MATERIALES DE LA CONSTRUCCIÓN

Julio Cesar Pino Tarragó
Betsy Elizabeth Fienco Sánchez
Martha Johana Alvarez Alvarez
Glider Nunilo Parrales Cantos
Adrián Oscar Macías Loor
Francisco Segundo Ponce Reyes

Ingeniería y Tecnología

3ciencias

MATERIALES DE LA CONSTRUCCIÓN

Ing. Julio Cesar Pino Tarragó

Arq. Betsy Elizabeth Fienco Sánchez

Ing. Martha Johana Alvarez Alvarez

Ing. Glider Nunilo Parrales Cantos

Ing. Adrián Oscar Macías Loor

Ing. Francisco Segundo Ponce Reyes

Editorial Área de Innovación y Desarrollo,S.L.

Quedan todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida, distribuida, comunicada públicamente o utilizada, total o parcialmente, sin previa autorización.

© del texto: **los autores**

ÁREA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO, S.L.

C/ Els Alzamora, 17 - 03802 - ALCOY (ALICANTE) info@3ciencias.com

Primera edición: **enero 2018**

ISBN: **978-84-948074-6-6**

DOI: **http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2018.24**

AUTORES

Julio Cesar Pino Tarragó, Ingeniero Mecánico, Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín, Cuba, Máster en Máquinas Agrícolas y Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Politécnica de Madrid. Investiga en temas: Evaluaciones de la explotación y mantenimiento de máquinas agrícolas; Procesamiento industrial de alimentos, Evaluación de materiales. Autor de más de 10 libros relacionados con las ciencias técnicas. Actualmente profesor titular de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

Betsy Elizabeth Fienco Sánchez, Arquitecta, Universidad Estatal de Guayaquil, Guayas, Ecuador, Máster en Gerencia Educativa, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. Investiga temas: Alternativas en construcción relacionada a las ciencias técnicas. Jefa departamental en el área de planificación y urbanismo en el Gobierno Municipal de Puerto López, Manabí. Contratista de obras civiles. Actualmente profesor de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

Martha Johana Alvarez Alvarez, Ingeniera Civil, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, Máster Riego y Drenaje, Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador. Investiga temas en: Optimización hídrica, hidráulicos relacionada a las ciencias técnicas. Contratista de obras civiles. Actualmente profesora titular de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

Glider Nunilo Parrales Cantos, Ingeniero Civil, Universidad Estatal de Guayaquil. Guayas. Ecuador, Master en Administración Ambienta Universidad Estatal de Guayaquil, Guayas Ecuador, Investiga temas de "Evaluación del manejo del Relleno Sanitario de La ciudad de jipijapa y su importancia por la Universidad Estatal del sur de Manabí, Análisis de esfuerzos en Resistencia de Materiales; Gerente General de la Compañía Constructora Desde el año 1990 hasta 2008, Guayaquil, Contratista. Fiscalizador de Obras civiles. Actualmente profesor titular de la Universidad Estatal del Sur de Manabí. Ecuador

Adrián Oscar Macías Loor, Ingeniero en Petróleos, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Máster en Administración de Empresas con Mención en Recursos Humanos, Universidad Laica "Eloy Alfaro de Manabí", Manta, Ecuador. Investiga temas: Gestión por procesos en la administración de Gobiernos Autónomos Descentralizados ecuatorianos, Uso de materiales alternativos para la Construcción, Geología de Manabí. Director de Talento Humano Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Rocafuerte, Manabí. Director de Planificación Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Rocafuerte, Manabí. Consultor de procesos de reingeniería de procesos para varias organizaciones ecuatorianas públicas y privadas. Actualmente profesor de la Universidad Estatal del Sur de Manabí.

Francisco Segundo Ponce Reyes, Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, Master en Gerencia Educativa, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. Investiga temas: Alternativas en construcción relacionada a las ciencias técnicas, Director de Obras Pública del Gobierno Municipal del Cantón Jipijapa, Manabí. Contratista de obras civiles. Fiscalizador de obras. Actualmente profesor de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN 11

1.1 OBJETIVOS INSTRUCTIVOS DE LA ASIGNATURA 11

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN 11

1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA, MINERAL Y DE FASE 15

1.4 ALGUNAS TÉCNICAS INSTRUMENTALES DE INVESTIGACIÓN USADAS EN LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES 16

1.4.1. Análisis químico. 17
1.4.2. Microscopio óptico. 18
1.4.3. Análisis térmico. 25
1.4.5. Microscopía electrónica 30

1.5. CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS DE LOS MATERIALES 34

1.6. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN 34

1.6.1. Propiedades termo-técnicas de los materiales 34

1.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN 41

1.8. OTRAS PROPIEDADES 43

CAPITULO II. MATERIALES PÉTREOS NATURALES 45

2.1. GENERALIDADES 45

2.2. ROCAS. TIPOS DE ROCAS MÁS USADAS EN LA CONSTRUCCIÓN 45

2.2.1. Rocas y minerales 45
2.2.2. Principales tipos de rocas 46

2.3. FORMAS DE USO DE LAS ROCAS EN LA CONSTRUCCIÓN 51

2.4. LOS ÁRIDOS 52

2.4.1 Obtención de los áridos 53
2.4.2 Propiedades de los áridos 59

2.5. OTRAS PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS 63

2.5.1. Parámetros del estado. (Propiedades relacionadas con la masa, el peso y el volumen) 63
2.5.2. Porosidad y compacidad. 67
2.5.3. Volumen de los espacios inter-granulares en un material a granel. 67
2.5.4. Superficie específica. 67

2.6. COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA 68

2.6.1. Tamizado 68
2.6.2. Representación gráfica de la granulometría 71

2.6 .3. Tamaño máximo y módulo de finura 73

2.7. MÉTODOS PARA COMBINAR ÁRIDOS 73

2.7.1. Métodos experimentales 74

2.7.2. Métodos analíticos 74

2.7.3. Métodos gráficos 75

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 81

INDICE DE FIGURA

Figura 1. Microscopio de luz polarizada modelo np-400b standard 18
Figura 2. Lentes objetivo de un “microscopio de luz 19
Figura 3. Desbaste de la muestra 19
Figura 4. Corte de la muestra 19
Figura 5. Unión de la muestra al portaobjetos 20
Figura 6. Esquema general de una sección delgada 20
Figura 7. Imagen de una sección delgada 20
Figura 8. Superficie de una muestra de hormigón conteniendo 5,6% de poros. 20
Figura 9. Superficie de un hormigón con un 17% de poros totales 21
Figura 10. Aspecto mostrado por los cristales de yeso en una muestra de mortero de acabado, observados bajo el microscopio de luz polarizada, entre nicoles cruzados 21
Figura 11. Aspecto mostrado por los cristales de yeso en una muestra de mortero de acabado, observados bajo el microscopio de luz polarizada, entre nicoles cruzados 22
Figura 12. Fisuras en una sección delgada de hormigón 22
Figura 13.Imagen óptica de una sección delgada donde se observan productos de la reacción álcali-sílice asociada con partículas de pedernal 23
Figura 14. Diagramas tg/dta de pastas de cemento a 28 días de edad 27
Figura 15. Difracción de los r-x en la estructura cristalina 29
Figura 16. Vista interior de un equipo de difracción de r_x 29
Figura 17. Difractogramas de r-x obtenidas sobre pastas de cemento 30
Figura 18. Microscopio electrónico. 31
Figura 19**.** (Yeso sin aditivo). 33
Figura 20. (Yeso con aditivo). 33
Figura 21. Imagen de una muestra de cemento endurecido donde se aprecian agregados de csh (hidrosilicatos de calcio) y placas de portlandita (ch). 33
Figura 22. Imagen de una muestra de cemento endurecido donde se aprecian agujas de tobermorita (hidrosilicatos de calcio) y placas hexagonales de portlandita (ch). técnica de electrones secundarios 34
Figura 23. Durómetro. 43
Figura 24. Vista general de una cantera 53
Figura 25. Instalaciones de la cantera mariano pérez balí (el purio). 56
Figura 26. Diferentes tipos de trituradoras. 57
Figura 27. “Esquema de una criba“ 58
Figura 28. “Mediante los sistemas de criba se seleccionan los diferentes tamaños de los áridos para su posterior comercialización según su uso”. 59
Figura 29. Angulosidad y redondeamiento de las partículas de áridos 60
Figura 30. Esquema de las partes integrantes de un material poroso: va es el volumen absolute (volumen del sólido); vn, el volumen en estado natural (con poros); vagua, el volumen del agua; vaire el volumen del aire vp volumen de los poros. 65
Figura 31. Tamices para ensayo. 69
Figura 32. Tamizadora (Marca Haver & Boecker). 70
Figura 33. Representación gráfica de la granulometría de áridos. 72
Figura 34. Granulometría de un árido con respecto a una curva ideal. 72
Figura 35. Gráfico granulométrico del metodo del monograma (libro m.c., 2018). 78
Figura 36. 35% arena, 26% gravilla y 39% piedra. 80

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Resumen de las principales formas de uso de los materiales de construcción 15
TABLA 2. Coeficiente de conductibilidad térmica de algunos materiales comunes 35
TABLA 3. Coeficiente de dilatación térmica de algunos materiales comunes 36
TABLA 4. Minerales que integran la escala de Mohs 41
TABLA 5. Valores comparativos de dureza de algunos minerales según distintas escalas 42
TABLA 6. Resumen de las principales formas de uso de los materiales pétreos naturales en la construcción 51
TABLA 7. Dimensiones de los recipientes para la medición del peso unitario 66
TABLA 8. Tamices de ensayo 69
TABLA 9. Tamices de la serie de tyler normados por la ASTM. 70
TABLA 10. Peso de la muestra para el ensayo granulométrico. 70
TABLA 11. Tabla gramulométrica 71
TABLA 12. Tabla granulométrica del método del monograma (libro m.c., 2018). 77
TABLA 13. Granulometría en porcentaje (m.c., 2018) 78
TABLA 14. Tabla granulométrica del método de Ruthfuchs (m.c., 2018). 79
TABLA 15. Porcentaje granulométrico port amices/material (m.c., 2018). 80

CAPITULO I. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

1.1 Objetivos instructivos de la asignatura

a) Conocer la influencia de la composición y estructura de los materiales de construcción en sus propiedades ingenieriles comunes.
b) Indicar las técnicas de investigación recomendables para el estudio de las distintas propiedades de los materiales de construcción y conocer el significado de sus resultados.
c) Identificar los principales materiales y productos de la construcción.
d) Seleccionar materiales y productos de construcción de acuerdo a las necesidades del proyecto.
e) Utilizar los ensayos de laboratorio para verificar la calidad, utilización de los resultados
f) de los ensayos en la labor de dirección de la ejecución y control técnico de la obra. f) Conocer las materias primas, procesos de obtención, propiedades y uso de los
g) materiales y productos de la construcción más empleados en el país. Tomando en cuenta el impacto ambiental que provoca su fabricación y uso.

CONTENIDO DEL LIBRO

Composición y estructura de los MC
Materiales pétreos naturales
Materiales pétreos artificiales
Materiales aglomerantes
Maderas
Metales
Pinturas y plásticos

Generalidades

Materia prima, materiales y productos. Es muy importante distinguir claramente estos tres conceptos básicos que serán muy utilizados en esta asignatura. Utilicemos un ejemplo para ilustrar sus diferencias; un bloque es un producto hecho a base de hormigón, que a su vez se produce con cemento, áridos y agua. En este caso es un producto, el hormigón un material y los ingredientes cemento, áridos y agua son materias primas. Debe aclararse que estos conceptos son muy relativos y conviene utilizarlos correctamente.

1.2 Clasificación de los materiales de construcción

Existen miles de materiales disponibles y están divididos en tres clases simples:

metálicos, polímeros o plásticos y cerámicos. Los materiales compuestos son una mezcla de dos o las tres clases mencionadas. Un ejemplo importante de estos materiales es el compuesto de fibra de vidrio, formado por un cerámico (fibra de vidrio) y un plástico (matriz de resina). En adición a los tres ya mencionados, cabe aclarar que existen los llamados semiconductores, que han ganado una importancia cada vez mayor en nuestra tecnología de ingeniería y que poseen características que son poco típicas. Pero para fines del presente estudio no se requiere profundizar en ellos.

Las clasificaciones de los materiales se hacen tomando como base las fuerzas de enlace entre los átomos o entre las moléculas del material. Las fuerzas de enlace dependen de la organización atómica fundamental y son similares dentro de una misma familia. Esto facilita la comprensión y clasificación de las propiedades de un material. Se describirán posteriormente las diferencias entre estas tres fuerzas de enlace.

METALES

Se reconocen fácilmente debido a que tienen alta conductividad térmica, esto es, que pueden conducir rápidamente calor a otro elemento o viceversa. También tienen una alta conductividad eléctrica y son opacos. A menudo, aunque no siempre, son pesados y deformables. Usualmente pueden ser pulidos hasta obtener un gran brillo.

Los metales deben su comportamiento al hecho de que algunos de sus electrones pueden abandonar los orbitales en los átomos. De manera opuesta, en los polímeros y los cerámicos, los electrones no son libres de vagar en la medida que lo hacen en los metales. Puesto que algunos electrones son libres de moverse en un metal, rápidamente pueden transferir una carga eléctrica.

Cada electrón acarrea 1.6 X 10-9 Amperes por segundo, ya que un Coulomb es la carga transferida por un Ampere rápidamente de una región caliente de un metal a una región fría. Los metales transmiten algo de la energía térmica que han absorbido en la zona de más alta temperatura y esto les da la propiedad de conductividad térmica.

Típicamente la mayoría de los metales son más densos que los materiales no metálicos. De cualquier forma, la alta densidad no es una característica inherente de los metales, puesto que existen metales ligeros. No obstante, más del 90% de aquellos elementos con peso atómico de 40 o más son metales. Hasta ahora la alta densidad es sólo una coincidencia del comportamiento metálico.

La reflectividad de un metal está relacionada con la respuesta de los electrones a vibraciones de las frecuencias de luz. Esto es otro resultado de la independencia parcial que tienen los electrones de sus átomos correspondientes. En síntesis, los metales se caracterizan por la habilidad de ceder electrones.

POLÍMEROS

Más a menudo llamados plásticos. Están caracterizados por su baja densidad y su uso como aislantes tanto térmica como eléctricamente. Son pobres reflejantes de la luz y tienden a ser transparentes o translúcidos (al menos en secciones delgadas). Algunos de ellos son flexibles y sujetos a la deformación.

A diferencia de los metales, los cuales tienen algunos electrones libres, los elementos no metálicos de la esquina superior derecha de la tabla periódica, tienen en común el atraer electrones adicionales. Cada electrón se asocia con un átomo específico (o un par de ellos). De esta manera, en los plásticos encontramos una conductividad térmica y eléctrica bastante limitada, puesto que toda la energía térmica que debe ser transferida de regiones calientes por vibraciones atómicas lleva un proceso mucho más lento que el que se lleva a cabo en los metales. Debido a la escasa movilidad de los electrones en los plásticos, éstos son más capaces de ajustar sus vibraciones a los de la luz. Es por esto que absorben los rayos lumínicos.

Los polímeros contienen sólo elementos no metálicos, comparten electrones y forman grandes moléculas. Estas son a menudo llamadas macromoléculas. Estas grandes moléculas contienen un gran número de unidades o meros, de donde se toma la palabra polímeros para ellos. Más aún, estas moléculas usualmente tienen estructuras que pueden ser deformadas: de aquí el término plásticos. Por medio del conocimiento de la arquitectura o conformación de esas moléculas el científico y el

ingeniero han sido capaces de producir plásticos que tienen las propiedades deseadas para una amplia gama de aplicaciones técnicas.

Después de su proceso inicial, los po1ímeros como producto terminado se clasifican en dos grandes bloques: **Los Termoestables** y **los Termoplásticos.**

Los polímeros termoestables son generalmente, pero incorrectamente, llamados baquelita moldeada. Son diferentes de los termoplásticos porque después de su proceso inicial de moldeo no pueden ser reformados y si son sujetos al calor, se distorsionan. Se ampollan, se queman o se carbonizan En su proceso de moldeo tienen que calentarse a temperaturas y presiones mayores que los termoplásticos pero son más fuertes y soportan temperaturas más el evadas.

Los plásticos termoestables se hacen de resinas fenólicas, por lo que son muy costosos y los moldes que se hacen de ellos son muy frágiles con pocas aplicaciones prácticas. Por lo tanto, para reducir costos y mejorar la resistencia del material se usan varios agregados.

La característica definida de los polímeros termoplásticos es que pueden ser suavizados por el calor, generalmente a una temperatura abajo de 150 oC y puede después dársele forma cuando sea necesario. La baja temperatura a la cual se suaviza limita sus aplicaciones a cierto grado, pero son de gran valor para una gran variedad de propósitos en el campo de la ingeniería en general y eléctricas así como para productos domésticos.

Cuando se calientan a bajas temperaturas los termoplásticos pueden sufrir cambios de tamaño y forma y cualquier metal puede ser insertado y después extraído. En algunos componentes, esto puede suceder durante operaciones de soldado, a menos que se tome cuidado de poner “un pozo de calor” para absorberlo.

Algunos plásticos cambian su forma bajo temperatura ambiente y bajo presiones extremadamente ligeras. Esto se conoce como flujo frío y la brea es un buen ejemplo de un plástico con esta característica. Los plásticos en este grupo además del poli estireno, incluyen al “perspex“(acetato de celulosa), polipropileno, nylon, cloruro de polivinilo (P.V.C), y al polietileno.

CERÁMICOS

Dicho de una forma simple, los cerámicos son compuestos que contienen elementos metálicos y no metálicos. Existen muchos ejemplos de materiales cerámicos. Estas variedades pueden ser desde el cemento que forma parte del hormigón (incluso las rocas mismas), hasta vidrio y aislantes de bujías, por nombrar unos pocos solamente.

Cada uno de estos materiales es relativamente duro y frágil. En realidad, la dureza y fragilidad son atributos generales de los cerámicos junto con el hecho que tienden a ser más resistentes que otros metales o polímeros juntos a altas temperaturas y severas condiciones del medio ambiente. Las bases para sustentar las características mencionadas están dadas de nueva cuenta por el comportamiento electrónico de los constituyentes de este material, es decir sus átomos.

Debido a sus tendencias naturales, los elementos metálicos liberan los electrones localizados en los orbitales más alejados del núcleo de sus átomos y los ceden a los átomos de los materiales no metálicos, los cuales retienen esos electrones. El resultado es que dichos electrones quedan inmovilizados, de manera que un material cerámico típico resulta un buen aislante, tanto térmico como eléctricamente.

Igualmente importante resulta el que los iones metálicos positivos (átomos que han perdido electrones) los iones no metálicos negativos (átomos que han ganado electrones), desarrollen fuerte atracción entre sí. Cada catión (positivo) se rodea de aniones (negativos). Usualmente se requiere una

cantidad considerable de energía (y por lo mismo una cantidad considerable de fuerza) para separarlos. Es pues un hecho poco sorprendente que los materiales cerámicos tiendan a ser duros (resistentes mecánicamente), refractarios (térmicamente resistentes), e inertes (químicamente resistentes).

MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se han clasificado como: sintéticos (fibra de vidrio), naturales (madera), o combinados (los sintéticos y naturales; como el concreto y el asfalto). Los materiales sintéticos se dividen en tres categorías:

Reforzados con partículas. Las partículas más grandes se incorporan a una matriz y la carga se comparte entre la matriz y las partículas.

- Reforzados con partículas. Las partículas más grandes se incorporan a una matriz y la carga se comparte entre la matriz y las partículas.
- Endurecidos por dispersión. Se dispersan pequeñas partículas en una matriz; la matriz es el principal constituyente de soporte de la carga.
- Reforzados con fibra. Las fibras se incorporan en una matriz. La fibra es el principal
- componente de soporte de la carga.

Los materiales reforzados con partículas y reforzados por dispersión se clasifican (le acuerdo con el tamaño de su fase secundaria. La resistencia por dispersión tiene muchas analogías con los principios metalúrgicos. En el refuerzo con fibra se requiere una fracción de volumen inferior cuando la carga va a ser paralela a la dirección de las fibras en lugar de ser perpendicular a éstas. Sin embargo en todos los casos, deben controlarse las fracciones volumétricas de las fibras, las partículas o las fases dispersas, para obtener las propiedades deseadas. La fibra de vidrio es el mejor ejemplo para describir un material compuesto sintético. La madera se puede considerar como un material compuesto natural. Está compuesto de fibras de celulosa unidas por una matriz de polímeros, principalmente lignina.

Las propiedades mecánicas de la madera dependen del tipo, la cantidad de humedad, y la orientación direcciones de la muestra. El ensayo más común es la prueba de flexión en la cual se obtienen los valores más altos en las maderas duras. La presencia de defectos, tales como los nudos, disminuyen significativamente la resistencia de la madera.

En igual forma, las cantidades de agregados de la pasta de cemento determinan las propiedades del concreto, que es un ejemplo típico de lo que es un material compuesto combinado. El objetivo es obtener una masa de concreto a un costo mínimo y por lo tanto el agregado constituye una fracción significativa del volumen. En este material compuesto es sabido que se obtienen concretos de alta resistencia a la comprensión manejando las relaciones agua—cemento. Esto debido a que como todo compuesto cerámico, tiene una baja resistencia a la tracción. La utilización de varillas de metal como refuerzo en las áreas de alta tensión aumenta significativamente su utilidad, y esto no es sino otro agregado metálico más a la anterior combinación de materiales.

Un resumen de las principales formas de uso de los materiales de construcción se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resumen de las principales formas de uso de los materiales de construcción.

CLASE	TIPO	FORMA DE USO O TIPO ESPECÍFICO
Pétreos naturales	Suelos	**Adobes, tapial, quincha, embarrado, suelo- cemento, etc.**
	Rocas	**Triturada: Rajón, macadam, áridos.** **Bloques: Mampuestos, sillares, losas.**
Pétreos artificiales	Cerámicos	**Bloques, ladrillos, tejas, losas, azulejos.** **Piezas cerámicas. (tubos, piezas sanitarias,**
	Vidrios	**Bloques.** **Plano**
Aglomerantes	Aéreos	**Cal, yeso, magnesia**
	Hidráulicos	**CPO, cemento aluminoso, cemento de escorias, etc.**
	Resinas	**Acrílicos, fenólicos, furánicos, epoxi, etc.**
	Hidrocarburo	**Asfaltos y betunes.**
Aglomerados Artificiales	Morteros	**Revestimientos, juntas de unión, piezas, etc.**
	Hormigones	**Hormigón masivo, hormigón armado, etc. Piezas de H. (bloques, celosías, bovedillas, etc. Elementos de H. (pre-fabricado o in situ)**
Metales	Ferrosos	**Acero, Hierro dulce, Hierro fundido, etc.**
	No Ferrosos	**Al, Cu, Pb, aleaciones, etc.**
Materiales Orgánicos	Maderas	**Estructuras (horcones, vigas, etc.)** **Terminaciones (puertas, ventanas, mobiliario).**
	Corcho	**Terminaciones.**
Pinturas	Ag ua	**Protección, estética, etc.**
	Frescos	**Decoración**

1.3 Composición química, mineral y de fase

Los materiales de construcción se caracterizan por las composiciones química, mineralógica y de fase.

La COMPOSICIÓN QUÍMICA de los materiales permite tener una idea acerca de una serie de propiedades del material, tales como: la resistencia al fuego, estabilidad biológica, las características mecánicas y otras características técnicas. La composición química de los aglomerantes inorgánicos (cemento, cal, etc.) y de los materiales de piedra resulta cómodo expresarla mediante la de cantidad de óxidos (en %) que estos contienen. Los óxidos básicos y ácidos están vinculados químicamente entre sí y forman minerales que son los que definen muchas propiedades del material.

La COMPOSICIÓN MINEROLÓGICA muestra que minerales y en qué cantidad lo contiene el aglomerante o el material de piedra. Por ejemplo, en el cemento Pórtland el contenido del silicato

tricálcico ($3CaO.SiO_2$) constituye un 45-60%, además al aumentar su cantidad, se acelera el fraguado y aumenta la resistencia mecánica de la piedra de cemento.

Desde el punto de vista de su composición química, los minerales pueden ser compuestos químicos simples (definidos), compuestos indefinidos (variables) ó disoluciones sólidas (variable entre límites definidos). Ejemplos de compuestos químicos definidos son: los óxidos como la sílice (SiO_2), el óxido férrico (Fe_2O_3), etc., las sales oxigenadas como el $CaCO_3$ (calcita ó aragonita), el sulfato de calcio ($CaSO_4$), etc., y otros compuestos semejantes. También debemos considerar en este grupo a los minerales que están formados por un solo elemento químico, por ejemplo el cobre (Cu), el grafito (C), etc.

Especial significado tienen las disoluciones sólidas o mezclas isomorfas, en las cuales la composición química de la sustancia cristalina varía de un extremo a otro de una serie manteniendo su estructura cristalina, gracias principalmente a la capacidad de sustituirse un elemento por otro (isomorfismo). A medida que cambia la composición química en estos compuestos (de un componente al otro), también van variando las propiedades del material, tales como el índice de refracción, su masa específica, conductibilidad eléctrica, etc. Ejemplos muy representativos de disoluciones sólidas son las plagioclasas (los minerales más abundantes de la corteza terrestre), en las que la composición varía desde la albita ($NaSi_3AlO_8$) hasta la anortita ($CaSi_2Al_2O_8$).

En cuanto a la forma de expresar la composición química de los minerales, se suelen utilizar dos tipos de fórmulas, las empíricas y las estructurales. Las fórmulas empíricas son muy utilizadas por su sencillez, por ejemplo $3CaO.SiO_2$ en el caso de la alita, que es uno de los minerales más importantes del cemento Pórtland. Sin embargo, dichas fórmulas no se corresponden con las características estructurales de los compuestos (iones o sus complejos),

por lo que muchas veces se usan fórmulas en las que se acostumbra a separar los complejos aniónicos de los cationes. En este caso la alita se representa como Ca_3SiO_5.

La COMPOSIÓN DE FASE del material y la transición de fase del agua, contenido en sus poros ejercen una influencia sobre las propiedades y el comportamiento del material. Se pueden destacar las sustancias sólidas que forman las paredes de los poros, es decir, "carcasa" del material, y los poros llenos de aire y agua. Si el agua, que es un componente de este esquema, se congela, el hielo formado en los poros modificará las propiedades mecánicas y termo/técnicas del material. Además, el aumento del volumen del agua que se congela en los poros provoca tensiones internas capaces de destruir el material durante los ciclos de congelación y descongelación.

1.4 algunas técnicas instrumentales de investigación usadas en la caracterización de materiales

1. Técnicas de análisis químico
2. Técnicas de análisis térmico
3. Microscopía óptica y metalografía
4. Espectroscopia ultravioleta, de luz visible e infrarroja
5. Espectrometría de masa
6. Cromatografía de gases y líquidos
7. Microscopía de reflexión y transmisión de electrones
8. Espectrometría de resonancia magnética y nuclear
9. Espectrometría de emisión y absorción óptica

10. Difracción de rayos X y espectrometría de fluorescencia
11. Espectrometría de Auger y de fotoelectrones (rayos X)
12. etc., etc.,…….

Antes de comenzar el desarrollo del tema propiamente dicho, es conveniente destacar el objetivo y alcance que se pretende con el estudio de esta temática por los ingenieros civiles. Evidentemente que la investigación de los materiales de construcción constituye generalmente un problema de carácter multidisciplinario, en el que están involucradas varias disciplinas. Es necesario entonces el trabajo conjunto de especialistas, donde cada uno aporte sus conocimientos y experiencias en su rama, para lo cual se necesita un acercamiento mutuo que permita el entendimiento y aproximación progresiva a la solución del problema planteado.

No se pretende entonces, DE NINGÚN MODO, que el ingeniero sea capaz de utilizar el microscopio u otros instrumentos, y realizar por sí mismo todas las determinaciones, sino que lo que se pretende es que sea capaz de conocer el campo de aplicación de la técnica, y ante un caso concreto, acudir al especialista solicitándole con precisión lo que necesita, trabajar en conjunto e interpretar adecuadamente los resultados que se obtengan del estudio.

Conviene aclarar las diferencias que existen entre la ciencia de los "Materiales de la Construcción" y la "Ciencia de los Materiales". La Ciencia de los Materiales comprende estudios de naturaleza y alcance distintos a los de Materiales de la Construcción, generalmente más dirigidos hacia aspectos microscópicos o sub-microscópicos que se emplean para el diseño de nuevos materiales y otros fines.

1.4.1. Análisis químico

El análisis químico es el conjunto de métodos de análisis elemental, que permiten la determinación de los elementos o iones que contienen determinada sustancia. Dicha determinación puede ser de dos maneras, cualitativa o cuantitativa, pero para los propósitos más frecuentes vinculados con los materiales de construcción, la de mayor interés es la composición química cuantitativa. El análisis clásico para las determinaciones se realiza por vía húmeda (por gravimetría, colorimetría, volumen de gas desprendido, etc.), sin embargo, existe un numerosos grupos de técnicas instrumentales que permite de manera más rápida y efectiva, resolver los variados problemas prácticos comunes de la producción de materiales, control de calidad de ellos, caracterización e investigación en sentido general. Durante este tema se describirán someramente algunas de estas técnicas.

Como ya se ha explicado, los resultados del análisis químico se acostumbra a expresarlos en por cientos de los diferentes óxidos. En cada caso es muy importante saber cuáles son los elementos de interés, pues de lo contrario la determinación sería muy costosa y compleja. Durante el transcurso de la asignatura ustedes irán conociendo cuáles son los elementos más importantes a considerar en cada uno de los materiales de construcción y en cada situación específica.

El análisis químico no es ciertamente complejo, y generalmente puede realizarse en un pequeño laboratorio con la ayuda de instrumentos comunes (cristalería, reactivos para análisis, etc.), aunque se requiere de una balanza analítica, para muchas determinaciones se requiere de un horno y de crisoles apropiados, pero por lo general no resulta tan complicado en comparación con otras de las técnicas que trataremos hoy. Claro que para obtener resultados confiables se requiere de un técnico calificado, instrumentos "aptos" para su empleo, y la utilización de las normas de ensayo correspondientes. Esto último es muy importante, ya que de acuerdo con los objetivos de las determinaciones existen distintas normas

1.4.2. Microscopio óptico

La técnica de microscopía óptica es una de las más conocidas, y como se verá más adelante, consiste en un conjunto de métodos que van desde lupas comunes hasta complejos y costosos microscopios. El microscopio común permite hacer observaciones de la estructura de los materiales, presencia de poros, fisuras, uniones entre las distintas partes componentes, etc. Y en oportunidades, permite realizar el reconocimiento o identificación de los materiales más comunes.

Una técnica de valor inestimable es el microscopio de luz polarizada, el cual es un instrumento relativamente común, muy utilizado para estudios de distinta naturaleza en múltiples disciplinas y procesos tecnológicos. Se trata de un microscopio, que además del sistema de lentes ordinario posee, entre otros aditamentos, un polarizador y un analizador. Para el trabajo común, deben colocarse perpendicularmente las direcciones de vibración del analizador y del polarizador.

Se acostumbra a clasificar a las partes componentes de un microscopio en distintos sistemas:

- Sistema de movimiento: formado por el conjunto de partes mecánicas que ayudan al funcionamiento del instrumento, colocación de los lentes en su posición adecuada, enfoque, etc.
- Sistema de iluminación: está constituido por la fuente de luz, los reflectores y condensadores, necesarios para el adecuado funcionamiento del equipo.
- Sistema óptico: conjunto de lentes y otros accesorios que tienen como propósito lograr la amplificación y determinación de las constantes ópticas de los materiales estudiado

Las partes principales que componen un microscopio de luz polarizada se pueden apreciar en la Foto No. 1.

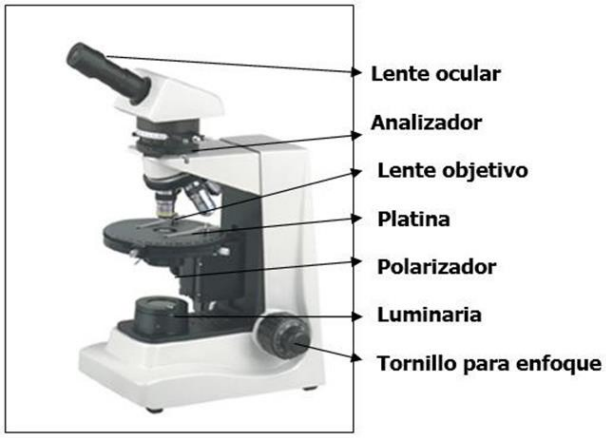


Figura 1. Microscopio de luz polarizada modelo NP-400B Standard.

Puede observarse una preparación (o sección delgada) sobre la platina giratoria del microscopio.

Figura 2. Lentes objetivo de un “Microscopio de luz

La preparación de la muestra de estudio

La muestra del material a estudiar se coloca sobre la platina, por lo que se infiere que su espesor debe ser lo suficientemente delgado para permitir el paso de la luz. Es decir, que se trabaja con luz transmitida. Esta preparación especial se denomina sección delgada (~0,02 mm de espesor), la cual se realiza en talleres especializados.

Figura 3. Desbaste de la muestra

Figura 4. Corte de la muestra

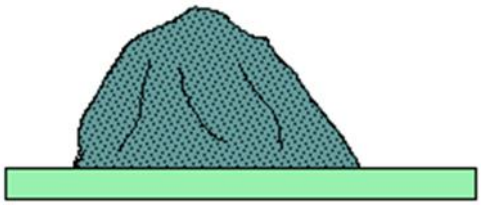


Figura 5. Unión de la muestra al portaobjetos

Figura 6. Esquema general de una sección delgada

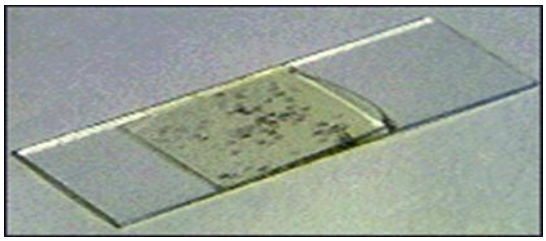


Figura 7. Imagen de una sección delgada

El trabajo con el microscopio de luz polarizada consiste entonces en la determinación de una serie de constantes ópticas, que permiten conocer las características del material que se analiza. Puede determinarse el índice de refracción, el signo óptico de la indicatriz, forma de los granos cristalinos, relieve, color propio, y otros parámetros ópticos de interés para el diagnóstico. Una determinación muy sencilla es por ejemplo, si el material es isótropo o anisótropo.

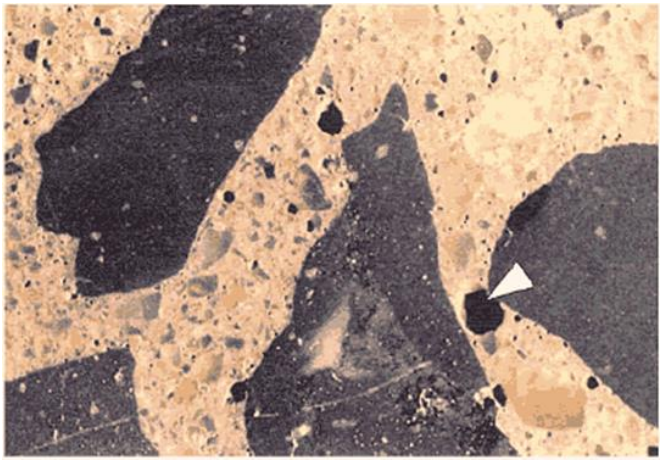


Figura 8. Superficie de una muestra de hormigón conteniendo 5,6% de poros.

(**Tomado de**: Petrografía del concreto FHWA)

El poro grande que se observa (marcado con una flecha) tiene alrededor de 2 mm de diámetro (mayor que los poros de aire ocluido). Observe los poros pequeños bien distribuidos.

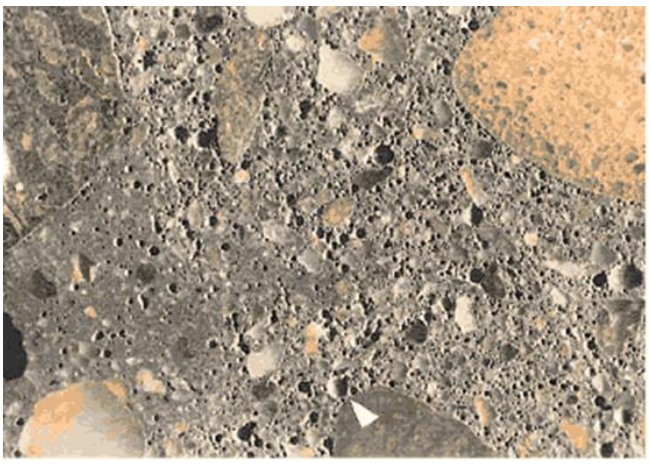


Figura 9. Superficie de un hormigón con un 17% de poros totales.

(**Tomado de**: Petrografía del concreto FHWA)

En definitiva, por medio del microscopio de luz polarizada podemos conocer si el material tiene estructura cristalina o amorfa, se puede efectuar el diagnóstico de un gran número de fases, se puede apreciar la estructura del material, la presencia de fisuras, poros, etc.

De esta manera, la técnica de microscopia óptica de luz polarizada puede ser utilizada ampliamente en el estudio de la composición petrográfica de los áridos utilizados o a utilizar en morteros y hormigones, en la observación de la estructura de distintos materiales de construcción, la identificación de determinadas fases presentes en los materiales, en el estudio y caracterización de materiales afectados por determinadas patologías, etc.

Es de destacar, que los mejores resultados en el estudio con el microscopio de luz polarizada se obtienen cuando se cuenta con la ayuda de un especialista en la técnica de microscopia, pero siempre resulta imprescindible la presencia e interacción con el especialista en materiales, que posibilite la correcta interpretación de los resultados, que de manera aislada pudieran tener un significado muy diferente. Desde luego que cuando se realiza una investigación sobre un determinado material, siempre debe tenerse la idea de lo que puede esperarse en el examen, por lo que el ingeniero debe profundizar previamente en lo que “puede o no” aparecer como resultado.

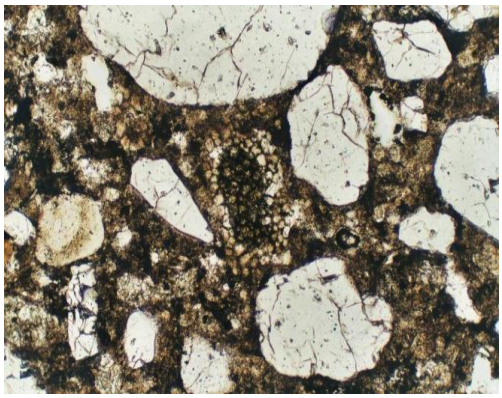


Figura 10. Aspecto mostrado por los cristales de yeso en una muestra de mortero de acabado, observados bajo el microscopio de luz polarizada, entre nicoles cruzados.

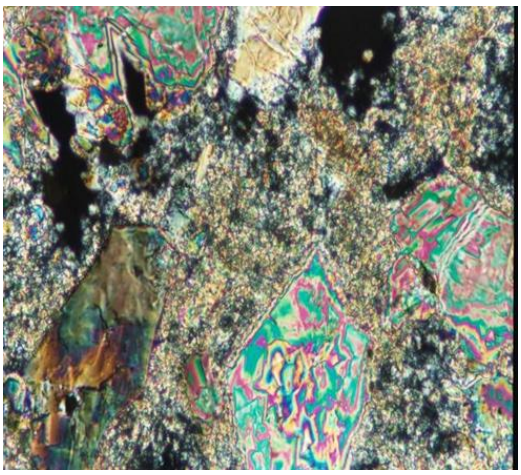


Figura 11. Aspecto mostrado por los cristales de yeso en una muestra de mortero de acabado, observados bajo el microscopio de luz polarizada, entre nicoles cruzados.

Es muy interesante conocer que el campo de aplicación de la técnica del microscopio de luz polarizada en el estudio de los materiales de construcción y otros fines, puede ampliarse considerablemente cuando se emplean algunos tipos de tratamientos a las muestras estudiadas. Un ejemplo particular es el uso de resinas de distintos tipos como impregnación, que al observarse a través del microscopio se favorece la diferenciación entre las distintas partes componentes, especialmente destacándose los poros, fisuras y otros defectos en los que la resina se aloja durante la impregnación.

En la Figura No. 12 la flecha indica la única fisura que pudiera ser visible con iluminación transmitida. La impregnación con una sustancia fluorescente e iluminación con luz ultravioleta pudiera hacer posible la observación de la fluorescencia de la sustancia en las otras fisuras. (El porta-objetos de vidrio pudiera ser alrededor de 100 veces el espesor de la sección delgada de hormigón).

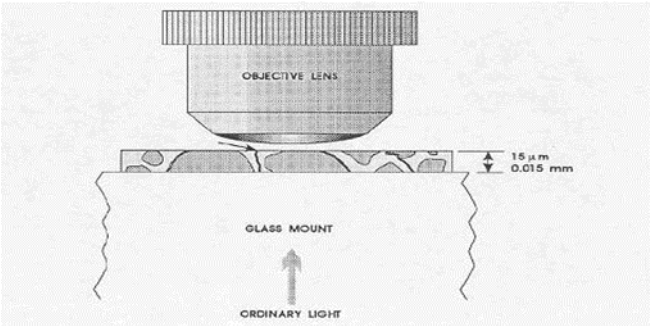


Figura 12. Fisuras en una sección delgada de hormigón.

(**Figura tomada de**: http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/04150/chapt8.cfm)

Ancho del campo visual: 15 mm.

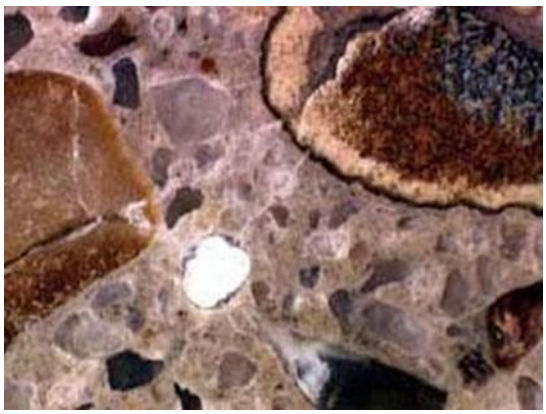


Figura 13. Imagen óptica de una sección delgada donde se observan productos de la reacción álcali-sílice asociada con partículas de pedernal.

(**Foto tomada de**: http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/04150/chapt8.cfm)

La microscopia óptica. Fundamentos

La luz posee un carácter dual onda-partícula, refiriéndose a su manifestación; y posee una naturaleza electromagnética, refiriéndonos a su esencia [4]. La luz ordinaria manifiesta un comportamiento de onda electromagnética, de manera tal que las vibraciones de los vectores eléctrico y magnético ocurren en todas las posiciones perpendiculares a la dirección de propagación del rayo de luz.

Los lentes o dispositivos que son capaces de transformar la luz ordinaria en luz polarizada se denominan "polarizadores". Tales dispositivos pueden ser de láminas de vidrio, prismas de Nicol, polaroides (lámina dicroica), etc.

Según la concepción anterior, al pasar la luz ordinaria a través de ellos, todas las vibraciones de la luz emergente estarán orientadas en un solo plano, llamado "plano de polarización" (luz plano polarizada). Si otro lente semejante se coloca entonces con su plano de polarización perpendicular al anterior, entonces no será posible el paso de la luz a través del sistema formado. Es así que entonces ese segundo lente puede servir para comprobar si la luz anterior estaba polarizada o no, simplemente haciéndolo girar 90 grados. Por eso los lentes que se ubican en tal posición sirven perfectamente como "analizadores", denominándoseles así en la literatura técnica.

El microscopio puede usarse para la observación, tanto sin analizador, como con luz polarizada entre nicoles cruzados (a los polarizadores se les conoce también como prismas de Nicol o nicoles). Se dice que los nicoles están cruzados cuando las direcciones de vibración de ambos se encuentran ubicadas en posición perpendicular, que es la manera en que se realizan la mayor parte de las observaciones en el microscopio de luz polarizada.

Al usar el microscopio sin el analizador, cuando la luz pasa a través de la sección delgada, esta se encuentra plano polarizada y en ese estado llega al ojo proporcionando una imagen brillante que frecuentemente brinda el color del mineral.

Cuando la luz atraviesa un cristal de comportamiento anisótropo se refracta, dividiéndose entonces en dos rayos, que resultan paralelos a los ejes cristalográficos del cristal y orientados en una posición mutuamente perpendiculares. Estos dos rayos son denominados clásicamente "ordinario" y "extraordinario", resultando característico el hecho que el segundo posee mayor velocidad que el primero, por lo que en la literatura técnica a veces se le denominan como lento y rápido respectivamente. Un resultado importante es que cuando dichos rayos emergen de la muestra están

en planos perpendiculares y desfasados. De esta manera, al llegar al el analizador, solamente los componentes de cada uno de los rayos que son paralelos a las direcciones del plano de vibración pueden atravesarlo, por lo que la luz emergente estará formada por dos rayos que vibran en el mismo plano, pero desfasados. Dichos rayos interfieren entre sí, proporcionando los llamados "colores de interferencia", que serán descritos más adelante.

Principales operaciones o determinaciones que pueden realizarse durante la observación de las muestras con el microscopio de luz polarizada:

a) Estudio del material sin el analizador

- Forma de los granos. Medición del tamaño de las partículas.
- Clivaje
- Índice de refracción
- Pleocroísmo
- Color propio

b) Estudio bajo nicoles cruzados y luz paralela (otoscopia)

- Discriminación de fases isótropas-anisótropas
- Determinación de la doble refracción
- Medición del ángulo de extinción
- Observación de características particulares en algunos granos (zonado, presencia de maclas, estructuras típicas, etc.)

c) Estudio con nicoles cruzados y dispositivo de luz convergente (conoscopia).

- Selección de los granos adecuados para el estudio
- Observación de las figuras de interferencia. Distinguir fases uniáxicas y biáxicas.

d) Determinación del sistema de cristalización de las fases a partir de su comportamiento óptico.

e) Identificación de las fases.

Campo de aplicación del microscopio óptico de luz polarizada:

"La Petrografía del Hormigón"

- Evaluación de la fisuración
- La observación de la estructura, proporción de áridos, pasta, mortero, etc.
- La preparación de las muestras de hormigón y mortero. Cuidados especiales.
- Configuración del sistema de poros
- Estimación de la relación a/c
- Ordenamiento de las partículas que conforman la estructura (ventaja sobre los R-X)
- Profundidad de penetración de determinadas sustancias

- Diagnóstico de la reacción álcali-agregado
- Identificación de la composición mineral de los áridos
- Determinación de la profundidad de carbonatación de un hormigón
- Identificación de fases en el clínquer de cemento Pórtland.
- Otras…….

Pero,

P.C. ¿Qué limitantes aprecia usted en la técnica del MLP?

Complete la siguiente tabla: Enumere las ventajas e inconvenientes de la técnica de microscopia óptica de luz polarizada en el estudio de materiales de construcción (use cuantos renglones necesite).

VENTAJAS	INCONVENIENTES
1.	**1.**
2.	**2.**
3.	**3.**
4.	**4.**

1.4.3. Análisis térmico

Se trata de un conjunto de técnicas analíticas donde se analiza el comportamiento de una sustancia objeto de estudio durante el calentamiento, enfriamiento (o un programa complejo de calentamiento-enfriamiento con determinada velocidad). El programa pudiera consistir en un calentamiento progresivo a cierta velocidad, enfriamiento bajo determinado régimen, o simplemente manteniendo la temperatura constante. Al calentarse o enfriarse un material, su composición o estructura pueden sufrir modificaciones, unas más notables que otras. Entre ellas, dilatación, contracción, pérdida de masa, formación de un gas, fusión, etc. Estos cambios se pueden medir, relacionándolos con la temperatura o el tiempo, obteniéndose así valiosa información.

O sea, que estos métodos se basan en ir detectando o midiendo los cambios físicos y/o químicos que van ocurriendo en una sustancia sometida a variación de la temperatura en el tiempo.

Cada una de las distintas técnicas de análisis térmico existente, se basa en la medición de determinadas propiedades o parámetros, por ejemplo: en la termogravimetría (TG), se mide la variación del peso, en la dilatometría se mide la variación de las dimensiones, etc.

Campo de aplicación en el estudio de materiales de construcción

Los métodos de análisis térmico son de gran aplicación en múltiples campos de la ciencia y la tecnología, para el control de calidad de procesos de producción de ciertos materiales como polímeros, metales, aglomerantes, etc., así como para detectar la presencia de ciertos compuestos químicos en la muestra que se analiza y otros propósitos muy diversos. La aplicación de estas técnicas en el estudio de la composición de los minerales arcillosos ha sido de gran valor para el entendimiento de determinados procesos que ocurren en los suelos donde se encuentran, así como en el

enriquecimiento de su clasificación. Otro campo de aplicación importante está en el estudio de las distintas modificaciones cristalinas del yeso, que se forman a distintas temperaturas durante el proceso de cocción en los hornos. Actualmente se emplean técnicas gravimétricas de diferente tipo para el estudio de los procesos de hidratación de pastas a base de cemento Portland y otros aglomerantes, en la evaluación de la influencia de aditivos o adiciones en el comportamiento de los materiales donde se utilizan etc.

Técnicas de análisis térmico

Termogravimetría (TG)

Esta técnica se basa en la medición de la variación de la masa de la muestra objeto de estudio en función del tiempo, a una temperatura determinada (i.g. modo isotérmico), o sobre un intervalo de temperatura, empleando una relación de calentamiento predeterminado. Esencialmente un aparato de TG consiste en una micro-balanza rodeada por un horno. Se van midiendo las ganancias o pérdidas de masa, mientras un dispositivo de interface permite llevar los datos a una computadora donde son registrados y graficados.

A partir del termograma (curva de masa vs temperatura o tiempo), se puede obtener información sobre la cinética de las reacciones ocurridas, estabilidad térmica del material analizado, inferir aspectos sobre la composición de algunos constituyentes, etc.

En la técnica termogravimétrica (TG), la medición de la masa de la muestra objeto de estudio, en una atmósfera específica, se va midiendo automáticamente en función del tiempo. Esta es una de las razones por la que dicha técnica es tan útil para la caracterización de procesos donde como consecuencia de distintas reacciones químicas en el material se encuentre involucrada la formación de un gas, por ejemplo, reacciones de oxidación o deshidratación.

Una gran ventaja de los métodos termogravimétricos, con respecto a otras técnicas, es que la muestra que se requiere para el análisis es muy pequeña, solamente unos miligramos, lo cual la hace muy estimada para la realización de estudios donde la toma de muestras provoque serias afectaciones a los elementos o artículos que son objeto de estudio, como ocurre con frecuencia en los trabajos de restauración de obras con valor patrimonial, etc.

En cuanto al intervalo de temperaturas en que se realiza el análisis, el mismo depende de varios factores, entre los que se cuentan el objetivo particular del estudio, las características del material que se investiga, el modelo de equipo de que se dispone, etc.

Todo equipo consta normalmente de un horno, un dispositivo electrónico que garantiza una velocidad de calentamiento uniforme, y posee un registrador donde se mide la propiedad a evaluar.

Análisis térmico diferencial. ATD (DTA)

Según Ramachandan, la técnica de análisis térmico diferencial es un método donde se monitorea la diferencia de temperatura que existe entre la muestra y un material de referencia en función del tiempo y/o de la temperatura, asumiendo que tanto la muestra como la referencia están sujetas al mismo ambiente, a una velocidad de calentamiento o enfriamiento seleccionada. Los resultados del procesamiento se van registrando en forma de una curva de temperatura o tiempo vs transiciones endotérmicas, denominada curva de ATD o DTA (Differental Thermal Analysis).

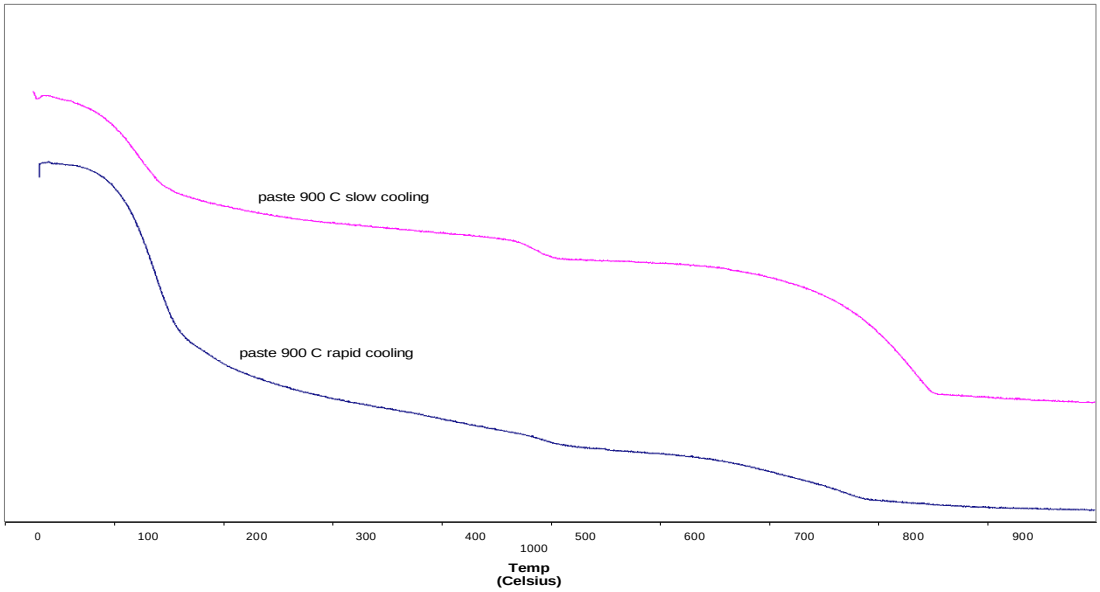


Figura 14. Diagramas TG/DTA de pastas de cemento a 28 días de edad.

Calorimetría de escaneo diferencial. CED (DSC)

Es una técnica muy parecida a la anterior, pero en este caso se registra la energía (en forma de calor) requerida para mantener en cero la diferencia de temperatura entre la muestra y el material de referencia, como una función de la temperatura (o del tiempo), a una razón de calentamiento o enfriamiento determinada, también asumiendo que la muestra y el material de referencia se encuentran en el mismo ambiente. El gráfico que se registra recibe el nombre de curva DSC (de sus siglas en inglés Differential Scanning Calorimetry) y muestra la cantidad de calor aplicada en función del tiempo o la temperatura.

Del análisis de las curvas obtenidas se pueden obtener múltiples informaciones, por ejemplo la temperatura a la que ocurre un determinado proceso, la energía involucrada en una transformación, la cinética de ocurrencia, etc.

Mediante ambas técnicas se pueden obtener datos sobre la entalpía, entropía, energía libre de Gibb y calor específico, así como datos cinéticos de los procesos que ocurren durante el ensayo. (Ramachandran)

Aplicaciones

Se trata de técnicas analíticas muy versátiles, aplicables a un gran número de campos tales como, por ejemplo, ciencia y tecnología de polímeros, ciencia y tecnología de los materiales carbonosos, ciencia de materiales, catálisis, industria farmacéutica, industria metalúrgica, Petrología, etc... A continuación se presenta una relación de las aplicaciones más importantes de las técnicas de Análisis Térmico.

Aplicaciones de la Termogravimetría:

- Estudios de descomposición y estabilidad térmica.
- Estudios composicionales.

- Determinación de purezas.
- Determinación de contenido en humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo.
- Estudios de gasificación de muestras carbonosas.
- Estudios cinéticos.

Aplicaciones de la Calorimetría Diferencial de Barrido:

- Estudio de transiciones de primer orden: fusión, solidificación, cristalización, etc...
- Estudio de polimorfismos.
- Identificación de polímeros.
- Estudios de polímeros: curado, transiciones vítreas, fusión, grado de cristalinidad.
- Estudios de oxidaciones.
- Determinación de purezas.
- Determinaciones de Cp.
- Estudios cinéticos.

Requisitos y limitaciones

Las muestras deben enviarse al laboratorio en recipientes cerrados e identificados, debiéndose utilizar envases de plástico, a no ser que la naturaleza de las muestras requiera otro tipo de material.

Se deberá suministrar cualquier dato acerca de la estabilidad térmica de las muestras; así como cualquier precaución a tener en cuenta en la manipulación de las mismas, en particular su toxicidad.

Otras técnicas de análisis térmico son: termogravimetría de alta resolución (HRTG), análisis termomecánico (TMA), análisis mecánico dinámico (DMA), análisis dieléctrico (DEA), etc.

1.4.4. Rayos X

Como los R-X son ondas electromagnéticas de la misma naturaleza de la luz, ellos pueden ser difractados de manera similar. La ecuación para la difracción **n=2 d sen** (Ley de Bragg) también puede ser aplicada entonces a los R-X. En este caso sin embargo, la longitud de onda es mucho menor, en el orden de 1000 veces o más, por tanto para obtener valores razonables de, la abertura d debe ser también menor en el mismo orden. No resulta práctico hacer tales aberturas para propósitos analíticos, pero afortunadamente ocurre que la distancia entre los planos adyacentes formados por los átomos en la red cristalina de los materiales, es justamente del orden de magnitud requerida para que ocurra la difracción, aprovechándose en la técnica denominada difracción de R-X.

De manera general, para propósitos analíticos, la radiación X puede ser utilizada en varias formas diferentes: (1) **La absorción de rayos X** brinda información sobre el material absorbente, tal como en otras regiones espectrales. (2) **La difracción de rayos X** permite el análisis de materiales cristalinos con un alto grado de especificidad y precisión. (3) La medida del poder radiante de una longitud de onda

dada puede ser un indicador cuantitativo de la composición de la muestra (análisis de emisión de RX, **fluorescencia de RX**).

En resumen:

a) **Espectroscopía de R- X (= ?)**

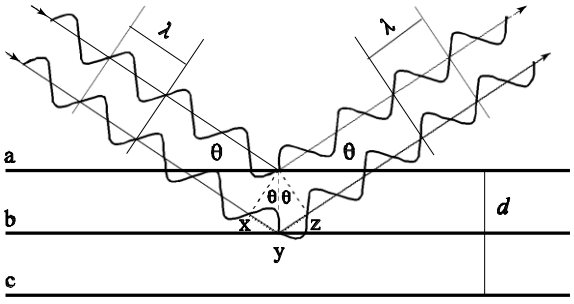
Al aplicarse la energía (R-X, R, etc.), ocurren saltos en los electrones de las últimas capas, entonces midiendo la longitud de onda de la emisión, se determina la composición (la muestra puede ser en estado sólido, líquido o incluso en polvo).

b) **Difracción de R-X (d = ?)**

Los R-X tienen una longitud de onda ( ) mucho menor que la de la luz ordinaria (luz = 4000 –7000Å), mientras que la longitud de onda de los RX es de (R-X=0,x – 1,0Å).

Nota: 1 Å= 1m x 10-10 = 0,1 nm 1 nm = 10 Å

Los cristales se caracterizan por su simetría, y en función de ella se pueden clasificar en distintos sistemas cristalinos, donde las partículas elementales están ordenadas rigurosamente. De esta manera en una sustancia cristalina (como la mayoría de los materiales) podemos encontrar familias de planos que se repiten en su red de átomos o iones, los cuales tienen una separación "d" determinada. Esas separaciones pueden servir como rejilla de difracción cuando inciden los Rayos X, obteniéndose como resultado un patrón que es característico para cada fase en particular, por lo que el método constituye una forma muy precisa para la determinación o identificación de fases cristalinas.



n=2 d sen (Ley de Bragg)

Figura 15. Difracción de los R-X en la estructura cristalina

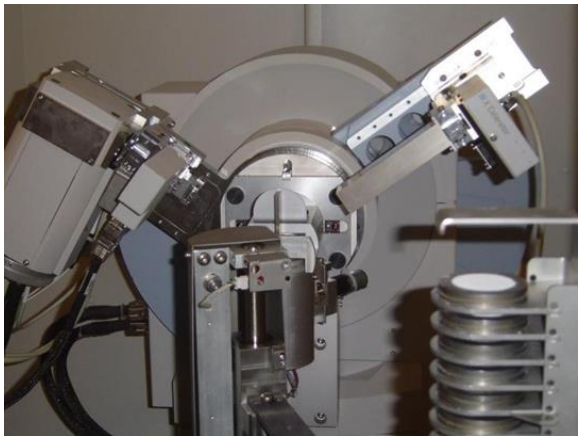


Figura 16. Vista interior de un equipo de difracción de R_X.

Como una idea muy preliminar, el costo aproximado de un equipo de Rayos X. (40-60 mil $). Sin embargo, para el trabajo práctico se acude a la solicitud de servicios de instituciones y personal especializado, por lo que el costo de los ensayos puede no resultar tan elevado.

Los resultados de la difracción de RX se pueden obtener en forma de una gráfica denominada "difractograma", en caso de usar un detector-registrador. La muestra a utilizar puede ser en forma de polvo, lo cual constituye una gran ventaja del método con respecto a otras técnicas empleadas para la determinación de fases. También se destaca como un aspecto muy favorable, el hecho de que la cantidad de material que se requiere para la muestra a investigar es muy pequeña. Todo esto unido a que constituye un método muy potente para la identificación de fases, caracterizar la estructura interna de materiales, etc., lo convierten en un ensayo muy apreciado dentro de las técnicas analíticas.

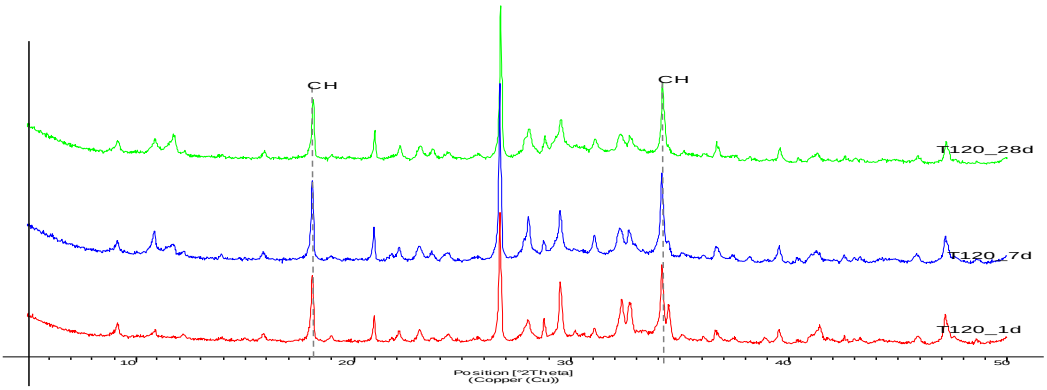


Figura 17. Difractogramas de R-X obtenidas sobre pastas de cemento.

Fuente: Artículo de R. Castillo Lara, CIDEM.

Indudablemente que la técnica de difracción de Rayos X es la más potente para la determinación de fases.

P.I. ¿Qué ventajas e inconvenientes encuentra usted en la técnica de DRX?

1.4.5. Microscopía electrónica

La potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. El microscopio electrónico utiliza electrones para iluminar un objeto. Dado que los electrones tienen una longitud de onda mucho menor que la luz, pueden mostrar estructuras más pequeñas. La longitud de onda más corta de la luz visible es de alrededor de 4 000 ángstroms (1 ángstrom equivale a 0,0000000001 m). La longitud de onda de los electrones que se utilizan en los microscopios electrónicos es de alrededor de 0,5 ángstrom.

Mientras que con el microscopio óptico ordinario las estructuras más pequeñas que pueden observarse tienen unos 0,2 µm, con el microscopio electrónico pueden verse fácilmente objetos de

0,001 µm. Con el microscopio electrónico es posible ver muchas sustancias incluso de tamaño molecular. Sin embargo, a causa de la naturaleza de este instrumento sólo pueden examinarse objetos muy delgados: si se está interesado en ver estructuras internas, incluso una sola bacteria es demasiado gruesa para ser observada directamente.

Todos los microscopios electrónicos cuentan con varios elementos básicos. Disponen de un cañón de electrones que emite los electrones que chocan contra el espécimen estudiado, creando una imagen aumentada. Se utilizan lentes magnéticas para crear campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que las lentes convencionales utilizadas en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones. El sistema de vacío es una parte relevante del ME. Los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, de forma que tiene que hacerse un vacío casi total en el interior de un

microscopio de estas características. Por último, todo ME tiene un sistema que registra o muestra la imagen que producen los electrones.

El microscopio electrónico es un equipo que funciona de modo muy parecido a un tubo de rayos X. Entre los cátodos se provoca una gran diferencia de potencial - V-, para provocar la emisión de electrones. Los electroimanes que están dispuestos en el instrumento actúan como si fueran “lentes”, es decir que sirven para aumentar la potencia de observación.

En la figura que se muestra a continuación pueden apreciarse de manera esquemática los distintos elementos componentes de un microscopio electrónico:

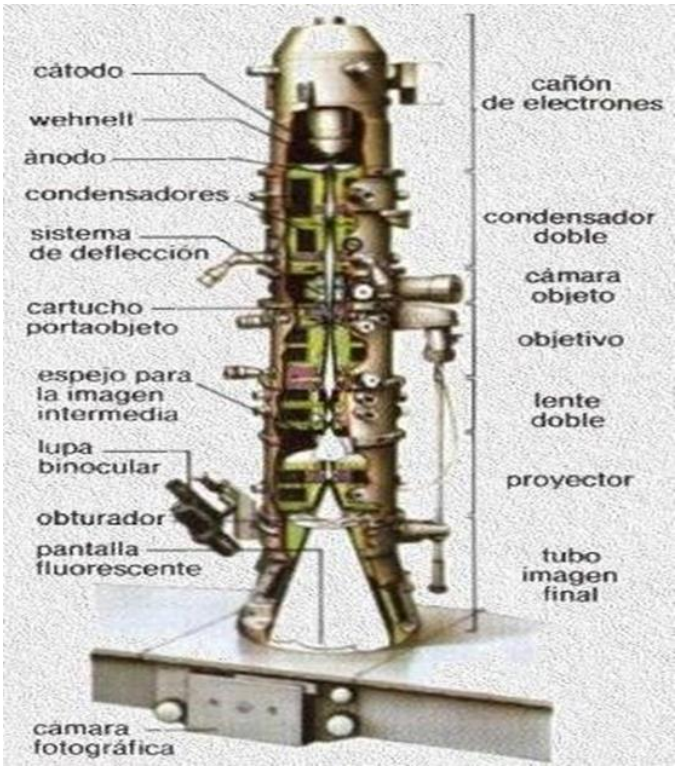


Figura 18. Microscopio electrónico.

De acuerdo con la forma en que se realiza la interacción de los electrones con la muestra que se observa, los microscopios electrónicos se pueden clasificar en dos grupos fundamentales: los de transmisión (MET ó TEM) y los de barrido (MET ó SEM). Los microscopios electrónicos son instrumentos muy costosos, así por ejemplo un MET puede tener un costo entre 280000 hasta más de un millón de dólares, no obstante, también en este caso es factible su empleo como un servicio de centros especializados.

a) Microscopio electrónico de transmisión. (MET/TEM)

En un MET se dirige el haz de electrones hacia la muestra que se desea aumentar, una parte de los electrones rebotan o son absorbidos por el material y otros lo atraviesan formando una imagen aumentada del espécimen. Para su estudio en un MET las muestras deben cortarse en capas muy finas, no mayores de un par de miles de ángstrom. Se coloca una película sensible o una pantalla fluorescente detrás del objeto para registrar la imagen aumentada.

En cuanto a su capacidad, pueden llegar actualmente hasta casi un millón de aumentos (la mayoría cientos de miles). Los equipos modernos tienen la ventaja adicional de que con ellos se puede lograr también la difracción de los electrones, obteniéndose así una información adicional muy valiosa, pues cada sustancia proporciona un patrón de difracción característico y de esa forma se puede realizar su identificación.

La aplicación de la técnica de microscopía electrónica normalmente debe hacerse después de haber empleado la técnica de la difracción de los rayos X. Un gran inconveniente de la técnica de microscopía electrónica es que la preparación de la muestra es muy difícil (principalmente en el MET). Ello se debe a que el poder de penetración de los electrones en el material que se analiza es muy pequeño (solamente de unas cuantas centenas de Å). Además, para la observación y fotografía de la imagen es necesario realizar el sombreado de la muestra con Pt, Au, Cu, etc.

b) Microscopio electrónico de barrido /scanning/ (MEB/SEM)

En este tipo de microscopio lo que se aprecia o se evalúa es la interacción de los electrones con la superficie de la muestra que se analiza, por lo tanto la información que se obtiene es mucho más débil. Sin embargo, esta técnica tiene como ventaja la facilidad de preparación de la muestra. El MEB explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario del MET, que examina una gran parte de la muestra cada vez.

El funcionamiento del MEB se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión. Los electrones del haz pueden dispersarse al alcanzar la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios. Los electrones dispersados y los secundarios son recogidos y contados por un dispositivo electrónico situado a los lados del espécimen. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en un monitor. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. Los MEB pueden ampliar los objetos 100 000 veces o más y producen imágenes tridimensionales, al contrario de los MET o los microscopios ópticos.

El costo de un MEB es de aproximadamente el doble del de un MET. En cuanto al aumento, por ejemplo, un Renma modelo 202M, como el que se tiene aquí en nuestra universidad, llega hasta 2000 - 3000X.

Actualmente se han desarrollado microscopios que son capaces de combinar los elementos de un MEB y un MET (Scanning Transmission Electron Microscope, STEM). Otro microscopio novedoso es el “microanalizador de sonda de electrones”, que cuenta con un analizador de rayos X, puede analizar los rayos X de alta energía que produce el objeto al ser bombardeado con electrones. Dado que la identidad de los diferentes átomos y moléculas de un material se puede conocer utilizando sus emisiones de rayos X, los analizadores de sonda de electrones no sólo proporcionan una imagen ampliada de la muestra, sino que suministra también información sobre la composición química del material.

A continuación, se muestra un ejemplo de la observación con un microscopio electrónico de barrido de unas muestras de yeso, en las cuales se puede apreciar la morfología de las partes componentes del material. Se distinguen perfectamente los cristales integrantes del conjunto, diferenciándose claramente las dimensiones relativas de cada una de las imágenes. Se destaca también la posibilidad de hacer determinaciones de las dimensiones de las diferentes partes del conjunto, así como caracterizar la forma de las partículas cristalinas, su inter-relación en la estructura, la porosidad y relaciones entre las partículas, etc.

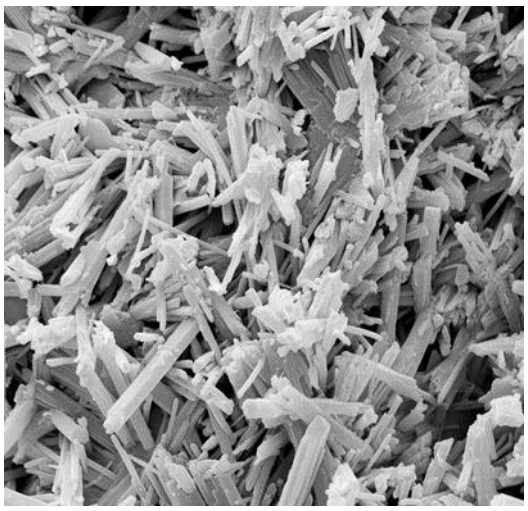


Figura 19. (Yeso sin aditivo).

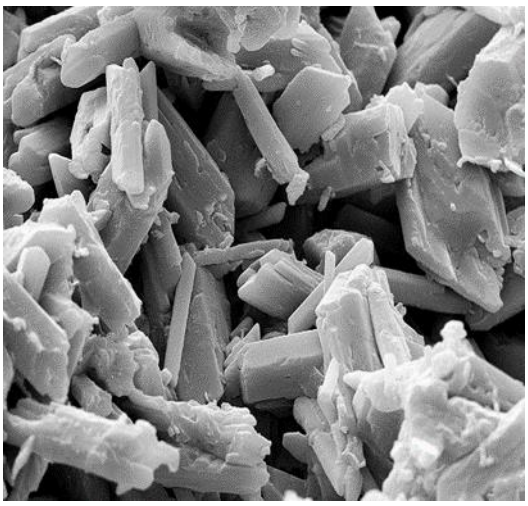


Figura 20. (Yeso con aditivo).

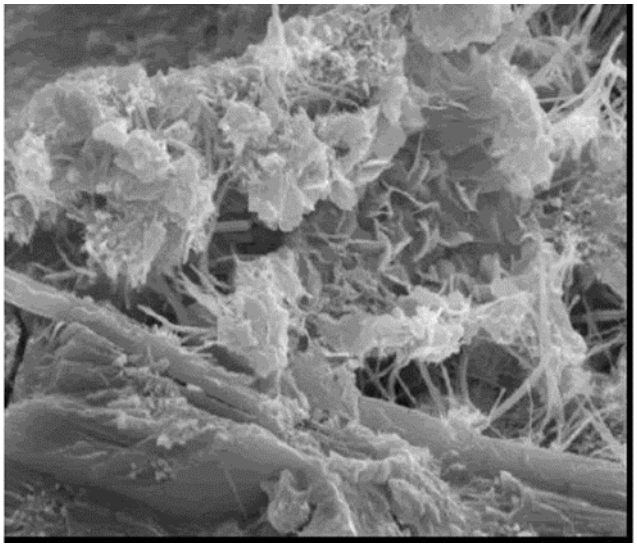


Figura 21. Imagen de una muestra de cemento endurecido donde se aprecian agregados de CSH (hidrosilicatos de calcio) y placas de Portlandita (CH).

Técnica de electrones secundarios.

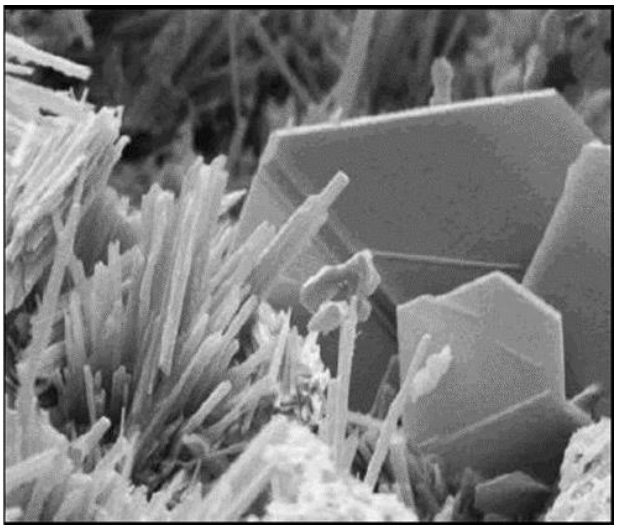


Figura 22. Imagen de una muestra de cemento endurecido donde se aprecian agujas de Tobermorita (hidrosilicatos de calcio) y placas hexagonales de Portlandita (CH). Técnica de electrones secundarios.

1.5. Características organolépticas de los materiales

Ciertamente las características organolépticas de los materiales de construcción no permiten normalmente efectuar una buena caracterización de los mismos, sin embargo, dado el hecho que pueden obtenerse de manera muy rápida y directa, pues resultan extremadamente importantes en muchos casos. Otro aspecto clave es que dichas características permiten en una gran cantidad de casos, la identificación del material, problema que no debemos subestimar en la práctica cotidiana.

Como su nombre lo indica, las características organolépticas son aquellas que pueden ser detectadas o apreciadas por los sentidos, como por ejemplo el color, olor, estado de la superficie al tacto, etc. De esa manera es que podemos identificar, por simple inspección, materiales tan comunes como el vidrio, la madera, los metales, las rocas, etc.

1.6. Propiedades físicas de los materiales de construcción

Entre el conjunto de propiedades físicas que caracterizan a los materiales, las más utilizadas en el campo de la construcción son las relacionadas con las propiedades termo-técnicas y las hidro- físicas. No significa que otras propiedades o parámetros, como las propiedades eléctricas, acústicas, etc. no sean útiles, sino simplemente que su utilización está vinculada a la solución problemas más específicos, fuera del objetivo del presente material.

1.6.1. Propiedades termo-técnicas de los materiales

Conductibilidad térmica

No todos los materiales conducen el calor del mismo modo, así por ejemplo, los metales se caracterizan por conducir muy bien el calor, mientras que la madera lo hace con mucha dificultad. La conductibilidad térmica es la propiedad que caracteriza la mayor o menor facilidad de transmisión de calor por un material. Puede definirse como la cantidad de calor que pasa en una hora a través de una

muestra del material de un metro cuadrado de área y un metro de espesor, cuando la temperatura entre ambas caras planas difiere en 1 oC. La unidad de medida de la conductibilidad térmica en el SI es W/(m. oC).

La conductibilidad térmica de los materiales está condicionada por su composición química, por las características de su estructura porosa, grado de humedad, así como la temperatura del entorno. La humedad del material incrementa mucho la conducción del calor, por lo que en los materiales y productos destinados al aislamiento térmico debe evitarse la humedad y/o protegerse con la aplicación de algún producto hidrófugo.

Como que la conductibilidad térmica del aire es menor que la de los materiales comunes, una vía práctica para lograr materiales y productos de construcción con menor conductibilidad térmica es incrementando la porosidad. Es este sentido es interesante conocer que los poros pequeños y cerrados proporcionan mayor aislamiento térmico que los materiales con poros grandes y comunicados. Como consecuencia de lo anterior, se puede establecer una relación directa entre masa volumétrica del material y su conductibilidad térmica. Por otro lado, también la humedad propicia el incremento de esta propiedad dado que el agua conduce mucho más el calor que el aire.

Tabla 2. Coeficiente de conductibilidad térmica de algunos materiales comunes.

Material	Conductibilidad térmica W/(m. °C)	Material	Conductibilidad térmica W/(m. °C)
Aire	0,02 3	Madera	**0,1-1,4**
Amianto	0,0	Ladrillo cerámico	**0,8**
Fibra de vidrio	0,03-0,07	Hormigón hidráulico	**1,6**
Corcho	0,05-0,25	Acero	**47-**
Agua	**0,5**	**Aluminio**	**209,**

La evaluación de la conductibilidad térmica de los materiales es extremadamente importante cuando se pretende construir elementos aislantes del calor, sea en edificaciones corrientes o en frigoríficos y otras.

Capacidad calorífica

La capacidad calorífica es la propiedad que caracteriza la capacidad de un cuerpo de almacenar calor. Esta magnitud extensiva depende del calor específico del material, de la masa del cuerpo y de la diferencia de temperatura. El calor específico (o capacidad calorífica específica), se define como la cantidad de calor que es necesario suministrar a 1 kg del material dado, para que incremente su temperatura en 1 oC. Mientras mayor sea el calor específico de un material, significa que mayor será la cantidad de calor necesaria para incrementar la temperatura de una masa de 1 kg del mismo en 1 oC y viceversa.

El conocimiento o evaluación de esta propiedad es importante, por ejemplo, para prevenir los efectos de las variaciones de temperatura entre el interior y el exterior de un elemento o edificación. En el SI se suele expresar en kJ/ (kg. oC).

Coeficiente de dilatación

Es una propiedad que caracteriza el grado en que un material cambia sus dimensiones (longitud o volumen) cuando sufre cambios de temperatura. Como es sabido, la mayoría de los cuerpos experimentan dilatación cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. El parámetro más usado en la práctica de la construcción es el coeficiente de dilatación lineal y su unidad en el SI es oC-1 (mm/mºC).

El correcto análisis de los coeficientes de dilatación térmica de los materiales usados en los elementos de una edificación permite la adopción de medidas preventivas relacionadas con los problemas provocados por dilataciones y contracciones que experimentan dichos elementos, que de otro modo pudieran causar deformaciones o agrietamientos indeseados. Generalmente el diseño adecuado de juntas de dilatación es una medida preventiva muy efectiva en las edificaciones de cierta envergadura. Especial cuidado debe guardarse en las tuberías, raíles de ferrocarril y otros elementos metálicos de mucha longitud. Otra consideración importante debe efectuarse cuando se diseñan materiales compuestos, pues cabe esperarse un comportamiento inadecuado del conjunto cuando se utilizan materias primas de coeficiente de dilatación muy diferentes. Significativos son los danos registrados en bombas, válvulas y accesorios por no prever de antemano estos importantes esfuerzos. En la Tabla No.3. Se muestran ejemplos de coeficientes de dilatación de algunos materiales comunes.

Tabla 3. Coeficiente de dilatación térmica de algunos materiales comunes.

Material	Coeficiente dilatación térmica $^{o}C^{-}$
Cuarzo	**$O,04x10^{-5}$**
Vidrio	**$0,7x10^{-}$**
Hormigón hidráulico	**1x10**
Acero	**$12x10^{-}$**
Aluminio	**$2,4x10^{-}$**

Resistencia a las altas temperaturas (poder refractario)

Se entiende por refractario a la capacidad de un material de soportar altas temperaturas durante un tiempo prolongado sin que se reblandezca o se produzcan deterioros en su masa. La forma más utilizada de los productos refractarios es el ladrillo, que es utilizado como material de revestimiento de los hornos industriales de diverso tipo. De acuerdo con su composición y comportamiento químico los refractarios se clasifican en tres grupos fundamentales: ácidos, neutros y básicos. Su campo de aplicación está marcadamente influenciado por su costo, pues generalmente son materiales muy caros. Los materiales cerámicos en general tienen muy buenas propiedades refractarias, siendo ampliamente utilizados en combinación con morteros y aglomerantes refractarios.

Resistencia al fuego

Esta propiedad caracteriza el comportamiento ante el fuego de los materiales de construcción, y su importancia está asociada fundamentalmente a la posibilidad real de la ocurrencia de incendios en las edificaciones, permitiendo también la correcta selección de los materiales y productos a utilizar en los distintos ambientes o lugares de la edificación. De acuerdo con la resistencia al fuego los materiales se clasifican en tres categorías: incombustibles, de difícil combustión y combustibles. (Referir a la NC)

Termofluencia

La termofluencia es un fenómeno que se puede producir cuando un material está sometido a altas temperaturas por un período de tiempo relativamente prolongado. Se manifiesta esencialmente como una deformación plática que ocurre a esfuerzos menores que los esfuerzos de fluencia del material. Como consecuencia, la capacidad de carga de los elementos donde ocurre este fenómeno, como consecuencia por ejemplo de incendios prolongados ó partes que se encuentren directamente sobre llamas de quemadores, etc., sufren una disminución apreciable de su capacidad de carga.

1.6.2. Propiedades hidro-físicas de los materiales

El conocimiento de las propiedades hidro-físicas de los materiales de construcción tiene una gran importancia práctica, pues la acción de la humedad sobre dichos materiales puede conducir al deterioro de los mismos por distintas causas, por lo que la investigación y aplicación de técnicas para prevenir o disminuir su efecto deletéreo es clave para garantizar la durabilidad de las obras. Patologías de naturaza física, química, electroquímica y hasta biológicas, pueden estar condicionadas a la presencia de agua en los materiales. Algunos ejemplos de deterioros de naturaleza química pueden ser la acción de los sulfatos sobre el hormigón de cemento Pórtland, el lixiviado de productos solubles, etc. La corrosión del acero de refuerzo en el hormigón armado es un excelente ejemplo de un fenómeno de naturaleza electroquímica que es posible sólo si hay presencia de humedad, etc. Además de lo expuesto, la presencia de humedad en los elementos constructivos altera su capacidad de aislamiento térmico, sirve como medio de transporte de sustancias agresivas, forma costras de precipitación en forma de eflorescencias, propicia la proliferación de hongos y bacterias, etc. Entre las principales propiedades hidro-físicas se encuentran la absorción de agua, la higroscopicidad, la ascensión capilar y la permeabilidad.

Absorción de agua

La absorción de agua de un material es simplemente la cantidad de de este líquido que es capaz de absorber el mismo cuando se sumerge en agua durante un período de tiempo (generalmente 24 horas). La absorción de agua se produce como consecuencia de varios fenómenos, que en conjunto hacen que los poros comunicados del material se llenen de agua. Por eso es que resulta tan importe su evaluación, sobre todo en materiales que serán sometidos a ambientes agresivos. Esta propiedad puede utilizarse para caracterizar la posible durabilidad del material, pues debe tenerse en cuenta que no solamente se trata de la potencial acción agresiva del agua, sino de los posibles iones o compuestos que es capaz de transportar la misma hacia el interior del material.

En la práctica la absorción de agua puede expresarse en función del volumen o de la masa, debiéndose seguir en cada caso la norma de ensayo correspondiente. No obstante, lo más frecuente es expresarla como el por ciento de agua absorbida con respecto al peso seco del material. O sea,

% Absorción de agua = (Wsat – Wseco) = % Wseco

Donde:

- Wsat…… Peso del material en estado saturado
- Wseco…. Peso del material en estado seco

La absorción de agua puede dar una idea de la porosidad abierta del material, pero su valor es siempre menor, pues no todos los poros logran llenarse de agua y porque el agua contenida en los poros grandes comunicados con el exterior se pierde al extraer la muestra del recipiente de inmersión.

Capilaridad

La capilaridad es una forma particular de penetración y ascensión del agua (y los compuestos que ella sea capaz de transportar) en los poros del material, cuando una parte del mismo está en contacto con el agua. Esta propiedad se relaciona directamente con la porosidad efectiva o accesible al agua y es inducida por efecto de la tensión superficial de la misma.

La tensión superficial de un líquido ocurre en la frontera de contacto de este con el aire, pues mientras en el interior del líquido las moléculas se encuentran atraídas por sus vecinas circundantes, las fuerzas intermoleculares en la superficie se hacen tangenciales, esa es la causa por la que las gotas de agua tienden a formar esferas. Cuando los líquidos están en contacto con superficies sólidas, se desarrollan entre ellos fuerzas intermoleculares que pueden ser mayores o menores que las que existen entre las moléculas del líquido. En conductos muy delgados la tensión superficial succiona al líquido, incluso en contra del sentido de la fuerza de gravedad, pudiéndose observar entonces cuando el líquido está en contacto con una pared vertical, una superficie de contacto líquido-aire con forma curva, denominada menisco. La forma cóncava o convexa del menisco depende fundamentalmente de la tensión superficial del líquido.

Muchas enfermedades de los materiales en las edificaciones se deben a los efectos de la capilaridad, así por ejemplo, paredes u otros elementos constructivos en contacto con las aguas freáticas pueden padecer de humedades hasta una altura considerable, ocasionando trastornos de diverso tipo, incluso estéticos, que resultan muy difíciles de solucionar.

Los parámetros de mayor importancia relacionados con la capilaridad son la altura de ascensión capilar, la cantidad de agua absorbida y la presión de succión. La altura de ascensión de un líquido en un capilar responde a la siguiente expresión:

$H = 2\sigma \cos \theta / (r\rho g)$

Donde:

- H…. Altura a la que asciende el líquido en el capilar
- σ…. Tensión superficial del líquido
- θ …. Ángulo de contacto líquido-sólido r .... Radio del capilar
- ρ….. Densidad del líquido
- g….. Aceleración de la gravedad

El movimiento de ascensión capilar en los elementos constructivos no responde a la ecuación anterior, pues la forma y dimensiones de los poros es muy variada. Sin embargo, un simple análisis nos permite obtener conclusiones muy importantes, por ejemplo, que la altura de ascensión capilar es mayor mientras disminuye el radio de los conductos. Por eso, en los materiales con poros de grandes dimensiones el agua asciende menos que en los que poseen poros de menor diámetro.

Higroscopicidad

Los materiales de construcción pueden absorber el agua no solo en estado líquido sino también en estado gaseoso. La higroscopicidad es la capacidad de un material poroso de intercambiar vapor de agua con el ambiente donde se encuentra, en función de la higrometría del aire (de la humedad relativa y temperatura), así como de la estructura porosa del material (dimensiones, distribución y grado de comunicación) y de la composición química del mismo. El fenómeno es de naturaleza físico-química y se desarrolla a expensas de la adsorción molecular del vapor de agua en los poros, en combinación con la condensación capilar. Algunos materiales se caracterizan por retener o atraer el agua,

denominándoseles propiamente hidrofílicos, mientras que otros, por el contrario experimentan cierta repulsión al agua, y son los llamados hidrófobos.

Cuando la temperatura desciende, el vapor de agua que satura al aire en los poros del material, se condensa y queda depositado en forma de líquido en la superficie interior de dichos poros. Cuando los capilares son muy finos, el vapor se condensa incluso antes de alcanzar la presión de vapor de saturación, lo cual se conoce como condensación capilar. Los materiales de construcción porosos, aun después de mantenerlos un largo período de tiempo de secado al aire, conservan cierto valor de humedad, tanto por adsorción como por condensación capilar, la cual se denomina humedad de equilibrio. Esta humedad de equilibrio es variable en función de la estructura porosa del material y de su composición, incrementándose con la presencia de sales higroscópicas.

Bajo las mismas condiciones ambientales, para una misma porosidad total, la higroscopicidad de de un material es mayor cuando se incrementa la superficie específica interna (poros pequeños y conductos capilares). Bien conocidas son las propiedades higroscópicas de materiales como la madera, que en ambiente húmedo absorben fuertemente la humedad, mientras que en ambiente seco la ceden hasta lograr una humedad de equilibrio, entre un 10-15% en función del tipo de madera.

Luego de analizar los distintos mecanismos de absorción de agua, puede exponerse que la absorción capilar de la humedad constituye uno de los problemas más importantes que causan deterioros en los materiales. En estos casos, el tratamiento con materiales hidrófugos puede ser una solución efectiva tanto técnica como económicamente para proteger al material contra la humedad.

Coeficiente de reblandecimiento

El agua absorbida por los materiales afecta sus propiedades, desde luego, que a unos más que a otros de acuerdo con su naturaleza. Así por ejemplo, los materiales arcillosos, la madera, etc., se ven seriamente afectados con la humedad, mientras que en los plásticos, el vidrio, metales, etc. las afectaciones son imperceptibles. En los materiales pétreos ordinarios, como el hormigón, las rocas naturales y otros, la resistencia se ve afectada en presencia de agua, esto es, se reblandece. El coeficiente de reblandecimiento caracteriza así el comportamiento del material saturado en agua, con relación a cuando está seco. O sea, es la relación del valor de resistencia a la compresión en estado saturado con respecto a la misma en estado seco. Así puede expresarse según la siguiente expresión:

Kr = R´saturado / R´seco

En la práctica de la construcción no resulta conveniente utilizar materiales con coeficiente de reblandecimiento inferior al 0,85 cuando los mismos van a ubicarse en elementos que estarán en contacto con el agua.

Variaciones de volumen por variaciones de temperatura y humedad

Muchos materiales sufren cambios de volumen al variar la humedad, muy acentuado es este fenómeno en los materiales arcillosos, en la madera, etc., menor pero de tomar en consideración, en los materiales pétreos naturales, los hormigones, productos cerámicos etc., y nulo en otros como los plásticos, metales, vidrio, etc. El efecto más nocivo se manifiesta cuando existen considerables ciclos de humedecimiento y secado, lo que presupone hinchamientos y contracciones continuadas que pueden provocar fisuras, grietas u otros daños en los materiales, que disminuyen apreciablemente la durabilidad de los elementos constructivos. Teniendo en cuenta lo anterior, muchos ensayos para evaluar el comportamiento durable de los materiales se basan precisamente en someter a especimenes a ciclos alternos de humedecimiento y secado, siguiendo las normas establecidas en cada caso.

Permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad que caracteriza el paso de fluidos a través de los vacíos de un material bajo una determinada presión, es decir, un material es permeable cuando permite su paso, e impermeable cuando no lo permite. Desde luego, que en la práctica lo más frecuente es encontrar materiales que tienen distinto grado de permeabilidad (o impermeabilidad). En la construcción, siempre que no se especifique lo contrario, la permeabilidad de un material se refiere particularmente al agua. De manera cuantitativa la permeabilidad de un material se puede expresar por medio del coeficiente de permeabilidad, cuya expresión propuesta por Darcy es la siguiente:

Q = Kp. i. A

Donde:

- Kp…. Coeficiente de permeabilidad (cm/h)
- Q….. Gasto que drena a través de la muestra(cm3/h)
- I……. Gradiente hidráulico (m/m)
- A…… Área de la sección transversal de la muestra (cm2)

El gradiente hidráulico del flujo (i), puede expresarse como:

$$i = \frac{(h1-h2)}{L}$$

Como que el gasto es:

$$Q = A . V$$

Sustituyendo en la expresión de Darcy:

$$V = Kp . i$$

Puede apreciarse entonces que la velocidad del flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico; esto indica que, dentro del campo de aplicabilidad de la ley de Darcy, el flujo en el material es laminar. Puede señalarse entonces que el coeficiente de permeabilidad es una constante física de proporcionalidad que tiene unidades de la velocidad, de esa manera, mientras mayor sea este, significa que mayor será la cantidad de líquido que pasará por el material en la unidad de tiempo, o sea que tendrá mayor permeabilidad.

En la práctica se suele utilizar para la caracterización del comportamiento de los materiales al paso de los fluidos (particularmente el agua), el grado de impermeabilidad, entendido como tal al valor de presión hidrostática que actuando sobre una de las caras de la muestra no permite el paso del agua a su través. Los valores para cada grado, así como las características del ensayo y de su técnica operatoria, quedan establecidas en las normas correspondientes de cada país.

La permeabilidad constituye un parámetro técnico decisivo en el diseño y construcción de algunas obras, como los tanques para el almacenamiento de líquidos, piscinas, cubiertas, etc. Las formas de

controlar la permeabilidad son diversas y se basan en tratar de utilizar materiales lo más compactos posible, con porosidad cerrada, aplicándose impregnaciones de materiales hidrófugos, membranas impermeables, pinturas especiales, etc.

1.7. Propiedades mecánicas de los materiales de construcción

-Resistencia a la compresión

-Resistencia a la tracción

-Resistencia a la flexión

-Resistencia al cortante

-Módulo de elasticidad

-Resistencia al desgaste

-Resistencia al impacto-tenacidad-fragilidad

-Dureza

La dureza de los materiales caracteriza el grado de oposición que experimentan los mismos a la acción mecánica de penetración de un cuerpo más duro en ellos. Se han desarrollado diferentes métodos para la determinación de la dureza de los materiales, cada uno con su campo de aplicación bastante bien definido, por lo que en cada caso es conveniente conocer cuál de los métodos es el más apropiado para darle solución al problema planteado. Entre los métodos más utilizados para la medición de la dureza se encuentran: Mohs, Brinell, Rockwell, Knoop, Rosiwal y otros.

Escala de Mohs. Ideada por el mineralogista alemán Friedrich Mohs, es una escala de dureza relativa que se usó inicialmente para la determinación de la dureza de los minerales, como un parámetro para su identificación preliminar o de campo, aunque luego se extendió su uso a otros materiales. Se basa en el principio de que los materiales más duros son capaces de rayar a los más blandos y no a la inversa. Mohs seleccionó diez minerales como patrones de dureza, formando una escala que se conoce como escala de Mohs. Los minerales que componen la escala de Mohs se muestran en la Tabla No. 4

Tabla 4. Minerales que integran la escala de Mohs.

Dureza	Mineral	Composición	Criterio práctico de comparación
1	Talco	$Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$	**Se puede raspar fácilmente con la uña**
2	Yeso	$CaSO_4.2H_2O$	**Puede rayarse con la uña**
3	Calcita	$CaCO_3$	**No se raya con la uña, pero sí con un alambre de cobre**
4	Fluorita	CaF_2	**Se puede rayar con un clavo**
5	Apatito	$Ca_5(PO_4)_3F$, Cl	**Puede rayarse con un cuchillo de cocina**
6	Ortosa	$KAlSi_3O_8$	**Se raya con dificultad con una lima de acero**
7	**Cuarzo**	**SiO_2**	**No se raya con el acero y es capaz de rayar al vidrio**

8	**Topacio**	**$Al_2OSiO_4(F,OH)_2$**	***Raya con facilidad a todos los anteriores***
9	Corindón	Al_2O_3	*Idem*
1	**Diamante**	**C**	***Idem***

El método de trabajo para la determinación de la dureza mediante esta escala no presupone disponer de los diez minerales tomados como patrón, sino que en la práctica se utilizan objetos comunes, con los que se raya al material investigado. De lograrse el rayado, significa que el material es más blando que el objeto, continuándose la prueba hasta encontrar el valor de la escala. Como ya se expuso, la dureza Mohs es de carácter relativo, o sea que el hecho que la fluorita tenga dureza 4 y el yeso dureza 2, no significa que la dureza sea el doble, sino simplemente que es más duro. Esto le resta algo de valor al método, pero sin embargo el mismo se utiliza profusamente dada su gran sencillez y aplicación práctica.

Una escala de dureza absoluta es la de Rosiwal, donde se expresa la dureza como la resistencia a la abrasión, medidas en ensayos de laboratorio, tomando como referencia al mineral corindón (dureza 9 en la escala de Mohs), al que se asigna un valor de 1000. Valores comparativos de dureza según distintas escalas pueden apreciarse, como ejemplos, en la Tabla No. 5.

Tabla 5. Valores comparativos de dureza de algunos minerales según distintas escalas.

Escala de Dureza	Yeso	Calcita	Cuarzo	Diamante
Mohs	2	3	7	**1**
Rosiwal	1,25	4,5	120	**140000**
Knoop	**32**	**135**	**820**	**7000**

En el trabajo con los metales se requiere frecuentemente la determinación, con cierta precisión, de la dureza, por eso se acude al empleo de aparatos denominados durómetros, los cuales difieren entre sí principalmente en el tipo de punta usada y en la magnitud de las cargas aplicadas. Se utilizan mucho en el estudio de distintos tipos de acero, pues la dureza medida sirve para correlacionarla con la resistencia a la tracción, propiedad mucho más difícil de determinar.

Figura 23. Durómetro.

Dureza Brinell. El método Brinell se basa en medir la penetración (indentación) de una bola de acero especial cuando se presiona sobre la superficie de la muestra con una fuerza determinada. La dureza se calcula entonces en función de la magnitud de la huella y de la fuerza aplicada. Es un método muy antiguo y se usa principalmente para materiales de dureza media (aluminio, madera, hierro dulce, etc.). Ejemplos de dureza Brinell de algunos materiales comunes son: Madera(1-5HB), Aluminio (15-17 HB), Acero (150-660 HB). Para metales más duros (HB>600) no resulta preciso, por lo que se usa entonces el método Vickers, que emplea como indentador una pirámide de base cuadrada de diamante.

Dureza Rockwell. También es un método que se basa en la penetración de un objeto en el material investigado, en este caso se trata de un cono de diamante. Es una de las escalas de dureza más difundidas y su campo de aplicación tiene un espectro bastante amplio. Para su determinación se aplica una fuerza definida de precarga con dicho cono, con un ángulo de punto de 120º en la superficie del material a evaluar. La profundidad alcanzada por el penetrador sirve como plano de comparación. Luego se presiona el penetrador con la carga principal durante un máximo de seis segundos. Finalmente se elimina la carga principal, manteniendo solamente la precarga. La diferencia de las profundidades anteriores y posteriores a la carga principal es la medida para la dureza Rockwell del material evaluado.

1.8. Otras propiedades

Otras: propiedades químicas, propiedades eléctricas, magnéticas,….radiaciones atómicas, acústicas, ópticas,… etc.

P.C: ¿Cuáles son las principales propiedades físicas que permiten caracterizar a los materiales de construcción desde el punto de vista de su comportamiento térmico?

P.C: Exponga ejemplos prácticos donde resulte imprescindible la utilización del coeficiente de dilatación lineal de los materiales de construcción.

P.C: ¿Cómo puede evaluarse la absorción de agua de un material de construcción? Cite ejemplos donde sea prudente el control de la absorción de agua y de la higroscopicidad.

CAPITULO II. Materiales pétreos naturales

2.1. Generalidades

Los materiales pétreos han constituido y constituyen un importantísimo grupo de materiales en la construcción de cualquier tipo de obra. Sus características generales, entre las que se destacan sus resistencias tanto físico-mecánicas como químicas, los hacen materiales apropiados para diversos elementos constructivos que han de resistir elevadas cargas y efectos agresivos del ambiente.

De acuerdo con su origen los materiales pétreos (o piedras) pueden ser divididos en dos grupos: naturales y artificiales. Entre los pétreos naturales figuran los distintos tipos de rocas, las que constituyen la fuente más importante de suministro de materias primas para la construcción y que ha sido utilizada por el hombre a través de su historia. Los materiales pétreos artificiales se producen la inmensa mayoría expensas de los naturales, por ejemplo, los productos a base de arcilla cocida (ladrillos, tejas, losas, etc.), el vidrio, el hormigón, etc.

Los pétreos naturales se encuentran originalmente en la corteza terrestre formando masas denominadas rocas, las cuales pueden ser mono minerales o poli minerales, aparte de otras sustancias que pueden ser no minerales. Los pétreos naturales tienen un amplio uso en la construcción, empleándose como áridos, balasto para ferrocarriles, enchapes, pisos, muros de mampostería etc. No obstante su estado natural, ellos precisan de una serie de procesos para su elaboración y comercialización como productos, siendo los fundamentales la extracción y la conformación.

Clasificación de los materiales pétreos:

a) Naturales: son aquellos que se obtienen a partir de rocas naturales, tal como aparecen en la naturaleza o sometidas a procesos de conformación, clasificación, etc.

Ejemplos:

- sin procesamiento: arena de río, de mar, gravas, etc.
- con procesamiento: piedra triturada, arena de bloques, planchas o láminas, etc.

b) Artificiales: son aquellas que se obtienen artificialmente con productos diversos en estado pulverulento o pastoso y endurecido con procesos físicos o químicos.

Ejemplos:

- Productos cerámicos, vítreos, escorias, subproductos industriales, etc., hormigón y productos de hormigón.

2.2. Rocas. Tipos de rocas más usadas en la construcción

2.2.1. Rocas y minerales

Las piedras de origen natural se agrupan bajo una categoría geológica muy importante, que son las rocas. Este término muchas veces se emplea incorrectamente e incluso ocasionalmente no se distingue claramente de otro concepto muy relacionado que es el de mineral. Las rocas pueden definirse como unidades estructurales que componen la corteza terrestre, las cuales pueden estar formadas por uno o por varios minerales. Debe destacarse que desde el punto de vista geológico no constituye una limitante el hecho de que un material sea coherente o incoherente, para que sea considerado una roca. Es decir, que la arena de un depósito natural es considerada una roca, igual que un macizo de

duro y compacto granito. Ejemplos de rocas mono-minerales son la caliza, el mármol, la dunita, etc. y ejemplos de rocas poli-minerales son el granito, el basalto, diorita, arenisca, etc.

Es importante comprender que existe una gran diferencia entre los conceptos de roca y mineral, aun cuando la roca pueda estar formada por un solo mineral como en el caso ya citado del mármol. Dicha roca está compuesta por granos cristalinos del mineral calcita muy bien unidos entre sí, de manera tal que se puede apreciar una estructura granular en forma de mosaicos. La calcita que constituye los granos del mármol posee una composición química constante $CaCO3$ (aunque puede presentar impurezas), tiene una dureza también constante con un valor de 3 en la escala de Mohs, estructura cristalina interna bien definida, etc. Sin embargo, no podemos decir lo mismo del mármol, cuya resistencia mecánica es variable y depende del grado de cohesión que tengan sus granos componentes, su composición es también variable (aunque como es lógico, mayoritariamente $CaCO3$), etc.

2.2.2. Principales tipos de rocas

Las rocas se han clasificado tomando como base diferentes factores, sin embargo, la clasificación que más se emplea es la que toma como base su origen. De esta manera, las rocas quedan agrupadas en tres tipos: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas son las que se han formado como consecuencia de la solidificación del magma procedente del interior de la Tierra en cuerpos pétreos con forma y dimensiones muy variables. Este grupo de rocas también se les conoce en la literatura científica como rocas magmáticas (pues son las que provienen del magma) o como rocas primarias, pues se considera que fueron las que primero se originaron al enfriarse el material que formó La Tierra como planeta.

Las rocas sedimentarias son las que se han formado por distintos procesos exógenos, que han sido capaces de proporcionar la materia prima a partir de la cual se han originado, por fenómenos de deposición de sedimentos de distinta naturaleza, dichas rocas. La naturaleza de los sedimentos que forman este variado grupo de rocas puede ser de muy diversa índole, químicos, detríticos, orgánicos, volcánicos y en ocasiones hasta mixto.

Las rocas metamórficas se han formado como consecuencia de modificaciones o alteraciones en la composición mineral y/o en la estructura de rocas ya formadas con anterioridad, por influjo de altas presiones y/o temperaturas que se presentan en los complejos procesos petrogenéticos en las profundidades de la corteza terrestre o en zonas de intensa actividad endógena.

Las rocas ígneas

La manera en que se originan las rocas ígneas nos permite hacernos una idea aproximada de la forma de yacencia de las mismas en la corteza terrestre, y en la práctica, lo inverso es el procedimiento usual, junto con la interpretación de la estructura, para inferir el tipo de roca ígnea según el lugar donde solidificó. Como ya se expuso, las rocas ígneas se originan por la solidificación de un material en estado de fusión parcial, pero dicho proceso puede ocurrir en distintos sitios o niveles de la corteza terrestre, y en función de este aspecto es que las rocas ígneas se subdividen en distintos tipos: intrusivas, hipoabisales y extrusivas.

Estructuras de las rocas ígneas

Las diferencias estructurales entre las rocas ígneas se deben en gran medida a factores condicionados por la velocidad de enfriamiento al solidificar el magma, su composición química, presión, estabilidad de las condiciones durante los procesos de formación, etc. Así, existen rocas con diferente grado de cristalización, tamaño de los granos, etc. que evidencian pertenecer a distintos grupos.

Las rocas intrusivas, al solidificar en masas magmáticas de gran envergadura y en las profundidades, poseen entonces elevada temperatura y una gran cantidad de calor, se enfrían muy lentamente a elevadas presiones, que son condiciones favorables para la cristalización de sus fases componentes en forma de grandes granos minerales. Como resultado se tiene entonces, que las rocas ígneas intrusivas son macrocristalinas de grano más o menos uniforme (holocristalina equigranular), que pueden apreciarse perfectamente a simple vista. Ejemplos típicos de tales tipos de rocas son los granitos, dioritas, gabros, etc.

Por el contrario, las rocas volcánicas solidifican en la superficie o muy cerca de la misma, en flujos de lava u otros cuerpos efusivos que tienen menor masa y por tanto menor cantidad de calor, menor presión (pues están en la superficie), e incluso menor contenido de elementos volátiles (que son mineralizadores). Bajo estas circunstancias la lava solidifica en condiciones poco propicias para el desarrollo de granos cristalinos, que de formarse serán de muy pequeñas dimensiones, dando lugar entonces a rocas de estructura micro o cripto-cristalinas (afaníticas). Es muy frecuente que la solidificación del magma que asciende hasta transformarse en lava ocurra en diferentes estadíos (parte en la profundidad y parte en la superficie). Como que entonces las condiciones de cristalización son muy diferentes, la estructura de las rocas resultantes se caracterizará por presentar una masa de grano fino (pasta afanítica cristalina o vítrea), con cristales mayores (fenocristales). Otra estructura muy característica de las rocas volcánicas es la vítrea, la cual se forma típicamente en lavas muy viscosas, de poco espesor o en su costra superficial.

Minerales petrogenéticos de las rocas ígneas

Los minerales fundamentales de las rocas ígneas son: feldespatos, cuarzo, anfíboles, micas, piroxenos y olivino. Todos los minerales difieren entre sí en cuanto a sus propiedades, por eso la existencia en una roca de uno u otros minerales cambia sus características: resistencia mecánica, estabilidad química, resistencia a la abrasión, etc.

a) Feldespatos. Estos minerales constituyen el principal grupo de los presentes en la corteza terrestre, ocupando más del 60% de su masa. Es decir, que son extremadamente abundantes y están representados por distintas variedades. Químicamente son alumosilicatos de sodio, calcio y potasio. Las variedades calco-sódicas constituyen el importante grupo de las plagioclasas. Los feldespatos postásicos comunes son la ortosa y la microclina.

La alteración superficial de los feldespatos tiene lugar bajo la influencia del agua cargada de ácido carbónico y como resultado de esta alteración se forman minerales del grupo de las arcillas. En comparación con el cuarzo, los feldespatos poseen una resistencia y una estabilidad química menor (120-170 MPa a la compresión), razón por la cual se encuentran menos en las rocas sedimentarias.

b) Cuarzo. Es muy mineral muy abundante también, estando presente en una gran variedad de rocas, tanto ígneas, sedimentarias o metamórficas. Desde el punto de vista químico este mineral es muy estable, ya que el mismo está compuesto por dióxido de silicio (sílice: SiO_2), manteniendo su lustre aun en las rocas meteorizadas. Desde el punto de vista mecánico, el mineral se caracteriza por presentar una elevada dureza (siete en la escala de Mohs), por lo que es capaz de rayar al vidrio y a minerales como la calcita, las plagioclasas y otros feldespatos. Es un material frágil, pero de extraordinaria resistencia (hasta 2000 MPa a la compresión y alrededor de 100 MPa a la tracción). El cuarzo es un mineral muy frecuente en arenas naturales y en muchos tipos de rocas que se usan para la producción de áridos. La arena de cuarzo es una materia prima básica para la fabricación de ladrillos silito-calcáreos.

Los feldespatos y el cuarzo constituyen los minerales de colores más claros frecuentes en las rocas ígneas, a los cuales petrográficamente se les denominan minerales félsicos. Por el contrario, los minerales de colores oscuros se denominan máficos, entre los que se encuentran las micas, los anfíboles, piroxenos y olivinos.

c) Micas. Son minerales del grupo de los alumosilicatos, que se caracterizan por presentar una estructura muy especial en forma de finas láminas, las cuales le proporcionan a tales minerales una perfecta exfoliación, propiedad de romperse, en este caso, siguiendo planos paralelos en forma de "escamas". Precisamente esta cualidad es la que hace que la presencia de estos minerales en los áridos sea indeseable, pues provoca varios trastornos que serán analizados posteriormente cuando se estudien las propiedades de los morteros y hormigones. En las rocas destinadas a otros fines constructivos, las micas son también indeseables, pues ellas disminuyen su resistencia mecánica, aceleran su meteorización y complican la rectificación y el pulido, ya que, como resultado de un despegue perfecto, las micas se exfolian con bastante facilidad en láminas muy finas. La dureza de las micas es de 2 a 3 en la escala de Mohs.

d) Anfíboles. Son minerales pertenecientes al grupo de los silicatos ferro-magnesianos, en este caso con una estructura fibrosa muy característica, que le proporciona a sus distintas variedades un hábito fibroso-acicular muy típico. Entre las variedades más importantes de este grupo se encuentran la hornblenda (u hornablenda), la actinolita y la tremolita.

e) Piroxenos. Es un grupo de minerales muy parecidos a los anfíboles, pero con una estructura "mas empaquetada" (cadenas dobles), que hacen que los cristales del mineral se presenten típicamente en forma de granos más o menos redondeados, lo cual permite diferenciarlos aproximadamente de los anfíboles en el diagnóstico preliminar macroscópico. Su color es verde oscuro a negro también, y presentan planos de clivaje muy semejantes a la hornblenda.

f) Olivino. Desde el punto de vista químico, los olivinos son silicatos de hierro y magnesio, que componen una serie isomorfa que va desde la fayalita hasta la forsterita. Desde el punto de vista petrográfico los olivinos son frecuentes en las rocas básicas y ultrabásicas. El peridoto u olivino común es de color verde oliva cuando se encuentra inalterado, pero esto raramente ocurre en las condiciones de la superficie terrestre, donde se encuentra alterado y frecuentemente serpentinizado.

Principales tipos de rocas ígneas

- Granitoides: Constituyen un grupo de rocas de la familia del granito (por eso se denominan granitoides)
- Diorita
- Gabros
- Peridotitas y piroxenitas
- Riolitas, dacitas y riodacitas
- Andesitas
- Basaltos
- Escoria y piedra pómez

Las rocas sedimentarias

Como ya se ha descrito, las rocas sedimentarias se han formado como consecuencia de la deposición y posterior petrificación de sedimentos con distinta composición y procedencia. Los sedimentos que

se han derivado de la descomposición química de rocas en la superficie de la corteza terrestre por efectos de la meteorización y otros procesos complejos de lixiviación, etc., son productos que se mantienen en solución acuosa hasta el momento en que existen las condiciones propicias (concentración, temperatura y otras) y precipitan, formando lechos de rocas, generalmente estratificados. Este grupo así formado recibe el nombre de rocas de origen químico.

Cuando de los procesos de geodinámica externa, principalmente de los erosivos, surgen predominantemente sedimentos de naturaleza detrítica (fragmentaria o clástica), que se transportan por distintos medios hasta cuencas de deposición donde finalmente quedan acumulados, se forman así las rocas fragmentarias (también llamadas detríticas o clásticas).

Otro tipo de roca sedimentaria es la que se origina por la acción predominante de la actividad de organismos, por la acumulación de sus esqueletos, conchas, formaciones coralinas, deposiciones mixtas, etc., que se denominan colectivamente rocas organógenas. Debe destacarse que la cantidad y variedad de rocas de este tipo es muy elevada, particularmente en países de condiciones geológicas como Cuba, que dado su origen, ha tenido continuados períodos de inmersión marina, con la consecuente deposición de sedimentos de este tipo.

Estructuras de las rocas sedimentarias

Las diferencias estructurales entre los distintos tipos de rocas sedimentarias se deben en gran medida a factores condicionados por la naturaleza de los procesos que dieron lugar a los sedimentos, condiciones de la cuenca de deposición, profundidad de las aguas, velocidad de la corriente, etc. Así, existen rocas sedimentarias con buen grado de cristalización (aunque generalmente menor que las ígneas intrusivas), con fragmentos, restos de organismos, etc. que evidencian pertenecer a los distintos grupos descritos anteriormente.

Las rocas de origen químico, al formarse como un precipitado de sales en cuencas marinas principalmente, constituyen un aglomerado de cristales de minerales, que en conjunto exhiben una estructura cristalina. En el caso de las rocas sedimentarias de origen fragmentario, es evidente que la estructura típica es la que está formada por fragmentos (pedazos) de otras rocas. La identificación de estas rocas se reduce entonces a la detección de los fragmentos o detritos en la masa de la roca. De manera muy evidente, las rocas sedimentarias de origen orgánico deben poseer entonces una estructura caracterizada por la presencia de restos de organismos, es decir, por fósiles.

Minerales petrogenéticos de las rocas sedimentarias

a) Calcita
b) Dolomita
c) Minerales arcillosos d) Yeso
d) Anhidrita
e) Halita
f) Otros …..

Principales tipos de rocas sedimentarias

- Calizas
- Dolomitas
- Yeso-Anhidrita-Halita
- Silicitas
- Brechas y conglomerados

- Areniscas
- Limolitas
- Lutitas

Las rocas metamórficas

Las rocas metamórficas deben su origen a transformaciones de otros rocas bajo el influjo de elevadas temperaturas, presiones y determinados agentes químicos que tienen lugar en regiones de la corteza terrestre donde al menos por un tiempo imperan tales condiciones. En función de las acciones impuestas a las rocas en trance de metamorfosearse, los resultados que se obtienen como respuesta serán diferentes.

Estructuras de las rocas metamórficas

Las diferencias estructurales entre las rocas metamórficas reflejan las condiciones geológicas bajo las cuales se formaron y de manera general se puede plantear que las mismas abarcan la variedad cualitativa de la combinación de las estructuras de las rocas ígneas, las sedimentarias y otras formadas propiamente en los procesos metamórficos.

De manera resumida, podemos encontrar rocas metamórficas con las siguientes estructuras características: macrocristalina, micro-cristalina, cataclástica (formada por fragmentos), etc., bajo dos categorías esenciales: orientadas (esquistosas) y no orientadas (masivas).

Minerales petrogenéticos de las rocas metamórficas

En las rocas metamórficas pueden presentarse minerales típicos tanto de las rocas ígneas como de las sedimentarias de las cuales se formaron, como por ejemplo cuarzo, feldespatos, calcita, micas, etc. Pero durante los procesos de metamorfismo se pueden formar también nuevos minerales, algunos que resultan exclusivos de tales tipos de rocas, sirviendo entonces de manera muy efectiva como elementos de carácter diagnóstico. Entre los minerales petrográficos comunes de las rocas metamórficas se encuentran los siguientes:

Principales tipos de rocas metamórficas

- Mármoles
- Cuarcitas
- Anfibolitas
- Serpentinitas
- Skarns
- Filitas
- Pizarras
- Esquistos
- Gneises
- Corneanas

2.3. Formas de uso de las rocas en la construcción

Los materiales pétreos naturales tienen una amplia gama de formas de empleo en los trabajos de la construcción, que van desde productos destinados a elementos estructurales resistentes (cimentaciones, muros, etc.), hasta elementos de terminación y decoración (pisos, revestimiento de paredes, escultura, etc.). Además, una importante masa de materiales pétreos naturales se usa como materia prima para la producción de otros materiales, incluyendo a los áridos, que constituyen el grupo de mayor demanda y producción en el mundo actual. En la Tabla No.6 se muestra un resumen de las principales formas de uso de los materiales pétreos naturales en la construcción, así como las rocas más utilizadas en cada caso.

Tabla 6. Resumen de las principales formas de uso de los materiales pétreos naturales en la construcción.

FORMAS DE USO	PRODUCTOS	ROCAS MÁS USADAS
Depósit os terrígen os	Material de mejoramient o	**Calizas, serpentinitas, gran variedad de rocas blandas y estables en general.**
	Impermeabilizantes	**Arcillas**
Pétreos a granel	Arena	**Lechos de ríos, yacimientos, dunas, arena de mar, paleo-cauces, etc.**
	Grava	**Bancos de grava fluvial, paleo-cauces, etc.**
Piedra triturada	Áridos de distintas fracciones granulométricas (arena, granito, gravilla, etc.)	**Calizas, mármoles, areniscas duras, granitos, pórfidos, basaltos, andesitas, etc.**
	Balasto	**Calizas, mármoles, cuarcitas, granitos, gabros, pórfidos, basaltos, andesitas, etc.**
	Carbonato	**Calizas, mármoles**
Piedra en bloques	Sillares	**Margas, calizas coralinas, calizas compactas, tobas, areniscas, mármoles, etc.**
	Mampuestos	**Calizas de distinto tipo, mármoles, cuarcitas, serpentinitas, areniscas, tobas, etc.**
	Rajón	**Calizas de distinto tipo, mármoles, cuarcitas, serpentinitas, areniscas, tobas, etc.**
	Bloques para escultura	**Mármoles, calizas, granitoides de grano fino, etc.**
Piedra en planchas o losas	Planchas para revestimiento de paredes	**Mármoles, calizas de distinto tipo, granitos, labradoritas, dioritas, serpentinitas, etc.**

Piedra en lajas naturales	Losas para revestimiento de pisos	**Mármoles, calizas de distinto tipo, granitos, labradoritas, dioritas, serpentinitas, etc.**
	Lajas para enchapes	**Esquistos, pizarras, caliza en láminas, areniscas en láminas, etc.**
	Tejas	**Pizarras**

2.4. Los áridos

Aunque la NC 251:2005 Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos, define a los áridos como "Material mineral procedente de rocas que se encuentran desintegradas en estado natural o precisan de trituración mediante procesos industriales. Las dimensiones son diferentes, varían desde 0,149 mm hasta un tamaño máximo especificado", esta definición no abarca toda la variedad de materiales que se pueden incluir en dicho concepto. Baste señalar que los áridos pueden ser tanto de origen natural como artificial. Los de origen natural pueden ser tanto obtenidos directamente en graveras o depósitos (bancos, yacimientos, etc.) o procedentes de la trituración de las rocas. Los áridos artificiales pueden ser fabricados en industrias destinadas específicamente a estas producciones, o pueden ser subproductos de otros procesos industriales.

Los áridos constituyen una parte importante en el hormigón, no sólo en el orden cuantitativo, ya que constituyen generalmente más del 75% del volumen del mismo, sino también en el comportamiento cualitativo. En ocasiones se le suele dar a los áridos una función puramente económica, presentándose simplemente como un material de relleno, sin embargo, los mismos tienen también una importante función técnica. Los áridos tienen una gran repercusión en las propiedades de los hormigones, tanto en su estado fresco como en el endurecido. La disminución de la fisuración y de las variaciones volumétricas en general, así como las propias resistencias mecánicas que se logran, se debe en gran medida a la presencia de los áridos en el aglomerado. Debe tenerse en cuenta además, que la durabilidad y resistencia química que caracterizan al hormigón se deben en gran medida a la presencia de los áridos.

Las propiedades de los áridos están condicionadas en gran medida por su génesis, composición, condiciones de extracción y procesamiento, etc. Debe resaltarse el hecho de que las características esenciales que han de presentar los áridos no son las mismas siempre, y que la selección depende de las características que se le fijen al hormigón deseado y muy especialmente de las condiciones locales en cuanto a fuentes de suministro, transporte, etc. Se infiere entonces la importancia del conocimiento del origen, composición y propiedades generales de los áridos.

Las propiedades más apreciadas en los áridos se relacionan con su aspecto físico-mecánico y con su comportamiento químico, que en conjunto tienen una marcada influencia en la durabilidad del producto que se elabore y en el logro de los parámetros técnicos deseados. En general se requiere entonces de un material pétreo que sea químicamente inerte, resistente a los esfuerzos mecánicos, con partículas que exhiban un adecuado coeficiente de forma acorde con su procedencia, de buena adherencia y que su distribución granulométrica satisfaga las exigencias establecidas para el conjunto. Desde luego, que en todo caso los aspectos económicos deben ser tenidos en consideración a la hora de efectuar la selección de un agregado determinado.

El tipo de árido, su granulometría y otras características, por ejemplo su resistencia a la abrasión, contenido de finos, etc., cumplirá con los requerimientos establecidos en la NC 251:2005 y será

seleccionado teniendo en cuenta la forma de ejecución de los trabajos, la utilización final del hormigón, las condiciones ambientales a las cuales estará expuesto el hormigón y cualquier otro requerimiento exigido, como sucede en el caso del hormigón con áridos expuestos o el terminado con herramientas.

2.4.1 Obtención de los áridos

La principal forma de uso de los materiales pétreos naturales en la construcción es como piedra triturada, la cual se produce en distintas formas comerciales, por ejemplo áridos de distintas fracciones granulométricas, balasto, macadam, etc. No obstante, existen otras maneras de obtener los productos antes mencionados, aprovechando algunos depósitos naturales donde los materiales se encuentran en un estado de agregación incoherente. Sin embargo, en Cuba la principal fuente de áridos se basa en la trituración de piedras naturales en las canteras.

Se le denomina cantera a la instalación industrial que se destina a la explotación de materiales pétreos naturales. La explotación de yacimientos de menas minerales se llama mina, mientras la explotación de depósitos o yacimientos de no minerales generalmente se designa con el nombre de cantera. Las minas pueden ser a cielo abierto o subterráneo, mientras que las canteras son normalmente a cielo abierto. Las características de las canteras difieren en función de las condiciones geológicas del yacimiento (condiciones de yacencia, profundidad del nivel freático, etc.), del uso al que se destinará la roca extraída, etc. Como se infiere, las operaciones necesarias para la explotación de canteras contemplan varias etapas y procesos de cierto grado de complejidad, y su instalación constituye una inversión seria.

Figura 24. Vista general de una cantera.

La explotación de depósitos de materiales pétreos puede ser muy variada, dependiendo fundamentalmente de las condiciones de yacencia y naturaleza del material a explotar. El caso más sencillo es cuando se extrae material para préstamo, por ejemplo, para el terraplén de una vía. Otra forma es cuando se extrae arena de un yacimiento (por ejemplo, la arena del Hoyo de Manicaragua) o cuando se extrae grava y arena del cauce de un río. Muy diferente es la instalación cuando se explota una roca maciza para ser triturada y obtener áridos, lo cual presupone la necesidad de equipos mucho más complejos para la trituración, clasificación, etc.

Antes de la apertura de una cantera, deben acometerse una serie de trabajos relacionados con; demanda del material, factibilidad técnica y económica, etc. La ubicación estará dada entonces en función de las necesidades y la disponibilidad de yacimientos apropiados de rocas, con las características exigidas según el uso a que se destinarán. Desde luego que deben tenerse en cuenta las distancias de suministro de los productos, las vías de acceso, suministro de agua, electricidad, etc.

Una tarea imprescindible es la realización de investigaciones ingeniero-geológicas en la zona de emplazamiento de la cantera, después de la cual se podrá decidir finalmente la ubicación precisa de la misma, la estrategia de explotación y la ubicación de sus instalaciones. Durante las investigaciones ingeniero-geológicas no solamente se aclaran las condiciones petrográficas, tectónicas, hidrogeológicas, etc. del yacimiento, sino que también (y muy importante) se realizan una serie de ensayos físicos, mecánicos y químicos, y pruebas tecnológicas con los productos obtenidos, que demuestren de manera fehaciente la aptitud de la materia prima para el objetivo perseguido.

Otra etapa que también se precisa realizar en cualquier tipo de cantera, aunque con características diferentes, es el desbroce, actividad que consiste esencialmente en la eliminación de la costra de meteorización, capa vegetal y otros elementos indeseables que pueden provocar el entorpecimiento de las actividades de explotación o simplemente que puedan contaminar al material que se extrae.

Explotación de canteras para piedra triturada

Luego de decidir la apertura de una cantera para la obtención de piedra triturada, además de los aspectos de administración y logística que lógicamente están asociados, se procede entonces a la realización del plan de explotación en el frente de cantera. Como ya se señaló, el desbroce es una obligada actividad que se va realizando de manera sistemática. El proceso de explotación como tal consta de diversas etapas: extracción de la piedra, trituración, clasificación y lavado. Cada una de esas etapas constituye de por sí un conjunto armónico bastante complejo, que requiere de la intervención de especialistas de distintas ramas: explotación de yacimientos, ingeniería mecánica, etc. A continuación, se describen someramente dichas etapas.

a) Extracción de la piedra

En función de las condiciones geológicas del yacimiento, de las condiciones topográficas, de los accesos, etc., se decide entonces la ubicación del frente de cantera, que es el área destinada a las operaciones sistemáticas de extracción de la piedra. La altura de la escarpa es un elemento importante del frente de cantera, pues tanto las perforaciones como la cantidad de material obtenido en cada etapa estarán en correspondencia con la misma. Las condiciones de yacencia de las rocas en el frente de cantera, principalmente la existencia y posición de los estratos, así como la presencia de diaclasas, pueden facilitar o complicar la explotación.

Para realizar la extracción del material pétreo por medio de explosivos, es necesario primeramente realizar orificios en el macizo rocoso. La perforación de los mismos es una tarea muy laboriosa que demanda de mucho tiempo. Aunque existen distintos procedimientos para la realización de estos orificios, la manera convencional es la perforación con carretilla barrenadora, que es un equipo muy versátil ya que permite realizar perforaciones en distintas posiciones, incluso horizontalmente. La carretilla barrenadora es una armazón portadora de un martillo neumático, que mediante unas guías permite dirigir la barrena convenientemente. El espaciamiento entre barrenos se calcula en función del tamaño de los fragmentos que se desean obtener, considerando la dureza de la roca, el poder del explosivo, etc. El tamaño máximo de los fragmentos está limitado a su vez por el tamaño permisible a la entrada del molino primario.

Luego de realizar el conjunto de perforaciones que de acuerdo con el diseño le corresponden a la etapa, se procede entonces a la colocación de los explosivos. El tipo de explosivo a utilizar es muy variado y su selección está relacionada fundamentalmente con aspectos económicos y de disponibilidad local. Como que se requiere también de un detonante y mecha, la operación de carga incluye también la colocación de estos elementos, todo lo cual es realizado por personal especializado y bajo estrictas medidas de seguridad. El extremo de las perforaciones se tapa con una mezcla de

material arcilloso o polvo de la misma perforación, con el objetivo de aumentar los efectos de la explosión. Al efectuarse la detonación, debido al poder expansivo de los gases generados, se produce la rotura de las rocas en fragmentos de diferentes dimensiones, disgregándose en el propio frente.

Como que generalmente después de la detonación no todos los fragmentos de piedra obtenidos quedan con dimensiones aptas para entrar al molino primario, se procede entonces a un proceso de rotura de esos grandes bloques, para la cual se pueden utilizar diferentes técnicas. El martillo neumático operado manualmente puede ser práctico en muchos casos, lo mismo para la apertura de barrenos donde se colocan cargas explosivas (retaqueo), o simplemente rompiendo los bloques con el propio martillo, etc. El proceso de separación de los grandes fragmentos o bloques sobre- medida, se realiza generalmente de manera paralela a la carga del material sobre los camiones en que se realiza el traslado hasta el molino primario. Tanto los distintos tipos de cargadores como los camiones empleados son equipos especiales muy robustos y especialmente diseñados para el trabajo de canteras. Debe destacarse que manera en que se realiza la carga del material obtenido de las explosiones es muy variable en función de la cantidad de tierra y otras impurezas que lo acompañen, por lo que la experiencia de los operadores tiene una gran repercusión en la efectividad del trabajo.

b) Trituración y desmenuzamiento

La trituración es el proceso mediante el cual se logra la disminución de las dimensiones de los fragmentos del material por medio de distintas acciones físico-mecánicas que lo quiebran en partículas menores. En ocasiones se emplea el término desmenuzamiento para designar a los procesos de este tipo que proporcionan un producto de grano fino, por eso se usa el término triturador para los equipos que realizan la trituración, y molinos, para el desmenuzamiento. No obstante, es frecuente el uso indistinto de los términos, designándose los equipos de manera general como “molinos”. Por otra parte, como que generalmente en la etapa inicial se utilizan equipos de machaqueo, a dicha etapa se le llama “machaqueo”, dejándose el término molido para la obtención de material más fino (arena). La obtención de polvo muy fino se logra entonces mediante la pulverización o molturación.

Los equipos de trituración son en general muy costosos, y una instalación de cantera constituye siempre una inversión de cierta envergadura, que exige un estudio minucioso de factibilidad y una adecuada selección de los equipos. Un parámetro técnico importante a tener en cuenta en los molinos es la medida cuantitativa de la capacidad del mismo de disminuir el tamaño de los fragmentos que se muelen, para lo cual se emplea comúnmente el denominado “índice de trituración” (i), que es el valor de la relación de las dimensiones de los fragmentos que alimentan al molino (D) y las dimensiones de los fragmentos del material resultante (d). O sea,

$$I = D / d$$

Donde:

D…. Diámetro medio de los fragmentos que se alimentan al molino.

d…. Diámetro medio de los fragmentos del material ya triturado.

En la práctica el índice de trituración se relaciona fundamente con la abertura de los orificios de las zarandas o cedazos que se usan antes y después de la trituración.

Figura 25. Instalaciones de la cantera Mariano Pérez Balí (El Purio).

Las características de los equipos de molienda están en función de la operación que realicen, las cuales para una instalación de cantera para piedra triturada pueden dividirse de manera resumida en:

- Machaqueo primario
- Machaqueo secundario
- Remolido

Los equipos que se utilizan para la trituración de piedra operan principalmente mediante efectos de compresión, fricción o de impacto, aunque algunos combinan efectos. Los tipos de molinos más utilizados en las instalaciones de cantera para piedra triturada son los siguientes:

I. Trituradoras de mandíbulas.

Son aparatos donde la rotura de la piedra se produce por aplastamiento entre dos piezas (mandíbulas), una de ellas fija y la otra oscilante. De acuerdo con la forma en que esta segunda haga su movimiento, estos aparatos pueden clasificarse en dos tipos: de simple acción y de acción compleja. En todos los casos las mandíbulas están recubiertas por planchas con una superficie acanalada, que en posición machi-hembrada facilitan la rotura de las piedras, que en los picos de las ondas de las planchas experimentan una concentración de tensiones hasta provocar su rotura. La posición de las mandíbulas propicia la entrada del material por la parte superior más ancha, mientras que la salida se realiza por la parte inferior más estrecha, que limita el tamaño de salida. No obstante, conviene recordar que una forma plana y alargada del fragmento puede hacer que el mismo pase a través de la abertura y que sin embargo no sea apropiado para el diámetro de entrada del siguiente aparato.

II. Trituradoras de conos

III. Machacadoras de martillos

En este tipo de molino, la trituración se logra por medio de golpes repetidos sobre el material, es decir, por medio de impactos. Estas máquinas están formadas básicamente por un eje movido por un motor,

al cual van insertados perpendicularmente una serie de elementos salientes llamados martillos, que pueden estar fijos o ser movibles. Cuando el motor hace girar el eje, con él giran los martillos y al introducirse el material dentro de la caja que forma el molino, los martillos lo golpean y lanzan contra la paredes de la caja donde rebotan, y vuelven a ser alcanzados por los martillos y vueltos otra vez a "batear". Este proceso se repite hasta que el material es capaz de pasar por las aberturas de la parrilla que forma el fondo de la caja del molino y sale ya como material triturado. La rotación del eje y los martillos se hacen a grandes velocidades para aumentar la fuerza del impacto.

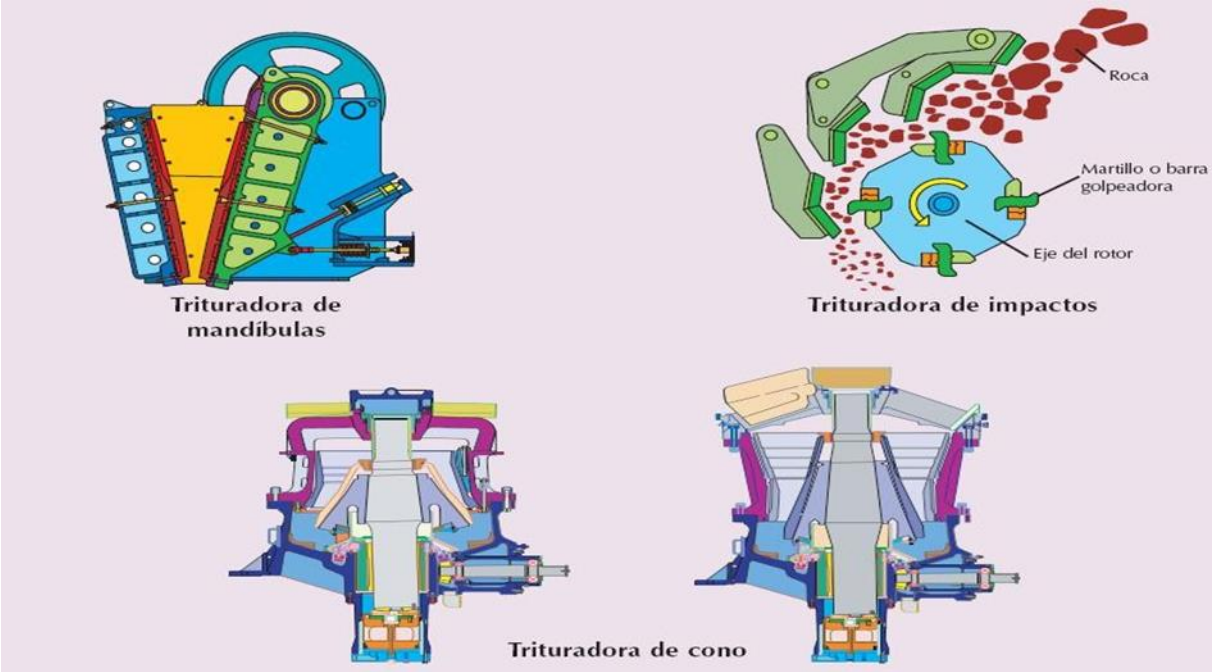


Figura 26. Diferentes tipos de trituradoras.

c) Clasificación y lavado

Es el un procedimiento de separación de áridos por clases de grosor mediante el tamizado de los mismos en una o varias cribas, o de clasificación de minerales en las superficies de la criba. (S.E. Andréiev, V.A.Perov, V.V. Zveriévich.1980).

Los procedimientos de clasificación de las rocas después de trituradas pueden ser:

1. Mediante clasificación mecánica.

por cribas planas vibratorias

En este caso el cribado se obtiene mediante tamices planos sometidos a oscilaciones o vibraciones bajo cuyo efecto se desplazan los materiales.

por tromeles cilíndricos

Los tromeles cilíndricos son tamices giratorios constituidos por un cilindro metálico con una inclinación del 10% aproximadamente respecto a la horizontal.

2. Mediante clasificación hidráulica.

Lavado

La clasificación de las arenas por vía hidráulica se asocia en la mayor parte de los casos al lavado de los finos de los materiales de naturaleza orgánica y arcillosa. El lavado destinado a liberar estos materiales puede efectuarse antes del machaqueo primario o después. Por otra parte puede realizarse un lavado previo en cantera, cuando en el emplazamiento de la cantera hay agua suficiente.

o clasificación

- Los aparatos de clasificación hidráulica de las arenas pueden clasificarse en:
- clasificadores hidráulicos.
- clasificadores hidromecánicos.
- clasificadores hidrocentrifugas.

3. Mediante clasificación neumática. Eliminación del polvo de los áridos.

Para los granos de arena inferior a 10 mm es posible el tratamiento con un selector de aire siempre que el grado de humedad del producto no sobrepase el 3%.

Entre las etapas de trituración, aparecen intercalados los equipos de clasificación, las cribas, que permiten seleccionar el tamaño de las partículas separándolas entre las que pasan y las que no pasan por las mallas. De este modo, se logran áridos de todos los tamaños posibles, en función de la demanda del mercado.

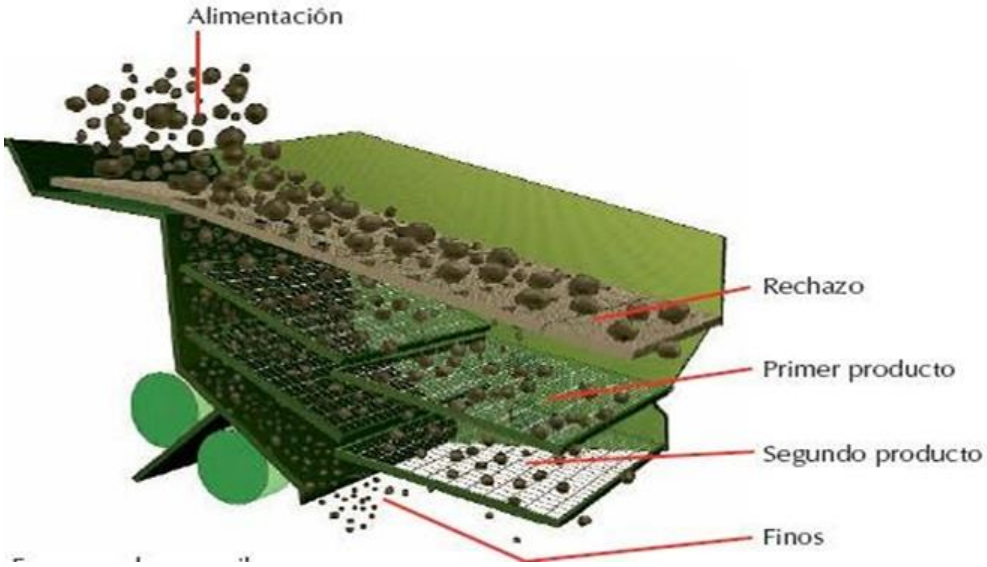


Figura 27. "Esquema de una criba. "

Figura 28. "Mediante los sistemas de criba se seleccionan los diferentes tamaños de los áridos para su posterior comercialización según su uso".

Las operaciones de desenlodado y lavado del material se realizan cuando el yacimiento presenta lodos, arcillas u otras sustancias que afecten en la calidad de los áridos, y permiten obtener áridos limpios con el fin de responder a las necesidades de determinadas aplicaciones de la industria, evitando así la alteración de la adherencia con los ligantes (cemento, cal, compuestos bituminosos u otros) permitiendo así proceder a su correcta aplicación.

2.4.2 Propiedades de los áridos

a) Resistencia mecánica (resistencia a la compresión e índice de triturabilidad)

La resistencia del árido es una exigencia necesaria para el logro de una cierta resistencia en el hormigón, pero no suficiente. Además, debemos diferenciar entre la resistencia de la roca a partir de la cual se produce el árido y la resistencia propia del árido. Cuando se evalúa la resistencia de las rocas, pesa mucho la presencia de fisuras y grietas presentes en la misma, sin embargo, al producirse el árido, este efecto enmascarador desaparece. Es por eso que es más conveniente utilizar el índice de triturabilidad del árido, que responde mejor al comportamiento del mismo en el hormigón.

La NC 251:05 establece que para hormigones de resistencia menores a 40 MPa, el índice de triturabilidad del árido grueso debe ser menor de 35-50 % (saturado).

b) Módulo de elasticidad

Al aumentar la resistencia a compresión del árido, generalmente también se incrementa el módulo de elasticidad, pero esto, como ya se explicó puede resultar contraproducente e influir negativamente en el comportamiento durable del hormigón. O sea, salvo en casos excepcionales, no resulta conveniente seleccionar áridos con elevado módulo de elasticidad.

c) Resistencia a la abrasión

Es importante tenerlo en cuenta cuando el hormigón que se va a fabricar estará sometido a efectos abrasivos, por ejemplo, cuando se emplea en silos que almacenan material abrasivo, en pisos o pavimentos industriales, etc.

d) Forma de las partículas

Los áridos obtenidos de graveras tienen normalmente forma redondeada y superficies lisas, mientras que los procedentes de la trituración son angulosos. La forma deseable en los áridos es la de mayor coeficiente de esfericidad. La presencia de PPA resulta entonces perjudicial, debido al entorpecimiento de la movilidad y compacidad de las mezclas, provocando la aparición de coqueras o de excesiva exudación interna (bajo las PPA).

La NC 251:05 establece que el contenido máximo de PPA en el árido grueso debe ser menor al 10% cuando el árido proviene de rocas sedimentarias y menor al 20 % cuando proviene de rocas ígneas.

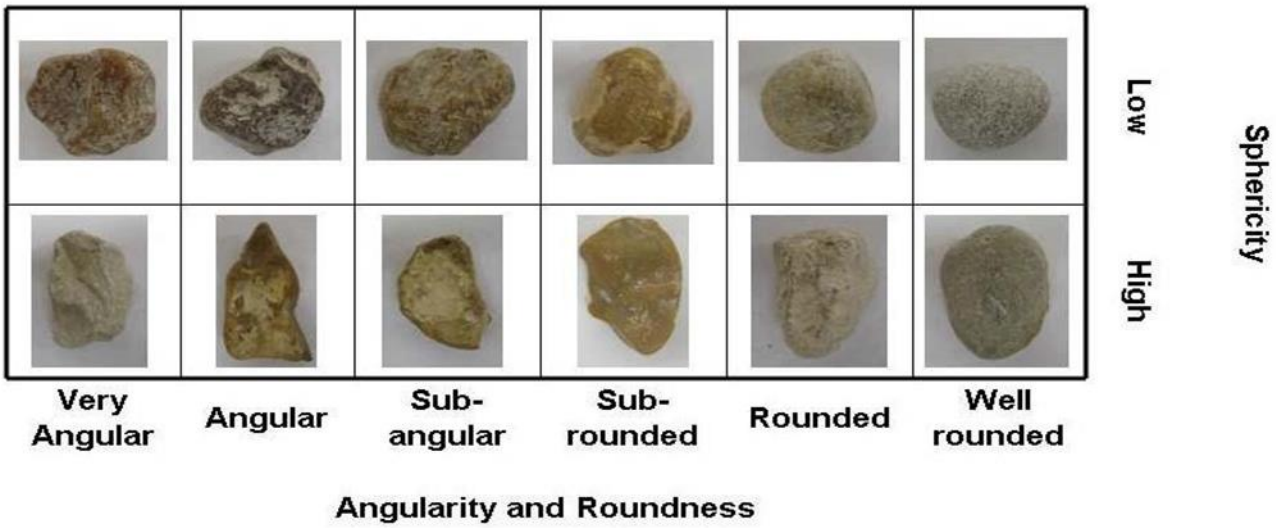


Figura 29. Angulosidad y redondeamiento de las partículas de áridos.

e) Adherencia

La adherencia de los áridos depende en gran medida del estado de su superficie, forma, TM, etc., y su influencia en las propiedades del hormigón, especialmente en su resistencia mecánica, es muy elevada. Es por eso, que por lo general las gravas naturales tienen menor adherencia que los áridos triturados.

f) Porosidad

La porosidad de los áridos está estrechamente relacionada con otras propiedades del mismo, entre ellos la absorción, permeabilidad, resistencia mecánica, adherencia, etc. Claro que su influencia no es igual en todos los casos y no debe absolutizarse. Sin embargo, para evitar la duda, es conveniente y deseable que los áridos no posean una porosidad muy elevada, sobre todo si los hormigones donde se emplearán van a estar sometidos a ambientes agresivos (o con posibilidad de congelamiento). Recuerde que la penetración de sustancias agresivas se ve limitada si el material posee menor porosidad, permeabilidad y capilaridad.

La NC 251:05 establece que la absorción del árido, generalmente, no debe superar el 3% de la masa seca del mismo.

g) Cambios de volumen

Resulta evidente que la presencia de áridos susceptibles de presentar variaciones de volumen por cambios de humedad, etc., son indeseables, dado el posible efecto deletéreo de los mismos al generarse tensiones internas en el hormigón que pueden figurarlo o descomponerlo.

h) Peso específico

Uno de los inconvenientes del hormigón hidráulico es su elevado peso, en lo cual influye mucho el peso específico del árido utilizado, por lo que pudiera pensarse que no es necesario establecer especificaciones para ello, pues mientras menor fuera, sería mejor. Sin embargo, debe recordarse que una de las cargas a considerar en el diseño estructural es el peso propio de los elementos y que algunas veces la resistencia del árido está algo relacionada con su PE. Es por eso que se establecen especificaciones para el PE, por ejemplo la NC 251:05 dispone que el PE del árido debe ser como mínimo 2,5. Caso particular es cuando se producen hormigones a base de áridos ligeros, donde se establecen otros requerimientos.

i) Granulometría

Se entiende por granulometría a la distribución por tamaños de las partículas componentes del material. Un primer aspecto en donde influye decisivamente la granulometría de la mezcla de áridos es en la compacidad del conjunto, en el caso del hormigón con la consideración adicional de la presencia del aglomerante con el agua. Muchas propiedades del hormigón, tanto fresco como endurecido, se ven modificadas por el grado de acomodo que se tenga en las partículas componentes del material. La resistencia mecánica, absorción, permeabilidad, durabilidad, etc., para una dosis de cemento dada, depende en gran medida del por ciento de vacío logrado entre la arena y los áridos gruesos. No debe confundirse la granulometría con el tamaño de las partículas

Los áridos se producen en distintas fracciones granulométricas, con especificaciones particulares en cada caso. En la NC 251:05 se establecen dichos requisitos tanto para la arena como para las distintas fracciones de árido grueso. También existen recomendaciones con respecto al Modulo finura para las arenas y al tamaño máximo para el árido grueso.

j) Sustancias perjudiciales

Materia orgánica

Ya se describió antes la influencia de la presencia de materia orgánica en los morteros y hormigones, sobre todo la afectación que ejerce sobre el fraguado del cemento Pórtland, así como en la adherencia. Claro que la presencia de materia orgánica es más frecuente en la arena de origen fluvial y otras, mientras que los áridos procedentes de la trituración de las rocas no es lógica su manifestación. Recuerde que su detección se realiza a partir del ensayo de coloración.

Material más fino que el T-200

El material más fino que 0,074 mm (abertura del T-200) es considerado una impureza en los áridos. La influencia negativa de tales materiales está relacionada con el incremento de la demanda de agua, la disminución de la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento, etc. No obstante, en algunos casos pueden lograrse ciertas mejoras en la plasticidad de las mezclas, disminución de la exudación, etc. que analizaremos en cada caso.

Según la NC 251:05:

El % permitido de material más fino que el tamiz 200 en los áridos gruesos para cualquier hormigón es inferior o igual que 1%.

El contenido de material más fino que el tamiz 200 en los áridos gruesos puede ser incrementado bajos las siguientes condiciones:

Si el material más fino que el tamiz 200, contenido en el árido grueso está esencialmente libre de arcilla o esquistos el por ciento puede ser incrementado hasta el 1,5 %, (El contenido de arcilla o esquisto será el resultado del procedimiento de ensayo que se adopte).

Si la procedencia del árido fino que será utilizado en el hormigón tiene menor contenido de material más fino que el tamiz 200 que el máximo permisible establecido en la Tabla 6, el por ciento límite (L) del árido grueso podrá ser incrementado atendiendo al valor de cálculo obtenido por la siguiente expresión:

$L = 1+ (P / 100 – P) x (T – A)$

Donde:

- L: límite del contenido de tamiz 200 especificado en el árido grueso expresado en %
- P: por ciento de árido fino con relación al peso total de áridos
- T: límite del contenido de tamiz 200 especificado en el árido fino expresado en %
- A: contenido real de T-200 en el árido fino

Terrones de arcilla

Los minerales arcillosos se dispersan en el agua perjudicando significativamente la adherencia entre los áridos y el cemento, mientras que en forma de terrones constituyen partículas blandas que se comportan como partes débiles en el hormigón, además de favorecer el deterioro por cambios de volumen. Esa es la razón por la que su contenido se limita en las normas. En la NC 251:05 limita a 0,25 % para el árido grueso y a 1 % para la arena.

Contenido de cloruros

La presencia de cloruros es nociva, principalmente por su efecto despasivante de las armaduras de refuerzo del HA y el desencadenamiento de la corrosión del acero.

Áridos potencialmente reactivos ante los álcalis

Cuando los áridos contienen variedades de sílice amorfa que sean susceptibles de ser atacadas por los álcalis (Na_2O y K_2O provenientes del cemento o de otras fuentes) y más aún si el hormigón va a estar expuesto a condiciones de humedad, hay que emplear un cemento con las características expuestas en la Nota del apartado 5.2.2 (NC 120) y tener en cuenta cualquier otra medida para prevenir las reacciones árido-álcali que sean nocivas.

Impurezas (carbón, madera, asfaltita, mica, yeso, pirita, etc.)

Cualquier tipo de impureza orgánica (carbón, madera, asfaltita, etc.) o no (mica, yeso, pirita, etc.), que pueda afectar la adherencia, fraguado del cemento o que reaccione de alguna manera con los componentes del hormigón o con los agentes exteriores del ambiente donde normalmente se encuentre el hormigón, deben evitarse. La mica puede perjudicar la adherencia, la resistencia y la durabilidad del material. El yeso puede alterar el fraguado o provocar corrosión sulfática. La pirita puede provocar reacción expansiva con la aparición de manchas pardo-rojizas, etc.

En la NC 251:05 se consideran toleradas las pequeñas cantidades de sulfato de calcio (yeso) y de sulfuro de hierro (pirita) bajo reserva que su contenido total en azufre expresado en anhídrido sulfúrico SO_3 no sobrepasa el 1% del peso total de la muestra de árido seco.

La distribución en el árido de las impurezas toleradas será uniforme y las partículas que la constituyen tendrán un volumen inferior de 0,05 m^3.

2.5. Otras propiedades de los áridos

Las relaciones que existen entre la masa y los volúmenes de las diferentes fases componentes de un material son extremadamente importantes desde el punto de vista ingenieril, ya que ellas determinan en gran medida el comportamiento físico, mecánico, e incluso hasta el propio comportamiento químico, que en conjunto con el ambiente en que se encuentren expuestos los mismos, tendrán un comportamiento durable diferente. Es conveniente que el ingeniero o constructor esté familiarizado con los distintos conceptos que de estas relaciones volumétricas y gravimétricas se derivan, con el objetivo de que pueda ser capaz de interpretar físicamente cada problema que al respecto enfrente y así darle correcta solución.

2.5.1. Parámetros del estado. (Propiedades relacionadas con la masa, el peso y el volumen)

Una introducción necesaria.

Peso VS Masa

Debe recordarse que los conceptos de masa y peso son diferentes, aunque frecuentemente se suelen utilizar erróneamente como si fueran lo mismo.

La diferencia entre los valores de gravedad máximos observados en los polos y los valores mínimos observados en el ecuador es alrededor de 5,3 Gal o 5300 mgal respectivamente. Los valores máximos de la gravedad normal observados en los polos se deben a la ausencia de la fuerza centrifuga en estos puntos y al aplanamiento de la Tierra.

Un cuerpo cayendo sin ser estorbado encima de uno de los polos aumenta su velocidad en la dirección vertical más rápidamente que el mismo cuerpo cayendo encima del ecuador hacia el suelo. Expresado en variaciones de masa un cuerpo de 1g de masa pesa casi 5mg más en los polos que en el ecuador.

Densidad.

Una importante relación es la que se establece entre la masa de un material y el volumen del mismo, como si estuviera absolutamente compacto (sin poros). Este parámetro se conoce con el nombre de ”densidad”, aunque muchos autores emplean impropiamente el termino ”peso específico” (más correctamente masa específica). En los líquidos es mucho más fácil la determinación de la densidad, ya que se precisa solamente tener precaución en extraer el aire atrapado y medir correctamente su masa y volumen, siguiendo la norma de ensayo correspondiente. Cada sustancia y cada mineral o fase, posee una densidad específica, o sea que es constante o propia. Bien familiar es para todos la densidad o masa específica del agua, ρ = 1 g/cm3, 1 kg/dm3 o 1 ton/m3, aunque debe recordarse que la densidad de las sustancias cambia con la temperatura y la presión.

En las fases (minerales) u otras sustancias definidas, la densidad (peso o masa específica) puede servir como un carácter diagnóstico. Esta propiedad depende principalmente del peso atómico de los elementos químicos que integran al material, así como de sus radios iónicos y arreglo de los mismos en su estructura interna. La influencia de los radios iónicos es muchas veces decisiva en los valores de la densidad del material, por ejemplo, el elemento químico potasio (K) tiene un peso atómico casi el doble que el sodio (Na), sin embargo la densidad del cloruro de potasio (KCl) es 1,98, menor que la del cloruro de sodio (NaCl), que es 2,17.

Si consideramos M como la masa del material y Vs como el volumen del material como si estuviera absolutamente compacto (que es el volumen del sólido), la expresión siguiente puede utilizarse para calcular la densidad o masa específica real:

$\gamma = M/ Vs$

Las unidades del SI más utilizadas para expresar la densidad o masa específica son: g/cm3, kg/dm3, kg/m3, ton/m3, etc.

En ocasiones es conveniente utilizar el concepto de densidad o masa específica relativa (o peso específico relativo). Esta es simplemente la razón entre la densidad del material y la densidad del agua, por lo que resulta una magnitud adimensional.

Peso específico (masa específica)

En el caso del trabajo común con los materiales de construcción y otros, la densidad no se utiliza con mucha frecuencia. Normalmente se emplea con más profusión el peso específico (masa específica). Esto se debe al hecho de que en la práctica, muchos materiales son muy heterogéneos, pero aún así se necesita hacer uso de dicho parámetro. Un ejemplo que ilustra perfectamente esto es el caso de una arena común de río, la cual normalmente está formada por granos de diferentes minerales y en gran medida por granos formados por partículas de más de un mineral. De esta manera resulta evidente que la densidad variará de una partícula a otra (pues pueden ser de distinto mineral) y entonces en estos casos el peso específico del conjunto es una propiedad más representativa, que permite su aplicación en múltiples problemas asociados con las relaciones o transformaciones de peso a volumen y viceversa.

Como que la inmensa mayoría de los materiales de construcción son porosos, el volumen total (V) en ellos es la suma del volumen de los sólidos (VS) más el volumen de los poros. Bajo estas circunstancias, la densidad como parámetro no es suficiente para resolver todos los problemas de las relaciones masa–volumen que se presentan tanto el terreno teórico como en la práctica. Es así que se acude a otros parámetros, como la masa específica corriente (peso específico corriente), la masa específica aparente (peso específico aparente) y la masa específica saturada (peso específico saturado). Los áridos constituyen un ejemplo ideal donde se utilizan con mucha frecuencia estos conceptos.

En un material poroso se pueden distinguir distintos tipos de poros, no solamente por su origen, dimensiones o formas, sino por su comunicación o aislamiento. Los poros abiertos (VPA) tienen comunicación con el medio en que se encuentran y pueden también comunicarse entre sí.

Como que el agua es un agente agresivo muy común, se emplea frecuentemente como elemento de referencia ante el comportamiento de los materiales. De esta manera, los poros abiertos son accesibles al agua y puede apreciarse que bajo determinadas condiciones de humedad pueden saturarse. Si el material se sumerge en agua por un determinado período de tiempo, sus poros abiertos prácticamente se saturan. Los poros abiertos o conectados incrementan la permeabilidad al agua y a otros agentes, disminuyendo sensiblemente la durabilidad del material. La permeabilidad y capacidad de absorción están relacionadas también con la porosidad abierta. Especial precaución debe tenerse en los países fríos, pues el deterioro provocado por congelación del agua en los poros es inevitable.

Los poros cerrados o inaccesibles (VPC) también modifican las propiedades del material, pero afortunadamente en la mayoría de los casos, de manera favorable. Por ejemplo, en los materiales aislantes del sonido, en los materiales ligeros, etc.

Para comprender mejor los conceptos antes mencionados, ilustremos gráficamente la estructura de un material cualquiera con sus distintos tipos de poros:

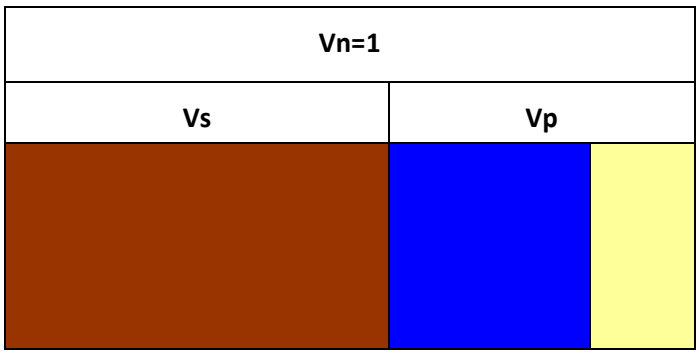


Figura 30. Esquema de las partes integrantes de un material poroso: Va es el volumen absolute (volumen del sólido); Vn, el volumen en estado natural (con poros); Vagua, el volumen del agua; Vaire el volumen del aire Vp volumen de los poros.

Peso específico corriente (masa específica corriente) γC

El peso específico corriente es el parámetro que relaciona la masa del material en estado seco (M), con el volumen total del mismo, considerándose este último como la suma del volumen de la parte sólida más el volumen de los poros abiertos y de los poros cerrados (V = VS + VPA + VPC). Lo anterior puede representarse mediante la siguiente expresión:

γC = M / (VS + VPA + VPC)

Como en el caso de la densidad, las unidades más utilizadas para expresar la masa específica corriente son: g/cm3, kg/dm3, kg/m3, ton/m3, etc. o su forma relativa (adimensional). El estado seco a que se hace referencia se logra por medio de tratamiento del material en una estufa a105 oC, hasta que mantenga su masa constante.

Peso específico saturado (masa específica saturada) γS

La masa específica de un material cualquiera, por ejemplo de un árido, se ve afectada por el grado de humedad que posea el mismo. De esta manera, aunque podemos determinar experimentalmente este parámetro para un cierto grado de humedad, no tiene un uso práctico común, pues la humedad varía de manera relativamente rápida y tendríamos que evaluarla continuamente. No obstante, en el caso de los suelos sí se suele utilizar, aprovechándose la relación matemática que existe entre el peso específico seco y el húmedo. Para salvar esta dificultad, se suele usar la masa específica saturada (peso específico saturado) que resulta mucho más práctica, particularmente en los áridos.

La masa o peso específico saturado puede definirse como la relación entre la masa del material en estado saturado (sin humedad superficial) (MS), con el volumen total del mismo, considerándose este último como la suma del volumen de la parte sólida más el volumen de los poros abiertos y de los poros cerrados (V = VS + VPA + VPC). Lo anterior puede representarse mediante la siguiente expresión:

γS = MS / (VS + VPA + VPC)

Peso específico aparente (masa específica aparente) γA

Puede definirse la masa o peso específico aparente como la relación entre la masa del material en estado seco (M) y el volumen total del mismo, considerándose este último como la suma del volumen

de la parte sólida más el volumen de los poros abiertos y de los poros cerrados (V = VS + VPA + VPC). Lo anterior puede representarse mediante la siguiente expresión:

$\gamma A = M / (VS + VPA + VPC)$

La determinación de los volúmenes a que hemos hecho referencia en este apartado se puede realizar siguiendo diferentes procedimientos, de acuerdo con las posibilidades y las exigencias de las normas correspondientes. La balanza hidrostática y el picnómetro son los métodos más utilizados en la práctica de los materiales de construcción.

Masa volumétrica a granel (Peso Unitario o Masa Unitaria)

En los materiales a granel (como la arena, piedra de hormigón, etc.) es muy útil el empleo de un parámetro que relacione su masa con el volumen total, incluyendo los espacios inter–granulares, este es el peso volumétrico, peso unitario (o masa volumétrica a granel).

La determinación experimental del peso volumétrico en el laboratorio se basa en la medición del peso del material contenido en recipientes de una capacidad dada, utilizándose para el llenado de los mismos un procedimiento normalizado. Los recipientes deben ser calibrados previamente con agua, determinándose el factor de calibración 1/V.

Tabla 7. Dimensiones de los recipientes para la medición del peso unitario.

Tamaño de las medidas			
Tamaño Máximo del árido (mm)	**Capacidad de la medida (litros)**	Dimensiones en mm	
		Diámetro interior	Altura interior
Hasta 9,52	3	15	**16**
Hasta 38,1	1	25	**29**
Hasta 102	**3**	**35**	**30**

De acuerdo con el objetivo de la determinación del parámetro, se pueden utilizar dos técnicas operatorias principales para la colocación o acomodo del material dentro del recipiente calibrado utilizado en el ensayo. Los dos tipos de peso unitario se designan con los términos: peso unitario suelto y peso unitario compactado.

- Suelto
- Compactado

En el caso del peso unitario suelto el recipiente se llena en tres capas, las cuales se compactan con 25 golpes de varilla cada una.

Importancia práctica

La importancia práctica de los conceptos aquí descritos se asocia principalmente con la transformación de pesos a volúmenes y viceversa. En cada caso particular se precisa la utilización de uno u otro concepto, en función de cuáles sean los pesos o los volúmenes involucrados en el problema.

Como una primera conclusión parcial de este tema podemos señalar que:

Densidad>PEssh>PEc>PUc>PUs

2.5.2. Porosidad y compacidad

Es el grado en el que el volumen de un material está ocupado por poros y se expresa como la relación entre el volumen ocupado por los poros y el volumen del material. Se puede expresar en tanto por ciento o tanto por uno.

La porosidad se utiliza como índice de otras propiedades del material, tales como resistencia a los esfuerzos, absorción de agua, conductibilidad térmica, durabilidad, etcétera…….

Los materiales densos son utilizados en construcciones que requieran altas resistencias mecánicas o impermeabilidad, por otro lado, los muros de edificaciones que requieran buenas propiedades de aislamiento térmico y sonoro se construyen comúnmente con materiales altamente porosos.

2.5.3. Volumen de los espacios inter-granulares en un material a granel

Entre las partículas de un material a granel siempre quedan espacios formando un conjunto de poros o huecos. En el caso particular de los áridos, el porcentaje de huecos (espacios inter- granulares) es una característica muy importante, pues ello determina el comportamiento del material con diferentes fines, ya sea como árido para morteros u hormigones, para usarse como un material de relleno en alguna aplicación, etc. La manera analítico-experimental de determinar el porciento de huecos contenido en un árido se encuentra establecida en la NC 177:2002 Áridos. Determinación del porciento de huecos. Según dicho documento, se procede de la siguiente forma:

% de huecos = (PEC – PUC) = PEC

Donde:

- PEC…. Peso específico corriente
- PUC… Peso unitario compactado (Peso volumétrico compactado)

Los resultados se expresan con una aproximación de dos cifras.

2.5.4. Superficie específica

La superficie específica es la sumatoria del área superficial de todas partículas que componen el material, la cual se incrementa con la finura de sus partículas. Según A. Betejtin, la superficie específica crece verticalmente en la medida en que aumenta el grado de dispersión de la sustancia. Admitamos un cristal cúbico de cualquier mineral con una arista equivalente a 1 cm. La superficie total será igual a 6 cm3. Si dividimos este cubo en ocho partes, la superficie total de los ocho cubos pequeños será de 12 cm3, y al dividir en cubos pequeños con aristas de 1 mm, la superficie toral será de 60 cm2. Si seguimos dividiendo hasta lograr cubos con arista de 1 mμ, es decir, hasta llegar a las dimensiones de la fase coloidal dispersa, la superficie total alcanzará 6000 m2, siendo el volumen total de la masa igual

a 1 cm3 (es decir, la superficie específica será equivalente a 6x107). En este caso, el número de cubos pequeños será de 1021.

De esta manera, entre la superficie específica x y las dimensiones de los granos y tenemos una razón proporcional inversa expresada mediante la fórmula simple: x=6/y. Esta razón se representa fácilmente en forma gráfica (fig 10).

De los datos aducidos se infiere que para los sistemas microcristalinos, la superficie específica y, por consiguiente, la energía superficial, tienen una importancia tan insignificante que, prácticamente, puede despreciarse. En los sistemas coloidales, esta energía adquiere una importancia excepcional. Precisamente, gracias a ello, toda una serie de propiedades físicas y químicas de las formaciones coloidales, de gran utilidad práctica, se distinguen sensiblemente de las propiedades que no poseen las sustancias cristalinas gruesas.

En el caso de los materiales aglomerantes, la finura es de suma importancia práctica, pues ello influye en la velocidad de las reacciones químicas y en la cantidad de material que puede reaccionar en un tiempo dado, todo lo cual será estudiado con más detalle en el capítulo IV “Aglomerantes”.

2.6. Composición granulométrica

La composición granulométrica es una característica particular de los materiales a granel, como las arenas, gravas, piedra triturada en general y otros materiales granulados. En esencia, la granulometría es la distribución por tamaño de las partículas o granos componentes del material. Esta característica tiene una gran importancia práctica en estudio y trabajo general con los áridos, pues ella influye decididamente en el grado de acomodo de las partículas y por tanto en el grado de compacidad que se logra en al volumen ocupado por él, o lo que es equivalente, en el volumen de los espacios inter-granulares.

Particular interés toma este asunto de la granulometría de los áridos en el caso de su empleo en morteros y hormigones, ya que una mezcla de áridos que en su conjunto proporcione una máxima compacidad es generalmente beneficiosa, al lograrse entonces normalmente mayor resistencia, impermeabilidad, durabilidad, etc. El análisis granulométrico puede efectuarse mediante distintos procedimientos, pero en la práctica de la construcción la granulometría de los áridos se determina mediante el método de tamizado.

2.6.1. Tamizado

El tamizado es el procedimiento mediante el cual, con la ayuda de tamices, se separan las partículas del material ensayado por fracciones de tamaño, en función de la abertura de los orificios de los tamices usados. Durante la operación de tamizado debe someterse al conjunto de tamices a un movimiento lateral y vertical, acompañado de una acción de sacudida, de manera tal que el material se mantenga en movimiento sobre la malla de los tamices.

Un tamiz es un recipiente cuyo fondo posee orificios de una forma (cuadrada o circular) y medida determinada, normalmente especificada por las normas correspondientes. En los tamices los orificios de forma cuadrada generalmente se logran con el empleo de una malla o cedazo, por lo que a la dimensión la abertura se le conoce también como “luz de malla”. Estas dimensiones se suelen expresar en distintos sistemas y unidades (milímetros, pulgadas, número, etc).

Como puede apreciarse en la Tabla No. 8, los tamices se dividen en dos grupos: serie gruesa y serie fina. Observe que la abertura de malla que establece la frontera entre ambas series es 4,76 mm. Esta es precisamente el límite que separa al árido fino (arena) del árido grueso.

Figura 31. Tamices para ensayo.

Fuente: Documento Universidad de Antioquia.

Tabla 8. Tamices de ensayo.

SERIE GRUESA		SERIE FINA			
Luz de de malla	**Luz de malla pulgadas**	**Luz de de malla mm**	**Luz de de malla No.**	**Luz de malla mm**	Luz de malla No
88.9	**3½ ”**	4,76	4		
76.2			**5**	0.297	50
68.5	3 ”	**4.00**	**6**	**0.250**	**60**
50.8	**2 ½”**	**3.36**	**7**	**0.210**	**70**
44.4			8		
38.1	**2 ”**	**2.83**	**10**	**0.177**	**80**
31.7					
25.4	**1 ¾”**	2.38	**12**	0.149	100
22.2					
19.1	1 ½”	**2.00**	**14**	**0.125**	**120**
	1				

Tabla 9. Tamices de la serie de Tyler normados por la ASTM.

No.	3	1½"	¾"	3/8"	No.4	No.8	No.1	No.3	No.5	*No.10*
mm	76,2	38,1	19,1	9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,29	*0,149*

Para efectuar el ensayo granulométrico los tamices deben colocarse de manera superpuesta, de mayor abertura a menor abertura. Luego de tomar una muestra representativa del árido se realiza la preparación de la misma, se seca hasta peso constante (a una temperatura de 105-110oC) y se toma una cantidad en peso que estará en correspondencia con el tamaño máximo del mismo. Estas cantidades se muestran en la Tabla No. 10.

Tabla 10. Peso de la muestra para el ensayo granulométrico.

Fracciones de áridos		Peso de la muestra
Fina	4,16 – 0,149	**50** **0**
Gruesa	25 – 4,76	**100** **0**
	38 - 25	**150** **0**
	76 – **38**	**300** **0**

El tamizado puede hacerse de manera mecanizada mediante el empleo de equipos denominados tamizadores, o manualmente. En todo caso la operación se llevará a cabo mediante un movimiento lateral y vertical del conjunto de tamices, acompañado también de una acción de sacudida, de manera tal que el material se mantenga en movimiento sobre el tamiz y que propicie el paso de las partículas a través de los orificios del mismo.

Figura 32. Tamizadora (Marca Haver & Boecker)**.**

Fuente: http://www.weavingideas.com.

Para efectuar el ensayo, la muestra previamente pesada se deposita sobre el tamiz superior y se le coloca la tapa, comenzando la operación de tamizado (manual o mecanizada). Si el ensayo se realiza manualmente, debe hacerse sobre un paño o superficie que permita recuperar cualquier porción de material perdido accidentalmente, vibrando el conjunto (tamiz, tapa y fondo) al menos dos minutos cada tamiz. Como consecuencia de la vibración, las partículas del árido serán separadas en función de

sus dimensiones, pasando por cada tamiz los granos más finos y quedando retenidos los más gruesos. El material más fino pasará entonces por todos los tamices y quedará acumulado en el recipiente final sin orificios, denominado “fondo”.

Terminado el tamizado, se pesa el material retenido en cada tamiz y se tabulan los resultados obtenidos. Los resultados se expresarán con aproximación al número entero correspondiente.

Para una mejor interpretación de los resultados del ensayo granulométrico, se acostumbra a expresar los resultados en por cientos con respecto al peso total de la muestra utilizada. (Retenido parcial, retenido acumulado y por ciento pasados por cada tamiz). Un ejemplo de la forma de expresión de los resultados de un ensayo granulométrico se muestra en la Tabla No.11.

Tabla 11. Tabla Gramulométrica.

TAMIZ		*RETENIDO PARCIAL*	*RETENIDO ACUMULADO*		*PASADO*
(mm)	**(No.)**	**g**	g	**%**	*%*
9,52	**3/8”**				
4	**4,76**				
8	**2,38**				
1	**1,19**				
3	**0,59**				
5	**0,295**				
100	**0,149**				
Fondo					

2.6.2. Representación gráfica de la granulometría

Los resultados del ensayo de tamizado de los áridos pueden representarse de manera gráfica, resultando de gran valor práctico en las interpretaciones de la composición granulométrica, que de esta manera se pueden apreciar con mayor facilidad que cuando se hace la representación de manera tabulada. Generalmente se acostumbra a representar los gráficos de la granulometría de los áridos de dos maneras principales: retenido parcial vs abertura de los tamices o porciento pasado vs abertura de tamices. De acuerdo con el propósito del análisis, se pueden utilizar escalas naturales o logarítmicas para la abertura de los tamices.

La interpretación de la granulometría de los áridos, particularmente cuando se comparan varios de ellos, puede hacerse sobre un mismo gráfico donde se representan las curvas granulométricas de cada uno de ellos. Así, mediante una simple observación, se puede conocer cuál de ellos es más o menos grueso, se puede obtener muy fácilmente el tamaño máximo, dónde se encuentran los defectos (en cuanto a composición granulométrica) de cada uno de los áridos representados, etc.

La representación gráfica de la granulometría de los áridos también permite, de manera muy simple, la identificación o delimitación de los husos granulométricos, es decir, el intervalo donde se especifica que debe estar la composición granulométrica de los áridos o mezcla de áridos para lograr determinada propiedad o simplemente cumplir una especificación dada.

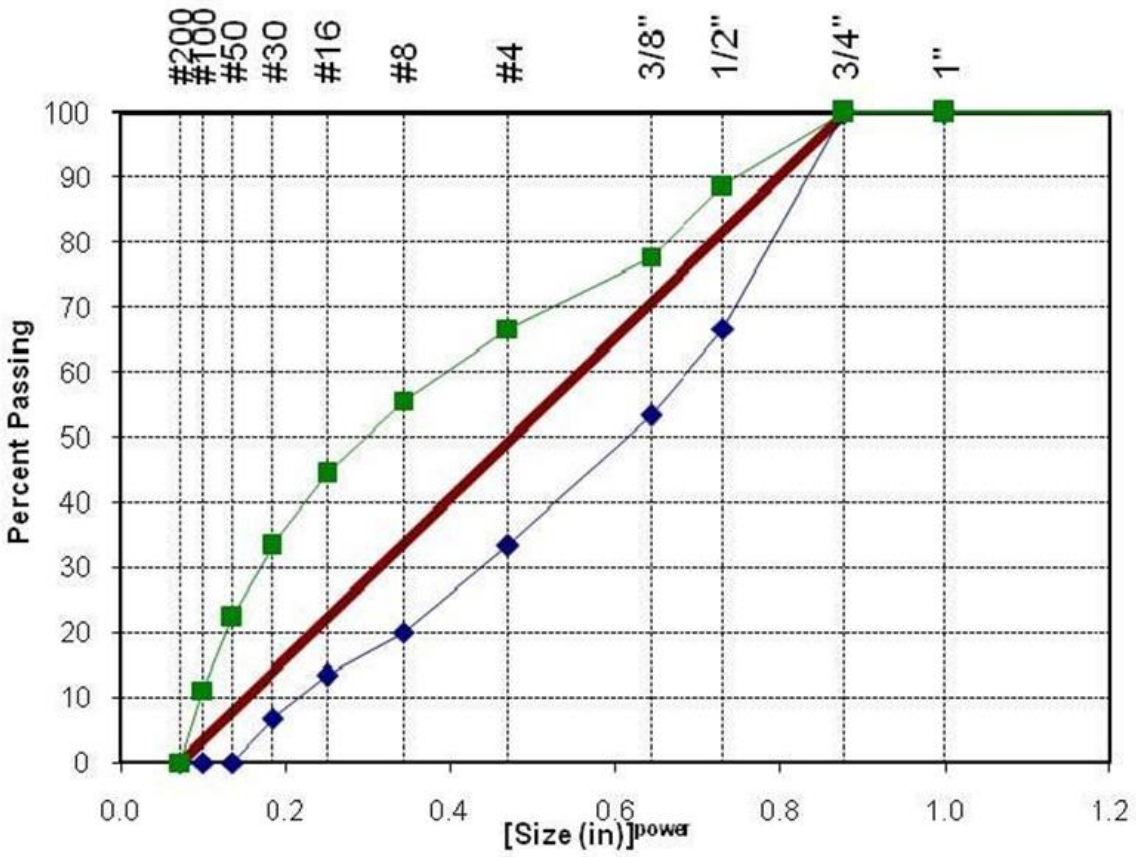


Figura 33. Representación gráfica de la granulometría de áridos.

Fuente: Marc Rached et al. Texas Univ.

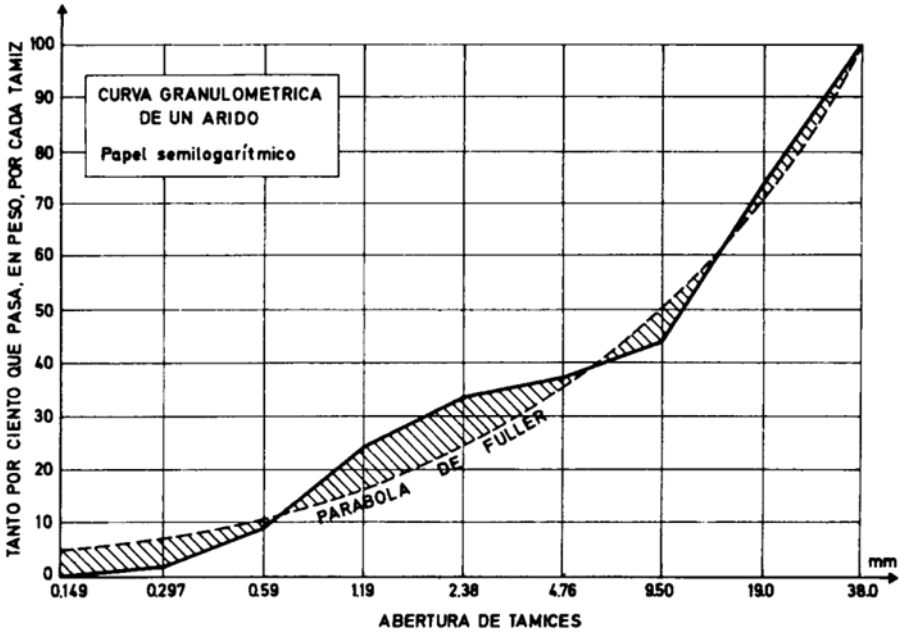


Figura 34. Granulometría de un árido con respecto a una curva ideal.

Fuente. Univ. de Castilla la Mancha. www. ingenieriaRural.com.

En los áridos se distinguen dos tipos de granulometría:

1. Granulometría continua (aparecen partículas de diferentes tamaños).
2. Granulometría discontinua (se omiten ciertos tamaños de las partículas).

2.6 .3. Tamaño máximo y módulo de finura

Un concepto de mucha aplicación práctica en el trabajo común con los áridos es el denominado "tamaño máximo". El tamaño máximo se define como la abertura del tamiz inmediato superior al tamiz que presenta un % retenido acumulado igual o mayor de 15. Para esto se utilizan, además de los tamices normados, los adicionales.

Módulo de finura

Otro concepto que también se utiliza mucho en el trabajo con los áridos es el denominado "módulo de finura". Se define como la suma de los % retenidos acumulados en cada uno de los tamices normados dividido por 100.

$$MF = \frac{\Sigma.RA(\%)}{100}$$

El MF es un factor empírico que brinda un índice de finura o grosor de los áridos, pero el mismo no da criterios sobre la distribución granulométrica. Es un factor que tiene gran importancia al utilizar el árido fino en hormigones.

La ASTM rechaza las arenas que no tengan el MF entre 2,30 -3,10.

La NC 251:2005 plantea que el MF de la arena debe estar comprendido en el intervalo entre 2.20 - 3.58.

Clasificación

Si: MF es mayor 6 piedras. Arenas si MF mayor 3.20 gruesas si MF menor 2.10 finas MF entre 2.10-3.20 medias

Resumiendo, podemos plantear que conociendo el MF de un árido podemos conocer aproximadamente el tamaño promedio del árido, pero sin indicar características de su granulometría.

2.7. Métodos para combinar áridos

En función de los objetivos que se persigan y de los medios y condiciones generales con que se cuente en una situación dada, se pueden utilizar distintos métodos o procedimientos para determinar la proporción en la que resultaría más conveniente mezclar dos o más áridos o fracciones granulométricas. Se han estudiado y aplicado métodos de carácter experimental, métodos analíticos basados en determinados parámetros de los agregados involucrados en análisis, y varios métodos gráficos que se basan en la composición granulométrica de los áridos.

2.7.1. Métodos experimentales

Los métodos experimentales se apoyan en resultados directos de los ensayos de laboratorio, determinándose la propiedad o parámetro que se persigue y seleccionándose la proporción que mejor comportamiento tenga. En oportunidades el análisis es bastante complejo, pues no siempre la proporción más conveniente se relaciona directamente con un valor característico (máximo, mínimo, promedio, etc.), sino que deben hacerse interpretaciones del posible comportamiento del conjunto de áridos cuando se encuentre desempeñado sus funciones en el aglomerado o en definitiva en el uso a que se destine. Dada la imposibilidad práctica de experimentar con todas las posibles combinaciones de las materias primas disponibles, se debe realizar un diseño de experimento donde mediante tanteo, se pueda llegar a seleccionar la proporción más conveniente, con un error aceptable. Indudablemente que los métodos más precisos son los experimentales, pues se basan en la práctica concreta, pero ellos tienen el inconveniente de que resultan en general muy laboriosos y requieren de mucho tiempo y recursos materiales para su realización.

Un ejemplo de aplicación de los procedimientos experimentales para la mezcla de áridos es en el método de diseño de mezclas de hormigón del profesor Dr. Sc. Ing. Viterbo A. O´Reilly Díaz. En dicho método, para la determinación de las proporciones en que deben mezclar los áridos a utilizar en un hormigón dado, se toma como criterio que el porcentaje de vacío y la superficie específica mínimos de una mezcla de áridos es la que señala la composición óptima, la cual requerirá una cantidad mínima de cemento. El método establece que para determinar el porcentaje de vacío mínimo, hay que ensayar las mezclas de los áridos con las proporciones en peso de arena y gravilla siguientes: (35:65, 60:40, 45:55 50:50 y 55:45). Tomando como base el peso específico corriente y el peso unitario compactado de cada una de las mezclas, se determina entonces el porcentaje de vacío de cada una de ellas. Se elige como combinación óptima la que tenga menor porcentaje de vacío.

2.7.2. Métodos analíticos

El método analítico más empleado para en el propósito que se expone aquí, es el que toma como base el módulo de finura de las fracciones a considerar. Como se conoce, el módulo de finura de un árido nos proporciona una idea sobre el tamaño promedio de las partículas componentes del mismo, no así de su granulometría. Un factor de mucha importancia en las mezclas donde se emplean los áridos es la superficie específica de los mismos, ya que influye, entre otros aspectos, en la cantidad de agua necesaria para lograr una cierta consistencia. En general, el incremento del contenido de agua en una mezcla afecta seriamente sus propiedades, por lo que generalmente se trata de utilizar el mínimo contenido posible, que posibilite adecuadamente las distintas operaciones a realizar. Como se comprenderá, a medida que disminuye el módulo de finura de un árido, mayor será la exigencia de agua, pues ya de por sí tendrá mayor área que mojar y que lubricar. Es por eso que en ocasiones se establecen módulos de finura ideales para las mezclas de áridos a utilizar en la fabricación de aglomerados, los cuales están contemplados como especificaciones de las normas de muchos países.

Si tomamos como base el conocimiento del módulo de finura deseado, ya sea por la especificación establecida por una norma o por recomendaciones empíricas, es posible mediante un método analítico simple, calcular las proporciones en que han de mezclarse dos áridos (que no poseen el MF deseado), para que la mezcla resultante satisfaga el requerimiento planteado. Partiendo de los módulos de finura de cada árido se puede plantear la siguiente expresión:

–

MF (mezcla) = MFA . % A + MFB . % B =

Donde:

- MF (d) …… Módulo de finura deseado en la mezcla de áridos
- MFA y MFB …… Módulo de finura del árido A y del árido B % A y % B…….. % del árido A y del árido B en la mezcla

El problema planteado puede resolverse fácilmente si logramos formular otra ecuación con esas dos incógnitas. Efectivamente, se puede plantear que: % A + % B = 100 %. Así podemos despejar y obtener que:

$$\% A = (MFB - MF (d)) / (MFB - MF A) =$$

Por ejemplo, supóngase que se dispone de dos arenas, una con un módulo de finura de 3,34 (que resulta muy gruesa) y otra con módulo de finura igual a 1,72 (que resulta muy fina). Si se desea obtener una arena con un módulo de finura adecuado (2,8 por ejemplo), puede procederse del siguiente modo:

$$\% A = (MFB - MF (d)) / (MFB - MF A) =$$

$$\% A = (1,72 – 2,8) / (1,72 – 3,34) = 0,67$$

Debe mezclarse:

67 % de la arena A (MF 3,34) y 33 % de la arena B (MF 1,72)

2.7.3. Métodos gráficos

Como ya se ha analizado antes, generalmente es conveniente lograr la máxima compacidad posible en las mezclas de hormigón, pues ello favorece normalmente su resistencia, impermeabilidad, durabilidad, etc. Precisamente, el interés por lograr buena granulometría en la mezcla de áridos tiene como objetivo fundamental el incremento de la compacidad del conjunto, a partir de llenar los espacios inter-granulares con material cada vez más fino. O sea, que de modo general, en la mayoría de los casos lo ideal es tener una mezcla con máxima compacidad y superficie específica mínima. Es aquí donde los efectos de compacidad y superficie específica se manifiestan de modo opuesto, pues mientras por un lado tratamos de buscar máxima compacidad llenando los espacios con grano más fino (vacío mínimo), esto hace que se incremente la superficie específica. La solución está entonces en encontrar una proporción que satisfaga las exigencias principales sin comprometer otros parámetros técnicos.

Claro que áridos con distinta composición granulométrica pueden tener el mismo módulo de finura, lo que significa que no es suficiente lograr un determinado módulo de finura en la mezcla de áridos para garantizar una elevada compacidad. Se requiere de una cierta

granulometría en el conjunto formado por la mezcla de áridos, para que la misma tenga el comportamiento deseado, lo cual significa que no existe una granulometría única para satisfacer las exigencias de las mezclas de morteros, hormigones y otros aglomerados o masas de áridos.

Varios investigadores han realizado profundos estudios sobre la problemática de la granulometría de los materiales a granel, por ejemplo Füller, Thomson, Bolomey y otros muchos. A partir de los resultados de estos trabajos investigativos han surgido múltiples curvas granulométricas que se recomiendan como “ideales” para lograr una máxima compacidad en un material a granel. De este modo, dichas curvas pueden usarse como referencia, para mediante la combinación de otros áridos que de manera independiente no tienen la granulometría deseada, se pueda obtener uno resultante cuya curva granulométrica se acerque a ella. Entre las curvas ideales más conocidas se encuentra la de

Füller (parábola de Füller), que desde fecha tan temprana como 1907 ya comenzó a utilizar. A continuación se presenta su expresión general, en la cual “y” representa el por ciento pasado por un tamiz de abertura “d”, de un árido de tamaño máximo “D”.

$$y \; 100 \; \sqrt{\frac{d}{D}}$$

En las condiciones actuales en que se realiza la producción de áridos en Cuba, las inmensas mayorías procedentes de la trituración de las rocas y separadas en distintas fracciones por tamaños mediante zarandas vibratorias, por ejemplo 38-19 mm, 19-10 mm, 5-0 mm, es imposible lograr una granulometría continua cuando se usan cualquiera de las fracciones gruesas mezcladas con la arena. Aunque constituye una práctica habitual la producción de hormigones mezclando solamente una fracción gruesa y una fina, ello resulta totalmente inadecuado en relación a la optimización del cemento en la mezcla.

En las condiciones actuales en que se realiza la producción de áridos en Cuba, las inmensas mayorías procedentes de la trituración de las rocas y separadas en distintas fracciones por tamaños mediante zarandas vibratorias, por ejemplo 38-19 mm, 19-10 mm, 5-0 mm, es imposible lograr una granulometría continua cuando se usan cualquiera de las fracciones gruesas mezcladas con la arena. Aunque constituye una práctica habitual la producción de hormigones mezclando solamente una fracción gruesa y una fina, ello resulta totalmente inadecuado en relación a la optimización del cemento en la mezcla.

Desde luego que no es posible ni necesario obtener en la práctica una granulometría que exactamente se corresponda con la “ideal”. Lo más apropiado es establecer curvas límites que formen un huso granulométrico, dentro del que pueden considerarse adecuadas o simplemente establecerse como especificaciones en las normas correspondientes. Por otro lado es muy conveniente tener en cuenta que no existe una granulometría que resulte “ideal” para todas las situaciones. En cada caso particular, en función de los objetivos perseguidos, se deberá seleccionar la composición granulométrica que mejor cumpla con los requerimientos de la mezcla donde se pretende utilizar. Si la mezcla de áridos que se quiere obtener es para su empleo en una mezcla de hormigón, factores tales como el contenido de cemento, la consistencia, forma de las partículas, etc., deben tomarse en consideración.

Entre los métodos gráficos que más se utilizan para la determinación de la proporción más conveniente en la cual se deben combinar varios áridos para logar una cierta granulometría se encuentran los del Nomograma y Rothfuchs.

Método del Nomograma

Este método es recomendable utilizarlo para definir la proporción en que deben mezclarse convenientemente dos áridos, que de manera independiente no poseen la granulometría deseada (pudieran ser especificaciones establecidas en una norma u otra cualquiera), y que mezclándolos pudiera lograrse o al menos acercarse más a ella. Desde luego que para poder aplicar el método se requieren como datos la granulometría de cada uno de los áridos. La granulometría deseada pudiera ser una especificación granulométrica dada o simplemente una que se seleccione en función de los objetivos de la mezcla, por ejemplo la parábola de Füller. Tal como se explicó antes, la granulometría se puede expresar tanto en forma de un solo valor de por ciento que pasa por cada tamiz (una curva), como en forma de un intervalo de valores que formen un “huso” (dos curvas).

El procedimiento se basa, en esencia, en ir definiendo gráficamente el intervalo de proporciones en que pudieran mezclarse los dos áridos para que la mezcla resultante posea el por ciento que pasa por cada tamiz, que se ha establecido previamente como “deseada”. Para ello se construye un cuadrado, cuyos lados verticales se gradúan en % pasado (de manera ascendente de 0 a 100). Los lados horizontales (también graduados en %) representan la proporción en que se pudieran combinar los áridos involucrados en el análisis, por lo tanto, los valores para cada combinación deben sumar 100%, por ejemplo 30% de un árido y 70% del otro, 40% de uno y 60% del otro, etc.

La definición de a cuál árido corresponde cada una de las escalas que forman el cuadrado es esencial y un error en ello arruina totalmente los resultados del procedimiento. Una manera recomendable es ubicar primeramente los áridos a combinar en las escalas horizontales, en una posición que puede ser cualquiera (en la escala superior uno y en la inferior el otro). Desde luego, si ubicamos uno cualquiera de los áridos en la escala inferior de izquierda a derecha (de 0 a 100%), el otro deberá estar en la escala superior graduado de derecha izquierda, de manera tal que cualquier vertical que tracemos defina porcentajes que se complementen (que sumados den 100%).

En función de la ubicación de los áridos decidida anteriormente, quedará definido entonces a cuál de los áridos corresponden las escalas verticales de % pasado. De esta manera, si por ejemplo ubicamos un árido A en la escala inferior de 0 a 100% de izquierda a derecha, la escala vertical derecha será la que represente al 100% de ese árido, por lo que se corresponderá con la escala de % pasado de A. Lógicamente que la otra escala vertical representará al % pasado de B, que coincidirá con el lugar donde está el 100% de B. Un ejemplo es la mejor forma de ilustrar lo explicado.

Tabla 12. Tabla granulométrica del método del monograma (libro M.C., 2018).

TAMIZ	% Pasa	% Pasa	% Pasa
25,	10	10	**10**
19,	10	5	**60-80**
9,5	9	1	**25-50**
4,7	5	0	**15-30**
2,3	**0**	**0**	**0**

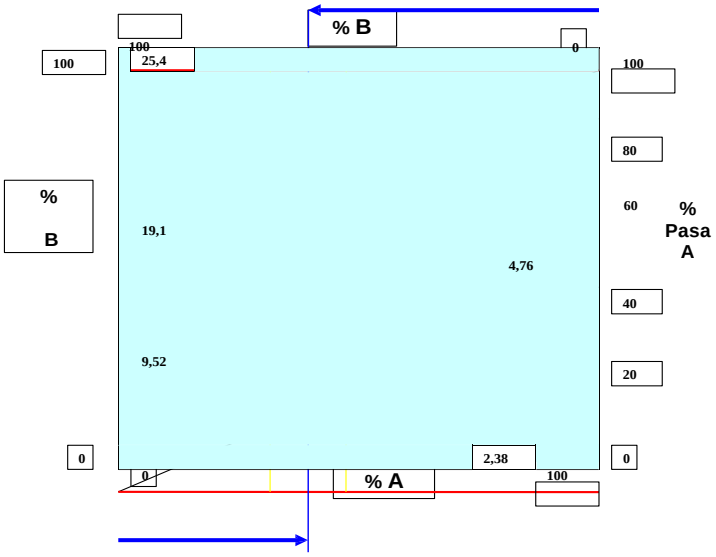


Figura 35. Gráfico granulométrico del metodo del monograma (libro M.C., 2018).

Tabla 13. Granulometría en porcentaje (M.C., 2018).

TAMIZ	% Pasa Mezcla	% Pasa
25,	10	**10**
19,	10	**60-80**
9,5	9	**25-50**
4,7	5	**15-30**
2,3	**0**	**0**

Método de Rothfuchs

Es un método que puede utilizarse para determinar las proporciones en que pueden mezclarse convenientemente varios áridos para obtener o acercarse lo más posible a una cierta granulometría. Como en el método del Nomograma, se requieren como datos la composición granulométrica de los "n" áridos a combinar y la granulometría que se desea obtener, que pudiera ser una especificación de una norma, de una tecnología dada, etc.

Este método es menos transparente que el del Nomograma, en el sentido de que no se aprecia fácilmente de manera directa, el valor que puede obtenerse para cada tamiz en las posibles combinaciones. Es un método muy sencillo, que tiene la ventaja con respecto al anterior de que puede usarse para combinar dos o más áridos.

El procedimiento para la aplicación del método puede resumirse en la siguiente secuencia de pasos:

1ro. Dibujar un rectángulo cuya rectangularidad sea aproximadamente dos, ubicado en posición tal que el lado mayor sea horizontal. Se recomienda utilizar papel cuadriculado o hacerlo en una hoja de papel en posición apaisada.

2do. Graduar de 0 a 100% los lados verticales del rectángulo.

3ro. Marcar una diagonal en el rectángulo, desde el vértice superior derecho hasta el inferior izquierdo.

4to. Ubicar en el lado inferior del rectángulo la abertura de los tamices. Para efectuar esta operación debe entrarse, usando la escala vertical, con el valor correspondiente al por ciento pasado para cada tamiz de la granulometría deseada (o especificación) hasta interceptar la diagonal trazada, y bajar entonces hasta el lado horizontal inferior, donde se marca la abertura del tamiz correspondiente.

5to. Teniendo entonces en el eje de abscisas la abertura de los tamices y en las ordenadas el

% pasado por cada tamiz, se trazan las curvas granulométricas de los "n" áridos involucrados en la mezcla.

6to. Utilizando una regla transparente se traza, para cada curva granulométrica, un segmento de recta en una posición tal que compense las áreas que le queden por encima y por debajo de la misma. Debe tenerse mucho cuidado en esta operación, pues de ello depende en gran medida el resultado obtenido.

7mo. El extremo inferior del segmento ubicado más a la derecha (de los trazados en el paso anterior) se une con el superior del inmediato a la izquierda con una recta y así sucesivamente hasta terminar con todos. Siempre habrá n-1 rectas de este tipo.

8vo. A partir de los puntos de intercepción de las rectas trazadas en el paso anterior con la diagonal del rectángulo, se proyecta hacia una de las escalas laterales, quedando entonces perfectamente definidos los por cientos en que han de mezclarse los "n" áridos para obtener (o acercarse) a la granulometría deseada.

9no. Conociendo ya los por cientos en que han de mezclarse los áridos, se puede entonces calcular el por ciento pasado por cada uno de los tamices del árido que resulta de la mezcla

Tabla 14. Tabla granulométrica del método de Ruthfuchs (M.C., 2018).

TAMIZ	% Pasa	% Pasa	% Pasa	Füller
38,			10	**10**
25,			8	**8**
19,		10	5	**7**
12,		7	2	**5**
9,5	10	3	4	**5**
4,7	9	3	0	**3**
2,3	8	0		**2**
1,1	6			**1**
O,5	4			**1**
0,295	2			**8**
0,149	**5**			**6**

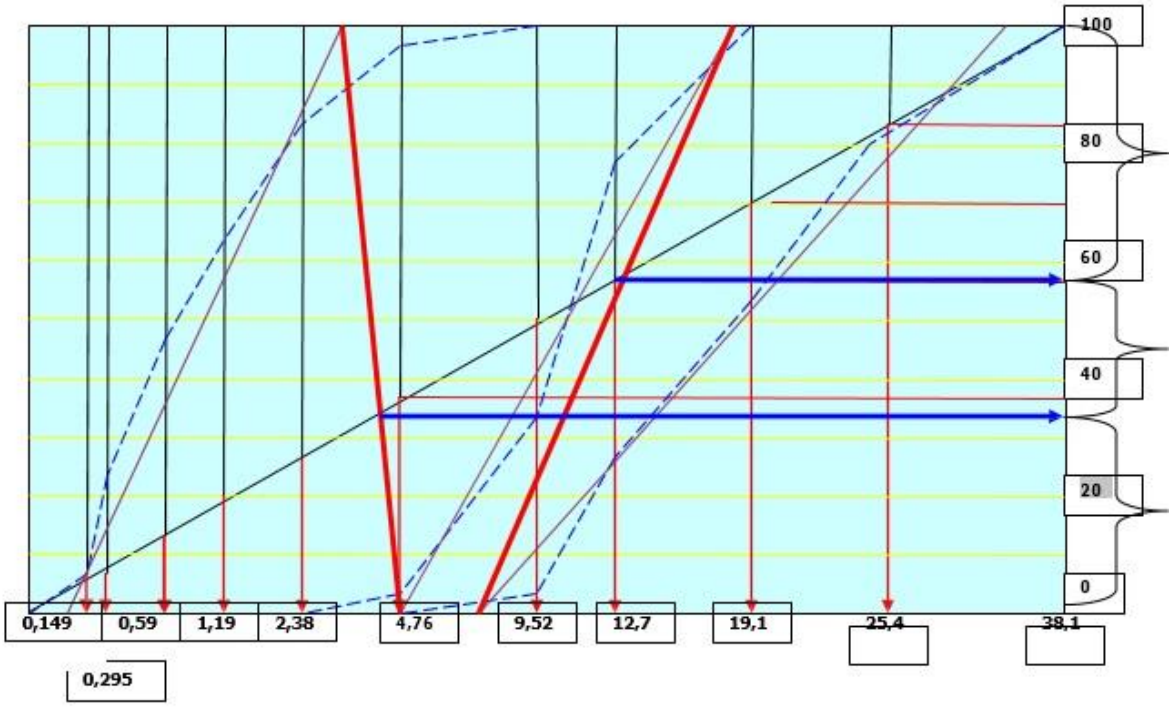


Figura 36. 35% Arena, 26% Gravilla y 39% Piedra.

Tabla 15. Porcentaje granulométrico port amices/material (M.C., 2018).

TAMIZ	% Pasa	Füller
38,1	0,35.100+0,26.100+0,39.100= **100**	**10**
25,4	0,35.100+0,26.100+0,39.81=	**8**
19,1	0,35.100+0,26.100+0,39.53=	**7**
12,7	0,35.100+0,26.76+0,39.28=	**5**
9,52	0,35.100+0,26.34+0,39.4=	**5**
4,76	0,35.96+0,26.3+0,39.0=	**3**
2,38	0,35.84+0,26.0+0,39.0 =	**2**
1,19	0,35.62+0,26.0+0,39.0=	**1**
O,59	0,35.47+0,26.0+0,39.0=	**1**
0,295	0,35.24+0,26.0+0,39.0=	**8**
0,149	**0,35.5+0,26.0+0,39.0=**	**6**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alamán, J. (2000). Materiales Metálicos, Madrid, España. Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Argüelles, R. Arriaga, F., Atienza, J. (1999). *Estructuras de Acero*, Bellisco, Madrid, España.

Arredondo, E. (1990). Generalidades sobre Materiales de Construcción, Madrid, España. Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Arredondo, E. (1991). Piedras, Cerámica y Vidrio, Madrid, España. Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Arredondo, U. (1991). Yesos y Cales*,* Madrid, España. Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Arredondo, E. (1992). Madera y Corcho, Madrid, España. Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Askeland, Donald R. (2001). *Ciencia e ingeniería de los materiales,* Paraninfo.

Bengoa, E. González, J. Polanco, J. y Villa, M. ***(1989****). Materiales de Construcción*, Universidad de Cantabria.

Betejtin, A. (1977). Curso de Mineralogía. Moscú, Rusia. Ediciones MIR.

Callister, William D. (2009). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, Limusa.

Fernández Cánovas, M. (1991). Materiales Bituminosos*, Madrid España,* Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Fernández Cánovas, M. (1994). Terapéutica del *Hormigón Armado,* Servicio de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Fernández Cánovas, M. (2007). **Hormigón**, Servicio de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Gallucci, Emmanuel. (2005). "MICROSTRUCTURAL CHARACTERISATION METHODS FOR CEMENTITIOUS MATERIALS". ppt. EPLF Doctoral School.

Gálvez, M. (2010). Problemas de Materiales de Construcción, Madrid España, Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Gibson, F. (1994). *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, Nueva York.

H. F. W. Taylor, T. (1967). La química de los cementos. Vol II. Bilbao, España. Ed. Urmo.

H.F.W. Taylor, T. (1990). Cement Chemistry. London, Inglaterra. Academic Press.

Kraemer, C. y Del Val, M.A. (1998). *Firmes y Pavimentos*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

Llorca, A; y Gálvez, P. (2000). Problemas de Materiales Compuestos, Madrid España, Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Ministerio de Fomento, B. (2002). *Guía de Aplicación de la Instrucción de Hormigón Estructural*. Madrid. *Edificación*,

Ministerio de Fomento, G. (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural EHE*, Madrid.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes, N. (1985). *Pliego General de Condiciones para la Recepción de Yesos y Escayolas RY-85*, Madrid.

Ramachandran, V. S. and James J. Beaudoin. (2001). "Handbook of Analytical Techniques in Concrete and Technology". New Jersey, USA. Noyes Publications.

Ramachandran, V. S., R. M. Paroli, J. Beaudoin and Ana Delgado. (2002). Handbook of thermal analysis of construction materials. Noyes Publications.

Ramos, M. A. (1988). *Ingeniería de los materiales plásticos*, Díaz de Santos.

Taylor, H.F.W. (1990). Cement Chemistry. London, Inglaterra. Academic Press.

West, Anthony R. (1998). "Solid State Chemistry and its Applications. Vol. 1. John Wiley and Sons.

Ingeniería y Tecnología

3ciencias