

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		
Nombre en inglés: phosphogypsum		

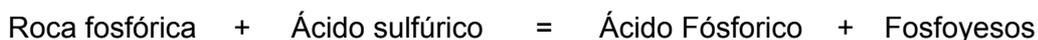


FOSFOYESO

1.-ORIGEN

La producción de ácido fosfórico por vía húmeda para su uso principalmente en la fabricación de fertilizantes fosfatados, polifosfatos sódicos para detergentes u otras aplicaciones. Se realiza atacando los fosfatos naturales, a partir de la roca fosfórica, con ácido sulfúrico al 70%⁽¹⁷⁾, y se genera un subproducto constituido fundamentalmente por sulfato cálcico hidratado que se denomina fosfoyeso. Por cada tonelada de ácido fósforico producida, se generan de 4,5 a 5,5 toneladas de fosfoyeso por lo que se estima que la producción mundial de fosfoyesos es de unos 100 a 280 millones de toneladas (Mt) al año.

La reacción química simplificada sería la siguiente:



El fosfoyeso tiene unas características distintas a las del yeso obtenido a partir de la roca de yeso y para poder ser utilizado como sustitutivo de éste, de forma rentable económicamente, se requiere una mayor investigación.

Existen tres procesos para la fabricación del óxido de fósforo: Proceso dihidratado, proceso hemihidratado y proceso hemi-dihidrato⁽⁹⁾.

El proceso dihidratado, es el proceso más estable y es el que requiere una menor inversión inicial de capital y tiene un bajo coste de producción. Es el proceso más utilizado en el mundo. Produce entre 28-30% de ácido fosfórico. Se generan 4,9 toneladas de fosfoyeso seco por cada tonelada de ácido fósforico producido. El fosfoyeso generado contiene gran número de impurezas. Este proceso es el que se utiliza en la fábrica de Huelva.

El proceso hemihidratado tiene un coste de inversión inicial y de producción más alto que el anterior. Produce entre 40-50% de ácido fosfórico. Genera 4,3 toneladas de fosfoyeso por ácido fosfórico, es decir, se obtiene menor cantidad de residuo y, la cantidad de impurezas es también menor.

El proceso hemi-dihidrato combina las ventajas de los dos anteriores. A pesar de todo es el menos

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

utilizado. Genera 4,9 toneladas de fosfoyeso por cada tonelada de óxido de fósforo y el fosfoyeso generado es el que contiene menor número de impurezas de los tres.



Las industrias de producción de ácido fosfórico son consideradas industrias de tipo NORM (Naturally Occurring Radioactive Material). Se trata de industrias convencionales no nucleares que se caracterizan por utilizar en su proceso de producción materia prima que contiene concentraciones elevadas de radionucleidos naturales o bien, debido a las características de su proceso de producción, generan productos comerciales, sub-productos o residuos enriquecidos en estos radionucleidos. En España, este tipo de industria está sometido al Título VII del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes^(14, 17).

La roca fosfórica de origen sedimentario utilizada como materia prima en las fábricas de producción de ácido fosfórico de Huelva contiene concentraciones de actividad en torno a $1,5 \times 10^3$ Bq/kg de ^{238}U en equilibrio secular con todos sus descendientes. Además, en el proceso dihidratado de producción de ácido fosfórico utilizado en Huelva, el contenido radioactivo presente originalmente en la roca sufre un fraccionamiento selectivo. Así, la mayor parte de los isótopos de uranio se disuelven en el proceso acompañando al ácido fosfórico producido, mientras que por el contrario, en torno al 90% del ^{226}Ra , ^{210}Pb y ^{210}Po terminan asociados al fosfoyeso en concentraciones en torno a los 7×10^2 Bq/kg. La presencia de estos radionucleidos naturales de la serie del uranio en el fosfoyeso, debe ser tenido en consideración en su gestión y posible valorización^(14, 17, 18).

La naturaleza y características del fosfoyeso están estrechamente influenciadas por la

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

composición y calidad de la roca fosfórica, el proceso de fabricación empleado, el método de vertido usado, así como la edad, localización y profundidad del apilamiento.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) ha clasificado el fosfoyeso como TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material), material radioactivo de origen natural cuyo procesamiento ha aumentado la concentración de los radionucleidos originales. Los niveles de radiación del fosfoyeso varían considerablemente de un apilamiento a otro y también según la zona dentro de un mismo apilamiento, debido a una serie de factores, como son: concentración de radio en la roca fosfórica, existencia de cobertura vegetal, porosidad, contenido en humedad, presencia de agua estancada, temperatura, presión atmosférica, etc⁽¹⁹⁾.

2.-VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN DEL RESIDUO

En las proximidades de la ciudad de Huelva está implantado un gran complejo de industria química básica que incluye diversas plantas dedicadas a la producción de ácido fosfórico. Estas plantas son los únicos centros de producción de ácido fosfórico en España y son los mayores productores de Europa, con una producción anual que supera las 500.000 toneladas de P₂O₅. Estas fábricas generan unos dos millones de toneladas anuales de fosfoyesos que se depositan en balsas de almacenamiento anexas a la fábrica. En Huelva se genera el 2% de la producción mundial de fosfoyesos⁽¹⁰⁾.

La mayor parte de los fosfoyesos que se generan en el mundo se deposita en balsas de decantación, sin tratamiento, lo que puede representar una fuente potencial de contaminación medioambiental (suelos, agua y atmósfera)⁽¹⁸⁾. Existen por tanto grandes almacenamientos históricos de estos residuos, generalmente en zonas costeras y próximas a núcleos de población, debido a la ubicación de las plantas de producción de ácido fosfórico.

En España, durante los últimos 40 años, se han depositado alrededor de 120 Mt de fosfoyesos repartidos en unas 1200 Hectáreas en las marismas del Río Tinto, en el Estuario de Huelva. Esta situación ha creado un gran impacto visual paisajístico, por lo que resulta necesario una correcta gestión de los mismos con el fin, no solo de reducir las cantidades generadas sino también de aprovechar el potencial que tienen como material secundario⁽¹⁴⁾.

Según datos de 2010 de la US-EPA, en Estados Unidos desde la mitad de los años ochenta la producción de fosfoyesos se sitúa dentro de un rango de entre 40 y 47 millones de toneladas al año. La región de Florida Central es una de las mayores áreas productoras, estimándose que genera unos 32 millones de toneladas de fosfoyesos al año y, que posee cerca de 1000 millones de toneladas almacenadas⁽¹⁹⁾.

Según los datos recogidos en los Informes Anuales 2008 y 2009 de la empresa Fertiberia⁽¹¹⁾:

Las primeras estimaciones para la campaña agrícola 2007/08 de la Internacional Fertilizer Industry Association (IFA) indican un retroceso en el consumo de nutrientes a nivel mundial del orden del 1% respecto a la anterior campaña. Para la campaña agrícola 2008/09 el retroceso es del orden del 5% respecto a la anterior campaña. Esta disminución de la demanda de nutrientes supone un cambio de tendencia muy significativo ya que en los últimos años la tendencia al alza había sido

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

una constante. El consumo de fósforo durante 2008 y 2009 experimentó un retroceso del 5% y del 7% respectivamente.

En España, diferentes causas, principalmente climatológicas y el precio de algunos productos agrarios, condicionaron que el consumo de fertilizantes experimentara una bajada sin precedentes del 27% durante el ejercicio 2008 con respecto a 2007. En este contexto, la demanda de abonos complejos y fosfatos amónicos experimentó un importante retroceso, traduciéndose en un menor consumo y en la disminución de un 25 % en la producción de ácido fosfórico con respecto a 2007.

La situación de crisis de demanda de fertilizantes y los precios, condicionaron la producción en 2009, siendo un 11 % menor con respecto al año anterior. Así mismo, durante 2009 se procedió al cierre, en la fábrica de Huelva, de dos de las cuatro líneas de producción de ácido fosfórico y, a la disminución por consiguiente del vertido de fosfoyesos a las balsas, en ejecución de las medidas impuestas por la Administración para la eliminación progresiva de dichos vertidos.

En la siguiente tabla se muestran las producciones, en toneladas, de ácido fosfórico alcanzadas durante los años 2007, 2008 y 2009:

	AÑO 2007	AÑO 2008	AÑO 2009
Ácido fosfórico	323.355	242.310	40.327

3. VALORIZACIÓN

La Directiva comunitaria 2008/98/CE de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos, define valorización como cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general.

3.1.- PROPIEDADES ^(12, 13).

Las características de los fosfoyesos que se recogen a continuación corresponden a siete muestras procedentes de siete fábricas distintas de Florida (EE.UU).

Propiedades físicas

- Granulometría: los fosfoyesos se pueden considerar limos yesíferos, por el tamiz UNE 0.25 (ASTM 60) pasa más del 96%. El porcentaje de finos (% pasa por el tamiz UNE 0.08) está comprendido entre el 51 % y el 80%. Los tamaños inferiores a 0.01 mm, están en una proporción inferior al 10%. Según la clasificación AASHTO se corresponde con un suelo tipo A-4.
- La densidad del sólido varía entre 2,3 gr/cm³ y 2,4 gr/cm³.
- La permeabilidad sobre probetas compactadas con el Proctor modificado han dado

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

resultados comprendidos entre $9,7 \times 10^{-5}$ y $1,5 \times 10^{-5}$ cm/seg y en el caso de muestras compactas con el Proctor normal las permeabilidades han variado entre $3,5 \times 10^{-5}$ y $4,6 \times 10^{-5}$ cm/seg.

Propiedades químicas

- El contenido en yeso en seis de las siete muestras está comprendido entre 81% y el 99%.
- El pH de las disoluciones varía entre 2,5 y 5,2.

Propiedades mecánicas

- En el ensayo Proctor modificado se han obtenido densidades entre 1,44 y 1,64 gr/cm³ para unas humedades óptimas comprendidas entre 18% y 14 % y con el Proctor Normal, en muestras de fosfoyesos dihidratados la densidad máxima es de 1.47 gr/cm³ para una humedad óptima de 17%.
- La resistencia a compresión simple en muestras preparadas por compactación bajo presión estáticas está comprendida entre 3,4 N/mm² y 12,4 N/mm², no habiéndose desmoronado las muestras al saturarse. Sin embargo, muestras preparadas bajo compactación dinámica, se desmoronan en la saturación, poniendo de manifiesto la sensibilidad de este material al agua.
- De los ensayos triaxiales realizados con presiones de confinamiento bajas: 0,7; 1,4 y 2,1 kg/cm² se ha obteniendo en todos los casos una cohesión nula, y ángulos de rozamiento comprendidos entre 43,5° y 50°.
- Según los resultados obtenidos en los ensayos de placa de carga dinámicos realizados sobre una capa de fosfoyeso de 27 cm de espesor, este material no se puede considerar adecuado para capas de base en carreteras.
- La resistencia a tracción determinada sobre probetas preparadas en las condiciones del Proctor Modificado, es aproximadamente un 10% de la resistencia a compresión. En probetas preparadas por compactación estática, la resistencia a tracción varía entre el 10% y el 18 % de la resistencia a compresión.

A continuación se recoge un resumen del estudio de una muestra de fosfoyesos procedente de Huelva, realizado en el CEDEX.

Propiedades físicas

- Granulometría: más del 85% del material pasa por el tamiz 0,08, por lo que se puede considerar un limo yesífero. Si se compara la granulometría del fosfoyeso de Huelva con la de los fosfoyesos de las siete fábricas de Florida, se observa que los fosfoyesos de Huelva son más finos, e incluso por el tamiz 0,08 pasa un porcentaje (88%) superior al de aquellos.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

- Densidad: La densidad de las partículas de fosfoyeso de Huelva es de $\gamma = 2,36 \text{ gr/cm}^3$, siendo un valor intermedio entre las densidades de partículas obtenidas en las siete fábricas de Florida .
- Permeabilidad: se han realizado ensayos de permeabilidad sobre probetas preparadas con la densidad del ensayo Proctor Normal y con la densidad del ensayo Proctor Modificado. Con la densidad del ensayo Proctor Normal, el coeficiente de permeabilidad obtenido es de $k = 4,8 \times 10^{-5} \text{ cm/seg}$. Con la densidad del ensayo Proctor Modificado, se obtuvo un coeficiente de permeabilidad de $k = 2,3 \times 10^{-5}$, menor que el coeficiente obtenido con las muestras compactadas con la energía del Proctor Normal.

Propiedades químicas

- Composición química: en la siguiente tabla se muestran los elementos, resultado del análisis químico, cuyos contenidos en este tipo de material son superiores al 0,1% de peso en muestra. Los valores más altos corresponden a los componentes del yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, que son el $\text{CaO} + \text{SO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$, dando una proporción de yeso en los fosfoyesos de 93,6%. El resto está constituido fundamentalmente por los fosfatos ($\text{PO}_4^{3-} = 3\%$).

ELEMENTO	%
Al_2O_3	0,2
Ca O	32,0
Na^+	0,3
PO_4^{3-}	3,0
Si O ₂	1,0
F	0,6
Cl	0,4
SO_3	44,6
H_2O (del yeso)	17,8
TOTAL	99,9%

Tabla1: Elementos que aparecen en una proporción mayor del 0,1% en los fosfoyesos de Huelva

- Una característica interesante es el grado de acidez de los fosfoyesos, ya que el yeso aumenta su solubilidad en ambiente ácido. Los fosfoyesos de Huelva tienen un ambiente ácido $\text{pH} = 3,7$, que los sitúa en una posición intermedia entre los pH de las fábricas de Florida, pH entre 2,5 y 5,2.

Propiedades mecánicas

Las características de las muestras de los fosfoyesos compactadas se han determinado mediante la energía del Proctor Normal y la energía del Proctor Modificado.

- En el ensayo Proctor Normal realizado con la muestra de fosfoyeso, se ha obtenido la densidad máxima, $\gamma = 1,43 \text{ gr/cm}^3$ para una humedad óptima de $W = 19,1\%$. Si se comparan estos resultados con los obtenidos en las siete fábricas de Florida, los

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

fosfoyesos de Huelva tienen unos valores de densidad máxima y humedad óptima, intermedios.

- Con la energía del ensayo Proctor Modificado, se ha conseguido una densidad máxima de $\gamma = 1,56 \text{ gr/cm}^3$ con una humedad óptima de $W = 16,9\%$. Si se comparan estos resultados con los obtenidos en las siete fábricas de Florida, los fosfoyesos de Huelva alcanzan una densidad máxima alta, solamente superada por los fosfatos de una de las fábricas, concretamente de la planta de Gardinier.

Además, con los fosfoyesos españoles en el ensayo Proctor Modificado se ha conseguido una densidad máxima más alta, para una humedad óptima mayor, de las que se consiguieron con los fosfoyesos de Florida para esta energía de compactación.

- De los ensayos de compresión simple realizados, dos sobre muestras preparadas con la energía del ensayo Proctor Normal y otras dos preparadas con la energía del ensayo Proctor Modificado, se ha conseguido una resistencia a compresión simple media de $q_u = 0,147 \text{ MPa}$ ($1,47 \text{ Kg/cm}^2$), en las muestras preparadas con la energía del ensayo Proctor Normal y, en las preparadas con la energía del ensayo Proctor Modificado, se ha conseguido una resistencia a compresión simple media de $q_u = 0,340 \text{ MPa}$ ($3,40 \text{ Kg/cm}^2$), ambas ensayadas con la humedad de preparación.
- Se realizaron cuatro ensayos de compresión triaxial: dos consolidados y no drenados, y otros dos consolidados y drenados. En cada pareja de ensayos, uno se hizo con muestra compactada con la energía del ensayo del Proctor Normal, y la otra con una muestra compactada con la energía del ensayo Proctor Modificado. De los resultados de los ensayos (tabla 2) se puede deducir que el ángulo de rozamiento está comprendido entre $\varphi = 48^\circ$ y $\varphi = 54^\circ$, correspondiendo el valor más alto, a la muestra con densidad más elevada $\gamma = 1,60 \text{ gr/cm}^3$. La cohesión también está comprendida entre $C = 0,040 \text{ MPa}$ y $C = 0,067 \text{ MPa}$. En los fosfoyesos de Florida el valor máximo alcanzado en el ángulo de rozamiento fue de $\varphi = 50^\circ$, con una cohesión nula.

TIPO ENSAYO	γ gr/cm ³	W% Inic.	C MPa	φ	Tensión rotura q_u MPa		
					$\sigma_s =$ 0,05	0,15	0,30 MPa
Consolidado, no drenado	1,41	20,8	0,060	48°	1,432	1,810	1,840
Consolidado, no drenado	1,57	16	0,040	48°	2,683	3,037	4,116
Consolidado, drenado	1,43	20,7	0,067	50°	0,494	0,158	2,081
Consolidado, drenado	1,60	14,6	0,050	54°	0,473	0,477	2,578

Tabla 2: Resultado de los ensayos de compresión Triaxial con fosfoyesos de Huelva

- Deformabilidad: se realizó un ensayo edométrico con una densidad $\gamma = 1,570 \text{ gr/cm}^3$ y contenido de humedad de $w = 13,5 \%$. Hasta una presión de $\sigma' = 147,19 \text{ Kpa}$, apenas se producen asientos diferidos, pero a partir de esta presión, los asientos diferidos aumentan así como el tiempo necesario para su estabilización. Al aumentar la carga a $\sigma' = 294,30 \text{ Kpa}$ se aprecia este incremento brusco de asientos. La deformación unitaria, ϵ , producida hasta alcanzar la carga de $\sigma' = 294,30 \text{ Kpa}$, fue del 4%.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

3.2.- PROCESAMIENTO

El fosfoyeso es el subproducto obtenido directamente en la producción de ácido fosfórico sin procesamiento.

3.3. APLICACIONES

La tecnología para la utilización del fosfoyeso se ha desarrollado principalmente en países con escasos recursos naturales de yeso o escasas zonas de almacenamiento para el residuo. Japón y Austria reutilizan prácticamente el 100% del fosfoyeso. En esta reutilización es muy importante la proximidad de las industrias en donde se produzca el reproceso debido a la influencia negativa de los costes de transporte.

En general, se estima que tan solo el 15% de la producción mundial de fosfoyesos se utilizan en agricultura, en tableros de yeso y en la industria del cemento⁽¹⁸⁾. Las aplicaciones del fosfoyeso que se están empleando a nivel mundial son las siguientes:

- El 70% del fosfoyeso reprocesado, se utiliza en la fabricación de tableros de yeso. En este caso es necesario eliminar la mayoría de las impurezas solubles del fosfoyeso, ya que una pequeña cantidad de ellas afecta de manera significativa al tiempo de fraguado y a la resistencia del yeso.
- El 19% del fosfoyeso reprocesado, se utiliza en la fabricación del cemento, si bien es necesario eliminar las impurezas orgánicas, como los fosfatos, que afectan a la calidad del cemento, en particular al tiempo de fraguado y de endurecimiento. La eliminación de las impurezas se consigue a través de modificaciones de los procesos de fabricación de ácido fosfórico y procesos de limpieza suplementarios. Añadiendo entre 3% y 5% de fosfoyeso reprocesado se retrasa el tiempo de fraguado del cemento, contrarresta la retracción, proporciona un amplio desarrollo de la resistencia inicial y alta resistencia a largo plazo⁽⁹⁾.
- El 7% del fosfoyeso reprocesado se utiliza en la agricultura como nutriente, de las siguientes formas:
 - Para la recuperación de suelos salinos;
 - Para el tratamiento de suelos ácidos;
 - Para mejorar la infiltración de agua;
 - Para reducir la costra en suelos meteorizados.
- Un porcentaje muy bajo, próximo al 3% de fosfoyeso, se utilizó en la recuperación de azufre, pero actualmente no existe ningún proceso de recuperación en funcionamiento.
- De manera experimental se ha utilizado el fosfoyeso en diferentes unidades de obra en carreteras.

En el pasado, en Estados Unidos el fosfoyeso se incorporaba en la mezcla de cemento Portland para su uso en construcción de carreteras. Actualmente, el empleo de fosfoyesos para tales propósitos está prohibido bajo la resolución final de la Agencia de Protección Ambiental, editada en junio de 1992, que enmienda la 40 CFR 62 Subparte R. En general la US-EPA limita el empleo de fosfoyeso que contenga concentraciones de ²²⁶Ra superiores a 370 Bq.Kg⁻¹. Actualmente las aplicaciones aprobadas que empleen fosfoyesos, consumen una cantidad anual aproximada de

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

500.000 toneladas. Dada la enorme cantidad anual producida de fosfoyeso en Estados Unidos, más de 40 millones de toneladas, y en respuesta a la necesidad de encontrar nuevas vías de emplear este material, la US-EPA ha creado un proceso mediante el cual investigadores pueden solicitar la aprobación por parte de la Agencia de nuevos usos del fosfoyeso⁽¹⁹⁾.

En España, se le ha dado una aplicación alternativa en la agricultura como corrector de suelos salinos-sódicos en el suroeste español, aunque en cantidades no superior al 10% de la producción anual de fosfoyeso. El uso de fosfoyeso con este propósito se encuentra explícitamente autorizado en la legislación española (Real Decreto 84/2005, julio 2005)⁽¹⁴⁾.

En cuanto a la búsqueda de posibles usos y aprovechamiento en España, el grupo MAR (Medio Ambiente y Reciclado, <http://www.medioambienteyreciclado.com/index.php>), está llevando a cabo proyectos de investigación en este sentido.

Otra posible aplicación sería su empleo como material de cubierta en vertederos. El fosfoyeso podría acelerar el proceso de biodegradación de los residuos sólidos urbanos (RSU) lo que alargaría la vida útil del vertedero⁽²⁰⁾.

En el campo de la construcción uno de los posibles usos que se le podría dar sería su empleo en el núcleo de terraplenes en obras lineales.

3.3.1.- Empleo de los fosfoyesos como material para terraplenes^(12, 13)

3.3.1.1.- Características y clasificación de los fosfoyesos como materiales para terraplenes

La clasificación de los fosfoyesos como materiales para terraplenes, se realiza comparando sus características con las características exigidas a estos materiales según la clasificación recogida en las especificaciones del nuevo PG-3.

El contenido en finos de los fosfoyesos, material que pasa por el tamiz 0,063, es superior al 80%, son suelos no plásticos, con un contenido en materia orgánica menor del 2%, pero con un contenido en yeso superior al 5% y con un hinchamiento inferior al 5%. Con estas características podrían considerarse como materiales marginales, pero teniendo en cuenta su contenido en yeso, de 93,6% superior al 20%, hay que tener en cuenta lo que dice el artículo 330 del PG3 referente a suelos con yesos.

Cuando el suelo tiene un contenido en yeso entre el 5 y el 20%, su utilización se limita al núcleo del terraplén y siempre que se tomen una serie de medidas para evitar la disolución con posible producción de asientos o pérdida de resistencia.

Cuando el suelo tiene un contenido en yeso mayor del 20%, no debe utilizarse en ninguna zona del relleno. Su uso se limitará a aquellos casos en que no existan otros suelos disponibles y siempre que el mismo venga contemplado y convenientemente justificado en el Proyecto.

Por tanto, los fosfoyesos se deben clasificar dentro de éste último grupo, y su colocación como relleno se podrá realizar bajo el caso obligatorio de disminuir los almacenamientos de este material en unos lugares concretos, por condiciones medio ambientales.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

Para admitir la colocación de los fosfoyesos en el núcleo de los rellenos de carreteras, tendrá que garantizarse que no va a penetrar el agua y que la deformación a largo plazo no va a presentar problemas. La protección frente a la penetración del agua se puede conseguir ejecutando el cimientado, espaldones y coronación del terraplén, con suelos bien graduados que al compactarse garanticen esta impermeabilidad. Además, el núcleo de fosfoyeso debe ser suficientemente compacto para evitar que pueda penetrar el agua hacia su interior, disolver los sulfatos u otros minerales, y provocar inestabilidad en el propio relleno, además de contaminar las aguas del entorno. Como una protección añadida, se debe elevar el pH de los rellenos de fosfoyesos, normalmente en torno a pH = 3,5, para situarlo por encima de pH = 5, con lo cual se mantiene baja la solubilidad del sulfato cálcico dihidrato que constituye la mayor parte de los fosfoyesos. Para elevar el pH, se recomienda la mezcla con cal.

3.3.1.2. Comportamiento de terraplenes experimentales en fosfoyesos en Francia^(15, 16)

En el año 1977 se construyeron dos terraplenes de 2 m de altura en Thamenier y en Rouen. La ejecución de estos terraplenes con fosfoyesos se realizó compactando tongadas de 0,30 m de espesor, con numerosas pasadas de eficaces compactadores vibrantes. El coste de la compactación de este relleno fue el triple de lo que cuesta compactar un suelo natural.

En el año 1983 se construyó un terraplén de 3,50 m de altura en el Centro de Experimentación de Carreteras de Rouen, en las condiciones con las que se había construido el terraplén de 2 m de altura. Además, en un tramo del terraplén, el relleno se hizo tipo sándwich, alternando una capa de suelo de permeabilidad media con una capa de fosfoyeso. Para controlar la fisuración, se interpuso un geotextil entre la penúltima y la última tongada. A los taludes se les dio una pendiente de 45° en un tramo, y de 60° en otro tramo. Se hizo un seguimiento de este relleno durante tres años, del que se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Aparecieron fisuras muy finas en la capa superior de fosfoyesos, que no afectaron a la capa de rodadura
- La deformación lateral de los taludes del relleno fue de solamente algunos milímetros, no planteando problemas de estabilidad.
- Los asientos en el tramo de terraplén con capas en sándwich eran más pequeños que en el tramo en donde todas las capas eran de fosfoyeso. En el tramo de fosfoyesos, los asientos extrapolados a 10 años alcanzaban los 9 cm, (2,5% de su altura), pero uniformes, con asientos diferenciales muy pequeños, debido probablemente a la cuidada compactación de los bordes del relleno.
- El comportamiento de este relleno de 3,5 m de altura se consideró adecuado, pero debido a su elevado asiento, no se permitió su ejecución en las proximidades de las obras de fábrica.

En el año 1990 se estudió el comportamiento de un terraplén experimental de 100 m de longitud, construido en Havre, con un tramo de 5m de altura y otro tramo de 8m de altura, y con una pendiente en los taludes de 1:1 (45°).

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

Las condiciones constructivas particulares fueron las siguientes:

- El cimiento del terraplén está constituido por una capa de grava limpia de 0,30 m de espesor.
- La humedad de puesta en obra del fosfoyeso fue del 17%, que corresponde a 0,9 W_{opt} del PN.
- El terraplén se compactó en tongadas de 0,25 m de espesor, con 10 pasadas de compactadora V4 a 2,5 Km/h.

Los movimientos se controlaron topográficamente, no detectándose deformación lateral del terraplén. En el tramo de terraplén de 5 m, de altura se produjeron asientos de 5 a 7 cm (1 a 1,4%) durante el primer año y, 0 cm durante el segundo año. En el tramo de terraplén de 8 m de altura, durante el primer año se registraron 12 cm de asiento (1,5%) y, 0 cm en el segundo año. En cuanto a la erosión de los taludes, sólo se detectaron pequeños surcos, por lo que se consideró satisfactorio el comportamiento de los fosfoyesos compactados, frente a la erosión.

3.3.1.3. Recomendaciones para la utilización de los fosfoyesos de Huelva en rellenos

De acuerdo con las especificaciones del PG-3 y los resultados de los ensayos de laboratorio sobre los fosfoyesos de Huelva, en particular la densidad máxima obtenida en los ensayos Proctor, el ángulo de rozamiento obtenido mediante los ensayos triaxiales, y la deformabilidad obtenida mediante los ensayos edométricos, y teniendo en cuenta los resultados de los terraplenes experimentales ejecutados en Francia, se pueden dar algunas recomendaciones para el empleo de los fosfoyesos de Huelva:

- Los fosfoyesos se pueden utilizar solamente en el núcleo del relleno. Las paredes laterales de este núcleo tendrán una pendiente 1:1. El relleno debe de estar situado por encima del nivel de agua debido a avenidas. La altura de la zona de cimentación del terraplén debe ser suficiente para que la posible agua acumulada al pie del terraplén no alcance la base del relleno de fosfoyeso.
- Entre el núcleo de fosfoyeso y la zona de cimentación del relleno, se colocará una capa granular de grava limpia, de 30 cm de espesor, que corte la posible subida de agua capilar desde el terreno en el que se apoya el relleno.
- Los espaldones del relleno, deben tener un ancho mínimo de 2m, ser suficientemente impermeables, protegidos de la erosión superficial, y con una pendiente 3H:2V.
- El relleno de fosfoyeso debe tener como máximo una altura de 2 m.
- La altura de la zona de transición, la coronación y las otras capas del firme, situadas por encima del núcleo de fosfoyeso, no debe ser superior a 2 m.
- La densidad alcanzada con el relleno de fosfoyeso deberá ser superior al 95% de la obtenida en el ensayo Proctor Modificado.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

- La humedad de puesta en obra estará comprendida entre -2% y +1% de la óptima del Proctor Modificado. El período de construcción más adecuado será en los meses secos, normalmente de Mayo a Diciembre.
- Para fijar las condiciones de puesta en obra, se deben realizar tongadas de ensayo al comienzo de la ejecución del relleno de fosfoyeso. Una primera aproximación podría ser ejecutando tongadas de 0,25 m de espesor con 10 pasadas de compactadora.
- Debido a la deformabilidad del relleno, y al alto contenido en sulfato, no se deben construir rellenos de fosfoyesos en las proximidades de las obras de fábrica, en particular en las zonas de transición.
- El pH del fosfoyeso cuando se coloca en obra, debe ser igual o mayor que pH = 5. Para ello se estabilizará con cal.

3.4. OBRAS REALIZADAS

En España no se utiliza el fosfoyeso en ninguna aplicación. El residuo que se genera en España está almacenado en balsas de almacenamiento próximas a la empresa en Huelva.

4.-CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Los fosfoyesos vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 06 correspondiente a "Residuos de procesos químicos inorgánicos", en subapartado 06 09 correspondiente a "Residuos de la fabricación, formulación, distribución y utilización de productos químicos que contienen fósforo y de procesos químicos del fósforo".

Según comunicado de la empresa que produce los fosfoyesos en España, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía certificó que el fosfoyeso que se fabrica en Huelva no es un residuo peligroso.

De acuerdo con estas premisas, los fosfoyesos se pueden clasificar con:

- código 06 09 04: Residuos cálcicos de reacción distintos de los mencionados en el código 06 09 03.

El principal peligro medioambiental del fosfoyeso, como el de las rocas yesíferas, para su utilización en obras de carretera, es el derivado de su solubilidad, y la posibilidad que presenta de contaminación de las aguas subterráneas por infiltración. La radiactividad del fosfoyeso es muy baja.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía ha elaborado el “Plan de Calidad Ambiental de Huelva y su Entorno 2010-2015”, en el que se recoge, además de las acciones ya iniciadas, una serie de programas con nuevas actuaciones que deberán llevarse a cabo, entre las que se encuentra la clausura y restauración de las balsas de fosfoyesos. Entre los años 1999 y 2006 el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) realizó diversos estudios para el diagnóstico ambiental de la zona, con la participación además de Universidades andaluzas y Organismos Públicos de Investigación, estos estudios servirían como base para la elaboración del Plan de Calidad Ambiental de Huelva y su Entorno⁽²¹⁾.

5. NORMATIVA TÉCNICA

No existe ninguna normativa técnica referente a fosfoyeso si bien se incluye a continuación la normativa técnica española referente al yeso:

- UNE 102.001:1986 Aljez o piedra de yeso. Clasificación. Características.
- UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.
- UNE-EN 12859:2009 Paneles de yeso. Definiciones y métodos de ensayo.
- UNE-EN 520:2005+A1:2010 Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- UNE-EN 13279-2:2006 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
- UNE 102.032:1984 Yesos y escayolas de construcción. Métodos de análisis químico.
- UNE-EN 520:2005+A1:2010 Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- NTE-RPG-1974 Norma Tecnológica de la Edificación. Revestimientos de paredes: Guarnecidos y enlucidos.
- NTE-PTP-1975 Norma Tecnológica de la Edificación. Particiones: Tabiques de placas y paneles.

6. REFERENCIAS

- [1] ANDERSON, NEIL R., “ Gypsum Aggregate - A Viable Commercial Venture”, Proceedings of the Second International Symposium on Phosphogypsum, Volume II. The Florida Institute of Phosphate Research, January, 1988. pp. 329-352.
- [2] CARMICHAEL, JACK B., “Utilization of the Phosphogypsum Produced in the Fertilizer Industry”. Vienna: United Nations Industrial Development Organization, May, 1985. pp. 63.
- [3] ERLNSTADT, GUNTER, “ Upgrading of Phosphogypsum for the Constrution Industry”. Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum. The Florida Institute of Phosphate Research, November, 1980. pp. 284-293.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

- [4] HO, ROBERTK. H. AND ZIMPFER,(May, 1985). "Comments on the Investigation of Phosphogypsum for Embankment Construction". Proceeding of the Second Workshop on By-Products of Phosphate Industries. The Florida Institute of Phosphate Research, May, 1985. pp. 182-213.
- [5] LIN K., FIGUEROA, J. L. AND CHANG, WEN,(May, 1985). "Engineering Properties of Phosphogypsum". Proceeding of the Second Workshop on By-Products of Phosphate Industries. The Florida Institute of Phosphate Research, May, 1985. pp. 49-59.
- [6] SAYLAK D., GADALLA, A., AND YUNG C., "Neutralization and Stabilization of Phosphogypsum for Road Constrution." Proceedings of the Third Wokshop on By-Products of Phosphate Industries. The Florida Institute of Phosphate Research, November, 1986. pp. 315-338.
- [7] WU, XIADONG, " A Study of the Radiation Problems Associated with Phosphogypsum Based Building Materials." Master´s Thesis, University of Miami, Coral Gables, Florida, July 1988. pp. 87.
- [8] WEN F. CHANG, Ph. D., P.E. "Engineering propierties and construction applications of phosphogypsum." University of Miami, Florida, 1999.
- [9] CEDEX. Informe "Utilización de los fosfoyesos en rellenos de obra. Estado del arte", para la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente. Marzo 2008.
- [10] [Romero García, R. E.](#) "Fosfoyesos de Huelva: ni son residuos ni son radiactivos". Libro. Ed.: Principia Creativos y Comunicación. 136p. 2009.
- [11] Informe anual 2008 y 2009 de Fertiberia:
http://www.fertiberia.es/imagenes/Archivos/HUELVA_ESP.pdf
<http://www.fertiberia.es/imagenes/Archivos/FERTIBERIA%20INFORME%20ANUAL%202009%20ESP.pdf>
<http://www.fertiberia.es/imagenes/Archivos/FERTIBERIA%20INFORME%20ANUAL%202008%20ESP.pdf>
- [12] CEDEX. Informe no publicado "Utilización de los fosfoyesos en rellenos de obra. Condiciones para la utilización de los fosfoyesos en terraplenes", para la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente. Diciembre 2008.
- [13] DAPENA GARCÍA, E.; PARDO DE SANTAYANA, F.; DÍAZ FLORES, E. "Characteristics of phophogypsum for utisation in roadwork fills", Laboratorio de Geotecnia, CEDEX. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Egipto 2009. pp. 116-119.
- [14] BOLIVAR, J.P.; GARCÍA-TENORIO, R. "Residuos producidos por industrias NORM: impacto radiológico y gestión" XI Congreso Nacional de la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR). Tarragona 2007.
- [15] FEVRE, M. et QUIBEL, M., "Utilisation des Gypses Residuaires en Terrassements". Ecole Nationale des Ponts et Chaussees. 1998.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2010
FOSFOYESO		

- [16] QUIBEL, M., 1998, Experimentation de L'Utilisation en Remblais Routiers du Gypse de Synthèse Thann et Mulhouse (Le Havre) Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (24 an 26 mars 1998).
- [17] BOLIVAR, J.P.; GARCÍA-TENORIO, R.; MATARRANZ, J.L. "Evaluación radiológica del apilamiento de fosfoyesos de las marismas del río Tinto (Huelva)". Alfa, Revista de seguridad nuclear y protección radiológica, editada por el CSN. Nº 1, I trimestre de 2008. p. 39-45.
- [18] TAYIBI, H.; GASCÓ, C.; NAVARRO, N.; LÓPEZ-DELAGADO, F.J.; LÓPEZ, F.A. "The radiological impact and restrictions on phosphogypsum waste applications". 1st Spanish Conference on Advances in Materials Recycling and Eco-Energy. Madrid 2009. p. 71-74.
- [19] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: <http://www.epa.gov/>
- [20] GÁZQUEZ, M.J., BOLÍVAR, J.P., GARCÍA-TENORIO, R., GALÁN, F. "Natural occurring radionuclide waste in Spain: the Huelva phosphogypsum stacks case". 1st Spanish Conference on Advances in Materials Recycling and Eco-Energy. Madrid 2009. pp. 75-78.
- [21] Junta de Andalucía. Plan de Calidad Ambiental de Huelva y su Entorno 2010-2015: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas_ambientales/planificacion_ambiental/Planes/Prevencion_y_calidad_ambiental/plan_calidad_huelva_2010_15/documento_pcahe2010_2015.pdf

7. ENTIDADES DE CONTACTO

- FERTIBERIA, S.A.

Torre Espacio
Paseo de la Castellana, 259-D. Planta 48
28046-Madrid
Tel.: 91 586 62 00
Fax: 91 586 62 22
E-mail: fertiberia@fertiberia.es
www.fertiberia.es

- Fábrica de HUELVA

Avda. Francisco Montenegro, s/n
21001-HUELVA
Tel.: 959 28 12 11
Fax: 959 26 36 04

- Consejerías de Medio Ambiente por Comunidades Autónomas
http://www.i19.es/index_archivos/Page1239.htm