



**Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

**CARACTERIZACIÓN E INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA DE LOS MATERIALES
UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN CIVIL EN GUATEMALA**

**Ludwyg Cristóbal Estuardo Herrera Villatoro
Asesorado por el Ing. Julio Roberto Luna Aroche**

Guatemala, octubre de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN E INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA DE LOS MATERIALES
UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN CIVIL EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

Ludwyg Cristóbal Estuardo Herrera Villatoro
Asesorado por el Ing. Julio Roberto Luna Aroche

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
SECRETARIA	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN E INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN CIVIL EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el 21 de mayo de 2004.

Ludwyg Cristóbal Estuardo Herrera Villatoro

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
GLOSARIO.....	IX
OBJETIVOS	XV
RESUMEN.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA SINTETIZADA DE GUATEMALA.....	1
1.1. Geomorfología.....	1
1.2. Marco geológico regional	4
1.3. Estratigrafía	4
1.3.1. Rocas metamórficas (Paleozoicas).....	4
1.3.2. Rocas sedimentarias del Carbonífero y Pérmico	5
1.3.3. Carbonatos del Pérmico	5
1.3.4. Formación Todos Santos	5
1.3.5. Carbonatos del Cretácico	6
1.3.6. Rocas ígneas del Cretácico Jurásico (ultrabásicas)....	6
1.3.7. Rocas intrusivas	6
1.3.8. Sedimentos clásticos marinos	7
1.3.9. Arenisca Subinal.....	7
1.3.10. Sedimentos marinos.....	7
1.3.11. Yeso y marga	7
1.3.12. Calizas, areniscas y conglomerados	8
1.3.13. Depósitos continentales	8
1.3.14. Rocas volcánicas sin dividir.....	8
1.3.15. Rocas volcánicas.....	8

1.3.16.	Cenizas volcánicas.....	9
1.3.17.	Aluviones cuaternarios	9
1.4.	Estructura	11
1.4.1.	Tectónica de placas.....	11
1.4.2.	Sistemas plegados	11
1.4.3.	Principales fallas	12
2.	PRINCIPIOS BÁSICOS PARA RECONOCER, EXPLORAR Y EVALUAR UNA CANTERA	15
2.1.	El pasado y presente de los materiales de construcción.....	15
2.2.	Principios básicos.....	15
2.2.1.	Etapa de reconocimiento.....	18
2.2.2.	Etapa de exploración.....	20
2.2.3.	Etapa de evaluación.....	26
2.2.4.	Etapa de diseño y manejo	29
3.	PIEDRA DE CONSTRUCCIÓN	39
3.1.	Historia de la piedra dimensional.....	39
3.2.	Características y factores de la selección en la piedra dimensional	40
3.3.	Métodos de extracción de la piedra dimensional.....	45
3.4.	Producción comercial de la piedra dimensional.....	47
3.5.	Granito.....	50
3.6.	Basalto	52
3.7.	Caliza	54
3.8.	Cal	58
3.9.	Calcita	60
3.10.	Mármol.....	61
3.11.	Serpentinita	64

3.12.	Gneis	65
3.13.	Esquisto.....	66
3.14.	Filita.....	68
3.15.	Pizarra	68
3.16.	Piedra de blindaje.....	70
3.17.	Roca para relleno	76
3.18.	El rol del geólogo.....	80
4.	AGREGADO GRUESO	81
4.1.	Propiedades del agregado grueso.....	81
4.1.1.	Fuerza	82
4.1.2.	Absorción de agua y encogimiento	83
4.1.3.	Resistencia a la abrasión, erosión y pulido.....	84
4.1.4.	Consistencia laminosa	86
4.1.5.	Resistencia al medio ambiente	88
4.1.6.	Distribución del tamaño de las partículas	89
4.2.	Agregado grueso de rocas trituradas	89
4.2.1.	Métodos de extracción.....	91
4.2.1.1.	Primaria	91
4.2.1.2.	Secundaria	92
4.2.2.	Categorías de trituración	92
4.2.2.1.	Trituradora de mandíbula	93
4.2.2.2.	Triturador giratorio	93
4.2.2.3.	Trituradora de cono	93
4.2.2.4.	Trituradora de impacto	93
4.2.2.5.	El cernido	96
4.3.	Agregados que ocurren naturalmente	96
4.3.1.	Arena y grava	96
4.3.2.	Formación de depósitos	97

4.3.2.1.	Depósitos residuales	98
4.3.2.2.	Depósitos coluviales.....	99
4.3.2.3.	Depósitos aluviales.....	101
4.3.2.4.	Planicies aluviales	102
4.3.2.5.	Depósitos marinos.....	103
4.3.2.6.	Depósitos glaciales.....	106
4.3.2.6.1.	Arenas y gravas glaciales	107
4.3.2.6.2.	Gravas fluvio-glaciales.....	108
5.	AGREGADOS FINOS	113
5.1.	Definición y usos de los agregados finos	113
5.2.	Especificaciones y exámenes.....	114
5.3.	Mineralogía de los agregados finos.....	121
5.4.	Fuentes de agregados finos	130
5.5.	Distribución de tamaños de grano en los agregados finos	132
5.6.	Forma y textura de los granos de arena.....	136
6.	PRODUCTOS ESTRUCTURALES DE ARCILLA.....	137
6.1.	Introducción	137
6.2.	El proceso de fabricación de ladrillos	138
6.3.	Los componentes de arcilla para ladrillo	144
6.4.	Ocurrencia y distribución de arcillas para hacer ladrillos.....	157
6.5.	Principales arcillas para hacer ladrillos.....	158
6.6.	Tuberías vitrificadas de arcilla	161
6.7.	Losas para pisos y paredes.....	162
6.8.	Arcilla expandida	164
7.	CEMENTO PÓRTLAND Y SUS MATERIAS PRIMAS.....	167
7.1.	Historia	167

7.2.	Materia prima para el cemento Pórtland.....	168
7.3.	Mineralogía de la materia prima para el cemento Pórtland	172
7.4.	Procesamiento del cemento Pórtland.....	173
7.5.	Producción de concreto.....	176
7.5.1.	Reacción álcali-sílice	180
7.5.2.	Reacción álcali-silicato	181
7.5.3.	Reacción álcali-carbonato.....	181
7.6.	Bloques (block) de concreto y piedra reconstituida	182
7.7.	Estabilización de la base para carreteras.....	183
8.	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MENORES	185
8.1.	Vidrio (arena sílica)	185
8.2.	Yeso	191
8.3.	Aislantes y agregados livianos	194
	CONCLUSIONES	199
	RECOMENDACIONES	203
	BIBLIOGRAFÍA	207

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

No.	FIGURAS	Página
1.	Zonas fisiográficas de Guatemala	3
2.	Mapa geológico de Guatemala.....	10
3.	Situación tectónica	13
4.	Fallas geológicas de Guatemala	14
5.	Equipo de cables percusivos	21
6.	Equipo de taladro rotatorio	21
7.	Taladro de vuelo continuo	23
8.	Taladro con tronco hueco.....	23
9.	Gusanillos de taladro usados en perforación rotatoria	24
10.	Método por perfiles.....	28
11.	Método de los polígonos	28
12.	Método por isopacas	29
13.	Efecto del desarrollo de canteras en el flujo de agua subterránea.....	31
14.	La falla de la pendiente en rocas consolidadas.....	35
15.	Cortado de granito con mechero de gas	46
16.	Cortado de mármol con cables continuos	47
17.	Cantera San Lorenzo –mármol blanco-.....	63
18.	Cantera San Lorenzo –mármol blanco-.....	63
19.	Cantera El Palmar –serpentina-	65
20.	Cantera El Palmar –serpentina-	65
21.	Metamorfismo regional de las rocas metamórficas	69
22.	Las cuatro zonas principales de desgaste, debido al clima en el ambiente costero marino	73
23.	Cuatro principios de los principales tipos de trituradoras	94
24.	Abanicos aluviales.....	100

25.	Movimiento de masa	103
26.	Distribución de los sedimentos en la región litoral.....	105
27.	Depósitos glaciales.....	107
28.	Morrenas -camellones de hielo-	109
29.	Descripción de la forma del grano	119
30.	Categorías de redondez para granos de arena.....	121
31.	Agregado fino, bajo microscopio binocular de baja resolución	127
32.	Sección transversal pulida de concreto	128
33.	Los métodos de extracción de la arcilla en relación con los estratos ..	140
34.	Estructura atómica de la lámina silícica.....	146
35.	Estructura atómica de la lámina alumínica	147
36.	Arcilla caolinítica y su estructura esquemática de sus minerales	148
37.	Arcilla montmorillonita y su estructura esquemática de sus minerales	148
38.	Arcilla illítica y su estructura esquemática de sus minerales	149

No.	TABLAS	Página
I.	Origen y estado de la materia prima para el cemento Pórtland ..	168

No.	GRÁFICAS	Página
1	Áreas planimetradas	29

GLOSARIO

Afloramiento	Corte de terreno, en el cual se pueden observar diferentes tipos de rocas que se asoman a la superficie de un terreno y estructuras geológicas.
Bituminoso/a	Las rocas que contienen compuestos orgánicos hidrocarburoados, que les confieren color negro, tacto grasiento y olor frecuentemente fétido.
Clasto	Fragmento, ya sea un cristal, roca o un fósil.
Concreción	Espesamiento por acumulación de materia alrededor de un núcleo o sobre una superficie; pueden ser de origen químico o bioquímico.
Delta	Construcción en forma triangular o de abanico, hecha por el material detrítico que transporta un río al sedimentarlo en su desembocadura en un mar o lago.
Detríticos	Partículas sólidas arrastradas y depositadas, procedentes del exterior de una cuenca. Sedimentos o rocas formados predominantemente por partículas detríticas.
Diagénesis	Proceso que implica cambios físicos químicos en un depósito sedimentario que lo convierte en una roca sólida y consolidada.

Diques	Están compuestos de lava endurecida, que en cierta ocasión fluyó hacia arriba a través de las fisuras que ya existían o que fueron abiertas por la fuerza del magma y que en algunas ocasiones fueron ampliadas por la corrosión magmática.
Distal	Parte de una unidad deposicional o de una cuenca sedimentaria, más alejada del área fuente.
Dolomitización	Reemplazamiento de la calcita por dolomita, con la obtención de una roca calcárea dolomitizada o de una dolomita secundaria.
Eflorescencia	Transformación de ciertas sales que se convierten en polvo.
Erosión	Conjunto de fenómenos externos que, en la superficie del suelo o a escasa profundidad, quitan en todo o en parte los materiales existentes, modificando el relieve.
Esquistosidad	Hojosidad que presentan ciertas rocas metamórficas, permitiendo su partición en hojas, adquirida bajo la influencia de esfuerzos tectónicos (esquistosidad de fractura) o debida a la orientación de los cristales de la roca paralelamente a su plano de exfoliación (esquistosis de flujo).

Estratigrafía	Es el estudio de las rocas en capas, principalmente aquellas de origen sedimentario.
Estratos	Capas de rocas agrupadas en formaciones.
Exfoliación	Es el proceso cuando la dilatación y la contracción se alternan, efectuándose en la parte exterior del cuerpo de una roca; junto con el congelamiento y el deshielo causan el descascaramiento de escamas y lajas.
Fallas	Se llaman fallas, cuando en las fracturas, fisuras o diaclasas se ha efectuado un desplazamiento apreciable.
Fisiografía	O geología física, abarca los campos de la geomorfología, meteorología, climatología y oceanografía.
Fractura	Es cualquier grieta en una roca sólida.
Fisuras	Se le llama a una fractura extensa que puede llegar a ser un conducto que sirva para el paso de la lava, que formará un basalto de meseta o de soluciones que originarán vetas mineralizadas.
Geomorfología	Es el estudio de las formas terrestres, su origen y desarrollo.

Intemperismo	Es cuando las rocas son expuestas a la atmósfera y lentamente se alteran. Esta alteración es ocasionada por el contacto de la roca con el agua, con el aire y con los organismos; este proceso crea los suelos así como prepara a las rocas para su remoción consiguiente por los agente de la erosión.
Isopaca	Lugar geométrico de los puntos de igual espesor en una unidad litoestratigráfica.
Diaclasas	Son las fracturas a lo largo de las cuales no ha habido movimientos perceptibles y que ocurren en grupos paralelos. Pueden originarse como estructuras primarias por el encogimiento del magma o lava cuando se enfrían para formar rocas ígneas o por el encogimiento de sedimentos cuando secan. O como, en cualquier tipo de rocas las diaclasas se producen como estructuras secundarias por la fuerza de compresión, tensión, torsión y esfuerzo cortante.
Karst o Cárstico	Erosión subterránea en ámbitos calcáreos, se manifiesta por: (1) la creación de socavados subterráneos, traducidos en fisuras y cavidades (simas y cavernas) y (2) la formación de depósitos detríticos.
Lapilli	Roca piroclástica constituida por pequeños fragmentos de lava sueltos, en general menores de 3 cms.

Laterita	Suelo ferralítico. Suelo rojo de las regiones tropicales húmedas, pobre en sílice (Si) y rico en hidróxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al).
Litología	Parte de la geología que estudia las rocas, en sus diferentes tipos y modo de presentación, como: vetas, diques, estratos, lentes, etc.
Oolito	Pequeñas esferas de 0.5 a 2 mm como promedio, cuyo centro (núcleo) es un fragmento y la envoltura (córTEX) está formada por delgadas capas que dan una estructura concéntrica, a la que puede superponerse una estructura radial. Se asemeja a la huevo de los peces.
Yacimiento	Disposición de las capas minerales en el seno o interior de la tierra. Masa mineral bastante extensa.

OBJETIVOS

➤ **General**

Realización de la investigación bibliográfica para describir las distintas características naturales que presentan en el campo los materiales para la construcción, en relación a las formaciones geológicas presentes en las áreas, en las cuales se realizará la extracción.

➤ **Específicos**

1. Proporcionar información de la geología general de la república de Guatemala, como auxiliar en el mapeo de fuentes potenciales de rocas y minerales (información primaria) y dependiendo del material de construcción requerido y localizado en el área, puede ser susceptible para el desarrollo de su extracción.
2. Proporcionar los conceptos básicos, para identificar en el campo las características naturales de un material de construcción, y ver si reúne las condiciones adecuadas para su uso directo o amerita ensayos específicos para su rechazo o aceptación.
3. Conocer los materiales de construcción para el proceso y elaboración de un producto final de buena calidad a utilizarse en la industria de la construcción.
4. Conocer los distintos ambientes geológicos y métodos apropiados para la extracción de los diferentes materiales de construcción a utilizarse en la construcción civil.

RESUMEN

El presente, es un documento que aporta los conocimientos geológicos básicos y necesarios, para que el estudiante, como futuro profesional y profesional activo de la ingeniería civil, observe los distintos ambientes geológicos que se presenten en la vida real (trabajo de campo), y ser capaz de identificar de qué tipos de materiales de construcción se tratan y tomar la decisión si se pueden utilizar directamente, o si es necesario un procesamiento previo para que el material se convierta de buena calidad y utilizarlo con confianza en la construcción a realizar.

También provee información para que se tenga la capacidad de observar y determinar en el producto final que se le proporcione, sí el material de construcción que se utilizó o adquirió es de buena calidad y reúne las condiciones y características que lo hacen confiable, al colocarlo en condiciones de servicio.

Con este trabajo de investigación, se trata de colaborar y de minimizar en cierta forma el desconocimiento que afronta el nuevo profesional de la ingeniería civil, en problemas suscitados más en el interior (área rural) de la república, en la adquisición de materiales de construcción y tomar la decisión de utilizar materiales locales, propios del lugar, que resultarán más económicos y verificar su calidad para darle solución a su problema.

Todos estos conocimientos son para que se apliquen, tanto en el área urbana como rural de todo el territorio nacional, cuando se proporcionen o se pretenda adquirir materiales de construcción básicos, y se tenga la capacidad para identificar si son de buena calidad y decidir si se utilizan o no, para asegurarse que se está realizando una construcción de alta calidad y perdurable.

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de este trabajo, se realizó la investigación bibliográfica de los distintos materiales de construcción, considerados como los de uso más común en la industria de la construcción en Guatemala.

Para ello se describen las distintas características naturales que presentan los materiales, en las formaciones geológicas presentes en las áreas de interés donde se realizará la extracción.

Se proporciona también información sobre los métodos apropiados para la extracción y procesamiento (si es necesario), como también, se aconsejan ensayos específicos para obtener una mejor valoración de los mismos.

Con esto se pretende que el futuro profesional o profesional activo en la ingeniería civil, en sus actividades -más rural que urbana- tenga un instrumento de ayuda, que le facilite describir y prestarle atención a la presencia de minerales no deseados en los materiales de construcción, que reaccionan en forma nociva deteriorando su calidad y la de las estructuras en donde éstos sean utilizados.

1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA SINTETIZADA DE GUATEMALA

1.1. Geomorfología

En Guatemala dominan dos orientaciones estructurales a saber: 1) Un arco este-oeste, convexo hacia el sur, de rocas cristalinas y sedimentarias Paleozoicas y Mesozoicas, que se extiende desde Chiapas hasta el Mar Caribe. 2) Un alineamiento noroeste-sureste a través de América Central, representado por rocas volcánicas Terciarias-Recientes, acentuado por una hilera de conos Cuaternarios.

En el territorio de Guatemala se distinguen cuatro provincias Fisiográficas, que son de sur a norte: (Ver Figura No. 1. Zonas Fisiográficas de Guatemala.)

- a. La Planicie Costera del Pacífico
- b. La Provincia Volcánica o Cinturón Volcánico
- c. La Cordillera Central de Guatemala
- d. Las Tierra Bajas del Petén

a. La Planicie costera del pacífico. A lo largo del litoral Pacífico, los productos de la erosión de las Tierras Altas Volcánicas han creado una planicie costera con un ancho promedio de 50 kilómetros.

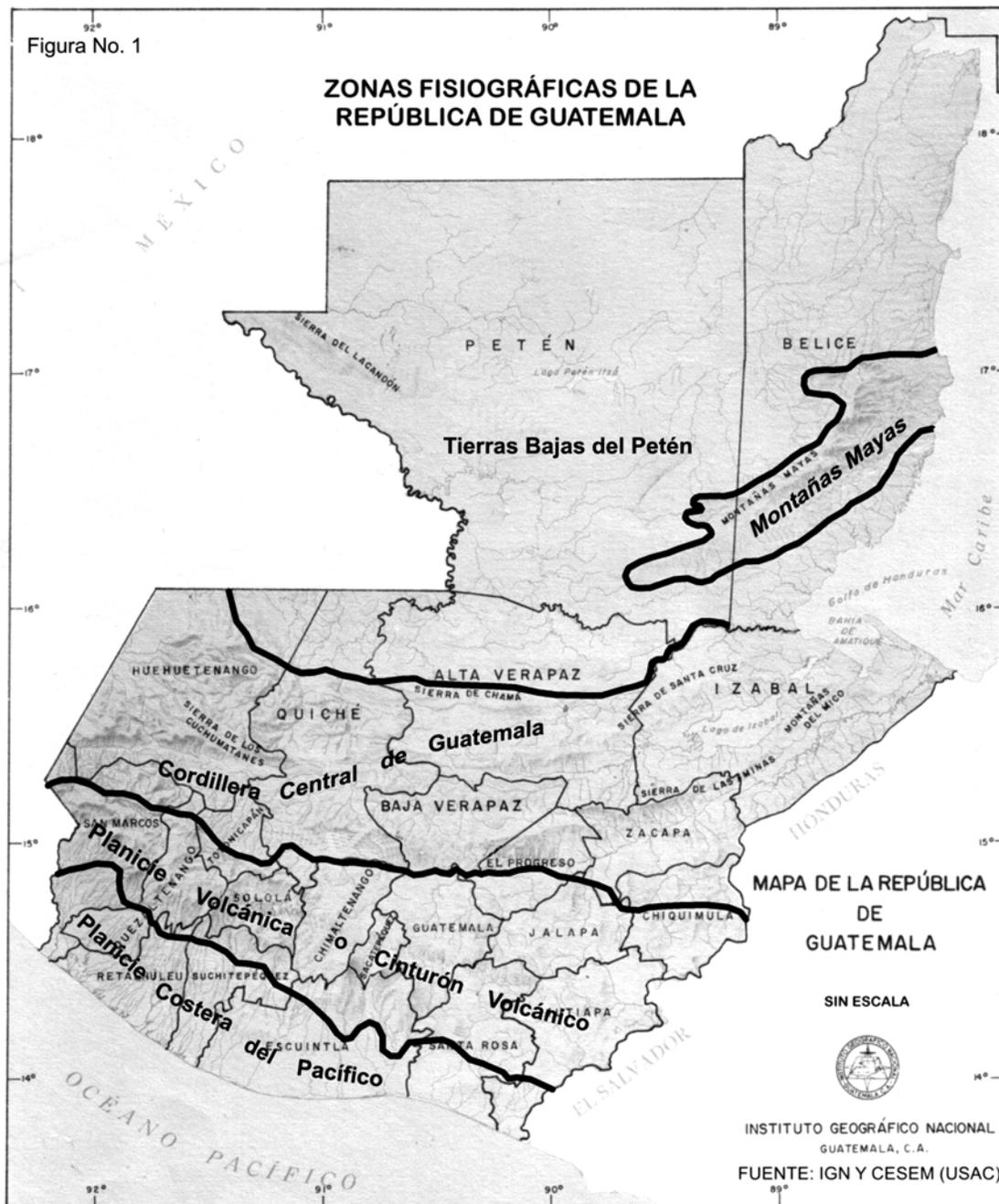
b. La provincia volcánica o cinturón volcánico. La Provincia Volcánica cubre la parte occidental, sur y oriental de Guatemala, extendiéndose hacia las otras repúblicas centroamericanas.

Esta zona se caracteriza por sus altas montañas, por su cadena de altos conos y domos, varios de ellos todavía activos, como por ejemplo: los volcanes Santiaguito, Fuego y Pacaya, que se encuentran alineados entre el plano costero del Pacífico y un cinturón de rocas volcánicas Terciarias, al otro lado; aquí en esta franja se encuentran también las enormes cuencas que contienen los lagos de Atitlán, Amatitlán y Ayarza y anchos valles planos, profundamente rellenados con depósitos de pómez Cuaternarios, como los de Chimaltenango, Tecpán Guatemala, Chichicastenango, El Quiché, Guatemala y Quezaltenango.

c. La cordillera central de Guatemala. Se le llama a la faja de rocas plutónicas, metamórficas y sedimentarias plegadas, que se extiende a través del centro del país, esta forma parte del sistema cordillerano que se desarrolla desde Chiapas hasta las islas de la Bahía en Honduras.

d. Las tierras bajas de El Petén. Representan un área de bosque tropical húmedo con elevaciones promedio de 100 metros formado por sedimentos Mesozoicos y Terciarios levemente plegados. Sobre calizas y dolomías Cretácicas donde se desarrolló un relieve Karst extenso, dando lugar a terrenos muy accidentados. Debido al drenaje subterráneo hay amplias regiones sin suministro de agua durante la estación seca. En ciertas partes del bosque tropical cede el terreno a amplias sabanas con pinos esparcidos y cerritos calcáreos de tipo Karst, que sobresalen de 30 a 100 metros sobre la planicie de la sabana.

Figura No. 1



1.2. Marco geológico regional

El territorio de Guatemala está comprendido por su geografía física dentro de una plataforma continental que se extiende desde el Istmo de Tehuantepec, en México, hasta las Tierras Bajas de Otrato en Colombia. Perteneciendo Guatemala, junto con El Salvador, Honduras y parte de Nicaragua, a la América Central Septentrional, siendo la estructura e historia geológica de esta zona parte del Continente Norteamericano.

1.3. Estratigrafía

En el territorio de Guatemala se pueden distinguir diecisiete grandes litologías diferenciables a gran escala; de las cuales, se hace una breve descripción de dichas unidades litológicas, principiando por la más antigua; haciendo especial énfasis en el tipo de roca que las constituyen, la zona del territorio donde afloran y la edad de las mismas. (Ver Figura No. 2. Mapa Geológico de Guatemala.)

1.3.1. Rocas metamórficas (Paleozoicas) (Pzm)

Constituidas principalmente por filitas, esquistos, gneises, mármol y pegmatitas, se encuentran principalmente en una franja que va de este a oeste, aflorando en el oeste y norte de San Marcos, en el sur y este de Huehuetenango, en el sur de El Quiché, Alta Verapaz, Izabal, Jalapa, Jutiapa y cubriendo casi totalmente los departamentos de Baja Verapaz, El Progreso y Zacapa, pudiendo encontrarse también en Belice. Todas estas rocas son de Edad Paleozoica.

1.3.2. Rocas sedimentarias del Carbonífero y Pérmico (CPsr)

En este grupo se han abarcado lutitas, areniscas, conglomerados y filitas; se encuentran de este a oeste en los departamentos de Huehuetenango, El Quiché, Baja Verapaz, Alta Verapaz e Izabal; aunque también se formaron en el sureste de El Petén y en el centro de Belice. Estas rocas son de edad Carbonífero Permiano.

1.3.3. Carbonatos del Pérmico (Pc)

Estos carbonatos se encuentran en una franja que va del este a oeste de Guatemala; en los departamentos de Huehuetenango, El Quiché, Las Verapaces e Izabal. Son de edad Permiana.

1.3.4. Formación Todos Santos (JKts)

Son formaciones alargadas de areniscas, se encuentran principalmente en el departamento de Huehuetenango y El Quiché, existiendo además pequeñas áreas en las Verapaces y en el sur de El Petén. Su edad es Jurásico-Cretácica.

1.3.5. Carbonatos del Cretácico (Ksd)

Están localizados principalmente en el centro y sur de los departamentos de El Petén, Belice y el Quiché; en el norte y sur de Izabal y en casi todo el departamento de Alta Verapaz y Huehuetenango; así como unas pequeñas áreas distribuidas en San Pedro Sacatepéquez, San Juan Sacatepéquez, en Tecpán Guatemala y San José Poaquil, además de encontrarse en San José Acatempa, en el centro de Jutiapa, en el norte de Baja Verapaz y Chiquimula y el sur del departamento de El Progreso. Son rocas de edad Cretácica.

1.3.6. Rocas ígneas del Cretácico-Jurásico (Ultrabásicas) (Pi)

Estas rocas se localizan en una franja que va de este a oeste del territorio de Guatemala; encontrándose en el centro y el oeste de Izabal, en el este de los departamentos de Alta Verapaz y El Quiché y al norte del departamento de Baja Verapaz. Se formaron en el periodo Jurásico-Cretácico.

1.3.7. Rocas intrusitas (I)

Este grupo está constituido principalmente por granitos y dioritas, así como rocas transicionales, es decir granodioritas. Estas afloran especialmente en el norte de los departamentos de San Marcos, Quezaltenango, Totonicapán, Guatemala y Chiquimula. En el sur de Huehuetenango, Sololá, Zacapa y Cobán. Así como al este de Zacapa y Baja Verapaz. Se han formado en diferentes tiempos, principalmente en el Paleozoico y Mesozoico.

1.3.8. Sedimentos clásticos marinos (KTs)

Estos sedimentos están distribuidos de este a oeste del territorio de Guatemala, encontrándose en el noreste de Huehuetenango, al norte de El Quiché, Cobán e Izabal y al sur de El Petén y Belice. Son de edad Cretácica-Terciaria.

1.3.9. Areniscas Subinal (KTsb)

Estas rocas afloran en su mayoría, en el oriente y sur del departamento de Chiquimula y unas pequeñas áreas en el norte y noreste de Jalapa. Son de edad Cretácica-Terciaria.

1.3.10. Sedimentos Marinos (Tpe)

Estos sedimentos (areniscas, lutitas y carbonatos), se encuentran dispersos en el departamento de El Petén, principalmente al centro y al noreste. Introduciéndose parte en el territorio de Belice. Localizándose además una pequeña área al norte de Cobán en las márgenes del río Negro o Chixoy. Son de edad Terciaria.

1.3.11. Yeso y Marga (Tic)

Esta formación se localiza al norte y noroeste del departamento de El Petén. Siendo de Edad Terciaria.

1.3.12. Calizas, Areniscas y Conglomerados (Tsd)

Estos tipos de rocas afloran únicamente en una pequeña área que se localiza al noreste del departamento de Izabal. Son de edad terciaria.

1.3.13. Depósitos Continentales (Tsp)

Estos depósitos se localizan al norte de Belice y del suroeste de El Petén, principalmente y al noroeste de Alta Verapaz, así como en distintas zonas del departamento de Izabal. Son de Edad Terciaria.

1.3.14. Rocas Volcánicas sin dividir (Tv)

Estas rocas (tobas, lahares y otras), pertenecen al Cinturón Volcánico y se pueden encontrar en los departamentos de San Marcos, Quezaltenango, Totonicapán, Sololá, El Quiché, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa, Jalapa y Chiquimula, y en una pequeña franja al sur de Huehuetenango. Se formaron durante el periodo Terciario.

1.3.15. Rocas Volcánicas (Qv)

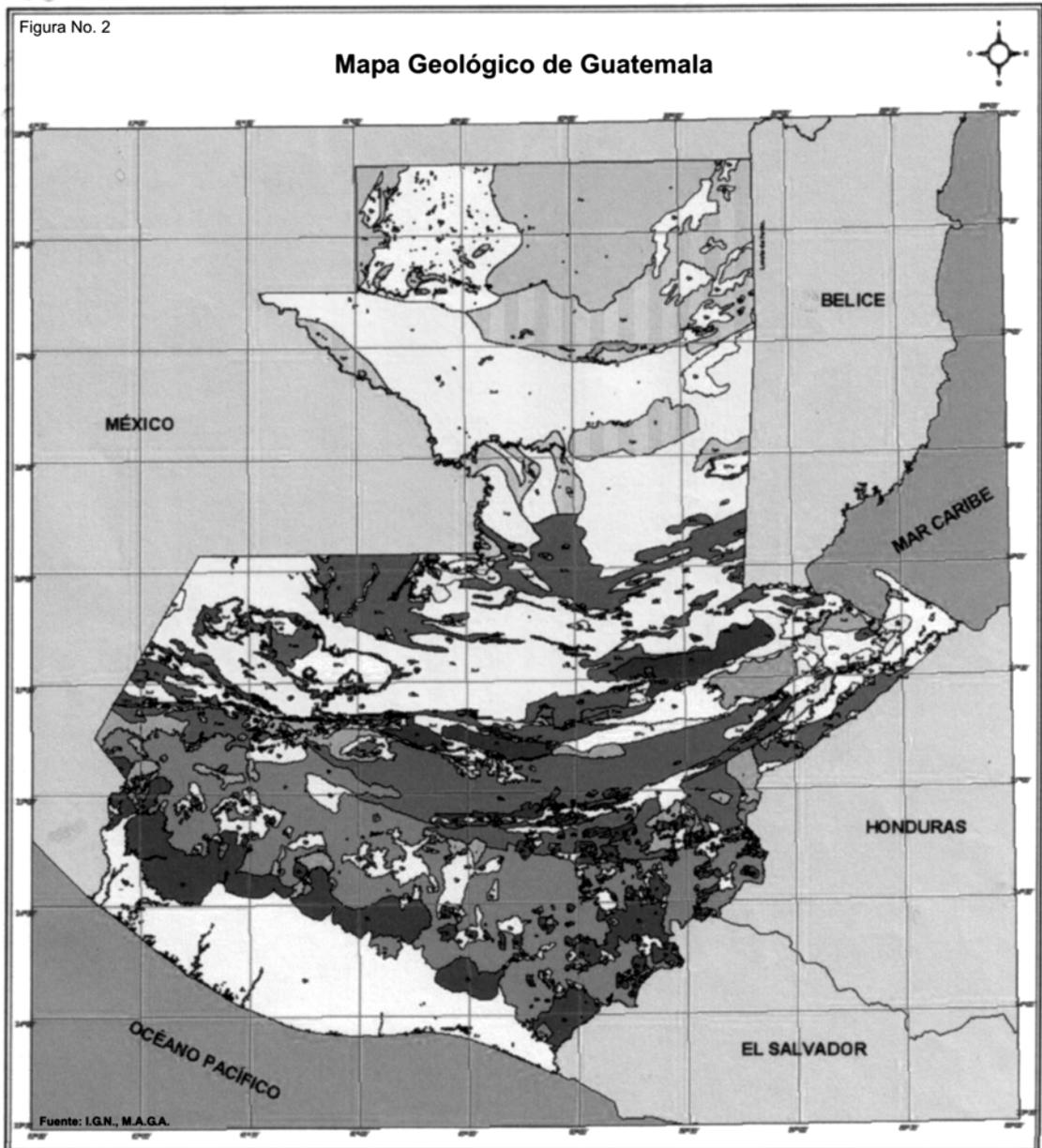
Esta clase de rocas (lavas, lahares y tobas), son propias del Cinturón Volcánico, ya que su formación se debió a la aparición de la cadena volcánica que se localiza en Guatemala, de este a oeste. Aflorando en el norte de los departamentos de Retalhuleu, Mazatenango y Escuintla, así como en el sur y el oeste de San Marcos y en el sur de los departamentos de Quezaltenango, Sololá, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala y Jutiapa. Pudiéndose observar también al oeste de Santa Rosa. Se formaron al principio del periodo Cuaternario.

1.3.16. Cenizas Volcánicas (Qp)

Esta clase de cenizas y pómez de origen volcánico se encuentran diseminados principalmente en el Cinturón Volcánico. Estando las cabeceras departamentales de San Marcos, Quezaltenango, Sololá, El Quiché, Huehuetenango, Totonicapán, Chimaltenango, Salamá, Santa Rosa, Jutiapa y Guatemala, asentadas sobre esta clase de rellenos pumíceos. Existiendo además en el norte de Sacatepéquez, en el centro de El Progreso y al sur de Izabal. Son rocas muy reciente del Cuaternario.

1.3.17. Aluviones Cuaternarios (Qa)

La mayor concentración de estos, se encuentra en la parte sur del país; a lo largo de toda la franja costera del Pacífico, en los departamentos de San Marcos, Retalhuleu, Mazatenango, Escuintla, Santa Rosa y Jutiapa. Encontrándose también al noroeste y noreste del departamento de El Petén, así como en las costas de Belice y en las márgenes del río Motagua y lago de Izabal. Existen zonas de menor concentración, como las localizadas al oeste de Zacapa y al sur de Jalapa y Chiquimula. Son rocas tan recientes del Cuaternario que aún sigue el proceso de depositación.



1.4. Estructura

1.4.1. Tectónica de placas

Con respecto a esta situación, en Guatemala se distinguen rasgos estructurales de gran magnitud.

Interaccionando las placas de Cocos y del Caribe a lo largo de la Fosa Mesoamericana, donde la placa de Cocos se está subduciendo bajo la del Caribe. La interacción entre las placas del Caribe y del Norte ocurre a lo largo de las fallas del Polochic, San Agustín y Motagua. Los desplazamientos relativos de estas placas dan como resultado la actividad volcánica y los movimientos telúricos. Las discontinuidades corticales antes mencionadas tienen una orientación aproximada este-oeste, cambiando a noreste-sureste. (Ver Figura No. 3. Situación Tectónica).

1.4.2. Sistemas plegados

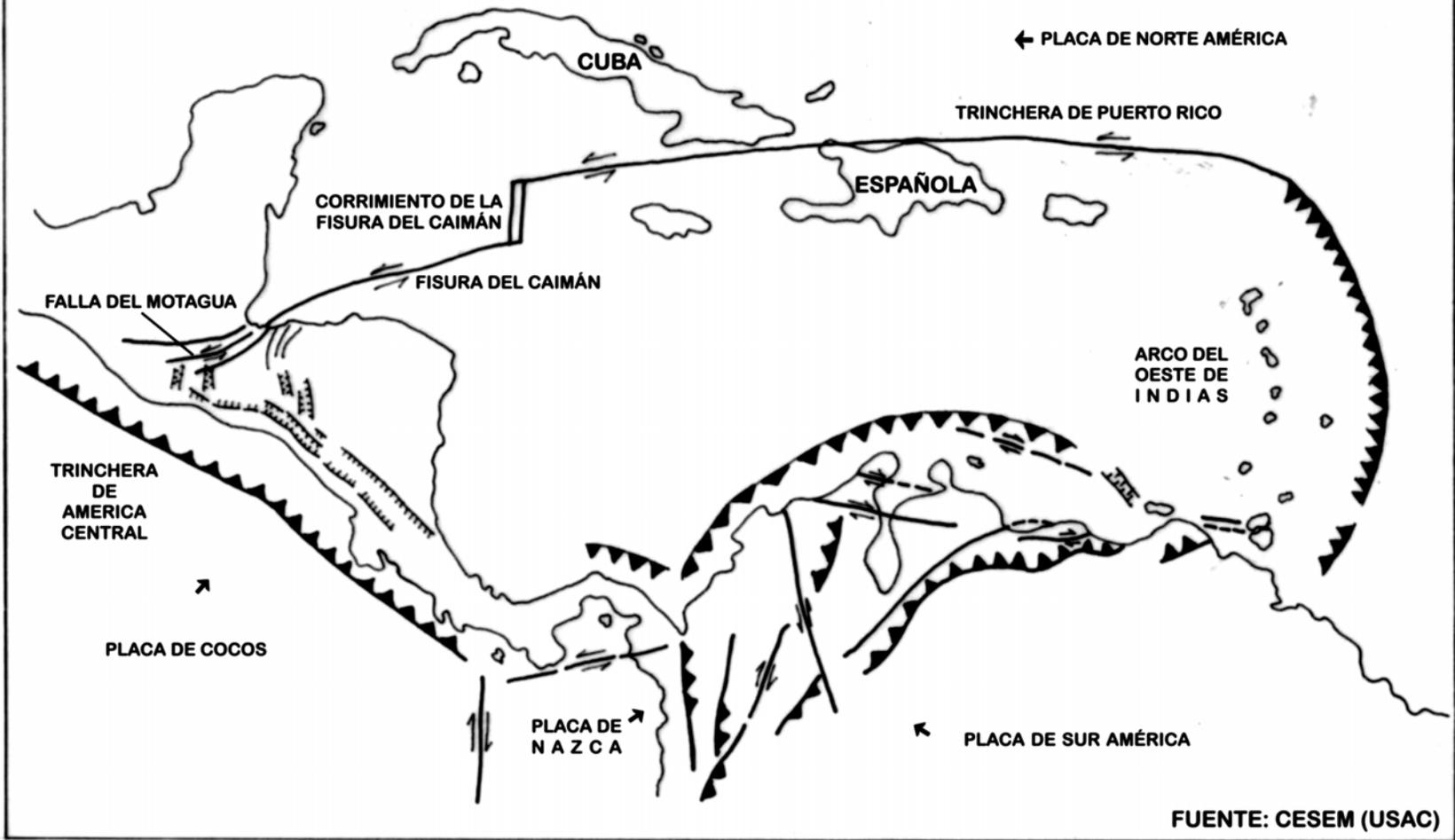
Otro rasgo de gran importancia son los sistemas plegados, los cuales se encuentran situados principalmente a lo largo de la Cordillera Central y un poco en las rocas sedimentarias que afloran más al norte, en las Verapaces y Huehuetenango. Los ejes de estos pliegues tienen una orientación aproximada este-oeste variando al noroeste-sureste.

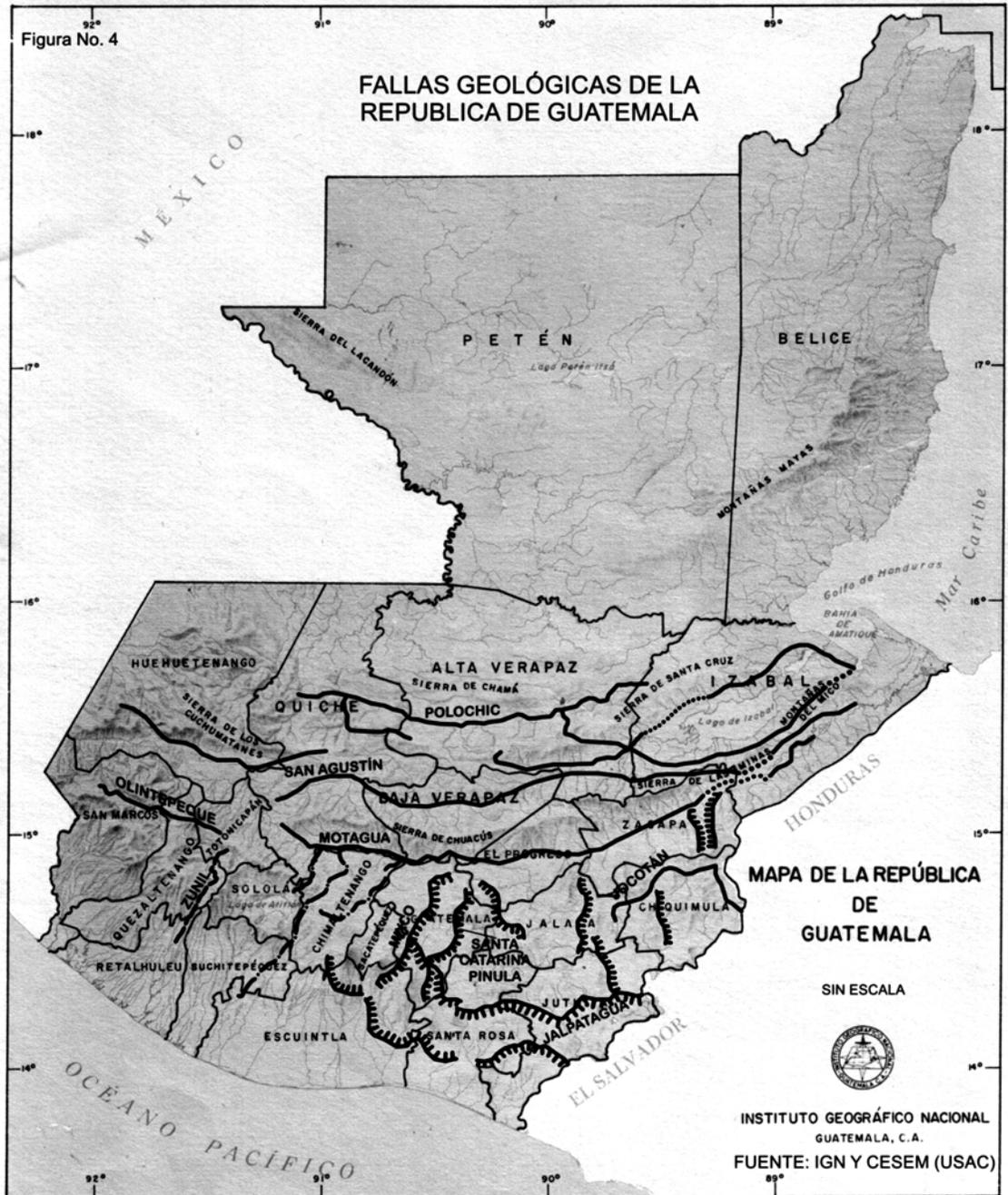
1.4.3. Principales fallas

Aparte de las fallas involucradas con las placas tectónicas, existe gran cantidad de fallas de menor dimensión, con una orientación aproximada nortesur, de tipo normal; es decir, que se han formado por esfuerzos de tensión en la corteza, como consecuencia principalmente por los desplazamientos relativos de las placas tectónicas antes mencionadas. Las fallas que pueden ser emplazadas en este grupo son las siguientes: Fallas de Mixco, Santa Catarina Pinula y la Falla de Zunil y las fallas de orientación este-oeste de Jalpatagua y Olintepeque, y otras que se distribuyen al este, sureste y noreste en las cercanías de Belice. (Ver Figura No. 4. Fallas Geológicas de Guatemala.) (C.E.S.E.M. – U.S.A.C.)

Figura No. 3

SITUACIÓN TÉCTONICA





2. PRINCIPIOS BÁSICOS PARA RECONOCER, EXPLORAR Y EVALUAR UNA CANTERA

2.1. El pasado y presente de los Materiales de Construcción

En el pasado, el hombre siempre ha usado la roca natural y la piedra para sus propósitos; ciertamente, fue su habilidad para hacerlo lo que lo distinguió de sus ancestros. Al principio fue solamente para armas y herramientas; pero temprano en su historia, el hombre empezó a usar la roca para la construcción; inicialmente para mejorar su cueva o albergue, pero después para construir sus moradas. Aunque debe asumirse que la leña fue probablemente el material de construcción más común usado por el hombre en fecha temprana, la construcción con piedra se remonta a por lo menos tiempos neolíticos.

2.2. Principios Básicos

La mayoría de los minerales y rocas industriales requeridos para la industria de la construcción son obtenidos por medio de la extracción en donde se abre un pozo; los métodos para minar a nivel profundo son generalmente muy caros y se utilizan cuando el minado es particularmente raro o cuando ocurre solamente en vetas pequeñas. Como un ejemplo del primer caso se encuentra el mármol, que se sigue desde la superficie a través de métodos para minar; y un ejemplo del segundo caso para minerales que se encuentran a niveles muy profundos, particularmente para minerales metálicos escasos o raros. La extracción por medio de la apertura de un pozo; por lo regular, utiliza una gran superficie de tierra. Esto es particularmente cierto en los casos de depósitos de arena y arena gruesa, que produce agregados gruesos y finos, que frecuentemente ocurren en terrazas de ríos de tan solo unos metros de espesor, por lo que su extracción rápidamente remueve grandes áreas de tierra.

La piedra dura para piedra triturada (pedrín), o piedra de construcción, y la piedra para hacer ladrillos tienden a obtenerse de grandes excavaciones profundas, teniendo efectos menores en la superficie. Las operaciones de extracción de piedra de cantera, aunque conducidas cuidadosamente, son a menudo ambientalmente inaceptadas. El ruido de las explosiones de maquinaria pesada y de la trituración de la roca; el polvo proveniente de la trituración y del tamizado; y el paso de vehículos pesados hacia y fuera de la cantera, todo esto es difícil de acomodar si hay gente viviendo y trabajando cerca del área. Es más, los efectos de la extracción por la apertura de pozos pueden durar incluso después de que el material ha dejado de extraerse. En áreas de arena de río; por ejemplo, donde la superficie del agua esta muy cerca de la superficie, hay muy poca alternativa de dejar la excavación sobre aguas abiertas. Donde la excavación es principalmente seca, una solución aceptable puede ser llenar la cantera. Sin embargo, el material para llenar la cantera no siempre esta disponible; frecuentemente el único material disponible son los desechos domésticos. El rellenar con desechos domésticos puede ser en sí un proceso nocivo; y si la base de la cantera no es sellada efectivamente de las aguas subterráneas, la contaminación de las aguas superficiales e incluso de los acuíferos que proveen agua, puede ocurrir.

Entonces, hay una contradicción fundamental. La sociedad demanda la provisión de un gran volumen de minerales y rocas a un bajo costo para construir sus casas y caminos; al mismo tiempo no está preparada para aceptar la pérdida de tierra y sus amenidades, ni tolerar las consecuencias ambientales del proceso de la cantera. Las consecuencias de esta contradicción pueden ser apreciadas por la mayoría de países desarrollados, quienes ahora han elaborado sistemas de control planeados para trabajar con minerales, designados para alcanzar un balance aceptable entre los conflictos de las demandas. Raramente es ejercido este control, en partes menos desarrolladas del mundo.

En el futuro, no hay duda de que se verá una extensión en la restricción de áreas, en las que los minerales podrán ser trabajados, lo que resultará en la búsqueda de estos materiales (en forma masiva) en áreas lejanas a aquellas en donde se usan. Es evidente que esto incrementará substancialmente los costos de construcción, pero éste es el precio que debe de pagarse si las consecuencias ambientales de extracción son aplicadas. Todos los minerales y rocas usados por la industria de la construcción son abundantes y de ocurrencia común y no hay ciertamente evidencia de que estos estén en peligro de agotarse. Hay, sin embargo, una posibilidad clara de escasear localmente, y porque el costo del transporte es un factor grande, esta escasez puede ser difícil de remediar trayendo materiales de lejos.

Por ello, para que un yacimiento mineral pueda ser explotado, es decir, antes de que produzca el material requerido por la industria de la construcción, debe de comenzarse por probar su existencia y comprobar sus posibilidades industriales. La explotación de los yacimientos minerales, es una actividad de alto riesgo económico, ya que supone unas inversiones a largo plazo que muchas veces se sustentan en precios del producto minero sujetos a altas oscilaciones. A su vez, la exploración supone también un elevado riesgo económico, derivado este del hecho de que supone unos gastos que solamente se recuperan en caso de que la exploración tenga éxito y suponga una explotación minera fructífera. Sobre estas bases, es fácil comprender que la exploración supone la base de la industria de la construcción, ya que debe de permitir la localización de los recursos mineros a explotar, al mínimo coste posible. Para ello debe de cumplir dos objetivos básicos:

1. Identificar muy claramente los objetivos del trabajo a realizar; y
2. Minimizar los costes sin que ello suponga dejar lagunas

Para esto, dispone de una serie de herramientas y técnicas básicas; que se indicarán más adelante.

La base para cualquier trabajo bien hecho dentro de la investigación minera es, la importancia de la planificación de las actividades a realizar en el mismo. Así, en la investigación minera el trabajo se suele subdividir en tres etapas claramente diferenciadas, de forma que solamente se aborda la siguiente en caso de que la anterior haya cumplido satisfactoriamente los objetivos previstos. Aunque pueden recibir distintos nombres, en términos generales se trata de una fase de reconocimiento (pre-exploración o prospección), una de exploración propiamente dicha y otra de explotación o evaluación. Incluso, si esta última alcanza los resultados previstos se realiza un estudio de viabilidad económica. (Higuera Higuera)

2.2.1. Etapa de reconocimiento

La responsabilidad de traer un nuevo descubrimiento o prospecto, al punto de considerarse una cantera lucrativa debe depositarse en el geólogo, por su especialidad en el conocimiento estratigráfico del suelo. El geólogo debe considerar algunos procedimientos a seguir en la búsqueda de, planificación y desarrollo de dicho prospecto.

La fase más temprana, que tiene por objeto determinar la localización de áreas o una zona concreta, normalmente de gran extensión, que presente las posibilidades de que exista un tipo determinado de yacimiento mineral (rocas o minerales), es la fase de prospección. En el campo de los minerales de construcción, el factor de anulación es siempre la distancia del mercado. Los minerales para la industria de la construcción se venden a un precio muy bajo cerca o al pie de la cantera, así que los costos del transporte forman en gran parte del precio final de venta. Se dice que el costo de la arena y grava aumenta, cuando el recorrido de la fuente hasta el mercado es muy largo. Normalmente, el mercado es un punto fijo, así que el área de reconocimiento está limitada por un radio fijo de este punto.

Muy ocasionalmente, el geólogo puede buscar un puente más amplio, de tal manera que las fábricas que usen este material se establezcan cerca de la fuente (pero esto es excepcional). Las distancias largas pueden ser toleradas si de alguna forma el transporte acuático (mar, río o canal) se encuentran adyacente a la fuente y al mercado. En general, los límites de una posible exploración están íntimamente definidos por este factor.

La elección del área de reconocimiento, se encuentra a menudo limitada por otros factores no geológicos; por la presencia o no de vías de acceso más que todo y que se encuentren en buen estado, por la disponibilidad del combustible o de un recurso de agua. En los países desarrollados, la posibilidad de ser capaz de alquilar o comprar la tierra y la de obtener un permiso de planificación o una licencia para ejercer la minería, deben de ser tomadas en cuenta. El resultado neto, es que el geólogo, probablemente está buscando el mineral en un área relativamente cercana. Un paso importante en esta fase, es definir precisamente el tipo de material buscado. ¿Si es una roca de construcción, qué tipo de fuerza, dureza y apariencia están siendo buscadas? ¿Si es un agregado, que clase de granulometría o mineralogía? ¿Hay algún constituyente que debe evitarse? La importancia de este paso es el que permite al geólogo definir los ambientes deposicionales, en donde dicho depósito puede ser encontrado, y entonces, hacer la búsqueda menos amplia. Cuando el o ella han establecido los límites del área de reconocimiento y definido objetivos precisos de búsqueda, el próximo paso del geólogo es consultar un mapa geológico local o regional del área en estudio, y obtener la información de que se dispone sobre el yacimiento en particular. Suele ser un trabajo fundamentalmente de gabinete, en el que se cuenta con el apoyo de información bibliográfica, mapas, fotografía aérea, imágenes de satélite, etc., aunque se puede incluir alguna salida al campo para reconocer las zonas de mayor interés.

2.2.2. Etapa de exploración

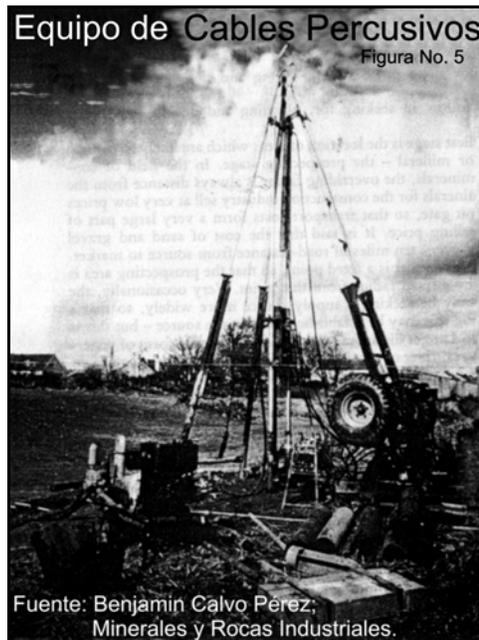
Cuando la fase de reconocimiento ha sido completada; es entonces, cuando un área o áreas que se creen dignas de mayor investigación han sido localizadas, la próxima etapa es llevar a cabo una exploración. Mientras las indicaciones de la superficie, que forman la base de la mayoría de mapeos geológicos, darán una primera indicación de la presencia o ausencia de un mineral en particular, cualquier evaluación apropiada de las cantidades debe basarse en exploraciones sub-superficiales.

Sí el depósito es somero, la excavación por medio de pozos de prueba con un excavador mecánico es satisfactoria; el método es barato y rápido y provee al geólogo una oportunidad de ver los depósitos en tres dimensiones; también provee la oportunidad de coleccionar grandes muestras. Estos pozos de prueba están limitados al alcance del brazo del excavador y raramente pueden extenderse más allá de 3 metros de la superficie; una excavación más profunda requiere el apuntalar el pozo y es extremadamente caro, raramente justificable en el caso de mineral al por mayor. La exploración a nivel más profundo requiere entonces, realizar la perforación de pozos.

El método más barato para la construcción de pozos perforados es taladrando con cables percusivos (extrañamente se le llama “Concha y Barrena” nombre que confunde) (Ver Figura No. 5. Equipo de Cables Percusivos). El equipo sólo requiere de una maquinilla de poder, que es usada para alzar y dejar caer un martillo pesado, que fuerza el tubo de acero dentro del piso. La misma maquinilla de poder, luego levanta y deja caer el pesado cincel, que pulveriza el material dentro del tubo, este material se saca luego con una cubeta de base encorvada.

Esta es una muestra perturbada; y una muestra no perturbada puede obtenerse, martillando otro tubo dentro del primero y sacando este a la superficie. El método no es limpio, las muestras están mezcladas y muchas veces contaminadas, y los grandes volúmenes de agua utilizados, pueden producir resultados anómalos.

Todos los otros métodos de taladrar son giratorios (Ver Figura No. 6. Equipo de Taladro Rotatorio.); es decir, dependen de una cabeza de taladro que rota, que sostiene una cadena de varillas de taladro. La velocidad de rotación puede variar desde muy baja, hasta alrededor de 600 revoluciones por minuto, dependiendo del método y de la carga de varias toneladas que puede aplicársele a la cadena del taladro.

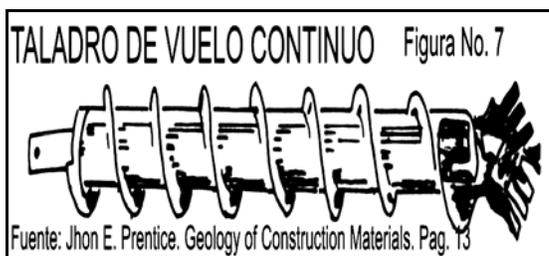


Para depósitos no consolidados, un método más satisfactorio que el de los cables percusivos es la barrena de vuelo continuo (Ver Figura No. 7. Taladro de Vuelo Continuo.). En este método, el largo de la barrena (generalmente de entre 150 a 200 mm de diámetro) está metido en el suelo una distancia de aproximadamente un metro y luego se saca; la muestra es retenida en los filos de la barrena.

Hay cierto riesgo de contaminación por material que cae de y es raspado de las partes altas del hoyo; de todas formas con cuidado y experiencia, se pueden obtener buenas muestras. Sigue siendo uno de los pocos métodos razonables para el muestreo de arenas no consolidadas y grava que puede ser efectuado.

Una modificación de lo anterior es la barrena con tronco hueco (Ver Figura No. 8. Taladro con Tronco Hueco.), en el que el centro de la barrena es un tubo hueco, a menudo proveído por una orilla filosa en la base. Esta es forzada en el suelo por el jale hacia abajo de las vainas de la barrena y, en rocas débiles, puede proveer una muestra relativamente no perturbada. En rocas más fuertes y en donde se requieren muestras menos disturbadas, tal vez se necesite un giratorio con centro de taladro. Aquí, un gusanillo cilíndrico es usado para cortar el centro cilíndrico de la roca sólida, que es retenida en un barril céntrico dentro del tubo del taladro. A intervalos regulares, la cadena entera del taladro puede ser sacada a la superficie y el núcleo removido del barril. El gusanillo necesita ser protegido para cortar a través de roca abrasiva; esta protección puede ser acero endurecido, para arcilla y rocas suaves; carburo de tungsteno o diamante natural o sintético para rocas duras. El método es lento, laborioso y caro, especialmente ya que los gusanillos del taladro necesitan ser reemplazados; y a pesar de que en teoría debería producir las mejores muestras, éste no es siempre el caso. La necesidad de enfriar el gusanillo del taladro y de remover los productos de la abrasión, se requiere que el agujero sea continuamente limpiado. El medio utilizado para limpiarlo puede ser aire comprimido, agua o un líquido denso; pero su uso frecuentemente puede erosionar o remover partes sustanciales del centro. Entonces, en una secuencia como la que puede encontrarse en muchos proyectos de ladrillo-arcilla, donde la arcilla alterna con arenas pobremente consolidadas, la arcilla puede proveer un buen centro, pero las arenas son completamente lavadas.

Es más, si la roca que está siendo taladrada se fractura, el núcleo puede quebrarse en el barril central y con su rotación destruir partes grandes del núcleo; en estas circunstancias el núcleo frecuentemente se resbala del barril central mientras es jalado a la superficie. Mientras que la tecnología moderna para taladrar, puede hacer mucho para reducir la pérdida del núcleo, sigue siendo cierto que la recuperación del 100% del núcleo muy rara vez se obtiene.



Bajo estas circunstancias, los geólogos muchas veces optan por el método menos caro de taladrar, girando en agujero abierto (Ver Figura No. 9. Gusanismos de Taladro usados en Perforación Rotatoria.). Este método utiliza un gusanillo de taladro que rompe la roca mientras va bajando, por lo que las muestras son traídas a la superficie como resultado del flujo de astillas del fluido. Los gusanillos de taladros pueden ser provistos de navajas de varias configuraciones o con ruedas anguladas o discos; y pueden ser protegidas con carburo de tungsteno o pedazos de diamante. Los cambios en la litología son idénticos a través del examen de las astillas y, por tanto, una sección estratigráfica puede ser construida; las muestras pueden ser adecuadas para el análisis de laboratorio, pero no, para ninguna forma de prueba del producto.

La observación cuidadosa y la instrumentación de la velocidad de penetración del gusanillo pueden dar la identificación precisa de los cambios litológicos durante la excavación. Después de que se retira el taladro, las probetas geofísicas pueden ser bajadas dentro del agujero y sus registros usados para complementar la información de las astillas.

Métodos particularmente útiles en el campo de los materiales primarios de construcción han sido aquellos que observan radiación gamma natural, resistencia y densidad. La radiación gamma en rocas emana de los materiales radioactivos, que están usualmente presentes en las arcillas, pero ausentes de las arenas. Entonces, un logaritmo gamma identifica precisamente la extensión de los yacimientos individuales de arcilla y arena. Las mediciones de resistencia están relacionadas a la porosidad y han sido usados para detectar la base de los depósitos de arena y grava, y la posición de los depósitos ricos en arcilla dentro de los mismos. Entonces, la excavación de un agujero abierto, con instrumentación cuidadosa y bitácoras, puede ser utilizada para tener una idea geológica muy completa. Comparado con la perforación del núcleo, este es mucho más rápido y barato; y es el método que probablemente sea más favorecido en la exploración de depósitos minerales al por mayor.



Tal vez los mayores problemas se encuentran en la exploración de depósitos consolidados flojos, como de arena y grava. Cualquier forma de recuperación del núcleo está fuera de cuestión, así que el geólogo debe depender de excavaciones directas de pozos de prueba, en el mal llamado método de “Concha y Barrena” o en algún tipo de técnica de barrenar.

Ningún método es ideal y el geólogo necesita ejercer mucha discreción en la interpretación de los resultados.

Con la exploración se pretende comprobar si el yacimiento mineral prospectado puede ser explotado económicamente, estableciendo su naturaleza, su estructura geológica y su grado de consistencia económica. La investigación en la exploración puede ser dividida en preliminar y final, y debe dar como resultado la cantidad o reservas del mineral investigado dentro de los límites del yacimiento explorado. Dichas reservas se pueden expresar en los términos siguientes:

- **Reservas probadas:** Son aquellas en que el tonelaje y la calidad (grado) del mineral que forman [y que pueden ser económicamente extraídas] han sido computados de las dimensiones y muestras obtenidas de los afloramientos, trincheras, sondeos y laborales de exploración, utilizando los análisis de cada una de las muestras.
- **Reservas probables:** Son aquellas en que el tonelaje y calidad del yacimiento es computado en parte con las dimensiones y muestras obtenidas del yacimiento y en parte de la estimación del cómputo de la posible continuación estructural del yacimiento dentro de una distancia razonable de la estructura.
- **Reservas posibles o inferidas:** Son aquellas en que se presume la estimación de la cantidad de mineral existente en un área donde geológicamente debería existir el yacimiento. Se basa en un conocimiento generalizado del carácter geológico de la región en la cual se presume la existencia del yacimiento, solamente por conocer algunas muestras del mineral. La estimación se basa asumiendo la continuidad o repetición de las pocas evidencias que se tienen, dentro del área considerada. (Prentice, 1990)

2.2.3. Etapa de evaluación

La evaluación de los depósitos de mineral en bruto es en términos cuantitativos y cualitativos; en todos los casos es la distribución espacial, en las tres dimensiones, lo que es importante, para que la construcción de mapas y secciones geológicas jueguen un rol primario en la evaluación. Como un medio de entendimiento y luego de cuantificación de un depósito mineral, el mapa de curvas de nivel es de suma importancia. Las curvas de perfil pueden ser perfiles de superficie, perfiles de sub-superficie de un horizonte geológico en particular o perfiles de profundidades iguales de un depósito (isopacas).

Los diferentes métodos que se pueden utilizar para evaluar los depósitos minerales y registrar los resultados de la investigación, dependiendo del método que será el más apropiado a utilizar, ya sea de perforación de agujeros o pozos de prueba, y según el depósito mineral que sea para obtener muestras confiables, se describen a continuación:

A. Método por perfiles: Una condición para la aplicación de este método es que existan perfiles (perforaciones alineadas) paralelos. Para el cálculo de las reservas son calculadas las superficies del cuerpo mineralizado sobre cada perfil (secciones). Dichas áreas pueden ser calculadas con ayuda de un planímetro y finalmente puede ser calculado el volumen de un bloque delimitado por las áreas de dos secciones.

Superficie planimetrada:

$$A = \{(A_1 + A_2) / 2\} + \{(A_2 + A_3) / 2\} + \dots$$

$$\text{Volumen} = A * l; (l = \text{distancia entre dos perfiles})$$

$$\text{Reservas en Toneladas} = Q = V * (\rho_R)$$

$\rho_R = (t / m^3)$ (La densidad es frecuentemente menor que el peso específico real, ya que deben de considerar impurezas y huecos en la roca).

Reservas (de Metal) = Q * Contenido Metálico

Para el ejemplo siguiente se tiene:

$$V_{1-3} = V_{1-2} + V_{1+3} = [(A_1 + A_2 / 2) * (l_{1-2})] + [(A_2 + A_3) / 2) * (l_{2-3})]$$

$$Q = V_{1-3} * \rho_R$$

Las reservas del área periférica son debido a las pocas posibilidades de comprobación, calculadas de manera especial y deben de ser consideradas en una clase especial de reservas. Si las superficies limitadas de un bloque difieren en más de un 30%, el bloque deberá ser calculado de la manera siguiente:

$$V = [A_1 + A_2 + (A_1 * A_2)^{1/2}] * (l_{1-2})$$

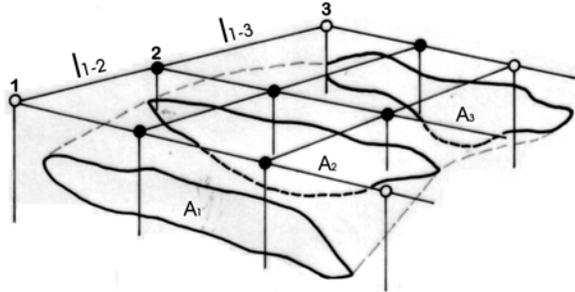
(Ver Figura No. 10. Método por Perfiles.)

B. Método de los polígonos: Para el cálculo de reservas por este método se requiere de una perforación central que se une a perforaciones vecinas, de tal forma que la línea que une dos perforaciones es cortada a la mitad, por líneas rectas que formarán un polígono cuyo centro es la perforación, el área de cada polígono es calculada y multiplicada por el espesor del cuerpo mineralizado en la perforación central del polígono correspondiente.

Las zonas periféricas se calculan tomando sólo la mitad del el bloque principal. (Ver Figura No. 11. Método de los Polígonos)

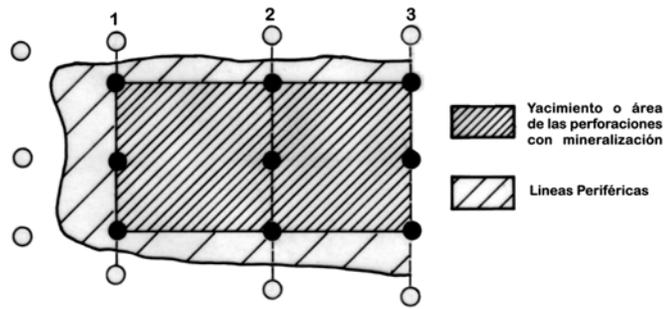
MÉTODO POR PERFILES

Figura No. 10



● Perforación con Mineralización ○ Perforación Estéril

Fuente: U.A.N.L. -Linares-. Geología de Yacimientos Minerales



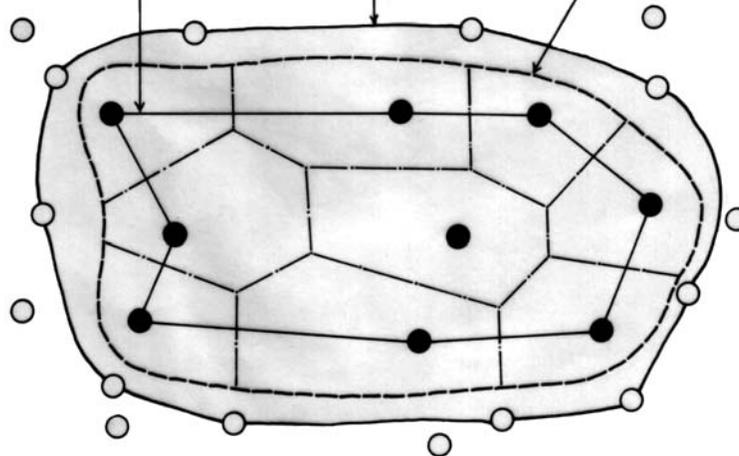
MÉTODO DE LOS POLÍGONOS

Figura No. 11

Línea externa límite del área de perforaciones con Mineralización

Línea interna del área con perforaciones sin Mineralización

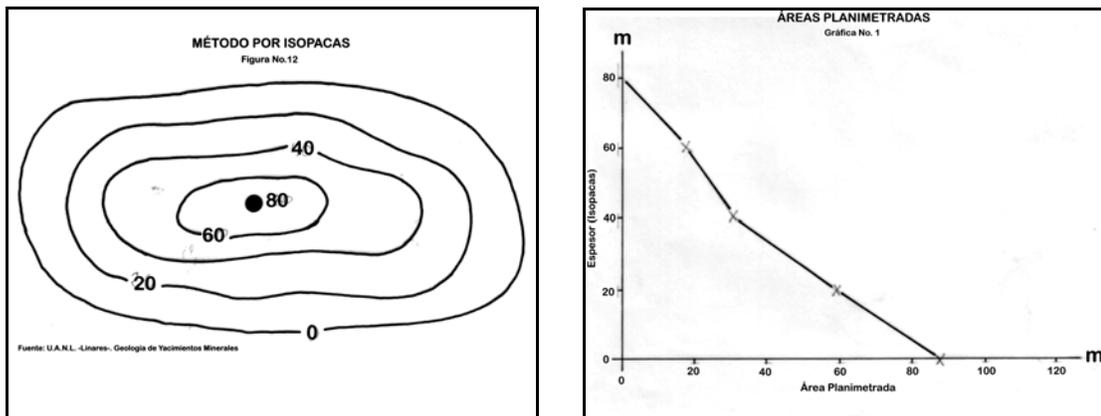
Línea de interpolación de límites con y sin Mineralización



● Perforación con Mineral ○ Perforación sin Mineral

Fuente: U.A.N.L. -Linares-. Geología de Yacimientos Minerales

C. Método por isopacas: Carta de Isopacas, en la que las superficies o áreas para cada isopaca son planimetradas. (Ver Figura No. 12. Método por Isopacas.). El área bajo la curva nos da directamente el volumen de roca o mineral en m^3 . (Ver Gráfica No. 1. Áreas Planimetradas.).



Con la información obtenida de una mineralización de interés minero y de acuerdo al método utilizado y que permite suponer que pueda llegar a ser explotada, se pasa a realizar su evaluación o valoración económica. A pesar de los datos que puedan obtener, estos aún no son concluyentes y debe ir seguida, en caso de que la valoración económica sea positiva, de un estudio de viabilidad, que contemple todos los factores geológicos, mineros, sociales, ambientales, etc., que pueden permitir (o no) que una explotación se lleve a cabo. (U.A.N.L., 1987)

2.2.4. Etapa de diseño y manejo

La etapa de exploración debió proveer la información necesaria para construir una ilustración tridimensional del depósito (su extensión lateral, su grosor, su estructura geológica, su variación interna y profundidad) y disposición de cualquier sobrecarga.

Las perforaciones debieron haber sido utilizadas para proveer información de los niveles de aguas subterráneas dentro del sitio. Usando esta información, la planificación y la excavación de la cantera puede continuar con una base lógica. Hay cinco áreas en las que se requiere conocimiento técnico específico; estas son:

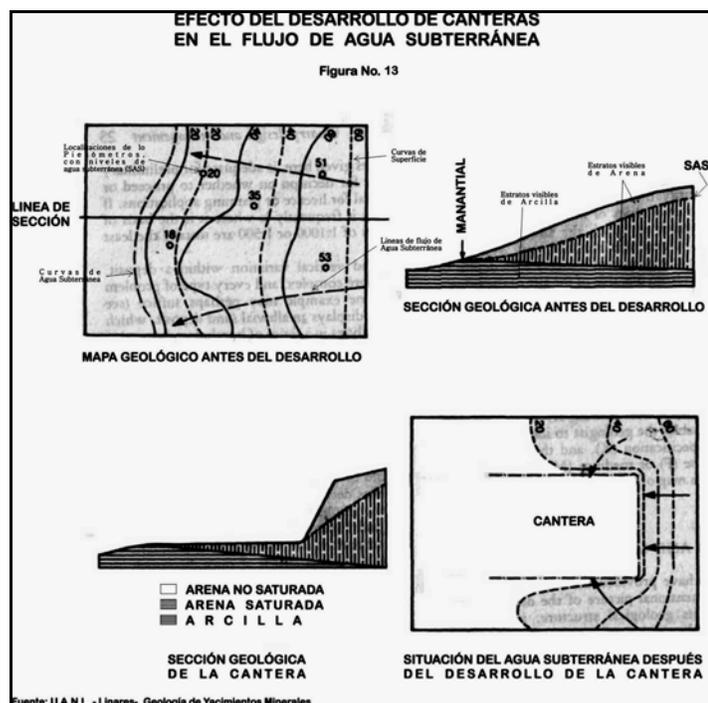
1. **Medios de excavación;** es decir, la maquinaria, la planta y los métodos necesarios para excavar un depósito;
2. **El método de excavación;** es decir, la forma en que el depósito debe ser trabajado para asegurarse una fuente continúa del producto deseado;
3. **La planificación** de cómo ir quitando capas, la remoción y el deshacerse del suelo de la superficie y la sobrecarga;
4. **Los métodos** de manejar el agua de la cantera; y
5. **Asegurarse de la seguridad y estabilidad** de las caras de la cantera.

De lo anteriormente expuesto; 1, 2 y 3 requieren la preparación de un plan detallado de la cantera, cuya base es la interpretación tridimensional hecha por el geólogo. Los ítems 4 y 5, sin embargo, llevan al campo de la hidroecología y mecanismos del suelo y roca. Estos son campos especializados, y en un proyecto grande, un geólogo puede justamente sentir la necesidad de buscar el consejo de un especialista; este no siempre está disponible, sin embargo, los principios básicos deben ser comprendidos por lo menos.

El control y planificación de las aguas subterráneas es esencial para la mayoría de las canteras. Si la cantera es de arcilla impermeable o si está situada arriba del nivel de agua local, el agua subterránea no será problema. Si la cantera intersecta con el nivel del agua subterránea, el desarrollo de la cantera cambiará el patrón de flujo del agua. Es necesario predecir los efectos de este cambio por muchas razones.

La cantidad del flujo de agua que entra a la cantera debe de ser conocida, de tal manera que se tomen las medidas apropiadas para su escape o su remoción por medio de una bomba. Los efectos del cambio en el flujo del agua sin duda se extenderán más allá del área de la cantera, así que habrá que asegurarse que el resto de las personas que usan esa agua no se vean afectados (ni por la reducción de la fuente, ni por su contaminación).

Un caso simple, es el desarrollo de una cantera con un horizonte de arena que yace sobre arcilla impermeable. La arcilla actúa como un retardante, que previene el movimiento hacia abajo del agua, de tal manera que el agua puede percolar a través del material permeable que se encuentra arriba y acumularse como un acuífero (zona saturada) en la base de la arena. La parte de hasta arriba de la superficie de esta zona saturada se conoce como el nivel de agua o como superficie del agua subterránea (SAS) (Ver Figura No. 13. Efecto del desarrollo de Canteras en el flujo de Agua Subterránea.).



Para poder estudiar el patrón del agua subterránea, es necesario tener datos de la sub-superficie; y es económico si se puede utilizar para ello la exploración con perforaciones, pero si esto no fue hecho, se necesitará construir perforaciones especiales para ello. Éstos pueden convertirse en piezómetros, insertándolos en la base porosa y recubriendo el agujero internamente (usualmente con plástico). El agua se elevará en éstos a la superficie del agua subterránea, cuyo nivel puede ser medido. De estos niveles, se puede construir un mapa de curvas de la sobrefaz del agua subterránea. Estos es muy informativo; la dirección del flujo del agua subterránea esta a igual ángulo que las curvas, y la tasa de flujo es proporcional al espacio de las curvas. Antes de iniciar el proceso de la cantera, el agua se escapa de nacimientos de la superficie de la base de la arena cuando se desarrolla la cantera, la excavación interceptará con la superficie del agua subterránea y el agua fluirá hacia la base de la cantera; al mismo tiempo, la superficie del agua de la cantera se empapará, de tal manera que la tasa de flujo aumentará.

Es obviamente importante conocer el volumen de agua que puede llegar a entrar al pozo de esta manera. Una medida de esto puede obtenerse midiendo el flujo de los nacimientos; si es grande, será necesario obtener un estimado preciso. La tasa de flujo a través de estratos permeables es determinada por la inclinación de la superficie del agua subterránea y por la habilidad de la roca de transmitir agua (su transmisibilidad). La inclinación puede medirse por medio de las curvas predecibles de la superficie de aguas subterráneas; la transmisibilidad puede ser obtenida de mediciones hechas en laboratorio en muestras de permeabilidad o, más satisfactoriamente, de test de bombeo en el campo. Este último método involucra el bombear (hacia afuera) un flujo de agua medido desde una perforación central. Esto crea una depresión cónica en la superficie del agua subterránea alrededor de la perforación que se bombea, que se extiende hacia afuera hasta que se cruza con otras perforaciones; donde puede ser medida como el punto de hale hacia abajo.

De la extensión de este punto, la transmisibilidad de los estratos puede estimarse, lo que luego permitirá el cálculo del flujo del agua. Aunque esto parece un procedimiento complejo, puede ser llevado fácilmente en el campo; también hay otros test de bombear (hacia adentro) que darán resultados satisfactorios.

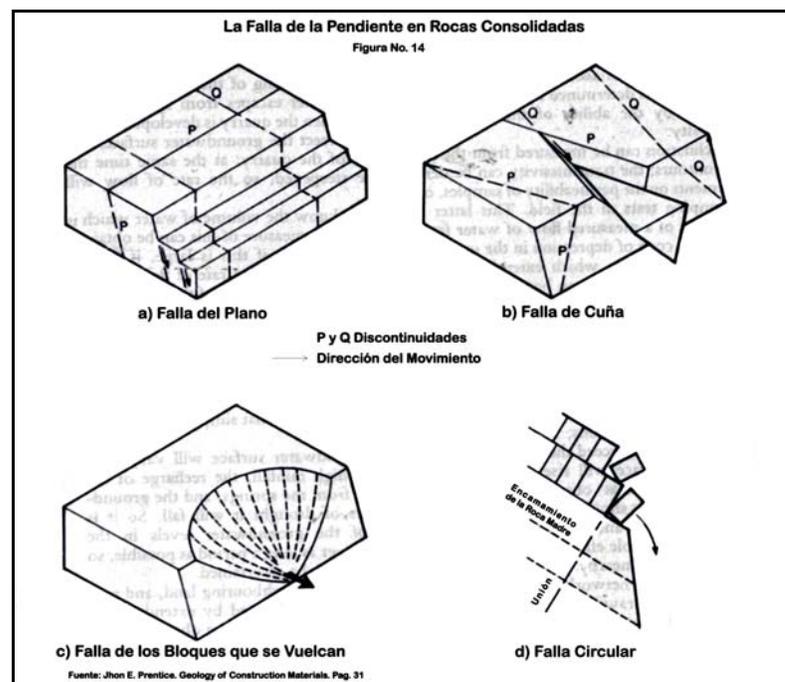
La posición exacta de la superficie del agua subterránea variará con las condiciones de las diferentes estaciones; cuando llueve bastante, la recarga del acuífero excederá la descarga de los nacimientos y la superficie del agua subterránea se elevará; cuando haya sequía, esta disminuirá. Por lo que es importante que las observaciones de los niveles del agua subterránea con el piezómetro continúen lo más que se pueda, para que se averigüen las mejores y peores condiciones.

Los efectos posibles del trabajo de la cantera en tierras vecinas y particularmente en el uso de agua cercana pueden ser evaluados extendiendo la red de observación de tal manera que el patrón de flujo puede ser observado. La cantidad de hule hacia abajo registrado durante los experimentos de bombeo pueden, por extrapolación, ser usados para determinar cuán probable una fuente cercana puede derogar el desarrollo propuesto. El diseño de la cantera y el establecimiento de un patrón de trabajo que asuma que las caras de la cantera serán estables durante todo el tiempo, deben depender también del entendimiento de la geología. El estudio de la estabilidad de las pendientes naturales y artificiales es el diferir de las especialidades gemelas de la mecánica de suelos y mecánica de rocas, lo que forma una gran parte de la ciencia de la ingeniería en geología. Los ingenieros no hacen diferencia entre el suelo verdadero (en el sentido agrícola) y la roca no consolidada; de tal manera que la mecánica del suelo se hace cargo del suelo verdadero, de la zona de erosión de las rocas consolidadas y la roca no consolidada, mientras que los principios de mecánica de la roca se aplican solamente a las masas de roca consolidada.

Los principios de mecanismos de suelo son aplicables; entonces, a canteras para arcilla, arena y grava, mientras que solamente las canteras que serán fuente de roca para piedra de construcción y agregados de roca triturada pueden ser estudiadas por métodos de mecánica de la roca.

La mecánica del suelo trata a la masa rocosa como una entidad uniforme y define parámetros que determinan el comportamiento de dicha entidad bajo diferentes condiciones. Un parámetro básico es el de la fuerza de corte, definida simplemente como la habilidad de la masa rocosa de resistir las fuerzas cortantes que se le aplican ya sea por montar (como en la fundición de un edificio, etc.) o por gravedad (como en una cara de una cantera). La fuerza de corte es observada como el producto de dos variables, ambas determinadas por el carácter de la roca misma (estas son el ángulo de fricción interna ϕ y la cohesión c). La cohesión depende principalmente de la presencia de minerales arcillosos y se encuentra en su mayoría como sedimentos arcillosos, que generalmente se encuentran ausentes en arenas y gravas. Algún grado de cementación puede tener el mismo efecto que la cohesión, aunque la cohesión puede ser bastante reducida por la presencia de discontinuidades de menor escala. El ángulo de fricción interna, es un parámetro que puede ser medido en el laboratorio, especialmente con muestras colectadas. Usando estas dos medidas (ϕ y c), es probable calcular el ángulo, en el cual la pendiente en la masa rocosa particular (suelo) será inestable. Si la cohesión es cero, la pendiente no puede soportarse en un ángulo mayor de ϕ ; valores más altos de c permite que la pendiente soporte mayores ángulos de ϕ . La estabilidad disminuye por la presencia del agua, medidas de lo cual se introducen en las ecuaciones. Estas ecuaciones relacionan la estabilidad con un factor de seguridad; mientras es generalmente reconocido que un factor de seguridad de 1 es altamente peligroso y un valor de 10 es muy seguro; no hay medio objetivo o integral de decidir el factor de seguridad apropiado a adoptar, lo que tal vez no sea permitido para un claro importante de autopista, por ejemplo, puede ser factible para una cantera pequeña temporal.

La base de la mecánica de la roca es enteramente diferente, cuando la fuerza de la roca es un factor y un valor del ángulo de fricción (ϕ) que puede ser calculado, este último relacionado a la fuerza compresiva no confinada de la roca, es reconocido que la causa de inestabilidad más importante descansa en sus discontinuidades (la roca madre, las uniones, etc.). Hay un número de diferentes formas en los que la pendiente de la roca puede fallar, y estas están relacionadas a la disposición de las discontinuidades (Ver Figura No. 14. La Falla de la Pendiente en Rocas Consolidadas.).



- **La falla del plano:** (a) ocurre cuando la pendiente se torna paralela a una discontinuidad importante (una unión importante o un plano de roca madre) y los planos se deslizan con este plano.
- **La falla de las cuñas:** (b) ocurre cuando dos uniones interceptan, y los bloques con forma de cuña se deslizan hacia adelante de la cara. En estos dos casos, la falla ocurre cuando el ángulo del plano del movimiento con la horizontal, es decir, el plano mismo en (a) o la línea de intersección en (b), excede el ángulo de la resistencia de fricción.

La falla ocurre en ángulos bajos cuando la superficie es lubricada por agua o por infiltraciones suaves y a altos ángulos cuando la superficie es áspera.

- **La falla de bloques que se vuelcan:** (c) es un mecanismo diferente y el ángulo en el que esto sucede está relacionado al tamaño y forma del bloque involucrado.
- Finalmente, **la falla circular:** (d) ocurre cuando el espaciado de la fractura es tan frecuente que la roca se comporta como un suelo diseñado por la ingeniería, y un resbalón rotacional ocurre a través de la masa rocosa. (Prentice, 1990)

El efecto de la erosión, tanto en la estabilidad del suelo como en la cara de la roca es extremadamente importante. Debe de ser reconocido que las propiedades físicas de la zona erosionada cerca de la superficie son probablemente muy diferentes de aquellas de la roca intacta en las profundidades. Tampoco deben de ignorarse los efectos a largo plazo de una exposición de la cara de la cantera; un hoyo cavado en un suelo cohesivo puede ser estable a ángulos muy altos, pero si esto se deja al clima el desarrollo de discontinuidades múltiples reducirá el ángulo dramáticamente.

Aunque hay formas de paliar esto [reduciendo el flujo del agua y motivando el crecimiento de la vegetación] las fallas en pendiente sustanciales son difíciles de parar una vez han comenzado. El diseño y planificación de la cantera deben, entonces, ver no sólo su vida productiva, sino su futuro a largo plazo y su restauración.

Lo anteriormente expuesto se da como una explicación general de principios, pero los mecanismos de la hidrogeología, el suelo y las rocas son especializaciones complejas cuyo entendimiento completo no descansa dentro del entrenamiento de la mayoría de geólogos que practican la “Geología General”. Si es probable que las condiciones de agua o la estabilidad de la cara de la cantera presenten problemas, y particularmente, si su solución tiene implicaciones financieras grandes, el geólogo o el ingeniero civil no deben dudar en seguir el consejo de un experto en estos campos.

3. PIEDRA DE CONSTRUCCIÓN

3.1. Historia de la piedra dimensional

La piedra natural debe ser seguramente uno de los materiales de construcción más viejos utilizados por el hombre. Antepasados, como fue la civilización micena de Grecia (cerca 1500 a. C.) perfecciona el estilo ciclópeo de construcción, en el que bloques macizos, sin adorno, fueron acoplados juntos, como una pared de piedra seca gigante. Los antiguos egipcios eran mas avanzados; trabajando con la piedra caliza terciaria, los cuales produjeron bloques bien formados tan temprano como en la primera dinastía (cerca 3000 a. C.), aunque la forma efectiva del granito en Egipto no fue alcanzada hasta 1000 años más tarde. Más tarde, las arquitecturas Griega y Romana muestran, por supuesto, el alto nivel de cubrir la piedra que había sido alcanzada por esas civilizaciones; y desde ese tiempo la construcción en piedra ha figurado prominentemente tanto la arquitectura “educada” como en la “vernácula” de cada país del mundo.

Tal vez el uso más extensivo de piedra en edificaciones se dio a finales del siglo diecinueve, cuando la riqueza de Europa y América del Norte se expreso en edificios públicos grandiosos y la opulencia privada pidió grandes casas y mansiones de piedra. Hoy la situación es diferente. El trabajo de extracción de piedra demanda tanto mano de obra, como energía extensiva, de tal manera que la dimensión de la industria de piedra es ahora más reducida. Inevitablemente, se ha concentrado en aquellas áreas donde las condiciones geológicas operan favorablemente para minimizar los costos de extracción.

3.2. Características y factores de la selección en la piedra dimensional

La piedra de cantera es usada en una variedad de modos en la industria de los edificios y la construcción; moldeadas y de tamaños como piedras dimensionales o apenas rotas son usadas como roca de desperdicio o de relleno. Cuando se quiebran un poco más, hasta que sea grava o piedra del tamaño de arena, estas son usadas como ingredientes primarios en la producción de concreto o asfalto, se convierten en algo conocido como agregado.

La piedra que ha sido cortada y tallada en piezas de formas regulares, es conocida como piedra dimensional. Las dimensiones pueden variar de varios metros en tres dimensiones como los bloques grandes usados para edificios públicos, a losas delgadas usadas como coberturas ornamentales o para baldosas de pisos. Las características deseables de una piedra dimensional son:

1. Fuerza estructural
2. Durabilidad
3. Apariencia atractiva y
4. Facilidad de trabajarla en cantera y tallarla.

Mientras otros factores que determinan la elección de la piedra a ser usada son:

- a. Disponibilidad (es decir, facilidad de transporte de la cantera al sitio); y
- b. Consecuencias ambientales del trabajo de la cantera.

La habilidad de cargar la carga requerida sin fallo es determinada por la fuerza estructural de la roca. En el caso de los bloques grandes estructurales, que se necesitan para soportar un edificio, la fuerza compresiva es lo más importante, mientras que en el caso de las baldosas de piso una fuerza tensil es requerida.

La fuerza de un bloque de roca, es determinada por dos factores. Primero por su mineralogía; algunos minerales (el cuarzo, por ejemplo) son inherentemente fuertes; otros (por ejemplo, arcillas y micas) son débiles. En segundo lugar, por la presencia o ausencia de algunas discontinuidades; en rocas sedimentarias, éstas pueden sobreponerse o unirse; en rocas metamórficas o ígneas, dándose la división, laminación, etc. Si estas discontinuidades están cercanamente separadas, como pueden estar por ejemplo, en delgada caliza sobrepuesta, una roca como ésta raramente será usada como piedra dimensional. Al mismo tiempo, la presencia de discontinuidades es extremadamente importante en facilitar la extracción de los bloques de las canteras. La situación ideal sería, si el espaciado de estas discontinuidades coincide con el tamaño de los bloques que serán extraídos, una coincidencia afortunada que raramente se realiza.

A pesar de que la fuerza compresiva, como se ha medido en el laboratorio, es una medida aceptable de la habilidad de una roca para soportar una carga, pero no se toman en cuenta los cambios graduales que pueden ocurrir dentro de la estructura de la roca, si se le coloca bajo cargas pesadas durante un largo tiempo. Estos cambios son bien conocidos por los petrólogos estructurales, quienes reconocen la efectividad de la solución a presión en puntos de contacto de granos individuales de cuarzo o calcita, permitiendo entonces a la roca ser deformada sin fractura obvia.

La durabilidad, es la habilidad de la roca de resistir la exposición al ambiente, que puede ser la atmósfera, donde la roca es usada como fachada para edificio o en agua subterránea donde se usa para fundaciones o para el mar en situaciones marinas. Los geólogos han estudiado el proceso de resistir los efectos climáticos sobre los yacimientos de roca natural y de esto podemos reconocer el rol tan importante del agua intersticial en este proceso.

La cristalización de dicha agua, por congelación o por formación de cristales de sal disueltos en ella, ejerce una presión desde dentro de la roca que puede destruir la estructura total. Estas sales disueltas pueden originarse por el desgaste químico de la roca misma, como por ejemplo, cuando la pirita decae en sulfatos; desde materiales usados en el mortero o desde aguas subterráneas salinas que se levantan desde abajo. El proceso es acelerado en atmósferas de ciudades contaminadas. Mientras, claramente de mayor significado en climas húmedos y donde el hielo y deshielo es un fenómeno común, hay algunos climas tan áridos que este proceso no es efectivo.

De aquí sale que la porosidad es una consideración muy importante y mucho esfuerzo ha sido dedicado para crear medios para medirla como un medio para predecir la durabilidad de la piedra. Se ha notado que el comportamiento de los poros está relacionado con su tamaño; aquellos menores de 5 μm retienen su agua incluso aplicando succión. Existe la creencia amplia de que la micro porosidad es de particular significado en la durabilidad de la roca.

Hay varios métodos para evaluar la porosidad de la muestra de una roca en el laboratorio, como lo son los ensayos de las propiedades físicas de los materiales. Están basados en la comparación del peso seco de un espécimen y sus pesos cuando se empapan en agua bajo varias condiciones. El porcentaje de porosidad es una medida de la roca enteramente saturada, mientras que el coeficiente de saturación mide el contenido del agua después de la inmersión total por 24 horas. La micro porosidad es una medida del contenido de agua retenido después de que una muestra enteramente empapada ha sido sujeta a presión negativa, se cree que mide el volumen de los poros de 5 μm de diámetro.

La capilaridad es medida colocando un espécimen con una punta en el agua y midiéndola después de que un periodo de tiempo ha pasado. Se ha observado que el proceso de tomar agua de una roca es un proceso de dos etapas; un periodo de absorción rápida es seguido por una etapa con una tasa más lenta de absorción. En algunas rocas, la absorción en dos etapas no ocurre; en estos casos, se utiliza la absorción después de 100 minutos para los cálculos.

El ataque químico en la piedra de construcción debido a las aguas atmosféricas es un fenómeno muy intensificado en aire contaminado de ciudades industrializadas modernas. Las piedras calizas son las más afectadas, ya que la calcita es muy soluble en ácidos diluidos, y la mayoría de piedras calizas que han estado expuestas a dichas atmósferas por solo unas décadas muestran una superficie profundamente grabada. La piedra caliza magnésica pérmica, es una sabia elección para la construcción, mientras que la dolomita es mucho más soluble que la calcita. Muchas piedras arenosas tienen un cemento calcáreo que une los granos de cuarzo, y por ende, son más susceptibles al ataque. El examinar muestras para medir la resistencia química se lleva a cabo a través de la técnica simple de inmersión en ácido.

Otro peligro adicional, particularmente en climas calientes, es el cambio de algunos silicatos encontrados particularmente en rocas básicas ígneas hasta expandirse en minerales arcillosos, para medir el orden de la susceptibilidad de dichas rocas, a este respecto, el examen utilizado es, en el que la roca es molida por un periodo de tiempo estándar y la cantidad de esméctica desarrollada, es medida por difracción de rayos X.

La fuerza compresiva de las rocas usadas para la construcción varía enormemente, de < 10 MPa, para algunas piedras calizas mesozoicas, hasta > 260 MPa para algunos granitos.

La experiencia sugiere que la fuerza compresiva no es normalmente, en sí misma, de gran significado en la evaluación de la calidad de piedras de construcción. La fuerza compresiva debería, sin embargo, tener una relación con el volumen de los poros, ya que la presencia de los poros, debería de debilitar la estructura.

Otros tipos de relaciones, como la micro porosidad y saturación contra la fuerza compresiva, también señalan la falta de correlación, indicando que ni los poros pequeños $< 5 \mu\text{m}$, ni los grandes tienen relación cercana a la fuerza de la roca. La excepción está en la micro porosidad, donde la correlación media sugiere que este factor pone un límite en la fuerza, señalando ninguna roca con $> 140 \text{ MPa}$.

Se puede esperar, que un grado de correlación entre varias medidas de porosidad pueda estar establecido. El examen de cristalización, que puede pensarse representa la aproximación más cercana al proceso de desgaste, indica una buena correlación con los coeficientes de saturación, pero ninguna con el porcentaje de porosidad y micro porosidad.

En sí, es que ninguno de los exámenes existentes mide las propiedades de una piedra de construcción que determine la durabilidad. Además de la mineralogía y la estructura porosa, otros factores son probablemente como el tamaño de la partícula, textura y cementación; de los cuales, ninguno a sido estudiado para esta conexión. El sistema actual de exámenes, aunque adecuado para rechazar roca no enteramente apropiada y capaz de dividir en clases más amplias, es todavía inadecuado para predecir la durabilidad de una piedra de construcción en particular.

3.3. Métodos de extracción de la piedra dimensional

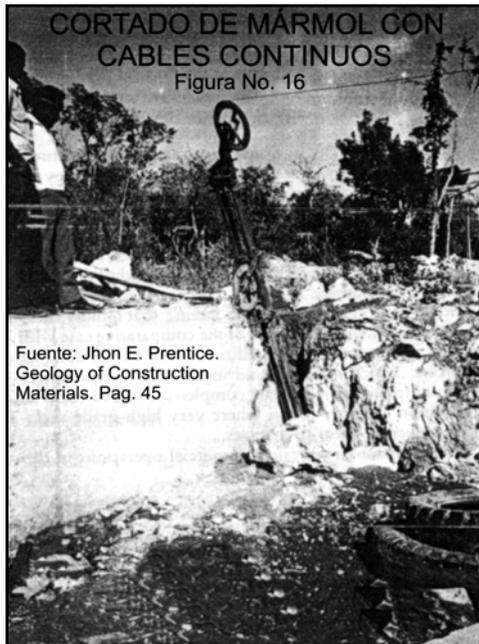
En el proceso de extracción de este tipo de piedra, el objetivo es producir bloques rectangulares tan libres de imperfecciones como sea posible. En algunas ocasiones, las discontinuidades naturales, pueden ser usadas. Por ejemplo, algunas piedras calizas jurásicas, tienen una capa horizontal combinada con dos juegos de planos unidos verticales, lo que divide a la roca en unidades rectangulares naturales; meter cuñas en estas discontinuidades es suficiente para dismantelar el bloque. Más comúnmente, es necesario taladrar líneas de hoyos no muy espaciadas entre ellos; éstos son taladrados verticalmente y horizontalmente a ambos lados del bloque, usando un taladro de percusión, una perforadora o un taladro rotatorio con punta de diamante, el bloque se parte martillando las cuñas. Una carga explosiva moderada (“polvo-negro”) puede ser usado en esta fase. En algunas rocas, un cortador a base de kerosén se usa para crear las incisiones primarias; esto depende de la acción de cortar del estrés creado por la expansión diferencial de los minerales en las rocas, entonces, es altamente exitoso en granitos, pero menos exitoso en rocas monominerálicas como las piedras calizas. (Ver Figura No. 15. Cortado de Granito con mechero de gas).

Otro método de extracción, muy usado en canteras de mármol, por ejemplo; fue un proceso de cables continuos para cortar bloques grandes de la cara de la roca. En este método, se realiza un hoyo con taladro verticalmente desde la superficie y otro se taladra horizontalmente desde la cara de la roca para interconectarlo con el hoyo vertical. (Ver Figura No. 16. Cortado de Mármol con cables continuos).



Un cable continuo es alimentado por las perforaciones y una mezcla de arena y agua es aplicado con el alambre, lo que gradualmente funciona como sierra a través de la roca. Luego otro par de hoyos hechos con taladro, son taladrados más allá, a lo largo de la cara, y son cortados con el alambre de la misma forma. Cuando los dos lados están cortados, el bloque es cortado atrás y fuera de la base en manera idéntica.

Un bloque grande, liberado desde la cara de la cantera, es entonces transportado a la planta para darle los últimos toques para hacer planchas y pulido de la superficie. Las planchas son hechas generalmente con sierras múltiples; para piedras suaves, acero armado con arena; pero para rocas duras, taladros con punta de diamante son necesarios y una variedad de toques finales, desde simples cortes hasta un pulido completo se aplican.



De lo anterior es claro que la producción de una piedra acabada de piedra dimensional es un negocio costoso, en términos de mano de obra, energía y habilidades. No es por ello sorprendente que la industria haya visto una contracción en años recientes y que muchas canteras que anteriormente producían piedra cortada se hayan vuelto a la producción más mecanizada y, por ello, más lucrativa, de agregados.

3.4. Producción comercial de piedra dimensional

Las pequeñas canteras, de las que se extraen piedras toscamente cortadas para paredes y casas para uso local, se encuentran donde hay piedra moderadamente dura. Pero las canteras comerciales de gran escala, que proveen piedra cortada a un mercado amplio y extenso, son pocas y lejanas. Los gastos de capital y los costos de operación de la planta son claramente altos, y debido al alto costo de los productos acabados, el mercado es sin duda limitado. El productor necesita entonces una oferta evaluada de material consistente y grandes depósitos de ese material, que geológicamente son raros.

Las circunstancias geológicas que son encontradas para las grandes masas de roca no fracturada son algo limitadas. En rocas sedimentarias, ocurren cuando la deposición es continua y no interrumpida de tal manera que los planos de la cama están separados ampliamente y donde ha habido poco tectonismo subsecuente.

En rocas ígneas dichas circunstancias se encuentran solamente donde ha habido intrusión subsecuente a una fase tectónica importante, como en el caso de los batolitos graníticos grandes. Masas substanciales de rocas metamórficas sólo ocurren cuando los efectos tectónicos han sido ya sea muy ligero o tan intenso que casi se ha dado la completa refundición. Debido a la facilidad comparativa en que las rocas calcáreas pueden recrystalizarse, muchas piedras de construcción útiles son los mármoles, que pueden ser encontrados en áreas de metamorfismo comparativamente de bajo grado; contrastando, las rocas de composición granítica completamente soldadas, que se encuentran solamente donde el metamorfismo de muy alto grado se han convertido en gneis.

Entonces, en general, las operaciones comerciales de alta escala de este campo consisten en:

1. Piedras Calizas y Mármoles
2. Intrusiones graníticas o similares; o
3. Complejos metamórficos de basamento

Las rocas calcáreas (Calizas y Mármoles) son particularmente útiles como piedra dimensional. La calcita es un material relativamente suave, así que el costo de cortarla y pulirla es relativamente bajo; al mismo tiempo es capaz de tener un pulido alto. Su rajadura rumbohedral asegura que la roca podrá ser cortada fácilmente en todas direcciones, lo que la hace una gran favorita entre escultores; mientras la falta de elongación en el hábito del cristal significa que, aunque fuertemente tectonizada, no hay una suposición de una estructura lineal dentro de la roca. Las condiciones deposicionales son también útiles; inmediatamente después de que los procesos de deposición diagenética toman lugar, lo que involucra la solución y redeposición, de tal manera que incluso antes del entierro de la roca pueden contener una cantidad sustancial de calcita cristalina entera.

Este proceso también tiende a eliminar las discontinuidades de la cama, lo que ocurre solamente cuando hay cambios importantes en las condiciones deposicionales, ellas mismas en las aguas normalmente tranquilas en las que la piedra caliza se acumula.

La fácil solubilidad de la calcita en ácidos disueltos hace que la piedra caliza sea un mineral menos que perfecto para usarla en la atmósfera contaminada de ciudades modernas; en estas circunstancias, se encuentra que la superficie se delinea profundamente después de algunos años. Un porcentaje de magnesio en el mineral hace que la roca sea menos soluble. Sin embargo, la exposición a una atmósfera menos agresiva puede ser beneficiada, porque la solución y redeposición lenta de la calcita en las capas de la superficie crean una patina fuerte, que resiste otros ataques de clima. Como un material para el piso, las rocas calcínicas no resistirán mucho la abrasión en áreas de tráfico pesado por la suavidad inherente del mineral; a pesar de que sean muy usadas en casas y edificios públicos.

Las piedras calizas tienden también a ser porosas; geológicamente, las piedras calizas viejas, como la piedra caliza del carbonífero, pueden ser bastante impermeables, ya que la diagénesis y mitificación extensivas por las que han pasado ha llenado los poros, con calcita depositada; pero esto las hace también fuertes y difíciles en la cantera. Las piedras calizas jóvenes tienen porosidades más altas, y por lo tanto, una menor durabilidad.

La industria frecuentemente falla en distinguir la piedra caliza ornamental (que son enteramente sedimentarias en origen) de sus equivalentes metamórficos, mercadeándolas ambas como mármoles.

La industria de piedra dimensional es vista como una en la que los costos de extracción, de procesamiento y de transporte son siempre altos, y en la que la automatización ofrece un prospecto muy bajo de reducir costos. De esto se deduce que sólo los depósitos que son geológicamente excelentes (extensos, uniformes y donde las estructuras asisten a la extracción) son fáciles de trabajar. Comparado con la producción de agregados triturados, esto produce un lucro bajo y no hay duda de que muchas rocas convenientes para la producción de piedra dimensional sirven para alimentar las plantas trituradoras de agregados. La mejor esperanza para la industria parece yacer en el desarrollo de la piedra dimensional y el agregado, de tal manera que la misma cantera puede usar su mejor material para cortarlo en bloques, y es el desecho de este proceso, aunado con el material de menor calidad, que pueden ir a la planta de agregados. (Prentice, 1990)

3.5. Granito

El granito es la roca plutónica por antonomasia, hasta el punto de que en el mundo industrial se denominan granitos a todas las rocas plutónicas, independientemente de su composición real. En sus términos más precisos, el granito es una roca relativamente escasa, aunque difícil de diferenciar en el campo de sus términos más próximos, sobre todo de la granodiorita, por lo que a menudo estas rocas plutónicas de tonalidades claras se describen con el nombre genérico de granitoides.

Los granitos son los más abundantes de todas las rocas plutónicas o abisales, de composición ácida. Los grandes plutones graníticos o batolitos pueden originarse de varias maneras, a saber, por excavación magmática (un cuerpo de magma excava o abre su camino hacia arriba dentro de la corteza terrestre), por inyección forzada (el magma, en ascenso vertical, empuja hacia arriba a la roca suprayacente), o por el remplazamiento metasomático o granitización (proceso mediante el cual las rocas sólidas son cambiadas en rocas de composición y textura granítica sin pasar por una etapa magmática).

A nivel de afloramiento, suele dar origen a un relieve característico, el denominado berrocal, formado como consecuencia del desarrollo del proceso de meteorización favorecido por la fracturación que suele afectar a este tipo de rocas, que suele individualizar paralelepípedos de rocas a partir de los cuales, por erosión diferencial de vértices y aristas, se forman los bolos.

En cuanto a su aplicación, el granito es una de las rocas más empleadas en la industria de la construcción, sobre todo en forma de placas pulidas para revestimiento de exteriores e interiores. También en grandes bloques se utiliza como elementos arquitectónicos de tipo sillería, mientras que triturada, o cuando ya está triturada de forma natural por la tectónica, se emplea como árido o incluso directamente como balasto para líneas férreas. Incluso las arenas que se forman por alteración sobre sus afloramientos se pueden aprovechar para la construcción.

A este respecto de la aplicación, hay que resaltar que el objetivo primordial de la explotación del granito es la obtención de grandes bloques comerciales, de varios metros cúbicos, para el posterior serrado y pulido de las placas. Esto no siempre es posible, debido a diversos factores que afectan a los yacimientos, como; la tectonización, el grado de fracturación que afecta a los minerales de la roca, la homogeneidad textural, etc.

En el territorio nacional, los yacimientos de granito son muy escasos y su costo de extracción, adquisición de maquinaria y equipo es de muy alto costo, por la dureza del material; pero no se descarta la posibilidad de encontrar un yacimiento altamente tectonizado y ser utilizado como árido o un granito sano y ser utilizado como roca ornamental.

3.6. Basalto

Los basaltos pueden definirse como lavas máficas en las cuales la plagioclasa cálcica es el principal mineral constitutivo, junto con augita, olivino y óxido de hierro; la hornblenda, la biotita y la hiperstena en casos excepcionales. El equivalente aphanítico del grabo es el basalto, la más abundante de todas las lavas. Cuando sus vesículas están rellenas por minerales, como cuarzo o calcita, se conocen como amígdalas. Al basalto y rocas ígneas de grano fino oscuras similares, se les conoce con el nombre de rocas trapecianas. En general, los basaltos son de la misma textura de grano fino que los materiales rocosos sólidos arrojados por las explosiones volcánicas denominadas rocas volcánicas piroclásticas. Las rocas volcánicas típicas se presentan como derrames de lava expulsados sobre la superficie de la tierra, cuyo espesor individual varía desde unos cuantos centímetros hasta varios centenares de metros.

Las erupciones producidas a lo largo de extensas fracturas en la superficie de la tierra, conocidas como fisuras, han formado grandes áreas en el mundo cubiertas por lava, debido a esto se deriva el término erupciones de fisura. A estas erupciones a menudo se asocian volcanes con conductos aislados de los cuales se emite la lava, cuya presencia no es necesaria. El basalto es el principal material de que están constituidas las erupciones de fisura, el cual por lo general fluye sobre la superficie de la tierra en grandes cantidades como para formar un gran espesor de láminas de lava horizontales, que al enfriarse y solidificarse, las rocas resultantes son conocidas como basaltos de inundación o de meseta.

En forma geomorfológica los derrames de lava, son cuerpos ígneos tabulares, delgados en comparación con su extensión horizontal. Su posición corresponde de un modo general al enfriamiento rápido de la lava, como la obsidiana, la perlita o la piedra pómez.

El basalto es una roca ígnea o eruptiva, conocida también como efusiva, extrusiva o volcánica, de composición básica (contenido de feldespato cálcico), que es aquella que ha sido llevada a la superficie de la tierra por la fuerza volcánica, de color oscuro, pesado y resistente.

La ocurrencia del basalto se encuentra mundialmente extendida. La extendida ocurrencia y uniformidad de textura, mineralogía y composición implican una fuente uniforme de las lavas o magmas a partir de los cuales se cristalizan los basaltos y las diabasas. Los basaltos forman la mayor parte de los conos volcánicos; también son abundantes en las regiones continentales. Como son los productos principales de los volcanes, predominan entre las lavas de los volcanes y de los cinturones orogénicos. Los basaltos constituyen más del 90% de las lavas participantes en las erupciones volcánicas. La distinción básica entre el basalto y la diabasa es el modo de ocurrencia. Los basaltos son rocas casi exclusivamente volcánicas, mientras que la diabasa predomina entre diques y sills, intrusiones de poca profundidad que han sido inyectadas paralelamente a los lechos de estratos de muy poca inclinación horizontal. La composición del basalto, la diabasa y el grabo son muy semejantes, lo cual indica que tienen un origen común y han cristalizado en condiciones diferentes. El basalto cuando no es vesicular (burbujas de gas disuelto) o escoriformes, constituyen un excelente material para balasto (cascajo) en las líneas de ferrocarriles y se usan mucho en el campo de la construcción como piedra machacada o triturada (material de agregado grueso para la ingeniería civil).

3.7. Caliza

Las calizas han recibido este nombre por la cal que se extrae de ella. Al sustraerle el dióxido de carbono queda la cal como residuo, que es simplemente óxido de calcio. La caliza presenta en su composición como minerales fundamentales la calcita y la aragonita, ambos minerales, están constituidos por carbonatos de calcio.

La caliza generalmente es de origen marino, químico u orgánico. Por lo general, se encuentra formando estratos en zonas plegadas montañosas, los cuales son resistentes a la erosión y dan origen a formas montañosas. La caliza directa o indirectamente está considerada como uno de los materiales más importantes para la vida humana. Se ha estimado que la corteza terrestre está constituida de entre el 3.5 y 4% de calcio y del 2% de magnesio, lo cual indica que de todas las rocas explotadas en el mundo la caliza representa un porcentaje superior al 35%.

Las calizas son rocas sedimentarias no clásticas, originadas por un proceso de sedimentación directa. Esta sedimentación puede tener diversos orígenes, si bien la más común es la denominada precipitación bioquímica: el carbonato cálcico se fija (en general, en forma de aragonito) en las conchas o esqueletos de determinados organismos, ya sean microscópicos (foraminíferos), o macroscópicos (lamelibranquios, braquiópodos,.....), y a su muerte, estas conchas o esqueletos se acumulan, originando un sedimento carbonatado. El aragonito, inestable en condiciones atmosféricas, se va transformando en calcita y la disolución parcial y reprecipitación del carbonato cementa la roca, dando origen a las calizas. Otra forma de depósito es la fijación del carbonato sobre elementos extraños, como granos de cuarzo, o pequeños fragmentos de fósiles, dando origen a los oolitos (calizas oolíticas).

También las algas fijan este compuesto, dando origen a mallas de algas o estromatolitos, que si se fragmentan y ruedan originan los pinolitos (calizas pisolíticas). Todas estas posibilidades dan origen a los diversos tipos de calizas.

Junto con el carbonato cálcico se suele producir depósitos de otros componentes, ya sean detríticos medios finos (arena-limo), o finos (arcillas); el primer caso es propio de medios energéticos, caracterizados por la sedimentación de fragmentos fósiles o resedimentación de fragmentos de calizas ya más o menos consolidados. Así se originan las denominadas calizas bioclásticas o de intraclastos, respectivamente. En el segundo caso, se produce la floculación de la arcillas conjuntamente con el depósito de los carbonatos, ya que ambos son propios del depósito en aguas tranquilas, y se originan las denominadas margas, margo calizas y calizas margosas, formadas por proporciones variables de caliza y arcilla.

La caliza es una roca formada básicamente por carbonatos de calcio (CaCO_3) y otros elementos que le comunican impurezas, entre los cuales los más comunes son el magnesio (Mg), la sílice (Si) y el fosfato (PO_4). Cuando la concentración de alguno de estos elementos es de cierto tenor, se conviene en denominar las calizas como calizas magnesianas, calizas silicas o calizas fosfatadas, según sea el caso. En las calizas magnesianas, de muy alta concentración de magnesio, se forma la sal doble calcio y magnesio, dando lugar a un tipo diferente de caliza, que se conoce con el nombre de dolomita. Las combinaciones en las calizas silíceas son las más desfavorables, ya que el material resulta insoluble y abrasivo. Las fosforitas son rocas que tienen en su formación el radical PO_4 . En esta roca, el fosfato es el compuesto de mayor importancia. La riqueza de la roca se indica por el porcentaje de fosfato tricálcico.

La mayoría de las calizas pulverizadas y otros productos procesados en las canteras son llamados productos crudos. En la práctica se distinguen dos tipos de productos: enmiendas y abonos, uno de ellos se obtiene por la pulverización mecánica de la caliza y el otro por proceso de cocción. Las calizas sometidas al proceso de cocción en hornos de cuba pierden el dióxido de carbono (CO_2) y el óxido de calcio (CaO), conocido como cal viva, la cual al ser tratada con agua (H_2O) da lugar al hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o cal apagada.

En cuanto a sus aplicaciones, son relativamente numerosas:

- Es la más extendida en la industria cementera: el cemento más común, el de tipo Pórtland, es una mezcla finamente pulverizada y debidamente dosificada de caliza y arcilla, que calentada en horno a temperatura entre $1,400$ y $1,500$ °C, reacciona para dar un producto que recibe el nombre “clinker”, al cual una vez enfriado se le adiciona una pequeña cantidad de yeso (para impedir el fraguado demasiado rápido) para obtener el producto final, que es el cemento.
- Otra aplicación común, si bien su eficacia es menor y su control es tan sencillo, es la obtención de la cal (CaO), producto calcinado de la caliza. Esta cal, a su vez se utiliza para la limpieza y desinfección de fachadas (encalado), y como producto base de otras aplicaciones en la industria química.
- Otra aplicación directa es como roca marmórea, para construcción: la mayor parte de los marmolistas le llaman mármol, y no es tal roca metamórfica, sino caliza poco o nada recristalizada; tienen menor calidad que los mármoles auténticos, si bien mayor variabilidad textural, y por lo tanto, mayor variedad y vistosidad (rojo alicante, negro marquina, etc.).
- Una aplicación a resaltar, por su importancia creciente, es su utilización como lecho de procesos de combustión de carbón rico en azufre, ya que evita la movilización de éste mediante la formación de CaSO_4 (anhidrita).

- Otra aplicación común es como árido (agregado grueso para concreto) y sobre todo como árido en la construcción de la base de vías de ferrocarril; como roca en la fabricación de cal, que se usa para la elaboración de morteros, estucos o enlucidos en la industria de la construcción; como refractario para revestimiento de hornos de solera abierta; como estabilizante en la sub-base de carreteras y como materia prima en la depuración de aguas residuales.

Es también interesante el comportamiento de estas rocas frente a los fluidos: las calizas suelen presentar escasa porosidad primaria, es decir, debido a la disposición original de sus elementos texturales, por lo que las calizas sanas y no fracturadas suelen tener escasa capacidad de almacenamiento de fluidos. Sin embargo, en determinadas ocasiones (a bajas presiones y temperaturas) pueden responder a la deformación tectónica fracturándose, lo que les confiere una cierta porosidad secundaria. Además el carbonato de calcio es soluble en agua, sobre todo en aguas cálidas, en las que existe ácido carbónico disuelto como consecuencia de las reacciones. Ello hace que bajo la acción del agua, ya sea superficial o subterránea, las formaciones de calizas desarrollen los denominados procesos kársticos, que implican la formación de cuevas y cavernas, formas de disolución (lapiáces y cárcavas) o de hundimiento superficial (dolinas), etc. Así como la forma de relieve más característico, el torcal. Además, en estas deformaciones se puede acumular agua en grandes volúmenes: son excelentes acuíferos subterráneos, aunque también son formaciones poco adecuadas para almacenar aguas superficiales, que suelen infiltrarse con gran facilidad a través de sumideros, dolinas, etc. El proceso en la explotación de la caliza, es por lo regular el de bancos a cielo abierto.

3.8. Cal

Bajo la denominación cal se incluyen todos los productos de las rocas calizas sometidos al proceso de cocción. Estos productos aportan el calcio (Ca) en forma de óxido de calcio (CaO), conocido con el nombre de cal viva, y el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, conocido con el nombre de cal apagada. La calcinación de la roca caliza (CaCO_3), proceso que se realiza en hornos, libera el dióxido de carbono (CO_2), dando origen al carbonato de calcio (CaCO_3) por $\text{CaO} + \text{CO}_2$.

La cantidad de cal viva depende de la pureza de la roca caliza utilizada, que debe estar en tenores que oscilan del 75% hasta el 98% de carbonato de calcio. La cal apagada resulta del tratar la cal viva con agua. La cal se hidrata y da lugar a un polvo que alcanza del 5% al 72% de cal, bajo la forma de hidróxido de calcio.

Las empresas que explotan yacimientos de calizas, producen cal agrícola como producto complementario. La cal tiene múltiples usos en sus diferentes formas. La cal viva se utiliza en la industria siderúrgica, en el tratamiento de los metales ferrosos, en el frisado de muros anclados de pared y en la fabricación de briquetas y morteros. La cal apagada se usa en tratamiento de agua potable, en la estabilización de la sub-base de carreteras y corrección de suelos y en la agricultura. La industria de papel utiliza la cal en sus diferentes formas.

Generalmente, una parte de la producción de cal es utilizada por la industria de la construcción y la otra parte por la agricultura como enmienda para los suelos.

El proceso para la fabricación de cal agrícola es mucho más sencillo que el proceso para fabricar cal viva y sólo requiere de la trituración de la caliza hasta una granulometría deseada. La caliza dolomítica es quizás la materia prima ideal, por su aporte de calcio (Ca) y magnesio (Mg).

El proceso de fabricación de la cal es mucho más sencillo que el del cemento y solo comprende de la calcinación, trituración, pulverización e hidratación de la materia prima, que puede ser caliza pura (CaCO_3) o caliza dolomítica ($\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$). Igualmente, las exigencias en cuanto a la calidad de la materia prima son mucho menores; además no se requiere la combinación de varios materiales, sino que la materia prima es exclusivamente caliza o dolomita. La cal proveniente de la roca caliza, la cual se somete a un tratamiento que se inicia en un horno a una temperatura de 900 °C. A la salida del horno la cal se presenta en terrones, es lo que se llama cal viva. Pero la cal viva no se utiliza en construcción por lo que se hidrata y se obtiene la cal apagada. Según la cantidad de agua que se utilice para la hidratación obtendremos distintos tipos de cal apagada. De mayor a menor cantidad de agua tendremos: **(a)** Cal en polvo; y **(b)** Cal compacta. (Riv)

La clasificación de la cal se hará en función de los tipos de componentes que lleve la cal.

a) Cal aérea: endurece rápidamente al contacto con el aire.

Existen cuatro tipos:

- a.1. Cal aérea I:** Es la de mejor calidad y se usa en albañilería para revocos, blanqueados, acabados y morteros para colocación de azulejos.
- a.2. Cal aérea II:** Se utiliza en trabajos toscos y para la unión de piedras en muros de mampostería.

a.3. Cal aérea dolomítica: También se le denomina cal gris o magra, forma una pasta gris al echarle agua. No es buena para la construcción.

a.4. Cal grasa: Se usa para la decoración.

b) Cal hidráulica: Es un material aglomerante, polvoriento y parcialmente apagado y tiene la propiedad de endurecer bajo el agua.

Cualquiera de los dos tipos de cal, tanto aérea como hidráulica, empieza a endurecer a partir de las tres horas y termina el proceso a las 48 horas. La dureza de la cal depende de la calidad de las calizas utilizadas y en menor grado de su manufactura. La mayoría de la cal es obtenida a partir de la caliza con porcentajes de carbonatos alrededor del 95% y excepcionalmente se emplea caliza con más del 98% de carbonatos. La cal viva con mayor valor de pureza contiene de 94% a 96% de óxido de calcio; sin embargo la mayoría de las especificaciones exigen sólo el 90% y para algunos usos pueden tener menos del 90%. La cal apagada, con un contenido del 74% de óxido de calcio, equivale a la cal viva con 100%, ya que la cal apagada contiene 26% de agua combinada químicamente. La cal viva en la construcción no se puede emplear antes de 60 días desde su apagado (paso de cal viva a cal apagada). La cal grasa se utiliza generalmente en morteros de cal, morteros bastardos, pasta de cal (para enlucidos) o pintura de cal para blanqueados de paredes.

3.9. Calcita

Es un mineral que ocurre en masas granulares o con crucero; crece en cavidades, como cristales piramidales llamados “espato diente de perro”. Es un carbonato de calcio (CaCO_3), incolora, blanda y de varios matices, de dureza 3, crucero oblicuo separándose en rombos (es decir, según tres direcciones); lustre opaco a perlino y su gravedad específica 2.7.

Es un mineral formador de roca y su composición es de carbonato de calcio (CaCO_3), que equivale a dióxido de carbono en un 44% y cal en 56%. En pequeñas cantidades de magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), Zinc (Zn) y plomo (Pb) pueden estar presentes sustituyendo al calcio.

Su variación es muy numerosa y de diversa apariencia. Depende principalmente de los siguientes puntos: diferencias en cristalización y condición estructural, presencia de impurezas, etc. Siendo los extremos cristales perfectos y formas macizas terrosas. Se utiliza en la fabricación de morteros y cemento; como un material de construcción y ornato, como fundente en operaciones metalúrgicas, como cristales puros en la fabricación de instrumentos ópticos, cal, fertilizantes y cal en blanqueo. La calcita, que es un mineral constituyente de las calizas y los mármoles, y en consecuencia del cemento; se pone en evidencia porque presenta efervescencia con el ácido clorhídrico (HCl) oficial (diluido al 10%).

3.10. Mármol

El metamorfismo es un proceso de transformación de rocas o yacimientos minerales persistentes, que ocurre en relación con el aumento de presión y/o temperatura que tiene lugar en determinados puntos de la corteza terrestre. Como consecuencia, se forman rocas nuevas (las rocas metamórficas), con texturas, estructuras y composiciones mineralógicas diferentes a la de la roca original.

El mármol, es la roca metamórfica con mayor interés minero que se explota en cantera. Se forma como consecuencia del metamorfismo de calizas, bajo condiciones de metamorfismo regional como de contacto, que inducen la recrystalización de la calcita a alta temperatura.

Este proceso transforma las variadas texturas originales de las calcitas en texturas granoblásticas de tamaño de grano muy variable, que pueden llegar a ser de varios milímetros, lo que se traduce en una mayor resistencia mecánica y homogeneidad de la roca.

Conviene resaltar el hecho de que el término geológico de mármol no es equivalente al empleado en la industria, que suele incluir las calizas marmóreas en sentido amplio, es decir, calizas compactas, que suelen presentar una mayor heterogeneidad de textura y estructura, y peores características de comportamiento mecánico y físico químico que los mármoles auténticos.

El mármol está compuesto mayoritariamente por calcita granoblástica, pero pueden contener además otros minerales, tales como micas (mármoles cipolínicos), dolomita, brucita, vesubianita, wollastonita, diópsido, tremolita, grafito y pirita.

En el estudio de los mármoles hay que resaltar que su homogeneidad puede no ser completa: además de los mármoles homogéneos, blancos o grises, existen otros que presentan heterogeneidades, más o menos desarrollados, que van desde bandeados o foliaciones tectónicas, marcadas por lo general por acumulación de minerales oscuros, y que son típicos de mármoles formados por metamorfismo regional, a formas o cambios de coloración más o menos irregulares, difusos, que pueden ser producto de inhomogeneidad de la roca caliza original. Esto permite una clasificación industrial de estas rocas según su tonalidad, en monocromos (o sencillos), cuando presentan una sola tonalidad y policromos (o compuestos), caso de presentar varios colores. La mayor parte de los mármoles monocromos se presentan en tonalidades blancas, amarillentas, verdosas o negras, mientras que los policromos se denominan según su tonalidad dominante.

Los mármoles policromos o compuestos presentan inclusiones de otros minerales, generalmente micas, cuarzos y serpentinas, en agregados o vetas que adoptan morfologías diversas y les confieren diversas tonalidades. Basándose en su estructura, se clasifican en veteados, casos de presentar colores listados; aborescentes, si las bandas de colores se ramifican; y brechiformes, en el caso que estén constituidos por fragmentos angulosos. Un caso particular de los mármoles brechiformes lo constituyen los brocateles (mármoles de varios colores), cuyos fragmentos presentan tonalidades distintas.

Un carácter a controlar para definir la explotabilidad de una masa marmórea es su fracturación. Al ser rocas afectadas por procesos tectónicos, a menudo están muy fracturadas, lo que dificulta su extracción en bloques comerciales, y favorece el desarrollo de fenómenos kársticos, que igualmente dificultan la explotación. También la presencia de minerales oxidables es un carácter geológico de interés minero, pues estos, pueden producir importantes problemas estéticos en el material instalado. (Ver Figura No. 17 y 18. Cantera San Lorenzo -Mármol Blanco-). (D.G.M.H., 1965)



Las aplicaciones concretas del mármol son en general conocidas: como chapado de exteriores e interiores, elementos arquitectónicos auxiliares (escalinatas), complementos decorativos (estatuas), revestimientos.

3.11. Serpentinita

Es una roca metamórfica de interés ornamental, de color verde y con tonalidades variadas de claras a oscuras, que se forman por el metamorfismo regional de rocas magmáticas ultramáficas (peridotitas) y es un mineral fundamental dentro de estas rocas, es masivo, liso, lustre grasoso al tacto, gravedad específica 2.5 - 2.8. Una variedad de serpentina que se llama crisotilo, es la clase más importante de los asbestos, que corresponde al grupo de los anfíboles.

Desde el punto de vista mineralógico, esta constituida mayoritariamente por minerales del grupo de la serpentina (antigorita), que suelen estar acompañados por otros filosilicatos afines, como el talco, por minerales opacos, como magnetita o cromita, por carbonato rico en magnesio (magnesita-dolomita) y por diversos tipos de minerales prismáticos (moscovita, biotita).

Sus características estructurales y texturales pueden ser muy variadas, mostrando formas más o menos irregulares, que en unos casos ofrecen caracteres estéticos positivos, mientras que en otros, impiden totalmente la explotación minera. En especial, la fracturación es el principal factor negativo para este tipo de aprovechamiento.

La serpentina, por sus caracteres mecánicos (sobre todo, por su baja dureza, igual a 4) se agrupa con los mármoles (“mármol verde”). A menudo se utiliza en la construcción de láminas pulimentadas para revestimientos, como elementos auxiliares (columnas, zócalos), como adornos, como material de construcción, etc. (Ver Figura No. 19 y 20. Cantera El Palmar –Serpentina-).



3.12. Gneis

Son rocas que pueden formarse por distintos mecanismos, que se pueden agrupar en dos: el metamorfismo de alto grado de rocas pelíticas, que dan origen a los denominados paragneises, y la deformación tectónica (por lo general acompañada de metamorfismo) de rocas graníticas, que origina los denominados ortogneises. Estos últimos son los que presentan mayores posibilidades industriales, por ser rocas compactas y competentes, susceptibles incluso del pulimento.

Están formados mayoritariamente, al igual que los granitos, por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, mica (biotita, a menudo acompañada de moscovita), como minerales mayoritarios más comunes, que pueden estar acompañados de muchos otros (granate, anfíbol, cordierierita), y de los accesorios comunes de este tipo de rocas (apatito, esfena, circón, piritita).

Su textura (masiva) y estructura (lenticular) están dominadas por la presencia de una foliación o bandeo, marcado por la reorientación mecánica y/o recristalización de minerales laminares (micas), por la granulación del cuarzo, y por la rotación de los granos de feldespato, que suelen dar origen, por su mayor resistencia al aplastamiento, a formas ocelares (augen). El resultado es el bandeo gneísico típico, con alteraciones claro-oscuros y nódulos claros, de feldespato. Es la roca metamórfica de grano más grueso.

Generalmente, el gneis es una roca muy consistente, sobrepasando el esquisto en su capacidad para resistir la meteorización. Topográficamente las formas producidas por la meteorización del gneis son redondeadas y no tienen el aspecto corrugado característico de los esquistos.

Los gneises, se agrupan con los granitos en cuanto a su explotación minera y aplicaciones industriales. Como carácter específico, hay que señalar, que el hecho de que sea una roca bandeada afecta a su instalación en obra y a su aprovechamiento, que estarán condicionadas por este factor.

3.13. Esquisto

Es una roca metamórfica que proviene de cambios en la forma y el carácter de las rocas preexistentes que originalmente eran totalmente diferentes. Cuando el metamorfismo es de grano muy intenso, puede ser difícil, sino imposible, determinar si la roca original fue ígnea o sedimentaria. Esta es una roca metamórfica, que presenta tal grado de metamorfismo que puede ser considerada por sus características especiales sin coincidir sobre su origen.

Es una roca común que contiene gran cantidad de minerales planos como micas, con clivajes dispuestos en la misma dirección, lo que hace que la roca sea fácilmente fisionable. Cuando los constituyentes micáceos o laminados dominan, el gneis gradúa a esquisto. Sin embargo, los minerales visibles probablemente son mucho más uniformes en apariencia y composición, tienen poco feldespato y las capas adyacentes, por lo regular, están compuestas de los mismos minerales. La foliación extrema de los esquistos causa que se separen fácilmente, de tal manera que esta separación se conoce como esquistosidad. En base a los minerales presentes más prominentes, son conocidas las variedades que se llaman esquisto de mica, esquisto de anfíbola u horblenda y esquisto de clorita.

El término esquisto significa exfoliación. La exfoliación de los esquistos se atribuye a la orientación o alineación de sus minerales, los cuales son lo suficientemente grandes para permitir su identificación macroscópica. La mayoría de los esquistos consisten en por lo menos dos o más minerales. Los esquistos derivan de rocas arcillosas o arcilla-arenosa, y a menudo se presentan asociados con gneis.

Los esquistos tienen la tendencia a desarrollar topográficamente una superficie de valles y cadenas montañosas paralelas. Algunos tipos de esquistos se utilizan en edificación, en especial para el cubrimiento de techos. Los esquistos calcáreos se utilizan, porque a veces se encuentran dentro de su formación lentes de mármol que pueden ser explotados industrialmente.

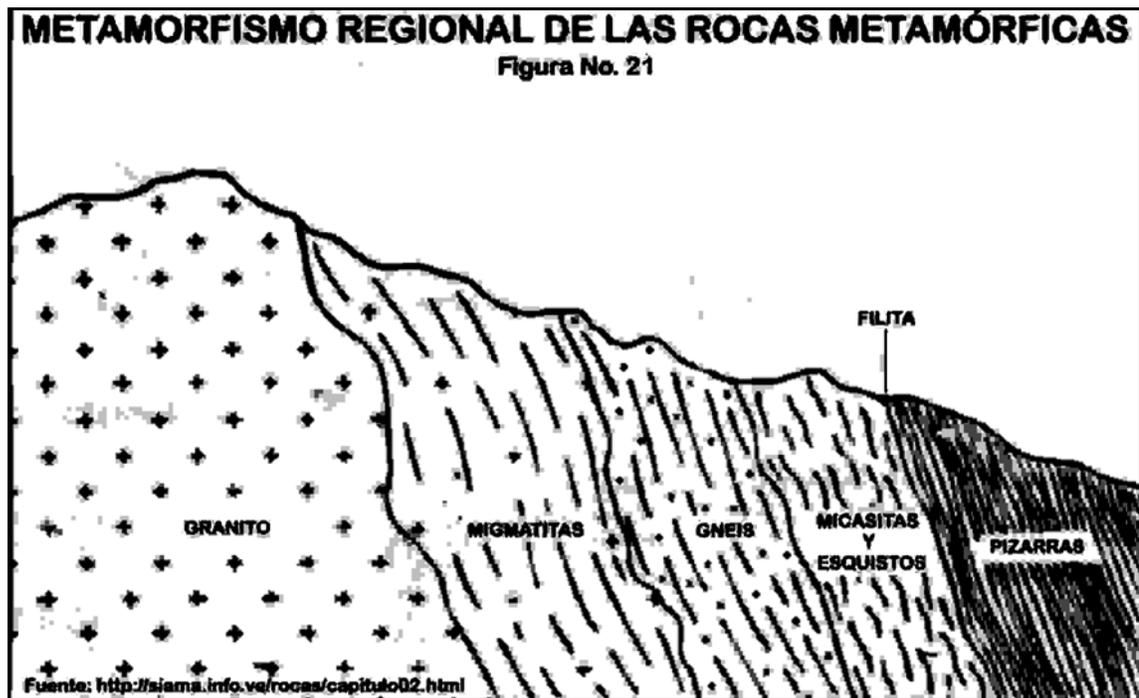
3.14. Filita

Es intermedia en textura entre el esquisto y la pizarra y tiende a romperse en lajas cuyas superficies muestran pequeñas arrugas. Las filitas son rocas similares a las pizarras, pero de grano más grueso. Las pizarras a bajas temperaturas se obtiene del metamorfismo del esquisto, pero si el metamorfismo del esquisto queda sometido a temperaturas suficientemente elevadas como para recristalizarse, se obtiene la filita; con exfoliación bien desarrollada al paralelismo de los minerales micáceos que la constituyen. Las pizarras y las filitas se utilizan en láminas para cubrir los techos de pequeños edificios.

3.15. Pizarra

La pizarra tiene su origen desde una roca sedimentaria que fue depositándose como barro o limo, bajo el agua, formándose capas que fueron prensadas por depósitos posteriores hasta convertirse en roca. Al ser un proceso desarrollado a lo largo de millones de años, la pizarra se formó en capas planas, por lo que resulta fácil de partir en láminas de superficie plana, uniforme y es muy resistente. Esa característica suya que permite el exfoliado regular de esas rocas metamórficas en láminas se denominó pizarrosidad o esquistosidad. Las pizarras fueron sedimentos arcillosos, adquiriendo su estado final, como se ha dicho, por las presiones y las temperaturas producidas en las cadenas orogénicas. Los principales componentes minerales de estas rocas son la sericita, el cuarzo y minerales del grupo de la clorita. Es frecuente también que contenga óxidos y sulfuros de hierro, minerales arcillosos y carbonatos, la textura de estas rocas al microscopio es típica, observándose una masa de minerales filitosos con una orientación paralela muy marcada, destacando sólo algunos agregados o minerales gruesos dispersos en la matriz mayoritaria de grano fino.

Las pizarras son las rocas más peculiares de las rocas metamórficas. Su peculiaridad radica en que se separan, no por planos estratigráficos como los esquistos, sino a lo largo de los planos de clivaje producidos por la presión. Estos planos pueden estar en cualquier ángulo como son los estratigráficos. Las pizarras, por lo general, no son tan resistentes a la erosión como el gneis o los esquistos, pero son más resistentes que la caliza o el mármol. Las formas topográficas producidas por las pizarras raras veces presentan características especiales, siendo usualmente una topografía suave subyugada y ondulada parecida a la topografía desarrollada en las zonas de esquistos. Cuando las pizarras se encuentran asociadas a calizas, es decir cuando se encuentran plegadas en una serie con pizarras, la erosión destruye la caliza, produciendo valles lineales bordeados por cerros de pizarras, y si las areniscas se encuentran en la serie estas formarán una serie continua de colinas o sierra sobre una topografía subyugada. (Ver Figura No. 21. Metamorfismo Regional de las Rocas Metamórficas). (Riv)



El uso de la pizarra en el territorio nacional es muy bajo, y en ocasiones se confunde con la filita en la utilización para recubrimientos de fachadas para casas y baldosas para solados; y no está lejos, que en un futuro cercano, a la pizarra se le de un mejor uso como material de construcción, ya que es un material noble con características y cualidades muy particulares, como en el acabado de cubiertas (techos) en diversos formatos para su uso, ya que después de extraerla, es aserrada para el tamaño o formato que se necesite para su comercialización; y además, armoniza en todos los entornos, se integra perfectamente en un entorno natural, sin romper con la armonía del paisaje.

3.16. Piedra de blindaje

Un uso importante que se le da a la piedra en altas cantidades es como una piedra de blindaje en la construcción de defensas contra el mar y para rompe-olas. Dichas construcciones usan grandes cantidades de piedra, generalmente en tamaños muy grandes (bloques de hasta 20 toneladas de peso son usados), de tal manera que la proximidad al sitio donde está la fuente de rocas es imperativa. La fuerza y durabilidad de la roca es un activo importante en este contexto y debe de ser tomado en consideración cuando su uso es considerado contra su rival principal, el concreto. Aunque el acero y la madera han sido usados para este propósito, 95% de los rompe-olas en el mundo usan piedra o concreto o una combinación de ambos.

La mayoría de rompe-olas son construidos de un núcleo central y una armadura externa. El núcleo está compuesto de una piedra de “corrida de cantera” descargada en la cama de mar, generalmente al nivel del mar, de tal manera que pueda ser construida hacia fuera desde la costa. Este núcleo consiste principalmente de material del tamaño del guijarro o peña (por ejemplo, entre 60 y 500 mm de diámetro). En esto, se ponen las capas blindadas.

La recubierta del núcleo es usualmente una capa filtro, compuesta por roca del tamaño de arena gruesa arenosa (de 2 a 60 mm de diámetro), pero frecuentemente contiene arena gruesa también. El objeto de esta capa de filtro es para prevenir a las finas de que sean lavadas fuera del núcleo, lo que podría causar el asentamiento o debilitamiento de la estructura. Arriba de esto, hay una o más capas de fragmentos de roca, frecuentemente una capa secundaria abajo, compuesta de fragmentos relativamente pequeños, encima de la cual una capa primaria, compuesta de bloques grandes, es construida. Alternativamente, la capa primaria puede ser construida en concreto o construcción de albañilería.

Las toscamente trituradas rocas del núcleo, tal como han sido producidas en la cantera, pueden contener una cantidad variable de finos (arena gruesa o de menor tamaño) y estas serán mayormente lavadas durante el proceso de emplazamiento. La cantidad de finos depende de la litología de la roca original; en general, las rocas ígneas duras y las piedras arenosas producen poco material fino cuando se trituran, mientras que las piedras calizas tienden a producir grandes cantidades. Este es un factor significativo en muchas áreas del mundo cuando la piedra caliza es la única roca disponible.

El diseño de las capas de filtro es dirigida hacia alcanzar la distribución de las partículas por tamaño, lo que deja vacíos mínimos, y puede ser calculado con una fórmula bien establecida. Sin embargo, la forma de las partículas es también importante, aunque mucho más difícil de medir, está demostrado que se deben evitar las partículas vedijosas (que están rotas en pequeñas láminas) o elongadas. Las rocas que producen dichas partículas son aquellas que tienen esquistosis o líneas, y este factor debe ser tomado en cuenta en la selección de la fuente de la roca para las capas de filtros.

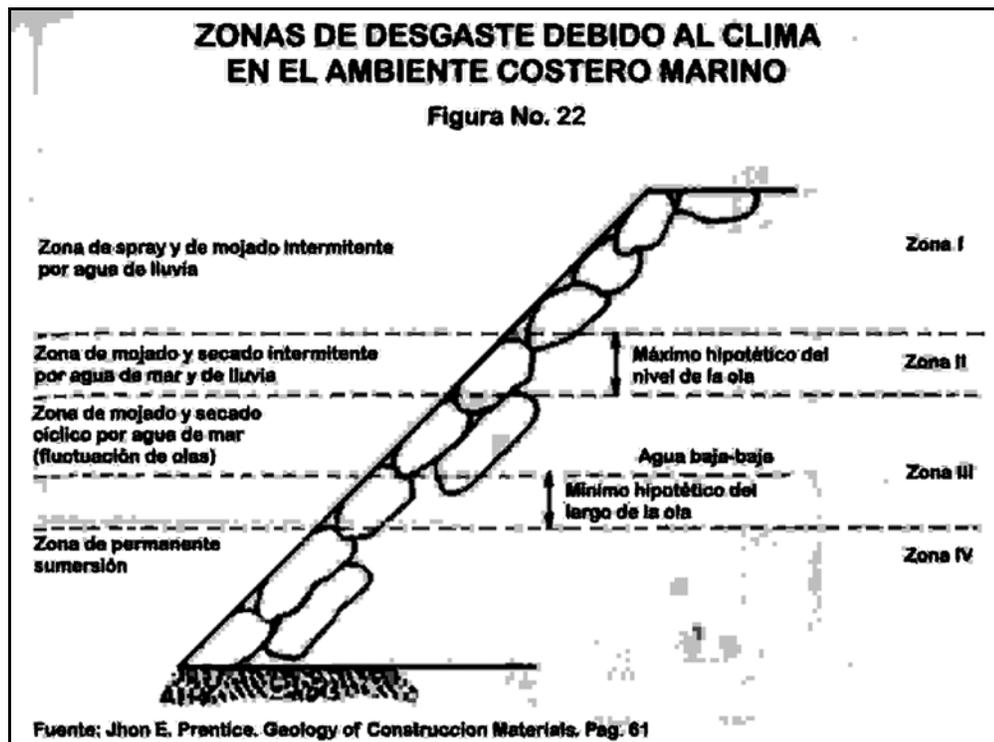
El tamaño de los bloques usados en el blindaje primario, es importante para determinar la efectividad del quiebre del agua y de la pendiente en la que puede ser mantenida. Inicialmente, esto es determinado por el espaciado de la fractura in situ, lo que puede ser establecido por una inspección visual de la cantera o por observación de los hoyos en el núcleo (designación de la calidad de la roca, DCR), o limitadamente, por las medidas geofísicas. El tamaño real producido, sin embargo, es también controlado por los métodos de excavación y por cualquier colisión primaria que sea llevada a cabo.

Será obvio que el uso como piedra de blindaje, coloca la demanda más grande sobre la roca natural, la que debe de tener una gran medida de la resistencia a la exposición en un ambiente muy agresivo. Estas cualidades pueden ser definidas como resistencia, por ejemplo, la resistencia a la fractura bajo el impacto; dureza, es decir, la resistencia a la abrasión, y la durabilidad.

Los agentes primarios que atacan la roca, son los de desgaste físico y químico por clima, pero estos tienden a agravarse en un punto donde se quiebra el agua por la presencia de la sal y por los cambios frecuentes de mojado y secado como resultado de el levantamiento y la bajada de las olas. Además, con el impacto físico de las olas durante tormentas, hasta los bloques más grandes pueden moverse; mientras los fragmentos de guijarro o fragmentos más pequeños pueden estar en movimiento constante. Los sedimentólogos han reconocido desde hace tiempo que esta zona representa el ambiente en donde el grado más alto de abrasión y rozadura toma lugar.

En un ambiente marino, cuatro zonas arregladas verticalmente pueden ser reconocidas. (Ver Figura No. 22. Las cuatro zonas principales de desgaste debido al clima en el Ambiente Costero Marino).

En la base (la zona IV), es la zona sumergida permanentemente, debajo de la marca de la marea baja, donde el blindaje es protegido de agentes sub-aéreos que desgastan, aunque todavía expuesta a corrientes fuertes de agua generada por las olas que se rompen. Arriba (la zona III) es una zona intersticial; aquí la diaria saturación y secamiento proveen un mecanismo de corrosión física (desde cristalización, de cristales de sal) y química acelerada. Es también la zona donde las olas que se rompen ejercen su mayor fuerza para mover y por lo tanto, gastar la piedra de blindaje. La (zona II) está arriba de la marca normal de la marea alta, pero todavía esta sujeta a las olas que mojan y secan alternativamente y la absorción por el viento y la güija y arena arrojadas por las olas. En la (zona I), la presencia de spray de sal y la exposición a fuerzas sub-aéreas resulta en la acción acelerada del desgaste por clima. En todas las zonas, las agencias biológicas pueden asistir en la erosión, los animales barrenadores y excavadores en las zonas III y IV; algas y plantas terrestres de otros niveles.



Las tres cualidades: dureza, resistencia y durabilidad pueden hasta cierto punto ser medidas por exámenes de laboratorio, aunque, como la piedra dimensional y la transferencia de los resultados del laboratorio al rendimiento actual es todavía imperfecta.

La fuerza compresiva no confinada es claramente importante como una medida de la habilidad de la roca para soportar el impacto repetido; y en el ambiente marino es necesario medir la muestra tanto del estado seco así como cuando esta saturado con agua fresca y marina. Las fuerzas mojada y seca son por lo general significativamente diferentes y el ratio entre la fuerza mojada-seca ha proveído valores en la evaluación de la conveniencia de la roca. Estos son muchos exámenes disponibles para cuantificar la resistencia de la roca a la abrasión, pero casi todos fueron inventados para usarlos en la industria de agregados e involucran medidas para fragmentos triturados. Ha sido sugerido que en los bloques grandes como los usados en rompe-olas, el patrón de fracturas es la característica más significativa y los exámenes usando los módulos de elasticidad, combinado con el de la fuerza compresiva no confinada, han sido creados. En el uso práctico, la simple medida de la gravedad específica parece relacionarse cercanamente a la resistencia a la abrasión. Se ha demostrado que los otros exámenes que usan la pérdida de peso o tamaño de partículas por molienda autógena bajo condiciones fijas eran practicables, y ya que simulan condiciones “reales”, deben ser una medida precisa de la resistencia a la abrasión.

Será claro para el geólogo que la resistencia de la roca a la abrasión debe depender de su mineralogía y su textura. Puede demostrarse que el mineral cuarzo, por un simple examen de raspado es más duro que la calcita, así que las piedras calizas son más fáciles de gastar que las rocas silíceas. Una roca de textura fina con esquistosis bien desarrollada puede ser gastada más fácilmente que una con equigranular grueso.

Una piedra arenosa con cementación debida a la solución de presión debe resistir a la abrasión mejor que una calcita cementada suelta. Entonces, la petrología detallada es uno de los métodos de evaluación más importantes en la predicción de la conveniencia de una piedra de blindaje. Los exámenes de durabilidad, con la piedra dimensional, no son fáciles de relacionar con la experiencia práctica. El consenso es que los factores principales en el proceso de desgaste natural a causa del clima son el colapso mecánico causado por el crecimiento del cristal en los poros de la roca y la conversión química de los minerales aluminosilíceos en arcilla. El primer proceso debe estar relacionado con la porosidad de la roca, que puede ser estimado por su gravedad específica o por la variedad de exámenes involucrando la saturación total o parcial del agua. Estos exámenes, sin embargo, miden el volumen total de los poros en la roca y hay evidencia que sugiere que el tamaño, particularmente el tamaño máximo de los poros pueden ser el factor más importante. Los exámenes que involucran ciclos de congelación y deshielo o mojado y secado y las medidas subsecuentes de la pérdida de peso, son ampliamente usados, basándose en el hecho de que son simulaciones prácticas de la vida real.

En términos prácticos, una de las características más importantes en la selección de la roca para piedra de blindaje es el reconocimiento de los efectos del desgaste por clima en la roca in-situ. Los efectos del desgaste por clima puede reducir la fuerza compresiva de la roca desde 250 MPa a valores casi nulos. La práctica estandarizada en ingeniería geológica reconoce siete grados progresivos de desgaste por clima; los grados más altos pueden ser reconocidos fácilmente, pero las rocas desgastadas ligera y modestamente pueden ser menos fácilmente identificables y a pesar de eso estos grados pueden tener fuerzas significativamente menores; la observación cuidadosa de la cara de la cantera o de los núcleos de los hoyos hechos con taladro es esencial.

Ya que el declive de la fuerza está relacionado con el desarrollo de los minerales arcillosos y particularmente de la expansión de minerales arcillosos, las medidas en laboratorio se éstos dan una medida objetiva; esto puede hacerse con difracción de rayos X o simplemente con manchas de azul de metileno. El problema de desgaste por clima es particularmente agudo en rocas básicas ígneas.

3.17. Roca para relleno

El relleno es un término general para describir material granular usado en su estado suelto. Para crear una base, ya sea para un edificio, un camino o una pista. Se usa un poco de material artificial de esta manera: concreto (ripió), arcilla esquistosa carbonera quemada y escoria volcánica quemada; pero la roca natural es la fuente principal y como tal representa el volumen más grande de producción de cantera para cualquier propósito.

En la construcción de caminos, el relleno suelto es usado para proveer una capa de protección y una sub-base. En el proceso de construcción, el suelo y cualquier material suelto es removido para formar una superficie nivelada (nivel de sub-grado o formación). Si esta superficie no es firme, se coloca una capa sobre ella, generalmente de piedra no finamente triturada o de material que sobra de la cantera, sobre ésta se coloca la sub-base compuesta de relleno selecto. La base del camino, la base de la pista y la pista a ser usada, que siguen en secuencia, están compuestas de agregados unidos con cemento o betún.

El objeto de la sub-base es distraer el estrés creado por el tráfico sobre un área amplia, de tal forma que el sub-grado debajo no se deforme.

El relleno de selecto, entonces, debe ser capaz de soportar la carga constante e intermitente impuesta por el paso de los vehículos; debe también soportar el movimiento entre partículas generado dentro del mismo. Cuando el camino está terminado, las capas superiores dan algo de protección a la sub-base; sin embargo, el agua aún puede pasar libremente a través de la estructura abierta, entonces la roca que la constituye debe ser capaz de mantener sus propiedades en condiciones mojadas. También debe ser capaz de resistir el proceso de desgaste por el clima, tanto mecánico como químico. Durante el proceso de construcción, la sub-base es usada como la pista donde la maquinaria pesada de construcción puede moverse; entonces debe ser capaz de soportar el peso y el impacto de ese tipo de vehículos. Durante la fase de construcción, debe quedarse por un largo período expuesto a los elementos, por lo que su resistencia al desgaste por el clima es mucho más importante.

La especificación de clasificación, es designada para crear una plataforma lo suficientemente rígida para soportar la carga impuesta, pero a la vez proveer de libertad de drenaje de agua a través de la sub-base. Es particularmente importante evitar la inclusión de arcilla, cuya presencia:

1. Permite que la sub-base se deforme,
2. Tapa los vacíos en la estructura; y
3. En casos extremos, puede ser forzada hacia arriba dentro de la base del camino y la base de la pista, causando rompimientos.

A pesar de la importancia manifiesta de que los componentes del relleno deben ser duros, resistentes y durables, hay muy poca práctica estandarizada en el examen de estos parámetros. Los métodos que se aplican a la roca dimensional y que miden la roca intacta (fuerza compresiva no confinada, porosidad, etc.) y los métodos usados para examinar los agregados (abrasión, desgaste o dureza, fuerza de impacto, etc.) son usados y están sujetos a las mismas reservas detalladas.

Probablemente la mayor desventaja de la aplicación de estos métodos es que son aplicados normalmente a rocas secas o parcialmente secas; mientras que un material de relleno debe ser capaz de mantener su fuerza incluso cuando es saturada repetidamente. Se considera que la pérdida de fuerza cuando se humedece, y es medido por el valor del agregado aplastado, para obtener el porcentaje de finos (por medio de una carga continua de 400 KN, durante 10 minutos) puede variar desde 20% en arena gruesa dura hasta 80% para algunas piedras calizas; medida por el valor del impacto del agregado (cantidad de finos producidos, por el golpe de un martillo de cierto peso a cierta altura), varía desde 17% hasta 35%, y por el examen de la medición de una carga requerida para producir 10% de finos, varía desde 24% hasta 63%. Estas cifras son tan grandes que claramente cualquier aplicación de las medidas de fuerza seca tiene muy poco significado en el contexto del relleno.

Un examen dirigido a este problema, pero particularmente en rocas de lodo, es el índice de durabilidad slake (IDS) (slake significa también: cal y apagar). En este, los fragmentos de la roca son rotados en un tambor con un colador de alambres debajo de agua y el peso perdido se mide. La pérdida de peso se reporta como porcentaje del peso inicial y eso es el (IDS).

Ya que el relleno puede estar expuesto al ambiente por algún tiempo durante la construcción y en algunos casos puede ser sujeto a la acción de las heladas, la susceptibilidad a la escarcha es vista como algo importante. Esta puede ser medida directamente a través de la refrigeración.

Un gran número de fallas en las sub-bases de caminos han sido rastreadas al uso de roca parcialmente desgastada. Una roca puede aparentar ser buena y sin desgaste, pero la alteración de los minerales primarios en otros secundarios más débiles puede reducir substancialmente la fuerza de su uso.

El granito y rocas similares, la descomposición del feldespato a caolinita es una causa importante en la alteración de minerales ferromagnesianos de rocas ígneas básicas a serpentinita y arcilla esmectita. Aunque tal vez es más significativo en rocas ígneas, cambios similares pueden ocurrir en piedras arenosas arcósicas. Afortunadamente estos cambios son detectados fácilmente bajo un microscopio petrográfico. Usando una técnica de contar puntos, es posible crear un índice micropetrográfico que compare el número de granos enteros y no enteros. Al ser examinado el granito, el método muestra una buena correlación entre otros métodos ingenieriles de examinar.

Diferentes condiciones climáticas pueden afectar el tipo y la velocidad de desgaste de las rocas y se ha encontrado necesario tomar esto en cuenta para determinar la conveniencia de una roca en el uso de un área particular. Un efecto del desgaste de las rocas por la acción atmosférica, es particularmente dramático, que ha afectado las bases de las casas y carreteras, esto ocurre cuando se usa una pizarra pirítica como material de base. La pirita (Fe_2S_x) se oxida fácilmente y se convierte en trióxido de sulfuro, que al combinarse con agua y carbonato de calcio forma yeso. La formación de cristales grandes de selenita produce una expansión de volumen, lo que tiene efectos disruptivos en las bases de caminos y la platilla de concreto puesta hasta arriba. La identificación de pirita en capas delgadas o pulidas o incluso en especímenes tomados con la mano es normalmente fácil y puede ser fácilmente reconocida en el campo por su aparición en superficies desgastadas por la acción atmosférica del mineral amarillo color sulfuro jarocita. En el laboratorio puede ser cuantificada por una separación del mineral pesado de la pizarra del suelo o por un análisis químico del contenido sulfúrico. Los límites de tolerancia son desconocidos, pero parece probable que cualquier pizarra que contenga más del 1% ó 2% de pirita, no debe ser usada para relleno. (Prentice, 1990)

3.18. El rol del geólogo

La discusión precedente ha demostrado, que las cualidades que determinan la conveniencia de una roca para ser usada como una piedra de construcción, como una piedra de blindaje o como una roca constituyente de relleno puede estar directamente relacionada con su modo de formación o historia geológica. Armado con este conocimiento, el geólogo puede realizar una búsqueda adecuada de nuevos depósitos y puede dirigir operaciones de cantera para obtener beneficios máximos.

También se puede observar que hay una clara relación, pero no simple entre los caracteres petrográficos de una roca y su rendimiento real como parte de un edificio o una estructura de ingeniería. Es significativo que la buena correlación entre varios métodos de examen ingenieril y la correlación con caracteres petrográficos es alcanzada solamente cuando las rocas estudiadas son de litología comprobable. Dada la gran variedad de mineralogía y textura de las rocas, es irrazonable pensar que respondan de igual manera a fuerzas externas. Entonces el efecto del impacto de una riolita vidriosa, debe ser completamente diferente del efecto sobre un granito cristalino o una piedra arenosa de calcita cementada, esperar medir eso con un solo coeficiente, que pueda luego ser comparado con otros caracteres como dureza, no es lógico. Sin embargo, dentro de un tipo litológico, hay consistencia de resultados para predecir su comportamiento.

Un punto de vista, al evaluar el potencial de una roca para usarla, el primer requisito es un estudio petrográfico completo, identificar su mineralogía, el tamaño del grano, textura, manufactura y estado de resistencia al tiempo. Solamente así es posible decidir las maneras en que la roca puede fallar y decidir que exámenes son apropiados para determinar su conveniencia.

4. AGREGADO GRUESO

Ya que tienen diferentes funciones y por lo tanto diferentes tamaños como productos finales, es conveniente seguir el uso industrial de separar el agregado grueso (es decir, partículas rocosas de más de 5 mm de diámetro) del agregado fino; aunque, por supuesto, su ocurrencia geológica es usualmente la misma. Tales tamaños de partículas pueden ocurrir naturalmente, como en arena glacial y aluvial, y por lo tanto sólo requiere separarse; o pueden ser creados al romper piedras.

El agregado grueso es principalmente utilizado como un constituyente primario del concreto, o como un constituyente de carreteras, ya sea en el cuerpo de la carretera o como ripio de la superficie. En la mayoría de los países del mundo, representa el agregado mayor. La construcción actual se basa en la accesibilidad del agregado grueso a un precio bajo; y el transporte de este material pesado y voluminoso es un elemento principal del costo. Las fuentes de dicho agregado deben entonces buscarse cerca del lugar de su uso.

4.1 Propiedades del agregado grueso

En las diversas formas en las cuales se utiliza el agregado, se expone a una variedad de presiones; y las propiedades de la carretera, el puente o edificio en donde se usa dependerán primordialmente de las propiedades del agregado. Es necesario que reaccione favorablemente con el concreto o el betumen en el cual se incrusta; y además, que sea duradero en las condiciones ambientales prevalecientes.

Para conocer las razones fundamentales de las propiedades de los agregados, es conveniente realizar un estudio petrográfico detallado de la roca, para que prediga su comportamiento en proyectos específicos en la construcción civil. Las propiedades que se deben examinar son muchas y variadas; se pueden resumir bajo las categorías de fuerza, absorción de agua, encogimiento, resistencia a la abrasión, capacidad de erosión, comportamiento al pulido, consistencia laminosa y resistencia al medio ambiente.

4.1.1. Fuerza

En cualquier material se puede describir como su habilidad para resistir compresión, fuerza de corte o tensión; y en materiales homogéneos hay una relación razonablemente precisa entre los tres. En rocas, las cuales son casi sin excepción no homogéneas, esta relación es más compleja, y por esta razón, así como por los grandes problemas involucrados en su medición, la fuerza de tensión ha recibido poca atención en la industria de la construcción. La fuerza de compresión, se puede medir simplemente aplicando presión a un cubo de roca en una dirección, y registrando la presión en deterioro. Esto es uniaxial o fuerza de compresión libre. La fuerza de compresión de una roca depende lógicamente de:

1. La fuerza de los minerales individuales; y
2. La fuerza de los materiales, de acuerdo a la cementación de los granos individuales;

mientras se puede esperar que la fuerza del mineral puede tener a cambio una relación con su dureza, como se mide con la escala de Mohs.

Una reducción significativa de la fuerza de compresión es consecuencia de los efectos del desgaste climático. Efectos del clima en la superficie, aún en climas templados, frecuentemente se extienden en profundidad varios décimos de metros de la roca; y aún roca que aparentemente esta fresca con frecuencia contiene rasgos de desgaste, los cuales reducen su fuerza sustancialmente.

Se debe reconocer, que la fuerza de compresión es una medida de la roca intacta, y no del mismo desempeño de dicha roca cuando se rompe el agregado. La mayoría de las rocas que se utilizan para agregado de caminos o de concreto son bastante resistentes a procesos de desgaste químico; y el hecho de que estos fragmentos de roca están mayormente incrustados en el concreto o cubiertos con asfalto les proporciona una capa o superficie de protección. Las rocas ígneas básicas, de las cuales el basalto es la más abundante, son sin embargo susceptibles al desgaste; en particular sus minerales ferromagnésicos son alterados fácilmente a arcilla esmectita protuberante, resultando en una desinfección de la roca. Hay que tener siempre presente, que las reacciones posibles entre los fragmentos del agregado y el cemento que los contiene es un asunto de gran preocupación en la industria de la construcción.

4.1.2. Absorción de agua y encogimiento

Son fenómenos relacionados. Diferentes clases de rocas muestran una capacidad distinta para absorber agua. Esto es importante en la producción de concreto, ya que la absorción de agua dentro del agregado produce un encogimiento en el concreto, que lo lleva a agrietarse, y por lo tanto falta de solidez. Una correlación clara se muestra entre el encogimiento seco del concreto y la absorción de agua del agregado utilizado; y una relación similar parece existir en mezclas bituminosas.

Rocas con una absorción alta son los basaltos, doleritas, felsitas y esquistos arcillosos, mientras que el granito, la piedra caliza y el pedernal muestran una absorción baja. Mientras que de la porosidad puede esperarse que tenga un papel importante en esta relación, de hecho la presencia de minerales de arcilla expansibles parece ser un factor importante.

Estas se forman en rocas ígneas básicas, de la descomposición de los minerales de ferromagnesio, y es de importancia que un basalto desgastado mostrará una alta absorción, mientras que la misma roca en un estado natural, sin desgaste tendrá un valor bajo.

4.1.3. Resistencia a la abrasión, erosión y pulido

Son propiedades de gran importancia en la construcción de las carreteras. Una roca que será utilizada para cubrir una carretera debe de soportar:

1. La aplicación súbita de presión intensa y estrés (impacto) de vehículos pesados;
2. La acción trituradora de las llantas (erosión); y
3. El proceso de desgaste (específicamente congelación).

Antes de la época del tráfico motorizado pesado, la superficie de la carretera se formaba con agregado natural; pero la carretera moderna, con su continua carga de vehículos pesados, exige un material mucho más duradero y hoy en día, el agregado de roca molida es usual.

La resistencia a la abrasión, desgaste o dureza de un agregado, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Este factor cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de piso y pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben estar duros. Los materiales que se utilizan como agregados para pavimentos deben tener resistencia al desgaste, la cual se determina mediante el ensayo de abrasión en la máquina de los Ángeles y se expresa en porcentaje. Un desgaste aceptable es del 20% hasta el 25%. Un desgaste del 50% no es aceptable para ningún tipo de pavimento asfáltico.

La dureza (resistencia a la carga), resistencia (resistencia a la abrasión) y tenacidad (resistencia al impacto), son propiedades ingenieriles controladas generalmente por los constituyentes minerales individuales de las partículas de las roca, la resistencia con los que estos minerales están empaquetados o cementados juntos y la abundancia de fracturas. Las partículas que consisten de minerales con un bajo grado de dureza se considera que son suaves; y aquellas que son fácilmente fragmentadas, debido a la unión o cementación débil o al fracturamiento, se considera que son débiles. Las partículas suaves y débiles son nocivas en los agregados porque se desempeñan pobremente en el uso y porque se fragmentan durante el manejo, afectando por eso la gradación de los agregados.

La fragmentación mecánica de los agregados debido a la acción de mezcladoras, equipo mecánico y/o tráfico, o fragmentación debido al intemperismo es referido como degradación del agregado. La degradación puede ocurrir debido al cedimiento compresivo de los granos en puntos de contacto, así como la acción abrasiva de granos entre sí. La degradación generalmente es de mayor significado en pavimentos bituminosos que en pavimentos de concreto. Un buen agregado en promedio tiene una resistencia de aplastamiento varias veces mayor que la del concreto.

La textura superficial, en lo referente a los espacios porosos del agregado, afectan la durabilidad, fortaleza y resistencia a la abrasión, y tienen influencia directa en los procesos de congelamiento y descongelamiento (en latitudes altas). La baja porosidad mejora la calidad del material. La cuarcita y el basalto densos se utilizan para hacer concretos resistentes al desgaste.

El pulido es una propiedad que su importancia radica en el reconocimiento de que, luego de un periodo de tráfico, algunos agregados sufren un descenso en su habilidad para inhibir el deslizamiento; que se relaciona con la habilidad de estos de perder su superficie áspera inicial y desarrollar un pulido. Un valor de prueba se deriva en una máquina que artificialmente acelera este proceso, dando números en el rango de 20 a 72, en el cual el número más alto denota una mejor resistencia al pulido.

La superficie de los agregados resistentes a deslices, son rocas constituidas de grano fino con cantidades sustanciales de cada uno de los constituyentes del cuarzo, arcillas cloríticas y fragmentos líticos; son rocas que han sufrido un grado moderado de metamorfismo y son por lo tanto densas y compactas, con una textura de crecimiento interno. Las cuarcitas y arcosas son moderadamente resistentes al pulimento, mientras que las piedras calizas son moderadamente susceptibles al pulimento, al igual que las rocas areniscas, aunque la ocurrencia de arena en la piedra caliza aumenta la resistencia a ser pulida; mientras que la mayoría de las rocas ígneas (granitos, basaltos, grabos y doleritas) no son fáciles ni difíciles para ser pulidas, mantienen una posición media. Las rocas que tienen una buena resistencia al pulido deben ser rechazadas para superficies de carreteras porque se rompen muy rápido bajo abrasión o impacto.

4.1.4. Consistencia laminosa

Es una medida de la forma de las partículas del agregado. Muchas rocas muestran una estructura lineal o laminada debido a la orientación paralela de los minerales alargados o laminados, como los de la mica o los del barro, que son los más obvios en este aspecto, cualquier mineral que muestre alargamiento puede producir una estructura así (por ejemplo, compuestos de fragmentos de cuarzo en arenisca).

Esta alineación puede darse a conocer en rocas sedimentaria durante su deposición (fragmentos o alineación de capas) o durante la diagénesis y metamorfismo (clivaje o foliación –láminas-). En rocas se pueden formar estas estructuras, por el flujo durante el emplazamiento o por capas que se unen durante el enfriamiento. Uniones subsecuentes pueden darse, estrechamente espaciadas para cualquier cuerpo ígneo o sedimentario. De este modo es un fenómeno muy común, del cual, algunas masas de roca podrían estar totalmente exentas.

Al ser golpeadas, estas rocas se rompen en fragmentos que son alargados y planos en lugar de ser cúbicos. La cuantificación de este fenómeno se hace midiendo las tres dimensiones de por lo menos a 200 pedazos, el índice de consistencia laminosa (I_{CL}) se define como el porcentaje de peso de fragmentos de los cuales su dimensión menor es menos de 0.6 veces la dimensión media; mientras el índice de alargamiento (I_A) es el porcentaje del peso de los fragmentos de los cuales su dimensión de largo es mayor en 1.8 la dimensión media.

La naturaleza laboriosa de estas medidas se justifica por la importancia de la consistencia laminosa para las propiedades mecánicas del agregado. Cuando se mide la fuerza de una roca laminada, como la pizarra, esta es mucho menor midiéndola normal a la alineación. Un agregado hecho de una roca laminada reflejará su fuerza en su orientación más débil, especialmente como en cualquier uso (como en la superficie de una carretera o como parte de una mezcla de concreto) las partículas laminosas tenderán a alinearse ellas mismas. De este modo, la consistencia laminosa reduce sustancialmente los valores de prueba del agregado.

4.1.5. Resistencia al medio ambiente

El agregado que se usa como superficie para carreteras es expuesto a desgastes atmosféricos, los cuales pueden ser acelerados en el rompimiento del agregado por el tráfico. Los efectos del clima también se pueden manifestar en donde el agregado se usa como base de carreteras, particularmente en donde la superficie no está totalmente sellada, y por lo tanto existe filtración de agua y en donde el agregado está expuesto o parcialmente, en la superficie del concreto. Es de gran importancia, la necesidad de asegurarse de que el agregado en estas situaciones no sea uno en el cual ya ha comenzado el proceso de desgaste. El empeoramiento de las propiedades mecánicas sobre el desgaste se registra muy bien; pero muchos operadores de canteras no están concientes de la profundidad de la superficie a la cual se puede extender o a la variedad de esa profundidad; y de esa forma rocas desgastadas defectuosas pueden ser entregadas en el lugar junto con el material correcto. Observación visual realizada por el responsable de la cantera, usando criterios de grietas abiertas, fisuras rellenas de arcillas, etc., es frecuentemente adecuada para prevenir estas situaciones; pero si se requiere confirmación cuantitativa, el método de un índice micropetrográfico puede usarse, para verificar el estado mineralógico de la roca.

El grado en el cual hasta las rocas firmes son susceptibles al desgaste por la acción atmosférica es variable y se ha tratado de medir. La prueba de durabilidad de desintegración, puede usarse para medir el efecto de la exposición a la saturación. En general sólo se aplican a rocas de barro, las cuales sólo en casos excepcionales serían usadas como agregado. Sin embargo rocas más fuertes pueden quebrarse con congelación, o por cambios extremos de temperatura.

4.1.6. Distribución del tamaño de las partículas (Clasificación)

Es una propiedad muy importante en el uso del agregado grueso. El agregado grueso es usualmente vendido en una serie de grados de tamaños normales. (Por ejemplo: 12.7 mm = 1/2", 19.05 mm = 6/8"). Estos grados de tamaños se producen con el proceso de cernido, y la habilidad de producir estos grados depende del tamaño de distribución presente en el material primario. El cernido nunca puede ser totalmente efectivo, así que cada grado de tamaño nominal incluye partículas de tamaños pequeños y grandes. La mayoría de los países ponen límites al tamaño menor o mayor del agregado, y la selección del grado a utilizar depende fuertemente de la experiencia y tradición. Por lo que es difícil encontrar alguna guía con bases científicas para los requisitos del tamaño para aplicaciones particulares. El único punto en el cual hay acuerdo general es la necesidad de excluir "finos", definidos de varias formas, pero mayormente como "pasar 75 µm"; este tamaño incluirá la mayoría de los minerales de barro, que tienen un efecto nocivo en la fijación del concreto y en la capa de bitumen; pero hay algunas formaciones de rocas que no tienen barro, así que hasta los "finos" pueden ser incluidos y no son dañinos. Por esto, la industria de la construcción confía en exámenes realizados sobre el producto final, concreto, mezcla de bitumen, etc., en lugar de especificar los ingredientes en términos de clasificación; la responsabilidad del proveedor es proporcionar un producto consistente dentro de los límites definidos de variación.

4.2. Agregado grueso de rocas trituradas

Antes del presente siglo, la mayoría de la demanda del agregado grueso se cubría con la arena que corre naturalmente; ya que muchas áreas urbanas estaban situadas en valles de ríos, las planicies aluviales de los ríos eran fuente natural e inmediata. Tales fuentes de abastecimiento, sin embargo, fueron insuficientes, y ha existido un reemplazo gradual de ellas por roca triturada.

En la construcción de carreteras la roca triturada ha reemplazado casi completamente el agregado natural, aunque este último es frecuentemente preferido para el concreto. Actualmente, en la república de Guatemala la producción de agregado natural y piedra triturada, abarca del 55% al 65%, respectivamente como material de construcción.

Como se describió anteriormente, un agregado grueso necesita llenar una serie de especificaciones definidas claramente; y hay un número limitado de formaciones geológicas que pueden suplir esta necesidad. Presiones económicas han tendido a favorecer grandes unidades de producción, produciendo grandes cantidades anualmente para satisfacer la demanda, lo cual para ello necesita por supuesto una gran base correspondiente de materia prima. Excavar y procesar rocas duras es, a pesar de los mejores esfuerzos de la industria para contenerla, un proceso ruidoso y polvoriento, generando tráfico pesado, y hay por esto restricciones severas en sitios ecológicos, especialmente porque áreas de “roca dura” también son comúnmente regiones de interés y atracción pintoresca.

Una zona que normalmente presenta problemas, es la zona laterítica (zona en la cual se encuentra una especie de arcilla rojiza) de desgaste de las regiones calientes y húmedas hoy en día en el mundo. La enorme profundidad del desgaste, la cual puede alcanzar cientos de metros, significa que sobre grandes tramos de tierra no hay rocas duras disponibles; o si la hay disponible, esta está tan profundamente descompuesta que hace de un concreto imperfecto. Muchas de estas regiones están en los países más pobres y menos desarrollados; y no es exageración decir que dichos países puedan adquirir los estándares de vida que disfruta el mundo desarrollado, pero uno de los principales problemas será el abastecimiento de un suministro adecuado de agregado grueso.

4.2.1. Métodos de extracción

Mientras las fuentes de agregado pueden estar muy disponibles, los métodos de extracción son similares a través del mundo. Casi todo el agregado de roca triturada se consigue por extracción de pozos abiertos. La primera etapa en el proceso normalmente requiere de explosivos; una línea de hoyos para explosivos se taladran a una distancia atrás de la cara de la cantera, y las cargas de explosivos se insertan y disparan. El patrón de los hoyos explosivos, la cantidad de la carga a usar, y el tiempo de la explosión deben ser cuidadosamente regulados para asegurar una eficiencia máxima de los explosivos, la producción de bloques del tamaño adecuado, y la creación de una cara nueva y estable de la cantera. Es por lo tanto, una operación que requiere gran habilidad. Por ello, el operador experimentado de explosivos usará las discontinuidades naturales en la roca, diaclasas, capas, etc., para su ventaja; éstas son usualmente evidentes en la parte frontal de la roca, pero el geólogo tiene la responsabilidad de avisar cuando es probable que existan cambios atrás de la parte frontal de la roca que son aparentes, cuando por ejemplo, se acerca a una falla o flexión principal.

4.2.1.1. Primaria

Consiste en la operación de una explosión primaria, la cual producirá bloques de varios tamaños, algunos de los cuales pueden ser grandes para enviarse directamente a la trituradora.

4.2.1.2. Secundaria

Si los bloques obtenidos en la explosión primaria son muy grandes, estos se pueden reducir por otra operación consistente por una explosión secundaria, que son pequeñas cargas que se insertan en los hoyos explosivos taladrados en dichos bloques y disparados en el suelo de la cantera. Alternativamente pueden romperse con una bola de acero que se eleva y se suelta con una grúa.

La extracción de las rocas que ocurren como masas compactas de minerales generalmente estratificadas y que se presentan bajo diferentes tipos de estructuras geológicas, amerita este método de extracción, de pozos abiertos. (Langer, 1995)

4.2.2. Categorías de trituración

Luego de lo indicado anteriormente, la siguiente etapa es la de trituración, fragmentación o machaqueo, que son operaciones que se ejecutan durante el proceso de preparación de los diferente productos y tienden a reducir la dimensión de los diferente fragmentos de piedra producidos, sin reducirlos a polvo, para alcanzar fragmentos de las dimensiones deseadas, a partir de rocas de diferentes dimensiones obtenidas en la cantera.

Esta operación, generalmente es llevada a cabo en una planta grande fija, aunque para operaciones de pequeña escala se pueden colocar plantas móviles dentro de la cantera. Existen muchas clases de trituradoras disponibles, pero pueden resumirse en cuatro categorías principales.

4.2.2.1. Trituradora de mandíbula

Es la que tritura la roca entre dos planchas de acero, una de las cuales esta fija, mientras la otra se mueve hacia adentro en contra de la otra por una rueda motriz excéntrica; así mientras el material se tritura en pedazos más pequeños este se mueve hacia debajo de las mandíbulas y finalmente se escapa de la base, el tamaño máximo puede entonces controlarse al variar la abertura en la base de las dos planchas. (Ver Figura No. 23.a).

4.2.2.2. Triturador giratorio

Consiste en un cono fijo invertido, en el cual se introduce la roca desde la parte superior, dentro de este existe otro cono más estrecho, el cual rota en un eje excéntrico; así, el espacio entre las dos superficies de trituración se abre y estrecha regularmente. (Ver Figura No. 23.b).

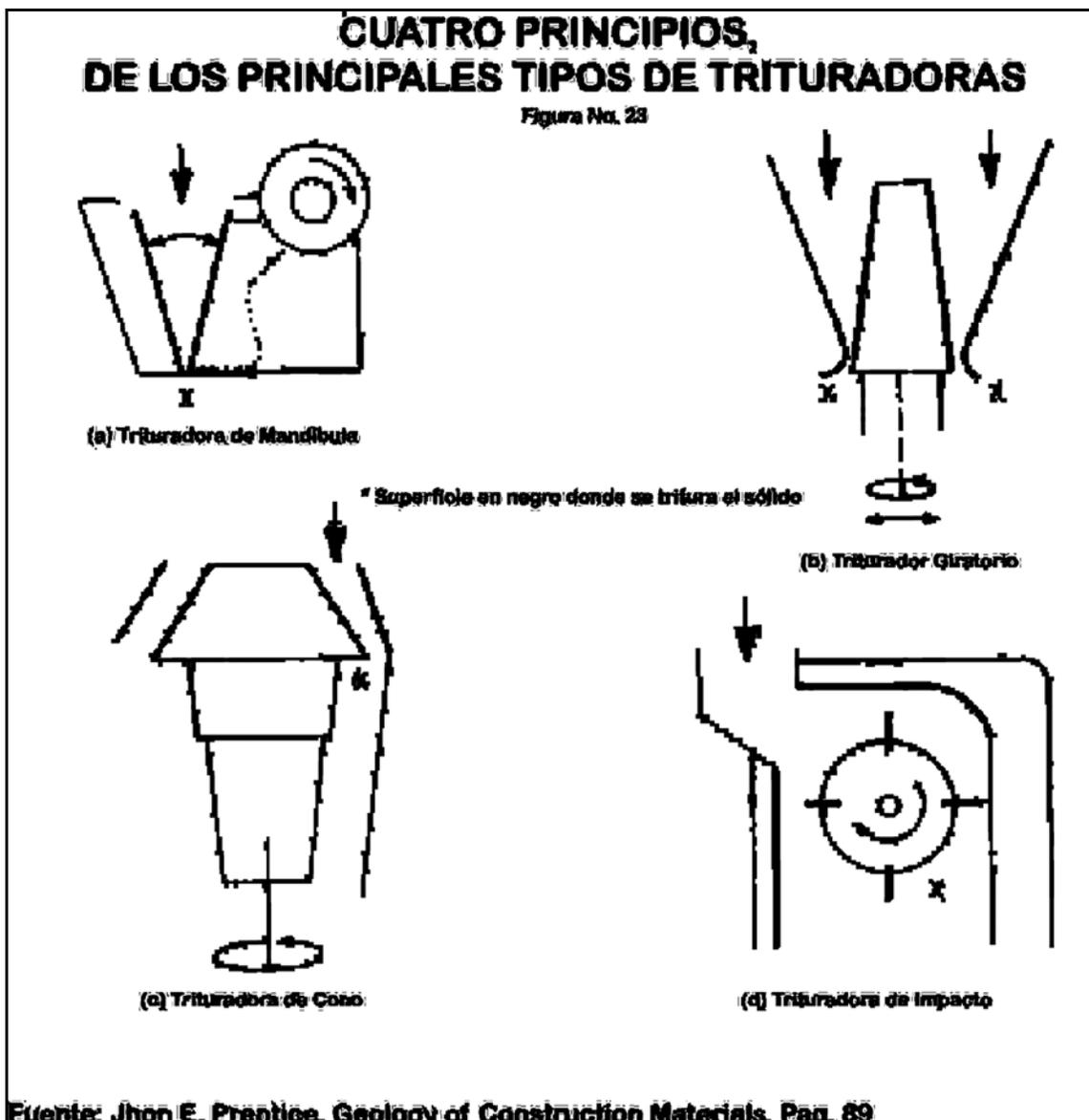
4.2.2.3. Trituradora de cono

De alguna manera esta trituradora usa el mismo principio que el giratorio, pero aquí las dos superficies cónicas de trituración están sub-paralelas. (Ver Figura No. 23.c).

4.2.2.4. Trituradora de impacto

Trabaja bajo un principio totalmente diferente, con la roca entrando en una cámara en la cual hay un disco que rota rápidamente, machacándose contra la pared de la cámara y contra de una a la otra y de este modo se reduce el tamaño. (Ver Figura No. 23.d).

La reducción rápida de la roca en la cantera en trozos de roca de cierta medida o diámetros mayores, hasta el tamaño necesitado para el agregado grueso, usualmente no se pueden alcanzar en una etapa y por consiguiente la trituración primaria, secundaria y frecuentemente terciaria es normal. Generalmente la trituradora primaria es del tipo mandíbula o giratoria, pero hay muchas combinaciones posibles. (Ver Figura No. 23. Cuatro principios, de los principales Tipos de Trituradora).



Se puede notar que las fuerzas que se aplican a un bloque de roca son diferentes en cada una de las cuatro clases de trituradoras; en la trituradora de mandíbula el bloque es sometido a compresión desde dos direcciones, mientras que en la clase giratoria hay también un elemento de estrés tangencial y en la trituradora de impacto es un mecanismo totalmente diferente. No es sorprendente, por lo tanto, que la forma y el tamaño de los fragmentos producidos por cada uno de estos procesos es diferente; esto se controla en primera instancia por la estructura de la roca misma, pero puede modificarse hasta cierto punto por la selección del proceso de trituración, y por el control de dichas variables, como la razón de abastecimiento, el espacio de las superficies de trituración y la programación de la apertura de salida. Por lo que, una roca que puede tender a producir un fragmento laminoso en una trituradora de mandíbula, puede reducirse a formas más cúbicas en una trituradora de impacto. Aunque el tamaño máximo del fragmento reducido puede controlarse al programar la apertura de salida del triturador, se producen inevitablemente varios tamaños de fragmentos por debajo de esta dimensión.

Un aspecto que se origina en la piedra misma es, sin embargo, de gran importancia “la abrasión”. La cantidad de desgaste en las superficies trituradoras de cualquier clase de trituradoras es muy grande y el costo de reemplazarlas es muy alto, por tanto, una roca abrasiva como la piedra caliza silicificada es mucho más costosa de producir como agregado, que un material desilicificado más suave. La erosión en una roca (la habilidad para gastarse) no es siempre igual que la resistencia de abrasión; así que triturar una roca abrasiva puede no necesariamente resultar en la producción de un agregado de la mejor calidad.

4.2.2.5. El cernido

Es el proceso final en la producción de agregado de roca triturada, es el que separa el agregado en fracciones de tamaño muy grande o muy pequeño, por medio de cedazos que pueden ser de malla de alambre, barras paralelas o placas perforadas, y son hechos de acero y hule. No es conveniente usar métodos secos de cernido para material menor de 3 mm de diámetro; pero es el proceso principal para la separación de tamaños en el rango de tamaños del agregado grueso. (Prentice, 1990)

4.3. Agregados que ocurren naturalmente

4.3.1. Arena y Grava

Es el nombre usual para una variedad de depósitos sedimentarios, los cuales contienen fragmentos de roca (grupo de fragmentos) de un tamaño que pueden ser usados directamente, o con un procesamiento mínimo, como agregado grueso y fino. Estos ocurren en una variedad de situaciones geológicas; algunas veces en tamaños de (piedras grandes o cantos rodados) los cuales requieren de alguna reducción antes que puedan ser utilizados; algunas veces como guijarros los cuales pueden usarse directamente para proporcionar agregado grueso. Algunas veces por procesos naturales de separación se han separado los grados de tamaños; algunas veces todos los tamaños, cantos rodados, guijarros, arena, cieno y arcilla ocurren juntos.

El método de formación de dichos depósitos determina sus características. El área de la fuente sedimentaria y su régimen de desgaste determinan la petrología original y la formación de los grupos de fragmentos; por ejemplo, si los grupos de fragmentos se originaron en un terreno calizo sujeto a un clima

frío (regiones de altas montañas), los grupos de fragmentos serían angulares y grandes, y consistirían enteramente de piedra caliza; pero sí es un terreno metamórfico con un clima tropical, con una variedad de grupos de fragmentos, de los cuales sólo los más resistentes a procesos químicos sobrevivirían. Durante el transporte sedimentario, la abrasión y fricción redondean los grupos de fragmentos, elimina los más suaves y los clasifica, el grado al cual estos procesos ocurren dependen parcialmente del método de transporte, río, glaciar u océano y en parte de la distancia que son transportados.

4.3.2. Formación de depósitos

Los procesos de deposición, es la actividad final del transporte sedimentario y afectan más adelante su división, determinando la forma y variabilidad del depósito final. De esta suerte un entendimiento total de estos depósitos y su historia geológica, es esencial si el geólogo va a:

1. Localizar nuevos depósitos y extensiones de aquellos ya conocidos;
2. Interpretar adecuadamente los registros de los hoyos taladrados, para que su evaluación de la cantidad y calidad sea correcta; y
3. Planificar el patrón de extracción más eficiente.

Muchos depósitos de arena y grava se formaron durante las épocas del Pleistoceno y Reciente, del período Cuaternario, y son por lo tanto un reflejo de la última historia geológica y climática de la región. La influencia de la glaciación del Pleistoceno ha sido profunda, y ha sido un factor importante al asegurar que las zonas templadas del mundo hoy en día han tenido un suministro adecuado de agregado para crear sus ciudades de concreto. Ya que su forma de origen es un determinante importante de sus profundidades, es posible usar una clasificación diagenética. Pueden entonces describirse como residual, coluvial, aluvial, planicies marinas, depósitos marinos, depósitos glaciales, arenas y gravas glaciales y gravas fluvioglaciales.

4.3.2.1. Depósitos residuales o no transportados

Son aquellos que se forman *in situ*, esto es, que no han sido transportados de su fuente. Procesos de desgastes mecánicos y químicos que pueden descomponer la superficie de una masa rocosa en una profundidad sustancial y este manto de desgaste puede excavarse para agregado grueso. En terrenos gneinosos y graníticos, donde el desgaste químico ha sido activo, los minerales reactivos se reducen a arcilla, la cual luego es lavada por la lluvia y agua subterránea, dejando una masa suelta de grava de los materiales cuarzosos más duros. Graduado y a veces lavado, este puede proporcionar un agregado de buena calidad.

Un grupo importante de depósitos residuales, formados en regiones en donde hay una alta evaporación de agua de la superficie de la tierra y consecuentemente el agua subterránea ha migrado hacia arriba, son las “capas duras”. Estas se forman en primera instancia como superficies rocosas, las cuales luego se unen para formar una capa continua, que puede alcanzar varios metros de grosor. Puede que entonces necesite algo de trituración para reducir otra vez a un tamaño para agregado. Dichos depósitos forman una fuente importante de agregado grueso en regiones donde con frecuencia no existe otra fuente. La composición de la “capa dura” depende del contenido soluble del agua subterránea, el cual a su vez depende de la geología subterránea. Calcreto (capa dura de calcita) y dolocreto (capa dura dolomítica), pueden ambas usarse como agregado; pero la asociación frecuente de yeso (halita = sal-común o sal roca = sal gema) y otras sales solubles hacen de muchos sucesos inapropiados para el concreto.

Algunas características de estos suelos son: suelo heterogéneo, tienen asentamiento, no sufren transporte (suelo no compactado), no apto para fundaciones, son difíciles de reconocer en el campo por la vegetación que crece sobre ellos, son de granulometría heterogénea, las formas de los granos son angulosos, permeables y porosos.

4.3.2.2. Depósitos coluviales

Ocurre cuando una corriente abandona las montañas y penetra en una planicie o en un valle amplio, y cuando sufre una disminución repentina en la velocidad, lo que causa la depositación del aluvión en un cuerpo que tiene la forma de un abanico llamado abanico aluvial. Al crecer el abanico adquiere una pendiente más fuerte, su espesor se hace más potente y sus clásticos son más gruesos; estas circunstancias lo obligan a adoptar una forma cónica que recibe el nombre de cono aluvial.

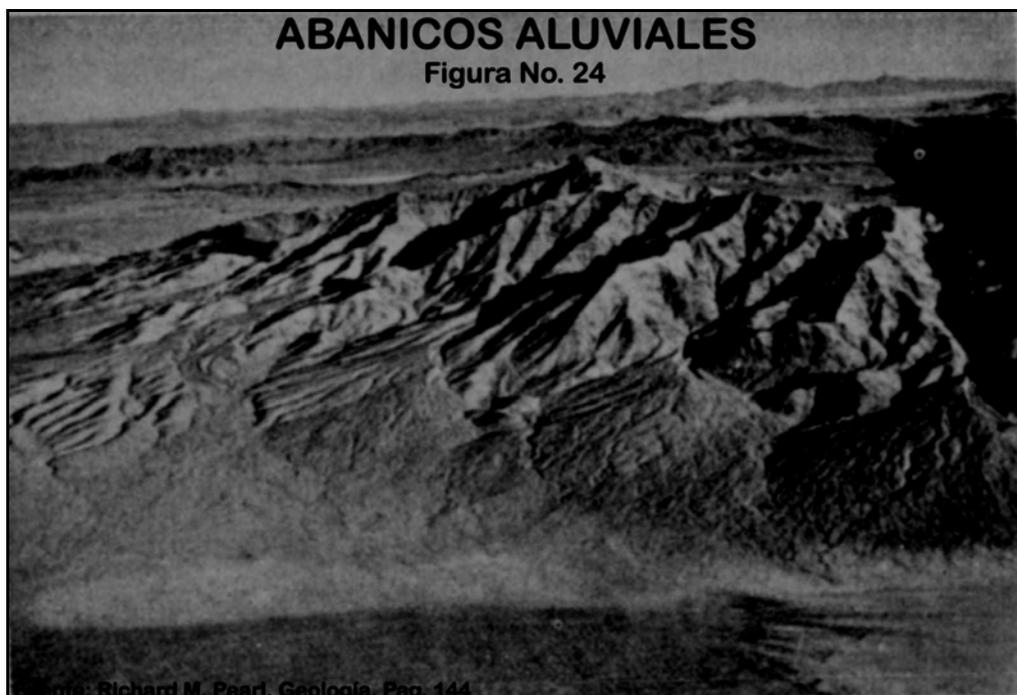
La combinación de abanicos aluviales adyacentes de corrientes paralelas, forman una cubierta ondulante unida de sedimentos a lo largo de la cordillera montañosa. A este rasgo topográfico se le conoce como: planicie aluvial de piemonte.

Son depósitos que han sido emplazados por movimientos de masas, ejem: laderas de rocas y talud, y otras parecidas. Estas son, por supuesto, petrográficamente similares a la roca de la cual se derivaron directamente, y los fragmentos son angulares y muy variables de tamaño. Tienden a aparecer apilados en laderas empinadas, y su superficie superior se define por el ángulo de reposo de los materiales constituyentes, así que son de un grosor relativamente pequeño.

Estos definen su formación por las rocas destruidas, bajo el efecto de la meteorización y erosión, y se mueven montaña abajo en dos formas:

- **Lento:** pocos centímetros cada año; y
- **Rápido:** en un derrumbe, aproximadamente 100 metros en un momento.

La energía de su movimiento proviene de la gravitación y el agua sólo mejora el deslizamiento. Los derrumbes tienen muchas veces como impulso una lluvia fuerte o una actividad sísmica. Los movimientos de masas provocan varios problemas para la población u obras infraestructurales. Taludes en movimiento lento muestran un crecimiento de árboles en forma curvada, porque el árbol quiere mantener su posición vertical. Este fenómeno se llama cabeceo y es un indicador muy importante para detectar deslizamientos lentos en las montañas. Grandes problemas provocan deslizamientos rápidos en el momento que tapan un valle totalmente. Se formará un embalse que se rompe por las presiones tremendas del agua acumulada. (Ver Figura No. 24. Abanicos Aluviales). (M. Pearl, 1971)



4.3.2.3. Depósitos aluviales

Son aquellos transportados por el agua. El tamaño de sus granos es de finos a muy grueso, su forma es sub-redondeada.

La combinación del escurrimiento de aguas en las laderas de las colinas y montes, y de las fuerzas del campo gravitatorio forman los depósitos de talud, en las faldas de las elevaciones; estos depósitos suelen ser heterogéneos, sueltos y predominantemente formados por materiales gruesos.

El escurrimiento de torrentes, produce arrastres de materiales de gran tamaño (mayores, a velocidades crecientes del agua), que se depositan en forma graduada a lo largo de su curso, correspondiendo los materiales más finos, a las zonas planas de los valles.

Los ríos acarrear materiales de muy diversas graduaciones, depositándolos a lo largo de su perfil, según varía la velocidad de su curso, al ir disminuyendo esta, la capacidad de acarreo de la corriente se hace menor depositándose los materiales más gruesos. De esta manera el río transporta y deposita partículas de roca según sus tamaños; decrecientes, correspondiendo a las partículas más finas (limos y arcillas) a depósitos próximos a su desembocadura. Otra característica importante es que se depositan en capas de espesores menores. Perforar en ellos es más fácil, entre ellos tenemos:

- **Torrenciales:** presenta grano desde muy gruesos hasta muy fino y con pendiente fuerte.
- **Terrazas:** los depósitos aluviales se terrazas se caracterizan por tener granulometría heterogénea. Cuando en una terraza observamos una erosión de 90° tenemos una terraza formada de grava gruesa muy compacta.

Por lo general de grano mediano a fino. (Ver Figura No. 25. Movimiento de Masa).

4.3.2.4. Planicies Aluviales

Las planicies aluviales de ríos grandes, son una fuente importante de agregado en cualquier parte del mundo, pero muchas dependen de su historia geológica reciente. Estos ríos corren lentamente en sus partes bajas que son capaces de sólo transportar arena y cieno.

En regiones donde grandes ríos riegan cadenas cercanas de montañas, y particularmente donde la lluvia puede ser muy fuerte, pero marcadamente de estación, el río puede estar entrelazado, y los depósitos se esparcen sobre un lecho de río muy grande el cual está muy seco durante la mayor parte del año. En estas circunstancias el mismo lecho del río se excava, con frecuencia selectivamente para diferentes grados de grava. Frecuentemente se asume que esta fuente se reemplazará con las inundaciones del invierno, si es que realmente ocurre el reemplazo total de esta fuente por extracciones en gran escala, cosa que es algo dudoso. Es característico de dichos depósitos, la existencia de un gran rango de tamaños, con todos los tamaños presentes desde rocas grandes hasta arena; en tales depósitos los más grandes con frecuencia se trituran para producir los grados o diámetros deseados. Ya que depósitos de esta clase, frecuentemente están cerca de la fuente de la roca, y las rocas compuestas de fragmentos no han recorrido mucho terreno, el grado de redondeo es con frecuencia bajo, y las rocas más suaves no han sido eliminadas por la abrasión y el desgaste; por lo tanto la calidad de la piedra puede que no sea muy alta. (Ver Figura No. 25. Movimiento de Masa). (W. Griem)



4.3.2.5. Depósitos Marinos

Son depósitos que tienen características muy diferentes de aquellos formados en tierra. En el ciclo de los procesos sedimentarios, todos los fragmentos de rocas derivados de la erosión de la tierra eventualmente llegarán al mar. Son vistos como un agente valioso para la producción de arena y grava, entonces, el entorno marino tiene dos características importantes.

Primero, cuerpos de agua marina generalmente se mueven lentamente, así que su habilidad de transportar rocas compuestas de fragmentos mayores a cieno fino y barro se limitan a ciertas localidades precisas. Estas localidades son:

1. La zona litoral, desde unos metros debajo del nivel bajo del agua (marea baja) hasta unos metros sobre la marca alta del agua (marea alta); y
2. Los suelos de los estuarios y mares poco profundos.

En la zona litoral, la forma principal de transporte es la energía del rompimiento de olas, el cual es responsable de la formación de arena del mar y de las ondas en los bordes expuestos del mar. En mares poco profundos, el movimiento diario de las mareas está confinado, y la velocidad de la corriente marítima está lo suficientemente aumentada para permitir el transporte de rocas pequeñas y arena.

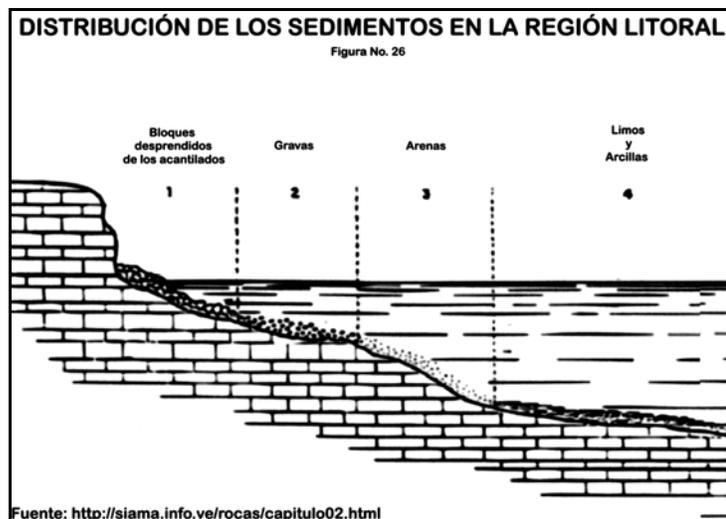
La segunda característica del transporte marino es que, en donde ocurre, involucra movimiento constante. Mientras que una piedra que se mueve río abajo se mueve solamente unos metros a la vez, y luego puede permanecer sin movimiento por años; las de una playa o en el lecho del mar, están en constante movimiento. El proceso de desgaste de piedras es por esto muy rápido; tipos más suaves de rocas se desgastan con mayor rapidez y la grava rápidamente consiste sólo de los materiales más duros. Las gravas desgastadas por el mar son por lo tanto frecuentemente de muy alta calidad.

Otro factor limitante en la existencia de arenas y gravas marinas, es la fuente de suministro hacia el mar. Muchos de los ríos grandes en su territorio, normalmente acarrearán sólo barro y cieno a sus desembocaduras, así que no hay suministro de material grueso disponible en estas regiones.

Otro factor en la explotación de la arena y grava marina, es su papel indiscutible en la protección de la costa. La presencia de una playa de piedras gruesas, en la base de una costa rocosa es eficiente para reducir la erosión de la costa; y muchas áreas bajas están protegidas de inundaciones por una barrera costera. En muchas regiones costeras en el pasado, como las playas y las ondas de arena en la orilla han sido excavadas para agregado, lo cual es una fuente útil y fácilmente accesible de dicho material y que expresamente es renovado constantemente.

Pero la alerta de los peligros potenciales de la erosión incrementada, ha causado controles estrictos de esta actividad en la mayoría de los países, y usualmente ahora sólo se permite en donde las ondas de playa están en un estado estable o fosilizado.

Un aspecto ventajoso de muchas arenas marinas, es el bajo contenido de cieno, especialmente en agregados dragados, donde la mayoría del material fino se lava con el dragado. Aspectos desventajosos son la presencia de sal y conchas. La sal no se puede incorporar en el concreto sin efectos desastrosos, por ello el agregado dragado del mar debe ser sacado a la orilla, drenado y preferiblemente lavado con agua dulce antes de usarlo. Los fragmentos de conchas son por supuesto los restos de moluscos marinos; en agregados costeros son menos frecuentes, porque la fricción violenta que produce las ondas de arena en la playa tiende a desgastarlos todos, excepto el más robusto; pero algunos agregados de lechos marinos contienen conchas en abundancia. Al ser suaves y estar compuestos de carbonato de calcio, disminuyen la fuerza, y a veces producen reacciones indeseables dentro del concreto. (Ver Figura No. 26. Distribución de los Sedimentos en la Región Litoral). (Riv)



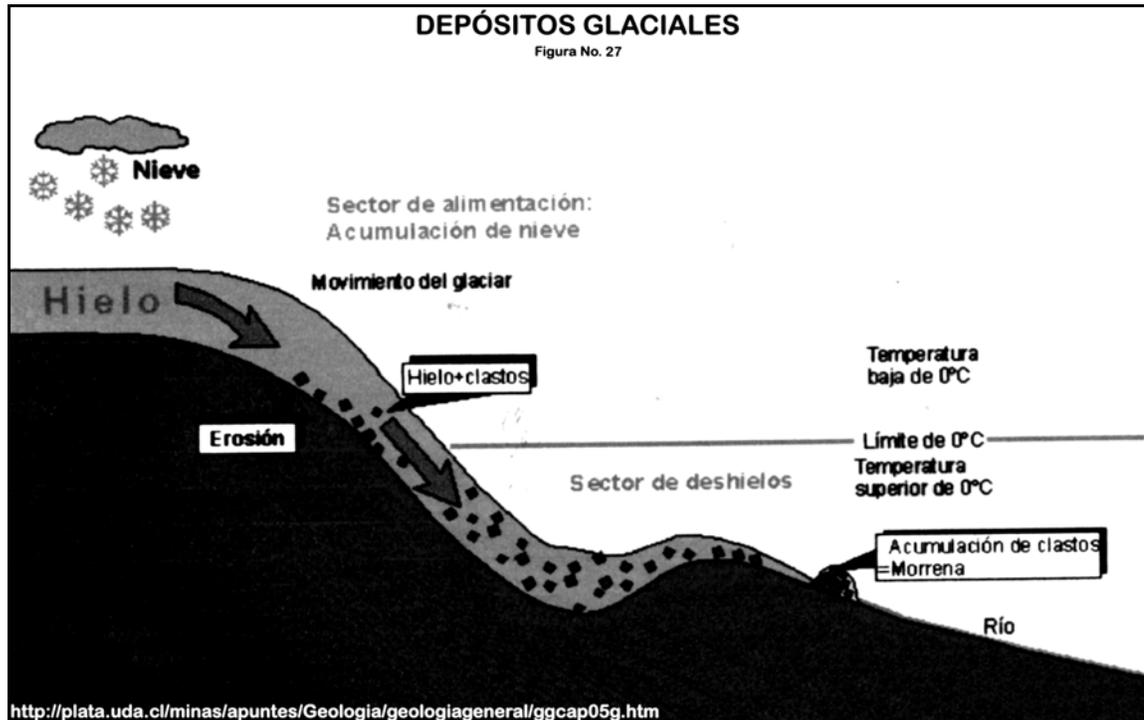
4.3.2.6. Depósitos glaciales

Son aquellos en que el hielo y el agua producida por una acción secundaria del hielo, es decir, por su deshielo, son los medios de transporte predominantes. Un glaciar es capaz de llevar una gran cantidad de productos clásticos durante su viaje, los cuales se depositan generalmente, porque la masa de hielo que los transporta se funde. La acumulación de estos materiales transportados, recibe el nombre de morrena.

Los depósitos glaciales están formados por suelos heterogéneos, que van desde grandes bloques, hasta materiales muy finamente granulados a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo.

Las características de estos depósitos son: el tamaño de los granos es de grueso a fino, la forma de los granos es de sub-redondeados a redondeados, con alta permeabilidad y porosidad también alta.

Existen otras series de sedimentos asociados a los glaciales, que proceden del lavado de las morrenas por agua y producen el deshielo del glaciar. Este fenómeno produce una selección en cuanto a tamaño se refiere, lavando los sedimentos más finos y dejando los sedimentos más gruesos. La extensión de los depósitos glaciales es grande y cubre amplios valles. En definitiva, en este medio abundan los sedimentos de material grueso y desaparecen por el lavado las arcillas y el limo. (Ver Figura No. 27. Depósitos Glaciales).



4.3.2.6.1. Arenas y gravas glaciales

Es otra categoría de agregados que ocurren naturalmente en las regiones de altas montañas donde existe una temperatura promedio baja y la nieve se acumula, transformándose en hielo, y este, por efecto de la gravitación se mueve hacia abajo, transportando grandes cantidades erosionadas de rocas grandes, arena, cieno y arcilla. En su recorrido, y ya en los sectores más bajos de las montañas, donde las temperaturas son más altas, el glaciar pierde grandes cantidades de hielo (deshielo), y durante este recorrido, las últimas partes del glaciar se mueven hacia abajo y en el momento del deshielo total, todos los clastos flotantes en el hielo se acumulan en un sector (porque falta el medio de transporte) como arcilla de rocas grandes o morrenas. Este es un depósito extremadamente heterogéneo, que usualmente contiene cantidades sustanciales de arcilla que ningún procesamiento la removerá; así que, excepto en donde las condiciones locales han producido una morrena muy arenosa o sin arcilla, no se puede usar para producir agregado.

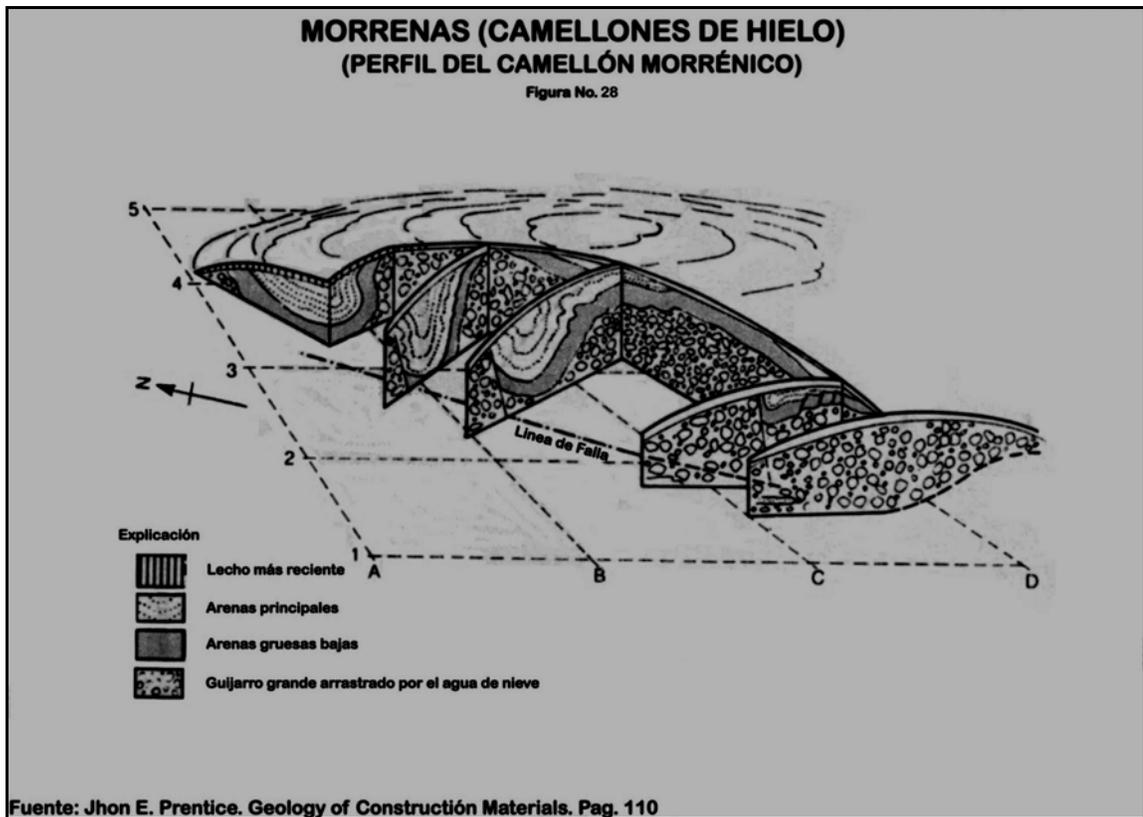
Los depósitos morrénicos, son aptos para las construcciones, bases para vías férreas, fundaciones, etc., por supuesto libres de arcilla. Generalmente están compuestos de till y tillita, que son conglomerados gruesos y burdos, es decir, es una grava cementada. (W. Griem)

Las características de estos depósitos son: granulometría heterogénea, granos angulosos a sub-angulosos, tamaño irregular, alta permeabilidad, alta porosidad, alta resistencia y sirve para todo tipo de hormigón y vías camineras.

4.3.2.6.2. Gravas fluvioglaciales

Durante el retiro o fusión del hielo (ablación), grandes cantidades de agua glacial derretida corre dentro del glaciar y lejos del malecón del hielo. Esta agua con frecuencia fluye rápidamente y es capaz de sacar una gran cantidad de rocas compuestas de fragmentos de las capas de hielo; el proceso de separación, y de que el flujo de agua glacial acarreó el cieno y la arcilla por largas distancias, dejando cerca del malecón de hielo extensos depósitos de grava y arena relativamente limpia, y estas gravas fluvioglaciales son una fuente importante de agregado en arenas recientemente sometidas a la acción de los glaciares.

Las gravas fluvioglaciales suceden en varias configuraciones diferentes, frecuentemente creando formas terrestres conspicuas y por lo tanto fácilmente reconocidas. Por eso las morrenas son camellones de hielo formados contra el malecón de hielo. (Ver Figura No. 28. Morrenas –Camellones de Hielo).



Lomos de cascajo, son montes sinuosos creados en las desembocaduras de los malecones de los ríos; mientras que los abanicos de los deltas, que es en donde el río de agua de nieve desemboca en agua estacionaria. Todos estos efectos tienen una estructura interna compleja y se necesita una apreciación cuidadosa y una comprensión total de la estructura antes de que puedan ser evaluados apropiadamente.

Ya que los ríos de agua de nieve son con frecuencia torrenciales, y los depósitos formados rápidamente, las gravas fluvioglaciales son con frecuencia pobremente divididas en grupos, es decir, muestran gran variedad en rangos de tamaños.

También hay mucha heterogeneidad en los tipos de rocas que conforman las piedras pequeñas. En el proceso de movimiento del hielo, el glaciar recorre una amplia variedad de terrenos geológicos, y recoge el material suelto en la superficie. El proceso de transporte del hielo no es tan efectivo como el del agua en movimiento para triturar las rocas más suaves, así que las gravas fluvio-glaciales frecuentemente contienen una proporción sustancial de agregado poco firme. Esto es particularmente cierto si el hielo se ha movido sobre el afloramiento de una formación más suave en las últimas etapas de su movimiento hacia delante. Por esto la conveniencia de un depósito fluvio-glacial para usarse como agregado es frecuentemente determinado por los movimientos del hielo locales, y un estudio de los detalles conocidos de formación y movimiento glacial, que con frecuencia muestra la predicción del potencial de dicho depósito.

La mayoría de las arenas y gravas desunidas son del pleistoceno o un origen más tardío, hay algunos depósitos más antiguos, los cuales son explotables. La mayoría de las rocas más antiguas que la era del pleistoceno han adquirido algún grado de cementación y compactación, así que las arenas están siendo convertidas en areniscas y las gravas en conglomerados. A veces, tales rocas se han mantenido suficientemente desunidas para ser extraídas sin fuerza excesiva y vueltas a romper sólo con la trituración mínima, para volverlas a su tamaño original. Dichos depósitos reflejan las condiciones bajo las cuales se formaron y son paralelos en sus características a los depósitos modernos formados de la misma manera.

El origen de un depósito no sólo determina sus propiedades como una fuente de agregado, sino que también tiene repercusiones en su extracción y procesamiento. (Prentice, 1990)

Depósitos aluviales frecuentemente ocurren en áreas en donde el nivel hidrostático es alto, así que en estos casos el depósito se trabaja en mojado. Usando un cable de arrastre de un lado, o colocando una draga en una embarcación flotante, o a veces una manguera de succión gigante, y la arena es elevada como una pasta aguada. La mayoría de otras clases de depósitos son secos y se trabajan de la misma forma que la arcilla. Hay algunas ventajas el trabajar en mojado, ya que parte del cieno y la arcilla se lavan automáticamente en el proceso de extracción; y el material dragado, frecuentemente es lo suficientemente líquido para que permita ser transferido a la planta procesadora por medio de tuberías. En general, el proceso de agregados naturales es muy simple, consistiendo principalmente de cernido para separarlos en los diferentes grados de tamaños; y si el trabajo original era en mojado, usualmente se ciere en esta etapa; de otra forma el cernido en seco es normal. Si hay elevadas cantidades de piedras grandes en el depósito, es rentable instalar una trituradora, para reducir estos a tamaños vendibles.

5. AGREGADOS FINOS

5.1. Definición y usos de los agregados finos

El término agregado fino es un término engorroso para el material que en la vida cotidiana se llama arena. Desafortunadamente, la palabra arena tiene implicaciones que limitan su utilidad. En primer lugar, implica un origen natural, en una playa o duna (desierto), por ejemplo: cuando la mayoría del material usado en la industria es hecho por el hombre aplastando roca o incluso aplastando productos artificiales, como la escoria. En segundo lugar, implica que los granos del mineral son principalmente de cuarzo, piedra caliza, basalto, etc. Las dimensiones de los granos de arena oscilan entre 0.06 mm y 2.00 mm de diámetro; en lo que corresponde a la clasificación usada principalmente por los sedimentólogos y con la industria que coloca el límite del agregado fino en 5 mm.

Los agregados finos tienen una variedad de usos en la industria de la construcción, los principales son los siguientes:

- 1.** Como un constituyente principal de la masa de concreto, ya sea formado en un lugar o para unidades ensambladas;
- 2.** Como una parte de la sección “no unida” del pavimento de una carretera.

En los contextos anteriores, se usa siempre en combinación con agregados gruesos.

- a.** En la producción de concreto, tales como baldosas para techo o tuberías de concreto;
- b.** Con cemento, para producir retazos de cemento para pisos y coberturas de pared internas y externas;

- c. Con cemento y en la cal apagada, para producir morteros de masonería;
- d. Con yeso de parís, para producir cal para enyesar paredes y techos;
- e. Para proveer una sección que pega en el pavimento de las carreteras, mezclando con componentes bituminosos para transformarlo en tarmacadam (alquitrán) o blacktop (cubierta negra).
- f. Como un relleno para surcos en los cuales se ponen cables de electricidad y algunos otros servicios principales;
- g. Como material de filtro para los drenajes y los afluentes de desechos;
- h. Como el constituyente principal en la manufactura de vidrio.

En el uso común están los términos de arena de concreto, para usos 1 y a; arena para edificios, para usos b, c y d; arena para asfalto, para uso en e, y arena para cable, para uso en f; pero estos términos no tienen una definición precisa.

5.2. Especificaciones y exámenes

Con tal multiplicidad de usos, no es sorprendente que haya una gran variedad de especificaciones comerciales en existencia. En casi todos los usos indicados arriba, el rol del agregado fino es aquel de un filtro; es decir, llena espacios que de otra manera tendrían que ser llenados con un material que une o que provee dureza a una mezcla, que de otra manera sería suave o móvil. Todos los materiales que unen, a los que se les incorpora agregados finos (cemento, betún) son en ellos mismos inherentemente débiles, de tal manera que actúan solamente como una goma que mantiene juntos a los granos del agregado.

Algunos materiales que unen tienen la tendencia a encogerse durante la deshidratación que sigue al emplazamiento, la fuerza del producto depende entonces de la fuerza del agregado y la situación ideal es una en la que las partículas del agregado estén empacadas juntamente, con una mínima cantidad de pegamento. También hay consideraciones sobre el costo; excepto posiblemente en el caso del yeso (sulfato de cal), el costo del pegamento es mucho más alto que aquel del agregado. En los productos de concreto, tales como baldosas para techo y tuberías, el radio de cemento: agregado de 1 : 3.5 se mira deseable, aunque no siempre se logra; pero se pueden alcanzar grandes ahorros si este radio se mantiene a un nivel alto y el uso del cemento a un mínimo.

Ya que al empacar juntos los granos del agregado son tan importantes, es claro que la distribución por tamaño y la forma de las partículas son parámetros importantes. La distribución por tamaño es más fácil de medir y ha recibido gran consideración.

El análisis del tamaño del grano es entonces un procedimiento de examen de gran importancia. Dentro de los rangos de tamaño del agregado fino, las técnicas de tamizaje son las más apropiadas para analizar el tamaño del grano y son las que son apropiadamente usadas. En general, los resultados son consistentes y se repiten, pero hay un número de factores que deben ser considerados en la interpretación de los resultados. Estos son los siguientes:

1. Un tamiz individual retiene solamente aquellas partículas cuya área mínima transversal sea mayor al tamaño del agujero de la maya. Entonces, las partículas alongadas pasarán a través de la red, incluso cuando su tamaño total sea mucho mayor. Al comparar dos arenas, entonces, es importante hacer por lo menos un juicio cualitativo de la proporción de las partículas alongadas.

2. La desagregación de una muestra no es siempre completa. El método normal de desagregación es aplicar presión suave ya sea rozando a través de los dedos o con un majador de mortero de plástico. Debe evitarse hacer gran presión porque se romperían los granos individuales; y en un contexto industrial, es importante que en el procedimiento de examen sea examinada la arena como se haría cuando se incorpora en la mezcla. Entonces la desagregación total puede incorporar falacias. Al mismo tiempo, la desagregación incompleta puede dar falsos resultados, ya que partículas de agregado de arcilla o de cieno pueden ser retenidas en un tamiz grueso, cuando sean rotas en tamaños más pequeños en la mezcla de trabajo. Por estas razones, el tamizaje mojado se prefiere generalmente al tamizaje en seco en arenas usadas para mezclas de cemento, pero puede ser enteramente inapropiado para una arena de asfalto.
3. El proceso de tamizaje raramente puede ser llevado a su última expresión. Incluso después de sacudir por periodos prolongados, siempre habrá más material que pueda pasar un tamiz grueso, aunque éste cada vez se torna en menos cuando prosigue el sacudido. La duración de tiempo que toma el llegar a una precisión aceptada no puede ser definida precisamente, ya que depende de la arena misma y del método e intensidad del proceso de sacudido, pero la mayor parte, si se adoptan procedimientos estándares, se pueden hacer comparaciones significativas entre arenas sobre esta base. Sin embargo, se necesita cuidado, si se hacen comparaciones internacionales, ya que la práctica estándar de laboratorio varía de país a país.

Además de lo anterior, hay riesgos usuales en la práctica de laboratorio, la fuente más común de error son los tamices sucios y gastados. Así que los análisis de tamiz deben ser siempre interpretados con cuidado. Una técnica útil es examinar cada fracción de tamiz bajo un microscopio binocular; esto siempre provee información útil sobre la presencia de granos alargados, agregados de arcilla y mineralogía generalizada de la arena, además de ser útil para verificar que tan completo ha sido el proceso de tamizaje.

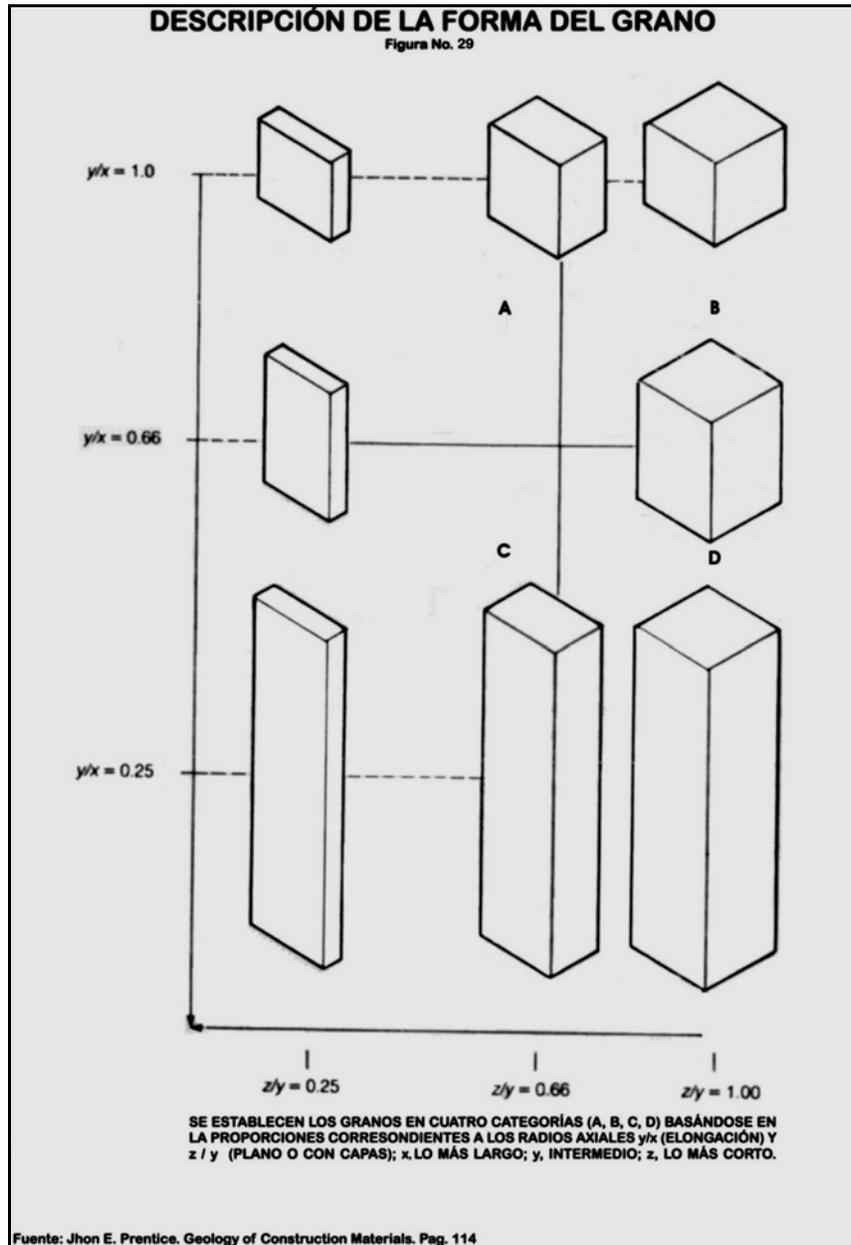
Una medida derivada del análisis del tamaño del grano es el valor equivalente de la arena. En la distribución del tamaño del grano, una de las características más importantes es la cantidad del grano más fino en tamaño, que se asume es la arcilla. En el análisis del tamiz, se le define como aquel que pasa el tamiz más fino, que puede ser entre 63 y 75 μm en diámetro de la red. Un método rápido, definido en un estándar americano (ASTM 2419), emplea una técnica de sedimentación, por la cual un líquido de suspensión del agregado, en un medio floculante, se vierte en un cilindro para medir y luego se mueve. Después que el material se asienta, es usualmente posible distinguir claramente entre la arena abajo y la arcilla encima, y el porcentaje se estima volumétricamente.

La densidad de la masa es una característica importante de un agregado fino. Ya que la cercanía por la que los granos están empacados es una característica importante a ser medida, una observación directa de este carácter es claramente importante, y ésta puede ser proveída por la medida de la densidad de la masa de una arena seca compactada. Una arena que no tiene espacio tendrá una densidad de masa igual a la gravedad específica del mineral, que si es cuarzo será de 2,635 Kg/m^3 . Se considera que las arenas secas naturales tienen una densidad de masa entre 1,400 y 1,800 Kg/m^3 , lo que representa porcentajes de vacíos entre el 32 y 47%.

Aunque se puede hacer una correlación aproximada entre la densidad de masa de la arena y la fuerza del concreto, hay suficientes discrepancias en esta correlación para mostrar que el otro parámetro, la forma de la partícula, es por lo menos tan importante para determinar la fuerza del concreto. (Calvo, 2000)

Es extremadamente difícil medir la forma de la partícula de un grano de arena y no se ha inventado un método enteramente satisfactorio. Aunque es perfectamente posible realizar medidas bajo el microscopio, el método consume demasiado tiempo y la mayoría de métodos dependen de la comparación visual. Se reconoce que hay dos elementos distintivos en la forma del grano, como lo son: la esfericidad y la redondez.

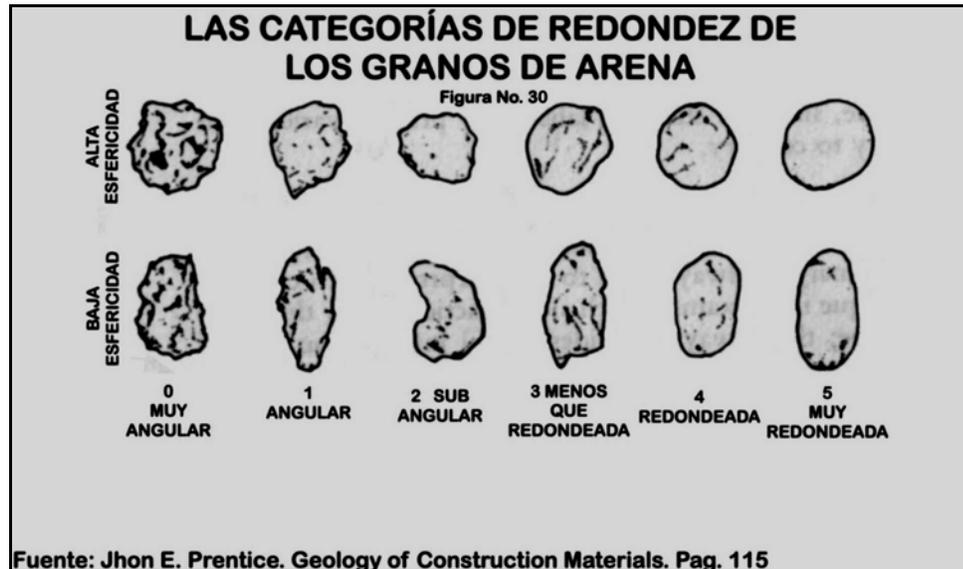
a. Esfericidad: La esfericidad se mide como la cercanía de un grano a una esfera; puede ser descrito en términos de la relación entre tres diámetros de un grano, el más largo (x), el más corto (z) y el intermedio (y); y una clasificación basada en las relaciones de estos tres ha sido establecida en la figura No. 29 (Ver Figura No. 29. Descripción de la forma del grano). Esta reconoce cuatro clases de forma, basadas en dos radios, el radio plano o de capas ($p = z / y$), y el radio de elongación ($q = y / x$). La clase equante (B) tiene una expresión completa en el cubo o esfera (donde $x = y = z$); los granos se separan de esta forma, ya siendo planos o más alargados. El ser planos sin elongación, produce granos colocados en capas (clase A : $x = y > z$). Elongación sin ser plano, da granos alargados en dirección de los polos o con forma de vara o bastón (clase D: $x > y = z$). Una combinación entre alargado y plano da origen a granos “establecidos” (clase C: $x \neq y \neq z$). Aunque es posible establecer límites matemáticos para cada uno de estas clases, la mayor parte de estudios no van más allá de colocar granos en una y otra categoría a través de una evaluación visual, cualitativa.



b. Redondez: La redondez es una medida del grano de angularidad de un grano de arena. Nuevamente, una comparación visual con un cuadro impreso (Ver Figura No. 30 Categorías de Redondez para granos de Arena.); es el único método práctico y sobre esta base, los granos de arena pueden ser colocados en seis categorías, desde “muy angulares” hasta “muy redondos.”

Un estudio completo de los efectos de la redondez y la esfericidad en las propiedades técnicas de la arena debe aún llevarse a cabo. Se sabe que la forma de las partículas influye en el empaque de los granos, y por ello, se debe modificar la influencia del tamaño de la partícula para producir fuerza en el concreto. Se sabe que los granos bien redondeados de algunas arenas naturales producen una mayor capacidad para trabajar en arenas de mortero; al mismo tiempo, ellos reducen la adhesión entre el cemento y el agregado, y pueden prevenir el desempeño de alta fuerza en el concreto.

Así como en los agregados gruesos, hay consenso que el resultado del análisis del tamiz sea presentado en la forma de una curva acumulativa de porcentajes, usando una escala logarítmica; aunque no existe un acuerdo internacional sobre si debiera ser el “porcentaje que pasó” o el “porcentaje que se retuvo”. Sin embargo, hay dificultades con los tamaños de tamiz. Por lo que al realizar un análisis de arena por tamiz, cuyo uso final no ha sido determinado, es bueno asegurarse que el rango de tamices ha utilizar cubre todas las posibilidades; donde los diámetros de abertura de los cedazos de los tamices sean en medidas estandarizadas convencionales, para que los resultados del análisis sean interpretados en la curva granulométrica de la manera más fácil.



5.3. Mineralogía de los agregados finos

En las altitudes altas a medias del globo terrestre y especialmente en regiones que han sido recientemente glaciadas, las arenas cuarzosas finas son usualmente abundantes. En el proceso de transporte por glaciares, por el derretimiento de glaciares y luego por ríos, se gastan los minerales más suaves, tales como el feldespato; y la existencia de aguas tranquilas como de lagos o de ríos de corrientes lentas permite la acumulación de cuerpos de sedimentos de granos finos en los que el mayor mineral es el cuarzo. En contraste, en las latitudes bajas, donde el desgaste químico es dominante, el proceso de laterización (laterita = arcilla roja y ferruginosa) remueve el sílice de la roca madre, de tal forma que los sedimentos depositados recientemente son arcillosos y el agregado fino es difícil de encontrar. Una vez más, las áreas montañosas de formación reciente son diferentes; y además, de las fuentes de arena fina de origen reciente o cuaternario, y algunos sedimentos aún más viejos se encuentran suficientemente consolidados y difícilmente para ser cavados y usados directamente como agregado. Dichas arenas son usualmente de origen marino e incluyen minerales autigénicos u otros, además del cuarzo.

Mientras que los granos individuales de un agregado fino son comúnmente mono-minerálicos, hay algunos casos de granos de este tamaño que son suficientemente complejos como para tomar parte en reacciones idénticas; como en las partículas de agregado grueso, que es el álcali, que son reacciones silicosas. Las partículas de agregado fino pueden ser dañinas por las siguientes razones:

1. Porque reaccionan con el medio en el cual están depositadas;
2. Porque son suaves y desmenuzables, y por lo tanto, reducen la fuerza o se desgastan;
3. Porque causan decoloración; y
4. Porque son alargados, y por lo tanto, crean laminación en el producto.

Los minerales dañinos más comunes que se encuentran en agregados finos son la arcilla, el carbón y los carbonatos.

Tal como se describe arriba, son razones por las que las especificaciones de la graduación o clasificación para el agregado fino excluyen a la arcilla de la mezcla. Como se conoce el efecto dañino en la mezcla, es que se le introduce un elemento débil y que al formar una delgada capa en las partículas más grandes, impide que se adhieran al cemento o al asfalto. Parece que la estricta observancia del límite de contenido de arcilla es particularmente importante en el asfalto usado para cubrir las carreteras y la base de las mismas; parece que es menos necesario para las mezclas de concreto, mientras que para los morteros, los límite estándares generalmente no se observan, ya que el porcentaje de la arcilla hace que tenga un acabado más liso.

La presencia de arcillas que se expanden (esmeclitas) es más significativa, ya que su habilidad para absorber agua causa problemas en la mezcla y subsecuentemente encogimiento en los morteros y su representación.

La esmectita también se encuentra como un producto en el desgaste de los silicatos ferromagnesianos; estos son por supuesto constituyentes de las rocas ígneas básicas y ultrabásicas. La reactividad de las partículas de basalto desgastado, afecta profundamente a los depósitos de basalto, extendiéndose profundamente en las fisuras y coyunturas, hasta la profundidad de incluso de canteras grandes, estos depósitos constituyen una fuente importante de agregado de roca aplastada. De tal manera que algo de las partículas desgastadas pueden encontrarse en muestras de arena del aplastador y las partículas en los depósitos movedizos se encuentran invariablemente en descomposición. De ahí se deriva que el concreto hecho de dicho agregado tenga una durabilidad dudosa.

Los fragmentos pequeños de carbón, lignita o turba aunque no de gran importancia en el concreto masivo o la construcción de carreteras, son de gran significado en el material para baldosas de techo de concreto. Estas baldosas tienen secciones delgadas donde se hace que casen y la presencia de una partícula suave de carbón en esta sección puede causar que la baldosa gotee o se rompa. El carbón puede aparecer como fragmentos detríticos derivados de la erosión del estrato que contiene carbón que se encuentra abajo o como fragmentos lignificados de material vegetal nativo al ambiente deposicional, debido a su baja densidad, no se separa de la arena por la acción actual y las partículas de varios milímetros de diámetro pueden encontrarse dentro de la arena. Ya que no parece haber ninguna forma infalible de quitar el carbón de la arena, dichas ocurrencias pueden dar todo un depósito de arena no apto para este propósito. Las partículas de bitumen en la arena pueden causar decoloración de la superficie de un producto de concreto, lo que es aceptable en ciertos usos; el bitumen es un mineral mucho más común de lo que se supone generalmente.

El bitumen se origina en el material petróleo asociado a algunas venas hidrotermales en la masa granítica y puede ser eliminada selectivamente en las canteras.

Los minerales carbonatados ocurren en arenas cuarzosas como conchas, concreciones y bandas delgadas de piedra caliza. En muchas partes del mundo, las rocas carbonatadas forman la única fuente del agregado; y en los dobleces mesozoicos y terciarios de las montañas del mundo, la única fuente es la piedra caliza, dolomita y mármol aplastado; en muchas áreas tropicales, las tan usadas arenas de playa están enteramente carbonatadas.

Afortunadamente, la incorporación de arena de cal, relativamente en una mezcla de concreto o asfalto, no causa demasiados problemas. Algunos problemas surgen, cuando la piedra caliza es sólo parte de una arena mezclada y cuando la piedra caliza está dolomitizada.

Uno de los problemas de una arena que contiene algo de piedra caliza es que hay un encogimiento diferencial. Toda piedra caliza tiene cierto grado de porosidad y este puede ser hasta del 28%, mientras que las partículas de cuarzo no tienen virtualmente nada de porosidad. Al incorporarse a una mezcla mojada de concreto, las partículas de piedra caliza absorben lentamente el agua, de tal manera que después de colocado el concreto, este se encoge gradualmente. Es más, si la distribución de las partículas de piedra caliza no es uniforme, algunas áreas se encogen más que otras y aparecen rajaduras, lo que puede resultar en la desintegración total del concreto.

Químicamente, el cemento y la piedra caliza pura no son reactivos, y por ello, es perfectamente posible hacer un concreto duradero usando agregado completamente de piedra caliza. Hay sin embargo, interacción entre la calcita de alto magnesio o la dolomita y la matriz del cemento.

Las secciones delgadas de concreto muestran orillas de reacción distinta alrededor de las partículas de dolomita que deben introducir estreses internos. La pérdida de fuerza en el concreto puede relacionarse particularmente con la inclusión de la fracción fina ($<63 \mu\text{m}$) del agregado; una pérdida marcada de fuerza ocurre cuando la inclusión de la fracción fina ($<63 \mu\text{m}$) excede el 20%. El efecto es más marcado con el concreto de mayor fuerza, ocurriendo una declinación firme en la fuerza de más del 5%.

Aunque las secciones anteriores, describen la mayoría de minerales encontrados en agregados finos que consistentemente resultan en un concreto de pobre calidad, hay otros que también pueden dar problemas en ciertas circunstancias.

Los minerales con láminas, que el más común es la mica, tienden a alinearse ellos mismos en el concreto si se le rechaza o vibra, creando una estructura laminar que introduce una debilidad direccional. Dicha mica puede ser detrítica en origen, si la arena se deriva de; por ejemplo, de un área de rocas esquistosas. Cuando la fuente de erosión de la arena es un terreno de rocas laminares, algunas de estas partículas planas y de tamaño de arena pueden formar una parte sustancial en la arena. Las arenas que en la mayor parte están formadas por fragmentos laminares, no son adecuados para la producción de concreto.

El problema de las partículas que se deshacen es particularmente agudo, en áreas en donde los sedimentos coluviales forman una fuente principal de arena. Dichos depósitos se forman por una degradación rápida que ocurre en áreas montañosas; generalmente se depositan cerca de su fuente de erosión y en una distancia corta de transporte, y no hay oportunidad para que los procesos de trituración o molimiento hayan removido las partículas más suaves.

Las arenas que contienen grandes cantidades de partículas de feldespatos, producen un concreto de baja fuerza y durabilidad dudosa. Las arenas con altos contenidos de partículas de cuarzo, se encuentran en donde ha habido trabajo secundario de dichas arenas, como ha ocurrido en algunos depósitos de ríos más recientes y éstos son muy buscados.

Existe una relación manifiesta entre la mineralogía y el tamaño del grano. El tamaño de las partículas encontradas en los depósitos de arena dependen de:

1. El tamaño original del grano, después de desgastado del origen de la roca;
2. La cantidad de demolición entre la fuente y el área de deposición; y
3. La separación durante el transporte y la deposición.

Ya que cada mineral tiene un tamaño de grano original, dureza y gravedad específica diferente, no debe esperarse una distribución homogénea de minerales a través de la clasificación del tamaño.

La mineralogía de una arena se relaciona cercanamente con su granulometría; ya que dos arenas del mismo depósito pueden tener una mineralogía diferente debido a la distribución del tamaño del grano diferente que tienen. Otra complicación se introduce con el procesamiento de la arena. El proceso de lavar o hidrosizar, aunque se alcanza la separación por tamaño, puede tener un efecto en la separación mineralógica. Esto es porque los minerales, debido a las gravedades específicas diferentes y los efectos de superficie, se comportan hidrodinámicamente diferentes en un proceso de lavado. Entonces el lavado puede algunas veces incrementar la cantidad de partículas de basalto en la arena, porque su gravedad específica más alta, las hace comportarse como si fueran más grandes que el cuarzo.

Y una arena producida por lavado puede tener una mineralogía diferente, debido a las mismas razones, de una producida por tamizaje en seco.

Las mismas observaciones se aplican a la arena producida por la roca aplastada; ya que los diferentes procesos para aplastar producen una granulometría diferente. El tamaño del grano roto producido por cada mineral también será diferente; así que al menos que la roca sea mono-minerálica, el producto triturado variará en su mineralogía en cada fracción del tamaño.

Sigue a lo anterior, que excepto donde hay arenas enteramente mono-minerálicas conocidas, el análisis mineralógico de rutina de una arena es esencial. Bajo circunstancias normales, todas las identificaciones necesarias pueden llevarse a cabo, examinando la arena bajo un microscopio binocular. (Ver Figura No. 31. Agregado Fino, bajo un Microscopio Binocular de baja Resolución).



Las características distintas de color, textura, hendiduras, etc., que son familiares para cualquier geólogo, pueden ser vistas de mejor manera si la arena se sumerge en agua y una cuantificación puede alcanzarse contando los granos individuales o por medio de una técnica de conteo por punto.

Los granos de piedra caliza pueden ser identificados al humedecerla con ácido disuelto y distinguir la dolomita con ácido fuerte.

Una técnica útil en el campo de la producción del concreto, es cortar y pulir una sección de un producto de concreto y examinarlo bajo un microscopio binocular. (Ver Figura No. 32. Sección Transversal Pulida de Concreto.).



Esto es particularmente útil, ya que permite ver el interior de los granos, permitiendo entonces una identificación más precisa y revelar la presencia de desgaste, texturas que pueden deshacerse, etc., en minerales individuales. Es útil distinguir, por ejemplo, el feldespato del cuarzo, no sólo porque revela las hendiduras, sino porque permite, llevar a cabo técnicas de coloreo en los feldespatos. Esto también muestra el comportamiento de los minerales en el producto; los efectos de laminación debidos a la presencia de minerales que se deshacen son claramente revelados y bordes reactivos alrededor de los minerales activos pueden ser identificados.

Algunas veces es necesario cortar secciones delgadas para identificar un mineral inusual, por ejemplo; éstos pueden fácilmente ser cortados a partir de un producto de concreto o de materiales incrustados usualmente en petrografía.

Otras técnicas sedimentológicas pueden llamarse para asistir materiales pesados que pueden separarse por sedimentación en bromoformo; los minerales ferrosos por separación magnética. (Prentice, 1990)

El énfasis en la tecnología del concreto y asfalto, en la investigación y en especificaciones estándar, ha sido consistentemente en el análisis de tamaño del grano. La importancia de la mineralogía ha sido menos considerada, particularmente en el mundo occidental, que se encuentra en regiones cuya historia geológica reciente ha proveído fuentes abundantes de arena rica en cuarzo. Mientras estas fuentes se agotan y la tecnología moderna se extiende en áreas cuya geología no es tan favorable, se necesita buscar otras fuentes de arena cuya mineralogía sea mucho más variable. Es de prestarle atención a los desastres que resultan por la reacción álcali-silicato en el concreto y los problemas que ocasiona en la construcción, para alertar al ingeniero civil sobre el significado de la mineralogía de la arena y a los geólogos para que en el futuro requerirles cada vez más que contribuyan con su arte para comprender la mineralogía de la arena.

5.4. Fuentes de agregado fino

Una pequeña cantidad de agregados finos se produce como resultado de la roca aplastada; pero esto es usualmente incidental al momento de la producción del agregado grueso. La manufactura de los agregados finos a partir de la roca, involucraría una operación de molienda muy cara, y rara vez se lleva a cabo, excepto en áreas en donde los agregados finos naturales son extremadamente escasos. La mayoría de los agregados finos se deriva de fuentes naturales.

Los agregados finos ocurren junto con los gruesos, como en las distintas situaciones geológicas descritas anteriormente (Sección 4.3.2. Formación de Depósitos), como: residual, coluvial, aluvial, marina o glaciogénica, etc.; pero hay diferencias en la distribución de las mismas.

Las arenas coluviales son comparativamente raras, ya que en el proceso de formación usualmente resulta en arena gruesa, más que en arena; pero hay algunas excepciones. Las rocas graníticas, cuyo tamaño del mineral original se aproxima al de la arena, que pueden romperse por desgaste químico, como en la descomposición del feldespato y de la mica, que dejan una masa floja de minerales de cuarzo, que se acumulan en depósitos de detritus cerca de su fuente. Ya que estos depósitos ocurren en áreas cuyo desgaste químico es intenso, algunas veces proveen una fuente de arena, donde otras fuentes son escasas.

La mayoría de depósitos aluviales consisten de una mezcla de arena gruesa y arena, de tal manera que los agregados gruesos y finos se producen juntos. Sin embargo en las regiones montañosas, en donde los ríos son normalmente torrenciales, la arena puede ser arrastrada y el material cavado de la cama del río puede ser únicamente, agregado grueso.

Los depósitos marinos, de playas de piedras redondeadas y gastadas por el agua, que son mayores que el cascajo ordinario (piedra pequeña y redonda) o del tipo de cama marina, también contienen una producción de arena. Pero es característico de los ambientes marinos que ocurra la separación de arena y arena gruesa, de manera que hay lugares en donde la arena ocurre por sí misma, como playas arenosas cerca de la costa o en bancos de arena en la cercanía de la costa. Estas están emplazadas por las olas y las mareas, y los granos de arena están en constante movimiento; en consecuencia la trituración y el redondeo de los granos de arena ocurren muy rápidamente, y la mayoría de playas arenosas son demasiado finas para muchos usos.

Los depósitos glaciogénicos, particularmente aquellos de origen fluvio-glacial, usualmente contienen tanta arena gruesa como arena. El debrís transportado del frente de hielo, de las corrientes de agua derretida se depositan muy rápidamente, así que la separación es imperfecta; entonces, cerca del antiguo frente de hielo, un esker consistirá de una mezcla irregular de todos los tamaños de arena y arena gruesa, y cuando esto se sigue corriente abajo, el porcentaje de arena se incrementará, entonces partes distales consistirán enteramente de arena y de cieno, y dichos depósitos son usualmente una fuente importante de agregados finos. Algunas veces el agua que viene del hielo derretido y su carga de sedimentos, termina en un lago glacial, lo que resulta ser un depósito mejor separado; pero muchos depósitos son mayormente muy finos para usos industriales.

Un agente transportador de sedimento, que es capaz de mover arena, pero no arena gruesa, es el viento; y ocurren grandes acumulaciones de dunas de arena, en áreas del desierto y en costas marinas. Sin embargo, los procesos de molimiento en el transporte por viento son tan efectivos como los del océano, y por ello, dichas arenas son usualmente de granos extremadamente finos; además, las velocidades normales del viento son sólo adecuadas para transportar partículas más finas.

Es más, en el caso de las dunas costeras, su rol como agencias protectoras costeras es muy apreciada y tendrá las mayores objeciones ambientales para ser explotadas.

En las regiones de la provincia volcánica o cinturón volcánico, parte oriental, central, sur y occidental de la república de Guatemala, los agregados finos están compuestos por granos de cuarzo, con cantidades subsidiarias de otros minerales. Esto es porque el terreno del que se derivan las arenas son predominantemente ígneas y metamórficas, y entonces, contienen mucho sílice, este terreno ha sido erosionado en condiciones climáticas en las que el desgaste mecánico, más que el químico, ha prevalecido, una situación que favorece la preservación del cuarzo. En otras áreas, como las de dobleces de las montañas jóvenes del mundo, los orígenes de los terrenos consisten en gran parte de roca caliza, así que todas las arenas que se derivan: aluviales, marinas o de cualquier tipo, consisten de granos de calcita. (Ver Figuras No. 1 y 2 del Capítulo No. 1). (Langer, 1995)

5.5. Distribución de tamaños de grano en los agregados finos

Los varios usos de los agregados finos demandan diferentes características, siendo la principal variable la distribución del tamaño del grano. Hay determinaciones estándares para cada uno de los usos principales en la mayoría de países del mundo y éstas varían de país en país, pero, por lo regular mantienen casi los mismos estándares y su variación es mínima.

Es decir, las determinaciones para agregados finos (arenas) para ser utilizados en distintas actividades para la construcción, como en la producción de concreto, asfalto para carreteras y morteros, de los cuales se pueden distinguir distintas gradaciones.

A modo de ejemplo, se detalla a continuación la degradación de la arena, por supuesto que pueden tener su variación como se indicó anteriormente: Para la elaboración de concreto, se pueden distinguir tres grados: gruesa, mediana y fina; y la diferencia más significativa yace en la maya del tamiz No. 30 (pasar los $600\ \mu\text{m} = 0.60\ \text{mm}$), cuyos porcentajes acumulativos de las partículas que pasan, pueden estar $\pm 15-54\%$ (para gruesa), $\pm 25-80\%$ (para mediana) y $\pm 55-100\%$ (para finas); siendo mínimas las diferencias, dependiendo del criterio para su uso de cada país. Aparte de determinar que solo el grado grueso y mediano pueden ser usados para concreto de uso duro, y no hay indicación específica que estos grados de agregado fino, tengan usos determinados, pero hay un entendimiento generalizado de que los grados más gruesos hacen un concreto más fuerte.

La arena para el asfalto usado en los caminos, siempre en el tamiz No. 30 (partículas que pasan los $600\ \mu\text{m} = 0.60\ \text{mm}$) es generalmente más fina, cuyos porcentajes acumulativos de las partículas que pasan de $\pm 35-100\%$ (medianas –finas) y del $\pm 75-100\%$ (finas); aunque la determinación para la “tirada en carretera para su uso” es mucho más limitada para aquella que es “tirada para base de carretera”. Para el asfalto, se da gran importancia al contenido de los finos ($<74\ \mu\text{m} = <0.074\ \text{mm} = \text{tamiz No. 200}$) que no puede ser más del 5% para la que es “tirada en carretera para su uso”.

En lo referente para “morteros de uso general” es típico de un número de determinaciones para su uso en morteros de colocados y en acabados externos e internos. Estas determinaciones son para arena fina, que para concreto, y está generalmente acordado que un buen porcentaje en el rango de mallas No. 100 ($149\ \mu\text{m} = 0.149\ \text{mm}$) a No. 30 ($300\ \mu\text{m} = 0.30\ \text{mm}$) es importante para asegurar la habilidad de trabajar y un acabado liso.

Se debe decir, que la adherencia en la industria a este último grupo de determinaciones es mínima, y muchas “arenas para edificios” son vendidas y exitosamente usadas lo que yace fuera de las determinaciones límites.

Es claramente una ventaja comercial si la arena extraída de un hoyo puede ser vendida “como fue adquirida”, o realizarle un mínimo procesamiento. Con un simple tamizaje (para remover cieno o arcilla, partículas finísimas), muchas arenas naturales pueden hacerse conformar con las determinaciones estándares. Esto no es enteramente sorprendente, ya que las determinaciones estándares se basan no en una evaluación científica del mejor material o el ideal, sino en la experiencia de la industria sobre que arenas disponibles actualmente se conocen para dar un producto satisfactorio.

En las arenas que se forman naturalmente, los rangos de distribución del tamaño del grano es bastante variable y se puede apreciar en buena forma analizando la propiedad granulométrica del agregado, como en el caso de la arena extraída de los agregados de las capas de la playa de mar, éstas tienen un rango de variación en la gradación del grano que es bastante pequeño, esta diferencia sucede en las mayas No. 100 ($149 \mu\text{m} = 0.149 \text{ mm}$) y maya No. 50 ($300 \mu\text{m} = 0.30 \text{ mm}$) de las partículas que pasan por estos y sus porcentajes acumulativos están entre $\pm 1-2.5\%$ y $\pm 5-15\%$ respectivamente; entonces los agregados finos se encuentran dentro de los rangos de arena para elaborar concreto (o sea arena gruesa); mientras que es claramente que están “fuera de las determinaciones” para ser utilizadas en asfalto para carreteras y apenas dentro de aquellos para morteros, todo esto en relación al tamiz No. 30 ($600 \mu\text{m} = 0.60 \text{ mm}$).

En lo que respecta a la arena extraída de las protuberancias del cascajo y de muchas playas modernas, estas son notablemente deficientes en los granos más gruesos, su porcentaje acumulativo de las partículas que pasan por el tamiz No. 50 ($300\ \mu\text{m} = 0.30\ \text{mm}$) están entre $\pm 23.8-46\%$, relacionado con el tamiz No. 30 ($600\ \mu\text{m} = 0.6\ \text{mm}$) y el rango no se encuentra dentro de ninguna determinación. Esta arena puede ser procesada para producir algo de arena para ser utilizada en edificios, removiendo los granos más finos, pero esto resulta ser evidentemente antieconómico. Las arenas que florecieron del pleistoceno, tienen una gradación más regular y aunque “como adquiridas”, estas yacen en el límite de la determinación para ruta pesada de asfalto, pero pueden ser recolectadas dentro de las mismas, removiéndole en lo más del 10% de los finos.

El rango de variación, de la distribución del tamaño del grano de un depósito fluvio-glacial, es enorme, desde contener arcilla cenagosa fina hasta la arena gruesa limpia. En estos depósitos, es típico que los varios tipos de arena ocurran de tal forma que la extracción selectiva no es posible; pero el extraer este material de una cantera dará materia prima con el amplio rango de tamaños, y un procesamiento cuidadoso dará una variedad de arenas que podrán hacerse conformar a las determinaciones requeridas.

Y finalmente, se menciona un depósito de terraza de río, en el cual, el rango estrecho de variación de la distribución del tamaño del grano, es una característica de la capacidad de separar en distintas clases por el transporte del río. Es posible que en estos depósitos se encuentren arenas de gradación mediana y fina, pero son mucho más favorecidas para la producción de concreto, siempre en relación con el tamiz No. 30 ($600\ \mu\text{m} = 0.60\ \text{mm}$).

5.6. Forma y textura de los granos de arena

Aunque se sabe que estos factores son altamente variables, no se ha hecho ningún estudio sistemático de los efectos sobre los productos que han sido fabricados. Se sabe que los granos angulares y de textura áspera dan cierta fuerza al concreto, presumiblemente porque la superficie da mejor adherencia al cemento. Al mismo tiempo esto baja la habilidad del trabajo o trabajabilidad de la mezcla del concreto y tienden a dar un acabado más áspero, en productos de concreto, los cuales son rechazados, tales como baldosas y tuberías de concreto; los fragmentos más angulares pueden darle una abrasividad excesiva a la mezcla, lo que puede ser altamente costoso en el uso de la maquinaria.

Los granos de arena en depósitos fluvioglaciales son los más angulares y de textura áspera. Los granos aluviales son más redondeados, con una superficie más lisa, aunque generalmente picados. Los granos transportados marítimamente son usualmente redondeados, con una superficie lisa, mientras que aquellos transportados por el viento son generalmente casi esféricos, con una superficie lisa y pulida. Entonces, así como la distribución por tamaño, hay una necesidad de igualar la característica del depósito con su uso último.

El agregado fino, derivado de la roca triturada será obviamente mucho más angular que cualquier arena natural; aparte de esto, la forma, textura y distribución por tamaño serán hasta cierto punto controladas por la mineralogía original de la roca de la cual se derivan. Entonces, los gneiss aplastados darán una arena cuyas partículas varían en tamaño, forma y textura; mientras la piedra caliza aplastada dará partículas uniformes y equidimensionales.

6. PRODUCTOS ESTRUCTURALES DE ARCILLA

6.1 Introducción

El arte de hornear arcilla para producir ladrillos, tejas o tubería es muy antiguo; fragmentos de ladrillo quemado han sido encontrados desde antes de 1,200 a. de J. C. en Egipto, y aún antes en Mesopotamia e India. El material de construcción habitual en las civilizaciones antiguas de los climas más cálidos, era un ladrillo endurecido al sol, que contenía usualmente excrementos de animales o paja cortada. Este producto sirvió para construir la mayor parte de las pirámides de Egipto, las paredes de Jericó y una gran parte de la Gran Muralla China. Son los romanos quienes deben recibir el crédito por el desarrollo del ladrillo quemado; fueron ellos quienes llevaron su producción a estándares muy altos mediante técnicas como someter la arcilla a climatización, molerla finamente y terminar con una quema controlada. Los ladrillos duraderos, rehusados, sirvieron de material de construcción durante el período post romano, y no fue sino hasta el siglo 12 que contamos con evidencia de la producción de ladrillos indígenas en las civilizaciones del norte. Desde entonces, sin embargo, la producción de ladrillos y tejas ha sido ubicua. En el siglo 18 cada villa, cada estado, tenía sus propios trabajos en ladrillo, utilizando arcilla de la superficie, excavada a mano de la localidad inmediata, procesada y quemada usando métodos que diferían poco desde los tiempos romanos. La revolución industrial trajo consigo una demanda de producción a gran escala y comenzó la mecanización del proceso. Al mismo tiempo, los trabajos en ladrillo también crecieron, y la concentración de la industria en un pequeño número de unidades grandes comenzó.

Estas grandes unidades de producción, se excavan a profundidad para sacar arcilla que no ha sido climatizada; y es precisamente por el problema generado por la demanda de la industria para obtener arcilla a gran escala que se pide la ayuda de los geólogos.

6.2. El proceso de fabricación de ladrillos

Los procedimientos para hacer un ladrillo pueden ser descritos bajo cinco enunciados: extracción de la arcilla, procesamiento de la arcilla, formación de ladrillos, secado del ladrillo y someter el ladrillo a fuego. La geología y la mineralogía de la arcilla tienen importantes consecuencias en cada una de estas etapas.

La extracción de la arcilla: es casi universalmente mediante el método de excavación abierta pues el bajo costo del producto no puede absorber los altos costos de la minería a profundidad. La mayoría de arcillas para ladrillos se encuentran en depósitos sedimentarios estratificados; es raro que dichos depósitos sean completamente uniformes, usualmente cada capa en la secuencia muestra algún grado de variación. Antes de los días de la mecanización, era posible elegir vetas individuales de arcilla, pero la excavación moderna de la arcilla sólo permite una selección limitada; y se vuelve más importante asegurar que el método de extracción produzca una mezcla uniforme y consistente. Cada método de extracción tiene sus propias características, ventajas y desventajas (Ver Figura No. 33. Los métodos de extracción de la arcilla en relación con los estratos).

La cepilladura o aplanadora de pizarra o la excavadora con múltiples cubetas: consiste de una serie de ganchos con dientes en una cadena

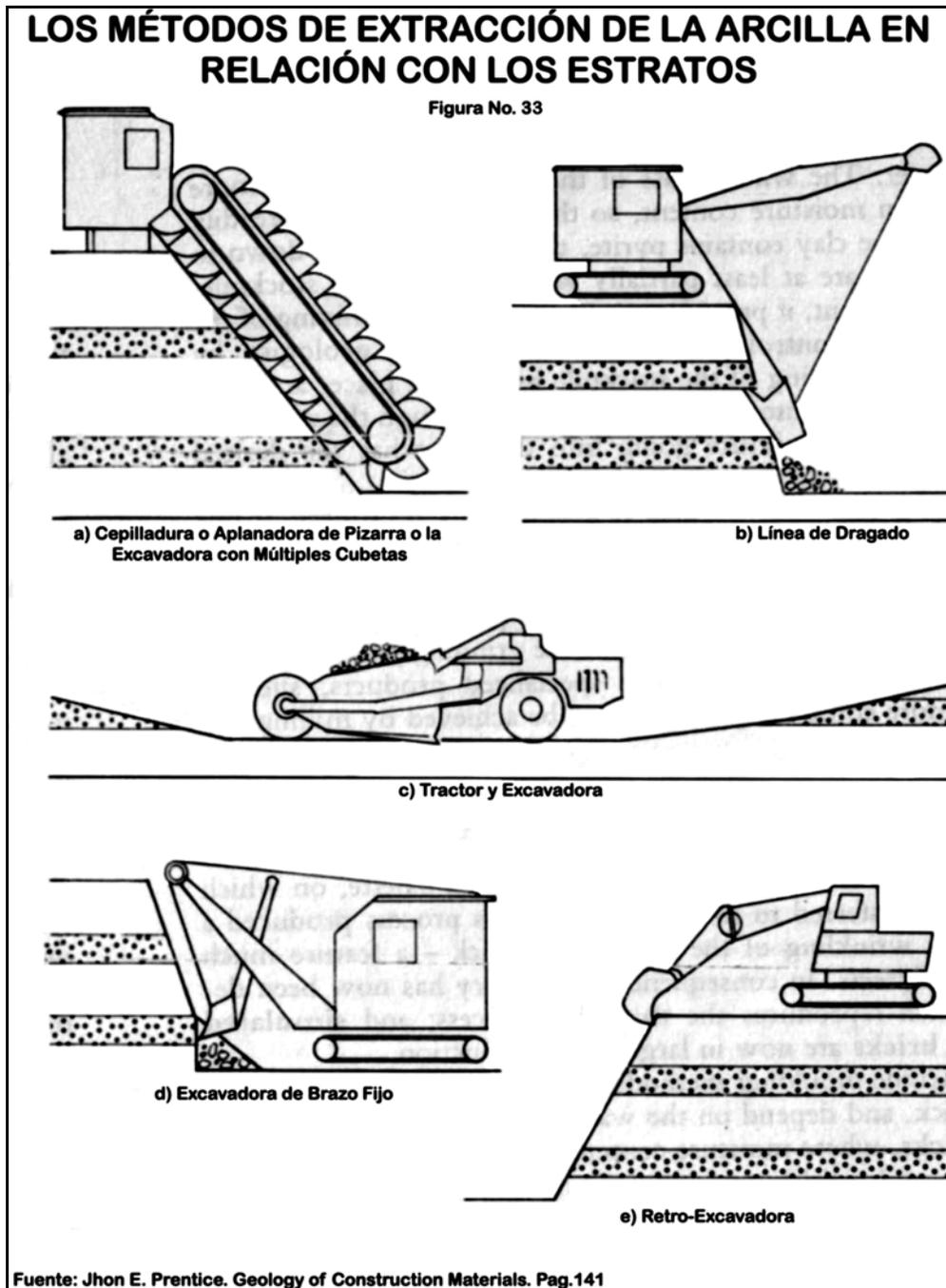
continua; la cadena de ganchos se coloca sobre la superficie, generalmente a un ángulo de aproximadamente 45°, y los ganchos hacen un corte continuo, aflojando el material en la superficie. El método es particularmente útil cuando el depósito es razonablemente homogéneo, pues asegura una mezcla constante y uniforme, pero cualquier selección de vetas es prácticamente imposible. Otra ventaja es que deja una superficie limpia, lo cual facilita el trabajo del geólogo. (Ver Figura No. 33 (a). Cepilladura o aplanadora de pizarra o la excavadora con múltiples cubetas).

La línea de dragado: consiste en una garra suspendida de un cable por una polea muy larga; opera desde el tope de la superficie y la cubeta se llena dragando de la base de la superficie hacia arriba. La propiedad de la mezcla depende mucho de la destreza del operador; con frecuencia es necesario crear una pila de arcilla quebrada en la base y excavar de ella, aún así es difícil asegurar una mezcla constante. Es posible efectuar una selección limitada de las vetas. (Ver Figura No. 33 (b). Línea de Dragado).

El uso del tractor y la excavadora: involucra que el operador haga pases sucesivos en la excavación, y que raspe una capa uniforme de arcilla en cada pase. El efecto es el de una cara con ángulo muy bajo, y si la profundidad de los estratos es poca, la operación es extremadamente difícil de controlar. Sin embargo, es particularmente útil para la construcción de una reserva pues la máquina puede cortar, luego depositar su carga en un solo viaje. (Ver Figura No. 33 (c). Tractor y excavadora.).

Las excavadoras de brazo fijo: trabajan desde el fondo de la superficie; están limitadas en cuanto a la altitud de superficie posible, pero es posible mantener un control cercano de la mezcla y efectuar una selección de vetas. (Ver Figura No. 33 (d). Excavadora de Brazo fijo).

La retro-excavadora: tiene limitaciones similares, pero puede trabajar fácilmente al pie de, o en una plataforma, en esta segunda situación es posible hacer selecciones muy precisas de arcilla. (Ver Figura No. 33 (e). Retro-excavadora).



En ocasiones se toma la arcilla directamente de la cantera a la planta de procesamiento, pero es más frecuente que haya una etapa intermedia en la formación de una reserva. Esta es una montaña de arcilla, generalmente de 10 a 20 metros de ancho, y 5 a 10 metros de alto, construida de la base en capas sucesivas; se deja por varios meses, generalmente durante el invierno, y luego se vuelve a excavar con una excavadora de brazo fijo. Las ventajas son diversas. La exposición al ambiente, en particular durante el invierno, rompe la estructura de la arcilla, haciendo que sea más fácil molerla posteriormente. La totalidad de la masa de la reserva adquiere un contenido más o menos uniforme de humedad para que sea más fácil de controlar. Si la arcilla contiene pirita, este mineral se quiebra en sulfatos que son parcialmente eliminados de la pila. Pero, lo más importante, es que proporciona un método para mezclar bien la arcilla; y brinda un mejor control de la misma; para que el geólogo, supervisando la construcción de la pila en primer lugar, y luego tomando secciones verticales de monitoreo regularmente, puede asegurar que la mezcla que vaya a la planta tenga las cualidades deseadas para el producto.

Al entrar a la planta, la arcilla es molida mediante rodos de acero; en esta etapa se agrega toda el agua necesaria, así como cualquier mezcla, combustible u otros aditivos. Es importante darse cuenta de que rara vez se lleva a cabo el molido, para la producción de ladrillos, al punto de alcanzar una pulverización completa, así es que aún después del proceso del molido, la arcilla es bastante heterogénea. Para productos más especializados, como losa para las paredes, se puede alcanzar un molido más completo en un molino de bola o pedrín.

La siguiente etapa es dar forma al ladrillo; puede ser logrado de diversas formas. Tradicionalmente se hacía a mano; el moldeador tomaba una bola de arcilla y la colocaba en un molde enarenado; luego cortaba la parte superior con un cuchillo, invertía el molde en una paleta en donde el ladrillo era llevado a la siguiente etapa.

Este proceso producía arrugas características en la superficie del ladrillo, característica muy apreciada por los arquitectos. En consecuencia, se ha desarrollado maquinaria que produce el proceso antes descrito; y ahora los ladrillos de similar fabricación casera son producidos a gran escala.

Otros métodos de moldeado en máquinas están disponibles para hacer diferentes clases de ladrillos, y dependen del contenido de agua de la arcilla. Los ladrillos secos, cuyo contenido de humedad es menor del 5%, son forzados a presión en moldes de acero, mientras los ladrillos de arcilla suave y los ladrillos moldeados (en los cuales el contenido de humedad puede ser de hasta un 20%) pueden ser prensados o vertidos en el molde. Para ayudar al desmoldado, los ladrillos secos requieren que el molde esté aceitado; para ladrillos de arcilla suave, la arena es el agente tradicional, mientras los ladrillos moldeados no requieren de ningún agente. Cada procedimiento produce una diferente textura en la superficie y una estructura interna diferente.

Finalmente, los ladrillos pueden ser formados para extrusión. La arcilla es pasada a través de una cámara al vacío para remover las burbujas de aire, luego es forzada a través de un molde rectangular, que extruye una columna de barro. Luego se corta verticalmente con una serie de alambres. Las capas de la superficie de arena, etc., pueden ser aplicadas inmediatamente después de la extrusión; el sistema se adapta particularmente a la producción de ladrillos perforados.

En el pasado, los ladrillos se dejaban en filas cubiertas (emparrillados) para que se secaran al aire libre; este procedimiento ha quedado discontinuado por razones obvias, en climas más húmedos. Hoy en día, los ladrillos fabricados se pasan a través de cámaras calentadas para remover el porcentaje de humedad; durante esta etapa, adquieren firmeza (fuerza verde) para que puedan ser manejados con mayor facilidad.

El método más simple de quemar los ladrillos es el del montón, es un método tradicional y muy usado. En este método los ladrillos se apilan juntos, dejando algunos espacios de aireado entre las pilas, mientras se rocía el carbón a intervalos en capas. Anteriormente simplemente se apilaban al aire libre, el método actual tiene una cubierta sobre toda la estructura. El combustible es vertido desde un lado y se permite que el fuego queme todo el montón.

Un método un tanto más complejo es el horno de cámaras, el mismo consiste de una serie de cámaras construidas con ladrillos, generalmente arregladas a lo largo de los dos lados de una estructura rectangular. Las cámaras están conectadas mediante una serie de chimeneas; el combustible se vierte desde arriba. Se permite que el fuego se mueva en las cámaras en sucesión. Los ladrillos se colocan al centro de cada cámara.

El horno en túnel, es un túnel largo, refractario, a través del cual pasan lentamente carros con paquetes de ladrillos. En el centro del túnel se encuentra el área de fuego, la cual es alimentada de combustible desde arriba.

Cualquiera que sea el tipo de fuego, hay considerable variación en la colocación de los ladrillos, y se utilizan diferentes patrones. Una ubicación cerrada, con pocos espacios, causa una penetración más lenta del calor hacia el centro del paquete, y asegura que los ladrillos ubicados en el centro sean quemados en una atmósfera reducida más que una oxidante. También se puede controlar esto regulando la provisión general de aire que entra en el horno. Es evidente que cada método de quemado está diseñado para proporcionar un período de pre-calentamiento (inmersión), seguido de una quema intensa y de un enfriamiento gradual. La variación de todos estos factores permite la producción de una variedad de tipos de ladrillos.

Como resultado final se verá, que la propiedad del proceso de quemado y los efectos que produce, se determina en gran manera por la mineralogía original de la arcilla; y por lo tanto el estudio del material crudo es el primer pre-requisito para comprender el proceso de la producción de ladrillos. (Prentice, 1990)

6.3. Los componentes de arcilla para ladrillos

Con excepción de algunas arcillas de origen residual, la mayoría de arcillas para ladrillos son depósitos sedimentarios. Por ende, contienen una variedad de minerales, de diferentes orígenes, y en diferentes proporciones. Cada uno de estos minerales reacciona de manera diferente a las diversas etapas del proceso de producción de ladrillos; muchos de ellos por supuesto interactúan en formas complejas. Aún queda mucho por entender; pero en el proceso de producción de ladrillos se hace un intento por evaluar el papel de cada mineral, en cada etapa del proceso de manufactura.

Probablemente el componente más importante de la arcilla para ladrillos es, sorprendentemente, el cuarzo. El cuarzo ocurre en forma de arena ó partículas de tamaño de sedimento de lodo, en la mayoría de arcillas para ladrillos; puede formar hasta un 90% del total. En vista de que no es hidrófilo, su presencia, en el grado de arena, ayuda a separar el ladrillo verde de su molde. Al crear una textura un tanto abierta del ladrillo, ayuda en el proceso de secado, y algunas veces se agrega a la arcilla como una “mezcla” (término de la industria para un aditivo inerte).

Debido a que es relativamente inerte a todas las partes del proceso de producción de ladrillos, el porcentaje de cuarzo libre en la arcilla para ladrillos es un parámetro importante; en vista de que el cuarzo es generalmente de un

tamaño mayor que los otros constituyentes, la distribución del tamaño de partículas puede ser utilizada como medida cruda del contenido de cuarzo. Esto explica la relación ha considerarse de la distribución de tamaños con respecto a:

1. La cantidad de agua que se requiere para hacer el ladrillo;
2. La contracción durante el secado; y
3. La contracción durante el quemado.

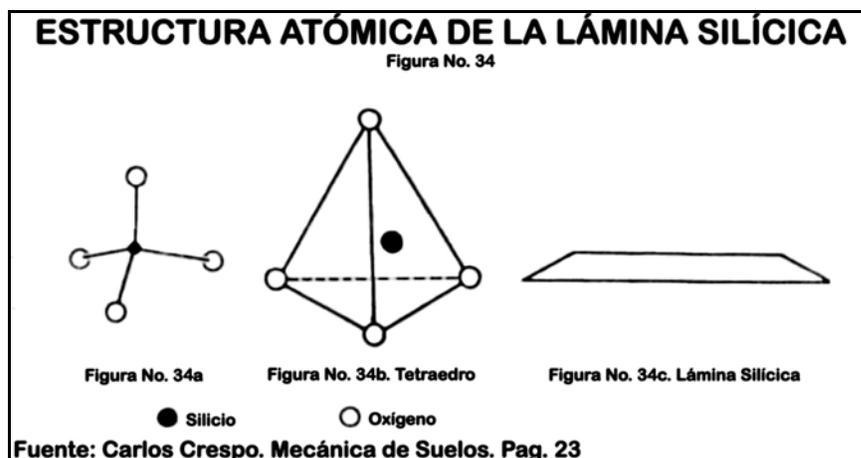
Durante el proceso de quemado, el cuarzo pasa por dos transformaciones, de una baja temperatura (α) a una alta temperatura (β) a 574°C, y de β cuarzo a cristobalito a más de 870°C. La transición α - β involucra un volumen de cambio de 0.8%, para que durante el enfriamiento del ladrillo ocurran micro-resquebrajamientos cuando esta temperatura sea alcanzada, de ese modo amenaza su fortaleza. La transición de β cuarzo a cristobalita se lleva a cabo lentamente, así que a menos que el ladrillo se mantenga a bajas temperaturas por un largo período de tiempo, únicamente las partículas más pequeñas, o los lados de las partículas más grandes, se vean afectados; ellos forman entonces parte de la fase de vidrio. El cuarzo es fuerte y resistente a la exposición al clima, y su presencia en el producto quemado es en gran parte el responsable de la fortaleza y durabilidad del ladrillo.

Los minerales de la arcilla son esenciales para la manufactura del ladrillo y de la losa porque proporcionan:

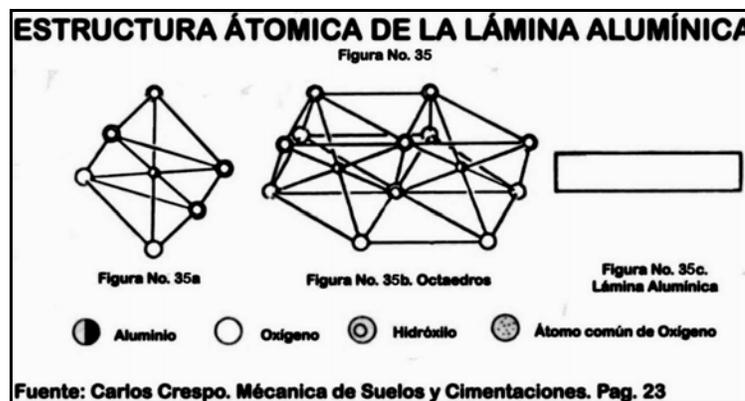
1. La plasticidad necesaria para moldear el ladrillo
2. La habilidad para mantener la forma del ladrillo durante el proceso de secado (fortaleza verde); y
3. La calidad de fusible para formar un vidrio; es decir, la vitrificación a temperaturas de fuego relativamente bajas.

Las arcillas son silicatos en hojas, en los cuales las hojas de tetraedros (SiO_4) están combinadas con una o dos capas de octaedros ($\text{Al}(\text{O}/\text{OH})_6$ o $\text{Mg}(\text{O}/\text{OH})_6$). Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratado, y también se puede dar que se intercalen diferentes minerales de arcilla. La estructura de estos minerales es, generalmente cristalina y complicada, la identificación no es simple, pues depende en gran parte de la refracción por rayos X y la microscopía de escaneado electrónico y sus átomos están dispuestos en forma laminar. De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas: una de ellas de tipo silíceo y la otra de tipo alumínica.

Una lámina del tipo silíceo (Ver Figura No. 34. Estructura atómica de la Lámina Silíceo) se encuentra formada por un átomo de silicio rodeado de cuatro átomos de oxígeno (Ver Figura No. 34a), arreglándose el conjunto en forma de tetraedro (Ver Figura No. 34b). Estos tetraedros se agrupan entre sí formando una unidad hexagonal, la cual se repite indefinidamente constituyendo una redícula laminar (Ver Figura No. 34c). La unión entre dos tetraedros se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno. Algunas entidades consideran como arcillas a las partículas menores a 0.002 mm ($<2 \mu\text{m}$).



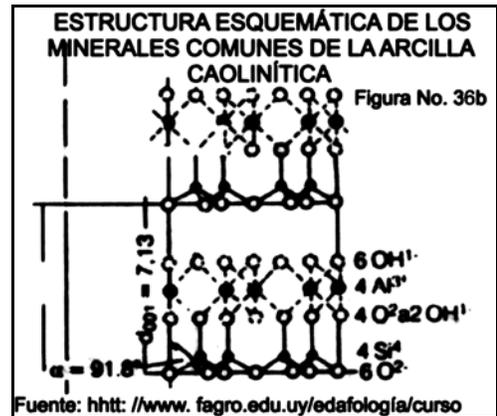
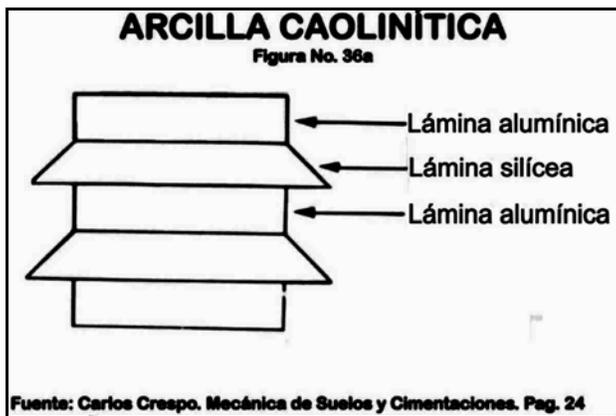
Una lámina del tipo alumínico (Ver Figura No. 35. Estructura Atómica de la Lámina Alumínica) esta formada por un átomo de aluminio rodeado de seis átomos de oxígeno e hidrógeno (Ver Figura No. 35a) arreglándose el conjunto en forma de octaedro (Ver Figura No. 35b), los cuales se agrupan entre sí mediante un átomo común de oxígeno, repitiéndose la formación indefinidamente y dando como resultado una retícula laminar alumínica (Ver Figura No. 35c).



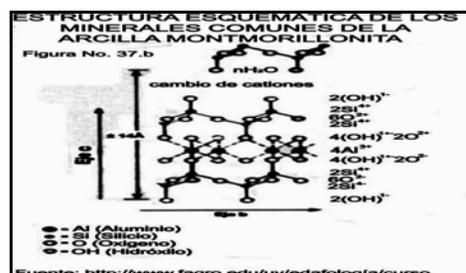
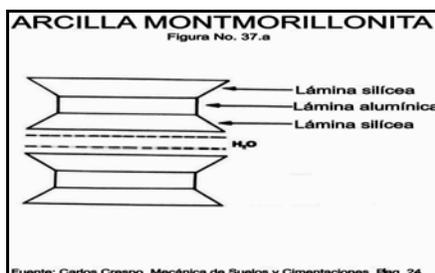
Sin embargo, los barro utilizados para producir ladrillos son usualmente mezclas de no más de cuatro minerales de arcilla; los cuales son caolinita, illita (Mica arcillosa), esméctita (Montomorillonita) y clorita, como se indica a continuación:

La caolinita (del nombre chino Kau-Ling), que procede de la carbonación de la ortoclasa (feldespato potásico). La arcilla caolinítica tienen una estructura, en la que una simple capa tetraédrica de sílice se alterna con una simple capa octaédrica de alúmina indefinidamente y con una unión tal entre sus retículas que no permiten la penetración de moléculas de agua entre ellas, pues producen una capa electrónicamente neutral, lo que induce, desde luego, a que estas arcillas sean bastante estables en presencia del agua. La alternación de estas capas da una composición de $\text{Si}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{10}(\text{H})_8$ y tiene un alto contenido de alúmina (39.5%) de cualquier mineral de la arcilla.

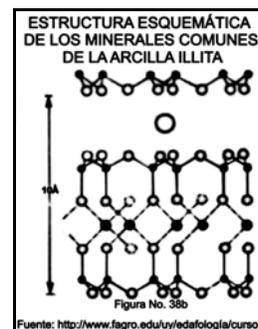
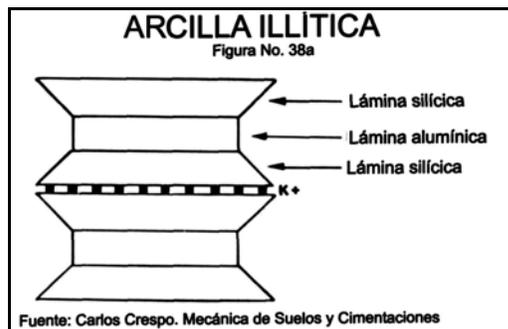
En las arcillas más sedimentadas, la caolinita se encuentra en forma desordenada, en la que existe un elemento al azar en la estructura, acompañado de sustitución iónica por magnesio (Mg), Fe^{2+} y Ca^{2+} . (Ver Figuras No. 36a. Arcilla caolinítica y No. 36b.) Estructura esquemática de los minerales comunes de la Arcilla Caolinítica).



La esmectita (Montmorillonita, que debe su nombre a Montmorillon, Francia), a la cual pertenecen las bentonitas, en sí es un nombre que se da a un grupo de minerales en que los oxígenos se reemplazan parcialmente por hidrófilos y los cationes de la capa del centro son sodio y calcio. Se forman por la superposición indefinida de una lámina aluminica entre dos láminas silíceas, pero con una unión débil entre sus retículas, lo que hace que el agua pueda penetrar en su estructura con facilidad. Estas arcillas sufren fuerte expansión en contacto con el agua, lo que provoca inestabilidad entre ellas. (Ver Figuras No. 37a. Arcilla Montmorillonita y No. 37b. Estructura esquemática de los minerales comunes de la Arcilla Montmorillonita).



La illita (que debe su nombre a Illinois, E. U. A.) producto de la hidratación de la micas y que presenta un arreglo reticular similar al de la montmorillonita, en la cual una capa octaédrica de alúmina se encuentra entre dos capas tetraédricas de sílice; algunos de los iones de Si^{4+} son reemplazados por iones de Al^{3+} y las láminas se unen mediante los iones de potasio; pero tienen la tendencia a formar grumos por la presencia de los iones de potasio, lo que reduce el área expuesta al agua, razón por la cual no son tan expansivas como las arcillas montmoriloníticas. (Ver Figuras No. 38a. Arcilla Illítica y No. 38b. Estructura esquemática de los minerales comunes de la Arcilla Illítica).



La clorita consiste de láminas similares a la illita alternando con capas octaédricas de composición $(\text{Mg}, \text{Al})_6(\text{OH})_{12}$. Algunas veces esta última capa es discontinua, lo cual presta al mineral propiedades de abultamiento, esto se conoce como clorita hinchada.

Otros minerales que en ocasiones se encuentran en proporciones suficientemente altas para afectar las propiedades necesarias para la fabricación de ladrillos son las micas, vermiculita y sepiolita. Cada uno de estos minerales se comporta de manera diferente en las diferentes etapas de la producción de ladrillos. En la fase de formación, la illita y las caolinitas desordenadas son plásticas, mientras que las caolinitas ordenadas y las cloritas no lo son. Las esmécticas son tixotrópicas; requieren de mucho agua para hacerlas plásticas, propiedad que se pierde durante el proceso de secado.

Por lo tanto tienen un mayor grado de encogimiento durante el secado que los otros tipos de barro (hasta 23% lineales, en comparación con un máximo del 10% para la caolinita y un 11% para la illita). Las esmécticas también tienden a reabsorber el agua durante la etapa verde.

Todos los minerales del barro, al ser calentados a temperaturas por encima de los 1,200°C son capaces de recrystalizarse para formar los siguientes minerales mullita ($x\text{Al}_2\text{O}_3$ y SiO_2), corindón (Al_2O_3) y, cuando hay magnesio (Mg) presente, olivino; mientras tanto, cristobalito resulta tanto de los cambios en la composición de mullita como de la incorporación de cuarzo libre. Sin embargo, las temperaturas y los tiempos utilizados en la producción industrial de ladrillos son inadecuados para que estos cambios se completen, y la fusión usualmente cesa en la etapa de formación de vidrio en la que algunos de estos minerales están comenzando a formarse. Pero, se considera importante el desarrollo de los cristales espesos de mullita para la producción de la fortaleza en el ladrillo quemado.

La caolinita ordenada tiene una alta temperatura de fusión (mayor a 1,200°C) y no pasa por una fase de vidrio, pero se puede mostrar que sí se forma mullita si se mantiene una temperatura de 950°C por más de un día. La caolinita desordenada tiene una temperatura menor de fusión, mientras la illita forma una fase vidriosa rápidamente al alcanzar una temperatura de alrededor de 1,050°C. El comportamiento bajo el fuego de las esmécticas y la clorita varía con su composición química. Estas reacciones con frecuencia involucran algún movimiento de hierro, lo cual afecta el color del ladrillo quemado; la transformación caolinita/mullita puede tomar alguna cantidad de hierro, lo cual blanquea el ladrillo, mientras la illita y la clorita expelen hierro en una etapa inicial, lo cual resulta en un color más rojo; por lo tanto el programa de fuego de cada ladrillo debe ser cuidadosamente ajustado al contenido barro-minerales de la materia prima, si se desea producir un ladrillo de la fortaleza, durabilidad y apariencia requerida, de la manera más económica.

Los minerales de hierro proporcionan la mayor parte del color al ladrillo quemado. En el ladrillo crudo, los minerales de hierro más comunes son la hematina (Fe_2O_3); goetita ($\alpha\text{FeO}\cdot\text{OH}$), limonita ($\approx 2\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$); magnetita (Fe_3O_4); pirita (FeS_2) y siderita (FeCO_3). Bajo condiciones de oxidación en el horno, todas estas se convierten en hematina, lo cual es de gran importancia en la producción del color del ladrillo. La hematina, al calentarse por arriba de los $1,000^\circ\text{C}$, muestra un incremento en el desorden del enrejado, y se tornan de un rojo más oscuro; por lo tanto, en general, una mayor temperatura de quemado produce un ladrillo más rojo. Se pueden crear condiciones reductoras en el horno si se colocan los ladrillos más juntos, para restringir el paso del aire entre los ladrillos; o controlando la provisión de combustible para que se quemé todo el oxígeno. En una atmósfera reductora, el hierro se combina con los silicatos en el barro para formar silicatos ferrosos, los cuales, a diferencia de la hematina, se vuelven líquidos a temperaturas de horno, formando una película azul oscuro en la superficie al enfriarse. Estas condiciones se combinan algunas veces; mediante un proceso conocido como relampagueo, mediante el cual se incrementa el combustible por un breve período de tiempo al final del ciclo de quemado, elevando así la temperatura y reduciendo el oxígeno, de esta forma se puede producir una gama variada de colores en la superficie del ladrillo.

Se pueden crear condiciones reducidas en el interior del ladrillo individual cuando el incremento de la temperatura en el horno es tal que se forma una película vitrificada en la parte de fuera del ladrillo, evitando así el escape de gases. Esto produce una capa negra en el ladrillo. En algunos casos, la capa negra se extiende hasta casi la superficie del ladrillo, y se crea deliberadamente para dar efectos de color; pero su presencia tiende a debilitar el ladrillo. De esta manera, ejerciendo un control cuidadoso del horario de temperatura del horno y la atmósfera dentro del mismo, el productor de ladrillos puede producir una multiplicidad de variaciones de color.

Sin embargo, estos cambios están acompañados de numerosos cambios mineralógicos que pueden ejercer influencias sutiles en el color, así que ejercer un control estricto del color es de hecho extremadamente difícil.

Algunas arcillas para ladrillo producen ladrillos blancos, amarillos o de color de ante (amarillo ligero) al quemarlos, y la mineralogía de este proceso es compleja. En barros de caolinita, que son deficientes de álcalis, la caolinita se transforma de primero, de una temperatura de alrededor de 1000°C, a una metacaolinita amorfa, y luego en una mullita cristalina (Al_2SiO_5); ambos minerales pueden absorber el hierro en su enrejado en sustitución del aluminio. Esto puede ser demostrado en la mullita cristalina midiendo las dimensiones del enrejado, el cual se incrementa al incrementarse la sustitución de hierro. Se verá que hasta un 11% de la hematina puede ser absorbida, así es que hasta este punto los ladrillos tienen un color pálido. El óxido de hierro por encima del 11% se cristaliza como hematina, y los ladrillos se enrojecen. La presencia del calcio también es importante. Bajos porcentajes de calcita (2-10%) resultan en la formación de anortita, la cual no puede aceptar la sustitución de hierro, así que se libera la hematina para dar un color rojo. A mayores niveles de calcita (alrededor del 20%), parte del hierro se torna en un piroxeno, que tiene color café, y dichos ladrillos se describen como “rojo-café claro”. Concentraciones más altas de calcita causan un color cada vez más claro, así que a 35-40% CaCO_3 , los ladrillos tienen nuevamente un color amarillo. Esto pareciera ser debido a la producción de una ferrita dicálcica ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$): wollastonita (CaSiO_3) que también se sabe se forma a estos altos niveles de calcio.

Estas reacciones únicamente llegan a su total extensión cuando las partículas constituyentes de la arcilla para ladrillos están finamente divididas. Cuando son toscas, las reacciones quedan incompletas, y se produce el mineral gehlenita; este proceso puede incorporar hierro pero da un color sucio al ladrillo.

La presencia de elementos alcalinos (que principalmente se encuentran en forma de illita barro-mineral) tiene un efecto importante: en la presencia de únicamente 1 ó 2 % de álcali, se forma anortita y otros feldespatos plagioclasa en lugar de la mullita, así que ocurre hematina libre aún cuando su concentración es baja (< 6%) y los ladrillos se enrojecen. El efecto de la presencia del calcio también es mayor, así que los ladrillos ílíticos son únicamente un 15-17% de carbonato de calcio y hasta un 6% de óxido de hierro toman un color amarillo luego de ser quemados.

El sulfuro de hierro, la pirita, tiene su importancia por aparte. Entre 480°C y 588°C desarrolla gases, ya sea sulfato de hidrógeno o sulfuro de trióxido (dependiendo de la cantidad de agua y oxígeno presente); si en esta etapa la parte externa del ladrillo se torna vitrificada, se crea un ambiente reductor que forma una coraza negra. En casos extremos esto causará que el ladrillo se expanda, así es que se infla, y hasta explota, fenómeno conocido como hinchamiento. Aún si no se llega a esta etapa, la textura esponjosa resultante de este proceso reduce con frecuencia la fortaleza del ladrillo. La presencia de pirita en la arcilla del ladrillo puede ser tolerada únicamente si la proporción es baja. También es muy susceptible a los efectos del clima, así es que si no está presente en la superficie de la arcilla, esta resiste más a los efectos del clima y en un corto periodo se manifiesta; como por ejemplo, en una pila de acopio, efectivamente la oxidará; y desafortunadamente, los productos de esta oxidación son perniciosos.

Los minerales del hierro también pueden actuar como fundentes, esto es, como la causa para bajar la temperatura de vitrificación. Por otro lado, cuando hay otros fundentes presentes, el contenido máximo permisible de hierro es muy bajo, porque el excederlo ocasiona que los ladrillos se fundan y se deformen en el horno.

Los minerales de calcio se encuentran presentes usualmente en arcillas en forma de calcita (CaCO_3); ello ocurre en forma de fragmentos fósiles de conchas, como concentraciones de diferentes tamaños, como costuras delgadas o lentes de piedra caliza, o finamente diseminados en toda la arcilla.

Al calentarlos a 900°C , la calcita se convierte en dióxido de carbono, el cual contribuye a reducir la atmósfera dentro del ladrillo, y de esta forma a la formación de un fondo o corazón negro. Si la calcita está presente en gran cantidad, la presencia de grandes cantidades de dióxido de carbono en el horno tiene un efecto humectante, lo cual da como resultado una falta de cocimiento a los ladrillos, y los mismos no adquieran el color y fortaleza apropiados.

De hecho, la presencia de la calcita en la arcilla tiene importantes efectos en el desarrollo del color, y normalmente se agrega algunas veces a las arcillas que al quemarlas se produce un color rojo, para producir un color amarillo o ante (amarillo ligero). El mecanismo para ello no está claro, pero probablemente incluye la incorporación de parte del hierro a un complejo de carbonatos como la ankerita ($(\text{Ca.Mg.Fe})\text{CO}_3$), que no tienen los colores fuertes de la hematina.

Si la calcita resiste la molienda, y por lo tanto sobrevive en el ladrillo hecho en fragmentos mayores a un milímetro de diámetro, el gas que se desarrolla crea una pequeña burbuja de barro vitrificado, y la calcita se convierte en óxido de calcio suave; si ello ocurre cerca de la superficie puede producir hoyos no visibles.

En los barros piríticos, el ácido sulfúrico, producido por la descomposición de la pirita, reaccionará con cualquier calcita presente para producir yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esto puede suceder ya sea durante la exposición al clima natural o artificial de la arcilla; o dentro del ladrillo en el horno.

Durante el proceso de quemado, se convierte a su forma hemihidrática; pero una vez el ladrillo es expuesto nuevamente al clima, se revierte nuevamente a yeso. La evaporación ínter sitial del agua del ladrillo hace que la superficie adquiera una fluorescencia blanca: en el mejor de los casos esto no es más que una capa no muy bonita que será removida pronto por el agua de la lluvia; pero si hay demasiada presente, los efectos de cristalización dentro del ladrillo pueden resultar en su total desintegración. Las reacciones entre estas sales solubles y líquidas del mortero pueden también ser muy dañinas.

El carbón o carbono ocurre en tres formas en la arcilla para ladrillo: como carbón de piedra o lignito (carbón fósil combustible) o hidrocarbón. En la primera forma se encuentra principalmente como fragmentos de restos de plantas, raíces o madera fósil, aunque algunas veces se incluyen deliberadamente en la mezcla vetas delgadas de carbón. Aún cuando se reduce el costo del combustible para quemar los ladrillos, frecuentemente tiene el efecto de blanquear el color. En su forma de hidrocarbono, cuando se encuentra en forma de aceite de arcilla esquistosa (esquistos de aceite), puede ser muy valioso, pues reduce los costos de energía significativamente; pero hay límites superiores que si se sobrepasan hacen imposible controlar el proceso de quemado.

La mayoría de productores de ladrillo utilizan aditivos para cambiar las propiedades del ladrillo quemado. En general, el bajo precio de venta del producto impide cualquier adición costosa o en grandes cantidades al barro crudo; por esta razón, la mayoría de aditivos son minerales industriales comunes o productos de desecho de otras industrias. Sirven únicamente para modificar la arcilla original, cuyas características aún están determinadas en gran parte por el material excavado.

Grog es el nombre que se le da a cualquier material más o menos inerte, agregado para abrir la textura del ladrillo, y así reducir los riesgos de hinchamiento o formación de coraza negra. La arena es el más común, pero también se puede utilizar roca quebrada como mica-esquistosa, ceniza volcánica y pórfida (roca ígnea que encierra cristales de feldespato y cuarzo), así como productos de desecho, como desechos domésticos incinerados y ladrillo reciclado quemado, dependiendo mucho de la disponibilidad local.

Se pueden incorporar colorantes al cuerpo del ladrillo, o en la arena que se utiliza para desmoldar o revestir. Los utilizados son los colores industriales más baratos, como los ocre y el dióxido de manganeso.

Es práctica común agregar algo de combustible al ladrillo para producir un quemado balanceado: el material preferido es el coque pues también sirve como grog; pero el carbón energizado, el aceite de desecho, etc., también son elementos ya probados. Algunas veces se utiliza una adición no mineral, como el aserrín o la fibra de desecho del proceso de la caña de azúcar (bagazo).

Si las impurezas del sulfato son un problema, la adición de compuestos de bario es muy efectiva como medio de control; este precipita el sulfato como una sal altamente insoluble de bario, la cual por lo tanto no se mueve o recristaliza dentro del ladrillo. Los hoyos producidos por la cal se reducen algunas veces mediante la adición de sal común, a pesar de que aún no está clara la forma en que ello trabaja.

6.4. Ocurrencia y distribución de arcillas para hacer ladrillos

Los minerales de la arcilla se forman mediante la exposición al clima de los minerales alumino-silicatos; en vista de que los mismos están presentes en prácticamente cualquier roca (excepto en las piedras puramente arenosas y calizas) y se encuentra que las arcillas son muy abundantes. Por lo tanto, es posible, casi en cualquier parte del mundo, hacer un ladrillo de material expuesto al clima excavado de la superficie.

El tipo de mineral de arcilla producido por la exposición al clima depende en gran parte de las condiciones climáticas, y especialmente de la cantidad de lluvia. Se verá que las condiciones secas favorecen el desarrollo de la esmectita; la illita se forma en condiciones un tanto más húmedas, mientras condiciones muy húmedas producen caolinita y vermiculita. En áreas lluviosas, se puede remover el sílice de la molécula, produciendo gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). La última reacción se da más a altas temperaturas, así que las extensas regiones del mundo con un clima caliente y húmedo, tienen una capa expuesta al ambiente en la que predominan la gibsita y la caolinita (una laterita).

Las rocas sedimentarias se forman mediante la remoción y reposición del material de la superficie expuesto al clima; y durante el proceso de transporte sedimentario los minerales de la arcilla parecen ser bastante estables. En esta etapa, los minerales de barro de otras fuentes que no sean de la exposición al clima pueden ser agregados.

Algunos cambios se llevan acabo durante la diagénesis: la caolinita es persistente en ambientes de lagos y ríos, pero en agua de mar puede transformarse en illita; la esmectita también puede transformarse en illita en esta fase.

Otras transformaciones en illita y clorita pueden ocurrir con entierros poco profundos e incrementos en la temperatura. Sigue que la mineralogía precisa de la arcilla para hacer ladrillos está determinada en gran parte por su historia geológica.

Otros minerales no barrosos se relacionan con el modo de origen de la materia prima. Así pues, en lateritas, y en sedimentos derivados de laterita, el hierro se encuentra con más frecuencia en forma de hematina; en sedimentos no marinos se encuentra como siderita; y en sedimentos marinos, en particular aquellos formados en mar abierto, ocurre como pirita.

6.5. Principales arcillas para hacer ladrillos

El uso de arcillas de la superficie, expuestas al clima, como materia prima para hacer ladrillos siguió como práctica durante buena parte del siglo pasado y en este, siendo importante en muchos países en vías de desarrollo. En los países desarrollados, sin embargo, las fábricas locales pequeñas de ladrillos se han ido reduciendo a unas cuantas unidades grandes; estas deben perforar a profundidad en busca de material no afectado por el clima para obtener una provisión adecuada; y necesitan encontrar formaciones geológicas que sean espesas, consistentes tanto a lo lateral como a lo vertical, y que en gran medida no tengan problemas de manufactura. A ello es necesario agregar las demandas del mercado, que algunas veces favorecen excesivamente un ladrillo cuya materia prima sea escasa, y no comprará un ladrillo hecho de una fuente abundante. Todo ello ha llevado a una reducción en el número de formaciones geológicas que aún están siendo utilizadas.

Los factores determinantes para la formación de depósitos arcillosos, se considera que se debe por la existencia de cuencas aptas para la acumulación de sedimentos provenientes de cortas distancias, en zonas tectónicamente activas, ya que las fallas permiten el origen de depresiones, al ser fácilmente erosionados los materiales sueltos de una masa rocosa que ha sido afectada por la misma, siendo lugares donde el agua se estanca, formando laguna y pantanos, creando un ambiente deposicional.

El aporte de sedimentos a tipos de cuencas de pequeña extensión es constante y proviene de puntos cercanos. Estos sedimentos son producto de la desintegración de rocas graníticas, los cuales una vez depositados, dan origen a depósitos de arcillas, que por lo regular lo indica el carácter silíceo predominante.

La caolinita pertenece a los minerales del grupo del caolín y es uno de los más usados, suele producirse por la hidrólisis del feldespato y de otros silicatos, por la acción de las aguas termales al elevarse hacia la superficie o por la erosión ordinaria de la superficie. Yacimientos de caolinita relativamente pura, tienen su origen en rocas ígneas ácidas ricas en feldespatos, y otros se han formado secundariamente en lechos sedimentarios después del transporte. Se cree que las fracciones coloidales de los suelos geológicamente antiguos, se han concentrado en pantanos y han sido lavados hasta convertirse en depósitos de arcilla caolinítica. La eliminación de bases de magnesio, álcalis y hierro ferroso, es el factor esencial para la formación del caolín.

Los minerales del grupo de la montmorillonita, se han formado por la descomposición superficial de rocas por agentes atmosféricos; procesos hidrotermales a baja temperatura, la alteración del polvo volcánico en capas estratificadas y por la acción de las aguas circulantes a lo largo de fracturas y fisuras.

El medio óptimo para la descomposición por los agentes atmosféricos, es aquel en que se encuentran en concentración bastante alta el calcio, hierro ferroso y especialmente el magnesio. La proporción de potasio debe ser bajo o quizás baja en relación con el magnesio, el calcio y el hierro ferroso. Suele haber materia orgánica, lo que ejerce una acción reductora.

Los minerales arcillosos del grupo illita, hidromica; contienen potasio y tienen propiedades semejantes a las de la mica moscovita. A medida que el calcio, el magnesio y el sodio, fácilmente reemplazables, son sustituidos por el potasio en condiciones que fijan el potasio en la red cristalina en forma insustituible; la arcilla va cambiando de los tipos de capas mixtas brabaisita y después a una variedad de mica moscovita.

La arcilla es el producto principal del proceso de intemperismo y un componente principal de la mayoría de rocas sedimentarias. La oxidación, reacción orgánica, hidrólisis, disolución e intercambio de iones, son los factores importantes del proceso químico, en el intemperismo de las rocas. El intemperismo de los minerales aluminio-silicatos (albita u ortoclasa), pueden dar lugar a la formación de caolinita. Los minerales de feldespato tienden a cambiar a caolinita, biotita y moscovita, y a menudo alteran a illita; mientras que los minerales ferromagnesianos proporcionan Mg (2+) para la formación de montmorillonita (GRIM, 1953). También por procesos hidrotermales se pueden formar arcillas. En el proceso de formación de las arcillas, la composición de las rocas arcillosas cambia extensamente. Es de gran importancia el valor del Ph del medio en el cual se formó la arcilla; por ejemplo, la caolinita o halloicita se forma en un medio ácido (5 y 6), mientras que un ambiente alcalino propicia la formación de montmorillonita (>6), Los minerales arcillosos ocurren en diversos tipos de depósitos, pero son tres los que más comúnmente se presentan:

- 1. Depósitos autóctonos:** son los más comunes, ocurren por el intemperismo de las rocas ígneas, dando lugar a la formación de arcillas *in-situ*.
- 2. Depósitos alóctonos:** son los que se presentan en forma de lentes tabulares dentro de rocas sedimentarias o depositados a lo largo de valles aluviales. El material arcilloso ha sido transportado desde su fuente hasta su lugar de acumulación.
- 3. Depósitos hidrotermales:** son las arcillas relacionadas a la alteración de soluciones hidrotermales a lo largo de fracturas y fallas.

6.6. Tuberías vitrificadas de arcilla

Las tuberías para los desagües bajo tierra necesitan estar protegidas del ataque del agua subterránea de afuera del pozo así como de los líquidos de adentro. Necesitan una fortaleza a alta compresión pues con frecuencia se encuentran debajo de carreteras y necesitan soportar el peso de estar enterradas profundamente debajo de altos edificios. Las tolerancias de tamaño y forma son muy estrictas, y para evitar distorsión de dichos objetos grandes en la secadora y en el horno, se requiere de una provisión de arcilla consistente y bien mezclada. Para crear una fortaleza, las temperaturas del horno alcanzan 1,200°C para que se forme la mullita secundaria cristalina. El barniz o glaseado tradicional con sal, producido al salpicar la superficie de la tubería formada con roca salina antes de quemarla, ha sido reemplazado en su totalidad por un glaseado cerámico a base de feldespato.

6.7. Losas para pisos y paredes

La losa decorativa para interiores se hace con frecuencia de un cuerpo con base de arcilla al que se le aplica un glaseado de sílice. Tradicionalmente, la base se quema primero, el glaseado y cualquier patrón deseado se agregan en forma líquida, y luego el producto se vuelve a quemar, proceso que puede tomar varios días. Los métodos modernos, que utilizan un solo quemado, pueden completar el proceso en 20 minutos. En estas circunstancias, la contracción por fuego necesita ser muy baja, y muy uniforme; por esta razón, las arcillas refractarias con un mínimo de agentes fundentes, finamente molida y muy bien mezclada, es lo que se usa como cuerpo. Una receta típica consistiría de un 35% de arcilla de bola, 15% de arcilla china, 10% de piedra caliza y hasta un 15% de desechos de losa. La sílice forma un 25% de esta mezcla, parte como arena finamente molida pero con frecuencia incluyendo un porcentaje de cristobalito (producido por la calcinación de arena) ello para evitar los efectos de la inversión α/β del cuarzo a los 573°C.

El glaseado es esencialmente de sílice, con sienita nefelita o feldespatos agregados como un fundente. El verter la mezcla directamente en el agua produce una fritada, un vidrio altamente poroso que puede ser fácilmente vuelto a derretir para aplicarlo a la superficie de la losa. Ciertos óxidos metálicos actúan como “pacificadores”; en el pasado se ha utilizado plomo y estaño, pero se les ha reemplazado por zirconio (que se deriva principalmente de las arenas oscuras).

En el último siglo, opulentos edificios públicos y privados con frecuencia han utilizado baldosa encáustica para sus pisos, y actualmente se está volviendo a su manufactura.

Para estos, se imprime una bola de 2 cm. de grosor de arcilla / sienita nefelita con un patrón profundo, que luego es infiltrado con arcilla líquida de diferentes colores. Luego de un proceso de secado prolongado y lento, en la superficie de la baldosa plana, para luego quemarla de la forma normal.

Las caolinitas primarias y las arcillas de china se derivan directamente de la alteración *in-situ* de los granitos, y por lo general son muy costosas, demasiado refractarias, para la industria de la baldosa, pero las arcillas de bola que ocurren en las cuencas sedimentarias, sí se utilizan. Estas consisten de caolinita que tiene menor cristalinidad, junto con otros minerales de barro como illita, y por lo tanto tienen una temperatura de quemado más baja que la de la arcilla de china. Son bajos en cuarzo y prácticamente libres de minerales de hierro, así es que después de quemadas adquieren un color blanco. Estas arcillas de bola deben su existencia en parte al trabajo de los granitos alterados que se encuentran cerca, y en parte a la destrucción de una extensa manta de caolinita al ambiente, que se desarrolló en condiciones calientes y húmedas ha principios de la era Terciaria, la cual ha sido removida prácticamente en su totalidad debido a la profunda erosión del bajo Terciario y el Pleistoceno.

Cuando las arcillas son muy variables, y el contenido de caolinita no forma más del 25% o con frecuencia no está presente; la illita es el mineral predominante, con cantidades significativas de esmectita y clorita. Sí el contenido de hierro puede ser tan alto como del 6%, los cuerpos son por lo general de color rojo oscuro; y si sucede que el contenido de cuarzo es también bastante alto, hasta un 40%; y con frecuencia hay un alto contenido de minerales de carbonato, tanto como calcita y dolomita, los cuales pueden alcanzar un 18% de la mezcla del cuerpo, estos cuerpos de las baldosas son inevitablemente débiles, entonces es conveniente agregarles minerales feldespáticos o arcilla caolinítica, para agregarle fortaleza a la baldosa.

6.8. Arcilla expandida

El proceso que resulta de la expansión desastrosa en la producción de ladrillos, puede convertirse en una ventaja en la producción de arcilla expandida, la cual puede ser incorporada al concreto como agregado de poco peso. En este proceso, se alimentan bolitas de arcilla al horno a unos 1,200°C para que la rápida vitrificación de la capa de afuera de la bolita ocurra antes de que los gases generados en el interior puedan escapar. La bolita se infla de esta manera a varias veces su tamaño original, y la textura esponjosa del interior resulta en una gravedad específica baja, con densidad de hasta 0.3.

Pareciera que la evolución de óxidos de sulfuro de la pirita, y de dióxido de carbono de los carbonatos es menos importante en este proceso, pues estas reacciones ocurren a temperaturas relativamente bajas; la reacción importante es la reducción de compuestos de hierro en la presencia del carbono, produciendo dióxido de carbono y oxígeno.

La rápida vitrificación es importante, así es que la presencia de un 20-30% de fundentes en la arcilla es esencial. El carbono orgánico por encima del 3% y la pirita por encima del 2% inhiben el proceso.

Aún cuando es inherentemente débil como agregado, su bajo peso permite que se forme con el cemento en grandes bloques que pueden ser utilizados en paredes de interior y pisos.

Aquí, como en cualquier otra parte del mundo, el concreto de bajo peso es producido más frecuentemente mediante espumación, o incorporando otros rellenos de bajo peso como la perlita.

Otra partícula de bajo peso, relacionada de lejos con la arcilla expandida, es la coenosfera. En estaciones generadoras de electricidad que utilizan carbón, los combustibles atrapan la mayor parte del polvo fino, el cual, bajo el nombre de ceniza combustible pulverizada o ceniza volátil (pfa) encuentra uso en la industria de la construcción. En ella ocurre una proporción de esferas vitrificadas huecas, que probablemente se originaron de burbujas de arcilla fundida de la materia argilaceosa del carbón. Al separarlas mediante flotación, pueden ser incorporadas al concreto como sustituto del agregado fino, produciendo un producto de bajo peso. (García y Suárez)

7. CEMENTO Y SUS MATERIAS PRIMAS

7.1. Historia

La patente británica No. 5022, registrada por Joseph Aspdin, de Leeds, en 1,824, para un “cemento superior que semeja la piedra de Pórtland” es sin duda una de las marcas de la industria de la construcción; ya que introdujo un material, que, cuando se combina con un agregado, hace concreto de alta fuerza. Es difícil visualizar lo que el paisaje urbano actual sería sin el concreto; o imaginar cómo las estructuras principales de ingeniería de hoy, como puentes, túneles, caminos, edificios altos, etc. pudieran haberse construido sin él.

La invención de Aspdin fue moler juntas piedra caliza y arcilla, formando una mezcla y luego ponerle fuego a la mezcla en un horno. La idea básica no fue enteramente nueva, ya que se conocía desde 1,796 que quemar nódulos de piedra caliza arcillosa producía un cemento que se asentaría bajo el agua (esto fue curiosamente mal llamado cemento romano y su uso era amplio alrededor de 1,800); en Inglaterra, era hecho quemando los nódulos septarios que se lavaban de la arcilla de Londres en las costas de Essex y Kent. Al mismo tiempo, el cemento hidráulico comenzó a hacerse quemando piedras calizas arcillosas, como las de las áreas bajas de Liassic Blue Lias en Inglaterra y en capas similares Jurásicas y Cretácicas del continente europeo.

De hecho, los romanos, alrededor del 100 a. de J. C., descubrieron un ingrediente diferente (cenizas volcánicas de la villa de Pozzuoli, en los declives del Monte Venusiano, que cuando se mezclan con cal quemada y mojada, producía un cemento hidráulico) entonces, el término puzolano se usaba para describir cualquier material que reacciona con la cal para formar un cemento.

En esto, fueron precedidos por los griegos, quienes usaron tufas (toba, piedra volcánica) volcánicos de Santorini. De tal modo que el descubrimiento de Aspdin, usando dos materiales comunes y nativos, fue ciertamente de gran importancia.

7.2. Materia prima para el cemento Pórtland

Pueden ser utilizadas varias para la elaboración del cemento Pórtland según sea el origen de estas y las dosificaciones adecuadas de las mismas. Según el origen y dureza del material, estos pueden ser:

<p><u>ORIGEN Y ESTADO DE LA MATERIA PRIMA</u> <u>(CALCÁREO-ARCILLOSA)</u></p>

NATURAL	ARCILLOSA	CALCÁREO	ARCILLOSO-CALCÁREO
Duro	Pizarra	Caliza	Caliza Arcillosa Cementada
Suave	Esquistos	Caliza Suave	Caliza Arcillosa Suave
No Consolidado	Arcilla	Marga (Conchas)	Marga Arcillosa

ARTIFICIAL: Materiales que también se agregan a la materia prima:

- Ceniza Volcánica o Toba Volcánica
- Carbón
- Desechos Alcalinos
- Escorias de altos hornos

En sí, los materiales básicos son dos: la roca caliza y la arcilla, estos ocurren frecuentemente en yuxtaposición (una junto a la otra). Se requiere usualmente entre el 18% y el 25% de la arcilla, menos si la roca caliza misma tiene un contenido mineralógico arcilloso. Las rocas calizas que se pueden usar son las de las eras Carbonífera, Cretácea-Jurásica y Pérmica. Donde ocurre la piedra caliza gruesa del Carbonífero, generalmente químicamente pura y es inmediatamente sobrepuesta por las arcillas esquistosas.

En la era Jurásica, la tan llamada piedra caliza hidráulica; los depósitos consisten de una alternación de piedras calizas y arcillas esquistosas, así que con el diseño adecuado de la cantera, las proporciones correctas pueden ser mantenidas.

El yeso del Eoceno, es el proveedor del volumen más grande para la industria cementera en Guatemala y parcialmente de los países centroamericanos vecinos (El Salvador y Honduras). Tiene la ventaja de ser uniforme, muy gruesa y lo suficientemente suave para una muy económica extracción.

Algunas de las materias primas y secundarias que se utilizan para la fabricación del cemento Pórtland se indican a continuación:

- **Caliza:** Es la más común de las rocas sedimentarias no clásticas o detríticas dominantes, y se encuentra en las capas superficiales de muchos cerros y montañas, en depósitos de profundidad variable, las hay de más de 200 metros. Para la fabricación de cemento se extraen volúmenes muy grandes, porque la caliza representa el 80% de las materias primas que forman el clinker. Por eso conviene que esté cerca

de la planta; de no ser así el costo del cemento se elevaría demasiado por razones de acarreo. Primero se explora el cerro para conocer el volumen y saber el grado de pureza del material que se va a explotar. El análisis químico permite conocer la calidad de una cantera de roca caliza. Se considera buena la que tiene carbonato de calcio en un 95% o más. Abajo del 90% ocasiona problemas. Debido a su dureza se extrae de las canteras con el empleo de explosivos. Una voladura puede producir de 30 a 100 mil toneladas de materia prima.

- **Pizarra:** Se les llama “pizarra” a las arcillas principalmente por óxidos de silicio de un 40% al 65%, por óxidos de aluminio de 10% al 15%, por óxidos de hierro de 6% al 12% y por cantidades variables de óxido de calcio de 4% al 10%. Es también la principal fuente del álcali. La pizarra representa aproximadamente un 15% de la materia prima que forman el clinker. La roca es de grano fino, se separa fácilmente en láminas lisas y lustrosas (crucezo pizarreño). Por lo general contiene carbón negro, en forma de grafito, así como minerales de hierro y manganeso, los cuales proporcionan colores como el rojo y verde. Como estos materiales son relativamente suaves, el sistema de extracción es similar al de la caliza, sólo que la barrenación es de menor diámetro y más espaciada, además requiere explosivos con menor potencia. Debido a que la composición de estos varía de un punto a otro de la corteza terrestre, es necesario asegurar la disponibilidad de cantidades suficientes de cada material.

Existen otros materiales a usarse como:

- **Sílice:** Eventualmente se agregan arenas silicas que contienen del 75% al 90% de sílice, para luego obtener el óxido de silicio en la mezcla cruda. La sílice es un compuesto reemplazante especialmente común que da lugar a la silicificación.
- **Hematita:** El material que aporta mineral de hierro se le llama “Hematita”, aunque puede ser de diversos minerales de hierro o escoria de laminación. Es el criadero de hierro más abundante y al cual se debe principalmente el color rojo en las rocas. Ocurre en forma masiva u oolítica, pero puede ser granular, fibrosa, micácea o terrosa. La Hematita contiene entre el 75% y 90% de óxidos de hierro. Con estos minerales se controla el contenido de óxido férrico de la mezcla. La Hematita constituye entre el 1 y 2% de la mezcla cruda.
- **Puzolana:** Roca volcánica pulverulenta y sirve para hacer mortero hidráulico o cemento hidráulico al agregarle agua. Es el material expulsado por la erupción de un volcán. Los fragmentos de materia en su estado sólido arrojados por las explosiones volcánicas son descritos como piroclásticos (rotos por el fuego). De acuerdo con su tamaño y forma, el material en estado sólido y como fragmentos más pequeños son la ceniza volcánica (menos de 4 mm) o polvo volcánico (menos de 0.25 mm); el polvo más fino puede ser arrojado a la atmósfera superior y mantenerse en ella por varios años antes de asentarse. La ceniza compactada a roca o cuando se consolida se transforma en “toba”; algunas llegan a ser tobas soldadas cuando están fundidas en una nube ardiente de gases calientes. Los fragmentos más gruesos producen una brecha volcánica, la cual puede originarse por una explosión o por flujo.

- **Rocas arcillosas:** Aunque las arcillas son silicatos, se diferencian de las silíceas por su aspecto terroso y su plasticidad al mojarse. No reaccionan con el ácido si son puras, comenzando a hacerlo si son margosas (material calcáreo de grano muy fino comúnmente mezclado con arcilla).
- **Yeso:** Las capas gruesas de este mineral componen una de las rocas sedimentarias más comunes, a las cuales se les aplica el mismo nombre del mineral y se encuentran intercaladas con otras rocas sedimentarias que también son producidas por la evaporación del agua marina. Presenta varios hábitos, incluyendo el espato lustroso fibroso, alabastro compacto y selenita cristalina, el yeso es un producto abundante de la evaporación.

Hay muchos países en el mundo donde la piedra caliza y la arcilla no pueden ser encontradas en suficientes cantidades para hacer cemento, y una investigación en la industria del mundo demostraría formaciones sedimentarias de los mármoles Pre-Cámbricos a arenas coralinas recientes formando la base. En donde las rocas calizas son localmente escasas, las rocas ígneas ultrabásicas y las intrusiones carbonaditas pueden utilizarse.

7.3. Mineralogía de la materia prima para el cemento Pórtland

La pureza química no parece ser algo esencial para el elemento de piedra caliza de los materiales primos, aunque en piedras calizas generales que son bastante puras son usadas. Parece que algo de magnesia, pero no mucho (no > de 3 a 5%) puede ser tolerada, pero las rocas calizas dolomíticas no son utilizadas. La mayoría de arcillas añadidas a la mezcla son de origen marino, y, además de proveer alúmina y sílice requeridas para hacer los minerales cementosos, también

usualmente contienen hierro y sulfuro (mayormente como marcasita o pirita). Algo de hierro es necesario, proveyendo un flujo que baja la temperatura de fusión en el horno y que entra en por lo menos uno de los minerales importantes del cemento Pórtland, aluminio-ferrita tetracálcica. Algo de sulfuro se oxida en el horno, produciendo trióxido de sulfuro, que se combina inmediatamente con la abundante calcita que produce el yeso; pero una cantidad excesiva de sulfuro no puede ser tolerada, y es un factor limitante en algunas de las arcillas que se usan. (Riv y M. Pearl, 1971)

7.4. Procesamiento del cemento Pórtland

Originalmente el proceso fue “mojado”, es decir, una mezcla fluida de piedra caliza y arcilla molidas, eran mezcladas con agua y luego alimentadas en un horno; esta agua tenía que evaporarse antes de que la reacción mineralógica pudiera comenzar. Tener nuevos costos de energía ha resultado en que este proceso sea reemplazado por una alimentación en “seco”, que parece alcanzar el mismo resultado con substancialmente menos combustible. Con la alimentación en seco se va a elaborar cemento y el de uso más general en la construcción, es el “cemento Pórtland”; que se inicia con la extracción de la materia prima: piedra caliza y arcilla de las canteras a cielo abierto o galerías, con el uso de explosivos o medios mecánicos (como palas mecánicas, rompedores neumáticos, etc.). Con camiones estos materiales son transportados a la trituradora realizando un triturado primario, con trituradoras de quijadas o rotatorio, obteniendo un tamaño resultante de $\varnothing 5/8$ ". Luego un triturado secundario, ya sea rotatorio, de cono o de martillo de impacto y se combina con tamizado. Los materiales obtenidos de la trituradora pasan al molino, donde la mezcla se dosifica con todo cuidado y analiza químicamente para obtener las cantidades deseadas de cal, sílice, óxido de aluminio y óxido férrico. Luego del molino, para facilitar la calcinación, este polvo fino y homogenizado pasa a lo largo de un horno rotatorio, donde la mezcla se “cose” a temperaturas

de 1,400 a 1,600°C, en el que los minerales se fusionan en un estado vidrioso y permiten enfriarse despacio, de tal manera que se desarrollen los cristales. La materia prima, durante su calcinación, sufre reacciones químicas y forma nódulos duros, del tamaño de una nuez de un nuevo material llamado clinker. El clinker, después de descargarlo del horno y enfriarlo, se tritura para formar un polvo fino; durante este proceso de trituración, se agrega un retardante (por lo general un pequeño porcentaje de yeso) para controlar la rapidez de fraguado en el momento que se hidrate el cemento. El polvo fino es el cemento Pórtland.

Los minerales resultantes del proceso de calcinación son muchos y muy complejos, pero los principales cementosos son silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), como también hay frecuentemente un porcentaje de óxido de calcio. Estos cuatro compuestos constituyen más del 90% del peso del cemento Pórtland, a saber:

- **Silicato Tricálcico (C_3S):** es el que produce la resistencia inicial del cemento Pórtland hidratado, alcanzando gran parte de su resistencia en siete días. Pasa del fraguado inicial al final en unas cuantas horas y es el responsable de la resistencia inicial hasta los 28 días. La reacción del C_3S con agua desprende una gran cantidad de calor (calor de hidratación). La rapidez de endurecimiento de la pasta de cemento Pórtland está en relación directa con el calor de hidratación; cuando más rápido sea el fraguado, tanto mayor será la exotermia (la liberación del calor).
- **Silicato Dicálcico (C_2S):** en una de sus fases, y la que es la más importante, requiere de algunos días para fraguar. Es el causante principal de la resistencia posterior (de los 28 días en adelante) de la pasta de

cemento Pórtland. Debido a que la reacción de hidratación avanza con lentitud, hay un bajo calor de hidratación. El compuesto C_2S en su fase beta, en el cemento Pórtland desarrolla menores resistencias hasta después de 28 días; sin embargo, aumenta gradualmente, alcanzando una resistencia similar a la del C_3S . No debe ser menor del 10% para cualquier tipo de cemento.

- **Aluminato Tricálcico (C_3A):** presenta fraguado instantáneo al hidratado. Es el causante primario del fraguado inicial del cemento Pórtland y desprende grandes cantidades de calor durante la hidratación. El yeso agregado al cemento Pórtland durante la trituración o molienda en el proceso de fabricación, se combina con el C_3A para controlar el tiempo de fraguado. El compuesto C_3A muestra poco aumento en la resistencia después de un día. El C_3A hidratado, por sí solo, produce una resistencia muy baja, su presencia en el cemento Pórtland hidratado, produce otros efectos importantes. Un aumento en la cantidad de C_3A en el cemento Pórtland, ocasiona un fraguado más rápido y también disminuye la resistencia del producto final al ataque de los sulfatos.
- **Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF):** es semejante al C_3A , porque se hidrata con rapidez y solo desarrolla baja resistencia. No obstante, al contrario del C_3A , no muestra fraguado instantáneo. La velocidad de hidratación es afectada, además de la composición, por finura de molienda, la cantidad de agua agregada y las temperaturas de los componentes al momento de mezclarlos. Para lograr una hidratación más rápida, los cementos se trituran hasta dejarlos muy finos. El aumento inicial en la temperatura y la presencia de una cantidad suficiente de agua también aceleran la rapidez de reacción.

En la etapa de la obtención del clinker, para su posterior molienda, los materiales cementosos pueden ser añadidos, dando productos diferentes para una variedad de usos. Dichos materiales pueden ser naturales, como cenizas volcánicas y tufas (toba, piedra volcánica), horsteno y diatomitas, que proveen el sílice adicional; o compuestos adicionales como la escoria de alto horno y la ceniza de combustible pulverizada (la ceniza que vuela o pfa) de las estaciones eléctricas, estas proveen tanto sílice como alúmina.

7.5. Producción del concreto

El concreto consiste de un relleno mineral inerte (agregado) unido a una “goma” (pasta de cemento); el agua es añadida para causar la hidratación de los minerales cementosos y para permitir a la mezcla de concreto ser vertida o darle forma. Las proporciones usuales de estos ingredientes son: agua 14%-22%, cemento 6%-18%; el agregado, hace entonces el 60%-80% de la mezcla, de esta cantidad: 1/3 es agregado fino y 2/3 agregado grueso.

Hay muchas variables en la formulación de un concreto satisfactorio; la mineralogía precisa del cemento; la petrografía, distribución del tamaño y forma del agregado; y la composición del proceso de agua. Más complicaciones son creadas por la adición de otros químicos, como una ayuda al flujo del concreto (plastificantes) o una ayuda para que se asienten. Con tantas variables, es difícil predecir precisamente las propiedades del concreto final, y si las cantidades a ser hechas son grandes; por ejemplo, en la alimentación de productos de concreto o para un proyecto de ingeniería civil importante, es normal preparar un examen de especímenes de una variedad de mezclas y determinar las fuerzas de trituración etc. de éstas.

De las variables, la constitución del cemento es la más fácilmente controlable; en primer lugar, usualmente está hecho de materia prima, piedra caliza pura, gruesa y arcillas marinas uniformes, que no varían mucho; en

segundo lugar, el análisis químico de rutina de la escoria de fundición del suelo puede asegurar la consistencia del producto de estos trabajos. La uniformidad de la oferta del agregado es menos fácil de controlar, en parte porque las rocas de la cantera tienden a ser más variables, en parte por el problema inherente del muestreo apropiado de dicho material voluminoso y en parte por la complejidad de los exámenes necesarios para reconocer la variación. Un buen ejemplo puede ser el de una cantera de basalto o dolerita; la profundidad de desgaste por el clima en dichas rocas es notoriamente variable, y el producto de una cantera puede resultar en una proporción variada de agregado desgastado y no desgastado por el clima. Solamente a través de una supervisión geológica cuidadosa de la cantera y un examen regular petrográfico del producto, puede esto ser evitado.

Es reconocido que el concreto requiere de un período de tiempo para adquirir su fuerza total, un período de curación, durante el cual el proceso de hidratación es tomado para completar el exceso de agua evaporada. Los productos de concreto, como tubos o baldosas, se curan a temperaturas y humedad controladas; pero el concreto de edificios y estructuras debe ser expuesto a los caprichos del clima local.

En este punto, toma lugar el encogimiento y hasta un concreto bastante sólido puede ser penetrado por una red de micro-rajaduras. Estas micro-rajaduras se desarrollan usualmente en la pasta del cemento o a lo largo de las interfaces de cemento/agregado; pero ha sido sugerido que si se usa agregado de roca triturada, las micro-rajaduras pueden extenderse en planos de debilidad del agregado.

El encogimiento excesivo, que lleva a las rajaduras extensivas, y posiblemente a la desintegración eventual, está asociada con ciertos tipos de agregados, hay unos que contienen minerales con capas y planchas, como la

mica y la arcilla, éstos parecen absorben excesiva agua en la mezcla, que luego la pierden cuando se secan, con desarrollo de estrés consecuente dentro del concreto. Este encogimiento puede ser efectivamente medido con muestras de laboratorio. Los agregados de cuarzo, pedernal y mármol pueden producir encogimientos tan bajos como del 0.025%, mientras agregado con cantidades sustanciales de arcilla esquistosa, piedra de lodo y de roca parda terrosa o arcillosa gris puede resultar en valores arriba del 0.085%, esto causará un deterioro rápido del concreto en el trabajo. En medio de estos extremos, varios grados de encogimiento pueden relacionarse a la presencia de roca parda terrosa o arcillosa gris, filitas, micas esquistosas y rocas ígneas básicas desgastadas por el clima.

El concreto ha sido visto como una roca artificial, con todas las cualidades de una roca natural, por lo que se ha convertido, por lo menos en el último siglo, en un sustituto principal. Pero hay diferencias importantes. En primer lugar, los minerales en la pasta de cemento son silicatos hidratados que no ocurren en la naturaleza y, por tanto, su estabilidad a largo plazo es desconocida. En segundo lugar, el proceso de secado necesario crea una masa rocosa atravesada de rajaduras y, entonces, vulnerable al proceso de desgaste por clima; y en tercer lugar, los procesos de hidratación producen fluidos alcalinos dentro del concreto, lo que crea un ambiente de cambio químico.

La mayoría de rocas naturales han sido consolidadas por un entierro profundo dentro de la corteza terrestre, bajo presiones bastante considerables y han desarrollado de ese modo una fuerza, la cual solamente puede ser simulada en el concreto por la vibración y sobre todo incorporando refuerzos de acero. El concreto es alto en fuerza compresiva, pero débil en tensión y cualquier estructura de concreto que necesite resistir estrés es proveída de abundante refuerzo de acero, como varillas, redes y cables.

Los fluidos residuales dentro de la masa del concreto después de que la hidratación y el secado han sido completados son fuertemente alcalinos, y eso sirve para proteger el refuerzo de acero de los efectos de los electrolitos, que iniciarían la oxidación. Sin embargo, por el sistema de micro-rajaduras, esta situación puede ser destruida por la entrada de ácidos. Éstos se originan en una variedad de formas. El dióxido de sulfuro atmosférico y los óxidos de nitrógeno son una causa; son por supuesto particularmente concentrados en atmósferas contaminadas y son mucho más agravados por las emisiones de estaciones eléctricas, y por los vapores que salen de los carros; entonces, los caminos urbanos de motores están en mucho más peligro por estas condiciones. Otra causa es el uso liberal de sal en los caminos para librarse del hielo, que introduce iones de cloruro en la interfaz de acero/cemento; la sal, por supuesto, puede entrar en estructuras de concreto en forma de spray aéreo o de agua salina subterránea. Todas estas causas promueven la oxidación del acero y la consecuente expansión causa que se desarrollen rajaduras grandes en el concreto a lo largo de las líneas de refuerzo.

El concreto, por supuesto, está sujeto a los mismos procesos de desgaste por clima natural que la piedra dimensional, cuando se usa en una situación de exteriores. Entonces, los efectos del cambio de la temperatura, del hielo y deshielo y de las intrusiones de sal y yeso están generalmente manifiestos. Desde este punto de vista, el concreto debería ser visto como de pobre duración, dado que la diferencia de las propiedades de expansión entre el agregado y la pasta de cemento, y el predominio de las micro-rajaduras.

Durante las últimas décadas, un número en aumento de fallas en el concreto han ocurrido, que han sido consecuencia de las reacciones entre la pasta del cemento y las partículas de agregado. Ya que éstas han destruido efectivamente algunas estructuras importantes como: represas, pasos a

desnivel, parqueos y hospitales, y han recibido mucha publicidad. Cierta grado de interacción agregado/cemento parece tolerable e incluso favorable, como proveer una soldadura que aumenta la fuerza del concreto. Pero la mayoría de estas interacciones involucran una expansión local y son, por lo tanto, muy dañinas. Éstas están todas involucradas con la presencia de álcali en los fluidos residuales; éstas se forman durante la reacción de asentamiento del cemento, que libera iones de sodio, potasio e hidroxilo en una solución acuosa.

Se conoce que tres distintos procesos están involucrados; éstos son la **reacción álcali-sílice**, la **reacción álcali-silicato** y la **reacción álcali-carbonato**.

7.5.1. Reacción álcali-sílice

Esta es la reacción entre los fluidos acuosos y la sílice de las partículas de los agregados (aunque algo de la sílice puede ser proveído por la pasta). Resulta en la formación de la gel de sílice, que es altamente expansiva, ejerciendo fuerzas que han sido estimadas tan altas como 14 MPa, claramente lo suficientemente como para romper el concreto más fuerte. La reacción ocurre cuando la sílice se encuentra en forma microcristalina de tridimita y cristobalita o es amorfa; el cuarzo enteramente cristalino casi no se ve afectado. La expansión es mayor y más rápida con el ópalo, pero es vista de un grado menor en la roca carbonatada silificada, en horsteno y en roca parda terrosa o arcillosa gris etc. También ha sido observado en donde el cuarzo criptocristalino es un mineral accesorio en algunas andesitas y granitos.

La reactividad del sílice puede ser probada haciendo pequeños discos de agregados depositados en el cemento, que luego son inmersos en una solución altamente alcalina; la gel de sílice formada por la reacción puede ser vista en la superficie después de algunos días.

7.5.2. Reacción álcali-silicato

El agregado involucrado en esta reacción es el que contiene minerales con planchas o estructuras con capas, como las filitas, la roca parda terrosa o arcillosa gris, cloritos esquistosos y similares. El mecanismo no está bien entendido, pero se cree que está relacionado con la expansión de las capas de silicatos en contacto con el líquido alcalino.

7.5.3. Reacción álcali-carbonato

Los agregados que consisten de piedra caliza no dolomítica y rocas puras dolomíticas reaccionan con la pasta del cemento para formar un borde de reacción en la partícula del agregado que es aparentemente beneficiosa. Si un mineral arcilloso está presente en una dolomita, una reacción diferente ocurrirá; los márgenes del fragmento dolomita se vuelven desdolomitizados con la formación del mineral brucita ($MgOH_2$), que luego reacciona con los iones del silicato. Esta desdolomitización crea micro-rajaduras, lo que permite al agua penetrar en los minerales arcillosos, cuya hinchazón crea una expansión entera, que luego rompe el concreto. (Merrit, 1999; Calvo, 2000 y LCH)

En vista de la escala del daño causada por estas reacciones, no es sorprendente que haya una búsqueda intensa de remedios y prevenciones.

Las medidas que se han tomado hasta el momento son: **(a)** intentos de excluir los ataques de esta agua al concreto, por el uso de revestimientos y recubrimientos que sean resistentes al agua; y **(b)** la adición de varios químicos y minerales al cemento (como vapores de sílice, zeolitas: que es un silicato natural que se encuentra en ciertas rocas volcánicas), a fin de reducir los efectos de los líquidos alcalinos. Hasta el punto de que sea demostrado que

dichas medidas son totalmente exitosas, en todo caso, con la selección cuidadosa del agregado para evitar materiales reactivos, debe ser una consideración importante. Esto tiene, como quiera que sea, el efecto de restringir severamente la disponibilidad de las fuentes de agregados; y habrán muchos lugares en el mundo donde las fuentes de agregados totalmente no reactivos serán imposibles de encontrar.

7.6. Bloques (block) de concreto y piedra reconstituida

En contraste con la sofisticación de la tecnología moderna del concreto, el bloque de concreto (conocido comúnmente como block), que es la unidad de edificación más simple. La arena, cemento y agua mezclados juntos, vertidos en un molde y dejados a reposar, luego sacados del molde y secados; así es el proceso simple que provee una unidad de edificación a millones de personas a través del mundo en desarrollo. Dichos bloques tienen poca durabilidad, un aislamiento pobre contra el calor y el ruido, y una fuerza baja, pero son baratos y su componente principal, la arena; probablemente se encuentra disponible en toda localidad.

El aislamiento puede mejorarse fundiendo la unidad como un bloque hueco y usando en la mezcla otros agregados livianos. Entonces, el bloque de concreto producido en fábricas en los países avanzados puede ser un tipo muy diferente de producto.

Las mismas consideraciones sobre la selección del agregado, se aplican por supuesto como con la masa de concreto, si dichos bloques deben tener una alta resistencia a las heladas y larga vida.

El alto costo de la piedra natural en años recientes y la necesidad de que las nuevas casas se relacionen bien con las antiguas, construidas de piedra, ha

llevado al desarrollo de piedra reconstituida. Para hacer esto, la roca triturada es incorporada en la mezcla del cemento, curada y secada. A menudo el bloque se hace de doble tamaño y se parte a la mitad para darle la apariencia de una roca quebrada naturalmente. Se puede usar como base la piedra caliza oolítica, que tiene hábitos redondeados, que incluyen esferas que se asemejan a la hueva de los peces, que es una imitación pasable de roca natural que puede ser alcanzada; en alguna oportunidad se determinó que el uso de arena aluvial rica en oolito da un mejor producto que el oolito triturado. Lo que es más difícil de alcanzar en productos hechos a máquina son los diferentes tamaños de la piedra natural y el patrón tan regular de los bloques y las uniones, que inmediatamente revelan el origen del material.

7.7. Estabilización de la base para carreteras

En áreas de desgaste por clima tropical, los agregados de suficiente fuerza para proveer una base para la pista de carreteras pueden ser difíciles de encontrar. En estas situaciones, la estabilización del suelo local con cal o cemento, pueden proveer un sustituto satisfactorio. Ha sido experimentado que los suelos que tienen un amplio rango de tamaño de partículas requieren el menor cemento (tan poco como 3.5% en algunos casos); mientras materiales con un rango de tamaño limitado, como arenas medianas y arcillas, requieren más (hasta del 12%).

Adiciones mayores de cemento dan fuerza aumentada, pero la fuerza de compresión no confinada de 600 KN m^{-2} puede ser alcanzada. Los fundamentos del proceso no son realmente entendidos, pero parece que algo más que un relleno vacío simple esté involucrado.

8. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MENORES

La variedad de materiales usados por la industria de la construcción es enorme y casi todos estos materiales están, en primera instancia, basados en minerales. Todos los metales y la mayoría de los ingredientes del plástico derivado de hidrocarburos están manufacturados a partir de minerales. En las secciones que siguen, algunos de estos materiales están descritos en donde los factores geológicos tienen una relación directa con su manufactura y uso.

8.1. Vidrio (Arena Sílica)

El vidrio apenas era un producto importante de un edificio hasta fines del siglo dieciocho, cuando las mejoras en las técnicas de recubrimiento permitieron la producción de hojas de un tamaño regular adecuadas para ventanas. Las láminas muy grandes para vidrio son ahora producidas enrollando y estirando, o haciéndolo flotar en metal fundido. El otro uso de construcción es la fibra de vidrio, que es usada por sí misma para aislamiento e incorporada en un cuerpo de resina como fibra de vidrio.

La composición química del vidrio de ventana yace dentro de los siguientes límites: SiO_2 , 70-74%; Na_2O , 12-16%; CaO , 5-11%; MgO , 1-3%; Al_2O_3 , 1-3%. El elemento esencial es la sílice, que puede ser fusionado al vidrio por sí solo, aunque una temperatura en exceso a 1700°C es requerida. El sodio es introducido para bajar la temperatura de fusión; con las proporciones arriba mencionadas, una temperatura de fundición de alrededor de 1200°C es requerida.

La adición de cantidades mayores de soda produce vidrio acuoso soluble en agua. Sin el calcio, magnesio y aluminio; el vidrio puede ser inestable y débil.

La principal impureza a evitarse es el hierro. Cantidades diminutas de éste darían un color verde al vidrio; cantidades más grandes, lo harían café. Para un vidrio claro, lo máximo tolerado es 0.18% de Fe_2O_3 , y menos de 0.1% es preferido. Para la fibra de vidrio, contenidos de Fe_2O_3 marginalmente más altos a 0.3% son aceptados. Ya que los minerales de hierro son casi ubicuos por naturaleza, este requisito restringe severamente los depósitos minerales que pueden ser usados para hacer vidrio.

La arena usada para hacer vidrio es usualmente un agregado natural, denominada arena sílica, aunque raramente se utiliza roca triturada. La arena sílica es el material comprendido en el rango granulométrico de 1/16 a 2 mm, pero cuya composición química la constituye íntegramente el cuarzo (Bióxido de silicio, SiO_2). El cuarzo (SiO_2) es el principal constituyente de las arenas de sílice y procede de rocas ricas en sílice, tanto intrusivas como extrusivas (granito y riolitas, respectivamente) y de las sedimentarias areniscas. Es por causa de su estabilidad química y física el mineral detrítico más abundante, y entre otros minerales casi el único que constituye un compuesto químico puro, ya que su composición suele ser 100% de SiO_2 (46.7% de Si y 53.3% de O_2). Los depósitos de arena sílica se originan por la erosión gradual de rocas del tipo de areniscas, cuarcitas, granitos y riolitas, en donde la composición de sílice libre es abundante. Hay especificaciones muy cerradas sobre la distribución del tamaño del grano, de la mineralogía y de la pureza química.

La distribución del tamaño del grano es crítica para el proceso de fundición, y necesita un control cuidadoso para asegurarse de que la fusión sea pareja y para evitar burbujas y “piedras” (es decir, áreas en donde el vidrio se fundió pobremente). Las especificaciones han tendido a volverse más cerradas en tanto las demandas de la tecnología del vidrio aumentan; son muy precisas en excluir tanto gruesos (no más de 0.25% retenidos en un tamiz No. 30 de 600 μ m -0.60 mm-) y finos (nada pasa un tamiz No. 200 de 74 μ m -0.074 mm-). La calificación del rango medio de los tamaños no está definida, pero necesita ser pareja. Las especificaciones anteriores comparadas con las características de tamaño de las arenas naturales, indica que pocas arenas naturales tienen calificaciones que yacen exactamente dentro de éstos límites, de tal manera que la arena puede lavarse (usualmente con un hidrolizador) para proveer esta calificación. Otra limitación adicional referente al tamaño menor, es el requisito de que el contenido de aluminio debe permanecer bajo 1.4%, ya que el aluminio en la mayoría de arenas no feldespáticas se encuentra en la fracción de la arcilla.

La arena ideal para vidrio consistiría del 100% de granos de cuarzo, pero dicha arena no ocurre en la naturaleza. Los límites de aluminio definidos tan cerradamente excluyen a cualquier arena feldespática. La demanda del contenido bajo de hierro significó que todos los minerales que contienen hierro debían ser eliminados. Otro grupo de minerales no deseados son los minerales refractarios; de éstos, cromita y espinel cromado (especie de rubí) son vistos como los más objetables; pero la turmalina, estaurolita, monacita, circón, etc., todos los minerales pesados comunes de rocas sedimentarias, todos tienen puntos de fundición más altos que la sílice y, por tanto, crean fundiciones no parejas en el vidrio. El tamaño de estas partículas es muy importante; mientras la industria tolerará 1640 partículas por tonelada en el nivel de paso de 212 μ m, y sólo permitirá 20 partículas por tonelada si éstas exceden las 250 μ m, y ninguna del todo en exceso a 355 μ m.

Estas cifras son extremadamente bajas, representando 0.0000004% de la arena, y son una limitación severa en la industria de la producción.

La ocurrencia de arena totalmente libre de hierro requiere condiciones geológicas muy especiales, de tal manera que todas las arenas necesitan ser procesadas. Lavar e hidrolizar extraerá un poco de hierro, si está finamente dividido. Frecuentemente los granos de arena tienen filmes adheridos de arcilla y coberturas de mineral de hierro, y esto puede ser removido por fregar por rozadura o colisión. Otras capas más fuertemente adheridas y algunos granos de minerales pueden ser removidos por lixiviación ácida, usando ya sea ácido hidroc্লórico caliente o frío. Finalmente, la separación magnética, ya sea mojada o seca, puede ser usada para quitar granos del mineral de hierro.

Con la excepción de algunas muy pequeñas explotaciones de cuarzo en vena, todas las arenas que sirven para hacer vidrio son de origen sedimentario. Los minerales de hierro son tan comunes, que las circunstancias en las que se forma arena libre de hierro son extremadamente inusuales. Es útil distinguir dos categorías: aquellas arenas que fueron depositadas en forma libre de hierro, y aquéllas que contienen hierro, que fue subsecuentemente removido.

El ambiente deposicional para la primera categoría debe ser una en la que el área de la fuente es granítica o gneisosa (para proveer cuarzo) y está sujeta a desgaste químico (para reducir los silicatos de la arcilla); el ambiente deposicional debe ser tal que las arcillas ricas en hierro son luego removidas por selección muy eficiente.

Muchas más arenas para vidrio son depósitos que anteriormente contenían hierro; el principal agente en su remoción fue la percolación en dirección hacia abajo del agua, particularmente si el agua acidificada por crecimiento y descomposición de vegetación.

De eso sigue que, como las condiciones para formaciones de arena para vidrio son usualmente locales y especiales, las variaciones dentro de dichos depósitos ocurren; esto se aplica particularmente donde el bajo contenido de hierro es debido a la lixiviación local. Es común, entonces, dedicar sólo parte de la producción de la arena para arena de vidrio y vender los grados inferiores para fundición o arena de construcción.

El contenido de sodio para el vidrio se le provee casi enteramente por la adición de carbonato de sodio, natural o artificial. Éste ocurre naturalmente como el mineral trona ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), lo que requiere sólo calcinación para convertirlo en arena de soda anhidra. Estas arenas son depósitos evaporíticos, que normalmente, contienen sodio como hálito clórico y se necesitan de condiciones especiales para que se forme la trona. Estas condiciones incluyen actividad volcánica intensa (para proveer sodio y dióxido de carbono) y mucha vegetación en descomposición. El carbonato de sodio puede ser extraído de la salmuera (agua salada).

La mayoría de la ceniza de soda usada en la industria es producida por el proceso Solvay, en el que la sal de la roca y la piedra caliza son calcinadas juntas como un amonio catalizador para producir ceniza de soda y hálito clórico. Ya sea natural o artificial, la ceniza de soda se produce como un producto químico puro cuya adición a la mezcla del vidrio puede ser fácilmente controlada.

Los otros elementos que se necesitan para el vidrio construccional son el aluminio, el calcio y el magnesio. Una variedad de otros minerales son añadidos a otros vidrios para otros propósitos; como: plomo para vidrio para cristal, boro para vidrio resistente al calor, etc.

La mayoría de las arenas para vidrio contienen aluminio, y los fabricantes aceptarán hasta 1.4% en la arena. Es muy importante que el contenido de aluminio no varíe, y hay una especificación adicional que la media no deba exceder $\pm 0.15\%$. Ya que hasta 3% del aluminio se requiere en este producto, éste debe ser añadido, tomando en cuenta de no agregar más hierro al mismo tiempo. Minerales favorecidos, que pueden ser obtenidos en forma muy pura, son la caolinita, el feldespato y la sienita nefelina.

Las piedras calizas pueden introducir calcio. Las condiciones bajo las cuales la piedra caliza se ha formado fueron generalmente en mares tropicales claros, en los que el único sedimento fue proveído por los esqueletos de organismos y por la precipitación química. Así que las piedras calizas químicamente puras no son tan raras en todos los niveles de la columna estratigráfica. La piedra caliza mesozoica y el yeso son los proveedores principales de piedra caliza pura adecuada para hacer vidrio.

Encontrar una dolomita apropiada es menos fácil. La dolomita, que es un carbonato doble de magnesio y calcio, puede ser usada para proveer tanto estos elementos si un depósito libre de hierro puede ser encontrado. Desafortunadamente, la dolomita forma una serie de solución sólida con compuestos de hierro para producir minerales como ankerita, que ocurren comúnmente a lo largo de éste, y que no pueden ser fácilmente separados. Las dolomitas puras son raras de encontrarlas.

La industria también usa magnesita como una fuente de magnesio; ésta puede ser encontrada asociada con el vulcanismo ultrabásico, o puede ser manufacturada de la dolomita y del agua marina.

8.2. Yeso

El yeso puro es un mineral blanco, pero debido a impurezas puede tornarse gris, castaño o rosado. Se denomina sulfato de calcio dihidratado y su estructura cristalina esta constituida por dos moléculas de agua y por una de sulfato de calcio, de fórmula química: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. El sulfato de calcio dihidratado, ocurre en la naturaleza en tres formas: como una forma cristalina clara, selenita; como una forma masiva, alabastro; y como una forma masiva fibrosa, yeso. La forma anhidra, anhidrita (CaSO_4), ocurre en asociación con el yeso, en presencia de la humedad.

El alabastro ha tenido una larga historia de uso como piedra ornamental; es mucho más suave que el mármol y, por ello, es más fácil de esculpir; pero su suavidad lo hace inadecuado para su uso como azulejos para piso o cualquier lugar donde hay un uso substancial. Es también difícil de obtener bloques grandes sin fallas, siendo frecuente encontrar pequeñas venas y fragmentos de marga. Ocurre como facies (conjunto de caracteres que definen una roca, grupo de rocas o un depósito) locales en depósitos de yeso y se encuentra en pequeñas cantidades cuando lo hace.

El yeso es la forma más común de ocurrencia y la única con significado para propósitos de construcción. Cuando se le calienta a 107°C , pierde tres cuartos de su agua, convirtiéndose en hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), yeso de París. Éste puede ser mezclado posteriormente con agua y ya sea por sí solo o combinado con un agregado fino, usado para interpretaciones artísticas en paredes y techos.

La velocidad de la hidratación es muy rápida, así que usualmente se añaden una variedad de químicos orgánicos para retardar el tiempo en que se asienta. En años recientes, el consumo más grande de hemihidrato ha sido en la producción de tablas de pared, para tabique o mural, en el que el yeso hidratado es comprimido entre dos capas de papel pesado; esto es usado principalmente para cubrir las superficies internas de edificaciones, proveyendo una base lisa y rígida en el que una interpretación artística o enlucido puede ser aplicada.

El yeso ocurre generalmente como venas y filones en depósitos arcillosos, del que es extraído por medio de un trabajo de cantera selectivo. Tiene generalmente un color blanco puro, así que es fácilmente separable de la matriz oscura; las únicas impurezas son fragmentos arcillosos. Es más difícil cuando está presente en anhidrita, ya que ésta es casi imposible de distinguir visualmente del yeso cristalino. Por supuesto que no se deshidrata y no toma parte en el proceso de rehidratación, por lo que su presencia puede reducir la calidad del yeso. El yeso es invariablemente de origen sedimentario, ocurriendo como uno de los muchos minerales evaporitos que se originan ya sea por evaporación de lagos salinos o por la interacción de agua subterránea y salina en sus márgenes. En consecuencia, ocurre entre las capas de sedimentos de aguas someras, margas y arenas, y con otros evaporitos. Fue probablemente depositado originalmente como anhidrato, pero éste rápidamente se convirtió en yeso, el cambio de volumen asociado produce frecuentemente estructuras complejas en sedimentos adyacentes. Es, sin embargo, moderadamente soluble en el agua, y es únicamente preservado en o cerca de la superficie, donde no ha sido expuesto a percolación extensiva de aguas subterráneas, es decir, donde la producción en regiones donde la precipitación es baja o donde ha sido protegido por la inclusión interna de secuencias impermeables.

El yeso es uno de los minerales mas ampliamente utilizados en el mundo, existiendo actualmente una amplia gama de aplicaciones; pero específicamente en la:

- **Construcción:** Debido a sus excelentes propiedades bioclimáticas, de aislamiento y regulación higrométrica, mecánicas y estéticas se utiliza en guarnecidos, enlucidos, prefabricados y relieves arquitectónicos, proporcionando bienestar y comodidad. Esencial como agente retardante en la producción de cemento.

En cuanto a sus propiedades y beneficios, el yeso es:

- **Producto natural y ecológico:** El yeso se obtiene a partir del mineral sulfato de calcio dihidratado que se encuentra abundantemente en la naturaleza. Es no tóxico, respetuoso con el medio ambiente y sus residuos son biodegradables.
- **Regulación higrométrica:** Por sus excelentes cualidades higrométricas el yeso es el más eficaz y natural regulador de la humedad ambiental en los interiores de las edificaciones. Absorbe humedad excesiva y la libera cuando hay sequedad.
- **Aislamiento térmico:** La utilización del yeso en los revestimientos interiores de las edificaciones puede aumentar en un 35% la capacidad de aislamiento térmico frente a construcciones no revestidas.
- **Absorción acústica:** Debido a su elasticidad y estructura finamente porosa, el yeso ofrece una excelente capacidad de insonorización, disminuyendo ecos y reverberaciones, y mejorando las condiciones acústicas de las edificaciones.

- **Protección contra el fuego:** El yeso es completamente incombustible y resistente al fuego. Al exponerse al calor se produce una gradual liberación del agua de cristalización en forma de vapor que retrasa la elevación de temperatura absorbiendo el calor, sin emanar gases tóxicos que son la principal causa de accidentes fatales en la mayoría de incendios.
- **Compatibilidad decorativa:** El yeso, debido a su excelente plasticidad y moldeo, posee infinidad de posibilidades de decoración. Es compatible con casi todos los elementos de decoración: papel, tapiz, madera, pintura, texturizados, etc.
- **Blancura:** La blancura natural del yeso conforma el soporte más adecuado para aplicarle cualquier tipo de acabado posterior, tanto en blanco como en otros colores.
- **Facilidad de trabajo:** El yeso en estado plástico es muy manejable, modelable y liviano, y se adhiere fácilmente a las superficies.
- **Durabilidad:** El yeso, una vez formada la red cristalina en el fraguado, es estable en el tiempo e inalterable ante las variaciones ambientales.

8.3. Aislantes y agregados livianos

Hay un sin número de minerales que pueden ser usados para mejorar el aislamiento de ruido y calor en ambientes de los edificios; aunque no se relacionan geológicamente, tienen en común una textura abierta que puede atrapar aire y consecuentemente bajar gravedad específica.

Pueden ser usados por sí mismos como un relleno flojo, como entre las vigas de un techo de casa, o pueden ser incorporados con cemento a un bloque de bajo peso.

La **piedra pómez** es el producto de erupciones volcánicas explosivas. Dichas erupciones ocurren donde la lava volcánica es silíceo y, por ende, viscosa y hay mucha agua y aire atrapados. La repentina liberación de presión causa una rápida expansión, creando una masa espumosa llena de burbujas. Ésta se enfría rápidamente en el aire, produciendo una roca completa de peso liviano con vesículas no conectadas. Asociada con ésta, las partículas más pequeñas forman una ceniza volcánica de fragmentos vidriosos, conocidos como **pumicita**. Moldeada con cemento y curada lentamente, estos materiales producen un bloque de peso liviano con buenas propiedades de aislamiento, pero de fuerza relativamente baja.

Mientras que la pumicita puede ser encontrada en rocas de muchas diferentes edades geológicas, aquéllas que pertenecen a períodos más viejos generalmente tienen sus vesículas llenas con materiales minerales, y no tienen gravedad específica baja, lo que tiene un valor esencial. Todos los depósitos económicos de pumicita se localizan en áreas de actividad volcánica muy reciente.

Los productos explosivos de los volcanes, cuyos productos rocosos son de una composición más básica son conocidos como **escoria**; no son tan livianos como la pumicita y son más oscuros en color. Pueden ser usados como materiales para base de caminos menores. Cuando se le incorpora con cemento da un bloque de peso liviano, con buena calidad de aislamiento y produce un bloque más fuerte, con fuerzas compresivas de hasta 20 MPa y se les comparan con un máximo de 10 MPa para bloques hecho con pómez.

También de origen volcánico, es el material conocido como **perlita**. Hablando estrictamente, el término perlita se refiere a la textura encontrada en el vidrio volcánico, donde el vidrio puede ser visto roto por un sin-número de rajaduras curvas y esféricas. La perlita comercial, es el nombre dado a un vidrio volcánico que puede convertirse en un agregado expandido. El vidrio debe ser riolítico, es decir, altamente silíceo, y debe contener entre 2% y 5% de agua. Se le muele en gránulos y se le calienta hasta alrededor de 1100°C, en donde se expande hasta casi 20 veces su volumen original. Como la pómez, la perlita sólo ocurre en rocas muy jóvenes, ya que el vidrio volcánico tiende a vitrificarse con la edad y los ejemplos más antiguos son del Oligoceno. Las perlitas ocurren principalmente en los márgenes sosegados de domos de lava altamente silícea.

Mientras la pómez y la perlita se derivan de las rocas volcánicas ácidas, la **vermiculita** se asocia con rocas ultramáficas, pero aparentemente sólo cuando dichas rocas han sido invadidas por intrusiones tardías ricas en sílice. Cuando dichos complejos están altamente gastados por el clima, sus minerales ferromagnésicos se convierten en minerales similares a la mica. Es probable que más de una especie de mineral esté involucrada; pero todos tienen una estructura como de lámina que incluye una capa interna de agua. Cuando se le calienta rápidamente hasta 800°C, la capa interna de agua se expande explosivamente, formando un producto granular de baja densidad. Ya que las condiciones de su formación son tan precisas, las localidades en las que ocurre la vermiculita son limitadas.

Los agregados producidos de arcilla expandida, con pómez, perlita y vermiculita forman hoy el volumen más grande de agregados de peso liviano usados en la industria de la construcción. Hay muchas otras variantes, minerales naturales como diatomita y ciertas zeolitas; minerales procesados como micas expandidas; y productos enteramente artificiales como coenosferos y pfa expandido.

La ventaja de su livianidad no es sólo que los hace más fácil de manejar, sino que también reduce el peso de estructuras grandes en sus cimientos. Esto se combina con mejor aislamiento acústico y térmico que proporcionan. Mientras aumenta la presión en la oferta de agregados convencionales, la industria puede voltearse más y más a estos nuevos materiales. Aún tenemos mucho que aprender acerca de los constituyentes convencionales de nuestros edificios; estos nuevos presentan un nuevo desafío para nuestro entendimiento. (Calvo, 2000 y Riv)

CONCLUSIONES

1. Con el conocimiento de la geología de la república de Guatemala, se pretende que el futuro profesional y el profesional activo en la ingeniería civil, tenga una idea general de los lugares de la república en donde se puedan encontrar los materiales de construcción básicos, necesarios en el desarrollo de la construcción civil.
3. Previo al uso de la roca o piedra natural, ya sea en bloques de dimensiones requeridas o como agregados para concreto, se les realizan los estudios necesarios de la investigación minera, como también la calidad y el uso adecuado de los mismos, y sobre todo, para que el proyecto sea económicamente viable; entonces, se inicia la extracción de los materiales de construcción en canteras a cielo abierto (o perforaciones profundas para materiales especiales), por lo que estos materiales han venido a ocupar un lugar primario en la construcción de edificios de gran tamaño y prestigio; es por ello, que la industria de la construcción continuará dependiendo de las rocas y minerales para satisfacer sus necesidades básicas.
3. La roca dimensional aserrada o en bruto debe poseer características tales como: fuerza estructural, presentación atractiva, acabados finos, facilidad de extracción, durabilidad, etc., que son las deseables para obtener bloques grandes, convirtiéndolos a losas delgadas, a utilizarse en coberturas ornamentales (fachadas) de edificios, baldosas para pisos, blindajes de construcción como defensa en las costas marinas por la acción del mar, rompe-olas, etc., para que el desempeño de ésta sea satisfactorio en condiciones de servicio; además prestarle especial

atención al lugar geográfico donde ocurra su extracción, para que no se eleve demasiado el costo de transporte y tallado para su inmediata comercialización.

4. La formación de los depósitos de agregados gruesos (gravas) y agregados finos (arenas), por lo regular ocurren en situaciones geológicas similares; pero existen ciertas circunstancias que hay que considerar en la distribución del tamaño del agregado al momento de formarse los depósitos; como los medios de transporte naturales, en los que se producen procesos de erosión, trituración y molimiento de los distintos diámetros de fragmentos de roca transportados y su posterior depositación o por el grado avanzado del proceso del desgaste químico imperante en el área, para luego realizar el análisis a que tipo de depósito de agregado corresponde.

5. La extracción de la arcilla se realiza casi universalmente mediante el método de excavación a cielo abierto, utilizando métodos mecánicos o manuales, pues el bajo costo del producto no puede absorber los altos costos de la minería a profundidad. Las arcillas que son utilizadas para producir ladrillos, usualmente son mezclas de no más de cuatro minerales de arcilla, los cuales son: caolinita (carbonación de la ortoclasa -feldespato potásico-sódico-), illita (hidratación de las micas -mica arcillosa-), la esméctica -montmorillonita- (a la cual pertenecen las bentonitas) y la clorita. Estos minerales de arcilla provienen de depósitos sedimentarios estratificados, no son uniformes y en cada capa usualmente presentan algún grado de variación; se forman mediante la exposición al clima de los minerales alumino-silicatos; ya que los mismos están presentes prácticamente en cualquier roca (excepto en rocas puramente arenosas y calizas).

6. Los materiales básicos que constituyen la materia prima para la fabricación del cemento Pórtland son la roca caliza y la arcilla; y materiales secundarios como la pizarra (arcillas con óxidos de silicio, aluminio, hierro y cantidades variables de calcio), sílice (arenas sílicas), hematita (óxidos de hierro), puzolana (ceniza volcánica o toba volcánica) y yeso (retardante para el fraguado del cemento), estos últimos son utilizados eventualmente según necesidades mineralógicas, los cuales deben ser mezclados y molidos finamente, dosificados cuidadosamente debido al contenido mineralógico de los mismos, para obtener las cantidades deseadas de cal, sílice, óxido de aluminio y óxido férrico, para luego continuar con su proceso de calcinación a temperaturas de 1,400 °C a 1,600 °C, para obtener un cemento de alta calidad para el uso general en la construcción.

7. La arena sílica, yeso y pumicita son los materiales de construcción menores, utilizados en la fabricación de vidrio para ventanas, como aislantes, enlucidos de interiores, prefabricados y agregado (arena + cemento = bloque de bajo peso) en la industria de la construcción; geológicamente, la relación entre ellos es poca, pero tienen una relación directa en su manufactura y uso.

8. Las características generales que debe reunir la extracción de rocas y minerales para el uso en la construcción civil, depende del tipo de depósito; si este es no consolidado como: arena, grava, rocas fracturadas, etc., la extracción se realiza en pozos a cielo abierto en forma mecanizada (con retroexcavadora, cargador frontal, camiones de volteo, etc.); y manual (con piochas, palas, barretas, camiones de carga, etc.); y cuando es consolidado, como una masa rocosa, se hace necesario realizar perforaciones, para utilizar explosivos y obtener roca fracturada o taladrar hoyos a determinada distancia para introducir hilos helicoidales

diamantados para obtener bloques de rocas de varias dimensiones para uso ornamental. Esta actividad de extracción debe ser previamente planificada y desarrollada en forma técnica y racional, y no desordenadamente.

- 9). En todo proyecto en donde se realice actividades de extracción de rocas y minerales para la construcción, como: caliza, mármol, arena pómez o de río, etc., se debe realizar el estudio de impacto ambiental, en el cual se evalúan los impactos temporales, definitivos o permanentes al medio ambiente y se establezcan las medidas de mitigación para minimizar los daños al paisaje y restaurar el área trabajada, rigiéndose a los métodos, diseños y normas ingenieriles que las instituciones gubernamentales ordenan para este campo, considerándolos los más adecuados y que son las instituciones encargadas de legislar y supervisar este tipo de actividades.

RECOMENDACIONES

1. Se hace necesario motivar a los profesionales en geología, a que realicen actividades exploratorias orientadas a descubrir nuevas fuentes de materiales de construcción de buena calidad, como una cooperación para que los ingenieros civiles, en el ejercicio de su profesión se abastezcan y hagan uso de ellos en obras por realizarse y que éstas sean de la mejor categoría.
2. La extracción de los minerales y rocas industriales, constituyen los elementos básicos requeridos en la demanda de la industria de la construcción civil; actividad muy diversa, desarrollada en su mayoría a cielo abierto y por lo regular es conducida cuidadosamente; pero a menudo es ambientalmente inaceptada por las molestias ocasionadas alrededor del área de trabajo; por lo que se debe tener un adecuado control ambiental en el manejo de la cantera, elaborando sistemas de control planificados para disminuir estas molestias surgidas por el desarrollo de esta actividad y su posterior restauración al área trabajada, para que de cierta forma se minimice el impacto severo de que es objeto el paisaje.
3. Para la extracción de la roca dimensional, conocida como aquella que es cortada y tallada en piedras de varias dimensiones y formas diferentes, la industria de esta roca se debe concentrar en aquellas áreas, donde las condiciones geológicas operan favorablemente para la obtención del material, y que estén tan libre de imperfecciones como sea posible y que la selección del método de extracción sea el más adecuado, para minimizar los costos de su extracción.

4. Para la utilización del agregado grueso (grava) es conveniente realizar un estudio petrográfico detallado de la roca, para conocer sus propiedades fundamentales, principalmente una resistencia adecuada a la falla o la deformación excesiva, por las diversas presiones a que está sometida en su uso, como en edificios, carreteras, puentes, etc., y de esta forma se prediga un comportamiento satisfactorio en su servicio y que reaccione favorablemente en el concreto y bitumen en el cual se incrusta y que sea duradera en las condiciones ambientales del lugar en que se coloca.

Y para el agregado fino (arena), realizarle un análisis mineralógico, para determinar el porcentaje de minerales duros o suaves que prevalecen, para decidir su utilización y que no debiliten la fortaleza, calidad y durabilidad de la mezcla de concreto, ya que está sometida a condiciones similares como del agregado grueso y que responda eficazmente para prevenir desastres futuros a la hora de su serviciabilidad.

5. Para evitarse problemas serios en la fabricación de ladrillos cocidos, hay que realizarle previamente un análisis químico a la materia prima (arcillas), para conocer qué minerales contiene y el comportamiento de éstos bajo el fuego, que vendrán a determinar las propiedades del proceso de quemado. Porque si su mineralogía contiene una variedad de minerales de diferentes orígenes y en proporciones diversas, cada mineral reaccionará en manera distinta, creando minerales secundarios que se formarán por el grado de temperatura utilizada; por ello, el programa de fuego para el proceso de quemado de ladrillos debe ser cuidadosamente ajustado al contenido barro-mineral de la materia prima, para obtener cambios mineralógicos beneficiosos (formación de nuevos minerales) que coadyuven en el proceso; y así obtener una producción de ladrillos con la fortaleza, durabilidad y apariencia requerida de la manera más económica.

6. Los materiales que serán utilizados en la fabricación del cemento Pórtland, deben ser analizados químicamente y con un control minucioso en su dosificación, para que cuando se realice la mezcla de cemento y el agregado que fue cuidadosamente seleccionado, se eviten materiales reactivos en el concreto, cuando los procesos de hidratación (curado) y endurecimiento (fraguado) ya han sido completados, y los fluidos residuales altamente alcalinos, por efecto de la reacción química con sílice, silicatos y carbonato, estos no sean muy dañinos en la masa de concreto y provoquen severas micro-rajaduras por la expansión de los materiales y rajaduras grandes inducidas por la oxidación del refuerzo y la posterior destrucción de la estructura.

7. Los materiales de construcción más comunes que se deben utilizar como aislantes acústicos es la piedra pómez, por sus vesículas que atrapan aire o incorporándola como relleno flojo dentro de los muros; y como aislante térmico el yeso, que por su capacidad higrométrica, de absorber humedad cuando es excesiva en los ambientes de las construcciones y liberarla cuando existe mucho calor, refrescando de esta forma el ambiente, utilizándolo también en forma de enlucidos en las paredes de los ambientes internos.

BIBLIOGRAFÍA

1. C.E.S.E.M. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Sinopsis geológica de Guatemala.
2. Calvo Pérez, Benjamín y otros. Minerales y rocas industriales. Curso de pos-grado. Madrid, España. 2000.
3. Crespo Villalaz, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. México: Editorial Limusa. 1995.
4. Dirección General de Minería e Hidrocarburos, Ministerio de Economía. Nómima de muestras de minerales de Guatemala. Tipografía Nacional de Guatemala. 1965.
5. Duque-Escobar, Gonzalo. Manual de geología para ingenieros. <http://www.geocities.com/manualgeo>
6. García Romero, Emilia y Suárez Barrios, Mercedes. Las arcillas (Propiedades y usos). <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm>
7. Higuera Higuera, Pablo y otros. Yacimientos minerales. <http://www.uclm.es/user/higueras/IndiceYM.html>
8. LCH. Los constituyentes del hormigón. <http://www.contruaprende.com>
9. M. Pearl, Richard. Geología. 3ª ed. (Serie de Compendios Científicos “El Tutor del Estudiante”). México: Editorial C.E.C.S.A. S.A. 1971.
10. Merrit, Frederick S. y otros. Manual del ingeniero civil. 14ª ed. (3 Tomos). México: Editorial McGraw-Hill. 1999.

11. Prentice, John E. Geology of construction materials. London. Chapman an Hall. 1990.
12. Riv. Rocas industriales de Venezuela. <http://www.siam.ingo.ve/rocas>
13. U.A.N.L. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Técnicas. Unidad Linares. Geología de yacimientos minerales -Métodos de cubicación de reservas-. 1987.
14. Vera Terceros, Omar. Geología. <http://www.monografias.com>
15. W. Griem y S. Griem-Klee. Apuntes de geología general. <http://www.udac.cl/minas/apuntes/geología>
16. W. H. Langer y D. H. Knepper Jr. Caracterización geológica del agregado natural. Una guía al geólogo de campo a la evaluación del recurso de agregado natural. Denver, Estados Unidos. 1995.