

1.- ANTECEDENTES

1.0.- Introducción.

El desarrollo de nuevos materiales ha llegado, en algunas ocasiones, del estudio y mejora de los ya existentes. En el caso que nos atañe, mejorar las propiedades de los hormigones, morteros y yesos, es un campo de aplicación que ha estado y está en continua evolución debido a la constante investigación que sobre ellos se lleva a cabo, en concordancia con el avance de nuevas técnicas y nuevas aplicaciones.

Sin embargo, hay una marcada tendencia al desarrollo de los cementos o elementos cementosos en detrimento de los derivados del sulfato cálcico, componente principal del yeso de construcción.

Las nuevas investigaciones en comportamiento ante el fuego, así como ante la protección a explosiones, o incluso el análisis acústico o térmico, han hecho que el yeso vuelva a retomar su merecido reconocimiento.

Como se indica a continuación, los resultados obtenidos en cuanto a comportamiento ante el fuego y anti-explosiones, hacen que se tenga que profundizar más en la investigación en la base de yeso como elemento de aplicación.

Se aclara, que el presente documento parte de los morteros a base de sulfato cálcico ya desarrollados. Estos morteros, cuando son aditivados, consiguen cumplir propiedades adicionales de dureza, resistencia, manejabilidad e interacción con otros elementos, consiguiendo el grado de innovación necesaria para la aplicación a nuevos proyectos.

El mortero con el cual vamos a trabajar es una base de sulfato cálcico, un porcentaje de vermiculita añadido y un aditivo (denominado ADIFOC), y que nosotros denominaremos PROSOC a su conjunto. Se aplica como base de un conjunto cuya finalidad es la de conferir poco peso, buen comportamiento al fuego, acústico y de absorción de onda de choque adecuada para colocación independiente, o como con un segundo mortero aditivado, sin vermiculita y que nosotros denominaremos INCOFOC.

La misma relación agua/yeso (A/Y) y dosificación de aditivo son aplicados en las últimas pruebas realizadas para el Cuerpo de Seguridad del Estado de la Guardia Civil y del Ministerio del Interior, al objeto de probar su eficacia como protección de elementos estructurales ante el fuego y contra explosiones, empleados en la lucha antiterrorista.

Las dosificaciones en base a sulfato cálcico y vermiculita empleadas en estos casos son sólo INCOFOC (mortero aditivado y no adicionado con vermiculita), INCOFOC y PROSOC (como elemento prefabricado multicapas) y sólo PROSOC (mortero aditivado y adicionado) aplicados a diferentes espesores.

El mismo mortero, cuyo análisis y composición es estudiado en el presente documento, es aplicado al interior de puertas cortafuegos, como protección para alojamiento de cerraduras, puertas preparadas para la absorción de ondas de impacto provocadas por explosiones.

1.1.- Yeso

En las canterías faraónicas de Egipto, el yeso se emplea de forma habitual como uno de los materiales para revocar los paramentos pétreos en tumbas y templos, así como la pasta de juntas entre los sillares de sus pirámides, referencia encontrada en la pirámide de Keops, 2800 a.C.

También aparece yeso en los revestimientos de suelos y paredes del palacio de Knossos (Creta), con construcciones y reformas entre 2200 y 1600 a.C. En su conocida escalinata y propileos, incluso el trono del rey Minos era de yeso (Fotografía 1) (⁵ Villanueva, 2004).

Hay constancia de que ya en el siglo IX a.C, en Catal-Huyukg (Turquía), el yeso se utilizaba como materia prima en la realización de revestimientos, junto con la cal, que soportan pinturas al fresco. En Jericó, en el siglo VI a.C. aparecen moldeados de yeso.

En la civilización griega, el yeso es muy utilizado como material de revestimiento, en estucos y guarnecidos (²¹ Villanueva, García Santos, 2001).



Fotografía 1: Sala del trono y los bancos construidos con mortero de yeso.

De esta época es la referencia escrita sobre el gypsos, palabra griega que significa tierra más agua, y que se utilizó para referirse al yeso y a la cal. Se debe a Teofrasto (372 - 287 a.C.) quién describe el proceso de cocción de yeserías en Chipre, Fenicia y Siria. Menciona el empleo en revestimiento y ornamentación y describe un tipo de horno artesano con las mismas características que se han mantenido hasta la aparición de los procedimientos industrializados.

Más adelante, Catón y Columela citaron diferentes aplicaciones del yeso, pero fue Plinio el Viejo quién más se refirió a este material, citando los yacimientos de espejuelo en Segóbriga que se exportaba a Roma por el puerto de Cartagena.

Los romanos utilizaron el yeso en aquellas provincias en las que abundaba, es de destacar el hecho de haber aparecido en Pompeya importantes decoraciones y revestimientos, así como almacenes de yeso provenientes de Grecia, lo que hoy indica la existencia de un comercio a larga distancia, presuponiendo una alta valoración del producto.

San Isidoro en sus *Etimologías*, cita el término *plastiche* para referirse al trabajo en relieve realizado con yeso, que, posteriormente, se denominó *yasería*. Hay precedentes en la Roma clásica y en otras regiones del imperio, como en Villajoyosa, según estudió ⁽¹¹⁶⁾Torres Balbás (1995). Pero donde más se utilizó el yeso fue en la Persia sasánida, heredera de las viejas tradiciones de la albañilería Mesopotámica y trasmisora a través de los árabes del empleo de este material en La España Medieval. Se puede citar su empleo en los alcázares Omeyas de Siria y en la ciudadela de Amman ⁽²²⁾Almagro y Arce, 1996), donde aparece un sistema de piezas prefabricadas de yeso para la construcción de arcos.



Fotografía 2: Cantera de yeso en Sorbas (Almería).

Algunas zonas de España, como el valle del Ebro y el sur de Aragón son particularmente adeptas al empleo del yeso, incluso como mortero de juntas, en

fábricas de piedra o de ladrillo, así como en tapiales. En el resto se emplea particularmente en guarnecidos y enlucidos, en solados, en juntas tabicadas

En España, durante los siglos XIII al XV, se distinguen focos de gran interés, tanto en el reino musulmán nazarí de Granada como en la zona cristiana en Aragón, Toledo y Sevilla (²⁵ Villanueva, 1996). La tradición medieval de las yeserías continuó durante la primera mitad del siglo XVI, con motivos decorativos renacentistas, en el denominado estilo plateresco, como sucede en el Paraninfo de la Universidad de Alcalá.

En Europa también hay ejemplos de utilización medieval del yeso, particularmente destacable es la región de París, en la que había dieciocho canteras de yeso en explotación, el año 1292. El yeso se utilizaba en revestimientos, forjados de pisos, en tabiquería y chimeneas. La tradición del empleo del yeso en esta zona dio origen a la denominación *Plaster of Paris* cuando el producto se exportó a Inglaterra, sobretodo a partir del siglo XVII después del incendio de Londres. También hay que destacar los excelentes revestimientos exteriores existentes en algunos barrios centrales de París, como por ejemplo en la plaza de los Vosgos.

Durante el renacimiento y el barroco se utiliza profusamente el yeso en la decoración de interiores. Junto a la yesería con motivos clásicos aparece el *estuco*, que proporciona superficies pulidas a imitación del mármol. También aparece la *escayola*, utilizada en planchas para realizar falsos techos. Se trata de un producto fabricado con más esmero a partir de piedra de yeso de gran pureza, deshidratada parcialmente a baja temperatura y molido con gran finura. Se utiliza en trabajos decorativos, donde es preciso reproducir molduras u otros motivos ornamentales con exactitud y precisión.

En el siglo XVII los problemas económicos que sufre España dificultan la construcción de bóvedas y cúpulas de cantería. Se recurre a realizarlas con albañilería, en fábricas de rosca de ladrillo o tabicadas, en ambos casos recubiertas de yeso. Pero incluso se realizan bóvedas y cúpulas en carpintería, tanto por el sistema (⁸⁴ De L'Horme (1561), como en las denominadas bóvedas *encamonadas* (²⁶ Villanueva, 2005)

Para completar el panorama, hay que citar el empleo del yeso junto a fibras vegetales en producto denominado *staff*, muy empleado en Francia para la decoración con su máxima expresión en el periodo Rococó, que perdura en elementos prefabricados, en trabajos similares a los realizados con escayola.

A partir del siglo XVIII comienza el conocimiento científico del yeso. Así, en 1768, Lavoisier presenta en la Academia de Ciencias el primer estudio científico de los fenómenos en los que se basa la preparación del yeso. Posteriormente, siglo XIX, Van t'Hoff y Le Chatelier dieron una explicación científica a la deshidratación, iniciando una serie ininterrumpida de investigaciones sobre este material.

En esa época comienza el proceso de industrialización que afectará en primer lugar a los materiales y después a la construcción:

- Control del proceso de fabricación.
- Consecución de mayores temperaturas.
- Aumento de las series producidas y unificación de los productos.

Aparecen el acero y el cemento, como nuevos materiales característicos de esta etapa, que van a imprimir un nuevo concepto a la estructura de los edificios, facilitando a la postre la existencia de un esqueleto resistente independiente de los cerramientos. El sistema afecta a muchos materiales, a las herramientas y al propio sistema constructivo.

En lo referente a los materiales conglomerantes tradicionales, se produce una evolución diferente. Se industrializa la fabricación del yeso, en un proceso que termina con la introducción de innumerables tipos de hornos, con el objetivo de conseguir un sistema racional de calcinación.

También se produce la adición de los yesos en fábrica, mejorando notablemente la regularidad del proceso, con resultados muy positivos frente a las adiciones realizadas en obra. Los principales aditivos empleados son los retardadores del fraguado, pero se abre un importante proceso de investigación que incidirá decisivamente en los yesos de la tercera generación.

En cuanto a la calcinación propiamente dicha los sistemas son muy variados (²⁷ SNIP, 1982). La imaginación de los ingenieros se dispara para alcanzar la mejor deshidratación al menor precio. En unos casos se mueve la materia prima por el interior del horno y en otros, lo hace, la fuente de calor. Hay sistemas con carga continua y otros con carga discontinua. De fuego directo y de fuego indirecto.

Los hornos más habituales son las marmitas de fuego indirecto para obtener la escayola y los hornos rotativos de fuego directo para producir el yeso.

A principios del siglo XX aparece en Estados Unidos la placa de yeso laminado (Fotografía 3). Un tablero de dos cartones con alma de yeso, inventado con el fin de

sustituir a los tableros de madera y aumentar la resistencia al fuego en caso de incendio. Aparece, por tanto, en un contexto de tabiques de carpintería muy arraigado en Estados Unidos y otros países del norte de Europa, pero que en su traslado a los países mediterráneos, de tradición constructiva en el área de la albañilería, produce un efecto importante, tendente a la industrialización del sistema constructivo.



Fotografía 3: Placa de yeso laminado en diferente conformación.

Esa misma tendencia hacia la industrialización se produce con prefabricados de escayola, donde la plancha lisa sustituye a los tradicionales encañizados, en la ejecución de cielorrasos y, más adelante, en diferentes tipos de techos, desmontables o no, realizados con piezas prefabricadas de escayola, así como a toda una serie de productos prefabricados como complementos y decoración de techos, como molduras, cornisas interiores, fosas, plafones.

La colocación de los prefabricados de yeso ha dado lugar a un importante número de adhesivos, pastas de agarre y de repaso, realizados a base de productos de yeso industrial con diferentes tipos de aditivos, ya en las puertas de lo que podemos considerar yesos de la tercera generación, como veremos a continuación.

Después de la II Guerra Mundial, se comienza a estudiar más científicamente las modificaciones producidas en las características del yeso, mediante el empleo de aditivos y adiciones (²⁸ Arredondo, 1961).

En Gran Bretaña, para la reconstrucción de los edificios dañados durante el conflicto bélico, se comienzan a utilizar productos aligerados, con perlita y vermiculita, hasta el punto de llegar a normalizar una serie de productos aligerados (²⁹ Foster, 1964) (³⁰ BS, 1973), que completan el panorama normativo de los yesos densos. Tanto la perlita expandida como la vermiculita exfoliada son productos minerales e inertes, con capacidad de ocluir aire en su interior y mejorar el aislamiento térmico de los revestimientos.

Cada vez fue más frecuente la adición en fábrica de retardadores de fraguado, para la producción de *yeso lento*, muy apreciado en la ejecución de revestimiento. Pero, como se ha dicho, lo más importante es que se inició una investigación sistemática de diferentes tipos de aditivos.

En los morteros gunitados se investigó un tipo de yeso capaz de ser proyectado mecánicamente contra los paramentos. Tiene que ser lo suficientemente lento en su fraguado para que no endurezca en la manguera y, lo suficientemente espeso y adherente para que no escurra por la pared o se desprenda de los techos. Con aditivos modificadores del fraguado, espesantes y retenedores de agua se consigue formular este tipo de yeso, que ya se puede considerar de tercera generación.

También se actuó sobre los yesos de amasado manual mejorando sus características para facilitar la colocación. Así, cada vez fue más amplio en tiempo abierto o período en el que el yeso, después de amasado con el agua, se puede trabajar. Se obtienen así los denominados yesos manuales de *fraguado controlado*.

El proceso se completa al producirse yesos aligerados de proyección mecánica, tan aditivados como éstos y, además, aligerados con perlita.

El proceso de adición además produce un aumento de la resistencia superficial, por lo que el panorama se completa con los yesos de alta dureza.

Como hemos visto, en España, empieza a utilizarse de forma masiva el yeso para revestimientos con los árabes, y desde entonces, su empleo ha estado ligado a la tradición constructiva de nuestro país, fundamentalmente por tres factores:

- a) La gran abundancia de terreno yesífero, que representa un 60% del total de la superficie del país.
- b) La gran calidad de la materia prima, con más del 80-85 % de pureza.
- c) Es un producto cuya fabricación es sostenible con el medio ambiente, al requerir temperaturas en su procesado más bajas que otros productos de la construcción (200°C - 700°C).

La palabra yeso recoge dos acepciones diferentes. Sirve para designar un mineral y el producto industrial obtenido a partir de él. Existen distintas procedencias de la materia prima utilizada en la fabricación del yeso como material de construcción: aljez o piedra de yeso, yeso de desulfuración, fosfoyeso, fluoranhidrita.

El yeso como materia prima, es la roca denominada aljez o piedra de yeso. El aljez o piedra de yeso es una roca de origen sedimentario (evaporita) de precipitación química, constituida por cloruros y sulfatos de calcio, magnesio y potasio, muy abundante en la naturaleza, formada por evaporación del agua de mar en la Era secundaria y terciaria. Esta roca, está constituida principalmente por sulfato de calcio que cristaliza con dos moléculas de agua ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$), denominado sulfato de calcio dihidrato o simplemente dihidrato. Se presenta en la naturaleza en distintas variedades: yeso selenítico, yeso nodular o alabastrino, yeso fibroso, yeso lenticular. Además cada uno de estos yesos puede presentarse en varias morfologías: punta de flecha, rosa del desierto.

1.1.1.- El yeso como material de construcción.

Llamamos yeso de construcción al producto pulverulento procedente de la cocción de la piedra de yeso o aljez, que una vez mezclado con agua, en determinadas proporciones, es capaz de fraguar en contacto con el aire. El aljez, o sulfato de calcio dihidrato, tiene 2 moléculas de agua débilmente unidas al sulfato de calcio, y mediante un pequeño incremento de temperatura (entre 150°C y 180°C) se desprende el agua en forma de vapor quedando el sulfato de calcio con $1/2$ molécula de agua solamente, obteniéndose un producto denominado sulfato de calcio hemihidrato, o simplemente semihidrato, de fórmula química $\text{CaSO}_4 + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. Al sulfato de calcio hemihidrato molido a polvo se le denomina escayola de construcción.

La $1/2$ molécula de agua del hemihidrato está fuertemente ligada al sulfato de calcio y para desprenderla necesitaremos un incremento de temperatura mucho mayor, obteniéndose así el sulfato de calcio anhidro, llamado anhidrita, de fórmula química CaSO_4 y está constituida por cloruros y sulfatos de calcio, magnesio y potasio.

Las distintas fases del sistema $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ que podemos encontrar, en función de la temperatura de cocción, son las siguientes (Tabla 1):

$\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de calcio dihidrato
$\text{CaSO}_4 - \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de calcio hemihidrato en sus distintas variedades alotrópicas α ó β
CaSO_4	Anhidrita III, o soluble, en sus variedades: III β , III β' , III α
	Anhidrita II, en sus variedades: All-s (soluble), All-u (insoluble), All-E (disociada parcialmente).
	Anhidrita I

Tabla 1: Fases del sistema del yeso. (Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

El hemihidrato se presenta en dos formas alotrópicas llamadas hemihidrato α y hemihidrato β , según haya sido la forma de cocción del aljez. Para la formación del hemihidrato α es necesaria una atmósfera, dentro del horno, saturada en vapor de agua o próxima a la saturación, por este motivo, cuando se fabrica el hemihidrato β en calderas siempre se produce algo de hemihidrato α , puesto que en las calderas existe vapor de agua en mayor o menor cantidad.

El hemihidrato α es más compacto que el β , al microscopio tiene aspecto sedoso y brillante con multitud de cristales muy finos aciculares entrelazados, teniendo mayores resistencias mecánicas.

El hemihidrato β es esponjoso, no se reconocen los caracteres cristalinos, tiene mayor contenido energético, es más soluble y por lo tanto tiene menor estabilidad.

La anhidrita soluble (anhidrita III) es un sulfato cálcico anhidro que presenta gran avidez por el agua, pasando rápidamente a hemihidrato. Existen también formas alotrópicas α y β según procedan de la deshidratación de un hemihidrato u otro. Industrialmente presenta poco interés.

La anhidrita II artificial es un sulfato cálcico anhidro con la característica de ser prácticamente insoluble, es decir, no suele tomar agua en cantidad apreciable, siendo un producto prácticamente inerte. (Figura 1).

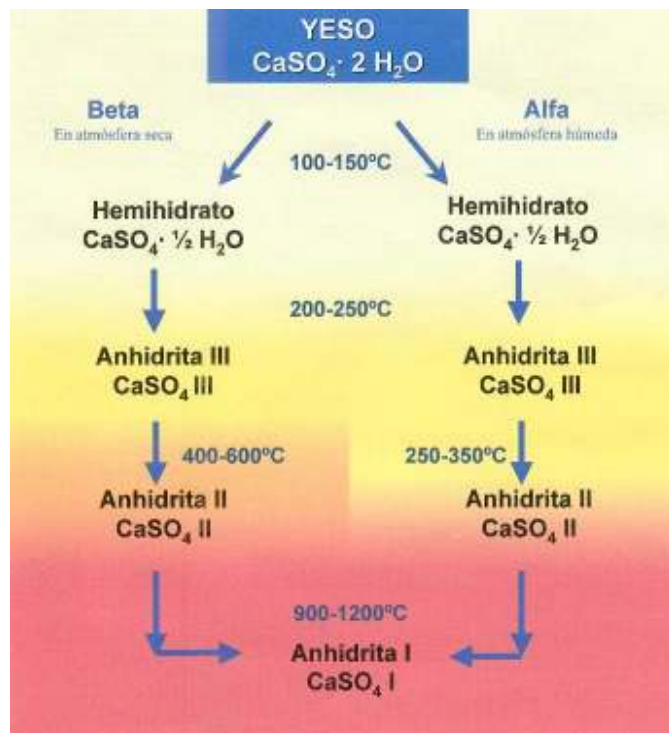


Figura 1: Fases del sistema del yeso. (Gomis Yagües, V. Universidad de Alicante). (Fuente: Algiss).

1.1.1.1.- Fabricación. Deshidratación industrial del aljez.

Aunque ciertos subproductos de la industria se pueden reciclar y dar lugar a yeso calcinado (desulfoyeso, fosfoyeso), no se consideran en esta Tesis Doctoral.

Las etapas elementales para la fabricación del yeso, a partir del aljez son las siguientes:

- Extracción.
- Calcinación.
- Expedición.

a) La extracción:

La extracción, se realiza en la cantera y comprende también los procesos de trituración y homogenización.

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. La piedra barrenada se presenta en grandes bloques que contienen entre un 0% y un 3% de humedad (agua de cantera).

- *Trituración:* la piedra se transporta a las plantas de trituración, normalmente en la propia fábrica de yeso, mediante cintas transportadoras (Fotografía 4).



Fotografía 4. Cinta transportadora de bandas. (Fuente Algiss).

Para la reducción del tamaño de la piedra de aljez, se utilizan machacadoras de impacto o de mandíbulas y trituradoras de rodillo simple con tamiz y retorno.

Las machacadoras de impacto (Fotografía 5) o molinos de rodillos se usan para la reducción al tamaño intermedio de partícula, y los molinos de martillos o molinos pendulares se usan para obtener los tamaños de partícula más pequeños.



Fotografía 5. Machacadora de impacto. (Fuente Algiss).

El tamaño del grano (Tabla 2) viene determinado por el sistema de calcinación o por el uso final a que vaya destinado el yeso fabricado:

Sistema de calcinación	Tamaño del grano (mm)
Horno rotatorio	0-25
Marmita	0-2
Marmita con unidad de secado y molino combinado	0 - 0,2
Horno transportador	4-60
Aljez y anhidrita natural para cemento	5-60

Tabla 2. Tamaño del grano en función del sistema de calcinación utilizado. (Del Río Merino, M. Tesis Doctoral, 1999)

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, este sistema aún se practica en Gran Bretaña.

- *Homogeneización*: 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 donde se ha producido la actuación.

b) La calcinación:

La calcinación incluye los procesos de: precalentado, calcinación, (propriadamente dicho), y refino.

Con la calcinación se produce la deshidratación del yeso. Esta depende de factores como: la temperatura, el tiempo, el tipo de aljez, etc.



Matemáticamente la cantidad que requiere el hemihidrato para convertirse en dihidrato es de 18,6 g de agua por 100 g de yeso.

El peso molecular (PM) del sulfato hemihidrato de calcio es de 145, el PM del agua es 18, por tanto el peso que se añade será de $1,5 \times 18 = 27$ g por cada 145 g haciendo la proporción se obtiene que para 100 g de hemihidratado se necesitan 18,6 g de agua.

Aunque en la actualidad existen hemihidratados que pueden trabajar con cantidades muy próximas a la teórica, en general para aplicaciones específicas y pequeñas, lo usual es trabajar entre 40-80 g/100 g de hemihidratado.

Industrialmente, es de suma importancia que la deshidratación se consiga en el más corto periodo 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 el laboratorio, pues es difícil producir fases puras durante la fabricación, obteniéndose en general, mezclas de fases del sistema SO_4Ca .

Se obtienen tres tipos de An II calcinada, dependiendo de la temperatura de cocción y del tiempo:

1.- An II-s. (anhidrita ligeramente soluble), producida a temperatura entre 300°C y 500°C.

2.- An II-u. (anhidrita insoluble), producida a temperatura entre 500°C y 700°C.

3.- An II-E (anhidrita disociada parcialmente), yeso Estrichgips, producida a temperatura por encima de los 700°C.

En la práctica, la diferencia entre estos productos radica en el tiempo de rehidratación, que para la An II-s es rápido, para la An II-u es lento y para la An II-E es un término medio, un poco más rápido que el la An II-u . Es muy posible la transición entre estos diferentes estados de reacción.

La An II-E está formada por una mezcla sólida An 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 1450°C.

Las formas y dispositivos de calcinación para la producción de yeso son muy variados; desde la utilización de técnicas artesanales, hasta los procesos industriales automatizados. En general, el tipo de proceso a utilizar está en función del producto final que se quiere obtener.

Los distintos tipos de hornos que se utilizan en la cocción del yeso se dividen en dos grupos, según estén o no en contacto con la piedra los gases combustibles:

- Hornos en contacto directo con los gases de combustión: pueden ser fijos (artesanal, cuba y colmena), o rotatorios.

- Hornos sin contacto directo con los gases de combustión: pueden ser también fijos (artesanal, panadero, autoclave, caldera) o rotatorios. Las marmitas pueden ser verticales u horizontales.

La escayola suele estar constituida por una mezcla de semihidratos alfa y beta.

1.1.1.2.- Síntesis de laboratorio del yeso.

Los rangos de estabilidad termodinámica para las fases del sulfato cálcico son las siguientes (Figura 2): 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
Semihidrato
Anhidrita III
Anhidrita II

Figura 2: Deshidratación progresiva del Sulfato de calcio dihidrato hasta la formación de la Anhidrita II. (Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

En condiciones atmosféricas normales, el semihidrato y la anhidrita III son estables, 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.

Para sintetizar fases puras en el laboratorio, se parte de semihidrato 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 beta.

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 pequeña, se forma directamente anhidrita III beta, sin formación intermedia de semihidrato. La superficie específica de esta Anhidrita puede ser hasta diez veces superior a la de la Anhidrita III beta,

El semihidrato alfa se obtiene a partir del dihidrato con una presión parcial de vapor de agua elevada, por ejemplo, por encima de 45°C en soluciones acidas o salinas, o por encima de 97,2°C en agua bajo presión. Una eliminación cuidadosa del agua a 50°C en vacío ó 100°C, a presión atmosférica, produce Anhidrita III alfa.

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 semihidrato.

La Anhidrita III alfa absorbe el vapor de agua para formar semihidrato alfa, además el semihidrato en contacto con la humedad absorbe, de forma reversible, hasta un 12% de su peso en agua sin convertirse en dihidrato. Este agua no estequiométrica del semihidrato, puede ser eliminada completamente secando a 40°C.

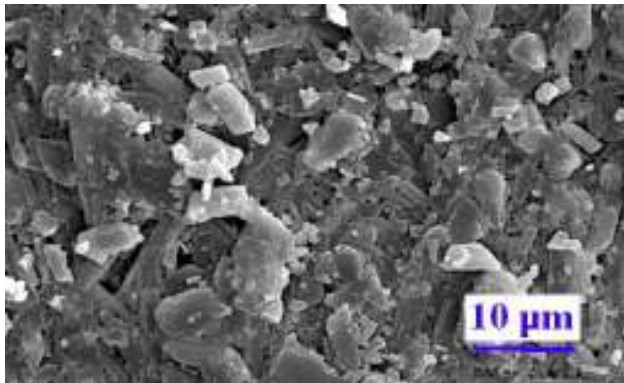
La Anhidrita II se forma entre los 200°C y los 1180°C. Por encima de 1180°C, se forma la anhidrita I; por debajo de 1180°C se convierten en anhidrita II.

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 aun no han sido consistentemente demostradas, debido a que la cinética de los cambios de fase está a menudo inhibida, porque las condiciones de ensayo no han sido definidas con precisión.

1.1.1.3.- Mecanismo de fraguado del yeso, influencia del agua en las características del producto final. Aditivos para el control del fraguado.

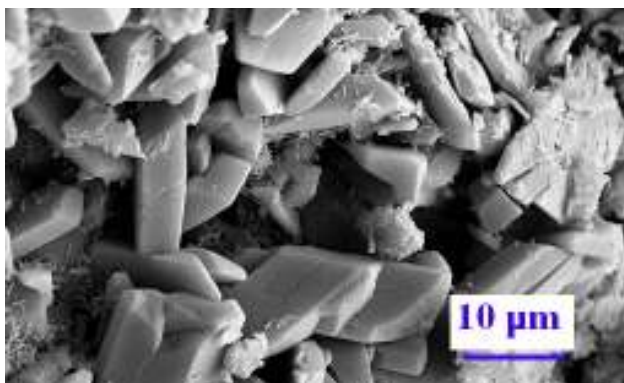
La capacidad de endurecer las fases anhidras del yeso, al añadirles agua, en poco tiempo volviendo a su estado original de sulfato de calcio dihidrato es lo que se conoce como fraguado.

El fraguado ocurre al solubilizarse el sulfato de calcio semihidrato en el agua y restituirse el agua combinada necesaria para formar el sulfato de calcio dihidrato. Este último por ser más insoluble que el sulfato de calcio semihidrato, precipita, volviéndose a disolver más sulfato de calcio semihidrato y precipitando más sulfato de calcio dihidrato. Los cristales de sulfato de calcio dihidrato formados se entrecruzan formando una estructura (Fotografía 6).



Fotografía 6: Estructura de cristales de yeso, obtenida por microscopía electrónica de barrido (Fuente: ¹¹⁷Gomis Yagües, V. Universidad de Alicante).

La velocidad de secado (Fotografía 7) influye en el tamaño de los cristales formados en el fraguado: velocidades de secado pequeñas producen cristales más grandes que los producidos con velocidades de secado más rápidas. La estructura formada posee unas cualidades de dureza superficial y resistencia mecánica adecuada para revestimientos interiores y piezas prefabricadas.



Fotografía 7: Cristales de yeso formados por una velocidad de secado pequeña. (Fuente: ¹¹⁷Gomis Yagües, V. Universidad de Alicante).

El sulfato de calcio semihidrato, 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 y estable, endurece, porque el dihidrato del sulfato de calcio forma

agujas o cristales, que crecen y se entrelazan entre sí, provocando un aumento de volumen, mayor a medida que la cantidad de agua de amasado es menor.

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 esta, el sulfato de calcio semihidrato, en presencia de agua, forma una solución saturada, aproximadamente de 8 g por litro, a 20°C. Hoy día se sabe que esta solución es de sólo 2 g/l a 20°C. En todos los casos, la temperatura afecta a la proporción de hidratación de yeso; esta proporción aumenta hasta temperaturas de unos 30°C y decrece posteriormente. (⁴ Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

La formación de los cristales de dihidrato cumple las leyes de formación del núcleo y del crecimiento del cristal, la mezcla y la humectación del semihidrato en polvo, que provocan la desintegración de las partículas del semihidrato, es seguida por un corto período de inducción, después del cual, el núcleo se forma a partir de la solución sobresaturada. La acumulación de cristales del dihidrato muy pequeños con gran exceso de agua, ha sido descrito por ⁽⁸⁵⁾ Kronert y otros (1979), 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 (teoría Von Weimam) y el índice de crecimiento del cristal es proporcional a la sobresaturación absoluta (ecuación de Nemst-Noyes). El semihidrato se convierte directamente en dihidrato; no existen etapas intermedias. La anhidrita III, se convierte en dihidrato mediante una etapa intermedia de paso a semihidrato, 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 solidifica formando una estructura de dihidrato, una cristalización final, que 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 semihidrato beta, 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 esta.
- El principio y el fin de fraguado.
- La densidad final del producto seco.

En el sistema de fabricación del yeso influye en gran medida su tecnología. Por ejemplo, el semihidrato beta 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. Este 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 alfa, 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 beta y el yeso multifásico requieren más agua de amasado que el yeso alfa 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 determina 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 semihidrato 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, determinando en gran medida la trabajabilidad de los yesos multifásicos.

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 absorbe 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 natural de yeso calcinado producen 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 de yeso calcinado mediante la inyección de pequeñas cantidades de agua que contenga un agente estabilizante; de esta forma se puede prevenir la formación de dihidrato. (⁴ Del Río Merino, Mercedes. Tesis doctoral, 1999)

Resistencia del yeso:

La resistencia de yeso seco fraguado es directamente proporcional a su densidad; por consiguiente, depende principalmente de su porosidad. 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 alcanzando su valor final cuando se ha llegado al equilibrio con el contenido en humedad.

Si la humedad continua, se rebaja la resistencia debido a cambios cristalinos y estructurales, apareciendo una recristalización, que implica los 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, aun 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 (⁸⁶ Forg, G., 1989). Usado en proporciones inferiores al 0.1% en peso, tiene un efecto retardante y sólo rebaja la resistencia ligeramente, cantidades superiores al 0.2% en peso, cambian 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. (³⁵ Murat (1977) estudio 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.

Aditivos de control del fraguado.

Tanto el mezclado como el amasado de yeso calcinado y agua para formar una pasta de consistencia específica pueden estar afectados por la presencia de agentes

humectantes. La mayor parte de éstos, llamados plástificantes o agentes reductores de agua, pueden ser alquilarilsulfonatos, lignosulfonatos o resinas de melamina. 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, sin embargo estos productos influyen muy poco en la demanda de agua de amasado.

El fraguado y endurecimiento pueden acelerarse o retardarse por medio de numerosos aditivos. Varios ácidos inorgánicos y sus sales son muy útiles, como acelerantes, especialmente en 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.

Otros retardantes disminuyen el índice de disolución del semihidrato 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 el mercado existen diferentes productos usados como aditivos en hormigones y morteros y en yeso, con el fin de obtener una serie de propiedades adicionales, complementarias a las del propio material. Se puede destacar algunos en función de sus características.

Aditivo MELMENT L10

Aditivo superplastificante incoloro que actúa como acelerante de endurecimiento, de la casa Basf (Tabla 3).

- Datos del Producto

Almacenamiento: 2 años desde su fecha de fabricación, en su envase de origen, herméticamente cerrado y no deteriorado.

Al resguardo de heladas y acción directa del sol, entre +5°C y +35°C.

- Datos técnicos

Composición química: Polímeros sintéticos de melamina

Densidad: $1,2 \pm 0,03$ kg/l (20°C)

pH = $9,5 \pm 1$

- Detalles de Aplicación

Las dosificaciones habituales son del 0,8 - 4,4 % sobre peso de yeso. Nosotros según sus instrucciones aplicamos 1,2 y 4,4 %

- Instrucciones de Aplicación

El Melment L10 puede ser incorporado al agua de amasado antes de su adición del yeso.

Propiedades	Descripción
Tipo de aditivo Melment L10	polímeros sintéticos de melamina.
Forma	Líquida
Color	Incoloro.
pH	9,5 +/- 1
Densidad	$1,2 \pm 0,03$ kg/l
Viscosidad a 28 °C	30 cps
Reactividad	Inmediata
Vida en almacén	12 meses

Tabla 3. Resumen de las propiedades del aditivo Melment L10. (Fuente: ¹¹⁸BASF).

Aditivo Sikament® TN-100

Aditivo superplastificante para yesos de la casa Sika para la producción de morteros de yeso fluido o como reductor de agua (Tabla 4).

- Datos del Producto

Apariencia/Color: Líquido marrón oscuro.

Presentación: Contenedor de 1 m³.

Almacenamiento: 2 años desde su fecha de fabricación, en su envase de origen, herméticamente cerrado y no deteriorado. Al resguardo de heladas y acción directa del sol, entre +5°C y +35°C.

- Datos técnicos

Composición química: Naftaleno formaldehído

Densidad: ~ 1,2 kg/l (20°C)

pH ≈ 8

- Detalles de Aplicación

La dosificación siempre se determinará mediante ensayos previos. Los valores habituales oscilan entre el 0,8% y el 1% del peso del yeso. Sika recomienda adicionarlo a Sikatard® 930, ambos al 1% en peso del yeso.

- Instrucciones de Aplicación

Sikament TN-100 puede ser incorporado al agua de amasado antes de su adición del yeso.

Propiedades	Descripción
Tipo de aditivo Sikament TN-100	Naftaleno formaldehído.
Forma	Líquida
Color	Líquido marrón oscuro.
pH	≈ 8
Densidad	1,2 kg/l
Viscosidad a 28 °C	
Reactividad	Inmediata
Vida en almacén	24 meses

Tabla 4. Resumen de las propiedades del aditivo Sikament TN-100. (Fuente: ³⁸Sika).

Aditivo Sikatard® 930

Aditivo retardador de fraguado para yesos, desarrollado para controlar la disolución del yeso. De esta forma, las mezclas de morteros pueden estabilizarse

durante cierto periodo de tiempo sin que fragüen. Este periodo está sujeto a la dosificación empleada (Determinada mediante pruebas de laboratorio) (Tabla 5).

- Datos del producto

Apariencia/color: Líquido incoloro.

Almacenamiento: 1 año, en su envase de origen, herméticamente cerrado y no deteriorado, a temperaturas entre +1°C y +35°C protegido del sol y las heladas.

- Datos técnicos

Solución acuosa de sales policarbonatadas exentas de cloruros.

Densidad: Aprox. 1,12 kg/lit.

pH : Aprox. 3.

- Detalles de aplicación

En función de la trabajabilidad y del retraso de fraguado requerido, la dosificación a utilizar estará comprendida entre el 0,2 y el 2% del peso del yeso. Debido a la gran cantidad de factores que afectan al tiempo de manejabilidad, es imprescindible la realización de ensayos previos para cada caso. Sika recomienda adicionarlo junto a Sikament TN-100, el 1% para ambos con respecto al peso de yeso.

- Instrucciones de Aplicación

Sikatard® 930 puede ser incorporado al agua de amasado antes de su adición del yeso.

Propiedades	Descripción
Tipo de aditivo Sikatard® 930	Sales policarbonatadas
Forma	Líquida
Color	Incoloro.
pH	~ 3
Densidad	1,12 kg/l
Viscosidad a 28 °C	
Reactividad	Inmediata
Vida en almacén	12 meses

Tabla 5. Resumen de las propiedades del aditivo Sikatard 930. (Fuente: ³⁸Sika).

Aditivo Sikamix 3300

Aditivo superfluidificante de alto rendimiento a base de melaminas modificadas para yesos. Se utiliza como aditivo en la fabricación de placas de cartón-yeso (Tabla 6).

- Datos de Producto

Apariencia/Color: Líquido marrón

- Datos técnicos.

Solución acuosa de Melaminas modificadas.

Densidad: 1,2 kg /l.

pH: 12

- Almacenamiento 1 año desde la fecha de fabricación, en sus envases originales bien cerrados y no deteriorados a temperaturas entre 5°C y +30°C. Proteger de las heladas.

- Detalles de Aplicación

Para aplicaciones típicas: 0,2 - 1,2% en peso de yeso. La dosis puede variar debido a los cambios en las materias primas, métodos de calcinación del yeso y parámetros de funcionamiento de cada planta. Se recomienda realizar ensayos previos.

- Instrucciones de Aplicación

Sikamix 3300 puede ser incorporado al agua de amasado antes de su adición del yeso.

Propiedades	Descripción
Tipo de aditivo Sikamix 3300	Melaminas modificadas.
Forma	Líquido.
Color	Líquido Marrón.
pH	~ 12
Densidad	1,2 Kg /l. aprox.
Viscosidad a 28 °C	-
Reactividad	Inmediata

Contenido en sólidos	36%
Vida en almacén	1 año en su envase bien cerrado y no deteriorado.

Tabla 6. Resumen de las propiedades del aditivo Sikamix 3300. (Fuente: ³⁸Sika).

Aditivo Sika Viscocrete G-2 (VP)

Es un superfluidificante de alto rendimiento basado en la tecnología de policarboxilatos con función dispersante para yesos. Está especialmente formulado para proporcionar la máxima reducción de agua y la estabilización de propiedades en la fabricación de productos a base de yeso. Proporciona fluidez a las lechadas de yeso a bajas dosificaciones (Tabla 7).

- Datos de Producto

Apariencia/Color Líquido Marrón claro/ incoloro

- Datos técnicos.

Solución acuosa de policarboxilatos modificados.

Densidad: 1050 a 1150 kg/l

pH : 3.5 - 4.5 a 23°C (solución al 40%)

Contenido en Cloruros (Cl⁻) Libre de cloruros según EN 934-2

Almacenamiento: 1año desde la fecha de fabricación, en sus envases originales bien cerrados y no deteriorados. A temperaturas entre 5°C y +30°C. Proteger de la luz directa del sol y las heladas.

- Detalles de Aplicación

Para aplicaciones típicas: 0,2 - 0,8% en peso de yeso. La dosis puede variar debido a los cambios en las materias primas, métodos de calcinación del yeso y parámetros de funcionamiento de cada planta. Se recomienda realizar ensayos previos.

- Instrucciones de Aplicación

Viscocrete puede ser incorporado al agua de amasado antes de su adición del yeso.

Propiedades	Descripción
Tipo de aditivo Viscocrete	Policarboxilato.
Forma	Líquida
Color	Color Líquido Marrón claro.
pH	3.5 - 4.5 a 23°C (solución al 40%)
Densidad	1.050 a 1.150 kg/l
Viscosidad a 28 °C	
Reactividad	Inmediata
Vida en almacén	12 meses

Tabla 7. Resumen de las propiedades del aditivo Viscocrete G-2 (VP). (Fuente: ³⁸Sika).

1.1.2.- Fabricación del yeso.

La piedra de yeso o aljez se extrae de canteras a cielo abierto o de canteras subterráneas. Esta materia prima extraída, previamente a su cocción, se tritura utilizando maquinaria apropiada, como pueden ser los molinos de rodillos, machacadoras de mandíbulas. El tamaño de grano tras su trituración viene determinado principalmente por el método o sistema de cocción a emplear.

Proceso productivo del yeso (Figura 3):

- 1.- Canteras.
- 2.- Trituración de la materia prima.
- 3.- Almacenado en silos de la materia prima.
- 4.- Horno de cocción.
- 5.- Molienda del yeso fabricado.
- 6.- Almacenado en silos del yeso fabricado.
- 7.- Zona de carga directa del yeso en camiones cisterna.
- 8.- Zona de ensacado automático del yeso.

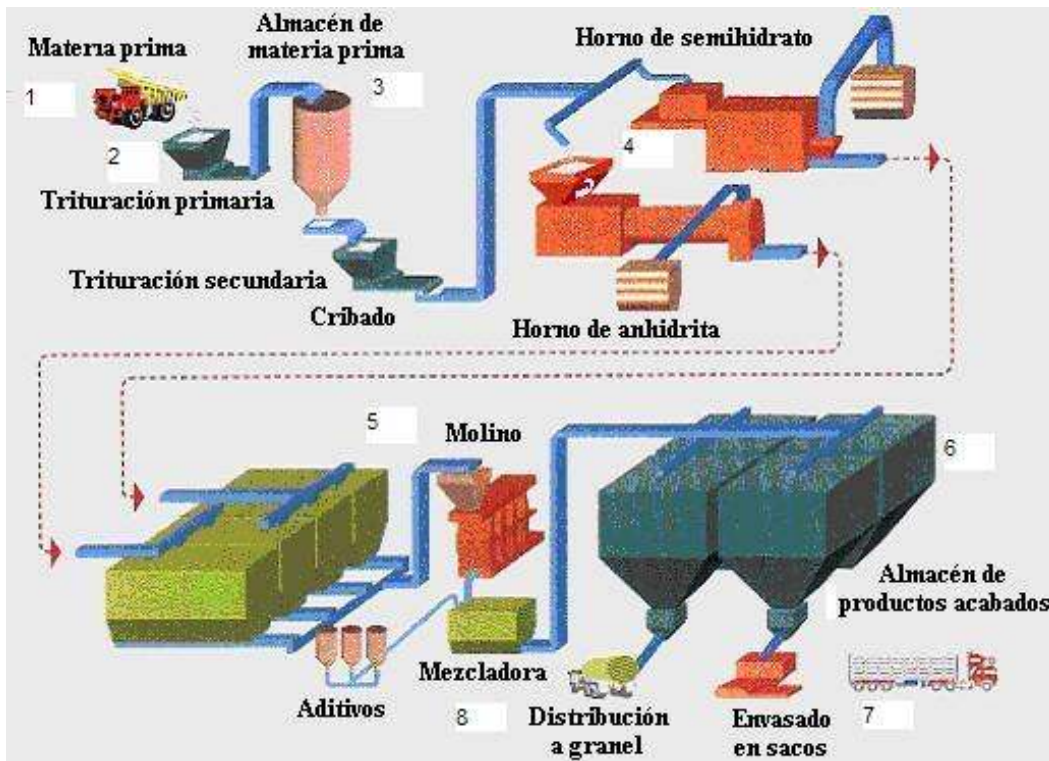


Figura 3: Fabricación de yeso. (¹¹⁷Gomis Yagües, V. Universidad de Alicante). (Fuente: Algiss).

Los diversos sistemas de cocción del yeso se dividen en dos grandes grupos, en función de que los gases de combustión estén o no en contacto con la materia prima. Entre ellos, destacamos: los hornos rotatorios, los hornos de caldera (marmitas) y las autoclaves. La elección del tipo de horno está en función principalmente del producto final que se quiere obtener, y de su rentabilidad.

Tras la cocción de la materia prima, ésta se muele finamente para conseguir una granulometría correcta, y se almacena en silos hasta su distribución posterior, bien en sacos o a granel.

Hornos utilizados en la calcinación de la piedra de yeso:

- *Horno Rotatorio*: Está particularmente indicado para la calcinación de la piedra de aljez granulada con diámetro entre 0 y 25 mm. No es preciso un presecado del mineral, que alimenta continuamente al horno en contracorriente con los gases calientes mediante un alimentador de cinta por peso. Los gases calientes se producen en una cámara de combustión de ladrillo. El exterior del horno no es de ladrillo sino que consiste en gruesas chapas de acero que garantizan una distribución uniforme de las partículas a lo largo de la sección transversal del horno. Se consigue una eficiencia térmica elevada debido a la transferencia directa del calor de los gases calientes al sólido.

La producción de estos hornos puede alcanzar las 600 Tm/día. Se utilizan para la producción de semihidrato β , con temperaturas de calcinación entre 120°C y 180°C, y para la anhidrita temperaturas entre 300 y 800°C. Su mezclado mutuo posterior, en las proporciones adecuadas para obtener las características que se le quiera dar al producto final, permite obtener los llamados yesos multifásicos.

El consumo de energía calorífica de estos hornos suele ser del orden de 1000 MJ/Tm de material deshidratado en los de semihidrato y de 1400 MJ/tm en los de anhidrita a los que hay que adicionar un consumo eléctrico de 15 - 20 kWh/tm que equivalen a 54 - 72 MJ/tm.

- *Horno Flash*. En este tipo de horno, los gases calientes a 650°C y elevada velocidad se ponen en contacto en una cámara con el material que está finamente molido. El material es arrastrado por los gases y llevado a ciclones donde se separa el producto. El proceso de deshidratación ocurre en sólo unos pocos segundos (entre 1,5 y 2 s) obteniéndose un producto a una temperatura media del orden de 160°C. Existen calcinadores donde la cámara inicial de contacto gases de combustión - producto es un molino con objeto de reducir más el tamaño de partícula.

El producto obtenido suele llevar un elevado contenido en anhidrita III lo que hace que sea muy reactivo y capaz de endurecer en sólo unos minutos cuando es hidratado. Por ello se utiliza en la fabricación de prefabricados tales como cartón - yeso al incrementar la velocidad de producción.

- *Marmita y otros hornos de fuego indirecto*. La marmita es una unidad de calcinación en donde el yeso es calentado indirectamente a través de tubos o a través de una doble cámara exterior por los que circulan los gases de combustión calientes: se trata de hornos en los que los gases de combustión no se ponen en contacto directo con la piedra de yeso.

El material colocado en el interior para ser calcinado suele ser agitado mecánicamente para mejorar la transferencia de energía y la homogeneidad del producto.

Los hornos suelen ser discontinuos en los que el material a calcinar se carga en el horno, se calcina y finalmente se descarga aunque también existen hornos con carga y descarga de material continua. El control de las temperaturas a las que queda sometido el producto es mayor y con ello la homogeneidad del producto obtenido. Sin embargo la eficiencia térmica es menor que en los hornos rotatorios de fuego directo. Suelen utilizarse para la producción de semihidrato beta que posteriormente va a ser utilizado en la fabricación de escayola.

En la Figura 4 se muestra una fotografía de un horno discontinuo de fuego indirecto que utiliza como combustible gas natural. En la parte inferior se observan los quemadores. La parte central superior consiste de un cilindro con paletas deflectoras en su interior donde se carga el material a calcinar. El cilindro gira de forma similar a un horno rotatorio pero a diferencia de éste, el material no está entrando y saliendo continuamente sino que se realizan operaciones discontinuas de carga, calcinación y descarga del producto.

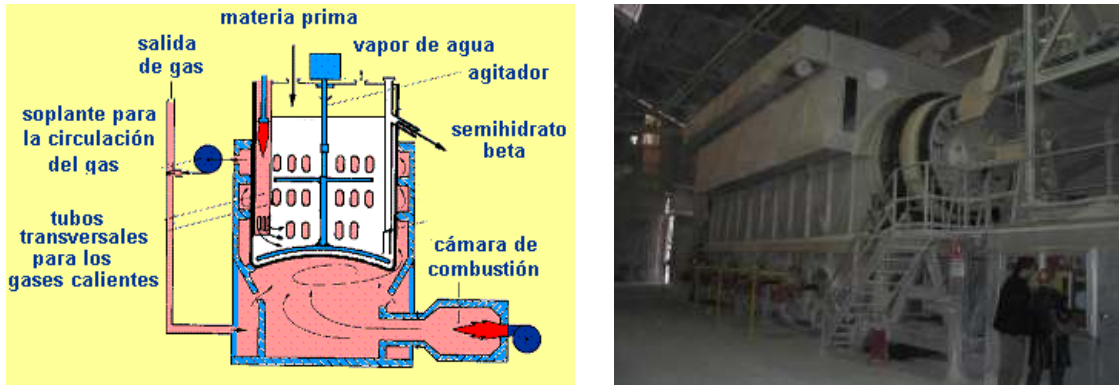


Figura 4: Horno discontinuo. (Fuente: ¹¹⁷Gomis Yagües, V. Universidad de Alicante. Factoría de Algiss)

- *Autoclave*: Se utiliza para obtener yeso alfa, sometiendo al yeso a calefacción a presión en atmósfera saturada de vapor de agua y en ciclos de cocción largos (14 a 16 horas).

El resultado es una escayola de cristales mucho más perfectos y por tanto, de menor superficie específica, lo que hace que se necesite una menor cantidad de agua para su amasado (⁷³ Doménech Carbó, M.T. 2006)

1.1.2.1.- Tipos de yeso que se fabrican en España (RY-85).

En España, las especificaciones de los yesos y escayolas de construcción están recogidas en el ⁽⁹⁰⁾ Pliego de Recepción de Yesos del año 1985 (RY-85), derogado por el RD 1371/2007 de 19 de octubre), que hace referencia a las normas UNE 102-010 y UNE 102-011, todo ello derogado, y que tuvo su periodo de transición junto con las normas EN UNE 13279-1 Julio-2009, de 1 de octubre de 2009 hasta 1 de octubre de 2010.

Aunque la normativa vigente es la UNE-EN 13279, se cree conveniente recoger la anterior clasificación, correspondiente a la RY-85, por su simplicidad y por el hecho de que todavía, en la actualidad es habitual encontrarse productos en el mercado con la antigua nomenclatura.

En este ⁽⁹⁰⁾ Pliego (RY-85) se establecen cinco tipos de yesos y escayolas con dos tipos de fraguado (normal y controlado), pues contempla la incorporación de aditivos reguladores de fraguado en todos los productos, menos en el yeso de prefabricados. Además establece las características que deben cumplir los yesos y escayolas. Estas características se determinarán en los ensayos realizados según normas ⁽⁸⁾UNE 102-031 y ⁽⁸⁾UNE 102-032.

En la norma ⁽⁹¹⁾ AENOR EN UNE 13279-1, Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción Parte 1: Definiciones y especificaciones, entre otras cosas define los tipos de yesos y sus definiciones, donde para mejor entendimiento trasponemos las tablas donde definen las familias y sus propiedades en la Figura 5.

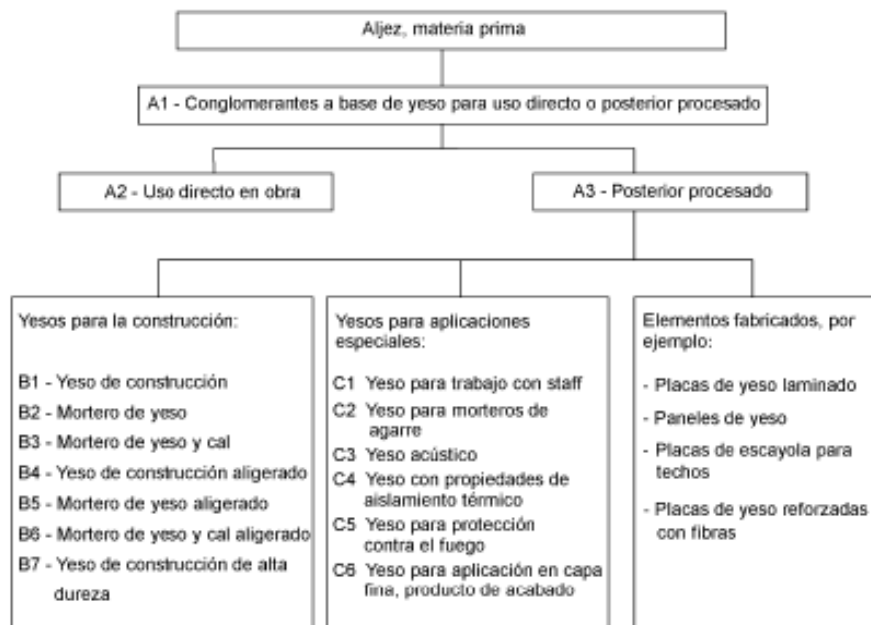


Figura 5. Familia de los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. (Fuente: Norma UNE EN 13279-1)

La designación de los yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso para la construcción se debe hacer según indicación en Figura 6.

Designación	Identificación
Conglomerantes a base de yeso ^a , por ejemplo: – para uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos); – para su empleo directo en la obra; – para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en placas de yeso laminado, en placas de escayola para techos).	A A1 A2 A3
Yeso para la construcción: – yeso de construcción; – mortero de yeso; – mortero de yeso y cal; – yeso de construcción aligerado; – mortero de yeso aligerado; – mortero de yeso y cal aligerado; – yeso de construcción de alta dureza.	B B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7
Yeso para aplicaciones especiales: – yeso para trabajos con staff; – yeso para morteros de agarre; – yeso acústico; – yeso con propiedades de aislamiento térmico; – yeso para protección contra el fuego; – yeso para su aplicación en capa fina, producto de acabado – producto de acabado	C C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7

Figura 6: Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción. (Fuente: Norma ⁹¹UNE EN 13279-1)

Quando las características de los yesos para la construcción se determinen según lo especificado en la ⁽⁴⁸⁾ AENOR UNE EN 13279-2, deben cumplir los valores establecidos en la Figura 7.

Yeso para la construcción	Contenido en conglomerante de yeso %	Tiempo de principio de fraguado min.		Resistencia a flexión N/mm ²	Resistencia a compresión N/mm ²	Dureza superficial N/mm ²	Adherencia N/mm ²
		Yeso de aplicación manual	Yeso de proyección mecánica				
B1	≥ 50	≥ 20 ^b	≥ 50	≥ 1,0	≥ 2,0	-	La rotura se produce en el soporte o en la masa de yeso; cuando la rotura aparece en la interfase yeso-soporte, el valor debe ser ≥ 0,1
B2	< 50						
B3	*						
B4	≥ 50						
B5	< 50						
B6	*						
B7	≥ 50			≥ 2,0	≥ 6,0	≥ 2,5	

^a Según los apartados 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6.

^b En algunas aplicaciones manuales se permite un valor menor que 20 min. En ese caso, el productor debe declarar el tiempo de principio de fraguado.

Figura 7. Especificaciones para los yesos de construcción. (Fuente: Norma UNE EN 13279-2)

Cuando las características de los yesos para la construcción para aplicaciones especiales se determinen según lo especificado en la ⁽⁴⁸⁾ AENOR UNE EN 13279-2, deben cumplir los valores establecidos en la Figura 8.

Yeso para la construcción	Contenido en conglomerante a base de yeso %	Finura de molido				Tiempo de principio de fraguado min.		Resistencia a flexión N/mm ²		Resistencia a compresión N/mm ²	Dureza superficial N/mm ²		
		5 000 µm	1 500 µm	200 µm	100 µm	Vicat	Cuchillo	2h ^d	7d ^e		2h ^d	7d ^e	
C1	Trabajos con staff	> 50	0	0	< 1%	< 10%	-	> 8	> 1,5	> 3,0	-	> 4,0	> 10
C2	Mortero de agarre	> 50	0	-	-	-	> 30	-	-	-	> 2,0	-	-
C3	Yeso acústico ^a	-	-	-	-	-	> 20 ^f	-	-	-	-	-	-
C4	Yeso para aislamiento térmico ^b	-	-	-	-	-	> 20 ^f	-	-	-	-	-	-
C5	Yeso para protección frente al fuego ^c	Desviación respecto al contenido nominal < 10%	-	-	-	-	> 20 ^f	-	-	-	-	-	-
C6	Yeso para capa fina, producto de acabado	> 50	-	0	-	-	> 20 ^f	-	-	> 1,0	> 2,0	-	-
C7	Producto de acabado	> 50	-	-	-	0	> 20 ^f	-	-	> 1,0	> 2,0	-	-

^a El fabricante debe verificar las propiedades acústicas mediante los métodos adecuados indicados en los apartados 5.1.3.1 y/o 5.1.3.2.
^b El fabricante debe verificar las propiedades de aislamiento térmico mediante los métodos adecuados indicados en el apartado 5.1.4.
^c El fabricante debe verificar las propiedades de reacción al fuego mediante los métodos adecuados indicados en el apartado 5.1.1.
^d Después de acondicionar durante 2 h, tras finalizar el tiempo de fraguado, en las condiciones especificadas en el apartado 3.1 de la Norma Europea EN 13279-2:2004.
^e Después de acondicionar durante 7 d en una atmósfera húmeda a (20 ± 2) °C y (95 ± 5)% de humedad relativa, seguido de un secado hasta alcanzar una masa constante a (40 ± 2) °C.
^f En algunas aplicaciones manuales se permite un valor menor que 20 min. En ese caso, el productor debe declarar el tiempo de principio de fraguado.

Figura 8. Especificaciones para los yesos especiales para la construcción. (Fuente: Norma ⁴⁸UNE EN 13279-2)

Características y especificaciones (⁹⁰RY-85):

YG: Yeso grueso: constituido por semihidrato (SO₄Ca + ½H₂O) y anhidrita II artificial (SO₄Ca II). Se utiliza para pasta de agarre en la ejecución de tabicados, en revestimientos interiores y como conglomerante auxiliar de obra. La resistencia mecánica a flexotracción deberá ser como mínimo de 0,2 kN/cm². Cuando el producto esté ensacado, los datos de identificación del producto vendrán impresos en color verde.

YF: Yeso fino: constituido por semihidrato (SO₄Ca + ½H₂O) y anhidrita II artificial (SO₄Ca II) con granulometría más fina que el YG e YG/L. Se utiliza para enlucidos, refilos, blanqueos sobre revestimientos interiores (guarnecidos o enfoscados). La resistencia mecánica a flexotracción deberá ser como mínimo de 0,25 kN/cm². Cuando el producto esté ensacado, los datos de identificación del producto vendrán impresos en color negro.

YP: Yeso de prefabricado: constituido por semihidrato (SO₄Ca + ½H₂O) y anhidrita II artificial (SO₄Ca II), con mayor pureza y resistencia que los yesos YG e YF. Sirve para la ejecución de elementos prefabricados de tabiquería. La resistencia mecánica a

flexotracción deberá ser como mínimo de 0,3 kN/cm². Cuando el producto esté ensacado, los datos de identificación del producto vendrán impresos en color amarillo.

E30: Escayola: constituida fundamentalmente por sulfato cálcico semihidratado (SO₄Ca + ½H₂O). Se aplica en la ejecución de elementos prefabricados para techos y tabiques. La resistencia mecánica a flexotracción deberá ser como mínimo de 0,3 kN/cm². Cuando el producto esté ensacado, los datos de identificación del producto vendrán impresos en color azul.

E35: Escayola especial: constituida fundamentalmente por sulfato cálcico semihidratado (SO₄Ca + ½H₂O) con mayor pureza que la E-30. Se aplica en trabajos de decoración, ejecución de elementos prefabricados para techos, bovedillas y placas y paneles para tabiques. La resistencia mecánica a flexotracción deberá ser como mínimo de 0,35 KN/cm².

Cuando el producto esté ensacado, los datos de identificación del producto vendrán impresos en color azul.

Además de los yesos especificados de fraguado normal, se comercializan otros de fraguado controlado, denominados de clase lenta, por tener un mayor periodo de trabajabilidad. Para caracterizar esta clase se añade una L, después de la designación del tipo, separada por una barra (Tabla 8).

CARACTERÍSTICAS	TIPOS Y CLASES								
	YG	YG/L	YF	YF/L	YP	E-30	E-30/L	E-35	E-35/L
QUÍMICAS									
Agua combinada (% máx)	6		6		6	7		7	
Índice de pureza (% mín)	75		80		85	90		92	
CaSO ₄ .1/2 H ₂ O (% mín)	-		-		-	85		87	
pH (mínimo)	6		6		6	6		6	
FINURA DE MOLIDO									
Retención en el tamiz 0'8 UNE 7.050 (% máx)	-		-		-	0 (*)		0	
Retención en el tamiz 0'2 UNE 7.050 (% máx)	50		15		30	5 (*)		1	

RESISTENCIA MECÁNICA					30					
A FLEXOTRACCIÓN	20 (2,0)		25 (2,5)		30	30 (3,0)		35 (3,5)		
mínima en kp/cm^2 (**MPa)					(3,0)					
TRABAJABILIDAD										
Tiempo en pasar del estado líquido al plástico (Máximo, en minutos)	8	20	8	20	8	8	20	8	20	
Duración del estado plástico (Mínimo, en minutos)	10	0	10	30	10	10	30	10	30	

(*) Cuando la E-30 se emplee para ejecutar elementos prefabricados para tabiques (UNE 102.020), puede admitirse hasta un 30% en el tamiz 0'2 sin limitar la retención en el 0'8.

(**) Los valores en (MPa) son aproximados y tienen carácter indicativo.

Tabla 8: Resumen de las características de los yesos contemplados en el ⁽⁹⁰⁾ Pliego RY-85.

1.1.2.2.- Otros yesos no especificados en el ⁽⁹⁰⁾Pliego RY-85

1.1.2.2.1. Yesos especiales de aplicación manual para la construcción (UNE 102-014-1: 1999; UNE 102-014-2: 1999; UNE 102-014-3: 1999).

Yeso aligerado (YA): Material constituido fundamentalmente por sulfato de calcio en sus distintas fases de deshidratación, que lleva incorporado en fábrica aditivos y agregados ligeros, orgánicos o inorgánicos, tales como perlita expandida o vermiculita exfoliada, para conseguir mejores prestaciones en aislamiento térmico o protección contra el fuego.

Las características mínimas a exigir en este tipo de yeso, determinadas con ensayos realizados según normas ⁽⁹²⁾ AENOR UNE 102-031 y ⁽⁴⁷⁾ AENOR UNE 102-032 son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.
- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.
- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 20 min.
- La densidad aparente será inferior a 800 kg/m^3 .
- La resistencia mecánica mínima a compresión, medida sobre probetas prismáticas de 4x4x16 cm será de 0,5 MPa (N/mm^2)

- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 45 ud Shore C.
- Su pH será mayor o igual a 6.

Cuando el producto esté ensacado, su denominación, los distintivos de calidad si los tiene, y la referencia a su masa, han de estar impresos en el saco en color amarillo.

Yeso de alta dureza (YD): Material constituido fundamentalmente por sulfato de calcio en sus distintas fases de deshidratación, que lleva incorporado en fábrica aditivos y agregados orgánicos o inorgánicos para conseguir mejores prestaciones en dureza superficial.

Las características mínimas a exigir en este tipo de yeso, determinadas con ensayos realizados según normas ⁽⁹²⁾ AENOR UNE 102-031 y ⁽⁴⁷⁾ AENOR UNE 102-032 son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.
- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.
- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 20 min.
- La densidad aparente será superior a 800 kg/m³.
- La resistencia mecánica mínima a compresión, medida sobre probetas prismáticas de 4x4x16 cm será de 6,0 MPa (N/mm²).
- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 75 ud Shore C.
- Su pH será mayor o igual a 6.

Cuando el producto esté ensacado, su denominación, los distintivos de calidad si los tiene, y la referencia a su masa, han de estar impresos en el saco en color gris.

Yeso de terminación (YE/T): Material constituido fundamentalmente por sulfato de calcio en sus distintas fases de deshidratación, que lleva incorporado en fábrica aditivos y agregados orgánicos o inorgánicos.

Se amasa de forma manual o mecánica (taladradora, batidora) consiguiendo una consistencia de pasta que permite su aplicación inmediata de forma manual.

Estos yesos están libres de partículas gruesas que impedirían el logro de una superficie de acabado lisa.

Las características mínimas a exigir en este tipo de yeso, determinadas con ensayos realizados según normas ⁽⁹²⁾ AENOR UNE 102-031 y ⁽⁴⁷⁾ AENOR UNE 102-032 son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.
- La finura de molido, será tal que la masa de yeso retenida en el tamiz de 200 µm sea inferior o igual al 15%.
- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.
- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 50 min.
- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 45 ud Shore C.
- Su pH será mayor o igual a 6.

Cuando el producto esté ensacado, su denominación, los distintivos de calidad si los tiene, y la referencia a su masa, han de estar impresos en el saco en color morado.

1.1.2.2.2. Yesos de construcción de proyección mecánica (UNE 102-015:1999).

Las materias primas de los yesos de proyectar tienen diversos orígenes:

- Piedra natural de yeso: aljez
- Subproductos industriales como desulfoyeso, fosfoyeso y fluoranhidrita

El yeso de proyectar es un yeso que contiene adiciones añadidas en fábrica; estas sustancias añadidas, dan al yeso unas características apropiadas para su buena puesta en obra a través de sistemas mecánicos de proyección.

Yeso de construcción de proyección mecánica (YPM): Conglomerante a base de sulfato de calcio que lleva incorporado en fábrica, aditivos y/o agregados, para conseguir las características adecuadas a su uso. Se aplica sobre un soporte mediante una máquina de proyección.

Las características mínimas a exigir en este tipo de yeso, determinadas con ensayos realizados según normas ⁽⁹²⁾ AENOR UNE 102-031 y ⁽⁴⁷⁾ AENOR UNE 102-032 son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.

- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.

- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 50 min.

- La resistencia mecánica a compresión será igual o superior a 2,0 MPa.

- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 65 ud Shore C.

- Su pH será mayor o igual a 6.

- La densidad aparente será superior a 800 kg/m³.

- La adherencia será tal que la rotura habrá de producirse en la masa de yeso o en el soporte.

Yeso de proyección mecánica de alta dureza (YPM/D): Yeso de proyección mecánica especialmente formulado para satisfacer las especificaciones de los trabajos que requieren altas durezas superficiales.

Las características mínimas a exigir en este tipo de yeso, determinadas con ensayos realizados según normas ⁽⁹²⁾ AENOR UNE 102-031 y ⁽⁴⁷⁾ AENOR UNE 102-032 son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.

- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.

- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 50 min.

- La resistencia mecánica a compresión será igual o superior a 2,0 MPa.

- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 75 ud Shore C

- La densidad aparente será superior a 800 kg/m³.

- La adherencia será tal que la rotura habrá de producirse en la masa de yeso o en el soporte.

Yeso de proyección mecánica aligerado (YPM/A): Yeso de proyección mecánica que contiene agregados ligeros, para incrementar el aislamiento térmico y la protección al fuego de los paramentos.

Las características mínimas a exigir en este tipo de yeso, determinadas con ensayos realizados según normas ⁽⁹²⁾ AENOR UNE 102-031 y ⁽⁴⁷⁾ AENOR UNE 102-032 son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.
- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.
- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 50 min.
- La resistencia mecánica a compresión será igual o superior a 2,0 MPa.
- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 45 ud Shore C.
- Su pH será mayor o igual a 6.
- La densidad aparente será inferior a 800 kg/m³.

La adherencia será tal que la rotura habrá de producirse en la masa de yeso o en el soporte. En la Tabla 9, se observa un resumen de las características de los tesos especiales.

DESIGNACION	YA	YD	YE/T	YPM	YPM/D	YPM/A
CARACTERISTICAS						
Índice de pureza (% mín)	>50	>50	>50	>50	>50	>50
Diámetro de escurrimiento (mm)	165-210	165-210	165-210	165-210	165-210	165-210
Tiempo de principio de fraguado (minutos)	>20	>20	>50	>50	>50	>50
Resistencia mecánica a compresión (N/mm ²)	≥ 0,5	≥ 6	≥ 0,5	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0
Dureza superficial Shore C (ud)	≥ 45	≥ 75	≥ 45	≥ 65	≥ 75	≥ 45
pH (mínimo)	≥ 6	≥ 6	≥ 6	≥ 6	≥ 6	≥ 6
Densidad aparente (kN/m ³)	< 8000	> 8000	-	> 8000	> 8000	< 8000
Adherencia	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple
Finura de molido. Retenido en 200 µm (% max)	-	-	≤ 15	-	-	-

Tabla 9: Resumen de las características de los yesos especiales (RY-85)

1.1.3.- Propiedades del material de yeso.

1.1.3.1.- Trabajabilidad.

El yeso es un material adecuado y de fácil manipulación para ser usado en múltiples derivados prefabricados y directamente en obra. La trabajabilidad del yeso depende de la moldeabilidad, la consistencia variable, el fraguado rápido regulable, la expansión de fraguado, la adherencia, las resistencias iniciales y la modificabilidad o facilidad de trabajo sobre elementos ya fraguados.

Moldeabilidad: El yeso pasa por unos estados plásticos de consistencia variable antes de terminar su proceso de fraguado, en los cuales se le puede dar forma a voluntad. Este carácter formaceo hace posible que se adapte a cualquier tipo de molde, que reproduce de forma precisa, debido a la conjunción de otra propiedad, la *expansión de fraguado*. Esta propiedad hace del yeso un material idóneo para ser utilizado en derivados prefabricados, tales como placas, paneles suelo-techo, molduras, cornisas, bovedillas para forjados.

Consistencia variable: el estado de consistencia que presenta la pasta o el mortero de yeso, al ser trabajado, es regulable a voluntad, principalmente en dos momentos de su proceso. En primer lugar, durante su fabricación, donde la relación de agua/yeso (A/Y) puede variar en un amplio espectro de valores, por ejemplo en el agua de saturación desde 0,3 para semihidrato alfa hasta 0,9 para semihidrato β . (Tabla 10). Esta consistencia normal del producto tiene mucha influencia en su utilización, tanto en la resistencia final, que es inversamente proporcional al cuadrado del factor agua/yeso utilizado, como en el rendimiento del material, o cantidad necesaria del mismo, para obtener una determinada cantidad de producto terminado o dihidrato.

Tipo de yeso según RY-85	Intervalo A/Y del amasado a saturación
E-35	0,7 – 0,74
E-30	0,7 – 0,72
YF	0,65 – 0,68
YP	0,58 – 0,54
YG	0,50 – 0,60

Tabla 10: Valores usuales A/Y correspondiente al amasado a saturación (Fuente: ⁸ATEDY, 2002).

En el caso de amasado por dosificación se parte de una relación A/Y en peso, la cual es fijada previamente con el fin de conseguir una consistencia normalizada. (⁴⁹ Manuales de soluciones constructivas. Saint Gobain Placo Ibérica, S.A., 2010)

La consistencia del producto puede ser regulada a voluntad durante su puesta en obra, dentro de ciertos límites, sin más que variar la cantidad de agua de amasado, o sea, actuando sobre el factor agua/yeso de utilización. Indudablemente esto tendrá consecuencias más o menos importantes para el producto terminado, según su destino, ya que de la misma depende tanto la resistencia final y el tiempo de fraguado, como la porosidad y densidad del yeso endurecido, y tiene notables influencias en las propiedades de habitabilidad y durabilidad. Dependiendo por tanto de la cantidad de agua añadida para su fraguado y de la naturaleza de cada yeso obtenemos consistencias variables y productos con diferentes densidades (Tabla 11)

A/Y (en peso)	Densidad (Kg/cm ³)			
	C.S.T.B. (1)	Blachere (2)	C.E.B.T.P. (3)	Collomb (4)
0,6	0,115	0,0012	0,001235	0,00125
0,7	0,108	-	-	-
0,8	0,100	0,0010	-	-
0,9	0,095	-	-	-
1,0	0,088	0,0009	0,000835	0,00085
1,1	-	0,0008	-	-
1,2	0,75	-	-	-

(1) "ChiersTechniques" 1973-74. París.

(2) E. Blachere. Saber construir. Barcelona 1.967.

(3) Collomb. Eurogypsum. Lyon 1.971. Boletín Informativo del yeso. N°4. Enero 1972

(4) Collomb. Las propiedades del yeso con respecto al aislamiento acústico. B.I.Y n° 14. Junio 1974

Tabla 11: Relación entre el agua de amasado y la densidad (Fuente: ⁴Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Fraguado regulable: el yeso es un producto de fraguado rápido. Este tiempo de fraguado es muy variable según haya sido el proceso de fabricación y dependerá de las distintas proporciones que el producto tenga, de las distintas fases de deshidratación del sistema sulfato de calcio - agua, o sea, de semihidrato alfa o beta, anhidrita III o II e incluso anhidrita I y dihidrato, para obtener diferentes tiempos de fraguado que pueden regularse en fábrica dentro de la constante general de ser tiempos relativamente cortos.

En su puesta en obra, dependiendo de la cantidad de agua de amasado, se puede regular la duración del fraguado de yeso. A mayor cantidad de agua de

amasado, a proporciones más elevadas de la relación agua/yeso, corresponden tiempos de fraguado más prolongados.

Hay otros factores que influyen en la velocidad del fraguado durante la puesta en obra del yeso, por ejemplo, la temperatura del agua, la rapidez del amasado, la pureza, el grado de finura y como se ha indicado la cantidad de agua. Pero la forma más idónea de regular el fraguado es la adición en fábrica de los correspondientes reguladores.

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 deber 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 porcentaje de disolución del yeso calcinado y en el crecimiento del núcleo.

Con los retardantes, ese mecanismo de retardo es diferente según el aditivo que se utilice. Por ejemplo, los coloides de alta masa molecular prolongan el periodo de inducción porque son venenos del núcleo.

Otros retardantes disminuyen el índice de disolución del semihidrato 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.

Tenemos pues, una propiedad técnicamente regulable y que nos da, desde yesos de fraguado rápido, utilizados en construcción, con ventajas para la ejecución de trabajos sin necesidad de encofrados, y en prefabricados, con tiempos cortos y para la utilización de moldes, hasta yesos de fraguado lento, como los yesos especiales para proyectar.

Expansión del fraguado: Independientemente del tipo de yeso empleado, se puede detectar la expansión de la masa durante el paso de hemihidrato a dihidrato. Por otra parte, si se comparan los volúmenes equivalentes de hemihidrato, agua y el producto de la reacción (dihidrato), el volumen del dihidrato formado será menor que los volúmenes equivalentes de hemihidrato y agua. Esto representa un cambio lineal en el objeto del 2,4%, aproximadamente. Por eso, según estos cálculos debería producirse una contracción volumétrica durante la reacción de fraguado. Pero, en su lugar, lo que se observa es una expansión de fraguado, fenómeno que puede expandirse a través del mecanismo de la cristalización. Los cálculos son los siguientes (⁹³ Phillips, R. W., 1987):

	$(\text{CaSO}_4)_2$	+	$3\text{H}_2\text{O}$	→	$2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Q}\uparrow$
Peso molecular	290,284		54,048		344,332
Densidad (g/cm^3)	2,75		0,997		2,32
Volumen equivalente	105,556		54,211		148,405
Volumen total			159,767		148,405

Tabla 12: Cálculos de expansión del fraguado (Fuente: ⁹³Phillips, R.W., 1987)

El cambio de volumen neto es $(148,405 - 159,767)/(159,767) \cdot 100$, o el -7,11%. La teoría del sol-gel demuestra también este cambio: cuando el sol pasa al estado de gel, se produce una contracción. Sin embargo, no se puede medir esta contracción porque tiene lugar cuando la mezcla está en estado fluido. El proceso de cristalización se explica gráficamente como un crecimiento de los cristales a partir de los núcleos de cristalización. Considerando el entrecruzamiento de los cristales de dihidrato, los cristales que aumentan de tamaño a partir de los núcleos se entremezclan y obstruyen el crecimiento de cristales adyacentes.

Si miles de cristales repiten este proceso durante su crecimiento, se crea una tensión hacia el exterior o tensiones internas que dan lugar a la expansión de toda la masa. Es así como puede producirse una expansión de fraguado a pesar de que el volumen verdadero de los cristales solos sea menor de lo calculado. Esta obstrucción y movimiento de los cristales da lugar a la aparición de los microporos.

Debido a que el producto de la reacción de fraguado del yeso tiene un volumen externo mayor, pero un volumen cristalino menor, se deduce que el material fraguado debe ser poroso. Por tanto, la estructura obtenida inmediatamente después del fraguado está formada por cristales engranados entre los que existen poros y microporos que contienen el exceso de agua necesaria para la mezcla. Al secarse se pierde el exceso de agua y el espacio vacío aumenta. La Figura 9 representa las oscilaciones de la expansión de fraguado y dan valores de su magnitud.

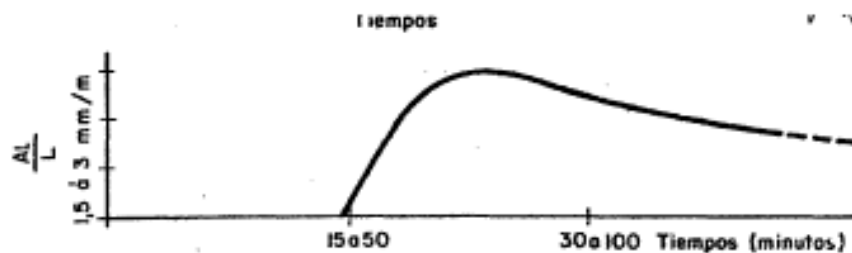


Figura 9: Expansión de fraguado con relación al tiempo. (Fuente: G. Blachere: Saber construir. Barcelona 1.967)

La expansión de fraguado del yeso, siempre que esté dentro de unos límites, tiene ventajas para su utilización, tanto en los enlucidos, al evitar las fisuras de retracción, como en los morteros y hormigones realizados con cemento. También, en los derivados prefabricados al tener que reproducir fielmente la forma de los moldes por delicada que sea la figura a reproducir.

Adherencia: el yeso debido a la naturaleza del proceso de fraguado se adhiere a otros materiales al introducirse, cuando aún permanece en estado fluido, por las oquedades y por los poros de éstos, en los que a continuación cristaliza, formando un conjunto íntimamente ligado. El yeso tiene una gran adherencia a cualquier soporte, por lo que es posible introducir en la masa de yeso elementos como cañizo, fibra de vidrio, perlita, vermiculita, corcho, poliestireno expandido y otros, a modo de refuerzos.

Esta propiedad se mejora en gran medida en los adhesivos a base de yeso, con adición de resinas sintéticas, obteniéndose pegamentos de gran calidad.

Resistencias iniciales: la resistencia de trabajo se adquiere a los seis o siete días, en condiciones de humedad y temperatura ambiente, aunque la pasta de yeso es capaz, a edades tempranas, de adquirir la resistencia suficiente para que los productos prefabricados con ella puedan ser desmontados poco después de su fraguado, transportados y manipulados. En la Tabla 13, se muestra una relación de valores de resistencias iniciales.

Tipo de producto	Resistencia a Flexotracción (N/mm ²)			
	Después de 2 horas en cámara húmeda		Valor final en seco	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
- Escayola	1,5	0,3	3,5	0,3
- Yeso fino de construcción	0,6	0,3	2,5	0,4
- Yeso grueso de construcción	0,4	0,1	1,2	0,4

Tabla 13: Valores de resistencia iniciales. (Fuente: Del Río Merino, ⁴M. Tesis doctoral, 1999)

1.1.3.2.- Habitabilidad.

Dentro de las propiedades que posee el yeso, en este apartado haremos principal hincapié en las de tipo acústico y el acondicionamiento térmico.

Aislamiento térmico:

Conductividad térmica: para un material determinado, el coeficiente de conductividad térmica depende de su densidad y del estado de humedad en que se encuentre. De su densidad, pues al ser ésta más baja se debe a que en su interior hay mayor cantidad de poros o burbujas de aire, que lo hacen menos conductor, y de su humedad, pues el contenido de agua hace que aumente la conductividad del material. En el caso del yeso hay gran variedad de valores para este coeficiente, en función de las variables densidad y humedad. Así en productos ligeros de yeso celular se alcanzan valores que suponen un extraordinario poder de aislamiento térmico, mientras que en yesos más densos se obtienen valores que lo sitúan en un buen puesto con respecto a otros materiales (Tabla 14 y Tabla 15).

Materiales	Coeficiente de Conductividad térmica (Kcal/m.h.°C)
Hormigón armado	1,30
Cerramiento de ladrillo	0,29 - 0,90
Partición de ladrillo	0.24 - 0.74
Placas aislantes de lana de madera	0.70 - 0.10
Tabiques y cielorrasos de yeso	0.25
Vidrio	0.65
Yesos	0.05 - 0.60

Tabla 14 Valores de Conductividad Térmica para diferentes materiales de construcción. (Fuente: ⁴Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Tipo de yeso	Densidad (N/dm ³)	Coeficiente de Conductividad térmica (kcal/m h °C)
Mortero de yeso	10 - 12	0,34
Revoco de yeso	8,0	0,30
Placas de yeso	6,0	0,21 – 0,25
Yeso celular	2,0	0,08 – 0,05
Enlucido de yeso	8,0	0,3
Yeso con vermiculita	2,0	0,07

Tabla 15. Valores de Conductividad Térmica para diferentes materiales de yeso en función de sus densidades. (Fuente: ⁴Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Los valores dados se refieren al yeso seco, para obtener el coeficiente de conductividad útil, o sea, aquel que se emplea en los cálculos, teniendo en cuenta la influencia de la humedad, cada país fija normas para su determinación.

Inercia térmica: La inercia térmica depende, en primer lugar, de la difusividad de los materiales en relación con el acondicionamiento higrotérmico. En segundo lugar, depende de la velocidad de enfriamiento de la pared que es directamente proporcional al almacenaje térmico de la misma, y por tanto a su calor específico, e inversamente proporcional al coeficiente de transmisión total de calor de la pared. En tercer lugar, depende de la velocidad de propagación de la onda térmica, que es proporcional a la difusividad del material y por último del factor de amortiguamiento, que nos da una idea de la inercia térmica de cada material. En la tabla 15, se expresan valores para estos dos últimos factores y por los mismos se observa que el yeso es un material que proporciona, en función de su densidad, una inercia térmica similar a la de los elementos de construcción tradicionales.

Por tanto consideramos la Inercia térmica (Tabla 16) como una propiedad de la construcción tradicional que el yeso comparte, en la medida en que forma parte de ella, y no lo hace en la medida en que se integra en la construcción ligera por medio de sus prefabricados.

Material	Velocidad de propagación de la onda en 24 h (mm/h)	Factor de amortiguamiento (1/m)
Hormigón	34,96	7,87
Yeso	32,12	8,64
Fábrica de ladrillo	31,40	8,52
Madera	17,02	15,41
Espuma de plástico	1,52	18,03
Hormigón espumado	2,12	13,11

Tabla 16. Inercia térmica, velocidad de propagación de la onda térmica y factor de amortiguamiento (Fuente: ⁴Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Regulación higrotérmica: La eliminación del vapor de agua de los locales, puede hacerse mediante orificios de ventilación natural o forzada, y a través de las paredes según sea su grado de permeabilidad al vapor acuoso. La velocidad de difusión del vapor de agua depende de dos factores. En primer lugar, de la diferencia de presión de vapor entre interior y exterior, y en segundo término de la llamada "difusividad " de la pared. La difusión relativa a través de yeso es unas quince veces menor que a través del aire, afirmando por tanto que a través del yeso las edificaciones transpiran.

Acondicionamiento acústico:

Aislamiento al ruido aéreo: para una frecuencia determinada y en tabiques simples, constituidos por un solo material o por materiales homogéneos en relación a

su módulo de elasticidad, puede afirmarse que el aislamiento al ruido aéreo depende directamente de su peso por m² de superficie.

Se presentan tablas de valores obtenidos experimentalmente para particiones de yeso, en los que se aprecia que la ligereza de este material, al igual que sucede con los otros materiales utilizados en tabiquería, no favorece su aislamiento acústico (Tabla 17)

Tabiques dobles de placa de yeso		Aislamiento a ruido aéreo (dB), para frecuencias			
Espesor de placa (cm)	Espesor cámara de aire (cm)	Bajas	Medias	Altas	Valor medio
6	5	35.7	42.5	53.8	41.9
7	5	36.1	41.5	51.1	41.2
7 y 9	5	36.9	44.6	51.3	42.6

Tabla 17: Valores del aislamiento acústico en tabiques compuestos en los que interviene el yeso. (Fuente: Datos del laboratorio INCE, 2001)

Se ha intentado aumentar la densidad de las particiones, mediante la adición de otros materiales más pesados, tratando de mejorar el aislamiento de los tabiques, en general, a base de aumentar su peso, por ello se recurre a la utilización de tabiques de varias capas cuando se requieren aislamientos acústicos elevados.

Esta técnica consiste en disponer elementos compuestos, formados por elementos de igual ó diferentes materias, pero con diferentes rigideces, dejando entre ellos cámaras de aire rellenas con materiales de escasa rigidez, de modo que constituyan un sistema vibratorio diferente, por capa, a la propagación del sonido.

Análogo principio tienen los denominados paneles resonantes, que se adosan a las paredes, dejando en su trasdós una cámara de aire subdividida, de modo que sus dimensiones individuales no excedan de 1/3 aproximadamente, de la longitud de onda del sonido que debe absorberse.

Absorción sonora: la absorción de cada material se determina por el coeficiente de absorción (energía absorbida por unidad de superficie, tomando como absorción máxima la de una ventana de superficie unidad).

En la absorción influye de modo importante la textura superficial del material, ya que la energía sonora se atenúa a medida en que la onda penetra por las superficies lisas de yeso. El yeso tiene un bajo coeficiente de absorción, alrededor de

0.02. Sin embargo su facilidad de moldeo hace posible con poco esfuerzo conseguir placas de yeso con gran número de penetraciones, que trasdosadas con materiales absorbentes obtienen importantes valores en su coeficiente de absorción, que por otra parte depende de la frecuencia del sonido. (Tabla 18)

Material	Coficiente medio de absorción acústica
Acero	0,10
Hormigón	0,015
Cemento	0,020
Yeso	0,020
Madera	0,030 / 0,100
Ladrillo	0,032
Corcho	0,160

Tabla 18. Valores del coeficiente de absorción acústica para diversos materiales (Fuente: ⁴Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999).

Reflexión luminosa: Depende fundamentalmente de la capa de terminación de las paredes. Así es que el yeso únicamente cuando se deja visto, como en determinadas placas de techos o en la construcción tradicional tiene una influencia en ella.

1.1.3.3.- Durabilidad.

Frente a los deterioros producidos por las acciones mecánicas y dado que el yeso no tiene un empleo generalizado en elementos estructurales, la propiedad que más interesa conocer es la de su resistencia mecánica, además de su dureza superficial. También es interesante el comportamiento del yeso ante el agua, la humedad y la temperatura.

Resistencia mecánica: En la norma ⁽⁴⁸⁾UNE EN 13279-2 tal y como se ha visto, fija valores mínimos de resistencia mecánica a flexotracción.

Dureza superficial: por regla general y en condiciones normales de utilización la dureza superficial de los elementos de yeso es suficiente (Tabla 19).

Tipo de yeso	Dureza superficial mínima (Shore C)
Enlucido tradicional	45
Yeso proyectado	65
Alta dureza	80

Tabla 19. Valores de dureza superficial para el yeso (Fuente: ⁸ATEDY, 2002).

Alteraciones debidas al agua: La solubilidad del yeso en agua no es muy elevada, pero el deterioro que esta produce en los elementos de yeso, se produce fundamentalmente, debido a la enorme pérdida de resistencia que experimentan en presencia de humedad y que puede explicarse considerando que el agua libre absorbida por el yeso actúa a modo de lubricante entre su estructura cristalina, deshaciendo la trabazón formada por la disposición de los cristales.

En las Tablas 20 y 21 se dan valores de la solubilidad en agua del sulfato cálcico dihidrato y de la pérdida de resistencia del yeso por contenido en humedad.

Temperatura (°C)	Solubilidad (gr/l)
0	1,759
10	1,928
30	2,090
40	2,097
60	2,047
70	1,966
100	1,619

Tabla.20: Valores de la solubilidad en agua del sulfato cálcico dihidrato (Fuente: ⁴Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999).

Contenido de Agua añadida (%)	Perdida de resistencia (%)
0	0
0,04	33
1	52
5	56
25	56

Tabla.21: Pérdida de resistencia del yeso por contenido en humedad (Fuente: ⁴Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999).

El grado de absorción de agua depende de la porosidad de yeso y por tanto, de su densidad y de su agua de amasado,

Puede decirse que los yesos a medida que se aproximan a su peso específico, que está alrededor de 2,5 absorben menos agua y se comportan mejor frente a ella.

En el caso de utilización de yeso en exteriores, hay que buscar con ayuda de aditivos como retardadores del fraguado, productos que puedan trabajarse bien con poca agua de amasado, para obtener densidades altas de modo que absorban poca agua, naturalmente, los efectos deben ser favorecidos mediante una hidrofugación en

masa o por tratamientos superficiales e impermeables, ya que aunque la estructura sea densa, seguirá siendo poroso y ávido de agua.

1.1.3.4.- Seguridad.

Protección contra el fuego: el yeso es un material incombustible, por tanto no hay que contabilizarlo en absoluto al estudiar la carga de fuego de los edificios.

Tiene una baja conductividad térmica, lo que evita la propagación del calor producido en los incendios, y contiene agua libre que consume una determinada energía calorífica para ser evaporada.

En su propia constitución contiene dos moléculas de agua por cada molécula de sulfato cálcico y absorbe calor para transformarse de dihidrato en anhidrita, lo que supone otras calorías invertidas en su descomposición y en la evaporación del agua combinada.

Aún no se han desarrollado suficientemente los estudios teóricos necesarios para poder evaluar, a partir de determinados coeficientes, el grado de protección que confiere un determinado tipo de yeso, con un espesor dado. Hay que recurrir a estudios experimentales, en los que a partir de una curva de temperaturas, o curva de incendio normalizado, se miden las temperaturas en la cara expuesta al fuego y en la no expuesta y se dan criterios de protección, de modo que se estiman que ésta desaparece al observarse en la cara no expuesta determinadas circunstancias, recogidas por las normas. El tiempo que dura esta protección se expresa en minutos y se considera como el grado de resistencia al fuego del elemento ensayado (Tabla 22).

Tipo de partición	Resistencia al fuego (EI)
- Tabique de ladrillo de entre $40 \leq e < 80$ mm (1) , guarnecido con yeso con espesores de 1,5 cm como mínimo, por ambas caras	90
- Tabique de ladrillo de entre $80 \leq e < 110$ mm (1) , guarnecido con yeso con espesores de 1,5 cm como mínimo, por ambas caras	180
- Tabique de ladrillo de entre $e > 80$ mm (1) , guarnecido con yeso con espesores de 1,5 cm como mínimo, por ambas caras	240

(1) e = Espesor de la fábrica en mm

Tabla 22: Valores de Resistencia al fuego (Fuente: ⁸³C.T.E. D.B.S.I. Febrero 2010).

1.1.3.5.- Propiedades físicas.

Las propiedades físicas más importantes de las fases del sulfato de calcio ($\text{SO}_4\text{Ca} + \text{H}_2\text{O}$) quedan resumidas a continuación en la Tabla 23.

Nombre	Dihidrato	Semihidrato α	Semihidrato β	Anhidrita III	Anhidrita II	Anhidrita I
Otros nombres	Aljez, Piedra de yeso, Doble hidrato	Hemihidrato α , Semihidrato cristalizado	Hemihidrato β , Semihidrato microporoso	Anhidrita soluble, Anhidrita III	Anhidrita insoluble, Anhidrita β Sobrecocido	Anhidrita alta temperatura. Anhidrita α
Símbolo	DH	SH α	SH β	An III	An II	An I
Fórmula química	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot \text{mínimH}_2\text{O}$	SO_4Ca	SO_4Ca
Sistema cristalino	Monoclínico	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal	Ortorrómbico	Ortorrómbico
Agua (%)	20,29	6,21	6,21	< 1	0	0
Peso específico (gr/cm³)	2,31	2,75	2,63	2,58	2,93 – 2,97	
Peso molecular	172,17	145,15	145,15	136,14 + E	136,14	
Solubilidad (gr/l) a 20°C						
Ref A	2,05	6,65	8,90	6,95	3,00	
Ref. All	2,58	7,11	9,52			
Calor de hidratación (Cal/mol)		4100±20	4600±20	6150±20 7210±20	4030±20	

Tabla 23: Características de las fases del sulfato de calcio (Fuente: Vademecum del yeso 95)

Sistemas de cristalización:

Los sistemas cristalinos del yeso se pueden apreciar en la Tabla 24.

Sistema cristalino	Representación	Fase
Monoclínico	<p>Sistema Monoclínico</p> <p>Yeso (CaSO₄, 2H₂O)</p>	Dihidrato
Hexagonal	<p>Sistema Hexagonal</p> <p>Cuarzo cristalino (Si O₂)</p>	Semihidrato α, Semihidrato β, Anhidrita III
Ortorrómbico	<p>Sistema Rómbico</p> <p>(Pb₃ S)</p>	Anhidrita II, Anhidrita I

Tabla 24: Representación de los sistemas cristalinos.

1.1.4.- Utilización del yeso, como material para la fabricación de elementos prefabricados.

Nos encontramos frente a un material, en primer lugar, económico por una parte, debido a que es una materia prima abundante en todo el mundo, sobre todo en

España, de explotación simple y poco costosa, pues se encuentra generalmente de forma muy superficial, y por otra parte, debido a que el consumo energético para producir yeso calcinado es menor que para la producción de otros materiales de construcción, por ejemplo el cemento. (¹⁹ Oteiza, I. 1992). Es de fácil trabajabilidad y secado rápido y controlado.

Es un material con resistencia mecánica suficiente para resistir los esfuerzos que deben aguantar las particiones.

Tiene buenas prestaciones de habitabilidad: de baja densidad y alto volumen de poros, lo que implica, una baja conductividad térmica y una rápida absorción y cesión del vapor de agua, "respira bien". Las paredes realizadas con yeso son cálidas al tacto y no sudan.

Los materiales a base de yeso, tienen una dureza superficial suficiente, para situaciones normales, tienen gran estabilidad de volumen, cambiando su tamaño sólo en condiciones extremas de humedad y temperatura.

Además, estos materiales 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 (¹⁷ Vilanueva, L. 1982).

Para aumentar esta protección se utiliza el yeso laminado y los yesos reforzados con fibra de vidrio que mantienen su estructura y su integridad cuando se exponen al fuego, gracias a las fibras que contienen (¹⁸ Villanueva, L; Río, M. 1994).

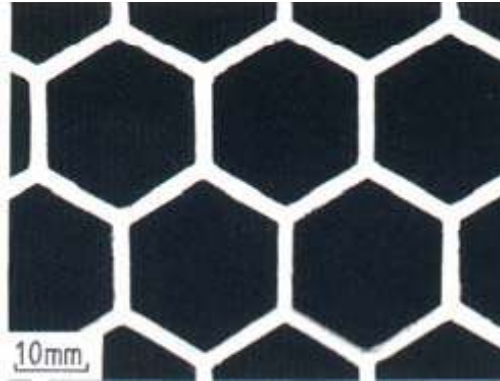
Los inconvenientes principales de este material son: su fragilidad, la falta de tenacidad que determina una rotura frágil, sin prácticamente capacidad de deformación y las alteraciones que sufre a causa del agua, lo que, en condiciones normales, lo inutiliza para aplicaciones al exterior y es por lo que en todo momento se hable de aplicaciones del yeso en interiores. En este caso, particiones y trasdosados.

1.2.- Aligerado de materiales. Materiales existentes utilizados para aligerar los morteros de yeso.

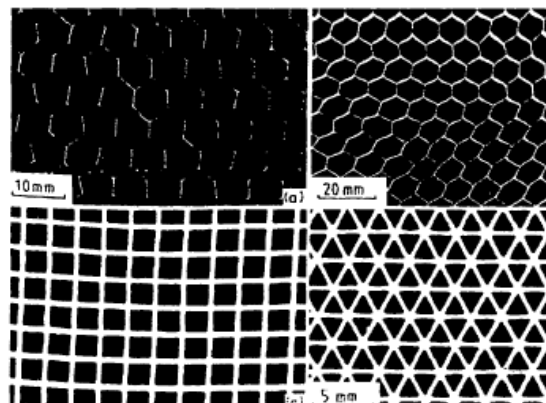
1.2.0. Los materiales aligerados.

Los materiales aligerados son aquellos que en su origen tienen densidades normales y mediante algún procedimiento se hace disminuir su densidad. Este procedimiento consiste en ocupar parte de su volumen con algún material de mucha menor densidad (sólidos celulares como los áridos ligeros ó incluso aire), convirtiéndolo en un material celular.

Un material celular es aquel que está constituido por múltiples celdillas de aire o gas en su interior. En las microfotografías siguientes (Fotografía 8 y Fotografía 9), se muestran materiales celulares de celdas cerradas tan regulares como las de los paneles.



Fotografía 8: Sólido bidimensional. (Fuente: ⁽³³⁾Gibson L, J. 1999)

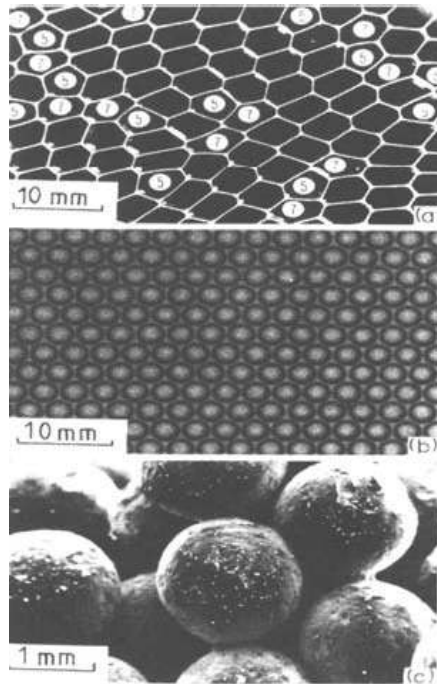


Fotografía 9: Materiales celulares de dos dimensiones, (a). Nido de abeja de Aluminio (b) Nido de abeja realizado con papel y resinas fenólicas. (c) Nido de abeja de celdas cuadradas realizado con cerámica, (d) Lo mismo pero de celda triangular. (Fuente: ⁽³³⁾Gibson L, J. 1999)

Generalmente la conversión de un material sólido en uno celular se realiza mediante la incorporación en el mismo de aditivos espumantes apropiados que pueden tener como base una reacción física (vapor), química (H_2S) o incluso biológica (levadura). Casi todos los materiales pueden espumarse, aunque lo más comunes son los polímeros. Se están investigando nuevas tecnologías que permiten espumar materiales como los metales, la cerámica o el vidrio. Muchos alimentos también son espumas. El pan, generalmente es una espuma de celdas cerradas, expandido por la fermentación de la levadura o por el dióxido de carbono del bicarbonato sódico. El merengue es clara de huevo espumada con azúcar, el chocolate y las golosinas que se expanden para hacerlas más atractivas y baratas. También los cereales del

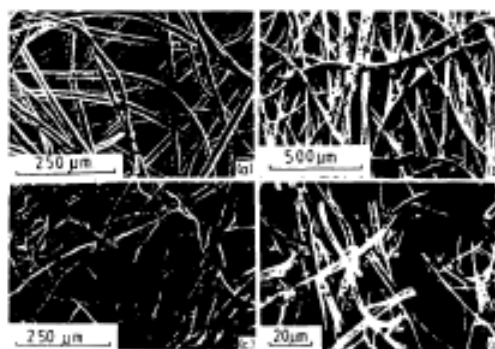
desayuno son ejemplos de cómo la generación de vapor crea espumas produciendo nuevas texturas más crujientes.

Los sólidos celulares pueden generarse también por uniones de esferas o granos expandidos, como por ejemplo, las planchas de poliestireno expandido o las espumas metálicas y de vidrio que se fabrican mediante la mezcla de esferas hechas generalmente de vidrio con un ligante de contacto como la resina epoxi, como se observa en las microfotografías (Fotografía 10).



Fotografía 10: (a) Espuma bidireccional en nido de abeja. (b) Conjunto de burbujas. (c) Esferas de aluminio. (Fuente: ⁽³³⁾Gibson, L. J. 1999)

Cada partícula es una pequeña cáscara esférica que está unida a las vecinas por puntos. Por otra parte los sólidos celulares de menor densidad se pueden generar creando una cadena tejida de fibras (Fotografía 11).



Fotografía 11. Materiales fibrosos. (a) Filtro. (b) Papel. (c) Algodón (d) Escama de la lanzadera espacial. (Fuente: ⁽³³⁾Gibson L. J. 1999).

El resultado de todos los procesos comentados, es generar un nuevo material que por su configuración (su estructura celular) se utiliza principalmente como material aislante térmico y acústico y anti-impacto.

1.2.0.1.- La estructura de los sólidos celulares.

La estructura de las celdas ha fascinado desde hace 300 años a los naturalistas. ⁽³⁴⁾ Hooke en 1664, examinó sus formas, ⁽⁹⁵⁾ Kelvin en 1887 analizó su disposición y Darwin en 1863 especuló sobre su origen y sus funciones.

Las propiedades de los sólidos celulares dependen directamente de la forma y estructura de las celdas. De manera que para cada sólido celular habrá que caracterizar el tamaño, forma geométrica y topología de las celdas, así como la conexión de sus paredes celulares y del espacio poroso.

El tamaño de las celdas, por ejemplo, no influye en las propiedades térmicas y mecánicas del material. El tamaño de las celdas importa más cuando las celdas son simétricas, pero cuando las celdas son más largas o más anchas, las propiedades dependen de la dirección, frecuentemente dominante. La dirección de la orientación de las celdas es muy importante, sobre todo en sólidos celulares bidimensionales, no tridimensionales como las espumas, pues la geometría de las espumas es más complicada.

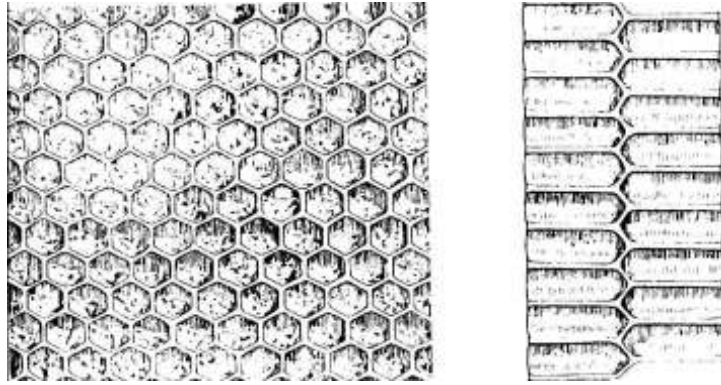
También es importante el que las celdas sean abiertas o cerradas. Cerradas o selladas con respecto a las celdas vecinas o abiertas, interconectadas con las celdas vecinas.

Las estructuras celulares se clasifican básicamente en dos tipos: nidos de abeja y espumas.

a) Nido de abeja.

Cuando alrededor de 1660 Robert Hooke, perfeccionó su microscopio, observó a través de él el corcho, lo que le permitió identificar la unidad básica de plantas y estructuras biológicas, que llamó "celda" (Fotografía 12. Hooke 1664)

La regularidad de las celdas de los nidos de abeja es notable, pero no tan perfecta como se creía (⁸⁹ Wyman, 1865) y sirve para compendiar los sólidos celulares de dos dimensiones.



Fotografía 12. Estructura alveolar típica en nido de abeja (dos dimensiones) (Fuente: Hooke, 1664)

b) Espumas:

El estudio de la geometría de los sólidos celulares de tres dimensiones, tiene una genealogía casi tan distinguida como la estructura de nido de abeja. Plateau en 1873, en su tratado sobre la geometría de los sólidos identificó la celda rómbicadodecaedro de 12 caras del mineral de granate.

Es posible ordenar con estas celdas el espacio, pero no la forma más eficaz de hacerlo. Durante casi un siglo se pensó que la celda que contenía la mínima superficie por unidad de volumen era el Tetraedro de Kelvin con caras ligeramente curvas (⁹⁵ Kelvin, 1887), recientemente y gracias a los sistemas de ordenador se ha identificado la unidad celular de menor área superficial por volumen (⁹⁶ Brakke, 1992 y ⁹⁷ Phelan, 1.994) consistente en seis poliedros de catorce caras y dos de doce.



Fotografía 13: Celda unitaria de Weaire y ⁽⁹⁷⁾Phelan

La celda de 14 lados está dispuesta en tres ejes ortogonales con las caras descansando en los intersticios entre ellas dando lugar a una estructura simple de celosía cúbica. Sólo las caras hexagonales son planas, las pentagonales son curvas.

La propiedad más importante y singular de los sólidos celulares es la densidad relativa, p^*/ps . La densidad relativa, es la densidad del material celular (p^*), dividida por la del material del que están hechas las paredes de las celdas que constituyen dicho material (ps). Las espumas poliméricas usadas como aislamiento térmico tienen densidades relativas entre 0,05 y 0,2. El corcho aproximadamente 0,14.

En general los sólidos celulares tienen densidades relativas menores que 0,3. La fracción de espacio poroso es $1-p^*/ps$. En la Fotografía 14 se muestran algunas espumas.

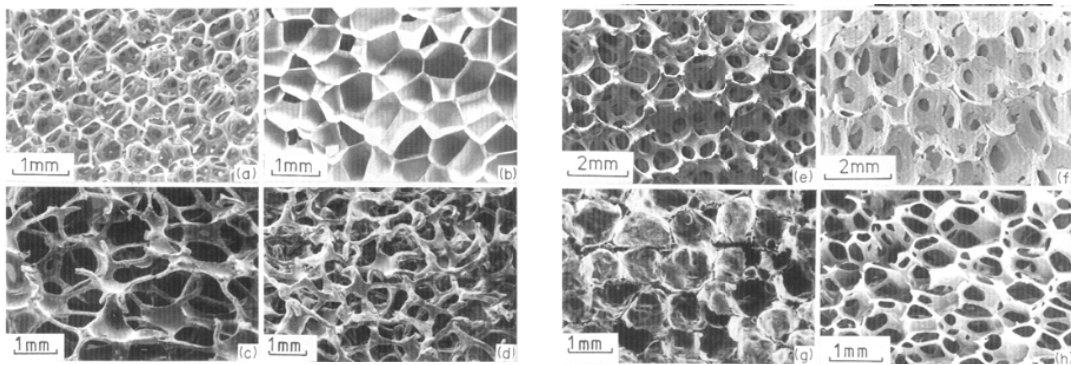


Figura 10: (a) Poliuretano de celda abierta, (b) Polietileno de celda cerrada, (c) Níquel (d) Cobre, (e) Zirconio. (f) Midlite. (g) Vidrio, (h) Espumas de poliéster con celdas abiertas y cerradas. (Fuente: ⁽³³⁾Gibson, L.J. 1997)

1.2.0.2. Aplicaciones de los materiales aligerados.

a) Reducir de la densidad.

a1) Facilitan la puesta en obra y por tanto, el rendimiento de la mano de obra utilizada.

a2) Facilitan el transporte, al ser más manejables se minimizan las roturas y desconchones.

Las aplicaciones fundamentales de materiales de baja densidad son:

- Realización de rellenos, evitando el colapso por sobrecargas debido al peso propio, principalmente en la rehabilitación de edificios.

- Prefabricados de gran tamaño.

b) Mejorar el aislamiento:

b1) Térmico: por la inclusión de celdillas de aire en reposo. Mejora del coeficiente de conductividad térmica de los materiales.

b2) Acústico; absorción de la energía de impacto.

b3) Incremento de la resistencia al fuego.

c) Aplicaciones de estos materiales:

c1) Absorción de la energía impacto.

c2) Colaboración en el aislamiento térmico del conjunto.

c3) Incremento de la resistencia al fuego.

d) Incremento de la vida útil del material.

d1) Mejorando su comportamiento ante la heladicidad.

e) Inconvenientes.

En ocasiones puede que la mejora de alguna de estas características suponga una reducción en las resistencias mecánicas del material o de su dureza superficial.

1.2.1. Procedimientos para aligerar materiales.

Existen muchos procedimientos para aligerar un material, que básicamente consisten en:

a) Realizar huecos ó alvéolos.

Ladrillos huecos de gran formato, bovedillas, paneles de escayola aligerados.

b) Ocluir aire en su interior.

Se puede introducir aire en el interior de un material mediante los siguientes procedimientos:

b1) Durante su fabricación:

Al incorporar en la mezcla partículas que en la cocción desprenden gases o aire formando microburbujas en el interior. Por ejemplo, en la fabricación de áridos ligeros como la arcilla expandida o la perlita que aumentan cinco y veinte veces, respectivamente, su volumen inicial, debido a la oclusión de burbujas de aire en su interior por el aumento de presión en el primer caso de los gases producidos durante la cocción y por la evaporación del agua de cristalización en la perlita.

Si se moldean, dan lugar a prefabricados como los bloques de termo arcilla Ceratres, los bloques Siporex, los bloques de Ytong, las placas de vidrio celular-poliedros, los Termoblock.

b2) Mediante la incorporación de aditivos

Se denominan aditivos a los productos que se incorporan en las pastas, morteros y hormigones en estado fresco, con objeto de mejorar alguna de sus características. Los aditivos pueden ser sólidos pulverulentos o líquidos, recomendándose el empleo de aditivos líquidos pues con ellos se consigue una mayor homogeneidad de la mezcla.

En todo caso deben modificar en sentido positivo y la mejora ha de ser permanente, tanto en estado fresco como endurecido (acción estable a lo largo del tiempo).

Los aditivos no son aligerantes propiamente dicho, tienen una función principal, que consiste en modificar una de las características de la pasta y una función secundaria y accesorio de modificar algunas de las características de los materiales, independiente de la principal.

A la propiedad del aditivo de modificar características, sin ser función secundaria se denomina, efecto secundario.

Hay que tener en cuenta las dosificaciones del aditivo y los componentes de la masa. Salvo casos especiales los aditivos no deben superar el 5% en peso

La norma ⁽⁷⁷⁾UNE-83.200 clasifica los aditivos en:

1. Modificadores de la reología en estado fresco
2. Modificadores del tiempo de fraguado y/o endurecimiento:
3. Modificadores del contenido de aire o de otros gases.
4. Modificadores del tiempo de fraguado y/o endurecimiento:
5. Generadores de expansión.
6. Aditivos que mejoran las resistencias a las acciones físicas (protectores contra las heladas, reductores de la penetración de agua)
7. Aditivos que mejoran las resistencias a las acciones físico-químicas.
8. Otros aditivos.

Los aditivos que interesan para el estudio de los sistemas y procesos para aligerar el yeso son los *aditivos que modifican el contenido de aire* (o de otros gases) de los morteros o pastas.

Estos aditivos son sustancias o productos cuya función principal es modificar, en uno u otro sentido, el contenido de aire ocluido en los morteros o pastas testigo;

también se incluyen en este grupo a los que modifican el contenido de otros gases. Dentro de éstos, se trabaja con aditivos inclusores de aire y espumantes.

1.2.1.1.- Inclusores de aire ó aireantes.

Aditivos cuya función principal es producir en los morteros y pastas un número elevado de finas burbujas de aire, (de 10 a 500 micras de diámetro, las mejores son las de 100 micras), de distribución continua de tamaños, separadas y repartidas uniformemente (Figura 11 y Figura 12). Estas microburbujas permanecen durante el endurecimiento del material. Las microburbujas interrumpen la red capilar, aumentando la resistencia a las heladas actuando como recintos de expansión.

Están formados por moléculas orgánicas que en disolución acuosa, se disocian en iones complejos que son adsorbidos por las partículas finas del cemento y de los áridos por su grupo polar.

Son derivados de resinas naturales de la madera, detergentes sintéticos, sales lignosulfonadas, grasas y aceites animales o vegetales, materiales proteínicos, ácidos derivados del petróleo, etc.

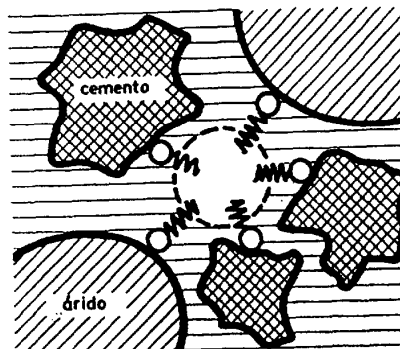


Figura 11: Acción de moléculas aireantes sobre las partículas de cemento y árido fino (Fuente: ⁽³⁷⁾Texsa 1974).

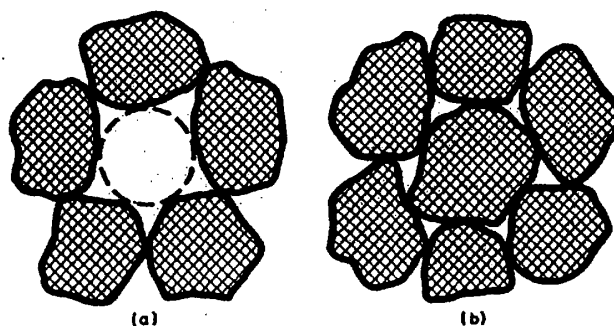


Figura 12: La presencia de burbujas de aire en la pasta de cemento hidratada (a), origina un aumento de diámetro de los capilares existentes en el hormigón (b). (Fuente: ⁽³⁷⁾Texsa 1974).

Por otra parte, como función secundaria, permiten mantener una consistencia plástica o fluida, disminuyendo la relación agua/cemento con lo que se consigue: aumentar la compacidad, mejorando por tanto la resistencia mecánica y la cohesividad interna y por tanto su impermeabilidad.

Como efecto secundario determinados aditivos de este grupo pueden producir una disminución de las resistencias mecánicas, que son función del contenido de aire.

1.2.1.2.- Espumantes.

Con la adición de espumantes se consiguen morteros y hormigones celulares.

Aditivo generador de espuma. La espuma se puede generar por batido manual o mecánico.

- Función principal: la espuma supone la oclusión de pequeñas burbujas de aire distribuidas homogéneamente, dotándole al material de una estructura alveolar y consiguiendo disminuciones de peso de hasta cuatro o cinco veces el peso inicial.

- Funciones secundarias: mejora la puesta en obra, a consecuencia de añadir docilidad en la masa y lógicamente debido a la reducción de peso. Mejora del aislamiento térmico, colaborando con la unidad de obra.

- Efectos secundarios: disminución de las resistencias mecánicas y en especial disminución de la dureza superficial del material.

- Aplicaciones: formación de rellenos de gran volumen, en movimientos de tierra. Formación de pendientes en azoteas.

- Prefabricados: bloques de hormigón celular, piezas especiales, bovedillas, paneles de cerramiento.

1.2.1.3.- Adición de cargas ligeras.

Se puede aligerar un material mediante la adición de cargas ligeras, como rellenos o sustitutos de parte de los áridos de la mezcla. Se denomina adición al ser materiales que se incorporan en la masa en pesos superiores al 5% sobre el peso del conglomerante, en morteros y yesos.

Estas cargas ligeras suelen denominarse áridos ligeros, entendiéndose como árido el grano que se mide con medidas de capacidad. Un árido se considera ligero cuando la densidad real del grano es inferior a $0,0098 \text{ N/cm}^3$ (⁹⁴ UNE 83-101-90).

Ventajas de su adición: su inclusión mejora la granulometría haciendo la masa más trabajable y en general también de mayor resistencia mecánica y de mayor

dureza superficial. Por otra parte mejora sus características térmicas y acústicas. Y su proyección mejora el rendimiento de las mezclas con conglomerantes.

Estos áridos pueden ser naturales o artificiales y pueden emplearse tal como se encuentran en la naturaleza o triturados y elaborados mediante un proceso de fabricación

1.2.1.4.- Clasificación de las cargas ligeras (áridos).

- *Naturales, inorgánicos, no elaborados*: Proceden de la desintegración natural o artificial de las rocas, debido a fenómenos erosivos: Puzolanas, Travertinos, Lapilli, Escorias, Tobas volcánicas, Diatomeas, Conchas machacadas, Piedra Pómez.

- *Naturales, inorgánicos, elaborados*, áridos obtenidos a través de un proceso industrial, de estructura porosa cerrada o abierta formada por los gases producidos por la materia orgánica incinerada o la evaporación del agua de cristalización, durante el proceso de fabricación: Arcila expandida, Esquisto expandido, Pizarra expandida, Vermiculita, Perlita expandida, Diatomita expandida, Obsidiana expandida, Arcilla sintetizada, Esquistos sinterizados.

- *Naturales orgánicos, no elaborados*: granulado de los desechos de corcho, cáscaras de cereales, virutas de madera.

- *Industriales no elaborados*, su utilización se hace cada día más importante por suponer un reciclaje de los desechos de la industria: Escoria de alto horno, Cenizas volantes.

- *Industriales elaborados*: Escoria expandida, Espuma de escoria, Cenizas expandidas, Cenizas sintetizadas.

- *Orgánicos*: Partículas de plástico, poliestireno expandido.

1.2.2.- Materiales aligerantes.

En este apartado se describen, a partir de la teoría, los materiales aligerantes utilizados, o de posible utilización, en los procesos para aligerar un yeso, en nuestro caso el yeso moreno.

La utilización de materiales aligerados es muy antigua, ya en el siglo II antes de Cristo. Estos son aquellos que en su origen tienen densidades normales y mediante algún procedimiento se hace disminuir su densidad. El procedimiento consiste en ocupar parte del volumen con algún material (materiales aligerantes) de mucha menor densidad (sólidos celulares como los áridos ligeros o incluso aire).

Un material celular es aquel que está constituido por múltiples celdillas de aire o gas en su interior.

1.2.2.1.- Perlita.

1.2.2.1.1.- Origen y características

Perlita no es un nombre comercial sino un término genérico para un silicato de formación natural.

La característica distintiva que diferencia a la perlita de otros cristales volcánicos es que, al calentarla a una temperatura determinada, su capacidad de expansión produce que aumente de cuatro a veinte veces su volumen original.

Esta expansión se debe a la presencia de un 2% a un 6% de agua en la roca de perlita en estado natural. Cuando se calienta con rapidez por encima de 1000°C, la roca estalla como si fueran palomitas de maíz a medida que el agua combinada se evapora y crea un número incontable de diminutas burbujas que confieren al material su increíble ligereza y otras propiedades físicas excepcionales de la perlita expandida.



Fotografía 14: Perlita expandida.

El proceso de expansión también produce una de las características más distintivas de la perlita: su color blanco. Mientras que el color de la roca en estado natural puede situarse entre un gris claro transparente y un negro brillante, el color de la perlita expandida se sitúa entre un blanco nieve y un blanco grisáceo.

Es posible fabricar perlita expandida hasta un peso mínimo de 32 kg/m³, por lo que es adaptable para numerosas aplicaciones.

Debido a que la perlita es una forma de cristal natural, está clasificada como inerte químicamente y posee un pH aproximado de 7.

1.2.2.1.2.- Propiedades.

- Color: Entre blanco nieve y blanco grisáceo.

- Índice Refractario: 1,5
- Humedad libre máxima: 0,5%
- pH 12
- pH (de la pasta aguada): 6,5 - 8,0
- Gravedad específica: 2.2.2 (podría ser <1)
- Densidad Aparente (Peso a granel): Entre 400 - 1200 N/m³ dependiendo de la granulometría.
- Punto de Ablandamiento: 1600°F - 2000°F (871 – 1093we°C)
- Punto de fusión: 2300 °f - 2450 °f (1260 – 1343°C)
- Calor Específico: 0,2 Btu/ib °f (837 J/kg°k)
- Conductividad térmica (24°C): 0,04 - 0,06 W/m°k
- Solubilidad:
 - . Soluble en HF y álcali en concentrado caliente.
 - . Moderadamente soluble (<10%) en NaOH al 1N.
 - . Ligeramente soluble (<3%) en ácidos minerales.
 - . Muy soluble (<1%) en agua o ácidos débiles.

En la Tabla 25 se puede apreciar un análisis químico de la Perlita.

Silicio	33,8	Magnesio	0,2
Aluminio	7,2	Elementos menores	0,2
Potasio	3,5	Oxígeno (por diferencia)	47,5
Sodio	3,4	Total Neto	97,0
Hierro	0,6	Agua combinada	3,0
Calcio	0,6	TOTAL	100

Tabla 25: Análisis químico de la perlita (Fuente: ⁽⁹⁸⁾Perlindustria. Ficha técnica, 2002)

Tipos de perlita: (Tabla 26)

Tipo	Granulometría (mm)	Densidad (Kg / m³)	Conductividad Térmica (Kcal/h °C m)
C-5	0 - 1.5	45 - 55	0,035
V-6	0 - 1.5	50 - 60	0,035
V-10	0 - 3	105 - 125	0,045
V-12	0 - 5	50 - 50	0,045
K-13	3 - 5	100 - 120	0,045

Tabla 26: Características de la perlita (Fuente: ⁽⁹⁸⁾Perlindustria. Ficha técnica, 2002)

1.2.2.1.3.- Usos y aplicaciones de la perlita.

Usos

La perlita posee numerosos usos. Dichos usos pueden dividirse en tres categorías generales: aplicaciones para la construcción, aplicaciones para la horticultura y aplicaciones industriales.

Aplicaciones para la construcción

Gracias a las destacables características de la perlita como aislante y a su peso ligero, se usa ampliamente como aislante de relleno en albañilería. En esta aplicación, el aislante de relleno libre para albañilería se vierte en las cavidades de los bloques de hormigón en los que rellena por completo cualquier hendidura, grieta, zonas de mortero y agujeros en general. Además de proporcionar un aislamiento térmico, la perlita aumenta la resistencia al fuego, reduce la transmisión de ruidos y es resistente al óxido. La perlita también es ideal para aislar recipientes criogénicos y de baja temperatura.

Cuando se utiliza la perlita como añadido del hormigón, se obtiene un hormigón de peso ligero, resistente al fuego y aislante, ideal para las cubiertas de los tejados entre otras aplicaciones. La perlita también puede usarse como un agregado del cemento Portland y del yeso para aplicaciones exteriores y para la protección al fuego de vigas y columnas.

Otras aplicaciones en la construcción son las siguientes: aislante de bajosuelos, cubrimiento de chimeneas, texturización de pinturas, placas de yeso y placas aislantes para el tejado.

Aplicaciones para la horticultura

En las aplicaciones para la horticultura, la perlita se usa en todo el mundo como un componente para los cultivos sin tierra donde proporciona ventilación y una retención óptima de la hidratación para un crecimiento superior de la planta. Diversos estudios han demostrado que se consiguen cultivos destacados con sistemas hidropónicos de perlita.

Otros beneficios de la perlita hortícola son su pH neutro y el hecho de que es estéril y libre de organismos. Además, su peso ligero la hace ideal para su uso en el cultivo de invernadero.

Otras aplicaciones hortícolas de la perlita son como transportador de abonos, herbicidas y plaguicidas y para la peletización de las semillas. Se utiliza con igual éxito en los cultivos de invernadero, aplicaciones paisajísticas y en las plantas del hogar.

Aplicaciones industriales

Las aplicaciones industriales de la perlita son de lo más diverso, y cubren desde los rellenos de alto rendimiento para plásticos a cementos para muros para contención de petróleo, agua y geotérmicos. Otras aplicaciones incluyen su uso como medio de filtrado para productos farmacéuticos, comestibles, químicos y agua para los sistemas municipales y piscinas.

Otras aplicaciones adicionales incluyen su uso como un abrasivo en jabones, limpiadores y pulidores y toda una variedad de aplicaciones de fundición que utilizan las propiedades aislantes de la perlita y su alta resistencia al calor. Esta misma propiedad de resistencia al calor es aprovechada cuando la perlita se utiliza en la fabricación de aislantes de tuberías, morteros y ladrillos.

1.2.2.2.- Vermiculita.

1.2.2.2.1.- Origen y características.

La vermiculita no es un nombre comercial si no un término genérico para un mineral de la familia de la mica compuesto básicamente por silicatos de aluminio, magnesio y hierro. Su forma natural es la de una mica de color pardo y estructura laminar, conteniendo agua interlaminada.

Su característica principal es que al calentarla a una temperatura determinada, su capacidad de expansión o exfoliación produce que aumente de ocho a veinte veces su volumen original.



Fotografía 15: Material de vermiculita en piedra y exfoliada.

Esta exfoliación se debe a la presencia de agua en el mineral crudo. Cuando se calienta con rapidez por encima de 870°C a medida que el agua se evapora se va transformando cada partícula laminar del mineral en un fuelle a modo de gusano y crea un gran número de pequeñas láminas con reflejos metálicos, de color pardo, con baja densidad aparente y elevada porosidad.

1.2.2.2.- Propiedades:

- Densidad: la densidad aparente de la vermiculita oscilan entre 600 y 1400 Kg/m³ según granulometrías, con lo que nos encontramos con un material muy ligero.

- Aislamiento térmico: la vermiculita expandida mantiene su capacidad de aislamiento entre 200°C y 1200°C. Su conductividad térmica es de 0,053 Kcal/h m°C para una temperatura media de 20°C. Su capacidad calorífica es muy baja (0,2).

Naturalmente con el aumento de la temperatura, el coeficiente aumenta como en cualquier material aislante, pero con una proporción mucho menor.

Las paredes brillantes de las laminillas de mica de vermiculita forman una multitud de pantallas que reflejan y dispersan la energía calorífica transmitida por radiación, y convierten a dicho material en el aislante ideal para altas temperaturas.

- Aislamiento acústico: al incidir las ondas sonoras sobre las laminillas multidireccionales de la vermiculita, exfoliada estas son reflejadas en multitud de direcciones y absorbidas por la estructura microscópica de burbujas de aire del mineral. Por estas razones la vermiculita es un excelente aislante acústico para una amplísima gama de frecuencias.

- Resistencia al fuego: el punto de fusión de la vermiculita es 1370°C y la temperatura de reblandecimiento es 1250°C. Es un mineral incombustible y químicamente muy estable a altas temperaturas lo que lo convierte en un material idóneo para la protección contra el fuego.

- Inalterabilidad: la vermiculita es insensible a los agentes atmosféricos y al paso del tiempo. Es estable, químicamente neutra (pH = 7,2) e inerte, no es higroscópica y no produce ninguna acción sobre el hierro o el acero.

En la Tabla 27 se observa el análisis químico de la Vermiculita.

Silice	SiO ₂	30 %
Alúmina	Al ₂ O ₃	11 %
Oxido de Sodio	Na ₂ O	1,5 %
Oxido Potásico	K ₂ O	2,5 %
Oxido Cálcico	CaO	9 %
Oxido de Titanio	TiO ₂	3 %
Oxido de magnesio	MgO	15 %
Oxido Férrico	Fe ₂ O ₃	14 %
Agua libre y combinada	Agua libre y combinada	11,5 %
Otros compuestos	Otros compuestos	2,5 %

Tabla 27: Análisis químico de la vermiculita exfoliada (Fuente: ⁽⁹⁸⁾ Perlindustria. Ficha técnica, 2002)

1.2.2.2.3.- Usos de la vermiculita.

La vermiculita ha sido usada en varias industrias desde hace más de 80 años. Se ha usado para la construcción, agricultura e industria (Tabla 28).

Agricultura:	Construcción:	Industrial	Horticultura
Alimentación animal.	Aislante acústico.	Envases absorbentes	Hidropónicos
Residuos avícolas	Aislante térmico.	Dispersión	Cultivo de semillas y esquejes
Fertilizantes	Aislante a temperatura ambiente alta	Lodo de perforación	Germinación se semillas
Plaguicidas.	Protección contra el fuego	Filtración	Mezclado para plantas de semillero
Condicionado de tierra.	Naval	Protección contra el fuego	Compuestos para siembra
Semilleros.	Morteros mono capas	Fijación de materias peligrosas	Plantación de bulbo

	Construcción de agregados ligeros	Hornos	Sustratos
	Cerámica	Diferentes formas de aislamiento (bloques)	Cultivo en macetas y grandes recipientes
		Aislamiento a alta y baja temperatura	
		Aislamiento para materiales que se funden a altas temperaturas (metal, vidrio)	
		Pinturas	
		Productos con moho	
		Perfumes absorbentes	
		Rellenos (texturización de plásticos)	
		Agregados de densidad media	
		Sellador	

Tabla 28: Usos de la vermiculita exfoliada (Fuente: ⁽⁹⁸⁾Perlindustria. Ficha técnica, 2002)

1.2.2.3.- Arcilla expandida

1.2.2.3.1.- Orígenes y características.

Ya en el siglo II a. C, los ingenieros romanos conocían las cualidades de los áridos ligeros, prueba de ello es la construcción de la bóveda del Panteón en Roma, realizada con una argamasa aligerada con piedra pómez.

Sin embargo hay que esperar a 1917 para que se generalice el uso de los mismos en construcción debido a que es en este momento cuando se consiguen fabricar áridos ligeros industriales.

En 1917 ⁽⁹⁹⁾ S.J. Hayde desarrolló en los EE.UU. un proceso industrial de expansión de arcillas mediante un horno tubular giratorio. Los áridos conseguidos mediante este sistema se aplicaron en construcción de edificios en la realización de hormigones ligeros (Fotografía 16).



Fotografía 16: Árido de arcilla expandida (Arlita). (Fuente: ⁽⁵⁰⁾ Arexpan, 2009)

La arcilla expandida se obtiene sometiendo arcillas especiales a un proceso de cocción a temperaturas de 1200°C en grandes hornos rotatorios. Mediante este tratamiento la arcilla se transforma en gránulos esféricos porosos y ligeros, con una superficie resistente de color pardo y un interior grisáceo formado por innumerables burbujas que contienen aire estancado, esta característica le otorga un poder altamente aislante y a la vez permite el libre paso del vapor de agua.

Después de la cocción, la arcilla expandida se somete a proceso de cribado y clasificación que selecciona las diversas granulometrías y densidades, obteniéndose los siguientes tipos (Tabla 29):

Denominación	Tipo	Tamaño (mm)	Densidad aparente (Kg/m ³)	Aplicación
A-8	A	0 - 3	800 + 50	Mortero. Hormigón y refractarios
F-3	F	3 - 8	350 + 50	Prefabricados y hormigones aislantes
F-5	F	3 - 8	550 + 50	Hormigón ligero estructural
F-7	F	3 - 8	750 + 50	Hormigón ligeros estructural y pretensado
G-3	G	8 - 16	300 + 50	Aislameinto jardinería

Tabla 29: Características de los diferentes tipos de arcilla expandida (Fuente: ⁽⁵¹⁾ Manual de Arlita, 2000).

1.2.2.3.2.- Propiedades.

La arcilla expandida es un producto químicamente neutro, que no desprende gases ni malos olores, es imputrescible y no atacable por parásitos, hongos o roedores. No le afectan las sustancias químicas y es altamente resistente a las

heladas y a los cambios bruscos de temperatura, con lo que nos encontramos con un material bastante inalterable en el tiempo.

El punto de fusión de la arcilla expandida está en torno a 1250°C. En la Fotografía 17 observamos una clasificación de la Arcilla Expandida.



Fotografía 17: Clasificación de la arcilla expandida (Arlita) (Fuente: ⁽⁵²⁾Maxit, 2010)

En la Tabla 30 observamos un análisis químico de la Arcilla Expandida.

Alumina	Al ₂ O ₃	18%
Silice	SiO ₂	64%
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃	6,5%
Óxido de titanio	TiO ₂	0,9%
Óxido de magnesio	MgO	2,5%
Óxido de calcio	CaO	2,0%
Óxido de potasio	K ₂ O	3,5%
Óxido cálcico	Na ₂ O	0,7%

Tabla 30: Análisis químico de arcilla expandida (Fuente: ⁽⁵⁰⁾Arexpan, Ficha técnica, 2009)

1.2.2.3.3.- Aplicaciones.

Sus excelentes cualidades ofrecen un amplio abanico de soluciones para la construcción como:

- Aislamiento de cubiertas, forjados, soleras y cámaras de aire (aislante térmico y acústico).
- Hormigones ligeros: aislantes o estructurales.
- Prefabricados ligeros aislantes: bloques; bovedillas; casetones; placas de cubierta, paneles de cerramiento.

- Ignífugo.

Por otra parte, las características de la arlita hacen de ella un producto altamente útil para su uso en cultivos, tanto en los que se usa tierra como en los que no (cultivos hidropónicos). Las características en este caso son las siguientes:

- Aire la tierra.
- Evita las heladas en la tierra.
- Conserva la humedad de la tierra.
- Aligera la mezcla final.
- Producto natural sin sustancias dañinas.
- No biodegradable.

1.2.2.4.- Poliestireno expandido.

1.2.2.4.1.- Orígenes y características.

El poliestireno se empezó a fabricar de forma industrial en 1936, pero como hasta 1952 no se descubrieron técnicas para realizar espumas.

Es un material plástico no cristalino, celular y rígido, que presenta una estructura celular cerrada rellena de aire. En la Figura 13 se observa la fórmula química del Poliestireno.

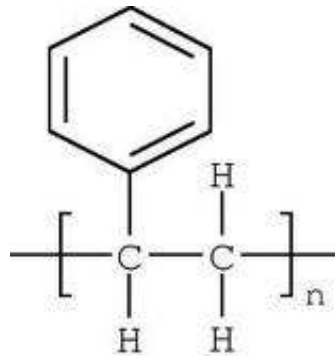
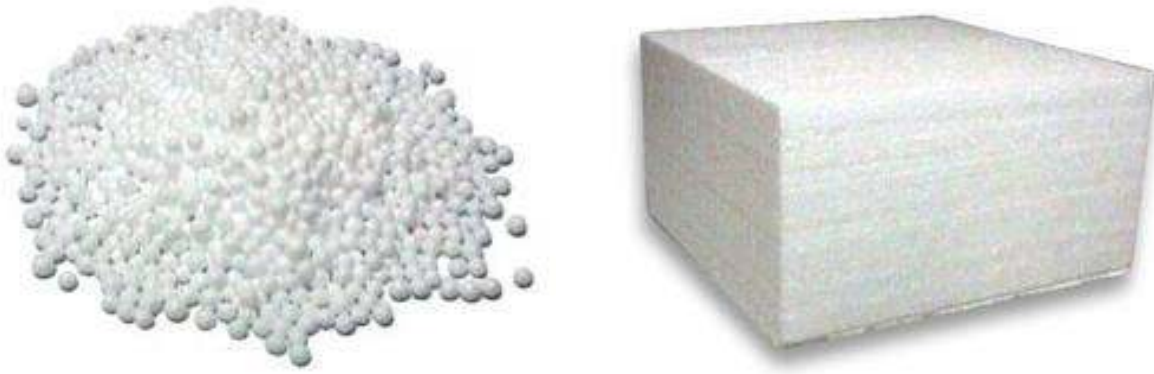


Figura 13: Fórmula del poliestireno.

El proceso productivo para la obtención de poliestireno expandido utiliza como materia prima el poliestireno expandible, el cual se obtiene de la polimerización del estireno en presencia de un agente expansor (pentano). Fotografía 18 y Fotografía 18a.



Fotografía 18: Poliestireno en perlitas y Fotografía 18a: Poliestireno en bloque.

En la fabricación del poliestireno expandido (EPS) (Figura 14), el primer proceso es la polimerización del estireno. En primer lugar el estireno es dispersado en forma de gotas en fase de agua en tamaños de 0,1 a 1mm. Las proporciones agua/estireno varían de 1:1 a 1:3. El tipo de polimerización utilizado es el de Suspensión y se lleva a cabo en reactores vidriados o de acero inoxidable. Estos reactores operan en forma discontinua, la temperatura es controlada mediante una camisa y frecuentemente mediante una serpentina interna de refrigeración.

Cuando las concentraciones del polímero se encuentran entre el 30% y el 70% se produce una aglomeración prematura de porciones del polímero semisólido, denso y pegajoso. En este momento es donde se alcanza el estado crítico de la polimerización, la agitación es más forzada y se deben agregar agentes de suspensión, dado que más aglomeración puede provocar la rotura del motor y si la agitación es insuficiente se produce material pobre. Por lo contrario, si la agitación es demasiada, puede quedar gas atrapado en el material. Una falla momentánea en la agitación produciría la aglomeración inevitable del material.

Cerca del final de la polimerización la mezcla polímero-agua es enfriada a 85°C para que la aglomeración de las partículas de polímero sea mínima al ser transferida al tanque de almacenaje.

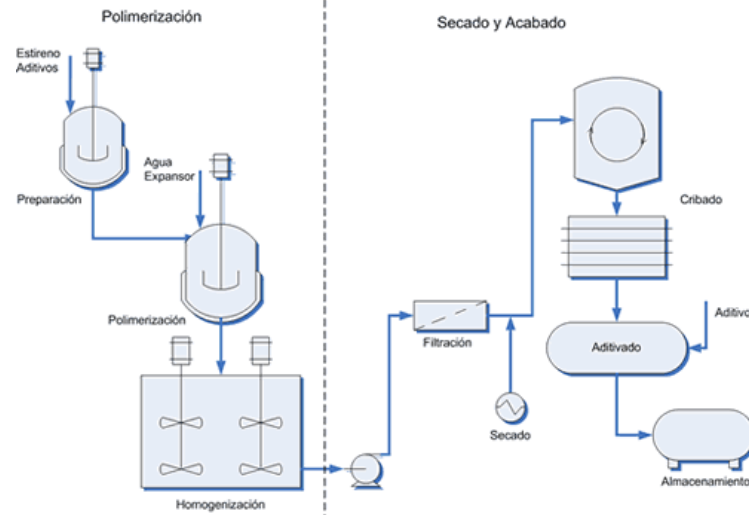


Figura 14: Esquema de fabricación de Poliestireno Expandido. (Fuente: ⁽⁵³⁾ ANAPE, 2010)

En una segunda fase se obtendría el poliestireno expandido, que consistiría en que el poliestireno expandible es transformado en artículos acabados de EPS mediante un proceso que consta de tres etapas: Etapa de Expansión, Etapa de Estabilizado, y una última de Expansión y el Moldeo.

1.2.2.4.2.- Propiedades.

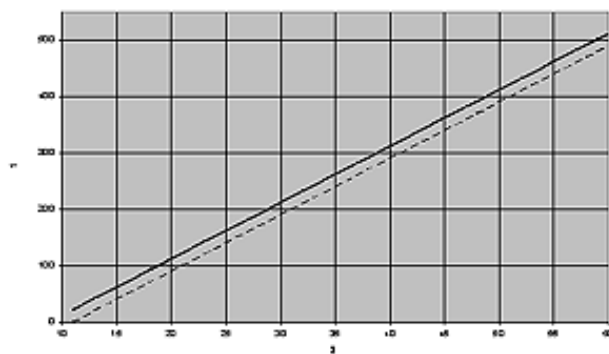
- Físicas:

a) Resistencia mecánica.

La resistencia a los esfuerzos mecánicos de los productos de EPS, se evalúan generalmente a través de las siguientes propiedades:

- Resistencia a la compresión para una deformación del 10%.
- Resistencia a la flexión.
- Resistencia a la tracción.
- Resistencia a la cizalladura o esfuerzo cortante

La densidad del material (Figura 15) guarda una estrecha correlación con las propiedades de resistencia mecánica. El gráfico reflejado a continuación muestra los valores alcanzados sobre estas propiedades en función de la densidad aparente de los materiales de EPS.



1.- Tensión de compresión (σ_{10}) [kPa]

2.- Densidad aparente (ρ_a) [kg/m³]

Figura 15: Gráfica de los valores alcanzados en resistencia mecánica, en función de la densidad aparente. (Fuente: ⁽⁵³⁾ ANAPE, 2010)

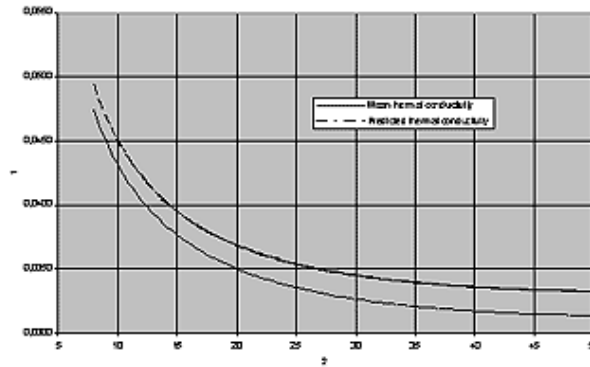
b) Tensión de compresión (σ_{10}) (⁵⁴ UNE-EN-826)

Esta propiedad se requiere en los productos de EPS sometidos a carga, como suelos, cubiertas, aislamiento perimetral de muros. En la práctica la deformación del EPS en estas aplicaciones sometidas a carga es muy inferior al 10%.

Los productos de EPS tienen una deformación por fluencia de compresión del 2% o menos, después de 50 años, mientras estén sometidos a una tensión permanente de compresión de 0,30 (σ_{10}) kPa.

c) Aislamiento térmico:

Los productos y materiales de EPS presentan una excelente capacidad de aislamiento térmico frente al calor y al frío. De hecho, muchas de sus aplicaciones están directamente relacionadas con esta propiedad: por ejemplo cerramientos de los edificios o envase y embalaje de alimentos frescos y perecederos. Esta buena capacidad de aislamiento térmico se debe a la propia estructura del material que esencialmente consiste en aire ocluido dentro de una estructura celular conformada por el poliestireno. Aproximadamente un 98% del volumen del material es aire y únicamente un 2% materia sólida (poliestireno). De todos es conocido que el aire en reposo es un excelente aislante térmico. La capacidad de aislamiento térmico de un material está definida por su coeficiente de conductividad térmica, λ , que en el caso de los productos de EPS varía, al igual que las propiedades mecánicas, con la densidad aparente. El gráfico adjunto nos muestra esta influencia (Figura 16):



1.- Conductividad Térmica (λ) [W/m·K]

2.- Densidad aparente (ρ_a) [kg/m³]

Figura 16: Gráfica de los valores alcanzados en conductividad térmica, en función de la densidad aparente. (Fuente: ⁵³ ANAPE, 2010).

Existen nuevos desarrollos de materia prima que aportan a los productos transformados coeficientes de conductividad térmica considerablemente inferiores a los obtenidos por las materias primas estándar

d) Comportamiento frente al agua y al vapor de agua.

El EPS no es higroscópico, a diferencia de lo que sucede con otros materiales del sector del aislamiento y embalaje. Incluso sumergiendo el material completamente en agua los niveles de absorción son mínimos con valores oscilando entre el 1% y el 3% en volumen (ensayo por inmersión después de 28 días). Nuevos desarrollos en las materias primas resultan en productos con niveles de absorción de agua aún más bajos. Al contrario de lo que sucede con el agua en estado líquido el vapor de agua sí puede difundirse en el interior de la estructura celular del EPS cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de presiones y temperaturas. Para determinar la resistencia a la difusión del vapor de agua se utiliza el factor adimensional μ que indica cuantas veces es mayor la resistencia a la difusión del vapor de agua de un material con respecto a una capa de aire de igual espesor (para el aire $\mu = 1$). Para los productos de EPS el factor μ , en función de la densidad, oscila entre el intervalo $\mu = 20$ a $\mu = 100$. Como referencia, la fibra de vidrio tiene un valor $\mu = 1$ y el poliestireno extruido $\mu = 150$.

e) Estabilidad dimensional.

Los productos de EPS, como todos los materiales, están sometidos a variaciones dimensionales debidas a la influencia térmica. Estas variaciones se evalúan a través del coeficiente de dilatación térmica que, para los productos de EPS, es independiente de la densidad y se sitúa en los valores que oscilan en el intervalo 5 -

$7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, es decir entre 0,05 y 0,07 mm. por metro de longitud y grado Kelvin. A modo de ejemplo una plancha de aislamiento térmico de poliestireno expandido de 2 m de longitud y sometida a un salto térmico de 20°C experimentará una variación en su longitud de 2 a 2,8 mm.

f) Estabilidad frente a la temperatura.

El EPS puede sufrir variaciones o alteraciones por efecto de la acción térmica. El rango de temperaturas en el que este material puede utilizarse con total seguridad sin que sus propiedades se vean afectadas no tiene limitación alguna por el extremo inferior (excepto las variaciones dimensionales por contracción). Con respecto al extremo superior el límite de temperaturas de uso se sitúa alrededor de los 100°C para acciones de corta duración, y alrededor de los 80°C para acciones continuadas y con el material sometido a una carga de 20 kPa.

g) Comportamiento frente a factores atmosféricos.

La radiación ultravioleta es prácticamente la única que reviste importancia. Bajo la acción prolongada de la luz UV, la superficie del EPS amarillea y se vuelve frágil, de manera que la lluvia y el viento logran erosionarla. Dichos efectos pueden evitarse con medidas sencillas, en las aplicaciones de construcción con pinturas, revestimientos y recubrimientos. Debido a que estos efectos sólo se muestran tras la exposición prolongada a la radiación UV, en el caso de las aplicaciones de envase y embalaje no es objeto de consideración.

- Propiedades Químicas

El EPS es estable frente a muchos productos químicos. Si se utilizan adhesivos, pinturas disolventes y vapores concentrados de estos productos, hay que esperar un ataque de estas sustancias. En la siguiente tabla se detalla más información acerca de la estabilidad química del EPS (Tabla 31).

SUSTANCIA ACTIVA	ESTABILIDAD
Solución salina (agua de mar)	Estable: EPS no se destruye con una acción prolongada
Jabones y soluciones de tensoactivos	Estable: EPS no se destruye con una acción prolongada
Lejías	Estable: EPS no se destruye con una acción prolongada
Acidos diluidos	Estable: EPS no se destruye con una acción prolongada
Acido clorhídrico (al 35%), ácido nítrico (al 50%)	Estable: EPS no se destruye con una acción prolongada
Acidos concentrados (sin agua) al 100%	No estable: EPS se contrae o se disuelve

Soluciones alcalinas	Estable: EPS no se destruye con una acción prolongada
Disolventes orgánicos (acetona, ésteres)	No estable: EPS se contrae o se disuelve
Hidrocarburos alifáticos saturados	No estable: EPS se contrae o se disuelve
Aceites de parafina, vaselina	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie
Aceite de diesel	No estable: EPS se contrae o se disuelve
Carburantes	No estable: EPS se contrae o se disuelve
Alcoholes (metanol, etanol)	Estable: EPS no se destruye con una acción prolongada
Aceites de silicona	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie

Tabla 31: Estabilidad química del EPS. (Fuente: ⁽⁵³⁾ ANAPE, 2010).

- Propiedades Biológicas

El EPS no constituye substrato nutritivo alguno para los microorganismos. Es imputrescible, no enmohece y no se descompone. No obstante, en presencia de mucha suciedad el EPS puede hacer de portador de microorganismos, sin participar en el proceso biológico. Tampoco se ve atacado por las bacterias del suelo. Los productos de EPS cumplen con las exigencias sanitarias y de seguridad e higiene establecidas, con lo que pueden utilizarse con total seguridad en la fabricación de artículos de embalaje destinados al contacto alimenticio. El EPS no tiene ninguna influencia medioambiental perjudicial no es peligroso para las aguas. Se pueden adjuntar a los residuos domésticos o bien ser incinerados. En cuanto al efecto de la temperatura, mantiene las dimensiones estables hasta los 85°C. No se produce descomposición ni formación de gases nocivos.

- Comportamiento frente al Fuego

Las materias primas del EPS son polímeros o copolímeros de estireno que contienen una mezcla de hidrocarburos de bajo punto de ebullición como agente de expansión. Todos ellos son materiales combustibles. El agente de expansión se volatiliza progresivamente en el proceso de transformación. El 10 % residual requiere de una fase de almacenamiento durante un tiempo en función de las especificaciones del producto. En caso de manipulación de productos sin esta fase de almacenamiento se tomarán medidas de prevención contra incendios. Al ser expuestos a temperaturas superiores a 100°C, los productos de EPS empiezan a reblandecerse lentamente y se contraen, si aumenta la temperatura se funden. Si continua expuesto al calor durante

un cierto tiempo el material fundido emite productos de descomposición gaseosos inflamables. A este respecto se adjunta la tabla 24 con la composición de dichos gases. En ausencia de un foco de ignición los productos de descomposición térmica no se inflaman hasta alcanzar temperaturas del orden de los 400 - 500°C.

El desarrollo y la amplitud del incendio depende, además de la intensidad y duración del mismo, de las propiedades específicas de las materias primas utilizadas en la fabricación del poliestireno expandido: estándar (M4) o autoextinguible (M1). Un material tratado con agentes ignifugantes (autoextinguible) se contrae si se expone a una llama. Sólo empezará a arder si la exposición se prolonga, a una velocidad de propagación muy baja, las llamas se propagan sólo en la superficie del material. Para calibrar las diferentes situaciones de riesgo que comporta el empleo de EPS, deben tenerse en cuenta factores derivados de su contenido, su forma y su entorno. El comportamiento al fuego de los materiales de EPS puede modificarse aplicando recubrimientos y revestimientos (Tabla 32).

Probeta	Componentes de los gases de combustión	Composición del gas de combustión en ppm a una determinada temperatura de ensayo.			
		300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Material expandido de producto estándar	Monóxido de carbono	50 *	200 *	400 *	1000 *
	Estireno monómero	200	300	500	50
	Otras sustancias aromáticas	Trazas	10	30	10
	Acido bromhídrico	0	0	0	0
Material expandido de producto autoextinguible	Monóxido de carbono	10 *	50 *	500 *	1000 *
	Estireno monómero	50	100	500	50
	Otras sustancias aromáticas	Trazas	20	20	10
	Acido bromhídrico	10	15	13	11
Madera de abeto	Monóxido de carbono	400 *	6000 **	12000 **	15000 **
	Sustancias aromáticas	-	-	-	300
Planchas aislantes de aglomerado de madera	Monóxido de carbono	14000 **	24000 **	59000 **	69000 **
	Sustancias aromáticas	Trazas	300	300	1000

* Combustión sin llama

** Combustión con llama

- no se midió

Tabla 32: Tabla resumen del comportamiento frente al fuego. (Fuente: ⁽⁵³⁾ANAPE, 2010).

1.2.2.4.3.- Aplicaciones.

Por su versatilidad y facilidad de conformado, además de sus excelentes cualidades y propiedades, el EPS presenta un amplio abanico de aplicaciones.

- Construcción. Se utiliza como aislamiento térmico y material de aligeramiento.
- Material de envase y embalaje para todo tipo de productos en diversos sectores de aplicación.
- Aplicaciones diversas. El EPS extiende su potencial de utilización a prácticamente todos los sectores de la actividad humana. Las características del EPS como material permiten fabricar productos ligeros de alta protección tales como cascos de protección, salvavidas. Moldes especiales de EPS para la elaboración de complicadas piezas de fundición, material preexpandido para rellenos diversos para componentes de automóvil.

1.2.2.5.- Poliuretano.

1.2.2.5.1.- Orígenes y características.

El descubrimiento del poliuretano se remonta al año 1937, gracias a las investigaciones desarrolladas por Otto Bayer. Se empezó a utilizar en la década de los 50, ya que hasta entonces no existieron máquinas capaces de procesarlo (Figura 17).

Las materias primas proceden de dos productos: el petróleo y el azúcar, para obtener, después de un proceso químico de transformación, dos componentes básicos, llamados genéricamente ISOCIANATO y POLIOL. La mezcla en las condiciones adecuadas de estos dos componentes nos proporcionará, según el tipo de cada uno de ellos y los aditivos que se incorporen, un material macizo o poroso, rígido o flexible, de celdas abiertas o cerradas (Fotografía 19).

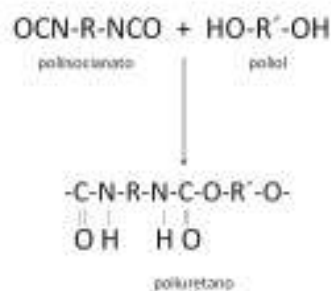
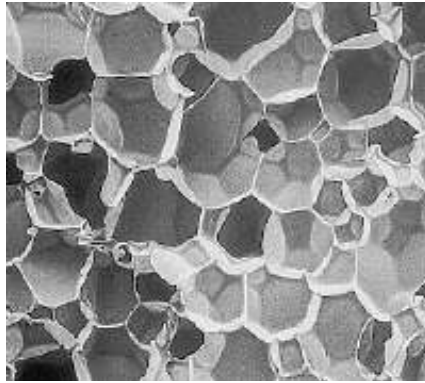


Figura 17: Esquema de formación de un poliuretano. (Fuente: ⁽¹⁰⁰⁾Bayer Material Science. Información técnica, 2004).



Fotografía 19: Vista microscópica de las celdas cerradas de la espuma de poliuretano. (Fuente ⁽⁵³⁾ATEPA, 2010).

La mezcla de los dos componentes POLIOL e ISOCIANATO, que son líquidos a temperatura ambiente, produce una reacción química exotérmica. Esta reacción química se caracteriza por la formación de enlaces entre el poliol y el isocianato, consiguiendo una estructura sólida, uniforme y muy resistente. Si el calor que desprende la reacción se utiliza para evaporar un agente hinchante, se obtiene un producto rígido que posee una estructura celular, con un volumen muy superior al que ocupaban los productos líquidos. Es lo que denominamos espuma rígida de poliuretano, o PUR (Fotografía 20).



Fotografía 20: Proceso de espumación del poliuretano. (Fuente: ⁽⁵⁵⁾ATEPA, 2010).

La espuma rígida de poliuretano (Figura 18) es un material sintético duroplástico, altamente reticulado espacialmente y no fusible. En las densidades habituales, para aislamiento térmico, la espuma contiene solamente una pequeña parte del volumen de materia sólida (con una densidad de 35 kg/m^3 , sólo el 3% del volumen es materia sólida).



Figura 18: Estructura de una celdilla de espuma. (Fuente: ⁽¹⁰⁰⁾Bayer Material Science. Información técnica, 2004).

Existen dos sistemas de fabricación que conducen a dos productos diferenciados:

- Espuma rígida de poliuretano aplicada in situ por proyección, o poliuretano proyectado, que se obtiene mediante pulverización simultánea de los dos componentes sobre una superficie denominada sustrato.

- Espuma rígida de poliuretano aplicada in situ por colada, o poliuretano inyectado, en el que los dos componentes se mezclan físicamente por batido y se introducen en una cavidad donde se realiza la expansión.

1.2.2.5.2.- Propiedades.

a) Aislante térmico.

Posee una alta capacidad aislante. Esta característica especial se debe a la baja conductividad térmica que posee el gas espumante ocluido en el interior de las celdas cerradas.

El poliuretano proyectado no supera el valor de conductividad térmica inicial de $\lambda(10^\circ\text{C}) = 0,022 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ (calculado según la Norma ⁽¹¹⁹⁾UNE 92202). Debido a que las celdas no impiden totalmente la difusión de gases a través de sus paredes, este valor de conductividad va aumentando ligeramente con el tiempo hasta llegar finalmente a estabilizarse. En la práctica, se considera como valor de cálculo de conductividad térmica de la espuma el obtenido después de 9 meses de envejecimiento acelerado $\lambda(10^\circ\text{C}) = 0,028 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. (Procedimiento recogido en la Norma ¹⁰³UNE 92120-1) (Tabla 33).

Espesor (mm)	Resistencia Térmica (m ² . °K/W)
20	0,71
25	0,89
30	1,07
35	1,25
40	1,43
45	1,61
50	1,79
55	1,96
60	2,14
65	2,32
70	2,50
75	2,68
80	2,86
85	3,04
90	3,21
95	3,39
100	3,57

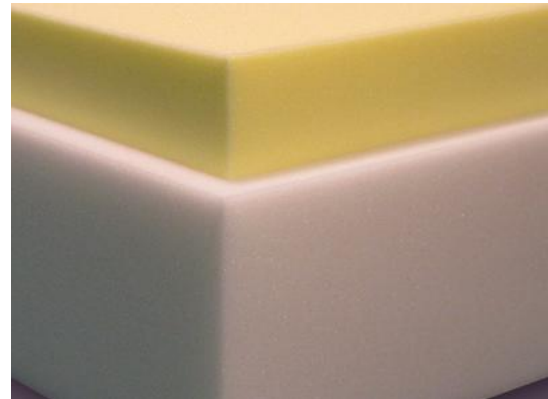
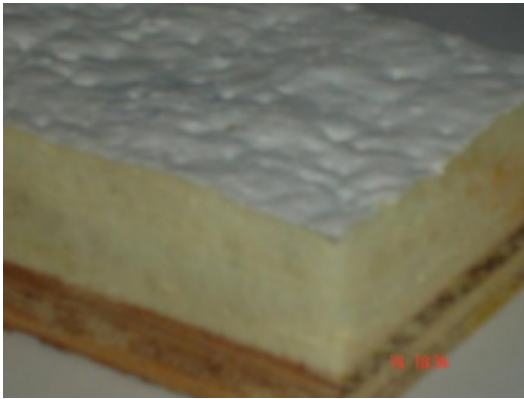
Tabla 33: Valor de Resistencia Térmica en función del espesor. (Fuente: ⁽⁵⁵⁾ATEPA, Septiembre, 2010).

La conductividad térmica del poliuretano proyectado $\lambda = 0.028 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Así mismo, mediante la aplicación de recubrimientos que eviten la difusión de gases (barreras de vapor) es posible conseguir que la conductividad térmica de la espuma no presente alteraciones apreciables con el tiempo, manteniendo valores de $\lambda(10^\circ\text{C}) = 0,024 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Gracias a esta baja conductividad térmica, $\lambda(10^\circ\text{C}) = 0,028 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, el poliuretano proyectado alcanza los valores de aislamiento térmico exigidos en el CTE con el mínimo espesor, lo que permite dejar una mayor superficie habitable, con el consiguiente beneficio económico.

b) Aislante acústico.

El poliuretano proyectado tradicional es un material compuesto de celdas cerradas (>90%) y ligero, de baja densidad (Fotografía 21 y Fotografía 22). Por tanto,

no destaca por su capacidad de absorción acústica, ya que presenta una superficie de absorción limitada, ni tampoco destaca como absorbente elástico.



Fotografía 21: Poliuretano en espuma y Fotografía 22: Poliuretano en espuma .Acabado.

No obstante, puede utilizarse combinado con otros materiales para reducir la transmisión de sonidos. Podemos señalar como muy positivo el efecto de sellado que realiza en los cerramientos por ser un Sistema Continuo Estanco, aportando por esta razón un buen resultado en cuanto al aislamiento al ruido aéreo, incrementando este aislamiento, según los casos, entre 7 y 9 dB. También en la construcción actúa muy eficazmente como amortiguador de vibraciones, ayudando a la eliminación de resonancias. En la Tabla 34 figura el coeficiente de absorción en función de la frecuencia. El coeficiente de reducción de transmisión de ruidos es 0,32.

Frecuencia (Hz)	Coefficiente de absorción
125	0,12
250	0,18
350	0,20
500	0,27
1000	0,19
2000	0,62
4000	0,22

Tabla 34: Coeficiente de absorción del poliuretano proyectado de celda cerrada en función de la frecuencia. (Fuente: ⁽⁵⁵⁾ATEPA, Septiembre, 2010).

Hoy en día disponemos de otra gama de espumas de poliuretano proyectado de baja densidad y celda abierta, específicamente diseñadas para aislamiento y

absorción acústica, que aumentan el coeficiente de absorción acústico hasta $\alpha = 0,5$. Sus características son:

- Densidad: $\rho < 15 \text{ kg/m}^3$ ($0,15 \text{ kN/m}^3$)
- Resistividad al Flujo del aire: $r = 5 - 6 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2$
- Rigidez Dinámica: $s' = 4.83 \text{ MN/m}^3$
- Coeficiente de Absorción acústica: $\alpha = 0,5$
- Conductividad térmica: $\lambda = 0,035 - 0.040 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
- Contenido en Celdas Cerradas: (CCC) $< 10\%$

c) Seguridad frente al fuego.

El poliuretano proyectado, como todos los polímeros, es un material orgánico y por tanto combustible. No obstante, existen espumas de poliuretano clasificadas desde C,s3-d0 (M1) hasta E (M3), según ⁽¹⁰¹⁾UNE-EN 13501 (⁽¹⁰²⁾UNE 23727), debiendo aplicarse unas u otras de acuerdo con el riesgo a que vayan a estar expuestas y de acuerdo a las exigencias del ⁽⁸³⁾CTE DB-SI.

La Norma ⁽¹⁰³⁾UNE 92120-1 de sistemas para poliuretano proyectado fija que su clasificación no puede ser mas desfavorable que E (M3). Por otra parte, la clasificación de productos según ⁽¹⁰¹⁾UNE-EN 13501 admite ensayos en condición de aplicación final de uso, esto es, si el poliuretano proyectado va a ir recubierto por otro material (yeso laminado, plancha metálica), el ensayo y la clasificación se realizara montando las muestras de esta forma.

Los fabricantes de sistemas tienen que acreditar mediante certificado de ensayo hasta que espesor máximo cumplen sus diferentes sistemas en las diferentes clasificaciones según las diferentes condiciones o aplicaciones finales de uso.

d) Resistencia mecánica

En aquellas aplicaciones específicas donde la espuma vaya a estar sometida a carga (ej.: suelos, cubiertas, terrazas), la exigencia de la Norma ⁽¹⁰³⁾UNE 92120-1 es que la resistencia a la compresión de la espuma, determinada según la Norma ⁽⁵⁴⁾UNE-EN 826, no sea inferior a 200 kPa.

La resistencia a la compresión (Figura 19) oscila entre 150 kPa para una espuma de 35 kg/m^3 ($0,35 \text{ kN/m}^3$) y 325 kPa para 60 kg/m^3 ($0,6 \text{ kN/m}^3$). Por otra parte, la resistencia a tracción, siempre mayor, oscila entre 180 kPa para una espuma de 30 kg/m^3 ($0,3 \text{ kN/m}^3$) y 820 kPa para una de 60 kg/m^3 ($0,6 \text{ kN/m}^3$).

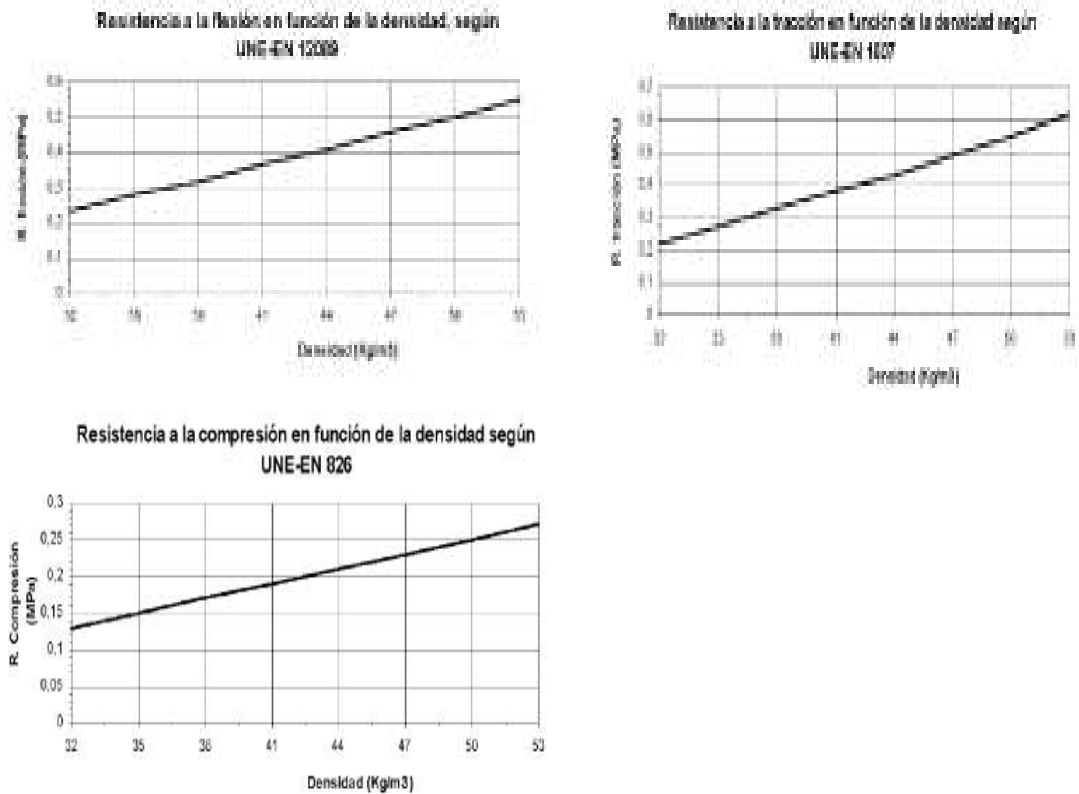


Figura 19: Valores de resistencia a Flexión, Tracción y Compresión para el poliuretano en función de la densidad. (Fuente: ⁽⁵⁵⁾ATEPA, 2010).

e) Estabilidad química.

El poliuretano proyectado es (Tabla 35):

- Resistente, en gran medida, a los disolventes utilizados en adhesivos, pinturas, pastas bituminosas, en conservantes para la madera y en masillas sellantes.
- Resistente al envejecimiento, contra la acción de las raíces e inerte bioquímicamente frente al ataque de mohos.
- Estable frente a los carburantes, aceites minerales y los ácidos y álcalis diluidos.
- Resistente contra la acción de los gases de escape o a la atmosfera industrial mas agresiva.
- Imputrescible, estable ante el detritus, inodoro y fisiológicamente no presenta inconvenientes.
- Químicamente neutro.

Producto químico	Cambio de volumen	Comportamiento
Alcalis, ácidos y soluciones salinas		
Agua de mar	3%	Estable
Acido clorhídrico concentrado.	-	Atacado
Acido clorhídrico 10%	2%	Estable
Acido sulfúrico 10	2%	Estable
Acido nítrico concentrado.	-	Atacado
Acido nítrico 10%	6%	Estable
Sosa caustica concentrada.	2%	Estable
Sosa caustica 10%	2%	Estable
Amoniaco concentrado.	6%	Estable
Amoniaco 10%	4%	Estable
Hidrocarburos alifáticos		
Gasolina	1%	Estable
Gasoil	2%	Estable
Aceite mineral	1%	Estable
Gasolina / benceno 60:40	1%	Estable
Hidrocarburos aromáticos		
Benceno	5%	Estable
Tolueno	2%	Estable
Clorobenceno	5%	Estable
Estireno monomero	2%	Estable
Otros disolventes orgánicos		
Etanol	13%	Hinchamiento
Metanol	12%	Inestable
Butanol	9%	Estable condicionado
Acetona	18%	Inestable
Acetato de etilo	16%	Hinchamiento
Tricloroetileno	14%	Hinchamiento
Cloruro metileno	17%	Inestable
Dimetilformamida	-	Atacado

Tabla 35: Estabilidad química del poliuretano proyectado bajo condiciones de ensayo (Comportamiento después de 28 días a 20 °C). (Fuente: ⁽⁵⁵⁾ ATEPA, Septiembre, 2010).

1.2.2.5.3.- Aplicaciones.

Los sistemas de poliuretano, hoy en día, son muy versátiles y permiten una gama amplísima de aplicaciones que forman parte de nuestra vida.

- Industria automovilística: volantes, spoilers, alerones, asientos, salpicaderos, como amortiguación de vibraciones y ruidos.
- Industria del calzado (sobretudo deportivo).
- Industria de fabricación de muebles y ventanas.
- Industria de fabricación de pinturas y barnices.
- Ingeniería médica (fabricación de piezas para trasplantes y ortopedias, hemofiltros)
- Ingeniería aeroespacial
- Industria del frío (tuberías, cámaras frigoríficas, neveras, criogenia).
- Industria de la construcción.

1.2.2.6.- Corcho.

1.2.2.6.1- Origen y características.

El corcho es un material que constituye la corteza del alcornoque (*Quercus Súber*, L). El alcornoque es un árbol autóctono de la zona Mediterránea Occidental y algo de la Atlántica, en donde encuentra las condiciones óptimas de habitabilidad. Los países en los que se halla el alcornoque de forma espontanea son los siguientes: Portugal, España, Argelia, Marruecos, Francia, Italia y Túnez.

El alcornoque tiene la particularidad de poder ser despojado de su corteza o cubierta externa, constituida por el tejido suberoso llamado corcho, regenerándola posteriormente.

Para ser descorchados, los árboles han de tener una edad o tamaño mínimo; la cantidad de corcho extraído del árbol no debe sobrepasar un cierto límite; la época de extracción ha de ser preferiblemente estival, y el turno o periodicidad de la saca ha de ser 9 o 10 años por lo general.

La edad en la que se efectúa la primera extracción de corcho en los alcornoques es la de 20 a 25 años pues es entonces cuando el crecimiento relativo del árbol ha alcanzado su valor máximo y el corcho es susceptible de aprovechamiento.

El primer corcho que se obtiene del árbol se denomina *bornizo* y por su forma y estructura solamente es utilizable para la obtención de granulado. El corcho siguiente recibe el nombre de *segundo* y aunque con mejor calidad industrial que el bomizo es también empleado como regla general para granulados. El corcho que se obtiene la tercera y siguientes veces, llamado de *reproducción*, propiamente dicha es el de mejor calidad y se destina para la elaboración de las manufacturas más valiosas, como son los tapones. No obstante puede el corcho de tercera y sucesivas pelar tener una calidad insuficiente, por razones fisiológicas, ecológicas o culturales, denominándose en tal caso *refugo*, y siendo destinado a la trituración para la obtención de granulados.

La corteza del alcornoque está constituida por tres capas o zonas claramente diferenciales yendo del centro a la periferia son: el endofleo o liber, el mesofleo o cubierta celular herbácea y el epifleo o corcho propiamente dicha.

El corcho es un tejido vegetal constituido por la agrupación de células muertas con forma, estructura y disposición particulares.

Las celdas de corcho, según mostró el profesor Frederic T. Lewis de Harvard, poseen 14 caras, seis de ellas son cuadriláteros y 8 de ellas hexágonos. Las celdas constan de catorce caras pues es la forma más perfecta que ofrece la naturaleza para conseguir el mayor volumen con la menor superficie. Un polígono de 14 caras necesita el mínimo material para cubrir un volumen.

Desde luego no todas las celdas o células que constituyen el corcho son tetradecaedros perfectos ya que debido a circunstancias de crecimiento u otros factores algunas de las celdas tienen menos de 14 caras (Figura 15 y Figura 15a). El número de células por cm^2 es del orden de millones

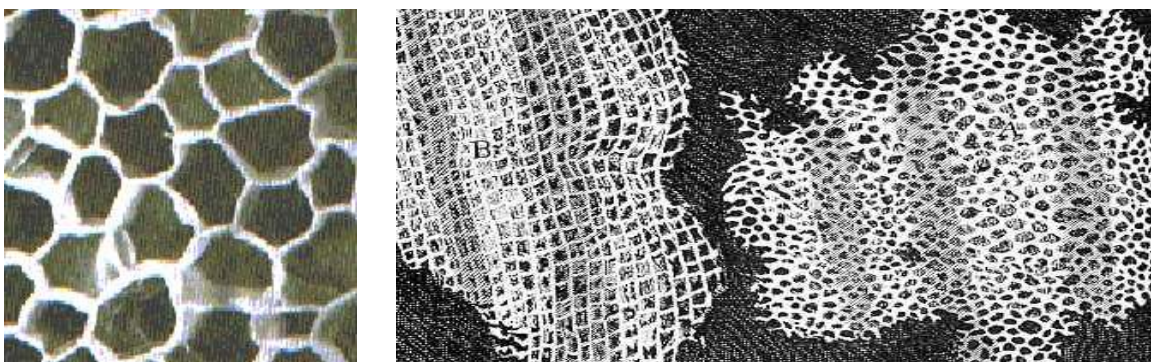
The image consists of two side-by-side microscopic views of cork cells. The left image shows a regular, honeycomb-like structure of cells, likely representing the endofleo or liber. The right image shows a more complex, irregular structure of cells, possibly representing the mesofleo or cubierta celular herbácea. The cells are arranged in a way that suggests a three-dimensional structure, with some cells appearing to be stacked on top of others.

Figura 20 y Figura 20a: Constitución celular del corcho. (Fuente: ⁽⁵⁷⁾Giles, B. 1961).

Las células que constituyen el corcho están dispuestas muy regularmente y próximas entre sí, sin que existan espacios intercelulares.

Tesis Doctoral - Antecedentes

90

Cada célula está formada por una cámara de aire envuelta por una membrana o pared celular. Esta membrana está integrada por capas de distinta naturaleza: celulósica la interior, de suberina la intermedia y más gruesa y lignificada la externa. Cada dos células contiguas están unidas por sus partes lignificadas. El tamaño de cada célula es muy pequeño, oscilando entre 70 micras (células producidas en primavera) y 10 micras (células producidas en otoño, al final del periodo vegetativo del alcornoque en la localización en que vive). El espesor de las membranas celulares oscila entre 1 en verano y 2,5 micras en otoño.

Las células jóvenes de corcho contienen protoplasma, núcleo y otros diversos productos diferenciados, presentando sus membranas naturaleza celulósica. A causa de un fenómeno semejante al de incrustación de las paredes de las células de la madera, en proceso de lignificación, las membranas de las células suberosas se transforman en una sustancia elástica, amarilla o rojiza, llamada suberina, siendo reabsorbido el contenido de las celdillas, que pronto se llenan de aire.

La suberina es un cuerpo menos oxigenado que la celulosa, siendo muy impermeable y teniendo por fórmula según Beauverie: $(C_6H_{10}O)_{12}$. La proporción en que entra a formar parte del corcho oscila entre 50% y 60% en peso, siendo el porcentaje de la celulosa de 20 a 30% y de 11 a 12% el de materia nitrogenada; las cenizas oscilan en torno a 0.4.

La composición química del corcho seco (Tabla 36), abstracción hecha de las cenizas, según se deduce de repetidos análisis, resulta ser la siguiente:

Carbono	66,8
Oxígeno	22,8
Hidrógeno	8,5
Nitrógeno	1,9

Tabla 36: Composición química del corcho. Abstracción de las cenizas. (Fuente: ⁽⁴⁾Del Río Merino, M. Tesis Doctoral, 1999)

Según otra relación de J. Juliá (1979), la composición básica del corcho es la siguiente (Tabla 37):

Constituyente	Cantidad (%)
Ácidos grasos	24 - 35
Celulosa	30 - 32
Lignina	20 - 32
Cenizas	0,1 – 0,2
Humedad	3 - 7
Taninos y Flabofenos	2,5 – 6,5
Cerina y Friedelina	2 - 3

Tabla 37: Composición básica del corcho (Fuente: ⁽⁴⁾Juliá, J, 1979; Del Río Merino, M. 1999)

1.2.2.6.2- Propiedades.

a) Propiedades físicas.

Son el resultado directo de su estructura celular rellena de aire.

- Compresibilidad y resistencia: Estas dos propiedades lo han hecho indispensable en numerosas aplicaciones. Un trozo de corcho puede reducirse sometido a una presión y después de que esta presión se reduce o desaparece, el corcho recupera en un 95% su tamaño original.

- Impermeable al agua y a otros líquidos: Tanto las celdas rellenas de aire como la resina que las une son impermeables al agua. Al tener una estructura no capilar la penetración a su través es prácticamente imposible. También el corcho es resistente al aceite.

- Bajo peso específico, Entre 0,20 y 0,25. La ligereza la debe a su estructura celular rellena de aire y a que el material que une las celdas es también muy ligero. La densidad del corcho varía con la naturaleza y edad del árbol. A igualdad de volumen, el corcho delgado o fino es más denso que el grueso o basto. Dentro de una misma clase, la densidad aumenta con la edad.

- Baja conductividad térmica (Figura 16): Debido a que el aire que rellena las celdillas es un excelente aislante térmico, ya que retarda la transferencia de calor a bajas y moderadas temperaturas. Esta propiedad junto con la baja densidad y la resistencia a la presión ha hecho del corcho uno de los principales materiales aislantes térmicos.

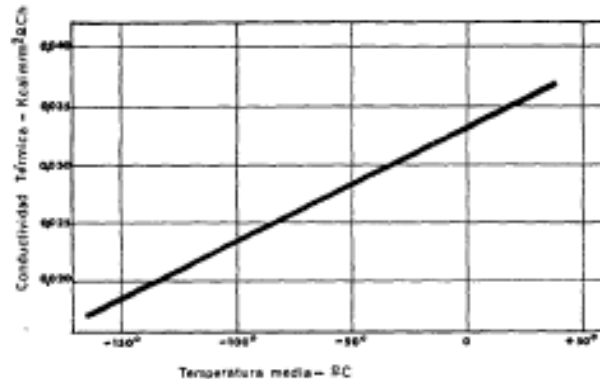


Figura 21: Conductividad térmica del aglomerado de corcho. (Fuente: ⁽⁵⁸⁾Velasco, L. 1970).

- Absorción de vibraciones: la propiedad de resistencia del corcho ha hecho de él una importante herramienta en el aislamiento acústico. Las celdas rellenas de aire del corcho reciben las vibraciones, las absorben y las reducen de forma que no son transmitidas a través del corcho.

- Absorción acústica: se emplea como aislante contra el ruido y la absorción al ruido. Las celdas rotas de la cara exterior del corcho forman una superficie ideal para la absorción de ondas acústicas.

- Alto coeficiente de fricción: cuando se corta una pieza de corcho se cortan las celdillas y cientos de microscópicas ventosas se forman en su superficie. En ellas se forma un vacío parcial cuando la superficie del corcho se presiona contra una superficie lisa. Este alto coeficiente de fricción que tiene el corcho lo hace imprescindible en aplicaciones donde se necesita un material cuya característica esencial es que no sea resbaladizo.

b) Propiedades químicas.

Destacar como lo principal, *su estabilidad*, ante exposiciones de 8-12 años al sol y a las condiciones climáticas que incluyen intervalos de temperaturas típicas de las zonas de alcornocales así como lluviosos inviernos y secos veranos con vientos fuertes.

Esta resistencia al *deterioro* lo ha hecho adaptable a diversas aplicaciones.

El corcho que se comercializa limpio no cambia de composición en contacto con el agua, aceites vegetales, animales o minerales, gasolina, gases como el dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno.

Resiste a los ácidos de frutas y vegetales y a cientos de compuestos químicos con lo que puede usarse para su taponamiento.

Sin embargo los álcalis fuertes y los halógenos deshacen las sustancias que ligan las celdillas y destrozan su estructura.

Otras propiedades del corcho serían:

- Es un producto natural, no contaminante.
- Tiene combustibilidad difícil.
- Estabilidad dimensional.
- Es imputrescente.
- Aislamiento ante la electricidad.
- Resistente ante: productos químicos, roedores e insectos.
- Durabilidad y conservabilidad a lo largo del tiempo sin merma de ninguna de sus propiedades específicas.

1.2.2.6.3.- Aplicaciones.

Se utiliza el granulado (Fotografía 23) además de para la elaboración de aglomerados como material de discontinuidad en pavimentos, pegado en capas de papel bituminoso de cierta consistencia, o suelos flotantes, para aislamiento acústico de ruidos producidos por percusión, gracias a su elasticidad que le posibilita como un muelle amortiguador.



Fotografías 23: Diferentes diámetros de corcho granulado. (Fuente: ⁽¹⁰⁴⁾Granulext, S.L., 2010).

Como material para revestimiento es ideal por las siguientes ventajas:

- a) Material con gran posibilidad de combinación de texturas, relieves, colores y tonalidades, mezclas con prácticamente cualquier material.
- b) Material manejable, limpio, recortable, resistente al fuego, sin desprendimiento de vapores y olores tóxicos, inocuo organolépticamente, permanentemente conservable en perfectas condiciones con un mínimo de cuidado, con posibilidad de eliminación de manchas por lavado o ligerísima abrasión, inalterable dimensionalmente, resistente al agua, ácidos débiles y minerales y un sinnúmero de reactivos, químicamente inerte, con gran resistencia al desgaste, a los esfuerzos mecánicos. Para zapatos, impermeable, no es atacable por roedores, insectos y microorganismos..
- c) Material buen aislante del calor y del frío, de la electricidad, del ruido por impacto y de las vibraciones.
- d) Material corrector acústico.
- e) Material aislante de las radiaciones complejas y de los efectos de las perturbaciones atmosféricas.
- f) Material compresible y con gran poder de recuperación.

En general el corcho como material de revestimiento se fabrica en placas, mediante operaciones de corte, reposo y pegado con colas especiales, empleándose una o varias clases o tipos de corcho natural o aglomerado.

- ***Aglomerados:***

Se emplean para su elaboración todos los residuos de las fabricaciones de láminas, tapones, residuos de difícil salida.

- ***Aglomerados puros:***

Están constituidos por granos de corcho aglutinados por medio de la resina natural del corcho. Moldeado a alta temperatura (250-300°C), la expansión del corcho hace que las partículas se compriman quedando unidas por las resinas naturales que migran a su superficie. El producto obtenido es de color oscuro y de baja densidad.

Ligando los gránulos a baja temperatura sin dañar su estructura, se obtiene un producto con el aspecto y el color del corcho natural, que se denomina corcho aglomerado compuesto no expandido.

Pueden ser expandidos o no expandidos.

- *Aglomerados. expandidos puros:*

Se denominan comúnmente negros. Su proceso de fabricación consiste en someter al granulado a cocción a 400°C y 300000 N/m² de presión, consiguiéndose una gran expansión de los granos de corcho a la vez que una exudación de las resinas naturales que posibilitan la aglutinación de unos granos con otros.

La eliminación con la cocción de los elementos más volátiles reporta una disminución de la densidad del producto resultante y una mayor pureza del mismo.

- Aglomerados puros no expandidos:

Hoy en día no se fabrican casi por haber sido sustituidos en su aplicación por ciertas clases de aglomerados compuestos.

Son obtenidos sometiendo al granulado en moldes a la acción del calor, pero a una temperatura tal, que lográndose el recubrimiento en los granos de corcho de la resina natural del mismo, con la consiguiente aglomeración no ocurra la expansión de los granos. La densidad de estos aglomerados es mucho más alta que la de los expandidos puros, unos 500 kg/m², utilizándose fundamentalmente en el recubrimiento de suelos, paredes y zócalos.

Es menor su poder aislante y su absorción acústica, pero superior su resistencia mecánica y su resistencia a la abrasión.

• ***Aglomerados compuestos:***

Están constituidos por granos de corcho aglutinados por medio de una cola apropiada ajena al corcho, obteniéndose por lo general según proceso de cocción en moldes cúbicos o cilíndricos adecuados o bien de forma continua con temperatura suave, la conveniente para determinar el fraguado de la cola sin que el granulado de corcho sufra ninguna modificación.

Como aglomerados compuestos deben de considerarse también aquellos en los que, además del corcho, entren a formar parte de su constitución no sólo aglutinantes, sino también otros materiales como caucho y el plástico.

El proceso de fabricación consiste en un troceado del corcho hasta una granulometría adecuada, mezclado con la resina que actúa como ligante y vertido en moldes donde se someterá a temperatura y presión adecuadas para obtener propiedades físicas y densidad requeridas.

Los ligantes habituales son la caserna, resinas de melamina y resinas de poliuretano. De ensayos realizados a los distintos tipos de aglomerados se deduce que

las características físicas del aglomerado realizado con resinas de poliuretano son muy superiores a las de los aglomerados obtenidos con otros ligantes. (⁴J.Juliá. 1979)

- **Regranulados:**

Deben de considerarse como un subproducto, pues proceden de los aglomerados como desperdicio de los mismos, bien de resultar del proceso de fabricación, como de aquellos bloques que han presentado alguna imperfección.

En ambos casos se trituran obteniéndose un granulado del aglomerado, que se denomina regranulado.

Existen regranulados de distintas clases, según el aglomerado de que provengan, siendo susceptibles de nueva aglutinación, ya siempre con cola.

Los productos resultantes presentan una calidad inferior a la de los aglomerados.

Los regranulados más importantes son los denominados negros, que proceden de los aglomerados expandidos puros.

Se emplean en el relleno de huecos irregulares como aislamiento térmico así como en aquellos lugares donde se desee un aislamiento térmico más barato.

1.3.- Materiales existentes utilizados para reforzar los morteros de yeso.

El refuerzo del material de yeso (Figura 17) mediante fibra es la línea de investigación más desarrollada, debido a sus grandes posibilidades, dando lugar al llamado campo de los materiales compuestos, que aunque conocido desde la antigüedad, se ha desarrollado tecnológicamente recientemente.

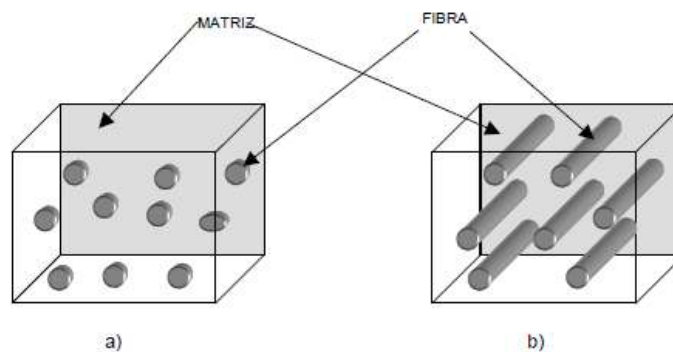


Figura 22: Material compuesto: a) Compuestos reforzados con partículas. b) Compuestos reforzados con fibras. (Fuente: ⁽⁶⁶⁾Landa Avilés, G. Tesis Doctoral, 2002).

Las fibras se utilizan desde la antigüedad para reforzar materiales frágiles como el tapial o el adobe.

Se denomina material compuesto o “composite” a un material conformado por un gran número de fibras resistentes, llamado refuerzo, embebidas en la fase continua de un material conocido con el nombre de matriz. (⁹³Phillips, R.W. 1983)

1.3.1.- Fibras de refuerzo.

El refuerzo actúa mejorando el comportamiento físico-mecánico de la matriz. Las mejoras obtenidas pueden ser: aumento de la resistencia a flexión, aumento de la tenacidad, mejora del comportamiento del material ante impactos mejora de la resistencia al fuego

1.3.1.1. Fibras de carbono.

1.3.1.1.1.- Origen y características.

Las fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo tienen un diámetro de 7 a 8 μm y constan de pequeñas cristalitas de grafito “turbostrático” (una de las formas alotrópicas del carbono). En un monocristal de grafito los átomos de carbono se ordenan en redes hexagonales, como se muestra en la Figura 18:

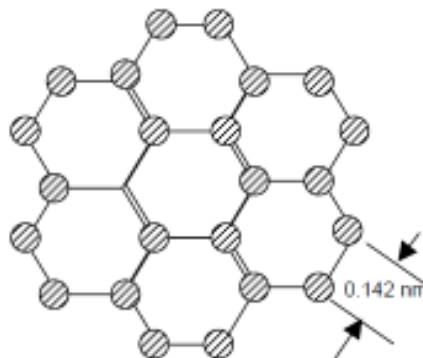


Figura 23: Ordenamiento hexagonal de la red de átomos de Carbono.

El módulo de elasticidad de las fibras de carbono depende del grado de perfección de la orientación, la cual varía considerablemente con las condiciones y proceso de fabricación. Las imperfecciones en orientación dan como resultado huecos de forma compleja, alargados y paralelos al eje de la fibra. Estos actúan como puntos de concentración de tensiones y puntos débiles que llevan a la reducción de las propiedades. Otras causas de debilidad, que se asocian a menudo al proceso de fabricación, incluyen las picaduras y las macrocristalinas (¹⁰⁵Hull, Derek, 1987)

1.3.1.1.1.1.- Procesos de obtención de fibras de carbono.

Las fibras tipo I, obtenidas a partir de poliacrilonitrilo normal (base-PAN) tienen una delgada cobertura de capas circunferenciales y un núcleo con cristalitas

desordenadas. A diferencia, algunas fibras obtenidas a partir de mesofases bituminosas muestran estructuras de capas orientadas radialmente. Estas distintas estructuras dan como resultado algunas diferencias significativas en las propiedades de las fibras (Figura 19).

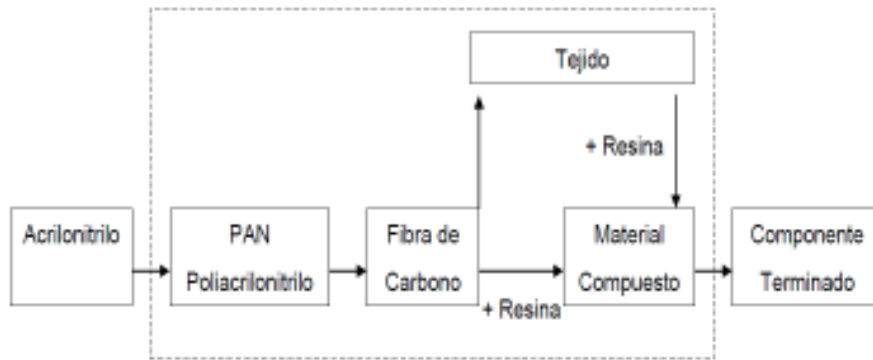


Figura 24: Flujo de fabricación de materiales compuestos de fibra de carbono. (Fuente: ¹⁰⁶HEXCEL FIBERS, S.L.).

Existen tres procedimientos principales para producir fibras con las capas graníticas orientadas preferencialmente paralelas al eje de la fibra

a) Orientación del polímero precursor por estiramiento.

El PAN se emplea como material de origen, el cual es un polímero que se asemeja mucho al polietileno en su conformación molecular en la que cada grupo lateral alternado de hidrógeno del polietileno es reemplazado por un grupo nitrilo. En el primer estado del proceso la masa de PAN se convierte en una fibra que se estira entonces para producir la orientación de las cadenas a lo largo del eje de la fibra. Cuando se la calienta la fibra estirada, los grupos activos nitrilo interaccionan y producen un polímero en escalera que consta de una fila de anillos hexagonales. Mientras la fibra está todavía bajo tensión se calienta en una atmósfera de oxígeno que conduce a la siguiente reacción química y a la formación de enlaces cruzados entre las moléculas de la escalera. El PAN oxigenado se reduce entonces para dar la estructura de anillo de carbono que se convierte en grafito turbostrático por calentamiento a temperaturas más altas. El módulo de elasticidad y la resistencia de las fibras dependerá de la temperatura del tratamiento de calentamiento final que determina el tamaño y la orientación de las cristalitas.

b) Orientación por hilado.

Este método consta del moldeo de hilos de alquitrán fundido para producir fibras. Durante este proceso de hilado los efectos hidrodinámicos en el orificio la orientación de las moléculas planas, pudiéndose inducir diferentes clases de

orientación. El hilo se hace infundible por oxidación a temperaturas por debajo de su punto de ablandamiento para evitar la fusión de los filamentos en un conjunto. Se carburiza entonces a temperaturas normalmente alrededor de los 2000°C. Se requerirán esfuerzos de tracción durante algunas de estas etapas para prevenir la relajación y pérdida de la orientación preferencial.

c) Orientación durante la grafitización.

A temperaturas muy altas las fibras carburizadas, a partir de rayón, alquitrán o PAN, pueden estirarse durante la etapa de grafitización. Esto tiene como consecuencia el deslizamiento de las capas de grafito unas sobre otras y la posterior orientación de las capas paralelamente al eje de la fibra.

Existen varias presentaciones de laminados de fibras de carbono, tales como fibras orientadas en forma unidireccional; fibras agrupadas en grupos de mechas, donde las mechas pueden orientarse en forma aleatoria (ver Figura 18) ó pueden ordenarse como un tejido (Figuras 20 y Figura 21) (Hull, D. 1987).

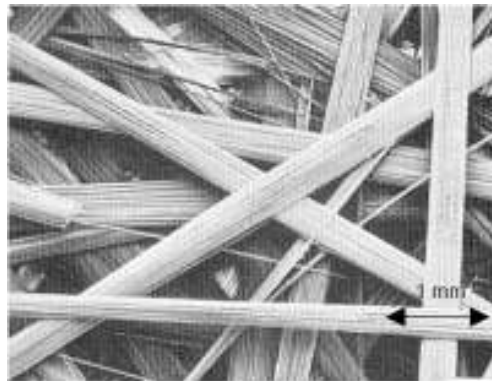


Figura.25: Micrografía de barrido electrónico de un tejido de mechas antes de la infiltración con resina. (Fuente: ¹⁰⁵Hull, D. 1987)

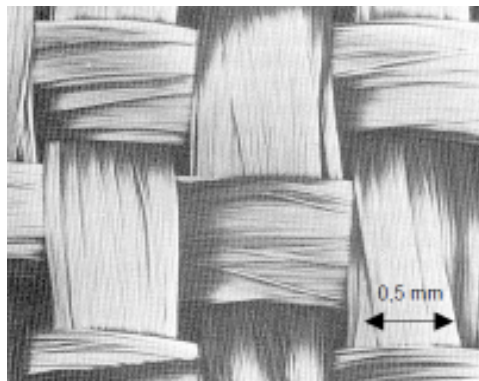


Figura 26: Micrografía de barrido electrónico de de un tejido de mechas antes de la impregnación con resinas. (Fuente: ¹⁰⁵Hull, D. 1987)

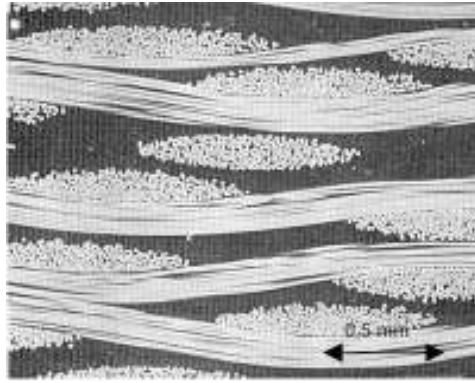


Figura 27: Fotogrametría de una sección pulida de un laminado de tejido de mechas paralelas a un conjunto de fibras. (Fuente: ¹⁰⁵Hull, D. 1987)

Cuando se habla de un laminado, se está hablando de un conjunto de láminas que bien pueden ser láminas con fibras unidireccionales o láminas con fibras conformadas por tejidos de mechas como se muestra en la Figura 22. Las fibras unidireccionales se pueden encontrar en el mercado previamente embebidas en su resina en forma rígida.

Los laminados de tejidos de fibra de carbono presentados en el mercado con el acrónimo TFC, se proporcionan en el mercado como un material flexible previo a su colocación y posteriormente embebido en su resina epóxica.

1.3.1.1.2.- Propiedades.

a) Estabilidad Térmica.

En ausencia de aire y de otras atmósferas oxidantes las fibras de carbono poseen unas propiedades excepcionalmente buenas a altas temperaturas. La resistencia y el módulo elástico dependen de la temperatura final del tratamiento térmico entre 1200°C y 2600°C. Las fibras de carbono mantienen sus propiedades a temperaturas por encima de los 2000°C. Para aplicaciones que incluyan matrices de polímeros esta propiedad no puede ser aprovechada porque la mayoría de las matrices pierden sus propiedades aproximadamente por encima de los 200°C.

b) Resistencia a Compresión.

En la Tabla 35 no se hace ninguna referencia a la resistencia y a la rigidez a compresión axial de las fibras. Estas propiedades son difíciles de medir y en general deben inferirse a partir de las propiedades de los materiales compuestos fabricados con dichas fibras. En la Figura 23 se indica la rotura de las fibras. Se ha encontrado que la rigidez axial en compresión es aproximadamente la misma que en tracción para todas las fibras.

En la Tabla 38 se observan las propiedades.

Propiedades	Carbono Base PAN TIPO I	Carbono Base PAN TIPO II
Diámetro (μm)	7,0 – 9,7	7,6 – 8,6
Densidad (1000 kg/m^3)	1,95	1,75
Módulo de Young (GPa)	390	250
Módulo (perpendicular al eje de la fibra) (GPa)	12	20
Resistencia a tracción (GPa)	2,2	2,7
Alargamiento en rotura (%)	0,5	1,0

Tabla 38: Datos aproximados proporcionados por el fabricante. (Fuente: ¹⁰⁵Hull, D. 1987).

c) Flexibilidad y Rotura de las Fibras

Las láminas de fibras de carbono se rompen sin ninguna reducción de su sección transversal (Figura 23). La fractura de las láminas a menudo implica el deshilachado de las fibras. (Hull, D. 1987)

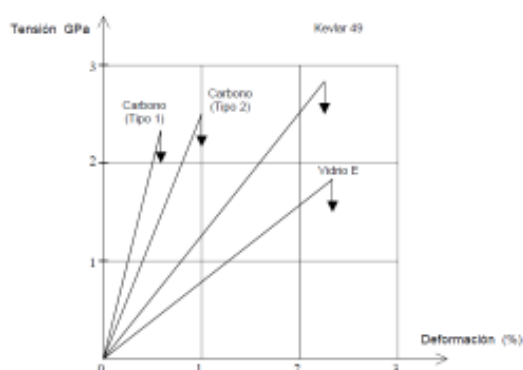


Figura 28: Curvas Tensión deformación de fibras. Las flechas verticales indican rotura completa. (Fuente: ¹⁰⁵Hull, D. 1987).

1.3.1.1.3.- Aplicaciones.

Las principales aplicaciones de la fibra de carbono son como refuerzo a otros materiales.

- Industria aeronáutica u automovilística.
- Industria de la construcción, como refuerzo en pilares y columnas, muros, vigas, tuberías.
- Obras de ingeniería como puentes, silos, túneles, construcciones industriales, aparcamientos de varios niveles.
- Fabricación de barcos y bicicletas.

- Ordenadores portátiles.
- Trípodes
- Cañas de pescar.

1.3.1.2.- Fibra de vidrio.

1.3.1.2.1- Origen y características.

La fibra de vidrio se elabora a partir de sílice, cal, alúmina y magnesita. A estas materias se les añade óxidos diversos y se trituran finamente, consiguiendo una masa homogénea, que más tarde se introduce en un horno a 1550°C.

El vidrio fundido se extruye y estira, aplicándole un ensimaje y consiguiendo así el filamento.

1.3.1.2.2.- Tipo y características.

1.3.1.2.2.1.- Fibras Tipo E.

Este tipo de fibra posee buenas propiedades dieléctricas, además de sus excelentes propiedades frente al fuego (Fotografía24). El vidrio tipo E tiene un peso específico de 2,6 gr/cm³



Fotografía 24: Material de fibra de vidrio Tipo E molida

Fabricación de la fibra de vidrio Tipo E (⁸⁷Miravete, A. 2007) (Figura 24):

Fase A. Composición-Fusión: Las materias primas finamente molidas se dosifican con precisión y se mezclan de forma homogénea. A continuación, la mezcla es introducida en el horno de fusión, y calentada a una temperatura de 1550°C, lo que condiciona hornos de coste elevado.

Fase B. Fibrado: El vidrio fundido en el horno es distribuido por canales y alimenta las hileras. Se mantiene allí a unos 1250°C, que permite su colada por gravedad. A la

salida de la hilera, el vidrio se estira a gran velocidad (10-60 m/s) y se enfría. Se obtienen filamentos de varias micras de diámetro.

Fase C. Ensimado: Los filamentos tal y como salen de la hilera no se pueden utilizar directamente, ya que no hay cohesión entre ellos, no resisten la abrasión, sufren los ataques del agua, etc. Para corregir estos defectos es necesario revestir los filamentos con una fina película (ensimaje) de una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos. El ensimaje se deposita sobre los filamentos a la salida de la hilera.

Fase D. Bobinado: El conjunto de filamentos se agrupa en una o varias unidades, que se bobinan.

Fase E. Secado: Los productos procedentes del bobinado se pasan por diferentes dispositivos de secado con objeto de eliminar el exceso de agua en que se había disuelto el ensimaje.

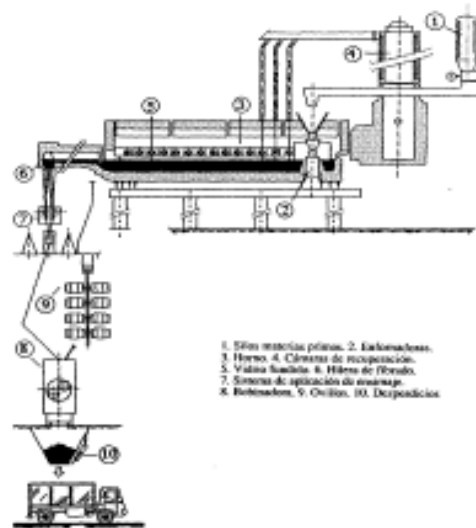


Figura 29: Fabricación de la fibra de vidrio Tipo E (Fuente: ¹⁰⁷Antequera, P. 1991)

En la Tabla 39, se observan el análisis químico de la Fibra de vidrio E.

Sílice	SiO ₂	53 – 54 %
Alúmina	Al ₂ O ₃	14 – 15 %
Óxidos de calcio y magnesio	CaO y MgO	20 – 24 %
Trióxido de boro II	B ₂ O ₃	6,5 – 9 %

Tabla 39: Análisis químico de la Fibra de vidrio E. (Fuente: ¹⁰⁸ISOVER)

Tiene escaso contenido en álcalis.

1.3.1.2.2.1.1.- Propiedades.

a) Mecánicas:

- Tenacidad (N/tex):1,30
- Fuerza a la tracción (MPas): 3400
- Elongación hasta rotura (%): 4,5

b) Térmicas:

- Conductividad térmica (W/m °K):1
- Resistencia termomecánica: 100% después de 100 horas a 200°C

c) Eléctricas:

- Resistividad (ohm.cm): 1014 – 1015
- Factor de disipación dieléctrica: 0,0010 – 0,0018 a 106 Hz.

d) Químicas:

- Absorción de humedad a 20°C y 60% de humedad relativa: 0,1
- Resistencia a disolventes: alta
- Resistencia a rayos UV: alta
- Resistencia de microorganismos: alta

1.3.1.2.2.1.2.- Usos de la fibra de vidrio Tipo E

- a) Construcción: Tejidos para decoración en locales públicos, aislante.
- b) Automoción: Composites para componentes de vehículos.
- c) Deportes: Composites para utensilios o aparejos para la práctica de deportes como esquís, canoas, pértigas.
- d) Industria: Para todo tipo de composites de uso industrial, como piezas plásticas reforzadas con éste tipo de fibra, componentes para ordenadores.

1.3.1.2.2.2.- Fibras Tipo AR.

La fibra de vidrio tipo AR es una fibra de alto contenido en óxido de zirconio. Este tipo de fibra posee muy buenas propiedades de resistencia a compuestos alcalinos. Tiene un peso específico de 2,68-2,70 g/cm³.

1.3.1.2.2.2.1.- Propiedades.

a) Mecánicas:

- Fuerza a la tracción (MPa): 3000 – 3500

- Elongación hasta rotura (%): 4,3

b) Químicas:

- Absorción de humedad a 20°C y 60% de humedad relativa (%): 0,1
- Resistencia a los disolventes: alta
- Resistencia a los rayos UV: alta
- Resistencia a microorganismos: alta

1.3.1.2.2.2.- Usos de la fibra de vidrio Tipo AR.

Industriales: Se utiliza como fibra de refuerzo en morteros a base de cemento, sustitución de amianto en tejados, paneles de fachadas, piezas de recubrimiento, de decoración.

1.3.1.2.2.3.- Fibras Tipo C

La fibra de vidrio tipo C es una fibra inorgánica y se caracteriza por su alta resistencia química, por ello se suele aplicar para aquellos productos donde se necesite dicha propiedad. Tiene un peso específico de 2,5 g/cm³

En la Tabla 40, se observan el análisis químico de la Fibra de vidrio C.

Sílice	SiO ₂	60 – 72 %
Óxidos de calcio y magnesio	CaO y MgO	9 – 17 %
Trióxido de boro II	B ₂ O ₃	0,5 – 7 %

Tabla 40. Análisis químico de la Fibra de vidrio C. (Fuente: ¹⁰⁸ISOVER).

1.3.1.2.2.3.1.- Propiedades.

a) Mecánicas:

- Tenacidad (N/tex): 1,24
- Fuerza a la tracción (MPa): 3100
- Elongación hasta rotura (%): 4,0

b) Eléctricas:

- Factor de disipación dieléctrica: 0,005 a 106 Hz

c) Químicas:

- Absorción de humedad a 20°C y 60% de humedad relativa (%): 0,1

- Resistencia a los disolventes: alta
- Resistencia a los rayos UV: alta
- Resistencia a microorganismos: alta

1.3.1.2.2.3.2.- Usos de la fibra de vidrio Tipo C.

Industriales: Se utiliza para productos donde se necesite una alta resistencia química, para torres de refrigeración, material para techos, tanques de agua, tinas de baño, tuberías, barcos.

1.3.1.2.2.4.- Fibras Tipo D.

La fibra de vidrio tipo D es una fibra inorgánica que posee muy buenas propiedades dieléctricas, además de excelentes propiedades frente al fuego. Su peso específico es de 2,14 g/cm³.

En la Tabla 41, se observan el análisis químico de la Fibra de vidrio D.

Sílice	SiO ₂	73 – 74 %
Trióxido de boro II	B ₂ O ₃	22 – 23 %

Tabla 41: Análisis químico de la Fibra de vidrio Tipo D. (Fuente: ¹⁰⁸ISOVER).

1.3.1.2.2.4.1.- Propiedades.

a) Mecánicas:

- Tenacidad (N/tex): 1,17
- Fuerza a la tracción (MPa): 2500
- Elongación hasta rotura (%): 4,5

b) Térmica:

- Conductividad térmica (W/m^{°K}): 0,8

c) Eléctricas:

- Factor de disipación dieléctrica: 0,0005 a 106 Hz

d) Químicas:

- Absorción de humedad a 20°C y 60% de humedad relativa (%): 0,1

1.3.1.2.2.4.2.- Usos de la fibra de vidrio Tipo D

Industrial: Se utiliza para composites permeables a las ondas electromagnéticas, para radares, ventanas electromagnéticas, circuitos impresos de alta gama.

1.3.1.2.2.5.- Fibras Tipo R

La fibra de vidrio tipo R inorgánica y posee buenas propiedades mecánicas y es resistente a la fatiga, temperatura y humedad. Su peso específico es de 2,53 g/cm³.

En la Tabla 42, se observan el análisis químico de la Fibra de vidrio R.

Sílice	SiO ₂	60 %
Alúmina	Al ₂ O ₃	25 %
Óxidos de calcio	CaO	9 %
Óxido de magnesio	MgO	6 %

Tabla 42: Análisis químico de la Fibra de vidrio Tipo R. (Fuente: ⁶⁵ISOVER).

1.3.1.2.2.5.1.- Propiedades.

a) Mecánicas:

- Tenacidad (N/tex)= 1,74
- Fuerza a la tracción (MPas): 4400
- Elongación hasta rotura (%): 5,2

b) Térmicas:

- Conductividad térmica (W/m °K):1
- Resistencia termomecánica: 50% después de 150 horas a 700°C

c) Eléctricas:

- Resistividad (ohm . cm): 1014 – 1015
- Factor de disipación dieléctrica: 0,0019 a 105 Hz.

d) Químicas:

- Absorción de humedad a 20°C y 60% de humedad relativa: 0,1
- Resistencia a disolventes: alta
- Resistencia a rayos UV: alta

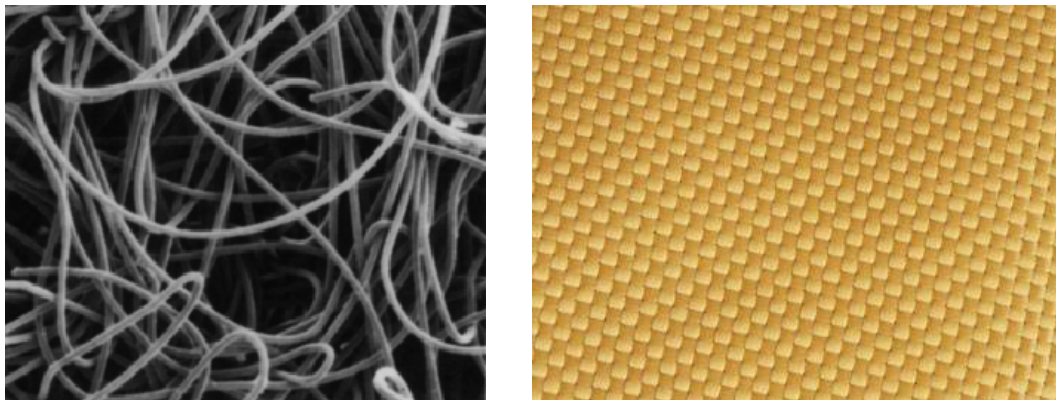
- Resistencia de microorganismos: alta

1.3.1.2.2.5.2.- Usos de la fibra de vidrio Tipo R.

Industriales: Se utilizan como fibra de refuerzo en palas de helicópteros componentes en aeronáutica, cisternas de cohetes, misiles, lanza-cohetes.

1.3.1.3.- Fibras orgánicas..

El concepto de fibras orgánicas esta basado teóricamente en la creación de fibras con una alta resistencia y alto módulo de elasticidad a partir de una perfecta alineación de polímeros. Podemos tomar como ejemplo las largas cadenas de polietileno que constan de cadenas unidas directamente en zigzag de carbono a carbono completamente alineadas y agrupadas estrechamente, que tienen un módulo de elasticidad teórico de aproximadamente 220 GPa. Actualmente, se trata de fabricar fibras de polietileno de alta densidad y elevado módulo de elasticidad donde se busca la máxima linealidad y alargamiento entre las cadenas de los polímeros durante el proceso de fabricación, durante el hilado y estirado (¹⁰⁵Hull, D. 1987).



Fotografía 25: Fibra aramídica sintética, Kevlar. (Fuente: ⁶⁵Bowers & Wilkins, 2010).

Las fibras orgánicas más comunes en el mercado son las fibras de Aramida (Fotografía 25), el cual es el nombre genérico de fibras de poliamida aromática. Las fibras de aramida fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont bajo el nombre comercial de Kevlar y en la actualidad hay dos tipos comerciales: Kevlar 29 y Kevlar 49. El Kevlar 29 tiene una densidad baja y alta resistencia aportada por las fibras de aramida, y está diseñado para aplicaciones como protección balística, cuerdas y cables. EL Kevlar 49 está caracterizado por una baja densidad, alta resistencia y módulo elástico. Las propiedades del Kevlar 49 hacen a estas fibras útiles para el reforzado de plásticos en materiales compuestos para aplicaciones aeroespaciales, en marina, automoción y otras aplicaciones industriales.

La unidad química que se repite en la cadena del polímero Kevlar es la de la poliamida aromática que se muestra en la figura 23. En conjunto estas fibras tienen alta resistencia en la dirección de la fibra.

Por cuestiones prácticas a las fibras orgánicas Kevlar 49 fabricadas por Du Pont serán mencionadas con el nombre de fibras de *Aramida* (Figura 25).

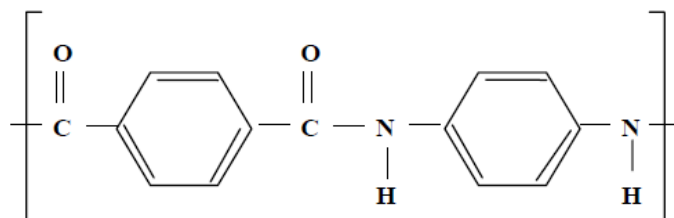


Figura 30: Unidad estructural repetitiva de las fibras de Aramida

1.3.1.3.2.- Propiedades.

a) Estabilidad Térmica

Las fibras de Aramida experimentan una grave fotodegradación bajo la exposición a la luz solar. Ambas luces, la visible y la ultravioleta causan efectos, conduciendo a la descoloración y la reducción de las propiedades mecánicas. La degradación puede ser evitada cubriendo la superficie del material compuesto con una capa que absorba la luz.

b) Resistencia a compresión.

Los datos de la Tabla 43 indican que la resistencia a compresión longitudinal de láminas unidireccionales orientadas, fabricadas con Kevlar es sólo un 20% de su resistencia a tracción.

Propiedades	KEVLAR 49 POLIAMIDA AROMATICA
Diámetro (µm)	11,9
Densidad (1000 kg/m ³)	1,45
Módulo de Young (GPa)	125
Resistencia a tracción (GPa)	2,8 – 3,6
Alargamiento en rotura (%)	2,2 – 2,8

Tabla 43: Datos aproximados proporcionados por el fabricante. (Fuente: ¹⁰⁵Hull, D. 1987).

La baja resistencia a compresión del Kevlar es debida a las propiedades anisótropas de la fibra y a la baja rigidez a cortadura. Básicamente, como en otras

fibras textiles, el material tiene sólo una limitada elasticidad en compresión. A tracción, las cargas son soportadas por los enlaces covalentes, pero a compresión los débiles enlaces de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waal hacen que se produzca esta relajación local y deshilachamiento. (Tabla 44)

Material	Tracción paralela (MPa)	Compresión paralela (MPa)	Tracción perpendicular (MPa)	Compresión perpendicular (MPa)	Cortante (MPa)
Poliéster - fibra de vidrio	650 – 750	600 - 900	20 - 25	90 - 120	45 - 69
Carbono tipo I - epoxi	850 - 1100	700 - 900	35 - 40	130 - 190	60 - 75
Kevlar 49 - epoxi	1100 - 1250	240 – 290	20 - 30	110 - 140	40 - 60

Tabla 44: Valores típicos de las propiedades de resistencia de las láminas unidireccionales. Fuente: Estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de estructuras de hormigón mediante materiales compuestos. (Fuente: ⁶⁶Landa Avilés, G. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña, 2002).

c) Flexión y Rotura de las fibras.

Las láminas de fibras de Aramida, rompen de manera dúctil, con un pronunciado estrechamiento local muy grande. La fractura de las láminas a menudo implica el deshilachado de las fibras. (¹⁰⁵Hull, D. 1987)

1.3.1.3.3.- Aplicaciones.

- Aplicaciones de tipo militar.
- Blindaje con paneles de Kevlar.
- Cubiertas para resistir impactos
- Industria aeroespacial y automovilística
- Prendas de seguridad.
- Protección de cables de fibra óptica.
- Discos de frenos (es el sustituto de las fibras de amianto).
- Fabricación de conos para altavoces.

1.3.1.4.- Fibras de poliéster.

1.3.1.4.1.- Origen y características.

Con la Segunda Guerra Mundial comienza la producción de fibras sintéticas. En 1939, Wallace Carother obtiene una fibra, a partir de una poliamida, con gran

capacidad de estiramiento, se trata del nylon. Ligeros cambios en la química del nylon provocaron que descubriera nuevas fibras como el poliéster, el acrílico, el elastano. Junto con su compañero James Dickinson, crearon lo que al principio se conoció como PET (polímero para la fabricación de fibras).

El PET (polietileno tereftalato) es producido por la reacción de glicol de etileno con ácido tereftalato o sus derivados. Es el polímero de poliéster más utilizado en la producción de fibras (Figura 26).

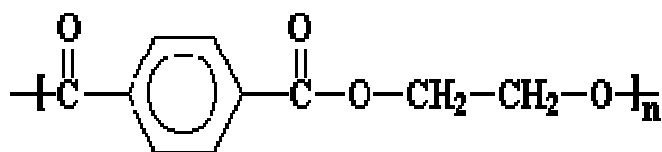


Figura 31: Unidad estructural del poliéster.

Su desarrollo continuó en secreto durante el transcurso de la Segunda Guerra Mundial. En 1946, Carothers y Dickinson cedieron los derechos de fabricación a Du Pont (para Estados Unidos) e ICI (para el resto del mundo). El poliéster se utilizó inicialmente para producir fibras y se convirtió en tejidos sintéticos revolucionarios. Al inicio de los años 50, se asignó la marca Dacron® a los primeros tejidos sintéticos del mundo lavables y que no necesitaban plancha.

Para 1970, el 87% de todo el poliéster producido en el mundo era fabricado en Estados Unidos, Japón y el Oeste de Europa. Esto continuó hasta que la patente del poliéster expiró; es entonces cuando países Asiáticos estuvieron habilitados para comprar plantas completas de poliéster y comenzaron a producir en grandes cantidades (Fotografía 26).



Fotografía 26: Fibra de poliéster.

El proceso del “melt spinning” (Proceso de Hilado por fusión. Solidificación rápida) es usado en la formación de fibras de poliéster. El poliéster granulado es obtenido en primera instancia en la poli-condensación y posteriormente en el proceso discontinuo. Antes de que el granulado sea derretido, debe ser secado. Este proceso es efectivo, en cuanto a costos se refiere, para pequeños lotes, en particular por especialidad.

El proceso continuo, también llamado hilado directo, es usado para la producción de hilos estándar y fibras en grandes lotes. En este proceso el fundido, el cual ha sido producido en el reactor poli-condensador, es extraído directo en una planta.

En el pasado, el granulado era derretido en el proceso de hilado por rejilla. En este proceso el granulado seco, que es alimentado por un tanque de reserva, será derretido a lo largo de tubos calientes. El derretido gotea en la tapa. Por medio de una bomba de presión y un filtro, el derretido es llevado al hilado por boquilla al dejar la tapa. La temperatura de hilado está alrededor del rango de los 280°C a 300°C.

En la actualidad, el hilado por rejilla ha sido remplazado por el hilado de extrusión. En él, el fundido del granulado, el incremento de la presión y la homogeneización del fundido, son obtenidos por medio de un “screw extruder”. Las ventajas de esto son el alto desempeño al derretido (>1 t/día) y el corto tiempo de exposición durante incrementos de presión simultáneos. El extruder alimenta varias válvulas de presión. Estas válvulas están situadas juntas en algo llamado hilado por láser y proveen a los inyectores el derretido exacto requerido. Los filtros son de acero inoxidable. Además de retener posibles impurezas, estos filtros también sirven para retener una mezcla del derretido con un compuesto de gel. Los inyectores tienen agujeros de 0.01 a 1 mm. de diámetro. El eje del flujo de aire y el eje de hilado están situados debajo de los inyectores.

1.3.1.4.2.- Propiedades.

Las fibras de poliéster son 50% cristalinas y el ángulo de sus moléculas puede variar. Sus propiedades son muy sensibles a los procesos termodinámicos. Básicamente, el poliéster, a través de modificaciones químicas y físicas, puede ser adaptado hacia el uso final que se le va a dar

Las principales propiedades del poliéster son (⁶⁷Carty, P. 1996):

- Bajo amplificación, la fibra parece lisa y en forma de barra. Usualmente es circular en las zonas transversales.

- Es usado como un filamento continuo (usualmente texturizado).
- Normalmente tiene mucho brillo, pero es menos vidrioso en apariencia que el nylon.
- Las fibras de poliéster son extremadamente fuertes y resistentes a la abrasión.
- Es extensible y no se arruga fácilmente. También es resistente al estiramiento.
- Conserva mejor el calor que el algodón y el lino.
- El poliéster es “no absorbente”.
- Las fibras de poliéster son resistentes a las manchas. El agua no se absorbe en la fibra y puede ser retirada fácilmente. Por el contrario, el aceite y la grasa sí son absorbidos por la fibra y es difícil retirarlos.
- Es resistente a los ácidos, álcalis y blanqueadores.
- El poliéster es termoplástico. Con ayuda del calor, se pueden producir plisados y pliegues permanentes en la tela.
- Tiene un punto de fusión de 250°C y una temperatura recomendable de planchado de 135°C.
- Las fibras de poliéster no son atacadas por bacterias, moho o polillas.
- Es más resistente que cualquier otra fibra a la luz del sol.
- El poliéster no puede ser teñido con colorantes normales solubles en agua. Se utilizan colorantes dispersos.
- El poliéster tiene un excelente pliegue y resistencia a la abrasión. Las combinaciones de poliéster con algodón son comunes debido a su habilidad para resistir a las arrugas y su facilidad para el lavado y secado.
- Tiene un módulo de Young inicial mayor al del nylon, y por lo tanto, es resistente a la deformación.

La gran ventaja del poliéster sobre otras fibras es su versatilidad (¹⁰⁹Textile Horizons June, 1993). El principal objetivo del desarrollo de fibras hechas por el hombre, es hacer fibras que se parezcan y se comporten como fibras naturales, quizá con algunas propiedades añadidas.

1.3.1.4.3.- Aplicaciones.

El poliéster, que puede ser producido con una alta tenacidad y un módulo grande, es ideal para muchas aplicaciones. Aunque las otras fibras hechas por el

hombre pueden encontrar mercado en algunas aplicaciones, el poliéster lo encuentra en casi todas. Es extensamente utilizado para un gran número de telas, con las que se fabrican principalmente vestidos, blusas, trajes, ropa impermeable, ropa deportiva, ropa interior y lencería. También es muy utilizado en textiles para el hogar y alfombras.

También es utilizado para la fabricación de pinturas, barnices, películas y materias plásticas apropiadas para obtener piezas de grandes dimensiones.

1.3.1.5.- Fibra de caña.

La mayoría de las fibras naturales provienen de plantas que se encuentran en países en vía de desarrollo, como la India, China y algunos países latinoamericanos. La producción es difícil de estimar pero existen referencias bibliográficas al respecto (¹¹⁰Rowell, et al., 2000; ⁶⁸White, et al., 1997). De este tipo de fibras, las que se encuentran con mayor disponibilidad son las pajas de cereales, los tallos de maíz, de sorgo, el bagazo de caña de azúcar, juncos, bambú, fibras de algodón, yute, kenaf, hemp, papiro, cáñamo, esparto, Hojas (sisal, abacá, henequén), Hierbas y pastos (hierba elefante). (⁶⁹Speller, 1993; ⁷⁰Maddern, y French, 1994; ¹¹²Young, 1997).

1.3.1.5.1.- Origen y características.

La caña común es originaria de Asia Central y se fue extendiendo y naturalizando en todos los países que rodean el mar Mediterráneo (⁷¹Polunin y Huxley, 1987; ¹¹³Fornell, 1.90). Desde esta área, se dispersó extensamente, sobre todo a través de la introducción intencionada del hombre debido a la economía de medios, en todas las áreas subtropicales y caliente-templadas del mundo. Hoy la situación es distinta y la Comisión Europea en el marco de su Acción Clave Vulnerabilidad de Ecosistemas, identifica 15 de las especies invasoras con mayor impacto en la zona mediterráneas apareciendo la caña común como una de ellas (⁷²Balaguer, 2004).

Es una planta salvaje en la que no se ha realizado selección de genotipos ni mejora genética. *Arundo donax* L (Fotografía 27), es una planta perenne que forma densos cañaverales, de ramas foliosas sin ramificar. El sistema radicular es un rizoma grueso y nudoso, con raíces adventicias profundas (150 cm.) y muy resistente; los vástagos son de crecimiento rápido. El tallo es de color verde, liso, flexible, hueco y nudoso; con diámetros entre 2 y 4 cm, y se vuelve duro y leñoso al cabo del un año

Los materiales lignocelulósicos están constituidos por celulosa, lignina y hemicelulosa en una relación aproximada de 4:3:3 variando sensiblemente según las diferentes especies (⁵⁹Fengel y Wegener, 1984; ⁶⁰Sjöström, 1981, ¹¹⁴Misra, 1993; ⁶¹Oggiano, 1997). Gracias a su origen renovable, a la biodegradabilidad de sus

derivados y sus posibilidades de reciclaje, son una fuente idónea de materiales poliméricos de interés industrial.



Fotografía 27. Haces de caña cortada. (Fuente: ⁷⁴Flores, J.A. Tesis doctoral, 2005).

1.3.1.5.2.- Propiedades.

a) Físicas.

Como material la caña común debe sus propiedades a la composición química y micro-estructura de la célula, en especial tiene una marcada anisotropía mecánica y resistencia al aplastamiento de la fibra. Estos aspectos nos dan las posibilidades máximas que tiene la caña como material resistente. Las propiedades varían ya que es un material vivo muy heterogéneo y obtenido de plantas no cultivadas. Esta heterogeneidad crea cierta incertidumbre a la hora de su utilización, por lo que es necesario el estudio de las propiedades de la caña común como material resistente

- Densidad y peso específico.

La densidad de la caña común (Tabla 45) depende en gran medida de la fracción del volumen de la envoltura del paquete vascular, porque dicha envoltura tiene células con paredes gruesas de fibras, que son más pesadas que las células del parénquima, y aunque éste ocupe mayor superficie, tiene células de paredes finas.

Densidad de la caña común tal y como se recibe	$\rho = 583 \text{ kg/m}^3$
Densidad de la caña común anhidra	$\rho = 537 \text{ kg/m}^3$
Densidad de la caña común saturada	$\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$

Tabla 45. Densidad de la caña común. (Fuente: ⁶²García Ortuño, T. 2003)

El peso específico (Tabla 46) se relaciona con la mayor parte de las propiedades físicas de los materiales, por ello viene a ser un indicador de la calidad de

los materiales vegetales, y de sus posibles aplicaciones, a mayor peso específico se suponen mejores resistencias a esfuerzos.

PESOS ESPECIFICOS Kg/m ³ ; 15% HR	
Arundo donax L. (8,63% HR)	583
Abeto	430
Acacia	700
Álamo blanco	450
Pino de Flandes	550
Haya	800
Pino silvestre	600

Tabla 46. Pesos específicos de maderas y caña común. (Fuente: ⁶³Ormea, G.B. 1975)

- Dureza.

La caña común es un material vegetal con dureza superficial extremadamente alta y presenta la mayor dureza a la penetración de su superficie a una humedad del 18%, cuanto la humedad llega al 56,6% la caña disminuye esta propiedad.

- Durabilidad.

A la caña le afectan pocos agentes externos, es muy higroscópica y aumentan sus propiedades mecánicas con la humedad, por lo que puede ser clasificada como de gran durabilidad, pues existen vallas de cañas a la intemperie y sin ningún tipo de tratamientos con más de 50 años de antigüedad en perfecto estado y se dispone de registros de cañas colocadas en obras con más de 100 años. (⁷⁴Flores, J.A. Tesis doctoral. 2005).

- Resistencia a tracción.

Como dato de referencia se obtuvo una tensión de rotura en la base del nudo de 59,25 N/mm².

Para la fibra central (entre nudos) la tensión de rotura de la caña fue de 218,89 N/mm².

Como se observa son valores muy elevados para una planta, como referencia comparativa el acero S235, tiene un límite elástico (garantizado) de 235 N/mm².

1.3.1.5.3.- Aplicaciones.

La aplicación fundamental de la caña durante siglos ha sido ligada a la construcción. Podemos enumerar distintas tipologías constructivas que utilizaban la caña común como elemento constructivo en algunas de sus partes: barraquetas, barracas, viviendas de la huerta, alquerías, edificaciones de núcleos urbanos, casas nobles y palacios.

En la actualidad su uso está ligado a la fabricación de tableros de fibra y partículas con resinas enlazantes, como elemento aglutinador del conjunto matriz - fibra.

1.3.1.6.- Lana de roca.

1.3.1.6.1.- Origen y características.

Es un tipo de lana mineral elaborada a partir de rocas diabásicas (rocas basálticas). Es un producto especialmente indicado para los aislamientos térmicos en la industria (altas temperaturas).

El “caldo” utilizado en la fabricación de la lana de roca tiene unas características físico-químicas parecidas a los vidrios, estando compuestos por silicatos y óxidos metálicos.

La lana de roca se obtiene fibrando por centrifugación el material, controlando en el proceso los contenidos de sílice y de óxidos metálicos.



Fotografía 28: Placas de lana de roca para aislamiento acústico. (Fuente: ¹¹¹Rockwool Firesafe Insulation)

La composición química final (Tabla 47) que debe asegurar una gran estabilidad mecánica hasta 750°C es:

Materias primas	Materias primas encolado
Roca basáltica	Aceite de linaza
Grava	Resina escórez
Fosfato	Naftenato de manganeso
Mineral de hierro	Baquelita
	Aceite mineral

Tabla 47. Composición química final de la lana de roca. Fuente: ¹⁰⁸ISOVER

En la fabricación de la lana de roca, el cubilote es el aparato encargado de fundir la escoria, utilizando como combustible carbón de coque. El chorro de fusión choca con el borde exterior de un rotor metálico, produciéndose el estirado mecánico y la aparición de fibras que tienen un diámetro medio de 4 micras (Figura 27 y Tabla 48).

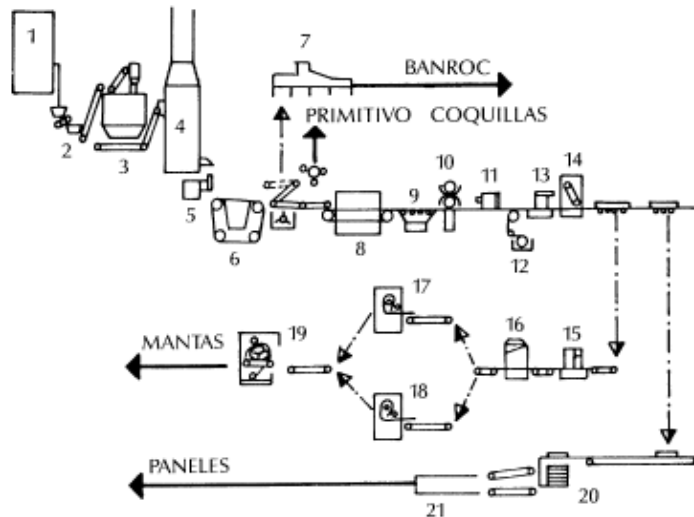


Figura 32: Esquema de la línea de fabricación de lana de roca. (Fuente: ¹⁰⁸ISOVER)

1.	Deposito de materias primas	12.	Foso revestimiento
2.	Separación finos	13.	Corte transversal
3.	Pesada	14.	Enrolladota
4.	Cubilote	15.	Máquina de coser
6.	Recepción	16.	Guillotina
7.	Emballadora Banroc	17.	Enrolladora n° 1
8.	Estufa	18.	Enrolladora n° 2
9.	Enfriadora	19.	Empaquetadora

10.	Corte longitudinal	20.	Apiladora
11.	Corte espesor	21.	Embalado

Tabla 48. Tabla de la línea de fabricación de lana de roca. (Fuente: ¹⁰⁸ISOVER)

Las fibras, una vez impregnadas con un encolado compuesto de aceite mineral y una resina, caen sobre un tapiz metálico en movimiento para pasar a una estufa en la que un circuito de aire caliente asegura la polimerización del encolado.

La variación de la velocidad del tapiz de recepción permite obtener diferentes densidades y espesores de material aislante.

1.3.1.7.- Fibra de celulosa.

La celulosa es uno de los materiales orgánicos más abundantes en la tierra (hidrato de carbono isómero del almidón) que se caracteriza por su gran disponibilidad y por ser una fuente de energía renovable (Fotografía 29). La borra del algodón, por ejemplo, contiene un 99% de celulosa, y la madera entre un 40 y un 50 %. Consta de fibras compuestas por fibrillas elementales, formadas a su vez por un gran número de moléculas lineales, cada una de las cuales tiene de 2000 a 3000 moléculas de glucosa anhidra, en la pared celular externa se produce un endurecimiento que impide el completo humedecimiento de la fibra, es decir, se pierde la capacidad de absorción de agua e hinchamiento de la fibra. La celulosa pura es blanca y de gran resistencia mecánica; las fibras de algodón, por ejemplo, llegan a soportar tensiones de hasta 800 N/mm².

No obstante, su uso en diferentes campos está restringido por unas limitaciones derivadas de su estructura. Dado que el punto de fusión de la celulosa es superior a su temperatura de degradación, su disolución es la única vía para la fabricación de formas utilizables. La obtención de fibras de celulosa, a partir de su disolución controlada, les confiere gran pureza, uniformidad y reproducibilidad de propiedades, en contraposición con las fibras naturales como el algodón.



Fotografía 29: Fibra de celulosa

1.3.1.7.1.- Origen y características.

Ya en 1665 Robert Hooke pensó en la posibilidad de fabricar fibras artificiales de celulosa regenerada, aunque esto no fue posible hasta el descubrimiento de la nitrocelulosa por Schönbein en 1845.

En 1889, el conde Hilaire Bernigaud de Chardonnet desarrolló en Francia una máquina capaz de fabricar fibras de celulosa regenerada, encaminada a la imitación de la seda natural.

Finalmente, todas estas investigaciones culminaron en la fabricación a escala comercial de la primera fibra de celulosa regenerada (Figura 28): el rayón viscosa (también llamada seda artificial). Su fabricación se inició en 1905, por Courtaulds en Coventry, según el proceso descubierto por Cross y Bevan (Inglaterra, 1891). En éste, la celulosa procedente de pulpa de celulosa se transforma en xantato soluble, mediante alcalinización y reacción con sulfuro de carbono. Posteriormente, la regeneración de este derivado de celulosa se consigue por precipitación en un baño de coagulación.

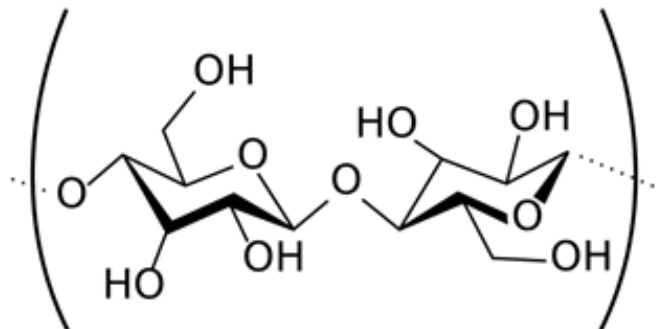


Figura 33: Monómero de celulosa

Con la aparición en el mercado de las fibras químicas sintéticas (poliéster, poliamida), la producción de las fibras de celulosa regenerada se redujo considerablemente por el coste de precio de producción y el coste medio ambiental producido (elevados contenidos de sulfuro de carbono y sales en las aguas residuales, así como de sulfuro de hidrógeno, subproducto generado durante el proceso y de notable poder contaminante, en los gases de salida).

Recientemente han aparecido desarrollos innovadores en este campo, basados en el uso de disolventes no acuosos de la celulosa, como el correspondiente al nuevo proceso de fabricación de fibras de Lyocell. Este proceso no sólo satisface los requisitos técnicos y económicos necesarios, sino que también cumple con los modernos estándares ecológicos exigidos actualmente.

1.3.1.7.2.- Propiedades.

Como puede observarse este proceso requiere numerosas etapas y conlleva considerables efectos medioambientales, debido a los altos contenidos de sulfuro de carbono (CS_2) y sales en las aguas residuales, así como de sulfuro de hidrógeno, subproducto del proceso en los gases de salida y de notable poder contaminante

Otro inconveniente es que el producto obtenido presenta unas propiedades mediocres de resistencia en húmedo. Mediante desarrollos posteriores se pudo mejorar este aspecto, dando lugar a la aparición de las fibras Modal y de alto módulo (HWM), pero sin ofrecer soluciones definitivas a la complejidad del proceso de producción y al problema medioambiental

Los polímeros celulósicos son producidos principalmente a partir de madera, pero algunas veces la celulosa se obtiene a partir de fibras de algodón (puede contener hasta un 95% de celulosa pura, mientras que la madera contiene alrededor de un 50%). Actualmente existen tres tipos de procesos para separar la celulosa del resto de los componentes de la madera (lignina y hemicelulosa a partir de los cuales se llega a obtener celulosa de una pureza cercana al 97%), un proceso de tipo químico (también denominado "Kraft"), un proceso semiquímico y uno de tipo mecánico.

Los tipos de polímeros celulósicos más importantes son los siguientes:

- Acetato de celulosa [$CH_3COOC_2H_5$], fabricado a partir de la reacción entre la celulosa y el ácido acético.

- Acetato butirato de celulosa, es un éster compuesto producido por el tratado de fibras de celulosa con ácido butírico [$CH_3CH_2CH_2COOH$], anhídrido butírico [$(CH_3CH_2CH_2CO)_2O$], ácido acético [CH_3COOH] y anhídrido acético [$(CH_3CO)_2O$] en presencia de ácido sulfúrico [H_2SO_4].

- Propionato de celulosa, formado al tratar las fibras de celulosa con ácido propiónico [$CH_3CH_2CO_2H$], ácido acético y anhídridos en presencia de ácido sulfúrico.

- Nitrato de celulosa, fabricado al tratar las fibras de celulosa con una mezcla de ácido nítrico [HNO_3] y ácido sulfúrico.

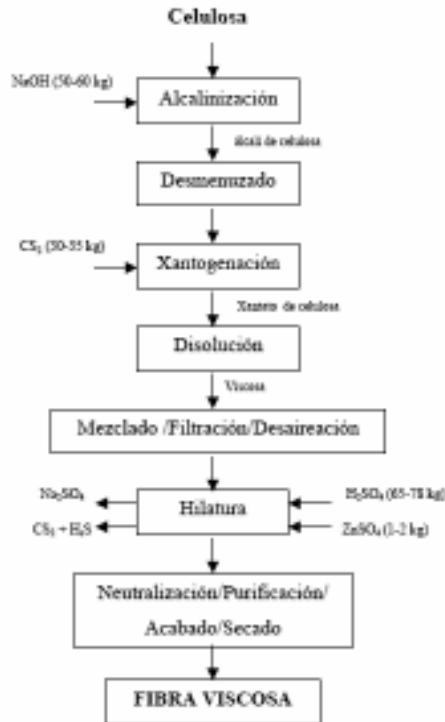


Figura 34: Diagrama de flujo del proceso de producción de fibra cortada de viscosa. (Consumos en kg/100 kg de fibra acondicionada). ¹¹⁵Rouette, Hans-Karl, 2001

Fibras celulósicas

Las fibras de viscosa (también denominado como “rayón” o “celulosa regenerada”) son fabricadas mediante el mismo proceso de obtención del celofán, excepto que la solución de viscosa (xantato de celulosa) es bombeada a través de un hilador, que contiene cientos de orificios, hacia un baño de ácido sulfúrico diluido de modo que la celulosa es regenerada como finos filamentos a medida que el xantato se descompone (Figura 29).

En 1992 se desarrolló un proceso para producir celulosa regenerada: el proceso Lyocell, en el cual la pulpa de celulosa se disuelve en el solvente óxido N-metilmorfolin (NMMO). Ésta solución es luego filtrada y pasada a través de un hilador para obtener los filamentos que se hilan en agua. El NMMO se recupera de la solución acuosa para su reuso. El proceso Celsol y CC son similares al Lyocell excepto que el NMMO como activador de la celulosa es reemplazado por enzimas en el proceso Celsol y por urea en el proceso CC. Se ha demostrado que el proceso Lyocell es el que usa menor cantidad de químicos a lo largo del proceso en comparación con el resto.

El acetato de celulosa, siendo soluble en disolventes orgánicos como acetona, es también apropiado para hilado en fibras, las cuales se denominan “fibras de

acetato". La celulosa a partir de la madera es hinchada con ácido acético, convertida en acetato de celulosa usando anhídrido acético y luego disuelta en acetona. La solución viscosa resultante es bombeada a través de hiladores formando, en aire caliente, filamentos. La acetona se evapora y es recuperada.

Celulosa a partir de bacterias

Si bien la celulosa para propósitos industriales se obtiene generalmente de las plantas, se está desarrollando la producción por medio de una bacteria denominada *Acetobacter xylinum* que genera celulosa en condiciones de fermentación agitada. Para dicho proceso se utilizan como alimento para la bacteria desechos agrícolas de gran diversidad, lo cual hace a esta tecnología de gran potencial a futuro.

Entre las propiedades de la fibra de celulosa

- Mecánicas y físicas

Conductividad térmica: 0,035 W/mK

Asentamiento: 4 %

pH: 7,7

Resistencia a la difusión del vapor de agua: 1 a 2 m

Reacción al fuego (DIN 4102): clase B2

Calor específico: 2100 J/kg.K

Enmohecimiento: nivel 0

Resistencia de circulación longitudinal:

19,8.10³ Pa.s/m² con densidad de 55 kg/m³

9,48.10³ Pa.s/m² con densidad de 45 kg/m³

3,6.10³ Pa.s/m² con densidad de 35 kg/m³

Humedad: 10 %

Energía contenida: Å 58 KW.h/m²

En la Tabla 49 se observa una comparación de propiedades de diferentes fibras celulósicas:

	Lyocell	Viscosa	Modal	Polinósica	Cupro	Algodón
Título (diez)	0,9 – 3,3	1,7	1,0 – 3,3	1,3 – 4,2	1,4 – 2,2	1,8
Tenacidad c. (cNtex)	40 - 44	22 - 26	34 - 36	35 - 40	15 - 20	24 - 28
Elongación c. (%)	14-16	20 - 25	13 - 15	10 - 15	7 - 23	7- 9
Tenacidad h. (cNtex)	34 - 38	10 - 15	19 - 21	27 - 30	9 - 12	25 - 30
Elongación h. (%)	16 - 18	25 - 30	13 - 15	10 - 15	16 - 43	12 - 14
Módulo h. (5%)	270	50	100	-	-	100
Grado polimerización	550 - 600	250 - 350	300 - 600	500 - 600	450 - 550	1000 - 3000
Retención agua (%)	65 - 70	90 - 100	75 - 80	55 - 70	100	5 - 55
Tasa de humedad (%)	11,2	13	12,5	-	-	8
Grado fibrilación (0=mín; 6=máx)	4 - 6	1	1	3	2 – 3	2

Tabla 49: Comparación de las propiedades de varias fibras celulósicas

1.3.1.7.3.- Aplicaciones.

Además de las aplicaciones en el sector de films, los polímeros celulósicos pueden también ser usados para procesos de moldeo y extrusión. Los derivados más comunes para estas aplicaciones son el acetato de celulosa, el acetato butirato de celulosa y el acetato propionato de celulosa. Los productos pueden ser desde juguetes y packaging hasta partes para automóviles, así como también material para aislamiento eléctrico.

La celulosa regenerada suele usarse para fines de uso en indumentaria, generalmente combinada con otras fibras. Una versión de este producto se utiliza en Europa para reforzar neumáticos de alta velocidad. De los distintos derivados celulósicos solamente dos son de importancia comercial para la producción de fibras en la actualidad: el acetato y el éster de xantato