hay que tener en cuenta lo establecido por el principio de Terzaghi, que indica que un terreno se deforme solo cuando existe un cambio en sus tensiones efectivas. En base a este principio y las hipótesis mencionadas anteriormente, las deformaciones han de ser calculadas mediante la teoría elástica usando el módulo de elasticidad efectivo y el coeficiente de Poisson. Como no es posible la determinación los valores de los factores anteriores en este TFG, se hará uso de unos valores orientativos ya establecidos, que se recogen en las siguientes tablas:

Tabla D.23. Valores orientativos de N_{SPT} , resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos

| Tipo de suelo | N_{SPT} | q_u (kN/m ²) | E (MN/m ²) |
|---------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------|
| Suelos muy flojos o muy blandos | < 10 | 0 - 80 | < 8 |
| Suelos flojos o blandos | 10 - 25 | 80 - 150 | 8 - 40 |
| Suelos medios | 25 - 50 | 150 - 300 | 40 - 100 |
| Suelos compactos o duros | 50 - Rechazo | 300 - 500 | 100 - 500 |
| Rocas blandas | Rechazo | 500 - 5.000 | 500 - 8.000 |
| Rocas duras | Rechazo | 5.000 - 40.000 | 8.000 - 15.000 |
| Rocas muy duras | Rechazo | > 40.000 | >15.000 |

Ilustración 15 Valores orientativos del Módulo de Young (Fuente: Blog de Víctor Yepes)

Tabla D.24. Valores orientativos del coeficiente de Poisson

| Tipo de suelo | Coeficiente de Poisson |
|---|------------------------|
| Arcillas blandas normalmente consolidadas | 0,40 |
| Arcillas medias | 0,30 |
| Arcillas duras preconsolidadas | 0,15 |
| Arenas y suelos granulares | 0,30 |

Ilustración 16 Valores orientativos del coeficiente de Poisson (Fuente: Blog de Víctor Yepes)

Hay que tener en cuenta que en los casos de que se trate de un suelo saturado el coeficiente de Poisson es equivalente a 0,5, debido a que implica una respuesta a corto plazo sin darse ninguna variación en su volumen. Este tipo de caso es usado para la determinación de asientos instantáneos.

En los asientos instantáneos, se hace uso del módulo de elasticidad sin drenaje, cuya determinación es difícil. Sin embargo, conociendo los valores del módulo de Young y el



coeficiente de Poisson efectivos, que sirven para la determinación de los asientos totales, se puede despejar de la siguiente ecuación el módulo de elasticidad sin drenaje (E_v), necesario para el cálculo de asientos instantáneos:

$$\frac{E_v}{1 + \nu_v} = \frac{E_u}{1 + 0,5}$$

El objetivo de estos cálculos es la determinación de los asientos, denominados deformaciones verticales. De este modo, se pueden calcular los asientos bajo el centro de cargas flexibles de forma circular, cuadrada o rectangular mediante la siguiente expresión:

$$S_i = I_s * q * t * n * B * (1 - \nu^2) * \frac{1}{E}$$

Donde:

- I_s : es el coeficiente de influencia, cuyo valor equivale a 1 en el caso de cargas circulares y a 1,122 en el caso de cargas cuadradas. Para las cargas rectangulares, este coeficiente se puede determinar a través de la siguiente expresión:

$$I_s = \frac{1}{\pi} \left(\ln \left(n + \sqrt{1 + n^2} \right) + n * \ln \frac{1 + \sqrt{1 + n^2}}{n} \right)$$

Donde:

- N : es el coeficiente de influencia. Este coeficiente se puede determinar mediante el siguiente cociente L / B . A continuación, se muestra una tabla de los valores de dicho cociente:

| L / B | I_s |
|--------------|-------------------------|
| 1 | 0,561099852 |
| 1,5 | 0,67878975 |
| 2 | 0,7658724006 |
| 2,5 | 0,834710204 |
| 3 | 0,891521356 |
| 4 | 0,981851797 |



| | |
|----|-------------|
| 5 | 1,052297117 |
| 10 | 1,272145749 |
| 20 | 1,492582963 |

Tabla 22 Valores del coeficiente de influencia (Fuente: Blog de Víctor Yepes)

Por último y aplicando el principio de superposición, se puede comprobar que el asiento en el centro de un rectángulo es el doble que en una de sus esquinas:

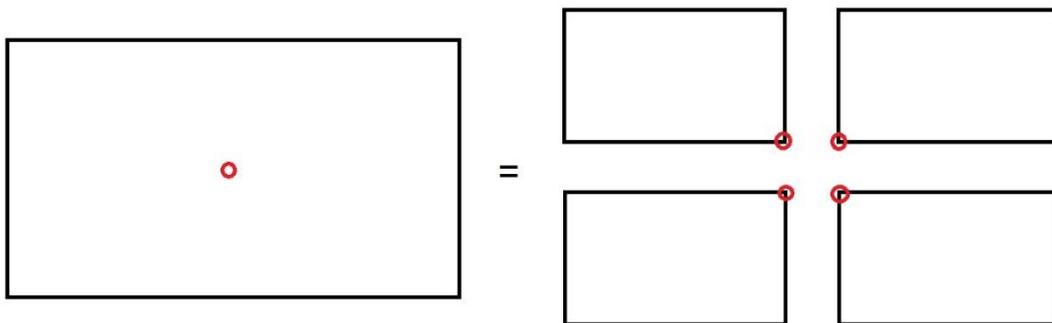


Ilustración 17 Principio de superposición (Fuente: Blog de Víctor Yepes)

7.3. Análisis de asientos y obtención de resultados:

Para la determinación de los asientos en la cimentación de los terraplenes, se ha hecho uso del software Settle 3D. Como se ha determinado en el estudio geotécnico, se dispone de un nivel rocoso muy próximo a la superficie, que presentará un comportamiento favorable en cuanto a los asientos.

Se han usado los siguientes parámetros de entrada en cuanto a los materiales presentes en la losa:

Perfil PK 0 + 160: los materiales presentes en la cimentación de este perfil se han identificado mediante el sondeo 2. Esta parte se encuentra constituida por 4 diferentes capas, que se muestran a continuación con sus correspondientes parámetros necesarios para el cálculo:

▪ **Tierra vegetal:**

| | |
|--------------------------------------|--------|
| Peso específico (KN/m ³) | 19,61 |
| Cc | 0,35 |
| Cr | 0,247 |
| e0 | 0,5685 |

Tabla 23 Características geotécnicas de tierra vegetal

▪ **Arcilla:**

| | |
|--------------------------------------|-------|
| Peso específico (KN/m ³) | 19,2 |
| Cc | 0,35 |
| Cr | 0,1 |
| e0 | 0,841 |

Tabla 24 Características geotécnicas de arcilla

▪ **Roca arenisca:**

| | |
|--------------------------------------|-------|
| Peso específico (KN/m ³) | 23,04 |
| Cc | 0,3 |
| Cr | 0,1 |
| e0 | 1,1 |

Tabla 25 Características geotécnicas de roca arenisca

▪ **Roca margosa:**

| | |
|--------------------------------------|-------|
| Peso específico (KN/m ³) | 23,04 |
| Cc | 0,3 |
| Cr | 0,1 |
| e0 | 1,1 |

Tabla 26 Características geotécnicas de roca margosa

Perfil PK 0 + 540: los materiales identificados en la cimentación de este perfil pueden verse en el sondeo 3 y en la calicata 3. En este caso la superficie de cimentación se encuentra compuesta por 6 capas de 4 materiales diferentes. Dichos materiales son los

mismos que se encuentran presentes en el caso del anterior perfil analizado, por lo que sus características geotécnicas son las mismas.

Para la determinación de los resultados de asientos, se han planteado dos diferentes hipótesis, referentes a las dos alternativas de actuación planteadas en este trabajo. De este modo, se han analizado los asientos según los siguientes casos:

HIPÓTESIS 1:

Alternativa analizada: bloque de neumáticos cubierto de una capa de tierra.

HIPÓTESIS 2:

Alternativa analizada: alternancia de capas de neumáticos y capas de tierra.

Empleando los datos anteriores como entrada en el software Settle, se han obtenido los siguientes resultados:

Perfil PK 0 + 160

| HIPÓTESIS | ASIENTO (cm) |
|-----------|--------------|
| 1 | 75.6 |
| 2 | 102 |

Tabla 27 Asientos perfil PK 0+160

Perfil PK 0 + 540

| HIPÓTESIS | ASIENTO (cm) |
|-----------|--------------|
| 1 | 47,8 |
| 2 | 61,2 |

Tabla 28 Asientos perfil PK 0+160

Una vez calculados los asientos obtenidos en la superficie de cimentación de los dos terraplenes estudiados, podemos ver que dichos valores son significativos, pero al estar ubicado el vertedero en una zona sin riesgos para la sociedad, no tiene gran efecto.

Comparando las hipótesis analizadas, podemos ver que tanto en el perfil ubicado en el PK 0+160 como en el perfil ubicado en el PK 0+540, la solución basada en la elaboración de los



terraplenes mediante una alternancia de capas de neumáticos y capas de tierra (hipótesis 2), presenta un mayor asiento, lo cual supone menor seguridad.

De este modo, la solución más eficaz en este caso es la referente a la hipótesis 1, bloque de neumáticos cubierto de una capa de tierra.

A continuación, se pueden observar los resultados gráficos obtenidos en cada uno de los casos:

Perfil PK 0 + 160. Hipótesis 1

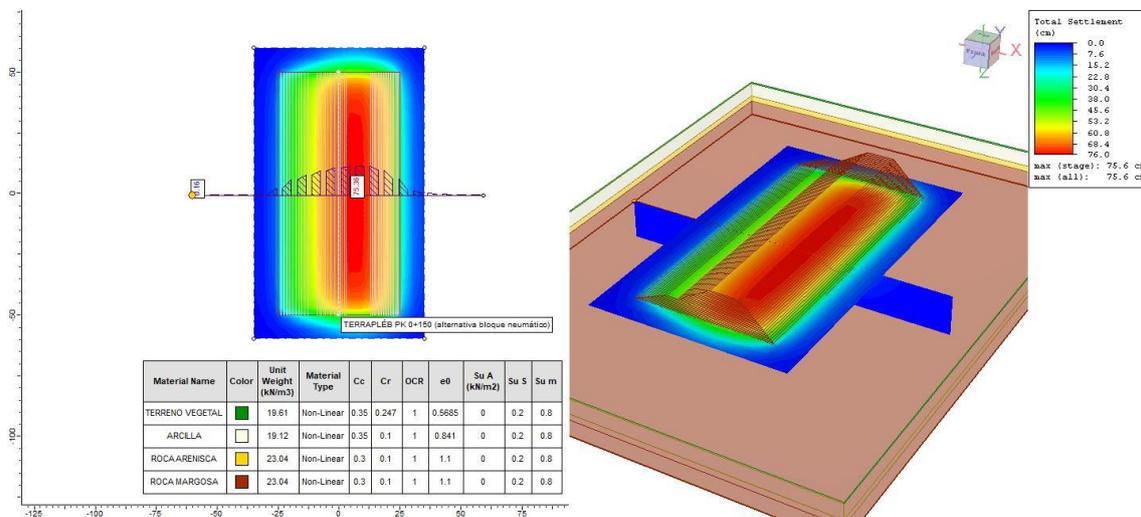


Ilustración 18 Perfil PK 0 + 160. Hipótesis 1. Asientos

Perfil PK 0 + 540. Hipótesis 1

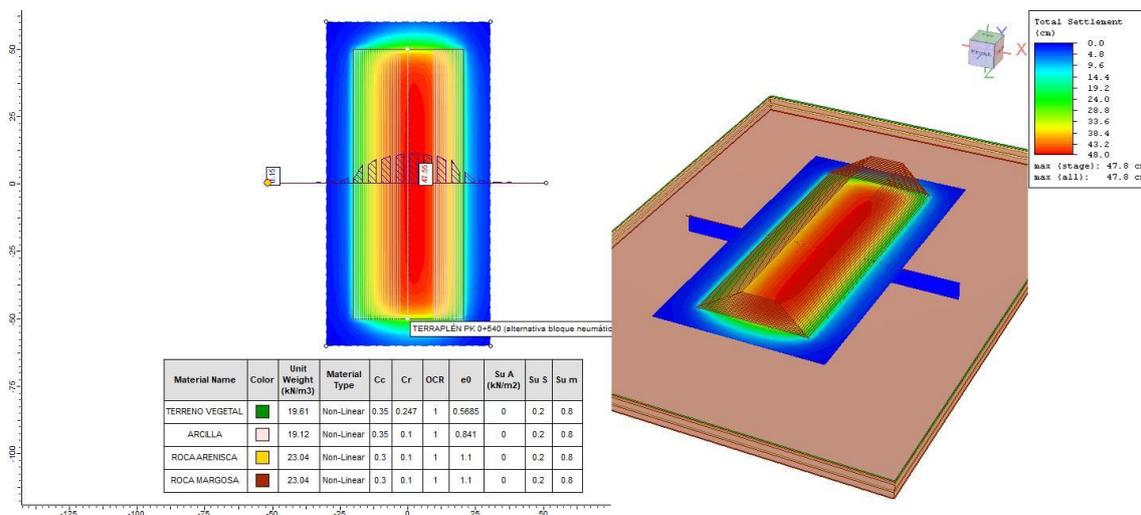


Ilustración 19 Perfil PK 0 + 540. Hipótesis 1. Asientos

CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES



En el presente trabajo de fin de grado, se ha desarrollado un análisis del proyecto de ampliación del vertedero de les Borges Blanques, ubicado en Lleida, enfocando el estudio desde un punto de vista geotécnico, con el fin de fomentar el uso de materiales que suponen riesgos para el medio ambiente y la sociedad, siendo estos en este caso los neumáticos fuera de uso.

De este modo, se ha analizado la información disponible en el proyecto original desarrollado por la empresa Kreum. S.A. para el análisis de la zona de estudio y la determinación de los condicionantes existentes en esta. Además, con el uso de la campaña geotécnica desarrollada en dicho proyecto y la información disponible en el instituto Geológico y Minero de España (IGME), ha sido posible la caracterización geomecánica de los terrenos afectados por las obras.

En el proyecto original, las paredes del vaso del vertedero han sido constituidas a partir de terraplenes habituales. Mientras que, en el presente estudio, la alternativa propuesta supone el empleo de neumáticos fuera de uso para perimetrar el vaso del vertedero analizado, lo cual supone un alargamiento en el ciclo de vida del vertedero, debido a que, al usar neumáticos extraídos de este, se consigue una disminución en el volumen de residuos almacenados, y la sustitución de las formas convencionales de almacenamiento de neumáticos una vez alcanzado el fin de su vida útil.

Haciendo referencia a las características geométricas de los perfiles de los terraplenes que rodean el vaso del vertedero de les Borges Blanques, se pueden diferenciar tres casos diferentes, siendo ubicados en los PK 0 + 160, PK 0 + 460 y PK + 540. De este modo, para el análisis de la viabilidad de la propuesta de actuación planteada en este estudio, se ha realizado un análisis de estabilidad de taludes y un análisis de asentamientos de los taludes que presentan mayor riesgo de deslizamiento, siendo estos el primer y tercer perfil, respectivamente. Los perfiles escogidos para el análisis han sido por la razón de las características geométricas de estos, alcanzando el primero una altura de 11,8 metros y estando el tercero ubicado sobre un plano de 18º de inclinación.

Para el diseño de los terraplenes, se han propuesto dos soluciones, siendo la primera la composición del terraplén mediante tongadas de tierra y de neumático



alternativamente, y la segunda la composición del terraplén mediante un bloque único de neumáticos cubierto de una capa de tierra. Para la unión de dichos neumáticos se ha propuesto su atadura mediante cuerdas que no presentan riesgo de incendio para evitarlo en caso de que se alcancen altas temperaturas. Ahora bien, como se ha explicado a lo largo del trabajo, el almacenamiento de neumáticos puede suponer riesgos como de incendio al estar expuestos a altas temperaturas o la habitación de estos por insectos y creación de plagas. Para evitar dichos problemas, se ha propuesto el cubrimiento de los terraplenes por capas de suelo que impidan que las altas temperaturas alcancen a los neumáticos, pudiendo estar estas elaboradas por latas presentes como residuos en el vertedero, y el uso de insectos como colémbolos que se alimenten de la materia orgánica y vegetal presente en la zona y así evitar la acumulación de insectos en los neumáticos.

Una vez conocida la geometría y composición de los terraplenes propuestos, y para determinar si dicha solución sería posible se han analizado la estabilidad y los asientos de los perfiles mencionados anteriormente.

En cuanto a la estabilidad, se ha empleado el software Slide 3D, obteniendo los siguientes valores como resultados del factor de seguridad, siendo la hipótesis 1 referente a la alternativa de un bloque de neumáticos y la hipótesis 2 referente a la alternancia de capas de neumáticos y tierra:

Perfil PK 0 + 160

| HIPÓTESIS | FS FELLENIUS | FS BISHOP | FS JANBU |
|-----------|--------------|-----------|----------|
| 1 | 1,826 | 1,894 | 1,761 |
| 2 | 1,541 | 1,660 | 1,426 |

Tabla 29 Conclusiones FS PK 0+160

Perfil PK 0 + 540

| HIPÓTESIS | FS FELLENIUS | FS BISHOP | FS JANBU |
|-----------|--------------|-----------|----------|
| 1 | 1,795 | 1,884 | 1,670 |
| 2 | 1,480 | 1,539 | 1,409 |

Tabla 30 Conclusiones FS PK 0+540



Analizando los resultados anteriores, se puede ver que, en ambos perfiles, la hipótesis 1 presenta mayor fiabilidad a la hora de ejecutar la solución, por lo que es la solución de actuación escogida.

Por otro lado, haciendo referencia a los asientos se ha empleado el software Settle. Los resultados obtenidos como asientos en los terrenos afectados por los terraplenes se pueden observar en las siguientes tablas:

Perfil PK 0 + 160

| HIPÓTESIS | ASIENTO (cm) |
|-----------|--------------|
| 1 | 75.6 |
| 2 | 102 |

Tabla 31 Conclusiones Asientos PK 0+160

Perfil PK 0 + 540

| HIPÓTESIS | ASIENTO (cm) |
|-----------|--------------|
| 1 | 47,8 |
| 2 | 61,2 |

Tabla 32 Conclusiones Asientos PK 0+540

Como se puede observar en los resultados anteriores estos alcanzan valores elevados, pero como el proyecto se trata de un vertedero localizado en una zona donde dichos asientos no afectan a ningún elemento en sus proximidades, no vemos ningún riesgo.

Para la circulación de los vehículos en el perímetro del vertedero, se han diseñado bermas en el perfil PK 0 + 160 de 5 metros de anchura al alcanzar una altura muy elevada, presentando estas un efecto positivo en la estabilidad del talud. Mientras que, en el resto de los perfiles, los vehículos podrían circular a través de la coronación de dichos terraplenes.

Por último, haciendo referencia al drenaje, se ha optado por el diseño de cuentas a pie de muro para facilitar el drenaje superficial, según la norma 5.2. IC. Dichas cunetas

serían triangulares con dimensiones variables en función del caudal que sería recogido, determinado en los cálculos. En los casos que las cunetas triangulares no sean suficientes para la recogida de todo el caudal, se optaría por secciones trapezoidales.

En conclusión, una vez analizados los condicionantes presentes en la zona de actuación, determinados los resultados de asientos en la cimentación de los terraplenes y calculados los factores de seguridad de la estabilidad de estos, la solución que presenta mayor seguridad para la ejecución del vaso del vertedero de los Borges Blanques es la referente a la hipótesis 1, al presentar un factor de seguridad de aproximadamente 1,8 y un asiento de 60 cm de media en ambos perfiles.

Valencia, Julio 2021

Fdo:

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



Ahmed, I. (1993). *Laboratory Study on Properties of Rubber-Soils*. Purdue University. <https://doi.org/10.5703/1288284314210>

Aiello, M. A., & Leuzzi, F. (2010). Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Waste management*, 30(8-9), 1696-1704.

C_ebr_1.pdf. (s. f.). Recuperado 3 de abril de 2021, de http://www.igme.es/actividadesigme/lineas/hidroyca/publica/libros1_HR/libro20/pdf/lib20/c_ebr_1.pdf

Desecherías—Consejo Comarcal de las Garrigues. (s. f.). Recuperado 4 de abril de 2021, de <https://ccgarrigues.com/serveis/deixalleries/>

Epps, J. A. (1994). *Uses of recycled rubber tires in highways* (Vol. 198). Transportation Research Board.

Garga, V. K., & O'Shaughnessy, V. (2000). Tire-reinforced earthfill. Part 1: Construction of a test fill, performance, and retaining wall design. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(1), 75-96.

González Rodrigo, N. (2020). *Recuperación de residuos y economía circular. Un estudio de casos*.

Hidalgo Signes, C. (2017). *APLICACIÓN AL ESTUDIO DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE LA CAPA DE SUBBALASTO DE VÍAS FERROVIARIAS FORMADO POR UNA MEZCLA NO BITUMINOSA DE MATERIAL GRANULAR Y PARTÍCULAS PROCEDENTES DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO*. Universitat Politècnica de València.

Hossain, S., & Jayawickrama, P. W. (2000). Use of whole tires in earth retaining structures. *Center for Multidisciplinary Research in Transportation Texas Tech University, Lubbock, TX, USA*.

Khalili, M., Jadidi, K., Karakouzian, M., & Amir Khanian, S. (2019). Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00276.

Kim, H.-S., Lee, S.-J., & Amir Khanian, S. (2010). Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(6), 839-843.

Kreum. (2013). *PROJECTE D'AMPLIACIÓ DEL DIPOSIT DE RESIDUS SÒLIDS URBANS DE LES BORGES BLANQUES*. PDF.

Kuo, N.-W., Liu, C.-C., & Leu, J. (2003). Environmental restoration by using waste tires: An example of the Nan-Liao landfill in Taiwan. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 64.

Mashaan, N. S., & Karim, M. R. (2013). Investigating the rheological properties of crumb rubber modified bitumen and its correlation with temperature susceptibility. *Materials Research*, 16(1), 116-127.



Penoyer, D. H., Kennelly, L. E., & Dever, R. J. (2006). Use of tire chips in Landfill gas extraction applications. *Proceedings of SWANA's 29th Annual Landfill Gas Symposium*.

Posse, F. J. A. (1987). *Manual de ingeniería de taludes* (Número 3). IGME.

Riba, O., Villena, J., & Quirantes, J. (1967). *Nota preliminar sobre la sedimentación en paleocanales terciarios de la zona de Caspe-Chiprana (Provincia de Zaragoza)*. CSIC.

Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 12(1), 17-29.

Tafreshi, S. M., & Norouzi, A. H. (2015). Application of waste rubber to reduce the settlement of road embankment. *Geomechanics and Engineering*, 9(2), 219-241.

Yeşiller, N., Hanson, J. L., Sohn, A. H., Bogner, J. E., & Blake, D. R. (2018). Spatial and temporal variability in emissions of fluorinated gases from a California landfill. *Environmental science & technology*, 52(12), 6789-6797.