

ANTECEDENTES

Yeso

El yeso es uno de los más antiguos materiales empleado en construcción. En el período Neolítico, con el dominio del fuego, comenzó a elaborarse yeso calcinando aljez, y a utilizarlo para unir las piezas de mampostería, sellar las juntas de los muros y para revestir las paredes de las viviendas, sustituyendo al mortero de barro. En *Çatal Hüyük* (Anatolia, Turquía), durante el siglo IX a. C., encontramos guarnecidos de yeso y cal, con restos de pinturas al fresco. En la antigua Jericó, en el siglo VI a. C., se usó yeso moldeado. ⁽³⁾

En el Antiguo Egipto, durante el tercer milenio 2800 a. C., se empleó yeso para sellar las juntas de los bloques de la Gran Pirámide de Guiza, y en multitud de tumbas como revestimiento y soporte de bajorrelieves pintados. El palacio de Cnosos contiene revestimientos y suelos elaborados con yeso.

El escritor griego Teofrasto, en su tratado sobre la piedra, describe el yeso (*gipsos*), sus yacimientos y los modos de empleo como enlucido y para ornamentación. También escribieron sobre las aplicaciones del yeso Catón y Columela. Plinio el Viejo describió su uso con gran detalle. Vitruvio, arquitecto y tratadista romano, en sus Diez libros sobre arquitectura, describe el yeso (*gypsum*), aunque los romanos emplearon normalmente morteros de cal y cementos naturales.

Los Sasánidas utilizaron profusamente el yeso en albañilería. Los Omeyas dejaron muestras de su empleo en sus alcázares sirios, como revestimiento e incluso en arcos prefabricados.

La cultura musulmana difundió en España el empleo del yeso, ampliamente adoptada en el valle del Ebro y sur de Aragón, dejando hermosas muestras de su empleo decorativo en el arte de las zonas de Aragón, Toledo, Granada y Sevilla.

Durante la Edad Media, principalmente en la región de París, se empleó el yeso en revestimientos, forjados y tabiques. En el Renacimiento para decoración. Durante el periodo Barroco fue muy utilizado el estuco de yeso ornamental y la técnica del *staff*, muy empleada en el Rococó.

En el siglo XVIII el uso del yeso en construcción se generaliza en Europa. Lavoisier presenta el primer estudio científico del yeso en la Academia de Ciencias. Posteriormente Van t'Hoff y Le Chatelier aportaron estudios describiendo los procesos de deshidratación del yeso.

Actualmente el yeso se utiliza como revestimiento, aunque en los últimos años están surgiendo nuevos materiales que le hacen la competencia, pero se puede asegurar que este antiquísimo material sigue proporcionando un gran confort ya que es un aislante acústico y térmico que hasta se puede conseguir con gran comodidad en piezas prefabricadas. Visto esto queda clara la versatilidad de este material, sus cualidades frente a otros y el por qué ha seguido utilizándose a lo largo de sus muchos milenios de vida.

Generalidades.

Ciclo de Transformación Yeso-Anhidrita-Yeso. Cuando el yeso es cubierto con otros sedimentos, aumenta poco a poco la presión que ejercen las rocas subyacente y el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se deshidrata y transformado en anhidrita (CaSO_4). La profundidad a la que ocurre este proceso es variable, pero la mayoría del yeso se convierte en anhidrita entre los 300 y 500 metros de profundidad. La Figura 2 muestra el ciclo de transformación del yeso en función de la profundidad del suelo. ⁽⁴⁾

Cuando por el proceso de levantamiento y erosión, la anhidrita se acerca a la superficie, entonces el proceso se invierte y la anhidrita es hidratada retransformándose en yeso.

La mayoría del anhidrita se re-transforma en yeso a una profundidad de menos de 150 metros.

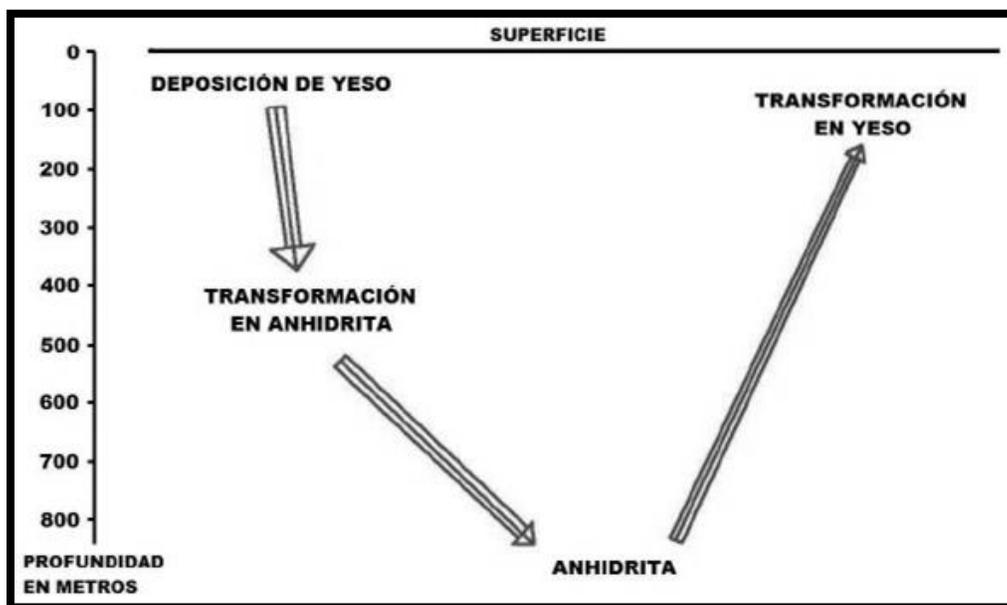


Figura 1. Ciclo de transformación yeso-anhidrita-yeso.

Clasificación.

- Yeso negro o gris, o yeso grueso, que se designa por el YG e YG/L. Construido por yeso semihidratado ($\text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4). Se obtiene calentando la piedra de yeso directamente con el combustible y adquiere ese color precisamente por eso, porque está en contacto con el combustible del horno donde se cuece. Tiene impurezas, residuos y es el yeso de peor calidad y por ello el más barato. Se emplea en obras no vistas. Tiene un contenido $> 50\%$ de yeso semihidrato, con la posible incorporación de aditivos reguladores de fraguado.⁽⁵⁾
- Yeso blanco o fino. Se designa por YF e YF/L (Clase normal y clase lenta, respectivamente, denominadas así en función de los periodos de trabajabilidad). De mejor calidad y con una granulometría más fina que el yeso negro, construido por yeso semihidrato y anhidrita. Tiene pocas impurezas. No se mancha porque no está en contacto directo con el combustible cuando se calienta. Tiene un porcentaje $> 66\%$ de yeso semihidrato, con la posible incorporación de aditivos reguladores de fraguado.
- Yeso escayola que se designa por E-30 y E-30/L (clase normal y clase lenta, respectivamente, denominadas así en función de los periodos de trabajabilidad). Consulta fundamentalmente por yeso semihidrato, en cantidad $> 80\%$, con la posible incorporación de aditivos reguladores de fraguado, y con una resistencia mínima a flexotracción de 30 Kp/cm².

Ningún tipo de yeso o escayola puede ser utilizado en exteriores por ser solubles en agua. El yeso es el aglomerante artificial más antiguo, fue utilizado por egipcios, griegos y romanos.

- Yeso hidráulico. Si, en la operación de cocción, se calienta la piedra de yeso hasta una temperatura entre 800° y 1000° C, se producirá una disociación del sulfato cálcico, y aparecerá cierta cantidad de cal que actúa como acelerador de fraguado. Así se tiene un yeso que fragua debajo del agua, llamado yeso hidráulico.

La cocción de la piedra algez, para la obtención del yeso hidráulico, se realiza en hornos verticales continuos, que consta de un cilindro revestido interiormente de material refractario, que se carga en capas alternadas de piedra de yeso y carbón mineral prensado.

Propiedades.

El yeso tiene gran aplicación en las partes de la construcción sin humedad. Constituye un mineral blando, llamado químicamente sulfato de calcio hidratado que, calcinado, molido y amasado con agua consigue endurecer rápidamente. Recibe normalmente el nombre de yeso una vez lista la piedra para emplear, o bien la "piedra de yeso", antes de verificar dicha preparación. ⁽⁶⁾

El yeso está definido por determinadas propiedades físicas y químicas, interrelacionadas entre sí directa o indirectamente. En función de estas propiedades, intrínsecas o bien derivadas del proceso de fabricación (extracción,

grado de cocido o molido), vendrá dado su uso en construcción. A su vez, el modo de hidratarlo también determinará el resultado final (temperatura del agua, proporción de ésta con el yeso). Las propiedades que marcan el carácter del yeso son principalmente:

Solubilidad. El yeso es poco soluble en agua dulce (10 gramos por litro a temperatura ambiente). Sin embargo, en presencia de sales su grado de solubilidad se incrementa notablemente. Desgraciadamente, la salinidad siempre aparece al contacto con el exterior. Por eso es recomendable el uso del yeso preferiblemente al interior, a menos que se pueda impermeabilizar mediante algún procedimiento. La solubilidad aumentará también por factores como la finura.

Finura de molienda. Como hemos comentado anteriormente, el yeso, una vez deshidratado debe ser molido para su utilización. La finura de molienda influye en gran parte en las propiedades que adquiere el yeso al volverlo a hidratar. La posibilidad de uso del yeso para la construcción reside en que al amasarlo con agua, reacciona formando una pasta que endurece constituyendo un conjunto monolítico. Se comprende fácilmente que, cuanto mayor sea el grado de finura del yeso, más completa será la reacción y, consecuentemente, la calidad del producto obtenido. La velocidad de fraguado es proporcional al grado de disolución, con lo que podemos afirmar que el yeso fraguará rápido. Este último factor limitará el tiempo del trabajador. Si el yeso *muere pronto* es apropiado para enlucidos (lucidos), o bien para acabados rápidos.

Velocidad de fraguado. El yeso se caracteriza por fraguar con rapidez, por lo que es recomendable para su uso hidratarlo en pequeñas cantidades. Esta propiedad depende de tres factores: ⁽⁶⁾

- El propio yeso (grado de finura, pureza, punto de cocido).
- Las condiciones de hidratación (la temperatura del agua, la concentración del yeso en el agua, el modo de amasar la pasta al hidratarlo).
- Agentes externos como la humedad o la temperatura.

Resistencia mecánica. Un yeso de alto grado en finura, velocidad de fraguado, concentración de yeso y temperatura del agua y de atmósfera, será también de alta resistencia mecánica.

Grado de cocido. Es necesario encontrar la temperatura justa de cocido, de lo contrario esto afectaría a las propiedades anteriores. Es conveniente no emplear el yeso recién cocido, ya que se acentuaría la rapidez de fraguado, impidiendo trabajar con comodidad.

Permeabilidad. Quizá el problema más difícil de resolver, sobre todo para su uso al exterior, es el de su impermeabilización. La solubilidad se ve acentuada por el grado de porosidad, y el yeso posee un grado alto. Por esto, el agua puede penetrar cómodamente a través de la red capilar, acelerando la disolución, y consecuentemente la pérdida del material. En los Monegros (Aragón, España), el empleo del yeso ha sido tanto al interior como al exterior de las viviendas. El tiempo se ha hecho cargo de demostrar que yeso es inadecuado en paramentos expuestos a la intemperie. En paredes interiores el resultado ha sido más

duradero. Para los pavimentos, los trabajadores además le añadían una última mano con cera de abeja, incrementando así su tiempo de vida útil. Todavía ahora no termina de encontrarse un medio de impermeabilización del todo efectivo, además de ser caros. Por ello, su ubicación es preferentemente en el interior. ⁽⁶⁾

Adherencia. Disminuye en contacto con el agua, siendo buena en medio seco, tanto con materiales pétreos como metálicos.

Corrosión. El yeso, es altamente corrosivo al estar en contacto con metales, y en presencia del agua disminuye.

Resistencia al fuego. Es de destacar su buena resistencia al fuego, considerándose buen aislante.

Existen notables diferencias entre la fabricación del yeso actualmente y el de años atrás. Hoy, el empleo de los nuevos materiales y sistemas constructivos ha borrado la identidad de este material. Antes, el yeso ejercía sobre todo de elemento resistente, además de contribuir al decorado o el acabado de paramentos. Ahora, sin embargo, los forjados logran su resistencia a compresión gracias al hormigón. Esta es la causa de que la fabricación del yeso ya no exija ciertas propiedades como la resistencia, antaño tan preciadas. Esto implica un modo de fabricación mucho más cómodo y descuidado, obteniendo un yeso débil y que poco tiene que ver con el procedimiento que acentuaban paso a paso los constructores de yeso.

Aplicaciones Industriales.

Sus aplicaciones son múltiples: en albañilería (confección de morteros simples para la construcción de tabiques y bóvedas para formación de cielos rasos, revocos y enlucidos, esgrafiados, estucos, etc.) en la fabricación de placas ensambladas para techos falsos, artesonados, pisos, florones y motivos de adorno, en artesanías. ⁽⁷⁾

Junto con la arcilla se emplea como fertilizante y sin fraguar es un aditivo retardador de la solidificación en el cemento. También se usa como fundente cerámico y como relleno de pinturas.

El espato satinado y la variedad alabastro se tallan y pulen con fines ornamentales. Los ejemplares cristalizados como rosa del desierto, se venden como objetos decorativos y a coleccionistas. Debido a su exfoliación laminar y su transparencia, así como su baja conductividad térmica, los romanos lo utilizaron en algunos casos a modo de aislante en ventanas, como hoy se usa el vidrio (como el caso del Yacimiento romano de Segobriga –Madrid). Como materiales de carga en la industria del papel y la goma.

En la agricultura se utiliza para mejorar las tierras de cultivo como abono y desalinizador; en medicina se utiliza para la elaboración de vendas de yeso, moldes quirúrgicos, odontológicos, producción de pasta dentrífica. En la industria química y farmacéutica como fuente de calcio, componente en medicamentos y lápices labiales. En la industria de alimentos, en el tratamiento de agua, limpieza de vinos, refinamiento de azúcar, vegetales enlatados y alimento para animales.

Zeolita

Las zeolitas fueron reconocidas por primera vez como un nuevo grupo de minerales, por Frederick Cronstedt, un mineralogista sueco, que en 1756 las observó en muestras de la mina de cobre Svappavari, en Suecia. Su nombre proviene de la palabra griega Zein y Litos que significa “piedra que hierve”, debido a su comportamiento de ser calentadas. ⁽⁸⁾

La síntesis de Zeolitas está reportada a principios del año 1862. Al principio del siglo XIX, René Just Haüy mineralogista francés, introdujo en su tratado de Mineralogía los primeros nombres a las diferentes especies de este grupo.

Hacia los años 1920's el grupo mineral recibió un pequeño interés, fue poco antes de que el primer análisis de la estructura del cristal fuera archivado. En esta década también se descubren las propiedades de absorción y se les denomina “tamices moleculares”. Hacia los años 40's las investigaciones sobre zeolitas se incrementaron dramáticamente en laboratorios del mundo, uno de ellos en Londres, donde se trabajó en la identificación y estudios cuantitativos; así como propiedades y usos de intercambio iónico.

En la década de los 50's el investigador Sarantakos observó a los coreanos utilizar métodos naturales para sus cultivos, esto lo llevó a realizar estudios de enzimología y tecnología de zeolitas lo que lo condujo a descubrir la inmovilización celular de bacterias a través de su utilización.

Conviene agregar que el Departamento de Investigación en Zeolitas ICUAP, del complejo de Ciencias de la Universidad de Puebla, fue fundado en la década de

los 80's; tiene una importante tradición en el estudio y análisis de este multifacético mineral, centrandó sus investigaciones en la síntesis e investigación sistemática de zeolitas para aplicarlas en diferentes procesos de interés tecnológico. En la República Mexicana, además de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, sólo la Universidad Autónoma de México y la Universidad Autónoma Metropolitana cuentan con centros de investigación en zeolitas.

En la década de los 90's los estudios de Zeolitas se incrementaron, desarrollando así un mejor conocimiento sobre sus propiedades, y dando como resultado un aumento en aplicaciones prácticas cotidianas como ejemplo: uso en detergentes para disminuir la abrasión en las prendas; en la industria cinematográfica, para evitar desgastes de coloraciones en películas fotográficas; en la industria de la construcción, en cementos, porcelanas como aislantes térmico y acústico, en el sector salud se implementan para combatir diversas enfermedades, como bactericidas principalmente.

La existencia de yacimientos de Zeolitas en el estado de Sonora, origina en la comunidad científica local e internacional un mayor interés; por lo que se hace necesario incrementar un estudio, esto con el fin de reafirmar, descubrir y profundizar en el conocimiento, del que ha sido denominado el "mineral del siglo XXI". ⁽⁹⁾

Generalidades.

Sintéticas y Naturales. Las zeolitas ocurren en la naturaleza como minerales, y pertenecen al grupo de los tectosilicatos. Existen unas 50 zeolitas naturales y más de 150 sintéticas. ⁽¹⁰⁾

En la actualidad, la mayor parte de las zeolitas que se emplean para aplicaciones industriales son sintéticas: se diseñan “a medida” de un determinado proceso, es decir, para favorecer la captación de un determinado ión y su posterior elución en condiciones controladas, y se sintetiza el compuesto zeolítico en un proceso industrial de bajo costo.

Las zeolitas artificiales se hacen en varias formas variando desde gelatinosas o porosas y arenosas, se utilizan como absorbentes de gases, agentes de secado y catalizadores y también como ablandadores de aguas. La zeolita natural esterilizada al 100% y en diferentes concentraciones, justifica su empleo tópico en medicina para el tratamiento y cicatrización de heridas de la piel, en concreto en cirugía debido a la rapidez de curación y regeneración de la piel. Muchos estudios están impulsando nuevas y novedosas aplicaciones de la zeolita natural en medicina.

Desde el punto de vista del control ambiental mediante la eliminación de contaminantes, la gran mayoría de los autores coinciden en la superioridad de las zeolitas naturales atendiendo a:

- Bajo costo de extracción y acondicionamiento para el intercambio.
- Disponibilidad de grandes volúmenes.
- Excelente estabilidad a los procesos químicos y térmicos que permite su reactivación.
- Posibilidad de utilización en varios ciclos.

Las zeolitas se comercializan mundialmente en varios millones de toneladas por año. No obstante, las posibilidades de diseño de las zeolitas sintéticas y su carácter de compuestos químicamente puros, frente a las variaciones que pueden presentar las zeolitas naturales, hacen que las sintéticas se empleen cada vez más.

Mineralogía y Estructura Cristalina.

Las zeolitas ocurren en una amplia variedad de ambientes geológicos, principalmente como alteración de minerales autigénicos, minerales metamórficos de sistemas de baja presión y temperatura. ⁽¹¹⁾

Las zeolitas pertenecen a la familia de los tectosilicatos y son aluminosilicatos cristalinos, con elementos de los grupos I y II como cationes. Consisten en un armazón de tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$ conectados el uno al otro en las esquinas por medio de átomos de oxígeno. Este arreglo permite que estos minerales gocen en su estructura de un sistema de poros y canales con diámetros específicos y uniformes. Los poros de su estructura presentan diámetros mínimos de 0.3 a 1 nanómetro. La Figura 2 muestra la estructura típica de las zeolitas (atómica, tetraédrica y cristalina).

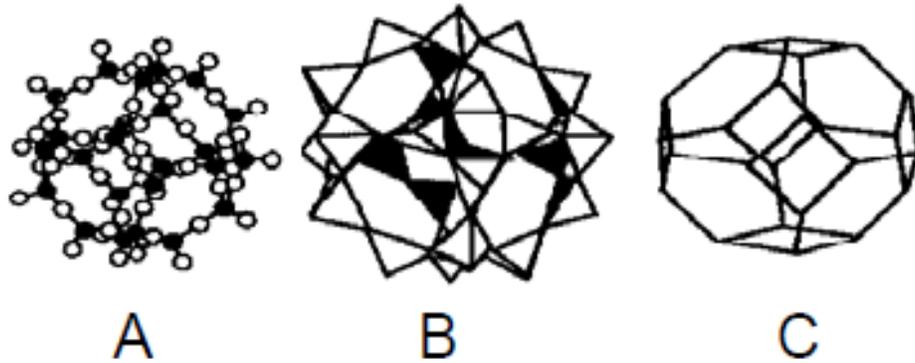


Figura 2. Estructura típica de las zeolitas. A. Atómica, B. Tetraédrica y C. Cristalina.

La estructura presenta canales y cavidades de dimensiones moleculares en las cuales se encuentran los cationes de compensación, moléculas de agua u otros adsorbatos y sales. Este tipo de estructura microscópica hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande, entre 500 y 1000 m²/g, con relación a su superficie externa. Sin embargo esta superficie es poco accesible para los contaminantes de tipo macromolecular.

La microporosidad de estos sólidos es abierta y la estructura permite la transferencia de materia entre el espacio intracrystalino y el medio que lo rodea. Esta transferencia está limitada por el diámetro de los poros de la zeolita, ya que sólo podrán ingresar o salir del espacio intracrystalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor, el cual varía de una zeolita a otra, en la Tabla 1 se muestran algunas propiedades importantes de las zeolitas.

Si se considera el número de átomos de oxígeno que forman los anillos o poros por los cuales se penetra al espacio intracrystalino. Las zeolitas se clasifican de la manera como se muestra en la Tabla 2.

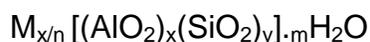
Tabla 1: Características generales de las zeolitas.

Propiedad	Valor
Diámetro de poro	2 a 12 Å
Diámetro de cavidades	6 a 12 Å
Superficie interna	500-1000 m ² /g ⁽⁵⁾
Capacidad de intercambio catiónico	0 a 650 meq/100g
Capacidad de adsorción	<0.35 cm ³ /g
Estabilidad térmica	Desde 200°C hasta más de 1000°C

Tabla 2. Clasificación de las zeolitas respecto al tamaño de los poros.

Zeolita	Átomos de O que forman la abertura	Diámetro de poro θ (Å)
Poros extragrandes	18	$\theta > 9$
Poros grandes	12	$6 < \theta < 9$
Poros medianos	10	$5 < \theta < 6$
Poros pequeños	8	$3 < \theta < 5$

Los tetraedros $[\text{AlO}_4]^{5-}$ inducen cargas negativas en la estructura, las cuales se neutralizan por cationes de compensación intercambiables. Estos cationes junto con las moléculas de agua, se encuentran ocupando el espacio intracrystalino de estos aluminosilicatos. La fórmula química por celda unitaria puede escribirse como:



Donde M es un catión de valencia n puede ser ocupado por Na, K, Li y/o Ca, Mg, Ba, Sr; m es el número de moléculas de agua y la suma de x e y, indica el número de tetraedros de aluminio y silicio por celda unitaria.

Clasificación.

Existen diversas formas de clasificación para las zeolitas, en donde se toman en cuenta algunas de sus características, por mencionar algunas: en base a la estructura cristalina, ambiente geológico, mineralogía, génesis, entre muchos otros; pero sin existir una clasificación única para estos minerales. ⁽⁸⁾

Geológica e hidrológicamente los depósitos de zeolitas se clasificaron según Munson and Sheppard (1974) en varios tipos:

- Sistemas cerrados: se forman por materiales volcánicos en sistemas hidrológicos cerrados.
- Sistemas abiertos: se forman en sistemas hidrológicos abiertos, como lagos de agua dulce y aguas subterráneas.
- Aguas hidrotermales y termales: formados por actividad hidrotermal.
- Marinos profundos: depósitos formados en suelos, comúnmente de meteorización material volcánicos.
- Sistemas metamórficos: estos depósitos son formados en zonas de metamorfismo de bajo grado, metamorfismo de sepultamiento.

En las zeolitas la unidad estructural básica o "unidad primaria de construcción" es la configuración tetraédrica de cuatro átomos de oxígeno alrededor de un átomo central, generalmente de Si o Al. La Tabla 3 muestra la clasificación estructural de las zeolitas según la existencia de 8 unidades secundarias de construcción.

Tabla 3. Clasificación estructural de las zeolitas.

GRUPO C4 (GRUPO DE LA FILIPSITA)			GRUPO C8-T1 (GRUPO DE LA MORDENITA)			GRUPO C6-C6 (GRUPO DE LA FAUJASITA)		
ZEOLITA	TO ₄	Si/Al	ZEOLITA	TO ₄	Si/Al	ZEOLITA	TO ₄	Si/Al
Li-ABW	8		Bikitaia	9		Linde	24	
Filipsita	16		Deschiardita	24		Rho	46	
Harmotoma	16		Epistilbita	24		ZK5	96	1-3
Gismondita	16		Ferrierita	36	4-7	Faujasita	192	
Na-P	16		Mordenita	48		Paulingita	672	
Amicita	16	1-3	ZSM-5	96	<20	Linde N	768	
Garronita	16		ZSM-11	96				
Yugawaralita	16							
Merlionita	32							
GRUPO C4-C4 (GRUPO DE LA ANALCITA)			GRUPO C6 (GRUPO DE LA CHABAZITA)			GRUPO C4-C4- T1 (GRUPO DE LA HEULANDITA)		
Analcita	48		Sodalita	12		Brewsterita	16	
Leucita	48	1-3	Cancrinita	12		Heulandita	36	2.5- 5.0
Wairakita	48		Oferita	18		Stilbita	72	
A	48		Losod	24	2.5- 4.0	Stellerita	72	
Grupo C4-T1 (GRUPO DE LA NATROLITA)	192		Gmelinita	24		Barretita	72	
Edingtonita	10		Liotita	36		GRUPO C8 (GRUPO DE LA LAUMONTITA)		
Gonnardita	20		Chabazita	36		Laumontita	24	1-2
Thomsonita	40	1-2	Mazzita	36				
Natrolita	40		Erionita	36				
Scolecita	40		Aghanita	48				
Mesolita	120		Levynita	54				

TO₄: Número de tetraedros por celda unitaria
Si/Al: relación Si/Al en el grupo estructural

A pesar de las pequeñas diferencias de entalpías libres entre los diversos aluminosilicatos susceptibles de formarse, las diversas zeolitas se obtienen de manera reproducible y con purezas cercanas al 100%. Ello hace difícil concebir la construcción de una estructura espacial continua, sumamente compleja a través de su existencia, en el gel de síntesis, a través de unidades estructurales comunes o "unidad secundaria de construcción" originadas por la unión de tetraedros. La combinación sencilla de estas especies, conducirá a las diferentes estructuras cristalinas de las zeolitas. Meier (1968), apoyándose en estudios cristalográficos, propuso una clasificación estructural de las zeolitas.

Zeolitas en México.

Dentro de los depósitos de zeolitas más estudiados y posiblemente de mayor importancia en México son los de Oaxaca y Sonora. Diversos datos reportados sugieren el siguiente potencial considerable: ⁽¹²⁾

- Oaxaca, Municipio Laollaga -15,120,000 toneladas (Clinoptilolita, Mordenita).
- Sonora: el cajón -10,000,000 toneladas (Clinoptilolita); y Agua Prieta – 3,000,000 toneladas (Erionita).

En la Tabla 4. Se muestra como están distribuidas las zeolitas en México, según su especie y la ubicación geográfica.

Tabla 4. Cuadro de distribución de zeolitas en México

ZEOLITAS EN MÉXICO	
Especie	Ubicación geográfica
Clinoptilolita	Chihuahua, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tlaxcala, Veracruz.
Chabasita	Baja California Norte, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Oaxaca, Sonora
Estilbita	Chihuahua, Edo. De México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Zacatecas.
Erionita	Sonora
Heulandita	Baja California Sur, Guerrero, Jalisco, Oaxaca, Sonora
Mordenita	Chihuahua, Guanajuato, Michoacán, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sonora

El consumo de zeolitas en México es limitado, por el hecho de que no se ha efectuado inventario de estas materias primas a nivel nacional ni una acción propagandística de las mismas.

Propiedades Físicas.

Las zeolitas están compuestas por aluminio, silicio, sodio, hidrógeno, y oxígeno. La estructura cristalina está basada en las tres direcciones de la red con SiO_4 en forma tetraédrica con sus cuatro oxígenos compartidos con los tetraedros adyacentes. Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones prácticas. ⁽⁸⁾

Las propiedades físicas de una zeolita deben de considerarse de dos formas:

La primera es una descripción mineralógica de la zeolita desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, hábitos del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión.

La segunda desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características de brillantes, color, viscosidad de Broockfield, viscosidad de Hércules, área superficial, tamaño de partícula, dureza, resistencia al desgaste.

La caracterización de cualquier zeolita siempre incluye la descripción básica de sus características mineralógicas y una evaluación al cambio con el efecto de la humedad, las cuales son consideradas para las aplicaciones comerciales específicas.

Las propiedades físicas por mencionar algunas son:

- Baja densidad y gran volumen de espacios vacíos cuando es deshidratado.
- Canales moleculares uniformes clasificados en cristales deshidratados.
- Estabilidad de su estructura cristalina al deshidratarse.

Propiedades Físico-Químicas.

Las aplicaciones de las zeolitas naturales hacen uso de uno o más de sus propiedades químicas, que generalmente incluye el intercambio de iones, adsorción o deshidratación y rehidratación. Estas propiedades están en función de

la estructura del cristal de cada especie, y su estructura y composición catiónica. Mumpton (1977), describe las siguientes propiedades relevantes porosidad, adsorción e intercambio iónico. ⁽⁸⁾

Porosidad. Las zeolitas son formadas por canales y cavidades regulares y uniformes de dimensiones moleculares (3 a 13 nm) que son medidas similares a los diámetros cinéticos de una gran cantidad de moléculas. Este tipo de estructura microporosa hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande en relación a su superficie externa. La IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño (Gregg y Sing, 1967). Si son mayores de 50 nm se conocen como macroporos, si su diámetro está comprendido entre 2 y 50 nm se trata de mesoporos y si son menores de 2 nm, como es el caso de los poros de las zeolitas, son microporos. ⁽¹³⁾

Cuando la distancia entre dos superficies es suficientemente corta, los potenciales de adsorción se suman, de forma que una molécula situada en el interior del poro se ve atraída por toda la superficie del poro aumentando la fuerza con la que se ve atraída. Es decir, a medida que disminuye el tamaño del poro más profundo se hace el pozo de potencial. En el caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán adsorbiendo formando una monocapa a una distancia determinada de la superficie (distancia de adsorción), y a medida que aumenta la cantidad adsorbida el adsorbato se ordena en capas sucesivas (llenado en multicapas).

Adsorción. Las zeolitas cristalinas son los únicos minerales adsorbentes. Los grandes canales centrales de entrada y las cavidades de las zeolitas se llenan de moléculas de agua que forman las esferas de hidratación alrededor de los cationes intercambiables. Si el agua es eliminada y las moléculas tienen diámetros seccionales suficientemente pequeños para que estas pasen a través de los canales de entrada entonces son fácilmente adsorbidos en los canales deshidratados y cavidades centrales. Las moléculas demasiado grandes no pasan dentro de las cavidades centrales y se excluyen dando origen a la propiedad de tamiz molecular una propiedad de las zeolitas.

La superficie de los sólidos es una región singular, que es responsable o al menos condiciona muchas de sus propiedades. Los átomos que se encuentran en ella no tienen las fuerzas de cohesión compensadas, como ocurre en los átomos situados en el seno del sólido que es, en definitiva, responsable de las propiedades de adsorción de los sólidos. A distancias suficientemente grandes, no existe una interacción apreciable entre una molécula acercándose a una superficie, por lo tanto, la energía de este sistema es próxima a cero. A medida que la molécula se acerca a la superficie la energía del sistema comienza a disminuir debido a que las fuerzas de cohesión de los átomos de la superficie empiezan a verse compensadas. En otras palabras, el potencial de adsorción origina una fuerza atractiva que provoca el acercamiento de la molécula a la superficie. Cuando la distancia entre la superficie y la molécula libre comienza a disminuir, las fuerzas de repulsión (debidas a la proximidad de las capas de electrones de los átomos de la superficie con los átomos de la molécula libre) comienzan a ser importantes. Por

lo tanto, existe una distancia para la cual la energía del sistema es mínima. La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que esta posee. Cuando el tamaño del poro disminuye se produce un incremento significativo del potencial de adsorción, ocasionado por el solapamiento de los potenciales de las paredes del poro. Así, para un mismo adsorbato, la interacción con las paredes del poro es mayor cuanto menor es el tamaño del poro, y por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida.

Intercambio Iónico. La propiedad de Intercambio Iónico (I.I.) se ha observado en minerales silicatos cristalinos como arcillas, feldespatos y zeolitas. Se considera una propiedad intrínseca de estos minerales pues es el producto de la sustitución isomórfica de los átomos de silicio de su estructura cristalina por otros átomos. En el caso de las zeolitas esta sustitución ocurre por átomos tetravalentes de aluminio lo que produce una carga neta negativa en la estructura que se compensa por cationes fuera de ella. Estos cationes son intercambiables, de ahí la propiedad intrínseca de I.I. que también es una manifestación de su naturaleza de estructura cristalina microporosa, pues las dimensiones de sus cavidades y de los cationes que se intercambian determinan el curso del proceso.

La capacidad de intercambio iónico (C.I.I.) de una zeolita es una magnitud que da una medida del monto de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa de zeolita. Esta capacidad está directamente relacionada con el Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química (Breck, 1974). Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a zeolitas con baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Clarke, 1980). La C.I.I.

teórica máxima, número de equivalentes intercambiables por masa de la celda unitaria, no siempre puede ser alcanzada debido a la existencia de sitios de intercambio inaccesibles.

Intercambio de Cationes. Por procedimientos clásicos de intercambio catiónico de una zeolita se puede describir como la sustitución de los iones sodio de las zeolitas faujasitas por cationes de otros tamaños y otra carga. Esta es una de las características esenciales de las zeolitas. En efecto, así se consigue modificar considerablemente las propiedades y ajustar la zeolita a los usos más diversos. El intercambio catiónico se puede efectuar de varios modos: ⁽⁸⁾

- Intercambio en contacto con una solución salina acuosa (intercambio hidrotérmico) o con un solvente no acuoso.
- Intercambio en contacto con una sal fundida. Por ejemplo, una zeolita A, originalmente con Ca, se pone en contacto con nitratos de litio, potasio o rubidio fundidos hacia 350°C.
- Intercambio en contacto con un compuesto gaseoso. Por ejemplo, una zeolita faujasita Y, originalmente en su forma Na, se pone en contacto con HCl anhidro o NH₃, a temperatura de 250°C.

Deshidratación – Rehidratación. Esta propiedad de las zeolitas varía en función de la presión y temperatura, pero también de su arreglo estructural; correspondido al efecto de hidratación, un proceso endotérmico y al de rehidratación, uno exotérmico. Esta propiedad al igual que otras, no afecta significativamente su arreglo estructural, solo a temperaturas altamente elevadas.

Basado en el comportamiento de deshidratación. Las zeolitas pueden ser clasificadas como:

- a. Aquellas que muestran cambios estructurales no mayores durante la deshidratación y exhiben continúa pérdida de peso como una función de la temperatura.
- b. Aquellos que sufren mayores cambios estructurales, incluyendo colapsos (derrumbes) durante la deshidratación y exhiben discontinuidades en la pérdida de peso.

Un ejemplo típico del primer tipo son las zeolitas naturales como: la clinoptilolita, la mordenita, la erionita, la chabazita y zeolitos sintéticos como lo son los zeolitos A y X los cuales son termalmente estables de 700 a 800°C la deshidratación zeolitas. El comportamiento en la deshidratación de las zeolitas en el segundo tipo es semejante a aquel que exhibe pérdida reversible de agua a bajas temperaturas, pero con un mayor cambio estructural a una elevada temperatura, y los materiales pierden su carácter zeolítico.

Aplicaciones Industriales

Las zeolitas son un grupo de minerales con propiedades especiales del intercambio iónico. Esta cualidad las hace muy útiles para algunas aplicaciones como: agricultura, nutrición animal, fertilizantes, pesticidas, acuicultura, tratamiento de desechos radiactivos, descontaminación, separación de gases, tratamiento de agua, etc. ⁽⁸⁾

Los depósitos de tobas zeolíticas (puzolana) del tipo piroclástico han sido utilizados en Sonora agregándose en la fabricación para su aprovechamiento en otras aplicaciones.

Los depósitos de zeolitas lacustres son de volúmenes pequeños comparados con los piroclásticos. Sin embargo, son depósitos de alta pureza y podrán ser aprovechados en actividades agropecuarias e industriales. Además, los materiales asociados (arcillas) son susceptibles también de aprovechamiento ya que se encuentran en grandes volúmenes.

Las zeolitas como se ha hecho mención poseen características únicas dentro de sus propiedades físicas y químicas, lo que les otorga aplicaciones prácticas múltiples de gran ayuda para la población, en la figura 3 se muestran diversas aplicaciones de las zeolitas.

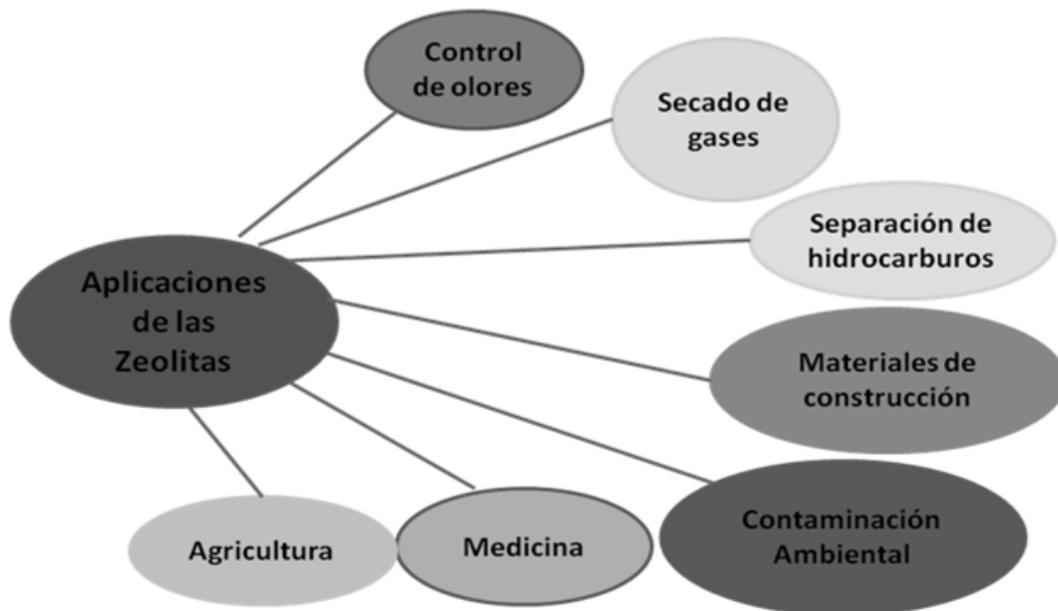


Figura 3: Esquema que muestra algunas de las múltiples aplicaciones de las Zeolitas.