

**SOLFATO
DE CALCIO**

RESUMEN DE LA

ULLMANN'S ENCYCLOPEDIA OF

INDUSTRIAL CHEMISTRY

VOLUMEN A 4

5ª EDICION

VCH Verlagsgesellschaft mbH
D-69451 Weinheim, Germany 1985

SULFATO DE CALCIO

por el D.Franz Wirsching
Gebrüder Knauf Westdeutsche Gipswerke, Iphofen, RFA.

Traducción : M^a Carmen Díez Reyes

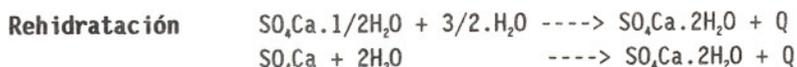
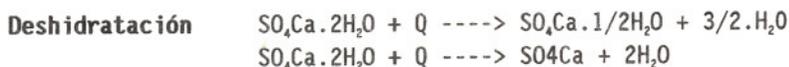
SUMARIO

0	INTRODUCCION
1	EL SISTEMA SULFATO DE CALCIO - AGUA
1.1	Fases
1.2	Síntesis de laboratorio
1.3	Deshidratación industrial del yeso
1.4	Aspectos energéticos
1.5	Estructura, compuestos mixtos, solubilidad
2	MATERIAS PRIMAS
2.1	Aljez y piedra de anhidrita
2.2	Desulfoyeso
2.3	Fosfoyeso
2.4	Fluoranhidrita
2.5	Yeso procedente de otros productos
3	FABRICACION
3.1	De aljez a yeso calcinado
3.2	De subproductos a base de sulfato de calcio a yeso calcinado
3.2.1	<i>Semhidrato B y yeso multifásico</i>
3.2.2	<i>Semhidrato α</i>
3.3	Anhidrita
4.	USO Y PROPIEDADES DEL YESO Y DE LA ANHIDRITA
4.1	Hidratación, fraguado y endurecimiento
4.2	Prefabricados a base de yeso
4.3	Yeso de construcción
4.4	Otros usos
4.5	Propiedades de los elementos a base de yeso instalados in situ
5.	MÉTODOS DE ENSAYO
5.1	Normas
5.2	Ensayos
5.3	Análisis químico
5.4	Análisis de fases
6.	ASPECTOS ECONÓMICOS
ANEXO 1	TABLAS
ANEXO 2	FIGURAS

0. INTRODUCCION

Tanto el aljez, ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), como la anhidrita natural (SO_4Ca), están ampliamente distribuidos en la corteza terrestre; únicamente no se encuentran en las zonas volcánicas. Además, se obtienen grandes cantidades de yeso y de anhidrita como subproductos de procesos industriales cuando se desulfuran los gases procedentes de las centrales eléctricas o cuando las sales de calcio reaccionan con ácido sulfúrico. En estos casos, el sulfato cálcico obtenido es normalmente un polvo fino y húmedo.

El yeso es un buen material de construcción, porque cuando se calienta pierde rápidamente su agua de hidratación, produciendo yeso calcinado, deshidratado parcial o totalmente, que recupera su estructura cristalina cuando se hidrata, fraguando y endureciendo (reacción inversa).



Estos dos procesos, deshidratación y rehidratación, son la base de la tecnología del yeso.

La densidad aparente del sulfato cálcico rehidratado es bastante menor (0.5 t/m^3) que la densidad de la piedra de sulfato de calcio ($2,3 \text{ t/m}^3$)

Ni el aljez ni la anhidrita natural son tóxicos.

A través de los siglos, la industria del yeso se ha desarrollado de forma paralela a la de la cal. Hasta el siglo XVIII, las fronteras entre ambos materiales permanecieron muy oscuras.

Las investigaciones sobre el origen de la tecnología del aljez, empezaron en 1765 con LAVOISIER y han continuado hasta la fecha.

De todas formas, un oficio tan firmemente basado en la tradición era reacio a aceptar conclusiones científicas, y sólo en las últimas décadas la fabricación de aljez se ha convertido en una industria moderna.

1. EL SISTEMA $\text{SO}_4\text{Ca} - \text{H}_2\text{O}$

1.1 Fases

El sistema $\text{SO}_4\text{Ca} - \text{H}_2\text{O}$ se caracteriza por 5 fases sólidas; cuatro de ellas existen a la temperatura ambiente: sulfato de calcio dihidratado, sulfato de calcio semhidrato (o hemidrato), anhidrita III y anhidrita II; la quinta fase sólo existe por encima de los 1.180°C y no se ha demostrado la posibilidad de producirla de una forma estable a menor temperatura. La TABLA 1 especifica las fases del sistema $\text{SO}_4\text{Ca} - \text{H}_2\text{O}$. Sólo las primeras cuatro fases son de interés para la industria del yeso.

El sulfato cálcico dihidrato ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es tanto el material inicial antes de la deshidratación, como el producto final después de la rehidratación. El sulfato cálcico hemidrato ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), aparece en dos formas distintas: α y β , representando dos estados cristalinos. Se diferencian entre ellos por sus características en la aplicación, por sus calores de hidratación y por sus métodos de preparación (ver TABLA 6). El semhidrato α está formado por grandes partículas primarias compactas, bien formadas y transparentes; el semhidrato β se caracteriza por estar formado por partículas secundarias escamosas y rugosas que se agrupan formando cristales muy pequeños.

LEHMANN y otros, postularon la existencia de tres estados límites para la anhidrita III (A III), también conocida como anhidrita soluble: A III β , A III β' , y A III α . Los tres estados de la A III fueron caracterizados por medio de análisis con Rayos X, análisis térmico diferencial, microscopía electrónica de barrido por Scanner, porosimetría mercuríca y medida de la superficie específica. La anhidrita II (A II) es la fase que existe en la naturaleza y también la obtenida por la calcinación de un dihidrato y de una anhidrita III a altas temperaturas. Las propiedades físicas más importantes de las fases del sulfato de calcio se indican en la TABLA 2.

1.2 Síntesis de laboratorio

Los rangos de estabilidad termodinámica para las fases del sulfato de calcio aparecen en la TABLA 1. Por debajo de los 40°C , y en condiciones atmosféricas normales, sólo es estable el sulfato cálcico dihidratado; las otras fases son obtenidas a temperaturas más altas por la progresiva deshidratación del dihidrato de calcio, en el siguiente orden:

Dihidrato ----> Semhidrato ----> Anhidrita III ----> Anhidrita II.

En condiciones atmosféricas normales, el semhidrato y la anhidrita III son metaestables, y por debajo de 40 °C, en presencia de agua o vapor de agua se convierten en dihidrato; lo mismo ocurre con la anhidrita II; de todas formas, entre 40 °C y 1.180 °C, la anhidrita II es estable.

Para sintetizar fases puras en laboratorio, se parte de un semhidrato β obtenido calentando entre 45 °C y 200 °C el dihidrato bajo presión de vapor de agua, es decir, en aire seco o en vacío. Un calentamiento más homogéneo a 50 °C en vacío, o hasta 200 °C a presión atmosférica, produce anhidrita III β .

Con una presión parcial de vapor de agua pequeña, si hay una eliminación rápida del vapor de agua desprendido y si el tamaño de partícula es pequeño, se forma directamente anhidrita III' β , sin formación intermedia de semhidrato. La superficie específica de esta anhidrita puede ser hasta diez veces superior a la de la A III β .

El semhidrato α se obtiene a partir del dihidrato con una presión parcial de vapor de agua elevada; por ejemplo, por encima de 45 °C en soluciones ácidas o salinas, o por encima de 97,2 °C en agua bajo presión. Una eliminación cuidadosa del agua a 50 °C en vacío, o a 100 °C a presión atmosférica, produce anhidrita III α .

La anhidrita III presenta dificultades para ser preparada de manera pura porque por encima de los 100 °C, empieza a formarse anhidrita II y entonces la anhidrita III reacciona inmediatamente con el vapor de agua para formar semhidrato.

El semhidrato β obtenido a partir de la anhidrita III β y el obtenido a partir de la anhidrita III' β difieren en sus propiedades físicas; por consiguiente, los semhidratos procedentes de la anhidrita III' β deberían ser designados como semhidratos' β . La anhidrita III α absorbe el vapor de agua para formar semhidrato α . Además, el semhidrato en contacto con la humedad absorbe, de forma reversible, hasta un 2 % de su peso en agua sin convertirse en dihidrato. Este agua no estequiométrica del semhidrato, puede ser eliminada completamente secando a 40 °C.

La anhidrita II se forma entre los 200 °C y los 1.180 °C. Por encima de 1.180 °C se forma la anhidrita I; por debajo de 1.180 °C se convierte en anhidrita II.

La cinética de la deshidratación del dihidrato en contacto con soluciones acuosas o con una fase gaseosa sustenta estos procesos reactivos. De todas formas, las hipótesis relativas a los mecanismos de reacción en la fase gaseosa aún no han sido consistentemente demostradas, debido a que la cinética de los cambios de fase está a menudo inhibida, y a que las condiciones de ensayo no han sido definidas con precisión.

1.3 Deshidratación industrial del aljez.

Industrialmente, es de suma importancia que la deshidratación se consiga en el más corto período de tiempo con el menor consumo de energía, de forma que los costos sean reducidos al mínimo. A causa de los problemas cinéticos, la calcinación se realiza a temperaturas mucho más altas que las usadas en laboratorio (TABLA 1). Es difícil producir fases puras durante la fabricación. Se suelen obtener mezclas de fases del sistema SO_4Ca . Se obtienen tres tipos de A II calcinada, dependiendo de la temperatura de cocción y del tiempo:

- 1.- A II-s (Anhidrita ligeramente soluble), producida entre 300 °C y 500 °C.
- 2.- A II-u (Anhidrita insoluble), producida entre 500 °C y 700 °C.
- 3.- A II-E (Anhidrita disociada parcialmente), yeso ESTRICHGIPS, producida por encima de los 700 °C.

En la práctica, la diferencia entre estos productos radica en el tiempo de rehidratación con agua, que para la A II-s es rápido, para la A II-u lento, y para la A II-E es un término medio, un poco más rápido que el de la A II-u (Fig. 6). Es muy posible la transición entre estos diferentes estadios de reacción .

La A II-E está formada por una mezcla sólida de A II y CaO (óxido de calcio), procedente de la disociación parcial de la anhidrita a trióxido de azufre y óxido de calcio, cuando el aljez se calcina por encima de los 700 °C. La presencia de impurezas rebaja la temperatura normal de disociación de la anhidrita II, que es aproximadamente de 1.450 °C.

1.4 Aspectos energéticos.

Kelly y otros realizaron un profundo estudio de las propiedades termodinámicas del sistema $SO_4Ca.H_2O$. Las TABLAS 3 y 4 indican los calores de hidratación y deshidratación de las distintas fases, que tienen importancia industrial.

1.5 Estructura, compuestos mixtos, solubilidad.

Estructura del cristal

La estructura cristalina del sulfato de calcio está formada por cadenas alternadas de iones Ca^{2+} e iones SO_4^{2-} tetraédricos. La mayor parte de estas cadenas de SO_4Ca permanecen intactas durante los cambios de fase.

En el sulfato de calcio dihidrato, el agua de cristalización está incrustada entre las capas, formando una red de mallas que permite una fácil rotura entre ellas. Cuando el sulfato de calcio dihidrato se deshidrata para formar el semhidrato, su volumen disminuye y aparecen amplios canales paralelos a la cadena SO_4Ca . En algunas posiciones definidas en estos canales el agua de cristalización está poco unida. Este agua puede escapar con relativa facilidad, lo que explica su fácil conversión en A III.

La A II es la que presenta los iones de sulfato de calcio de forma más comprimida y densa. Sin embargo, dado que tiene pocos canales, reacciona muy lentamente con el agua.

Isomorfismo

La incorporación isomórfica de los componentes químicos en la red de las fases de $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot\text{H}_2\text{O}$, es interesante en el caso de que la materia prima proceda de la desulfuración de los gases o de la obtención por vía húmeda del ácido fosfórico. La incorporación isomórfica del hidrogenofosfato de calcio dihidratado se produce porque el $\text{CaHPO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, tiene espacios de redes muy similares a los del sistema $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. El fosfato monosódico, NaH_2PO_4 , también puede ser incorporado a la red del aljez. KITCHEN y otros consideran posible el isomorfismo entre los iones AlF_6^{3-} y SO_4^{2-} . EIPeltauer, informa de la existencia de un isomorfismo más destacado, consistente en la incorporación del anión FPO_3^{2-} y del ión Na^+ inferior al 0.2 % en la malla del semhidrato, pero sólo 0.02 % en la malla del dihidrato. Los cloruros no pueden ser incorporados.

Dobles y triples sales

El yeso forma sales dobles con los metales alcalinos o con el sulfato amónico; algunas de éstas están presentes en la naturaleza, como la singenita, $\text{CaSO}_4\cdot\text{K}_2\text{SO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$.

Hay sulfatos triples de calcio con iones divalentes tales como hierro, zinc, manganeso, cobre y magnesio, junto con iones alcalinos e incluso con amonio. Un ejemplo puede ser la polihalita, que aparece en algunos depósitos de la naturaleza.

La etringita, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 32\text{H}_2\text{O}$, tiene gran importancia cuando se usa el yeso en la industria del cemento, lo mismo que la singenita y la tomasita.

Adiciones

El sulfato de calcio dihidrato puede combinarse con cuatro moléculas de urea para formar compuestos de adición.

Solubilidad

El aljez es ligeramente soluble en el agua (ver TABLA 2). La solubilidad de las distintas formas del sulfato de calcio está fuertemente afectada por la presencia de otros solutos. Existen en la bibliografía datos sobre la solubilidad del aljez en ácidos, especialmente en ácido sulfúrico, ácido fosfórico y ácido nítrico. El aljez es inmediatamente soluble en glicerol, en soluciones de azúcar y en soluciones acuosas de agentes gelatinosos, como por ejemplo en EDTA

2 MATERIAS PRIMAS

2.1 El aljez y la piedra de anhidrita (anhidrita natural).

Los depósitos de aljez y de anhidrita se encuentran en varios países. Se originaron como consecuencia de soluciones acuosas sobresaturadas en mares pocos profundos, cuyas aguas se evaporaron, depositando, en primer lugar los carbonatos, en segundo lugar los sulfatos y finalmente los cloruros, esto es en función de su progresiva solubilidad.

Aparece en formaciones de la época triásica y terciaria. El aljez en España corresponde a depósitos terciarios del Eoceno, el de Francia pertenece al período Oligocénico y al Miocénico.

La opinión más aceptada es la de que el aljez, $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot\text{H}_2\text{O}$, se forma a partir de una cristalización inicial. Los depósitos más conocidos de aljez primario son los de la región de París y de las áreas del Mediterráneo. Debido a aumentos de presión y temperatura, la anhidrita natural podría haberse desarrollado localmente a partir del aljez original. Sin embargo la presencia de agua en la superficie puede reconvertir la anhidrita en aljez. Este aljez es por consiguiente una roca secundaria, especialmente en formaciones anteriores a la era terciaria media.

Los distintos depósitos de aljez y de anhidrita natural difieren en dureza, estructura y color. Las mayores impurezas son el carbonato de calcio (piedra caliza), dolomita, margas, arcillas; son menos frecuentes la sílice, el betún, la glouberita, la singenita y la paliholita. Cuando estas impurezas están presentes en el aljez y en la anhidrita natural desde su formación se llaman "impurezas primarias". Se establece una distinción entre los depósitos de

carbonatos - sulfatos, principalmente localizados en el Perniano alto y los depósitos de arcilla - sulfatos, que predominan en el Triásico. Las impurezas secundarias se forman mediante el contacto con materiales incrustados en las grietas y en las cavidades de la roca, pero también pueden aparecer como material de desecho durante la extracción. El aljez es soluble en agua, y por consiguiente la piedra de aljez es lixiviada por el agua de la superficie. La composición química de algunos sulfatos de calcio se indican en la TABLA 5.

El aljez y la piedra de anhidrita natural son muy distintos estructuralmente.

Las variedades más importantes de aljez natural son: aljez espatado, también llamado espato de aljez escamoso (selenita), aljez fibroso, alabastro, aljez granular, piedra de aljez (aljez común), aljez compacto, aljez pórfido, aljez de tierra (gypsita en los Estados Unidos) y arena de aljez contaminado con la sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). La anhidrita, siempre cristalina, puede ser espatada (espato de anhidrita) de grano grueso o incluso en forma de barra.

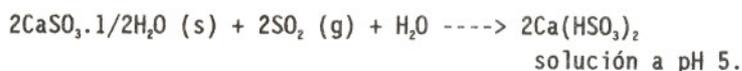
El aljez puede ser de color blanco puro. Si contiene óxido de hierro, varía de un rojizo a un amarillento. Si la arcilla y/o el betún están presentes, varía del gris al negro. La anhidrita natural muy pura es de un blanco azulado, pero usualmente es gris con un matiz azul. Las vetas blancas que a veces se encuentran en la frontera entre el aljez y la anhidrita natural son principalmente de glauberita ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$) o sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

2.2 Yeso de desulfuración.

El llamado yeso de desulfuración se obtiene por la desulfuración de los gases de combustión de suelos fósiles (combustibles de origen orgánico): antracita, carbón bituminoso y aceite, en grandes plantas de combustión, especialmente en centrales eléctricas. Se han desarrollado numerosos procesos, aunque sólo unos pocos han sido utilizados en la industria. Prácticamente todos operan por lavado a contracorriente, limpiando el gas de la combustión con suspensiones acuosas de piedra de cal o de óxido de calcio para eliminar el dióxido de azufre. Esta reacción que tiene lugar a un pH comprendido entre 7 y 8, produce un sulfito de calcio casi insoluble: $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$.



En una segunda fase el pH puede rebajarse a menos de 5, de tal modo que el sulfito de calcio en suspensión, se convierte en un bisulfito de calcio soluble $\text{Ca}(\text{SO}_3\text{H})_2$:



Este bisulfito de calcio se óxida fácilmente con el oxígeno atmosférico y se convierte en sulfato de calcio dihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ llamado yeso de desulfuración o desulfoyeso.



El ácido sulfúrico reacciona con el resto de la cal formando también un sulfato de calcio.



Se forman grandes cristales compactos de dihidrato que se separan de la suspensión acuosa mediante hidrociclones y filtros o centrifugadoras de vacío. El producto obtenido es un polvo húmedo, fino y extremadamente puro con un contenido en agua libre inferior al 10 %. La reacción es:



Se obtienen alrededor de 5.4 toneladas de sulfato de calcio dihidrato por cada tonelada de azufre del fuel.

En 1983, Japón produjo aproximadamente 2.5 Mt/a de desulfoyeso de combustión; la República Federal Alemana y los Estados Unidos 0.3 Mt/a cada uno. En Alemania y en los Estados Unidos, esta cantidad se incrementará considerablemente a consecuencia de la creciente protección medio ambiental. Hacia 1995 el total de desulfoyeso procedente de la combustión producido en la República Federal Alemana deberá ser de 3 Mt/a. Las medidas de protección medioambiental cada vez más severas, en este caso, la recuperación y el reciclaje del azufre en forma de sulfato de calcio, han propiciado el uso de este sulfato de calcio como materia prima para la industria yesera. El desulfoyeso tiene un alto porcentaje en sulfato de calcio y un color blanco casi puro (TABLA 5). Tanto su finura como su estructura cristalina, son importantes para determinar su empleo en la industria del yeso.

Algunas pequeñas cantidades se usan en la industria del cemento. El resto del desulfuroso se consume en la industria del yeso.

2.3 Fosfoyeso

La cantidad más importante de fosfoyeso procede de la industria del ácido fosfórico, mediante el tratamiento por vía húmeda de la fosforita o fluorapatita con ácido sulfúrico ($n \times M_r$):



En el mundo se producen normalmente 120-130 Mt/a de fosfoyeso, y se espera que esta producción se incremente debido al aumento de la producción de fertilizantes a base de fosfato.

El fosfoyeso es un polvo fino y húmedo con un contenido en agua de aproximadamente 20-30 %, e importantes contenidos de impurezas, que dependen del origen de la roca y del proceso de fabricación. Se producen alrededor de 1.7 toneladas de sulfato de calcio por cada tonelada de fosfato crudo, lo que equivale a unas 5 toneladas de sulfato de calcio por cada tonelada producida de pentóxido de fósforo.

Normalmente sólo se utiliza el 4 % de fosfoyeso producido debido a su alto porcentaje en agua y en impurezas.

Es más barato usar aljez natural que purificar y procesar el fosfoyeso. La cantidad de fosfoyeso producido cada año excede con mucho la demanda anual mundial del aljez natural y de anhidrita (aproximadamente de 75 Mt).

2.4 Fluoranhidrita

La fluoranhidrita es un subproducto obtenido en la fabricación de ácido fluorhídrico a partir del espato de flúor y ácido sulfúrico:



Una tonelada de espato de flúor produce 1.75 Tm de anhidrita. Este subproducto se usa como materia prima en la República Federal Alemana.

2.5 Yeso procedente de otros productos

El sulfato de calcio dihidrato se forma en pequeñas cantidades en la fabricación de ácidos orgánicos (ácido tartárico, cítrico, oxálico) o ácidos inorgánicos como el ácido bórico. Todos estos ácidos se producen por la reacción de su sal de calcio con el ácido sulfúrico.

Se cree que la cantidad de subproductos industriales se verá incrementada debido al tratamiento de aguas residuales que contienen sulfatos y a la neutralización de los ácidos sulfúricos diluidos, producidos en los procesos de extracción de minerales, (mineral de zinc) y en la fabricación de pigmentos (dióxido de titanio). Aunque en estos procesos se produce gran cantidad de sulfato de calcio, no es probable que se extienda su utilización.

Los residuos de sulfato de calcio procedentes de la industria cerámica y de las fundiciones de metal, tampoco han sido utilizados como materia prima por la industria del yeso, aunque se continúa investigando en esa dirección. Las cantidades son pequeñas y el tratamiento es muy costoso a causa de las impurezas.

3 FABRICACION

Aunque se conocen múltiples procesos industriales para la obtención del yeso, sólo unos pocos se utilizan en los países industrializados.

En este capítulo sólo se discuten los procesos caracterizados por los bajos costes de capital, operatividad, diseño, fácil manipulación, instrumental robusto y de larga duración, y obtención de una materia prima uniforme que se usa posteriormente para la fabricación del yeso.

La fabricación del yeso a partir del aljez (yeso de origen natural) y la fabricación de yeso a partir del desulfoyeso se tratan en capítulos diferentes.

3.1 De sulfato de calcio de origen natural "aljez" a yeso calcinado

El aljez (sulfato de calcio de origen natural) se extrae de canteras a cielo abierto y de canteras subterráneas. La extracción del aljez se realiza principalmente mediante perforación y voladura a uno o más niveles. En minería profunda se hace explosión de cámara. La piedra barrenada se presenta en grandes bloques que contienen entre un 0 % y un 3 % de humedad (agua de cantera).

Las cantidades necesarias de explosivos son aproximadamente de 250 g/t para minería de cantera y de 400 g/t para minería subterránea. La piedra se transporta a las plantas de trituración, normalmente en la propia fábrica de yeso, mediante cintas transportadoras.

Para la reducción del tamaño de la piedra, se utilizan machacadoras de impacto o de mandíbulas y trituradoras de rodillo simple con tamiz y retorno. Las machacadoras de impacto o molinos de rodillos se usan para la reducción a tamaño intermedio, y los molinos de martillos o molinos pendulares se usan para obtener los tamaños de partícula más pequeños. El tamaño del grano viene determinado por el sistema de calcinación o por el uso final a que vaya destinado el yeso fabricado:

Horno rotatorio	0 - 25 mm.
Marmita	0 - 2 mm.
Marmita con unidad de secado y molino combinado	0 - 0,2 mm.
Horno transportador	4 - 60 mm.
Aljez y anhidrita natural para cemento	5 - 50 mm.

Cuando se transporta por barco o avión a fábricas distantes, el aljez se reduce al tamaño requerido para su posterior tratamiento antes de su transporte.

No se suele lavar la piedra de la voladura, excepto cuando tiene núcleos de glauberita, la cual se elimina rápidamente por medio de la lixiviación con agua. Este sistema aún se practica en Gran Bretaña.

A menudo la piedra extraída y triturada es homogeneizada antes de ser calcinada. Esto se hace en plantas homogeneizadoras cuya capacidad de homogeneización corresponde a la producción de aproximadamente una semana.

La etapa final de la extracción del aljez es la restauración del emplazamiento de la cantera y su reinclusión en el medio ambiente del área.

Yesos semhidratos beta

Cuando la materia prima es el aljez, sulfato de calcio de origen natural, el yeso semihidratado y la escayola se obtienen por calcinación en seco a temperaturas entre 120 °C y 180 °C, bien en hornos rotatorios con fuego directo o bien en marmitas con fuego indirecto. Las marmitas pueden ser verticales u horizontales.

El horno rotatorio (con capacidad de hasta 600 toneladas/día), está particularmente indicado para la calcinación de la piedra de aljez granulado (0-25 mm). Esta, sin presecado, es alimentada continuamente al horno en contracorriente con los gases calientes mediante un alimentador de cinta por peso, y una compuerta de rueda celular alveolar (Ver Fig.1).

Los gases calientes se producen en una cámara de combustión de ladrillo, y están alineados con la zona de alimentación del aljez.

El exterior del horno no es de ladrillo, sino que consiste en gruesas chapas de acero que garantizan una distribución uniforme de las partículas de aljez a lo largo de la sección transversal del horno.

Se consigue una eficiencia térmica elevada debido a la transferencia directa de calor de los gases calientes al aljez. El tiempo de permanencia de la piedra de aljez en el horno está autorregulado. Este se incrementa con el tamaño de partícula, aunque se puede conseguir una calcinación completa sin que influya el tamaño de las partículas, obteniéndose un semhidrato β de calidad uniforme y propiedades homogéneas, tras su molido. El crudo no deshidratado es recogido en el silo de almacenamiento y añadido en pequeñas cantidades al yeso calcinado. Las plantas de hornos rotatorios están totalmente automatizadas y pueden ser controladas generalmente por un solo operario.

La marmita calentada por el exterior cuya capacidad es inferior a 20 toneladas, es la primera de una serie de unidades de calcinación similares calentadas indirectamente. El aljez es presecado y molido hasta un tamaño de partícula inferior a 2 mm. En las centrales modernas se combina la molienda con el presecado. Este proceso se lleva a cabo en unidades de secado - molienda, obteniéndose partículas de tamaño inferior a 0,2 mm (molino Raimond, molino Klaudius Peters, Attritor). Las propiedades del semhidrato se indican en la TABLA 6. Las fases del yeso se indican en la TABLA 7.

En los años sesenta, el procedimiento de cocción en marmita se mejoró y se hizo continuo, especialmente en Gran Bretaña (British Plaster Board LTD) y en América del Norte. El aljez presecado y finamente molido se alimenta de forma continua por la parte superior. Al deshidratarse, el crudo queda en el fondo, y el agua se evapora manteniéndose el crudo en lecho fluidizado. El aljez calcinado se deposita en el fondo de la marmita, de donde continuamente es descargado a través de una boca conectada a un lado de la misma.

La Fig. 2 muestra un diagrama de flujo para este tipo de planta. El balance térmico no es tan bueno como en el caso de hornos rotatorios de fuego directo, pero los gases residuales contienen menos finos. En este tipo de planta se pueden producir hasta 300 toneladas/día de semhidrato.

Recientemente se ha iniciado el método de combustión indirecta que consiste en una transmisión indirecta del calor de la doble cámara de la caldera exteriormente calentada, combinada con una transmisión directa del calor; sus ventajas son: alta eficiencia térmica y bajo consumo de energía.

Actualmente se están ensayando las marmitas calentadas sólo por combustión indirecta. Estos sistemas pueden producir hasta 500 t/d de semhidrato beta. A las marmitas existentes se les pueden adaptar quemadores de combustión directos, lo que reduce el consumo de energía e incrementa la proporción de flujo. La Fig. 3 muestra una marmita con un quemador de este tipo, diseñado para operaciones en continuo.

En Francia son muy populares las marmitas horizontales con capacidad de 5 a 10 t/h. Se conocen con el nombre de marmita BEAU.

Prácticamente el total de la producción de semhidrato beta se lleva a cabo en los tipos de plantas aquí descritos. Actualmente, en América del Norte se usan tanto las marmitas calentadas indirectamente como los hornos rotatorios calentados directamente, mientras que antiguamente sólo se usaba la marmita.

En el Reino Unido, se usa mucho la marmita de fuego indirecto; en Francia la marmita horizontal y en Alemania el horno rotatorio.

La mayor parte del semhidrato B o escayola producido se usa para los materiales de construcción (TABLA 5).

Existen otros procedimientos de calcinación para la fabricación del semhidrato B que sólo se han usado ocasionalmente en la industria. En el proceso de calcinación y molido, el aljez crudo es triturado y calcinado de forma continua en una unidad simple (Claudius Peters).

Algunas plantas producen semhidrato B y a veces también yeso multifásico en lecho fluidizado: la piedra de aljez secada y finamente molida es calcinada a contracorriente con los gases calientes (THYSSEN-RHEINSTAHL).

Otro método es el de la marmita horizontal calentada indirectamente que trabaja en continuo. Externamente se parece a un horno rotatorio. En este sistema los gases calientes pasan primero a través de un tubo central en flujo concurrente y luego a través de otros tubos calentadores a contracorriente. Similar a este sistema es la unidad calcinadora HOLOFLITE, también continua, que utiliza aceite caliente o vapor sobrecalentado como intercambiador de calor. En este caso el aljez es transportado por una cinta sinfín que tiene aceite caliente en su interior.

Yesos anhidros y yesos multifásicos.

Los yesos sobrecocidos se obtienen mediante procedimientos de calcinación en seco a temperaturas comprendidas entre 300 °C y 900 °C, obteniéndose principalmente anhidrita calcinada.

La reacción transcurre en tres etapas:

- 1) AII-s: Anhidrita ligeramente soluble, a temperaturas inferiores a 500 °C.
- 2) AII-u: Anhidrita insoluble, a temperaturas comprendidas entre 500-700 °C.
- 3) AII-E: Anhidrita Estringips, a temperaturas superiores a 700 °C.

Las propiedades y la composición del yeso una vez calcinado se indican en las TABLAS 6 y 7.

En el yeso sobrecocido y también en el yeso multifásico estos tres tipos de anhidrita aparecen en una proporción definida, que viene determinada tanto por el tipo de materia prima como por el proceso de calcinación. En algunos de estos procesos el crudo es calcinado de tal manera que la fase de anhidrita se obtiene al mismo tiempo que el semhidrato. En otros procesos, la anhidrita se produce separadamente y se mezcla después con el semhidrato B. (TABLAS 6 y 7).

Un sistema moderno de calcinación para yeso sobrecocido (anhidrita) y para yeso multifásico es el horno transportador desarrollado por KNAUF (Fig. 4). Su capacidad alcanza las 1.200 t/d por lo que éste se considera el sistema más eficiente para la calcinación del aljez. Antes de alimentar el horno transportador, hay que triturar la piedra de yeso a un tamaño entre 4-60 mm y dividirlo en tres o cuatro fracciones de tamaño de grano, por ejemplo 7-25 mm, 25-40 mm y 40-60 mm, o 4-11 mm, 11-25 mm, 25-40 mm, 40-60 mm. Las fracciones se apilan en la parrilla transportadora continua, la menor en el fondo. La parrilla, que se mueve de forma continua a una velocidad de 20-23 m/h, pasa a través de una campana de calcinación, donde los gases calientes se hacen circular a través de la capa de crudo, mediante ventiladores. La capa superior puede alcanzar una temperatura de hasta 700 °C y la capa inferior de hasta 300 °C. La temperatura de las placas resistentes al calor de la parrilla transportadora no supera los 270 °C. El aljez no se mezcla durante la calcinación y por lo tanto se forma poco polvo y no se necesita un sistema de recuperación del polvo. Aproximadamente la mitad de los gases residuales que salen se descargan a la atmósfera a unos 100 °C; el resto, que sale a unos 270 °C, se reintroduce a la cámara de combustión junto con aire, aproximadamente a 230 °C, para que al pasar a través de la capa de aljez se

enfrié. La eficiencia térmica de este horno transportador es bastante alta, superior al 70 %. En la República Federal Alemana y en algunos países se usan hornos transportadores de más de 2 Mt/a.

La Figura 5 muestra un diagrama de flujo de un proceso de fabricación de yeso de construcción. Además de un horno transportador, también se utiliza un horno rotativo en el que las partículas de crudo de pequeño tamaño (0-4 mm o 0-7 mm) se calcinan para obtener semhidrato B, mezclándolas a continuación con yeso anhidro, que ha sido molido hasta conseguir la finura requerida. De esta manera se producen los yesos multifásicos. Se diferencian unos de otros en sus propiedades de fraguado, y también se diferencian del semhidrato B en que son más toscos (La TABLA 7 indica su composición; la TABLA 6 muestra sus propiedades y la Fig. 6 muestra la representación del diagrama de 3 componentes).

Los yesos multifásicos se usan para revestimientos de paramentos interiores y de techos. Desde 1965 se producen en grandes cantidades yesos de aplicación mecánica (yesos de proyección) mediante la incorporación de aditivos químicos a un yeso multifásico. Este sistema es válido para la fabricación de los yesos de construcción tradicionalmente usados en los países latinos, África del Norte y Próximo Oriente.

Otras plantas de calcinación donde se fabrican yesos anhidros (anhidrita), parten de hornos rotatorios a contracorriente (VERNON). Por ejemplo en Francia, el yeso sobrecocido (anhidrita), se fabrica y se mezcla con semhidrato B para producir yeso de construcción de París. En este horno rotatorio a contracorriente, el aljez entra por el extremo opuesto a la cámara de combustión y avanza a través de la corriente de gases calientes. El yeso deshidratado alcanza su máxima temperatura aproximadamente a los 500 °C, justo antes de salir del horno. Estos hornos, con capacidades de 15 t/h a 30 T/h, están a veces enlazados entre sí y se usan para producir yeso anhidro y semhidrato B simultáneamente. Esto mejora la eficiencia y ofrece la oportunidad de enfriar el yeso anhidro obtenido a temperaturas muy altas de manera ventajosa. El problema del enfriamiento también se ha solucionado utilizando un sistema de enfriamiento análogo al utilizado en la industria del cemento (KNAUF-BABKOC).

El semhidrato α

El semhidrato α puede ser obtenido mediante procedimientos de calcinación en húmedo, tanto bajo elevada presión en autoclave, como a presión atmosférica en soluciones salinas ácidas o acuosas entre 80 °C y 150 °C aproximadamente. Sin embargo, sólo los procesos de autoclave han llegado a alcanzar importancia industrial.

El semihidrato α se mezcla a menudo con el semihidrato β . Por esta razón se han desarrollado procedimientos que producen una mezcla de semihidrato α y β con un solo proceso. Con este sistema, se seca el semihidrato α en un horno rotatorio que al mismo tiempo sirve para calcinar el semihidrato β , obteniéndose ambos tipos de material.

Control del proceso

Los sistemas de calcinación en seco del aljez están normalmente equipados con sistemas secos de recogida de finos. La cantidad de polvo (finos) formada depende del tipo de unidad de calcinación. Los filtros electrostáticos son usados, la mayor parte de las veces, para la recogida de finos, pero recientemente se han usado filtros mecánicos. Se acoplan tamizadores y equipos de transporte para el yeso calcinado, con filtros horizontales de tipo cedazo para la recogida de finos. El polvo recogido es añadido al aljez calcinado.

El agua liberada en el proceso se expulsa en forma de vapor a través de bocas de salida a la atmósfera. No hay pérdidas ni residuos. No existen problemas con el medio ambiente siempre que el proceso de cocción del aljez se desarrolle normalmente.

El consumo de energía de una planta de yeso viene determinado por la suma del fuel usado en la calcinación del aljez y de la energía eléctrica necesaria para impulsar la maquinaria. La TABLA 8 indica el consumo de energía de varios tipos de procesos basados en la experiencia. Normalmente se han utilizado como combustibles el petróleo y el gas. Sin embargo, el uso del carbón es cada vez mayor, principalmente en los sistemas de cocción en parrilla, y en los hornos de lecho fluidizado. Para mejorar el consumo de energía en estas unidades, se ha mejorado el diseño y se recupera el calor desprendido reutilizándolo. Además, cada vez se utilizan más los controles automáticos del proceso.

3.2 De subproductos a base de sulfato cálcico a yeso calcinado

El desulfoyeso y el fosfoyeso se pueden transformar en yesos semhidratos β , multifásicos y semhidratos α . Inicialmente ambos tienen gran cantidad de finos. Además, el uso del fosfoyeso tiene una gran cantidad de impurezas perjudiciales y agua.

En la TABLA 6 se comparan las propiedades de los yesos obtenidos a partir de un aljez, yeso natural, con los obtenidos a partir de sulfatos de calcio subproductos. Se diferencian en la cantidad de agua que requieren: relación agua-yeso, tiempos de fraguado y en la distribución del tamaño de partícula. La diferencia que se manifiesta en los valores de resistencia es debida a la

diferente cantidad de agua requerida para el amasado, obteniéndose también distintas densidades.

3.2.1 *Semhidratos B y yesos multifásicos*

Desulfoyeso

El sulfato de calcio obtenido a partir de los gases de combustión de las centrales eléctricas, es un polvo fino y húmedo con un contenido en agua combinada inferior al 10 % y con muy pocas impurezas. Estas impurezas, específicas del proceso, son sales solubles de sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}), cloro (Cl^-) y sulfito de calcio ($\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Por consiguiente este sulfato de calcio puede ser utilizado en las industrias del yeso y del cemento sin necesidad de ser purificado. Su humedad, debido a su finura, si exige un tratamiento que el yeso de origen natural no precisa; en la mayor parte de los casos, el sulfato de calcio procedente de los gases de combustión debe ser secado antes de la calcinación. Se pueden utilizar sistemas de secado convencionales en los que los gases calientes entran en contacto directo con el sulfato de calcio húmedo, como por ejemplo, el secador rápido de HAZEMAG y el secador FLASH de BABCOK. Se calcina el sulfato de calcio en una marmita, y en la mayor parte de los casos el semhidrato B producido se puede usar sin moler para la fabricación de materiales de construcción.

Posteriormente se tratará el capítulo del sulfato de calcio procedente de los gases de combustión usado en la fabricación del yeso de construcción y el del yeso multifásico. Debido a su estructura de partícula, que va desde la forma cúbica (densidad 1.2 t/m^3) hasta la forma de barra (densidad 0.5 t/m^3), y a su pequeño tamaño de cristal (de 20 a 60 μm , máximo 200 μm), no es aconsejable su utilización como materia prima para la fabricación de yeso multifásico. Esta estructura de partícula, es la causa de su tixotropía, si se usa como yeso multifásico. Es un yeso muy tosco con un rendimiento muy variable.

Se han desarrollado procesos de aglomeración para modificar la estructura cristalina de las partículas de desulfoyeso y para convertirlo en un producto compacto. De todos los procesos de aglomeración - briquetaje utilizados, molino prensa de rodillos, compactación con molinos prensa de extrusión, nodulización (granulación, aglomeración), el sistema de briquetaje ha demostrado ser el más efectivo y es el más ampliamente aceptado. En este proceso, el sulfato de calcio procedente de los gases de combustión se compacta en estado seco sin adición de agentes de enlace o de aditivos para producir bloques de 2 cm de espesor y 6 cm de largo cuyas propiedades mecánicas son equiparables a las del yeso de origen natural. Su resistencia es superior a 500 N y su densidad aparente es aproximadamente 2.15 gr/cm^3 . Estos bloques son excepcionalmente resistentes a la abrasión. Pueden ser

almacenados a la intemperie, son inmunes a las heladas y a la lluvia. En este estado, todos los tipos de desulfoyeso tienen una densidad de aproximadamente de 1.1 t/m^3 , y pueden ser usados solos o mezclados con yeso de origen natural.

La Fig. 7 muestra el diagrama de flujo para una planta de fabricación de desulfoyeso por secado y compactación. Algunas de estas plantas están en la República Federal Alemana (por ejemplo: KNAUF, SAARBERG).

Con los bloques de sulfato de calcio procedente de los gases de combustión se pueden obtener yesos multifásicos utilizando los mismos sistemas de calcinación empleados para el aljez natural.

La energía adicional que hay que aportar por tonelada de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ seco es de:

- a) 550.000 Kj. de energía térmica y 12 Kw.h de energía eléctrica para secar hasta una humedad del 10 %
- b) 10 Kw.h de energía eléctrica para la compactación de los bloques.

El proceso de secado es el que consume la mayor parte de la energía, aunque se puede aprovechar el calor residual de la central eléctrica que produce el desulfoyeso (STEAG/KNAUF).

El valor de este desulfoyeso se puede establecer mediante una comparación entre los costes de fabricación del desulfoyeso y los del aljez natural. En algunos países las centrales eléctricas están obligadas a pagar los costes de transformación; sin embargo, la evaluación final es casi siempre más cara.

A causa de las grandes cantidades de desulfoyeso que van a estar disponibles en el futuro, será difícil su absorción tanto por parte de la industria del yeso como por la del cemento. Una posibilidad viable es la de procesar las cantidades sobrantes, junto con otros subproductos de las centrales eléctricas, para obtener un producto apropiado para su uso en la agricultura o como material de relleno de canteras.

Fosfoyeso

El fosfoyeso finamente triturado ($95 \% < 0.2 \text{ mm}$) es un subproducto de la fabricación del ácido fosfórico por vía húmeda. Se obtiene en forma de pasta o costra de lodo con un contenido en agua combinada del 20 % al 30 %. La proporción de impurezas es alta, incluyendo sustancias orgánicas e inorgánicas, sustancias solubles e insolubles en agua, algunas de las cuales están adsorbidas en la superficie, y otras incorporadas a la red cristalina. Cuando se utiliza el fosfoyeso como materia prima para la fabricación de yeso,

hay que eliminar estas impurezas por medio de lavado, flotación y recristalización.

El fosfoyeso obtenido a partir de rocas magmáticas, (por ejemplo Kola) no contiene impurezas orgánicas. El fosfato de origen sedimentario (por ejemplo en Marruecos), contiene sustancias orgánicas y pequeñas cantidades de radio activo, que pueden aparecer en el yeso. Todos los fosfoyesos contienen impurezas inorgánicas, fosfatos silicofluorados y sodio, que desgraciadamente afectan a las propiedades del yeso.

La industria del yeso tendrá que realizar múltiples tratamientos adicionales si pretende usar el fosfoyeso como materia prima. La eliminación de las impurezas orgánicas que colorean el yeso y los contaminantes inorgánicos solubles en agua que causan eflorescencias, exige, en primer lugar, un mezclado del fosfoyeso con agua, sometiéndolo posteriormente a otros procesos: flotación, clasificación (hidrociclón), lavado minucioso y filtrado; esto supone un consumo de unas 5 toneladas de agua por cada tonelada de fosfoyeso. El sulfato de calcio así purificado se obtiene en forma de pasta con un contenido de agua libre del 20 % al 30 %.

Para la fabricación de semhidrato β destinado a los materiales de construcción, la torta de sulfato de calcio debe secarse para posteriormente ser calcinada (como ejemplo está el secador rápido HAZEMAG o el secador de contacto SERAPIC) y molida de forma análoga al aljez natural. Actualmente este método se utiliza en la industria del yeso en Japón, donde fue desarrollado en 1940 por YOSHINO.

En cuanto a su uso como material de construcción y como yeso multifásico, el fosfoyeso es inapropiado por la configuración de sus partículas, por su finura y por sus impurezas ácidas. La configuración isomórfica de sus partículas y su finura perjudican seriamente la trabajabilidad del yeso multifásico. Por ejemplo, este yeso es tixotrópico. Los fosfatos ácidos cocrystalizados producen productos calcinados sensibles a la cal, lo que interfiere con el fraguado y con la evolución de la resistencia.

Con el fin de subsanar estas deficiencias, el fosfoyeso es secado, calcinado y simultáneamente aglomerado en un compactador, después de añadirle una suspensión acuosa de hidróxido de calcio. Estas bolitas alcalinas recristalizadas se usan como material de base para el yeso de construcción y para el yeso multifásico.

En uno de los procesos, la materia prima utilizada como base de partida es el fosfohemidrato. Si el proceso es llevado a cabo adecuadamente, el

fosfohemidrato es lo suficientemente puro como para poder eliminar la fase de purificación. El fosfohemidrato fino, cuyo tanto por ciento residual de agua está entre un 20 % a un 25 %, se mezcla a continuación con una suspensión de hidróxido de calcio o con polvo de hidróxido de calcio, de manera que el sulfato de calcio cristalice en forma de dihidrato de grano grueso. Parte de la humedad y todo el ácido fosfórico están químicamente ligados y tanto el tamaño como la estructura de la partícula son satisfactorios. Así, las bolitas de fosfoyeso producidas, pueden ser entonces calcinadas y tratadas más a fondo en hornos rotatorios o, después de la trituración, en marmitas, para producir un yeso semhidrato β similar en composición al yeso de París; pueden ser convertidas en yeso calcinado en una parrilla transportadora, que contiene partículas gruesas comparables al yeso multifásico. Estos yesos pueden ser utilizados como yesos de construcción con aplicación manual o mecánica. Estos métodos de fabricación, aún en uso, fueron desarrollados y llevados a la práctica por KNAUF en 1962 y 1970: la mayor parte de los procesos diseñados para usar fosfoyeso (por ejemplo el de RHONE-PROGIL, CHARBONNAGES DE FRANCE, CHIMIE-AIR INDUSTRIE, IMPERIAL CHEMICAL INDUSTRY, BUELL) no han tenido una explotación comercial viable.

El tratamiento especial requerido por el fosfoyeso supone inversiones adicionales de capital, tanto de partida como de operatividad, haciendo peligrosa su competitividad con el aljez natural y, en general, convirtiendo el fosfoyeso en antieconómico para el uso comercial. Además, debido al consumo extra de energía que requiere este proceso, tras la primera crisis de energía en 1973, se eliminaron estos procedimientos.

Sólo Japón sigue usando el fosfoyeso dada la carencia total de canteras de aljez natural y debido a los prohibitivos costes del transporte desde las excesivamente distantes fuentes de aprovisionamiento (Norte de Africa y Australia). Pero, incluso en Japón, existe una tendencia creciente a usar el sulfato de calcio procedente de los gases de combustión. Corea del Sur también utiliza fosfoyeso como materia prima para la obtención del sulfato de calcio.

La carencia de depósitos de aljez natural en la densamente poblada parte Noroccidental de Europa haría, en principio, competitivo el fosfoyeso. Sin embargo, los fabricantes de fosfoyeso no reciben ningún tipo de subvención por parte de las empresas de ácido fosfórico, cosa que sí ocurre con los fabricantes de desulfateso. En resumen, hay que sacar la conclusión de que la posibilidad de que el fosfoyeso sea alguna vez utilizado a gran escala mundial es extremadamente remota, aún cuando la eliminación del fosfoyeso es cada vez más problemática.

3.2.2 Semhidrato α

La fabricación de yeso semhidrato en autoclave de forma continua, fue desarrollada en la República Federal Alemana por Giulini en 1962 y en Japón por NITTO GYPSUM en 1970. Estos procesos facilitaron su preparación por vía húmeda sin secado intermedio. El uso del fosfoyeso como materia prima necesita flotación previa y lavado en contracorriente, sin embargo, el desulfoyeso procedente de las centrales eléctricas ya es lo suficientemente puro como para ser utilizado directamente. En el procedimiento NITTO GYPSUM, (Patente KNAUF), que se indica esquemáticamente en la Fig. 8, el sulfato de calcio procedente de los gases de combustión con un contenido en agua combinada del 10 %, se mezcla con agua (una parte de sulfato de calcio y dos de agua) y se alimenta de forma continua al autoclave, donde se transforma en semhidrato α en condiciones controladas (135 °C, 2h). Los aditivos en suspensión cambian la estructura cristalina del yeso y producen un material con propiedades definidas y uniformes. El semhidrato α producido se mantiene en suspensión acuosa y se diluye en un filtro vacío. El material, que tiene un contenido en agua combinada del 10 % al 15 %, se seca a continuación a unos 150 °C en un secador con calefacción indirecta y se tritura. Este semhidrato α puede ser usado para la fabricación de cualquier tipo de yeso .

Actualmente el proceso continuo en autoclave, de NITTO GYPSUM, se usa industrialmente para la fabricación de un sulfato de calcio finamente dividido y para otros tipos de subproductos.

Todos los esfuerzos para conseguir un yeso semhidrato α similar en sus propiedades al yeso semhidrato B han fracasado hasta la fecha.

3.3 ANHIDRITA

La anhidrita se produce por trituración de la piedra de anhidrita en molinos de tubo o molinos de impacto a un tamaño de partícula inferior a 0.2 mm. Se añaden acelerantes de fraguado juntamente con el agua de amasado. Sin embargo el triturado muy fino es caro.

Los aceleradores de fraguado son mezclas de sales alcalinas y alcalinotérreas con hidróxido de calcio que se añaden en porcentajes de hasta aproximadamente un 2 % en peso de la anhidrita. Se pueden utilizar aceleradores de tipo ácido, sulfato ácido de potasio o sulfato de hierro.

La fluoranhidrita, un polvo fino y seco, neutralizada con hidróxido de calcio y triturada muy finamente, puede usarse también como yeso anhidro.

Los sulfatos, por ejemplo sulfato de potasio y de zinc, y el hidróxido de calcio o el cemento Portland, son aceleradores de fraguado que normalmente se añaden y mezclan en la fábrica.

La anhidrita natural y la fluoranhidrita se diferencian por su estructura cristalina. La fluoranhidrita está formada por cristales primarios muy pequeños que se compactan en forma de partículas secundarias de superficie específica alta y con alta reactividad, mientras que la anhidrita natural está formada por grandes partículas primarias que se transforman en reactivas mediante un triturado fino.

4. USO Y PROPIEDADES DEL YESO Y DE LA ANHIDRITA

4.1 Hidratación, fraguado y endurecimiento.

El sulfato de calcio semhidrato, la anhidrita III y la anhidrita II, por hidratación en condiciones ambientales, se convierten en sulfato de calcio dihidrato. Si la hidratación se realiza con la cantidad de agua adecuada para producir una mezcla homogénea, fluida, estable y no sedimentaria, se solidifica y endurece, porque el dihidrato del sulfato de calcio forma agujas que crecen y se entrelazan entre sí.

Ha habido múltiples investigaciones sobre el mecanismo de la hidratación. Hacia 1900, Le Chatelier, estableció una teoría sobre la cristalización que tuvo gran aceptación. Según ésta, el sulfato de calcio semhidrato, en presencia de agua, forma una solución saturada, aproximadamente 8 g/l, a 20 °C. Hoy día se sabe que esta solución estaría sobresaturada porque a 20 °C la solubilidad del sulfato de calcio dihidrato es de sólo 2 g/l, precipitándose por tanto el sulfato de calcio dihidrato.

Cavazzi, y más tarde Baykoff, establecieron la teoría coloidal, que señala que la hidratación se realiza mediante una etapa intermedia en fase de coloide, formándose un tipo de gel, o mediante una adsorción entre el sulfato de calcio y el agua. Esta teoría no se ha podido demostrar de forma experimental.

La teoría de Le Chatelier se ha visto apoyada por la constatación de los fenómenos topoquímicos que aparecen durante la hidratación. Estos dos mecanismos no son excluyentes, ya que la transformación en dihidrato siempre aparece en la fase de soluto. La hidratación topoquímica es una hidratación interna de las partículas de semhidrato que se manifiestan sólo en distancias cortas.

La formación de los cristales de dihidrato cumple las leyes de formación del núcleo y del crecimiento del cristal (Fig. 9). La mezcla y la humectación del semhidrato en polvo, que provocan la desintegración de las partículas del semhidrato, es seguida por un corto período de inducción, después del cual el núcleo empieza a formarse a partir de la solución sobresaturada. La acumulación de cristales del dihidrato muy pequeños con gran exceso de agua ha sido descrito por KRONERT y otros, como un agrupamiento. Por tanto, después de esta nucleación, comienza el crecimiento del cristal, que al menos en las etapas iniciales, viene acompañado por continuas recristalizaciones. El porcentaje de formación de núcleos es proporcional a la sobresaturación relativa (TEORIA DE VON WEIMARN) y el índice de crecimiento del cristal es proporcional a la sobresaturación absoluta (ECUACION DE NERNST-NOYES). El semhidrato se convierte directamente en dihidrato; no existen etapas intermedias. La anhidrita III se convierte en dihidrato mediante una etapa intermedia de paso a semhidrato, y la anhidrita II se transforma directamente en dihidrato sin etapas intermedias. Si la proporción de agua es la correcta para el fraguado y para el endurecimiento, la mezcla endurece formando una estructura de dihidrato, una cristalización final, que según LUDWIG y otros, consiste en un intercrecimiento con interconexión de los cristales del dihidrato e inclusiones de los componentes no hidratados. El exceso de agua puede ser eliminado mediante secado.

La proporción de hidratación del semhidrato B, se demuestra por el contenido de agua combinada, por la intensidad de la difracción de los rayos X y por el aumento de la temperatura debida al calor de hidratación.

Existen diversas formas de poner en práctica estos procesos de hidratación, solidificación y endurecimiento. Los parámetros para caracterizar estos procesos son la relación de agua de amasado en la mezcla, la consistencia de ésta, el principio y el fin de fraguado, el índice de desarrollo de la resistencia y la densidad final del producto seco.

El sistema de fabricación del yeso influye en gran medida en su tecnología. Por ejemplo, el semhidrato B procedente de un horno rotatorio requiere más agua para formar una pasta fluida de consistencia uniforme que la que requiere el yeso fabricado en marmita. Esta último, a su vez, requiere más agua que el yeso multifásico, que a su vez requiere más agua que el yeso de autoclave; esta relación agua/yeso (capacidad de agua del yeso), está relacionada con la resistencia y con la densidad de los productos fraguados.

Los yesos α , trabajables con poca cantidad de agua, pueden ser transformados en yesos de alta resistencia y alta densidad. Sin embargo, estos materiales no se utilizan en construcción a causa de su fragilidad.

El yeso β y el yeso multifásico requieren más agua de amasado que el yeso α para obtener una consistencia fluida. Se obtienen materiales con una resistencia media, con alta elasticidad y baja densidad y son universalmente utilizados en la industria de la construcción.

La forma de la partícula, la distribución de su tamaño y la superficie específica también determinan la cantidad de agua requerida para obtener una consistencia específica. Generalmente el yeso muy fino requiere más agua que el yeso de grano grueso. Las partículas en forma de barra también incrementan la cantidad necesaria de agua. Las partículas de semhidrato β pueden desintegrarse al primer contacto con el agua, disolviéndose y formando series de partículas sueltas muy finas, cambiando así la distribución del tamaño de sus partículas. La distribución del tamaño de las partículas de los yesos multifásicos determina en gran medida su trabajabilidad.

El yeso calcinado sufre un cambio en sus propiedades durante su almacenamiento, "envejecimiento". Este envejecimiento es causado, hasta cierto punto, por la absorción de vapor de agua del aire. El grado de envejecimiento afecta al agua de amasado necesaria para una consistencia dada; se necesita más agua para el yeso recién calcinado que para el envejecido. Si se adsorbe una considerable cantidad de agua, pueden formarse núcleos de dihidrato, acelerando el proceso de hidratación. Sin embargo, las reacciones que tienen lugar debido al envejecimiento aún no han sido completamente estudiadas. El envejecimiento natural del yeso calcinado produce cambios graduales en las propiedades del yeso durante varios meses. Para evitar esto, se han desarrollado métodos para producir un envejecimiento artificial, de tal manera que el yeso no sufra cambios significativos durante su almacenamiento. Existe un proceso llamado aridización, que consiste en añadir al sulfato de calcio utilizado como materia prima, antes de su calcinación, cloruro de calcio o sales minerales en proporciones de hasta un 0.2 % en peso. También se consigue el envejecimiento del yeso calcinado mediante la inyección de pequeñas cantidades de agua que contenga un agente humectante; de esa forma se puede prevenir la formación de dihidrato.

Tanto el mezclado como el amasado del yeso calcinado con agua para formar una pasta de consistencia específica pueden estar afectados por la presencia de agentes humectantes. La mayor parte de éstos, llamados plastificantes o agentes reductores de agua, disminuyen la demanda de agua. Pueden ser alquilarilsulfonatos, lignosulfonatos o resinas de melanina. Es también posible aumentar la demanda de agua añadiendo agentes floculantes, por ejemplo, óxido de polietileno. Pueden añadirse productos químicos espesantes, como celulosa y almidones, para estabilizar la pasta de agua y yeso o para prevenir la sedimentación y segregación; sin embargo éstos productos influyen muy poco en la demanda de agua de amasado.

El fraguado y el endurecimiento pueden acelerarse o retardarse por medio de numerosos aditivos. Varios ácidos inorgánicos y sus sales son muy útiles como acelerantes, especialmente el ácido sulfúrico y sus sales. El dihidrato del sulfato de calcio es considerado como un buen aditivo para acelerar el fraguado. Finamente dividido, actúa como un enérgico acelerador y por consiguiente debe ser completamente eliminado cuando el aljez es calcinado. El efecto acelerador de estas sustancias es debido a un aumento de la solubilidad, que influye en el porcentaje de disolución del yeso calcinado y en el crecimiento del núcleo.

Los retardantes son normalmente ácidos orgánicos y sus sales y coloides orgánicos, procedentes de la descomposición y de la hidrólisis de biopolímeros, como las proteínas, así como las sales del ácido fosfórico o del ácido bórico. El mecanismo de retardo es diferente según el aditivo que se utilice. Por ejemplo, los coloides de alta masa molecular prolongan el período de inducción porque son venenos del núcleo. Otros retardantes disminuyen el índice de disolución del semhidrato o el crecimiento de los cristales del dihidrato. En condiciones normales la anhidrita II no requiere ser retardada ya que es suficientemente lenta, y casi siempre exige una aceleración.

En todos los casos, la temperatura afecta a la proporción de hidratación del yeso; esta proporción aumenta hasta temperaturas de unos 30 °C y decrece posteriormente.

La resistencia del yeso seco fraguado es directamente proporcional a su densidad; por consiguiente, depende principalmente de su porosidad y menos directamente de la proporción de agua/yeso y del tamaño y estructura de los poros. La resistencia varía también con la humedad o con la presencia de aditivos sin que cambie su densidad. La resistencia del yeso con un contenido en humedad superior al 5 % es aproximadamente la mitad de la del yeso en estado seco. Durante el secado, la resistencia del yeso va aumentando hasta el 5 % de humedad, haciéndose evidente al 1 % y alcanza su valor final cuando se ha llegado al equilibrio con el contenido en humedad.

La humedad continua, rebaja la resistencia debido a cambios cristalinos y estructurales; aparece una recristalización como consecuencia de la solubilidad del yeso en agua. La deformación de los yesos en estado húmedo es consecuencia de sus cambios estructurales. También la presencia de aditivos provoca un cambio en la estructura del cristal modificando la hidratación, lo que provoca variaciones en la resistencia, aún cuando no haya una modificación de la densidad, incluso en estado seco.

Un caso extremo es la reducción de la resistencia en presencia del ácido cítrico que se usa normalmente como retardador. Usado en proporciones

inferiores al 0.1 %, tiene un efecto retardante y sólo rebaja la resistencia ligeramente. Con cantidades superiores al 0.2 %, cambia el hábito del cristal del dihidrato de forma que no se produce un endurecimiento del yeso porque los cristales ya no se entrelazan ni se entrecruzan.

MURAT estudió la morfología de los sulfatos de calcio dihidratos tanto naturales como sintéticos con técnicas sofisticadas con el fin de conocer el efecto de los aditivos sobre el hábito del cristal del dihidrato.

4.2 Prefabricados a base de yeso.

Los prefabricados a base de yeso son ampliamente usados en la construcción. Entre ellos podemos citar : Cartón yeso, paneles de paramento vertical, placas para techos y paneles reforzados con fibras. Estos son productos ligeros, porosos, secos y no quebradizos, que poseen una excelente trabajabilidad. El semhidrato B es el material de base para todos estos productos porque fragua rápidamente y proporciona las características exigidas por la industria de la construcción.

Las plantas para la fabricación de prefabricados a base de yeso suelen estar cerca de las fábricas de yeso.

Cartón yeso

El cartón yeso es un material formado por un alma de yeso embutido entre dos láminas de cartón. Tiene una densidad de 750-950 Kg/m³. Se fabrica introduciendo el semhidrato en un mezclador continuo con agua y aditivos, e incluso con adhesivos, para formar una pasta homogénea que fragua rápidamente. Esta pasta se extiende sobre una lámina continua de cartón de unos 0.6 mm de espesor (aproximadamente 300 g/m²). La pasta se cubre con una segunda lámina de cartón y se moldea con unos rodillos con el fin de obtener una superficie plana. Se fabrican láminas de distintos anchos y espesores, indicados en las correspondientes normas. Esta plancha de cartón yeso, inicialmente blanda, se endurece en pocos minutos y se corta a distintas longitudes. Estas placas cuyo contenido en agua libre es de aproximadamente un tercio de su peso, se secan inmediatamente en un secador de túnel continuo calentado indirectamente con vapor o bien directamente con gas o petróleo. El cartón yeso es considerado un material de construcción laminar.

Se fabrican muchos tipos de placas de cartón yeso según el uso a que vayan destinados (diferentes dimensiones, pesos, tipos de bordes, resistentes a la humedad, etc.). Cuando se requiere un cartón yeso con propiedades específicas frente al fuego es necesaria la adición de fibra de vidrio. Recientemente se han desarrollado placas de cartón yeso aligeradas no combustibles utilizando

mantas y velos de fibra de vidrio en lugar del cartón tradicional. La capacidad de las plantas modernas para la fabricación de cartón yeso es de 20.10^6 m^2 por año, con un consumo anual de 150.000 t de yeso.

El cartón yeso se usa en revestimientos interiores, en falsos techos y en forrado de elementos estructurales. Se atornilla a estructuras de madera o de metal o se pega sobre muros de hormigón o ladrillo con un adhesivo a base de yeso.

Las juntas se tapan y se terminan con unas bandas de papel, con el fin de obtener superficies lisas. El cartón yeso también puede usarse para la construcción de divisiones desmontables y muros ligeros, para dividir espacios que requieren condiciones específicas, tanto en edificios de hormigón o de estructura metálica, como en viviendas prefabricadas. El cartón yeso puede ser transformados en fábrica para formar paneles de tamaño especial, paneles aligerados laminados con capas intermedias de poliestireno o poliuretano. El cartón yeso de múltiples capas se usa para el recubrimiento de suelos (suelos secos) y para el revestimiento de cajas de ascensores, forrado de columnas, etc. También existen placas para techos con recubrimientos especiales para obtener acabados decorativos con láminas de plástico o con láminas de aluminio que protegen de la transmisión del vapor de agua.

Sus especificaciones están recogidas en la Norma UNE 102-023, y en los proyectos de norma que está elaborando el Comité CEN /TC 241.

Paneles de yeso de paramento vertical

Los paneles de yeso están formados por yeso fraguado. Para fabricarlos se utiliza yeso semhidrato mezclado con agua, con una relación de agua de amasado (A/Y) comprendida entre 0.9 y 1.0. La pasta, que fragua rápidamente, se vierte en moldes. Al cabo de unos 5 a 8 minutos los paneles se desmoldan y se secan, bien en hornos, o como ocurre normalmente en España en secaderos a la intemperie.

Las dimensiones más comunes son 500 x 666 mm, con espesores de 60, 70, 80, 100 mm y con una densidad de 700-900 Kg/m³. Se utilizan para la construcción de divisiones interiores y como tabiques ligeros de separación. Las juntas, machihembradas, se unen con una pasta de yeso. Sus características más generales son: poco peso, alto índice de aislamiento acústico y excelente resistencia al fuego.

Sus especificaciones están recogidas en la Norma UNE 102-020, y en los proyectos de norma que está elaborando el Comité CEN /TC 241.

Placas de escayola para falsos techos

Estos elementos se fabrican mezclando semhidrato B, agua y pequeñas cantidades de fibra de vidrio. La mezcla se vierte en moldes de caucho con diferentes superficies, lo que permite la obtención de placas con distintos diseños.

España es uno de los países en los que este tipo de material es más conocido. Los elementos a base de yeso para falsos techos pueden ser: plancha lisa para techos continuos, no desmontables, cuyas dimensiones más comunes son 1000 x 600 mm y 1200 x 800 mm, y placas para techos desmontables, con funciones decorativas, de ventilación, de calefacción, (placas radiantes) o acústicas, con fibra mineral pegada al dorso. Se atornillan a la estructura de base y se encajan en la estructura general con entramados vistos, semivistos y/o ocultos. Sus dimensiones más comunes son: 625 x 625 mm, y 600 x 600 mm; su peso oscila entre los 8 kg/m² y los 20 kg/m².

Sus especificaciones están recogidas en las Normas UNE 102-021, UNE 102-022 y UNE 102-024, y en los proyectos de norma que está elaborando el Comité CEN /TC 241.

A partir de yeso semhidrato se fabrican otros elementos para construcción como son las placas de fibra y yeso (puede utilizarse fibra de vidrio, fibra de madera u otras). La fibra de vidrio puede llegar hasta un porcentaje de un 15 % en peso.

Este tipo de elementos suele tener una densidad de 800 Kg/m³ a 1.200 Kg/m³.

Estas fábricas suelen tener una capacidad de producción de unas 500.000 m²/a, consumiendo alrededor de 25.000 t/a de semhidrato.

4.3 Yeso de construcción

El yeso calcinado se usa para revestir. El mejor es el yeso multifásico (ver TABLA 7), porque en su composición existen múltiples fases que proporcionan un principio de fraguado rápido y un final de fraguado gradual. Se obtienen acabados lisos; es un material muy plástico y cubriente. Se puede aplicar en una sola capa o en dos capas, con o sin aditivos y agregados. Es un material con alta resistencia.

No es aconsejable utilizar un semhidrato B sin aditivos para la realización de enlucidos y guarnecidos, ya que el principio de fraguado es muy lento y el final de fraguado demasiado rápido. Además, tampoco es adecuada la distribución del tamaño de sus partículas. Sin embargo, la adición de agregados y aditivos permite la obtención de yesos retardados y aligerados muy útiles en la industria de la construcción.

El semhidrato alfa, debido a sus características especiales no se puede usar en construcción.

Hace 20 años surgió en la República Federal Alemana un yeso multifásico de proyección mecánica. Normalmente se usa un yeso semhidrato como material de partida. Mezclado con aditivos se convierte en un material que puede ser aplicado a máquina sobre distintos paramentos para realizar guarnecidos en una

sola capa. Los aditivos permiten obtener tiempos de fraguado muy variables ajustándose el yeso a las necesidades de cada obra. Este material lleva también incorporado retenedores de agua (metilcelulosa, etilcelulosa, etc.). Este material está especialmente indicado para grandes superficies, obteniéndose acabados con muy buenos resultados en dureza superficial y en resistencia.

Las plantas para fabricar yesos de proyección mecánica suelen ser grandes, del orden de 400.000 T/día. Suelen estar equipadas con sistemas sofisticados de mezclado.

En la obra, el yeso en polvo se alimenta de forma continúa a la máquina de proyección donde se mezcla con agua. La pasta se proyecta sobre los distintos soportes en una sola capa, que se puede pulir con el fin de obtener superficies lisas y uniformes.

Las máquinas de proyectar situadas en el interior de edificios se pueden alimentar directamente con yeso procedente de bidones o contenedores instalados en el exterior del edificio mediante bombas transportadoras neumáticas a través de mangueras flexibles. Estas de máquinas de proyectar pueden ser manejadas por un solo operario.

Los yesos premezclados aligerados, que contienen agregados del tipo vermiculita o perlita, mezclados con agua, se aplican normalmente en una sola capa sobre cualquier tipo de soporte, ladrillo, cemento, hormigón, etc. Estos materiales tienen los aditivos adecuados para garantizar una buena trabajabilidad. El yesaire sólo tiene que añadir el agua. Este tipo de material permite trabajar en cualquier época del año.

Las propiedades de estos materiales se indican en la TABLA 9.

En algunos países, por ejemplo en Gran Bretaña y en algunas regiones españolas, el revestimiento se suele hacer en dos capas, una capa de base, guarnecido, y una capa de acabado, enlucido. El material usado para guarnecer es un tipo de yeso semhidrato B aditivado, al que se le pueden incorporar agregados tipo perlita, arena, etc. El yeso para enlucir que se aplica sobre la capa de guarnecido, normalmente al cabo de unas 24 horas, es un yeso más fino, que puede tener cal como aditivo.

En Francia, España, y en otros países, existen yesos multifásicos no aditivados. En aquellos países cuyo clima es seco, se usa el yeso como mortero de agarre, e incluso, para recubrimientos exteriores

4.4 Otros usos

La anhidrita capaz de fraguar, se usa como pasta niveladora para suelos, usos donde su fragilidad no es un obstáculo.

Cantidades muy importantes de anhidrita natural son consumidas por la industria minera para la construcción de soportes de galerías, y estructuras de ventilación en las minas de carbón. La anhidrita de "mina seca", con una distribución del tamaño de partícula determinada, por ejemplo, 0-8 mm y que contiene un acelerante, se usa en minas de carbón subterráneas que trabajan por el sistema de "muro largo" (revestimiento de pozo de mampostería). Con la ayuda de grandes ventiladores, la anhidrita se transporta neumáticamente a través de mangueras y se humedece en la zona de uso antes de ser esparcida en capas para formar una barrera. Las barreras de anhidrita desarrollan rápidamente una resistencia inicial a compresión de aproximadamente 15 N/mm^2 , alcanzando a los 28 días una resistencia superior a los 40 N/mm^2 . Se utilizan como soportes de galerías y techos.

El yeso calcinado se usa también en la minería para la construcción de tabiques herméticos y para el cerramiento de muros galería, por ejemplo, para apagar el incendio de pozos ocultos.

La anhidrita natural molida y la fluoranhidrita, susceptibles ambas de fraguar, son utilizadas como aglomerantes de anhidrita para suelos autonivelantes. Cuando la anhidrita, finamente molida y con un acelerador de fraguado, se usa como pasta niveladora para suelos, se mezcla primero con arena en la proporciones de 2 a 5 y luego se mezcla con agua en una mezcladora hasta que alcanza una consistencia espesa.

Mediante bombas y mangueras de émbolo se bombea la mezcla a los diferentes plantas donde se extiende sobre el forjado. Dado que estas pastas no se cuarteán, pueden realizarse solados continuos, sin juntas de dilatación, en grandes superficies.

Cantidades muy importantes de aljez natural y de piedra de anhidrita se usan como retardantes para cementos Portland y de altos hornos. De acuerdo con las normas alemanas (DIN), el contenido máximo permisible de SO_3Ca en el cemento es de 3 % en peso de SO_3 para el cemento Portland y de 4 % en peso para el cemento de altos hornos. La piedra de yeso de origen natural (aljez), o la anhidrita natural o una mezcla de ambas, con un tamaño de partícula comprendido entre 5 mm y 50 mm, se añade directamente al clinker antes de su molienda. Está presente en el cemento en una forma reactiva dividida finamente. También se puede utilizar en la industria del cemento el yeso de

desulfuración y el fosfoyeso, principalmente en países como Japón y Corea del Sur, que carecen de recursos de yeso natural. Más de 40 % de la producción total de aljez y piedra de anhidrita es consumido por la industria del cemento.

En la U.R.S.S. se obtiene un mortero de yeso mediante la calcinación del aljez con ciertos tipos de cemento y de sílice activa. A causa de sus propiedades resistentes al agua, este mortero es usado para la construcción de cuartos de baño prefabricados, y ocasionalmente, también para la construcción de tabiques exteriores e incluso para casas de campo prefabricadas. Sin embargo, debido a la solubilidad del yeso en agua, el uso de este material en exteriores no es muy corriente.

El semhidrato alfa se usa para fabricar moldes de alta resistencia para la fabricación de tejas, elementos de fundición de metal y materiales dentales. Una mezcla de semhidratos β y alfa es la base de los moldes cerámicos, porque su expansión de fraguado, su resistencia y su absorción pueden ser fácilmente modificadas variando las proporciones de ambas fases. La adición de aditivos de masa molecular alta puede mejorar la estabilidad de los moldes cerámicos sin consecuencias negativas. El yeso cerámico se usa también para hacer instrumentos quirúrgicos y vendajes ortopédicos.

El sulfato de calcio dihidrato también se usa como estabilizador de suelos para desplazar al sodio en suelos demasiado alcalinos, por ejemplo en los suelos inundados por el agua marina. También sirve como fertilizante en suelos deficientes en sulfuro, especialmente en Norteamérica .

Ocasionalmente, el sulfato de calcio, en la forma de aljez, de anhidrita o de fosfoyeso, se utiliza para fabricar ácido sulfúrico por el procedimiento MULLER-KUHNE. El ácido sulfúrico necesario para el tratamiento de los fosfatos puede recuperarse en forma de fosfoyeso. Por esto, las plantas de ácido fosfórico que carecen de una fuente cercana de obtención de ácido sulfúrico han usado este proceso. A la vez, se obtiene cemento .

El proceso HERSEBURG para la fabricación del sulfato amónico a partir de aljez o de fosfoyeso nunca ha sido importante porque la demanda de sulfato amónico siempre ha sido cubierta por las grandes cantidades producidas como subproducto en la industria química.

La anhidrita III es un agente de secado efectivo (drierita) en laboratorios y en la industria.

El yeso sintético fino es usado a pequeña escala en forma pulverizada (LENZIN), en Alemania, como aditivo en la industria del papel y de la pintura. En la industria de bebidas, especialmente en las fábricas de cerveza, es usado para obtener y normalizar la dureza necesaria del agua.

Se han desarrollado recientemente procesos para fabricar alambres de sulfato de calcio. Si la producción fuera económica, se crearía un amplio campo de aplicación como rellenedor de fibra, reactivo antisedimentario y sustituto para asbesto y amianto.

Se está investigando también sobre el empleo del aljez como estabilizador de sedimentos residuales y para residuos especiales.

La anhídrita pura, finamente molida, ha encontrado un mercado importante en la industria del vidrio como sustituto del sulfato de sodio, debido a su bajo precio.

4.5 Propiedades de los elementos a base de yeso instalados in situ.

Los materiales de construcción a base de yeso son aconsejables para la construcción de revestimientos interiores sin carga en lugares secos. Los materiales prefabricados se secan en la fábrica. Los revestimientos a base de yeso secan después de su aplicación mediante ventilación, al cabo de unos pocos días. Estos yesos se adhieren bien a la base. Cuando los materiales de construcción están suficientemente secos, por ejemplo, cuando su humedad es inferior al 2 %, puede procederse a su decoración, mediante empapelado, pintado, o revestimiento con azulejos.

Las superficies realizadas con materiales de construcción a base de yeso son inertes.

En la TABLA 10 se resumen las propiedades más importantes de los prefabricados a base de yeso. El yeso fraguado y endurecido tiene baja densidad y alto volumen de poros, y por tanto, una baja conductividad térmica. Su porosidad, permite una rápida absorción y cesión del vapor de agua. El yeso "respira bien". Las paredes realizadas con yeso son cálidas al tacto. No sudan.

Los materiales a base de yeso, tienen gran estabilidad de volumen, cambiando su tamaño sólo en condiciones extremas de humedad o temperatura. Su contenido en humedad es inferior al 1 %. Sin embargo, la exposición continuada a la humedad o a temperaturas superiores a los 60 °C. provoca su desmoronamiento.

Los materiales a base de yeso proporcionan una buena protección contra el fuego, debido a su contenido en agua, que puede llegar hasta un 20.6 %. Este agua, en presencia de fuego, se evapora, impidiendo que la temperatura del paramento supere los 100 °C.

El cartón yeso y los yesos reforzados con fibra de vidrio mantienen su estructura y su integridad cuando se exponen al fuego, gracias a las fibras que contienen.

5 METODOS DE ENSAYO FISICOS, MECANICOS Y QUIMICOS

5.1 Normas

En la actualidad existen normas internacionales (ISO: International Standard Organisation), Normas Europeas: CEN (Comité Europeo de Normalización) y normas nacionales: DIN en Alemania, NF en Francia, UNE en España, BS en Gran Bretaña, ASTM en USA, etc.

La EUROGYPSUM, Asociación Europea de Fabricantes de Yeso, a través de su Comisión Científico Técnica intercambia de forma periódica información con los Organismos de Normalización y con RILEM (Red Internacional de Laboratorios de Ensayos de Materiales).

5.2 Ensayos

La norma DIN describe los métodos de ensayo para determinar la finura de molido, el tiempo de fraguado, la relación agua/yeso, las resistencias a flexotracción y a compresión y la dureza. También se recomienda un ensayo de adherencia sobre hormigón. Para los paneles de paramento vertical y para las planchas y placas para techos establece especificaciones de densidad aparente, dimensiones, peso y carga de rotura. Para las placas de cartón yeso establece especificaciones de dimensiones, pesos, carga de rotura y deformación permanente bajo carga.

Describe también un método de ensayo para determinar la superficie específica Blaine, así como un sencillo método para determinar la resistencia al impacto.

La industria cerámica que aún no ha establecido sus propios métodos de ensayo, determina además la expansión de fraguado y la capacidad de absorción de agua.

La clasificación de los materiales a base de yeso frente al fuego no está incluida en la norma DIN 4102. Los materiales a base de yeso se consideran incombustibles.

Los materiales a base de yeso que cumplen la Norma DIN 4102 son idóneas para la protección de estructuras frente al fuego, para forrado de columnas metálicas, etc.

5.3 Análisis químico

Los métodos de ensayo convencionales se usan para los ensayos de rutina. El agua libre de la materia prima, del yeso calcinado, del yeso endurecido y fraguado se determina por secado a 45 °C. El agua combinada se determina por calcinación a 360 °C.

El sulfato de calcio en solución se determina, de forma cualitativa, por precipitación en forma de singenita, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

5.4 Análisis de fases

El análisis de fases diferencia entre el dihidrato, el semhidrato, la anhidrita III, la anhidrita II, e incluso entre la A II-s, A II-u y A II-E. Esta diferenciación no sería posible por análisis químico.

El análisis de fases se puede realizar por rayos X, espectroscopía infrarroja, microscopía y calorimetría. Sin embargo es necesaria mucha experiencia para obtener resultados fiables. El método convencional en cualquier laboratorio es el gravimétrico con diferentes porcentajes de hidratación.

La determinación del dihidrato es complicada cuando se trata de pequeños porcentajes (menos de un 5 %). En estos casos es conveniente utilizar el análisis térmico diferencial.

La determinación de la anhidrita II por exposición a la humedad es una cuestión de definición. La anhidrita que se hidrata al cabo de tres días se denomina A II-s, la que se hidrata al cabo de siete días se denomina A II-u, y la anhidrita que no se hidrata al cabo de ese tiempo se considera como material anhidro y se determina por otros sistemas (añadiendo un 1 % de sulfato de potasio en solución acuosa en lugar de agua destilada, se puede acortar el plazo de hidratación de siete días a sólo unas horas).

Las anhidritas A II-s y A II-E, se pueden distinguir por su pH, que en el caso de la A II-E es superior a 9, y para el resto de las anhidritas es de aproximadamente 6.

No es posible distinguir el semhidrato α del semhidrato β mediante métodos de hidratación. Su distinción se hace por microscopía. Existen otros métodos que proporcionan información, tales como la resonancia magnética de protones, o el análisis térmico diferencial.

6. ASPECTOS ECONOMICOS

La producción mundial estimada de yeso y anhidrita natural se ha incrementado en las dos últimas décadas:

50 Mt/a en 1966-67.	15 Mt para la industria del cemento
60 Mt/a en 1972	25 Mt " " " " "
75 Mt/a en 1982	35 Mt " " " " "

El yeso que no se utiliza en la industria del cemento, se destina a la producción de yeso calcinado, elementos a base de yeso para la construcción, yesos multifásicos y yesos industriales.

La TABLA 11 refleja el consumo mundial de yeso natural destinado a la producción de yeso calcinado, por países.

El principal material de construcción a base de yeso es el cartón yeso (América del Norte: 6 m²/habitante, Escandinavia: 4 m²/habitante, Japón: 3 m²/habitante, G.Bretaña: 2.5 m²/habitante, Francia: 1.5 m²/habitante, Benelux y la República Federal Alemana: 1 m²/habitante), seguido por el yeso de proyección (Europa Central) y el yeso multifásico (España, Italia, Norte de Africa y Próximo Oriente).

En 1980 se consumieron 7 - 8 Mt de yeso como subproducto, que incluyen, 2.5 Mt de yeso de desulfuración y 5 Mt de fosfoyeso. De estas 7 - 8 Mt, 5.3 Mt se utilizaron en Japón, la mitad para la industria del cemento y la mitad para la industria del yeso; 0.7 Mt en Corea del sur, en la industria del cemento y 0.6 Mt en Europa Central, en la industria del yeso.

La producción total de semhidrato alfa es inferior al 1 % de la producción total de yeso calcinado, es decir, menor a 300 Kt/a de las cuales, en la República Federal Alemana, 122 Kt se destinaron a yeso industrial y 16 Kt a yeso dental.

En Europa Central, especialmente en la República Federal Alemana, se utilizaron cerca de 0.8 Mt de anhidrita natural destinadas a la industria del carbón en 1982.

No se esperan grandes cambios en la industria del yeso, tanto en la producción como en el consumo. La industria de la construcción será el mayor consumidor,

seguido por la industria del cemento. Unicamente se espera un incremento del consumo en algunos países como China, países del Golfo Pérsico y determinadas zonas del Lejano Oriente, como respuesta al incremento de las actividades de construcción.

ANEXO 1

TABLAS

TABLA 1. FASES DEL SISTEMA $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$

CARACTERISTICAS	SULFATO DE CALCIO DIHIDRATO	SULFATO DE CALCIO SEMHIDRATO	ANHIDRITA III	ANHIDRITA II	ANHIDRITA I
Fórmula	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4	CaSO_4	CaSO_4
Masa molecular	172,17	145,15	136,14	136,14	136,14
Estabilidad termodinámica °C	< 40	Metaestable *	Metaestable *	40-1180	> 1180
Forma	—	2 formas: α y β	3 formas: III β , III β' y III α	All - s All - u All - E	—
Otros nombres	Aljez, materia prima a base de yeso Yeso sintético Yeso subproducto Yeso químico Yeso fraguado Yeso endurecido.	Forma α Hemidrato de autoclave Hemidrato β Escayola Yeso de París	Anhidrita soluble	Anhidrita natural Anhidrita sintética Anhidrita química Anhidr. subproducto Anhidrita calcinada	Anhidrita de alta temperatura
Condiciones de síntesis, temperatura °C y condiciones atmosféricas	< 40	Forma α > 45 a partir de soluciones acuosas Forma β , 45-200 en atmósfera seca.	A α y β : 50°C y vacío o 100°C en aire. A β' : 100°C en atmósfera seca.	200-1180	> 1180
Fabricación: Temperatura °C	< 40	Forma α - 80-180 Forma β - 120-180	A β y A α' : 290 A α - 110	300-900 All s < 500 All u: 500-700 All E > 700	No se fabrica comercialmente

* : Metaestable en agua saturada con vapor de agua

TABLA 2. PROPIEDADES FISICAS DEL $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot x\text{H}_2\text{O}$

PROPIEDAD	SULFATO DE CALCIO DIHIDRATO	SULFATO DE CALCIO SEMHI DRATO α β	ANHIDRITA III	ANHIDRITA II	ANHIDRITA I
Agua de cristalización	20,92	6,21	0,00	0,00	0,00
Densidad g/cm^3	2,31	2,757 2,619-2,637	2,580	2,93-2,97	—
Dureza, Mohs	1,5	0,67-0,88		0,27	—
Solubilidad en agua (20 °C), g/100 g disolución	0,21	0,67 - 0,88	Hidrata a semhidrato	(0,27)	--
Indices de refracción n_o n_β n_γ	1,521 1,523 1,530	1,559 1,5595 1,584	1,501 1,501 1,546	1,570 1,576 1,614	—
Característ. ópticas	+	—	+	+	—
Orientación óptica	$n_\beta \parallel b$ $n_\gamma \parallel c = 52^\circ\text{C}$	$c \parallel n_\gamma$	$c \parallel n_\gamma$	$n \parallel c$	—
Angulo axial 2V	58-60°	14°	$\approx 0^\circ$	42-44°	—
Red de simetría	Monoclínico	Rómbico	Hexagonal	Rómbico	Cúbico
Distancia red, 1 m a b c	1,047 1,515 0,628	0,683 0,683 1,270	0,699 0,699 0,634	0,696 0,695 0,621	—

TABLA 3. CALOR DE HIDRATACION

CAMBIO DE FASE	CALOR DE HIDRATACION POR MOLECULA (g) DE DIHIDRATO A 25°C (EN JULIOS)
$\beta\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} (1) \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	19300 ± 85 (111.9 ± 0,50)
$\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} (1) \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	17200 ± 85 (100.00 ± 0,50)
$\beta\text{-CaSO}_4\text{III} + 2\text{H}_2\text{O} (1) \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	30200 ± 85 (175.3 ± 0,50)
$\alpha\text{-CaSO}_4\text{III} + 2\text{H}_2\text{O} (1) \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	25700 ± 85 (149.6 ± 0,50)
$\text{CaSO}_4\text{II} + 2\text{H}_2\text{O} (1) \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	16900 ± 85 (98.0 ± 0,50)

TABLA 4. CALOR DE DESHIDRATACION

CAMBIO DE FASE	CALOR DE DESHIDRATACION POR MOL O POR TONELADA DE PRODUCTO DESHIDRATADO, A 25°C	
	J/mol	kJ/t
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \beta\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} (g)$	86700	597200
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \alpha\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} (g)$	84600	582700
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \beta\text{-CaSO}_4\text{III} + 2\text{H}_2\text{O} (g)$	121800	895700
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \alpha\text{-CaSO}_4\text{III} + 2\text{H}_2\text{O} (g)$	117400	863100
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4\text{II} + 2\text{H}_2\text{O} (g)$	108600	798000

TABLA 5. COMPOSICION QUIMICA DE LOS SULFATOS DE CALCIO

	ALJEZ		ANHIDRITA NATURAL		DESULFOYESO	FOSFOYESO			FLUORANHIDRITA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Análisis Mineralógico									
- CaSO ₄ ·2H ₂ O	91,6	96,4	6,0	3,8	97,5	93,0	97,6	96,5	0,0
- CaSO ₄ II	6,4	0,9	88,8	83,7	0,0	0,0	0,0	0,0	94,7
- MgCO ₃	0,1	0,6	2,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
- CaCO ₃	1,9	1,3	3,1	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Análisis Químico:									
- Agua combinada	19,1	20,1	1,3	0,8	20,6	19,5	19,2	19,2	0,0
- SO ₃	46,4	45,4	55,1	51,0	45,8	43,2	45,4	46,9	56,4
- CaO	33,6	32,5	40,3	38,7	32,1	32,2	32,5	32,1	40,8
- MgO	0,05	0,28	0,95	1,71	0,04	0,01	0,01	0,01	0,13
- SrO	0,07	0,16	0,07	0,14	0,0	0,06	2,05	0,05	0,0
- Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0,01	0,08	0,01	0,39	0,27	0,27	0,70	0,93	0,27
- HCl Residuo insoluble	0,10	0,47	0,10	2,49	0,32	1,51	1,00	0,68	0,69
- Na ₂ O	0,02	0,01	0,04	0,11	0,01	0,47	0,14	0,02	0,03
- P ₂ O ₅ total	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,01	0,11	0,30	0,0
- F	0,0	0,0	0,0	0,0	0,04	1,76	0,14	0,29	0,0
- Otros					0,20 SO ₂ 0,01 Cl				0,11 ZnO 0,69 K ₂ O 0,0
Orgánicos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,03	0,08	0,03	0,04	0,14
Pérdida al fuego	0,54	0,71	2,08	4,45	0,4	1,38	0,34	0,43	100,18
Total	99,89	99,71	99,71	99,79	99,81	101,45	101,62	100,95	10-12
pH	6	6	6	6	6	3,1	4,2	4,2	

TABLA 6. PROPIEDADES DEL YESO CALCINADO

MODO DE OBTENCION	TIPO DE YESO	RESIDUO > 0,2 mm	AGUA COMBINADA	RELACION AGUA/YESO	FRAGUADO		RESISTENCIA N/mm ²			DENSIDAD	USOS
					Inicial	Final	Flexión	Compresión	Dureza		
<u>Yeso natural</u>											
.- Horno rotatorio	Semhidrato β	1,0	4,1	137	13	28	4,8	11,2	19,1	1069	Yeso de construcción, yesos especiales
.- Caldera	Semhidrato β	3,3	5,6	156	9	22	5,2	14,0	26,8	1133	
.- Caldera de cinta transportadora	Yeso multifásico	36,6	0,8	167	6	35	5,1	15,5	25,9	1225	Yeso de proyección, yeso multifásico
.- Autoclave	Yeso α	0	6,2	263	10	22	12,3	40,4	92,0	1602	Yeso cerámico, moldes, etc.
<u>Desulfoyeso</u>											
.- Horno rotatorio (KNAUF)	Yeso β	3,1	3,4	135	9	21	4,7	11,0	21,5	1064	Yeso premezclado, material para juntas, yeso de construcción
.- Caldera	Yeso β	2,6	5,2	139	14	28	5,2	13,5	19,5	1070	
.- Caldera de cinta transportadora	Yeso multifásico	26,2	2,0	177	6	20	6,7	20,8	34,1	1353	Yeso de proyección
.- Autoclave	Yeso α	0	6,0	270	13	26	12,0	45,0	90,2	1580	Yeso dental

TABLA 7. COMPOSICION DE LAS FASES, EN %, DEL YESO SOBRECOCIDO,
DEL YESO DE PARIS Y DEL YESO MULTIFASICO *

TIPO DE PRODUCTO	YESO DE PARIS (HORNO ROTATORIO)	YESO SOBRECOCIDO HORNO DE CONVECCION	YESO MULTIFASICO (MEZCLA DE YESO DE PARIS Y SOBRECOCIDO)
DIHIDRATO $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0-0,5	0-2	0.2
β -SEMHI DRATO $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	75	6	26
β -ANHIDRITA III $\beta\text{-CaSO}_4\text{,III}$	19	18	14
ANHIDRITA II $\text{CaSO}_4\text{,II}^{**}$	5	74	58

* : No se han considerado las impurezas

** : Reacción de All-s, All-u y All-E

TABLA 8. DATOS DE ENERGIA CARACTERISTICA EN LA FABRICACION DE YESO

PROCESO DE CALCINACION	VARIACIONES	PRODUCTO FINAL	AGUA COMBINADA %	ENERGIA CONSUMIDA POR TONELADA DE MATERIAL DESHIDRATADO		CAPACIDAD MAXIMA t/d
				Térmica kJ/t	Eléctrica kWh/t	
Horno rotatorio con reducción previa a 0-25 mm y tamizado fino después de calcinación	Corriente	β semhidrato	3,0-5,0	1.050.000	13	600
	A contracorriente	Sobrecocido	1,0	1.450.000	15	600
Horno de cinta con reducción previa a 4-60 mm y tamizado fino después de calcinación	—	Yeso multifásico	1,0	1.100.000	20	1200
Horno continuo con reducción previa a 0-0,2 mm por tamizado en seco.	Calefacción exterior sin quemador de inmersión.	Semhidrato β	5,7	1.100.000	23	220-300
	Calefacción exterior con quemador.	Semhidrato β	5,5	1.050.000	21	440-500
	Quemador sin calefacción externa	Semhidrato β	5,4	1.000.000	20	500
Calcinación con aire con reducción previa a 0-1 mm.	Quemador de ciclón	Semhidrato β	4,5	1.250.000	13	500
Autoclave (yeso natural)	Discontinua	Semhidrato α	6,0	1.600.000	41	20
Autoclave para desulfuroso	Continua	Semhidrato α	6,0	2.100.000	40	24

TABLA 9. PROPIEDADES DE APLICACION DE LOS YESOS DE PROYECCION, DE LOS YESOS ADHESIVOS Y DE LOS YESOS PREMEZCLADOS

PROPIEDADES	YESO DE PROYECCION	YESO ADHESIVO	YESO ALIGERADO
Relación agua/yeso	0,45-0,55	0,60-0,70	0,55-0,65
Principio de fraguado (min)	60-120	50-90	50-90
Fin de fraguado (min)	170-220	80-200	100-170
Resistencia (N/mm ²):			
.- a flexión	1-2	1-2	1-2
.- a compresión	4-6	3-5	3-7
Densidad aparente del yeso seco en kg/m ³	1000-1200	850-1000	900-110
Rendimiento, m ² por 100 kg de yeso	9-10	13-14	12-13

Datos según DIN 1168.

TABLA 10. YESOS DE CONSTRUCCION Y SUS PROPIEDADES

	CARTON YESO 9,5 mm de espesor	YESO DE PROYECCION
<u>Densidad aparente y porosidad</u>		
Densidad, kg/m ³	900	1200
Volumen de poros, %	60*	50
Radio poros, μm	$\approx 99\% > 0,05$	$\approx 99\% > 0,05$
<u>Propiedades climáticas</u>		
Conductividad λ WK ⁻¹ m ⁻¹	0,21	0,35
Coefficiente de penetración de calor, b:		
- Ensayo ½ hora J.s ^{-½} .m ² .K ⁻¹	412	1172
- Ensayo 2 horas	489	1410
Resistencia a la transmisión del vapor de agua μ	8	10
Coefficiente de absorción del vapor de agua α , m/h:		2,5
- Superficie no tratada	2,29	
- con fibra rugosa	2,98	
- empapelado	2,66	
<u>Expansión de calor y contenido de humedad en equilibrio</u>		
Coefficiente lineal de expansión térmica α (K ⁻¹)	13×10^{-6} 0,5 3000	20×10^{-6} 0,3
Contenido de humedad en equilibrio a 20°C y 65 % de humedad relativa (% en peso)		2800
Módulo de elasticidad N/mm ²		

* : Núcleo

TABLA 11. CONSUMO DE YESO NATURAL PARA LA PRODUCCION DE YESO CALCINADO

	CONSUMO Mt/a 1973	CONSUMO Mt/a 1980
Estados Unidos	12.7	13.5
Francia	4.4	4.5
República Federal Alemana	3.7	3.5
España	3.1	3.1
Gran Bretaña	2.5	2.5
Canadá	1.0	0.9
Otros	10.5	12.0
TOTAL	38	40

ANEXO 2

FIGURAS

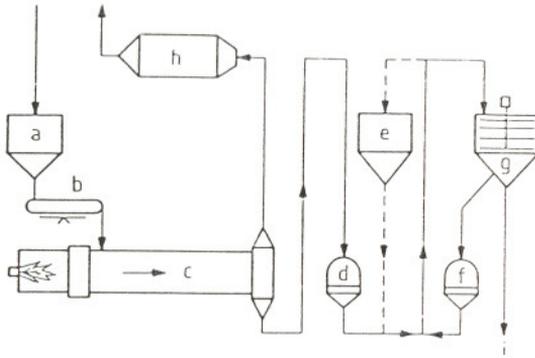


Fig.1 Producción del yeso semhidrato B por el proceso de horno rotatorio

- a) Silo para piedra de aljez
- b) Cinta de alimentación por peso
- c) Horno rotatorio con cámara de combustión
- d) Molino primario
- e) Silo de almacenamiento con indicación de marcha y paro
- f) Molino de finos
- g) Clasificador de aire
- h) Precipitador electrostático. Filtro electrostático
- i) Yeso semhidrato B

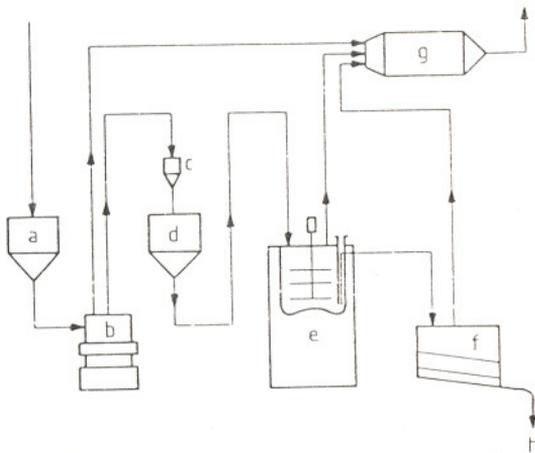


Fig.2 Producción de semhidrato B con marmita continua combinada con secado y molido

- a) Silo para aljez
- b) Unidad de secado - molienda
- c) Ciclón
- d) Conducto de alimentación
- e) Marmita continua
- f) Conducto de enfriamiento
- g) Precipitador electrostático
- h) Yeso semhidrato B

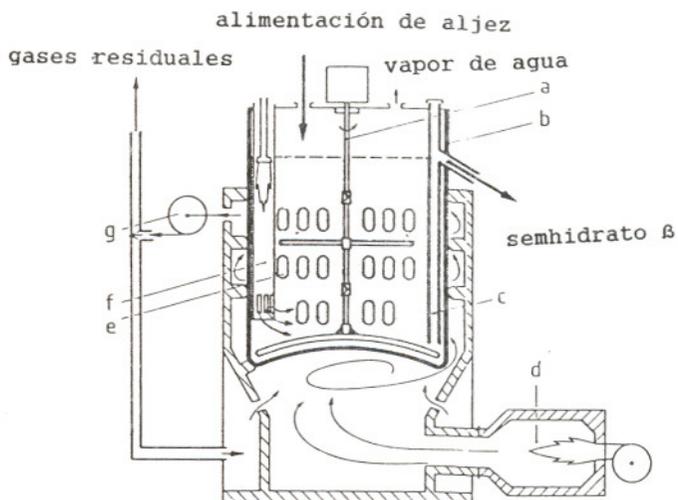


Fig.3 Marmita con quemador sumergido de combustión para la fabricación en continuo de yeso semhidrato B (yeso de París).

- a) Agitador
- b) Carcasa exterior de la marmita
- c) Conducto ascendente para la descarga de escayola
- d) Cámara de combustión
- e) Conductos cruzados para los gases calientes.
- f) Conducto sumergido con quemador de combustión.
- g) Ventilador para salida de gases circulantes y residuales.

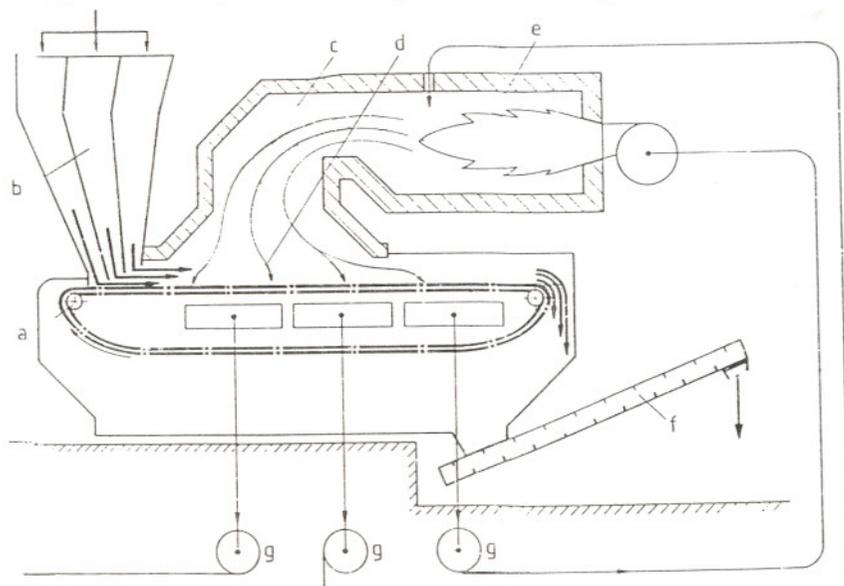
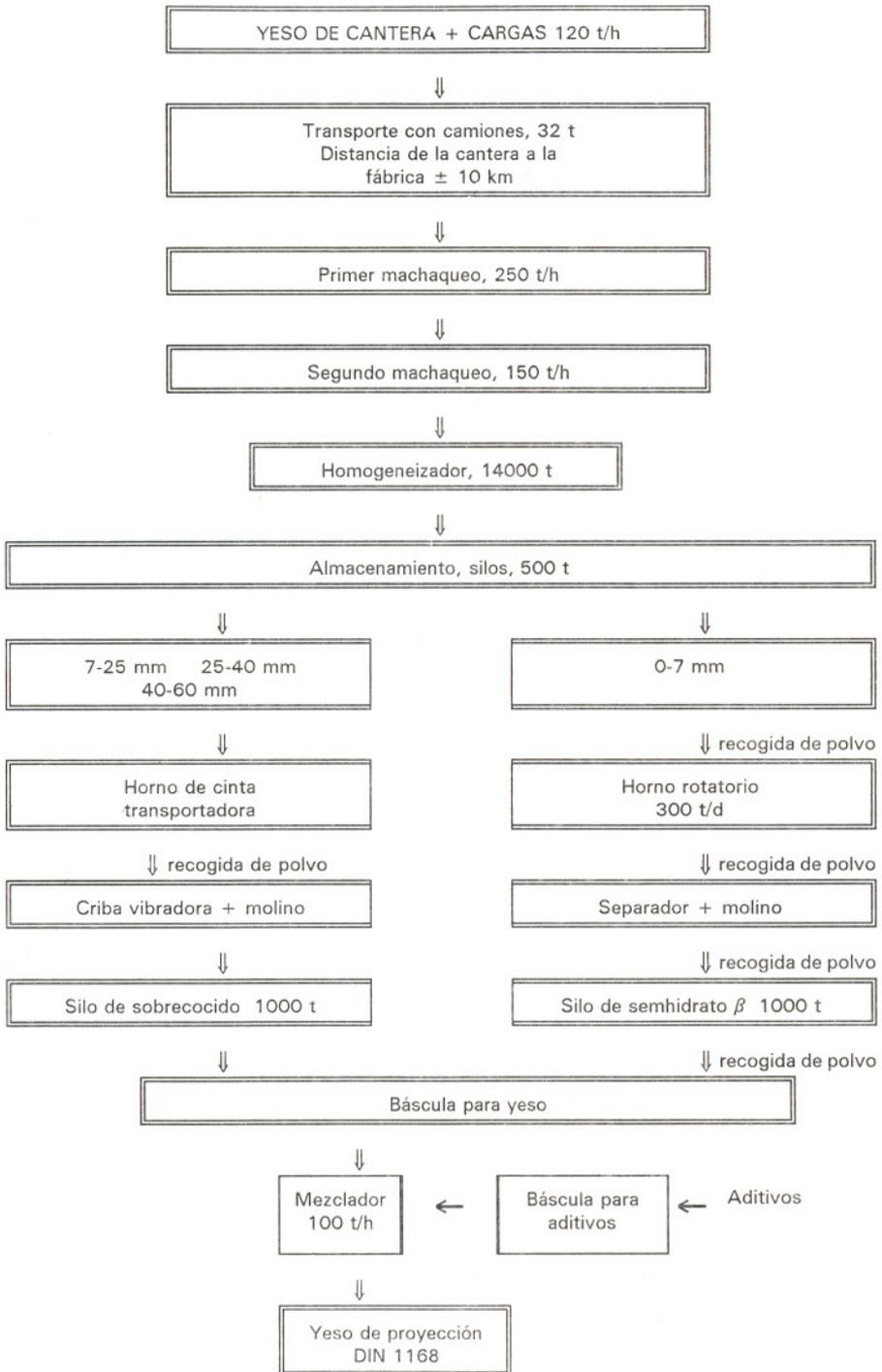


Fig.4 Horno para la fabricación de anhídrita

- a) Parrilla transportadora
- b) Descarga de alimentación
- c) Cubierta de calcinación
- d) Capas de yeso
- e) Cámara de combustión
- f) Descarga
- g) Ventiladores para la circulación y enfriamiento de los gases de salida

FIGURA - DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA FABRICACION DE YESO DE PROYECCION EN HORNO DE CINTA TRANSPORTADORA



se hidrata rápidamente a semhidrato

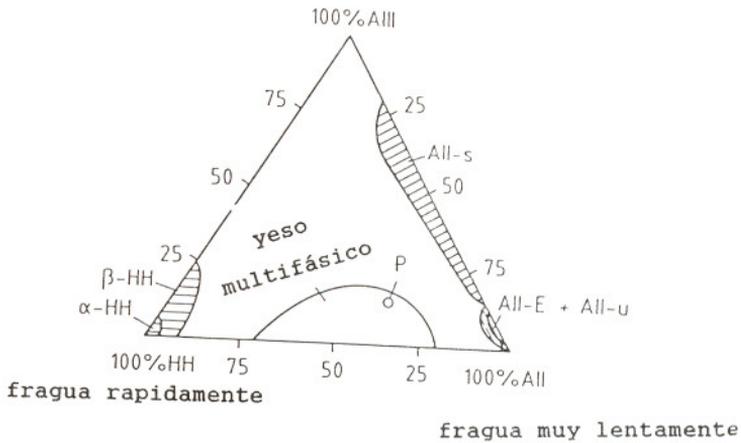


Fig.6 Diagrama trifásico del yeso cocido

El punto P indica la composición de un yeso multifásico, compuesto de 20 % de semhidrato beta, 14 % de A III y un 58 % de A II, composición indicada en la TABLA 7 para un yeso multifásico.

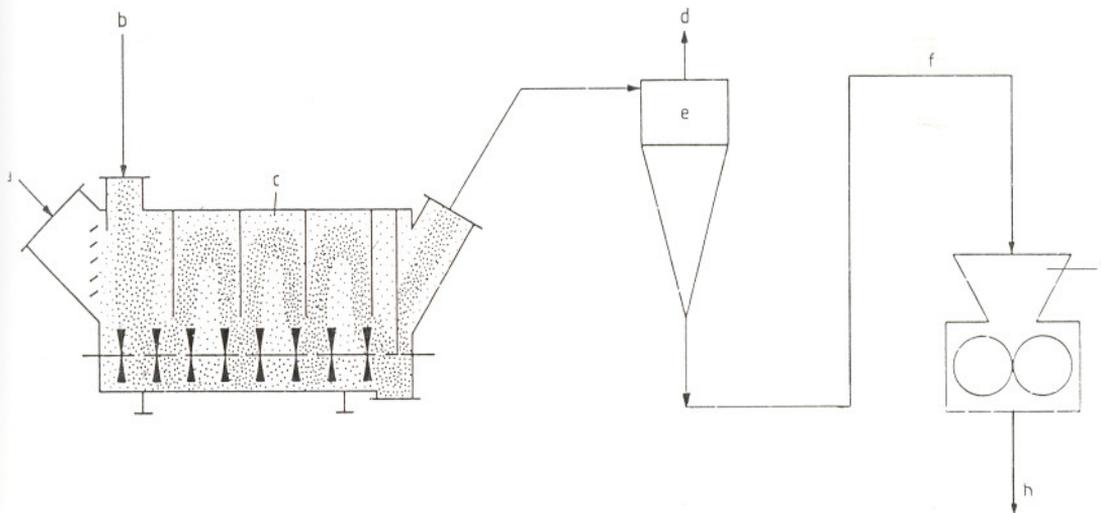


Fig.7 Planta de secado y de briquetaje de desulfoyeso

- a) Entrada gases calientes
- b) Entrada de la humedad del desulfoyeso al secador
- c) Secador rápido
- d) Salida de gases calientes
- e) Ciclón
- f) Entrada del desulfoyeso seco en la prensa de compactación
- g) Prensa de compactación
- h) Briquetas de yeso

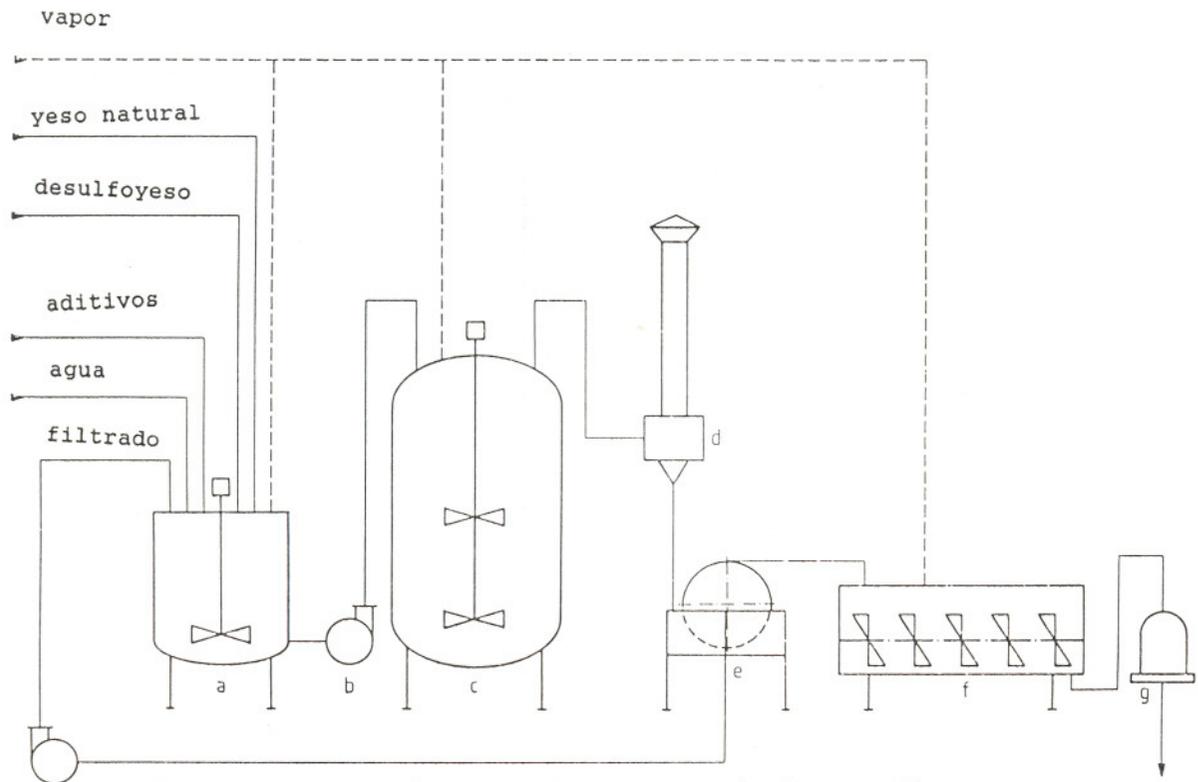


Fig.8 Fabricación de semhidrato alfa a partir de desulfoyeso en autoclave continuo

Yeso a seco

- a) Tanque de mezclado
- b) Pasta
- c) Autoclave
- d) Expansión
- e) Filtro de vacío
- f) Secador
- g) Pulverizador

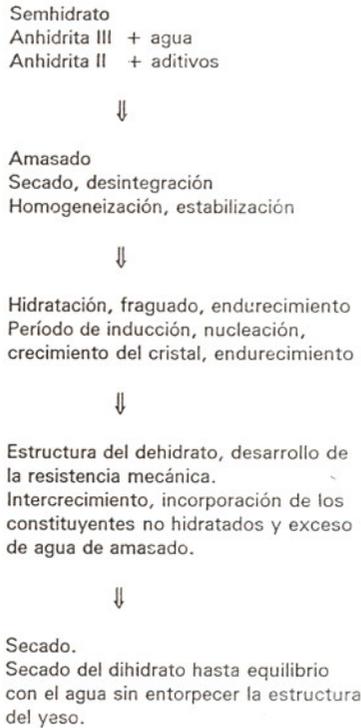


Fig.9 Etapas de la hidratación, fraguado y endurecimiento de los sulfatos de calcio

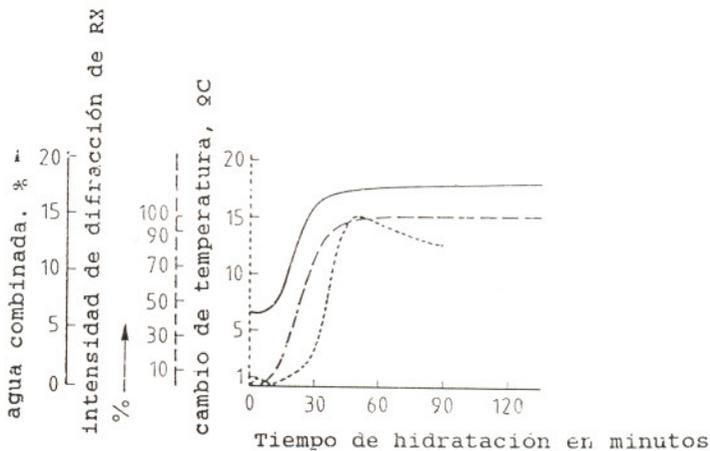


Fig. 10 Porcentaje de hidratación del semhidrato B demostrado por el contenido de agua combinada (—), intensidad de la difracción por rayos X (----) y aumento de la temperatura a partir del calor de hidratación (....)

EDITADO POR:



Serrano, 40 28001 MADRID-ESPAÑA

Tfno: 435 47 01 Fax: 435 30 96

P. V. P. 2.000,— Ptas.