

Caracterización y compactación de cenizas de Central Térmica empleadas en terraplenes de carreteras

Miguel Ángel Calzada Pérez
Universidad de Cantabria. Santander, España. calzadam@unican.es
Ángel Vega Zamanillo
Universidad de Cantabria. Santander, España. vegaa@unican.es
Ignacio Pascual Montejo
Centro Tecn. Iglesias. Asturias, España. contratasiglesias@contratasiglesias.com
Alberto Hernández Sanz
Universidad de Cantabria. Santander, España. uc20631@unican.es

Fecha de recepción: 21 de diciembre del 2007

Fecha de aprobación: 09 de julio del 2008

Resumen

La escasez de recursos energéticos y de materias primas aconseja un aprovechamiento de los desechos y subproductos industriales. Un campo en el que se pueden emplear es en la construcción de carreteras, consiguiendo soluciones estructurales válidas y económicas, capaces de mejorar el entorno y el medioambiente.

En el presente artículo se exponen los resultados y conclusiones de un estudio de caracterización realizado sobre cenizas procedentes de dos centrales térmicas españolas, situadas en las localidades de Soto de Ribera y Aboño (Asturias, España), para su posible aplicación en la construcción de terraplenes y rellenos de carreteras.

Palabras clave: ceniza, terraplén, compactación, capacidad portante, reciclaje

Abstract

The shortage of energy resources and raw materials advises to use industrial wastes and subproducts. One area where they can be used is in road construction, getting valid and economical structural solutions, capable of improving the land and the environment.

In this paper, the results and conclusions of a study of ashes characterization from two thermal power plants in Spain, located in the towns of Soto de Ribera and Aboño (Asturias, Spain) are described, for its possible application in the construction of road embankments and fillings.

Key words: Ash, Embankment, Compaction, Bearing Capacity, Recycling

1. Introducción

En los últimos años, debido a la creciente demanda de energía en España y en el mundo, las industrias energéticas han incrementado su producción considerablemente.

En el caso de las centrales térmicas que utilizan carbón como combustible, el consumo energético ha supuesto un incremento notable en la producción de desechos provenientes de este tipo de industrias. Estos desechos

(escoria de carbón, cenizas volantes,...), suponen un volumen anual importante de materiales que deben ser almacenados y tratados convenientemente teniendo en cuenta las exigencias ambientales actuales. Por lo tanto, el aprovechamiento de estos desechos industriales en la construcción civil supone una opción más que interesante para dar una salida económica y funcional a los problemas derivados de la gestión ambiental de los residuos, los cuales hoy en día exigen costosas medidas de reducción de emisiones, vertidos controlados, grandes zonas de acopio, contaminación paisajística, etc.

El objetivo principal del estudio realizado, trata de introducir y validar el material (ceniza) procedente de los quemadores de carbón de centrales térmicas en forma tal que sea posible su aplicación como material de relleno en terraplenes y formación de explanadas, dentro del marco normativo existente, y así extrapolar los resultados particulares del estudio a otras cenizas con características similares. Para ello, se ha realizado un programa de ensayos adecuado y un análisis comparativo de dos cenizas de diferente naturaleza, para su clasificación y determinación de su idoneidad o no en la construcción de infraestructuras viales.

Posteriormente, se ha realizado un estudio de compactación y capacidad portante de las cenizas procedentes de centrales térmicas, considerando diferentes variables, a fin de acotar un rango adecuado de utilización por parte de las empresas constructoras de carreteras.

2. Ensayos de caracterización

Se han realizado una serie de ensayos comúnmente utilizados para la caracterización de suelos, orientados a definir las propiedades físicas y químicas básicas de las cenizas estudiadas. Éstos fueron los siguientes:

- **Caracterización química y mineralógica:**
 - Análisis químico.
 - Difracción de rayos "X" para determinación de elementos traza y elementos mayoritarios.
 - Ensayo de puzolanicidad para cementos UNE-EN 196-5.

- Determinación de límites de Atterberg. UNE 103-103/94 y UNE 103-104/93.
- Equivalente de arena. UNE 103-109/95.

- **Caracterización física y clasificación de suelos:**
 - Granulométrico de suelos por tamizado UNE 103-101/95.
 - Densidad relativa y absorción de los áridos UNE-EN 1097-6.
 - Densidad aparente y porosidad. UNE-EN 1097-3.
 - Hinchamiento libre UNE 103-601/96 y colapso en edómetro.

2.1. Caracterización química

2.1.1. Análisis químico

El análisis químico fue realizado pulverizando y diluyendo las muestras previamente, y observando diversas reacciones químicas que se producen.

De los resultados obtenidos en la Tabla 1, ambas cenizas son de tipo sílico-aluminoso dados los porcentajes de sílice y alúmina presentes, ambas presentan la sílice como óxido mayoritario (SiO₂), con contenidos importantes de alúmina (Al₂O₃), óxidos de hierro (expresado como óxido férrico) y cal (CaO).

Tabla 1 Análisis químico de la ceniza de Soto de Ribera y análisis químico de la ceniza de Aboño

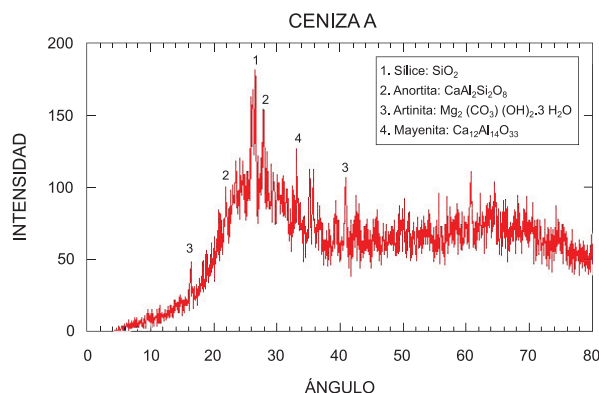
Componente	S.R-I	S.R-II	Aboño
Sílice (Si O ²) %	38,8	43,6	49,4
Alúmina (Al O ³) %	21,4	23,5	27,8
Óxido Férrico (Fe ² O ³) %	5,91	6,77	8,56
Óxido Cálculo (Ca O) %	4,99	4,62	7,07
Óxido Potásico (F ² O) %	2,33	2,72	2,15
Magnesia (Mg O) %	1,16	1,32	1,64
Óxido de Titanio (Ti O ²) %	0,87	0,93	1,34
Pentóxido de Fósforo (P ² O ⁵)	0,32	0,28	0,59
Óxido de Estroncio (Sr O) %	< 0,1	< 0,1	0,18
Óxido de Bario (Ba O) %	< 0,1	< 0,1	0,16
Cloro (Cl) %	< 0,1	< 0,1	0,13
Carbono (C) %	23,3	15,3	0,55
Azufre (S)%	0,48	0,68	0,06

El resto de elementos se encuentran en una proporción que puede asumirse como normal, sin embargo, los contenidos de carbono de la ceniza procedente de la central de Soto de Ribera se encuentran en muy alta proporción (23,3%) en el ensayo I y un (15,3%) en el ensayo II, lo que podría ser consecuencia de una deficiente combustión del carbón en la caldera, dando como resultado una importante cantidad de residuo inquemado, y por consiguiente, elevados porcentajes de carbono.

2.1.2. Análisis mineralógico

La identificación y cuantificación del contenido de las fases cristalinas y amorfas de las cenizas de Soto de Ribera y Aboño, se realizó por el procedimiento de difracción de rayos - X (XRD).

Figura 1 Difractograma ceniza de Aboño



A pesar de las condiciones desfavorables del difractograma obtenido de la ceniza de Aboño (Figura 1), con picos poco definidos, pueden observarse algunas fases posibles como la sílice, el sílico-aluminato anortita, el aluminato cayenita y el carbonato hidratado llamado artinita.

Muy distinta es la situación de la muestra de ceniza de Soto de Ribera tal como aparece en la Figura 2. El difractograma presenta picos perfectamente definidos, lo cual encaja con una muestra en la que todas sus fases son cristalinas (aunque permanece algún resto de fase amorfa).

Esta definición de los picos permite hacer una interpretación fiable del difractograma. Las fases predominantes son la sílice y, en menor medida, la calcita (carbonato cálcico). También aparecen fases más minoritarias como son los feldespatos y las arcillas o filosilicatos, en particular, la caolinita.

2.1.3. Carácter puzolánico

Para la determinación de la puzolanidad de materiales sílico-aluminosos, como el cemento, se aplica la norma UNE-EN 196-5:2005, comparando la cantidad de ión calcio de la disolución acuosa del material hidratado con una curva patrón.

Según la Figura 3, puede considerarse que las cenizas estudiadas van a presentar un comportamiento puzolánico, en contraposición a las cenizas con carácter sulfo-cálcico, las cuales se comportan como conglomerantes hidráulicos en presencia de agua. La clasificación de ambas cenizas según ASTM C 618 es ceniza tipo "F" por su fracción más fina de ceniza volante.

Observando los resultados obtenidos a los ocho días, las concentraciones de [OH]- y [Ca O] se encuentran en la zona inferior delimitada por la curva de saturación, con concentraciones muy bajas. Se considera entonces que ambas cenizas presentan carácter puzolánico, principalmente debido a que su composición química demuestra un alto contenido de (SiO₂) y (Al₂O₃).

2.2. Caracterización física

2.2.1. Análisis granulométrico

Las cenizas analizadas se encuentran en su mayor parte bajo la banda de las arenas con una cierta proporción de partículas de tamaños mayores como se muestra en la Figura 4. Tamaños máximos en estado original de 10 – 12,5 mm de la ceniza procedente de la central de Aboño y 6,4 mm de Soto de Ribera.

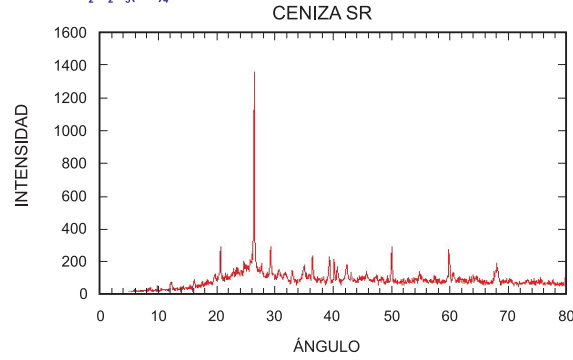
La ceniza de Aboño puede considerarse como una arena gruesa, mientras que la ceniza de Soto de Ribera presenta un tamaño menor dentro del rango de las arenas.

Según la normativa española (PG-3), ambas cenizas cumplen las características para su utilización en rellenos tipo terraplén al pasar más del 70 % del material por el tamiz 20 mm.

Difractograma ceniza de Soto de Ribera

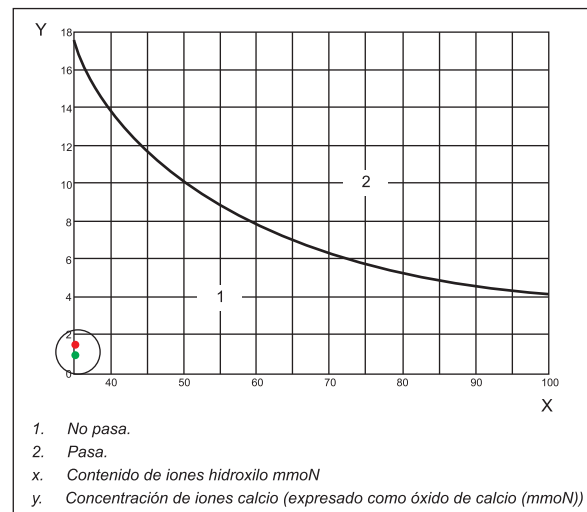
Figura 2

- 1. Sílice: SiO₂ ; 2. Calcita: CaCO₃; 3. Feldespatos; 4. Filosilicatos;
- 5. Caolinita: Al₂Si₂O₅(OH)₄



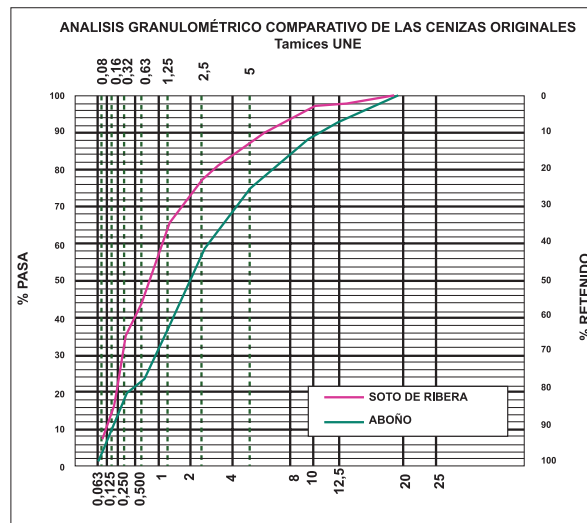
Curva de concentración de saturación UNE-EN 196-5:2005

Figura 3



Análisis granulométrico comparativo de las cenizas estudiadas en estado original

Figura 4



2.2.2. *Peso específico de partículas, densidad aparente, porosidad y absorción de agua*

Se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la norma UNE-EN 1097-3.

La densidad de partículas aparente es la relación entre la masa de una muestra de árido secada en estufa y el volumen que ocupa en agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y de los huecos accesibles al agua. De la fracción 63-31,5 mm las cenizas de Soto de Ribera presentan una densidad aparente de 2,016 t/m³ y la ceniza de Aboño de 2,108 t/m³. De la fracción 4-0,063 mm las cenizas de Soto de Ribera presentan una densidad aparente de 1,890 t/m³ y la ceniza de Aboño de 2,174 2,108 t/m³.

El peso específico es la masa de las partículas, sin huecos entre ellas, por unidad de volumen. La ceniza de Soto de Ribera presenta un peso específico de 2,125 t/m³ y la ceniza de Aboño de 2,365 t/m³. El peso específico de partículas alcanza valores muy bajos, especialmente la ceniza de Soto de Ribera.

Se entiende por volumen de huecos a la relación de los poros totales respecto al volumen total que ocupa la muestra (volumen de referencia o aparente). Este parámetro se conoce como porosidad, y a partir de él,

se puede determinar el índice de poros del material. Las cenizas de Soto de Ribera presentan un porcentaje de huecos de 52,7%, un índice de poros de 1,114, y una absorción de 3,70 %. Las cenizas de Aboño presentan un porcentaje de huecos de 55,7%, un índice de poros de 1,257, y una absorción de 4,10 %.

2.2.3. *Índice de hinchamiento y colapso en edómetro*

El índice de hinchamiento y colapso de las muestras de ceniza se realizó en célula edométrica de 45 mm de diámetro y 12 mm de altura (Fotografía 1) según la normativa UNE 103 601:1996.

En ambas cenizas, el índice de colapso y potencial de colapso es menor de 0,10 %. El hinchamiento libre de la ceniza de Soto de Ribera es de -0,167% y de la procedente de Aboño -0,180%. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que no se produce colapso en ninguna de las dos muestras ensayadas, ya que, el asiento de las probetas se encuentra en ambos casos por debajo del límite establecido del 1%.

De la misma manera no se produce hinchamiento en ninguna de las dos muestras ensayadas, encontrándose por debajo del 3 %, limitación impuesta según UNE 103 500.

2.2.4. *Límites de Atterberg*

Las cenizas estudiadas carecen de plasticidad dado que no presentan minerales arcillosos en su composición y prácticamente no aparecen partículas de tamaño arcilla. Por ésta razón no es posible determinar los límites de consistencia de las cenizas estudiadas. En cualquier caso, la sensibilidad de ambas cenizas al agua es prácticamente nula y pueden considerarse como un material granular permeable.

2.2.5. *Equivalente de arena*

Las cenizas de ambas centrales térmicas presentan una fracción de arena limpia, determinada a partir del ensayo equivalente de arena. UNE-EN 933-8 2000. La ceniza de Aboño tiene un EA de 86% y la procedente de Soto de Ribera de 78%.

Valores de equivalente de arena superiores a 50, reflejan un grado de limpieza suficiente para la mayor parte de las aplicaciones relacionadas con la construcción de rellenos compactados.

Fotografía 1 Ensayos de edómetro



3. Ensayos mecánicos

Se han realizado ensayos mecánicos que aportasen información acerca de la compactación y capacidad portante que presenta el material bajo unas determinadas condiciones. Se han seguido las siguientes normativas:

- Ensayo de apisonado Próctor normal y modificado UNE 103-500/94 y UNE 103-501/94.
- Ensayo CBR para determinación de la capacidad portante UNE 103-502/95.
- Variación de la granulometría tras la compactación UNE 103-101/95.

3.1. Estudio densidad seca-humedad (ensayo Próctor)

Se ha realizado un análisis de las características de compactación de las cenizas, variando la energía de compactación aplicada y la humedad de compactación.

Las distintas variantes del ensayo Próctor realizadas en laboratorio para la obtención de los parámetros de compactación fueron las siguientes:

- Ensayo Próctor normal con maza normalizada de 2500 gramos y molde cilíndrico de 1000 cm³ en tres capas compactadas con 26 golpes.
- Ensayo Próctor modificado con maza normalizada de 4540 gramos y molde cilíndrico de 2320 cm³ en cinco capas compactadas con 60 golpes.
- Ensayo Próctor modificado con martillo Kango y molde cilíndrico de 2320 cm³ en tres capas compactadas con 20 segundos de aplicación por tongada.

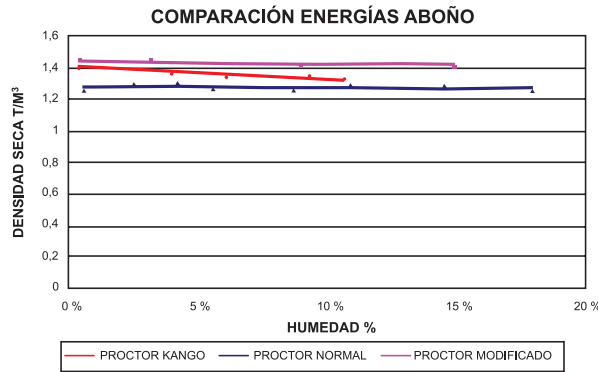
Los resultados de los ensayos de compactación realizados pueden observarse en las Figuras 5 y 6, donde aparecen representadas las gráficas densidad seca-humedad para las distintas energías de compactación aplicadas sobre el material.

Las gráficas resultantes muestran una muy ligera variación de la densidad con la humedad, tendiendo a disminuir ésta con el incremento de humedad, a pesar de la porosidad que presenta el material.

La línea de tendencia de la densidad para ambas cenizas puede considerarse casi una línea horizontal, con una ligera pendiente negativa. Esto se debe principalmente a la pequeña variación de la densidad seca para las diferentes cantidades de agua añadida, como consecuencia de la pequeña variación del índice de huecos tras la compactación para las diferentes combinaciones de humedad-energía de compactación.

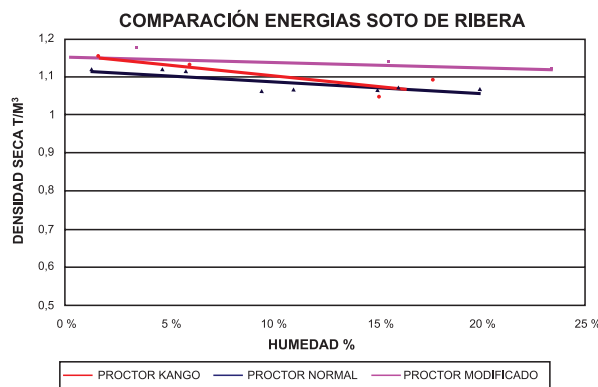
Resultados de los ensayos Próctor normal y modificado de la ceniza de Aboño en laboratorio

Figura 5



Resultados de los ensayos Próctor normal y modificado de la ceniza de Soto de Ribera en laboratorio

Figura 6



La energía de compactación tampoco varía la densidad seca de manera considerable para una determinada cantidad de agua añadida. En la ceniza de Aboño, la variación de densidad se encuentra entre 1,2 t/m³ de Próctor normal hasta algo más de 1,4 t/m³ de Próctor con Kango. Incluso las máximas densidades secas se obtienen por Próctor modificado y no con martillo Kango, considerada hipótesis de partida para la obtención de la densidad máxima.

Lo mismo ocurre con las cenizas de Soto de Ribera, donde las densidades obtenidas son algo menores que en las cenizas de Aboño y con una tendencia decreciente con el aumento de humedad de compactación.

Los bajos valores de peso específico se transmiten en la obtención de bajas densidades secas tras la compactación. La ceniza de Soto de Ribera presenta densidades menores comparativamente con la ceniza de Aboño, dado que, su peso específico de partículas es menor.

La humedad óptima para las distintas energías de compactación aparece en las Tablas 2 y 3:

Tabla 2 *Humedades óptimas y Densidades secas, ceniza de Soto de Ribera*

Próctor de Referencia	Humedad óptima	Densidad seca max
Próctor normal	4,70 %	1,222 t/m ³
Próctor modificado	3,50 %	1,175 t/m ³
Próctor con Kango	1,60 %	1,154 t/m ³

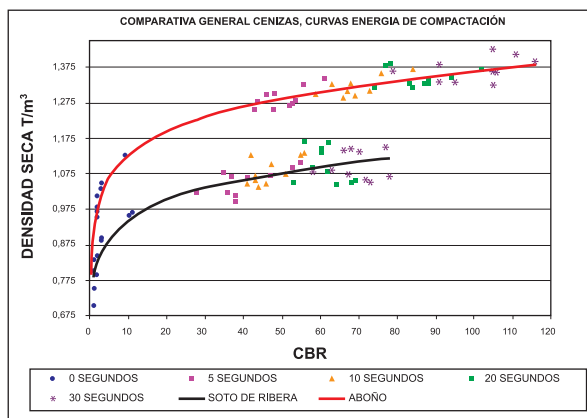
Tabla 3 *Humedades óptimas y Densidades secas, ceniza de Aboño*

Próctor de Referencia	Humedad óptima	Densidad seca max
Próctor normal	4,20 %	1,299 t/m ³
Próctor modificado	3,50 %	1,450 t/m ³
Próctor con Kango	1,80 %	1,424 t/m ³

Tabla 4 *Relación de ensayos realizados, combinaciones de humedad y energía de compactación*

Procedencia muestra	Próctor de referencia	Humedades (%)	Energía aplicada (s)
Soto de Ribera	Martillo Kango	0, 5, 10, 15, 20 y saturado	5, 10, 20 y 30
Aboño	Martillo Kango	0, 5, 10, 15, 20 y saturado	5, 10, 20 y 30

Figura 7 *Curvas Densidad seca-Índice CBR obtenido para las distintas combinaciones de humedad-energía de compactación de las cenizas*



3.2. Estudio de la capacidad portante, ensayo CBR

Para la determinación de la capacidad portante en laboratorio, se han fabricado probetas con diferentes porcentajes de humedad (0, 5, 10, 15 y 20 %). Para

cada porcentaje de agua añadida se han realizado distintas compactaciones con martillo Kango, desde los cero segundos de aplicación, hasta un máximo de 30 segundos por tongada, en escalones de 5 segundos (Tabla 4).

En las Figuras 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos para las distintas combinaciones de humedad y energía de compactación obtenidos para la determinación del índice CBR en laboratorio. Se observa como la capacidad portante desarrollada por ambas cenizas en laboratorio, teniendo en cuenta las especificaciones recogidas en el pliego general de carreteras (PG-3), puede considerarse muy alta.

En cuanto a la densificación del material, se puede observar en la Figura 7 que, durante los cinco primeros segundos de compactación se produce un salto cuantitativo de la densidad seca y también de la capacidad portante, para 5 segundos el CBR alcanzado es de 40. En los segundos de compactación sucesivos este incremento de densidad es menos acusado.

El aumento de densidad seca se transmite en la obtención de un índice CBR muy alto, alcanzándose un máximo CBR de 114 para la ceniza de Aboño, mientras que la ceniza de Soto de Ribera, a pesar de presentar menor capacidad portante, alcanza un CBR máximo de 76.

Observando las Figuras 8 y 9, la ceniza procedente de Aboño es comparativamente la que presenta mayor capacidad portante y mayores densidades, por lo tanto, es la que tiene un mejor comportamiento resistente una vez compactada. Como se observa en las figuras adjuntas, la humedad que proporciona la mayor densidad seca en función del CBR corresponde a valores bajos de humedad, por lo que puede considerarse como óptima. El resto de humedades de compactación van a asegurar un CBR muy alto, para la condición de compactación de 30 segundos, en un rango de densidades que no varía excesivamente (0,1 t/m³). En general, se puede concluir que ambas cenizas van a desarrollar una capacidad portante de buena a excelente, expresada en índice CBR, para prácticamente cualquier combinación de humedad y energía de compactación.

3.3. Variación de la granulometría sobre el material compactado.

Se ha analizado la degradación del material bajo el efecto de la compactación. Para ello, se han realizado

análisis granulométricos del material compactado bajo 20 y 30 segundos de compactación con martillo Kango, como se recoge en las Figuras 10 y 11.

Según la Figura 11, la ceniza de Soto de Ribera presenta una menor influencia de la compactación sobre la granulometría inicial, mientras que la ceniza de Aboño (Figura 10) varía de manera más marcada al aumentar la energía de compactación. Las partículas más gruesas se fracturan y dividen en tamaños más pequeños aumentando la proporción de partículas menores. La ceniza de Aboño posee partículas más gruesas que se degradan tiempo después de la compactación. El cernido por el tamiz de luz de malla 2 mm, varía entre 51,7%, 58,2%, 65,2% respectivamente para el material origen, y compactado 20 y 30 segundos.

4. Clasificación de las cenizas

- Clasificación ASTM: tanto la ceniza de Soto de Ribera como Aboño se consideran como SW-SM. Son arenas limosas bien graduadas con pocos finos, los cuales tienen poca o nula plasticidad.

- Clasificación AASHTO: la clasificación correspondiente es A-3, es decir arena fina, limpia y uniforme, con algunos finos de carácter no plástico.

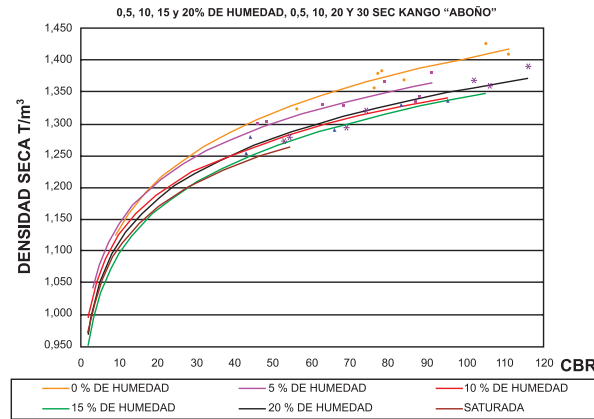
- Clasificación Española (PG-3): con los datos obtenidos en los ensayos, la clasificación por el PG-3 de las cenizas es Suelo Seleccionado. Cabe destacar que dada la gran capacidad portante que desarrolla el material compactado, ambas cenizas pueden considerarse como un excelente material en la construcción de terraplenes. Las características de las cenizas como suelo seleccionado permiten su utilización tanto en coronación de terraplenes como en núcleo y cimientó.

5. Conclusiones

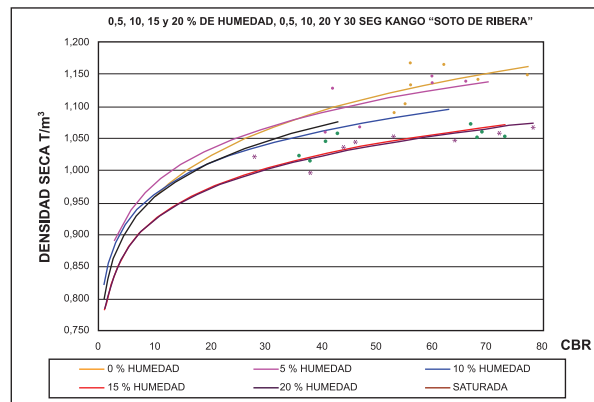
- Las cenizas estudiadas pueden considerarse como arenas de granulometrías continuas y con curvas similares, pudiendo considerarse como materiales bien graduados. Comparativamente, la ceniza de Soto de Ribera presenta un tamaño de grano menor que la ceniza de Aboño.

- A partir de los ensayos Próctor, las densidades secas máximas se pueden considerar bajas (menor de 1,5 gr/cm³), y éstas se obtienen para bajas humedades óptimas (menores del 5 %).

Curvas comparativas de humedad-energía de compactación de la ceniza de Aboño Figura 8



Curvas Comparativas de humedad-energía de compactación de la ceniza de Soto de Ribera Figura 9



Granulometrías comparativas del material original, compactado 20 seg., y compactado 30 seg. de la ceniza de Aboño Figura 10

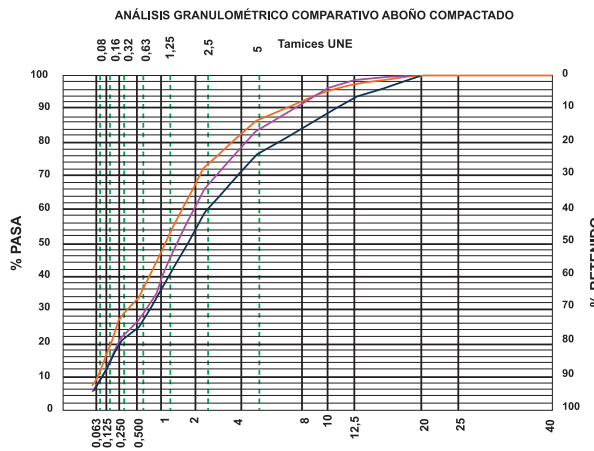
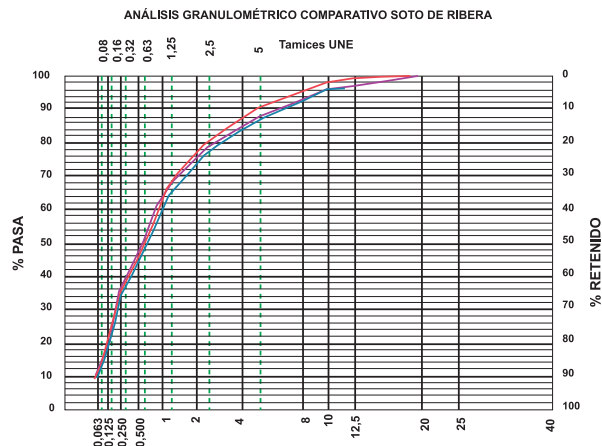


Figura 11 Granulometrías comparativas del material original, compactado 20 seg. y compactado 30 seg. de la ceniza de Soto de Ribera



•Las curvas Próctor son poco sensibles a la humedad. La densidad seca solo se modifica en 0,2-0,1 gr/cm³ pasando de un 0 % de humedad aproximado a un 20 % de humedad.

•En los estudios de la influencia de la energía de compactación no se observa una gran diferencia sobre la densidad seca obtenida. Por ejemplo, de 5 segundos de compactación a 20 segundos con Kango, la densidad seca varía tan solo en 0,15 gr/cm³.

•Los ensayos realizados demuestran que ambas cenizas poseen excelentes características de capacidad portante por sí mismas, sin necesidad de la adición de ningún otro producto.

Se han obtenido CBR > 70, siendo mayor el obtenido en la ceniza de Aboño (CBR >110).

•A pesar de no obtenerse el máximo CBR para la máxima densidad seca (correspondiente a una humedad baja), los valores de CBR que corresponden a estas densidades máximas se encuentran en un rango muy alto de capacidad portante.

•Aunque las densidades secas son bajas, se puede concluir que ambas cenizas van a desarrollar una capacidad portante excelente, expresada en índice CBR, para prácticamente cualquier combinación de humedad y energía de compactación.

•Según las distintas clasificaciones realizadas, las cenizas analizadas se consideran como arenas de

calidad, bien graduadas con pocos finos y que presentan poca o nula plasticidad.

•Las características de las cenizas como suelo seleccionado permiten su utilización tanto en cimiento y núcleo, como en coronación de la explanación.

Referencias bibliográficas

1. Pardo de Santayana Carillo, F. Oteo Mazo, C., (1991), "Comportamiento Geotécnico de Cenizas Volantes en Rellenos Compactados y Su Evolución a lo Largo del Tiempo", Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (CEDEX).
2. M. Mateos (1989) "Sobre Empleo de Las Cenizas Volantes en Capas de Base de Firmes de Carreteras", Revista de Obras Públicas, Marzo. Pág. 211-213.
3. M. Mateos. (1987) "Contribución a la Utilización de Cenizas Volantes". Cimbra, No 243, Junio 1987 Pág. 22-24.
4. Hacar Rodríguez, F. García Arango, I. (1988). "Empleo de Cenizas volantes en Capas de Base de Firmes de Carretera". Revista de Obras Públicas Enero 1988.
5. United States Department of Transportation, (Federal Highway Administration), (2006). "Fly Ash Facts for Highway Engineers". Pavements FHWA 2006.
6. Aykut Senol et al. (2006). "Soft Subgrades Stabilization By Using Various Fly Ashes" Resources, Conservation & Recycling, Vol. 46, Issue 4, pg: 365-376.
7. Carlos Kraemer, José Pardillo, Sandro Rocci, Manuel G. Romana, Victor Sánchez Blanco, Miguel Ángel del Val. (2004) "Ingeniería de Carreteras" vol II. McGraw-Hill.
8. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España, (MOPU) (1981 y modificaciones), "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3", Dirección General de Carreteras Madrid.