



Las rocas como materiales para hormigón

Maiza, Pedro José ^{1,2} - Marfil, Silvina Andrea ^{1,3} ✉

Recibido: 10 de Agosto de 2008 • Aceptado: 17 de Julio de 2009

Resumen

Se consideran los principales minerales y rocas de la corteza terrestre, que son utilizados con frecuencia como agregados para hormigón. Para tal fin, puede calificarse a las rocas como: graníticas (ígneas y metamórficas granudas), volcánicas y sedimentarias (litificadas), a las que deben agregarse conglomerados, arenas, limos y arcillas (inconsolidados). Dentro de esta simplificación han quedado excluidas la mayoría de las rocas metamórficas, especialmente aquellas que presentan fisilidad (pizarras), esquistocidad (esquistos en general) y texturas de mortero (cataclasitas). Todas ellas deben ser tratadas con rigurosidad por las características físicas, mineralógicas y texturales que definirán comportamientos específicos muchos de los cuales serán perjudiciales si se incorporan al hormigón.

Muchas de las partículas que constituyen los agregados pétreos están recubiertas parcial o totalmente por la precipitación de carbonatos, sílice, material arcilloso/limoso, materia orgánica, sulfatos o por otros sedimentos los que dificultan seriamente su determinación. Aún con ayuda de estereomicroscopio, sólo podrá observarse la superficie externa cubierta y no se identificará la composición litológica de la partícula. Si está recubriendo una roca granítica o cuarzo no ocasionará inconvenientes, pero si enmascaran terrones blandos, arcillosos, vidrio volcánico, calcedonia o areniscas opalizadas será un problema serio.

Los yacimientos de origen fluvial, glacioluvial o marino costero, presentan composición litológica muy variada. Los componentes líticos de gravas y arena pueden estar enmascarados superficialmente por sílice criptocristalina o por óxidos de hierro asociados con sílice, tornándolos potencialmente reactivos frente a los álcalis lo que podrá ocasionar reacciones deletéreas en el hormigón que tiendan a disminuir sus prestaciones durante la vida útil de la obra.

Palabras clave: Agregados, hormigón, minerales, rocas.

Abstract

The main minerals and rocks of the earth's crust that are frequently used as aggregates for concrete will be considered in this work. For this purpose, rocks can be classified as granitic (grainy igneous and metamorphic) rocks, volcanic and sedimentary (lithified) rocks, as well as conglomerates, sands, silts and clays (non-consolidated). The great part of metamorphic rocks have been excluded from this simplification, in particular those presenting fissility (shales), schistosity (schists in general) and mortar textures (cataclasites). They must be all rigorously treated since their physical, mineralogical and textural characteristics will define specific behaviors that would be damaging if they are added to concrete.

Mención Especial del Premio Horacio V. Rimoldi - 2009

1 Dpto. de Geología. Universidad Nacional del Sur.
San Juan 670. 8000 Bahía Blanca. Tel.: 0291-4595184.
Fax: 0291-4595148

✉ E-mail: smarfil@uns.edu.ar

2. Investigador Principal CONICET.

3. Investigador Independiente CIC.

Many of the particles making part of the rock aggregates are partially or totally covered by the deposition of carbonates, silica, clay/siltstone material, organic material, sulphates or by other sediments that makes difficult their determination. Even using a stereomicroscope only the external covered surface will be observed and the lithological composition of the particles will not be identified. If granitic rock or quartz are covered

there will be no problem, but if soft clods, clay clods, volcanic glass, calcedonie or opalized sandstone are hidden there will be a serious problem. Deposits from river, glacial river or marine coastal origin show lithological composition highly varied. Lithic compounds of gravel and sand can be masked in the surface by cryptocrystalline silica or by iron oxide associated with silica, making them potentially reactive in the alkali presence what can cause deleterious reactions in concrete tending to decrease their features during the lifetime of the construction.

Keywords: *Aggregates, concrete, minerals, rocks.*

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de los agregados, rocas que composicional y texturalmente pueden considerarse semejantes, la acción de procesos termodinámicos conduce a la deformación de las estructuras de sus componentes y modifican totalmente su comportamiento.

El cuarzo es un mineral inocuo, pero si está deformado (desarrollo de extinción ondulante) se comportará como un mineral reactivo dependiendo del grado del tectonismo que lo afectó, y si estas condiciones se intensifican y culminan con un microfracturamiento llegando a la policristalinidad, cambiará hasta la superficie específica del mineral original y se comportará como una especie deletérea.

Al evaluar una roca debe considerarse su nivel de alteración ya que dependiendo de éste sus posibilidades de reaccionar son totalmente distintas.

La adecuada identificación de los minerales y rocas constituyentes de los agregados es de vital importancia para predecir su comportamiento en servicio.

Además de la composición hay que considerar su estabilidad en un medio fuertemente agresivo como puede ser el hormigón de cemento portland. Otro factor a tener en cuenta es el grado de exposición y humedad a la que estará sometida la obra.

Se debe identificar la presencia de componentes fácilmente lixiviables que pueden disminuir la compacidad de las rocas, producir reacciones químicas, desarrollar alta capacidad de intercambio catiónico y/o de absorción de agua provocando un aumento de volumen, presencia de minerales muy blandos, friables, con marcados planos de clivaje o exfoliación que afecten las propiedades físico-mecánicas y la presencia de crustificaciones superficiales que modifiquen la adherencia con la matrix.

MATERIALES

A continuación se dará una breve descripción de algunos de los minerales y rocas más frecuentes. Estos se encuentran en los agregados gruesos (canto rodado y piedra partida) como parte de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas y a medida que el tamaño de grano disminuye aparecen como minerales individuales en especial en las arenas. (*Dana and Dana 1951; Winchell 1933; ASTM C-294 1981; Chang, et al. 1998; Corneils and Hurlbut 1993*).

MÉTODOS

Se utilizó microscopía de polarización sobre secciones delgadas. Para ello se trabajó con un microscopio de polarización Olympus, trinocular BH-2, con cámara de video y programas computarizados para el tratamiento de imágenes.

Minerales de sílice

Cuarzo

Es la variedad de sílice más abundante y frecuente. Es un mineral duro, resistente a la meteorización por lo que es un componente muy abundante en las arenas y gravas. Adopta una morfología acorde con las condiciones de erosión, transporte y sedimentación y con la evolución del sedimento. Puede presentarse en granos absolutamente redondeados hasta irregular y anguloso y si es de grano extremadamente fino, adopta factura concoidal. Cuando está bien cristalizado se comporta como inocuo en el hormigón (Figura 1a) mientras que si ha sufrido procesos de deformación se transforma en potencialmente reactivo. En la Figura 1b se muestra clastos de cuarzo de grano fino y con extinción ondulante, como consecuencia de los procesos de deformación que ha sufrido.

Opalo

Es una forma de sílice hidratada. No tiene estructura cristalina definida. Se encuentra con frecuencia en rocas sedimentarias, principalmente en chert, diatomitas y como cemento de areniscas. También es frecuente como mineral secundario rellenando cavidades y fisuras en rocas. Es un material metaestable, especialmente en medio alcalino, y reacciona con los álcalis del cemento. En clastos monominerales, es un constituyente común de arenas, principalmente fluviales, presenta fractura concoidal.

Calcedonia

Es una variedad de sílice fibrosa. Es un material metaestable en medio alcalino. Su presencia es frecuente en chert, franita, jasperoides y otras variedades de sedimentos de origen químico. Se presenta como relleno de cavidades, como reemplazo de fósiles, como material cementante de rocas sedimentarias y en forma masiva. También en calizas y dolomías, como nódulos, lentes y bandas. Aún en bajas proporciones cuando aparece como constituyente de los agregados los transforma en potencialmente reactivos. En la Figura 1c se observa un clasto de calcedonia al microscopio de polarización.

Tridimita y cristobalita

Son variedades de sílice microcristalina. Se encuentran en algunas rocas volcánicas y metamórficas, generalmente en cavidades. Ambas son metaestables a presión y temperatura ordinarias y se comportan como potencialmente deletéreas en hormigón de cemento portland. Estas formas de sílice son comunes en vulcanitas desvitrificadas, en tobas alteradas y en sedimentos cuyos cementos son silíceos. Cuando están más o menos puras tienen fractura irregular - concoidal. Su identificación es difícil aunque imprescindible y debe realizarse con métodos específicos, puesto que las arenas o gravas que las contienen, aún en cantidades ínfimas, serán potencialmente reactivas en el hormigón.

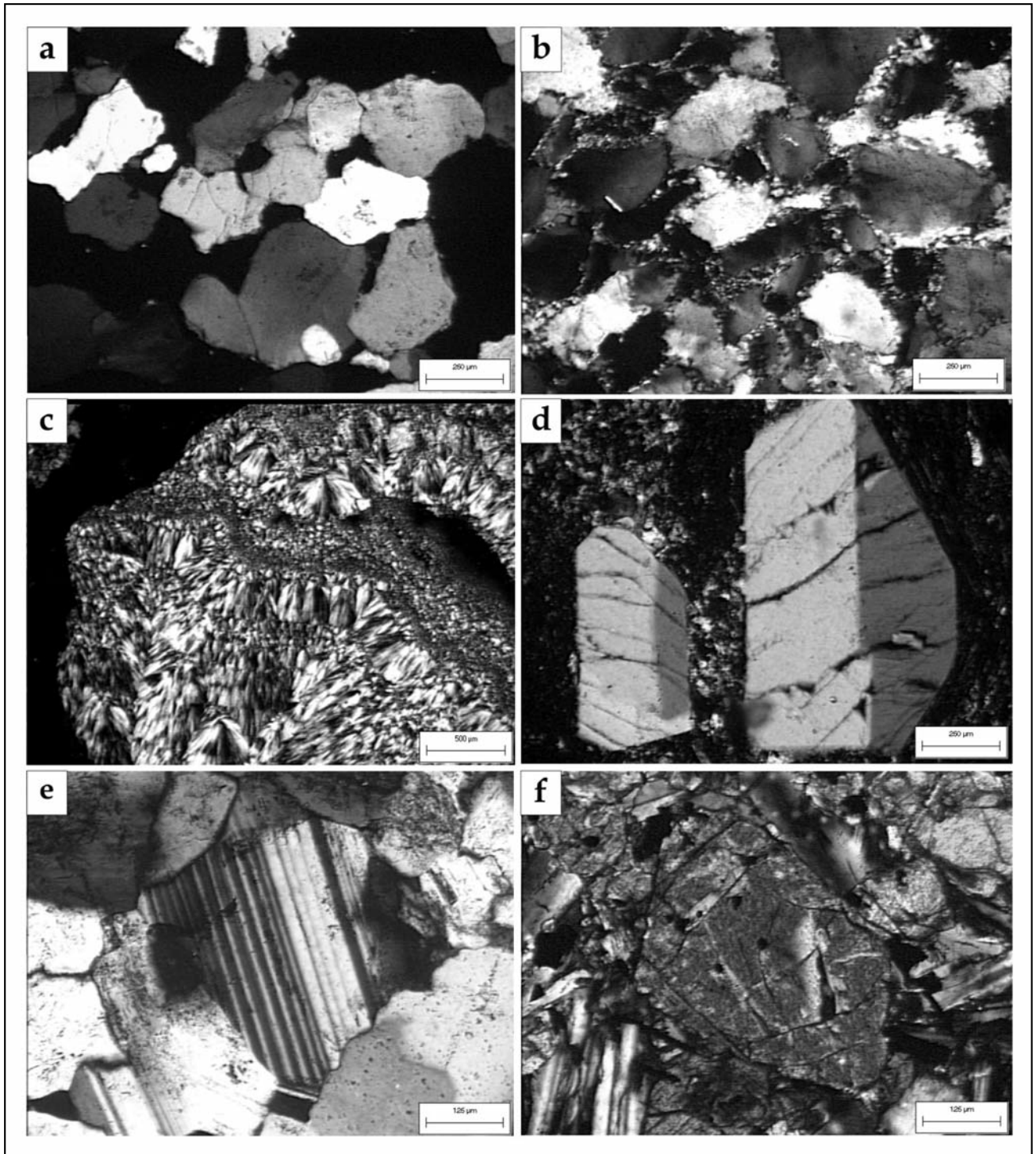


Figura 1. Minerales: a. cuarzo granular grueso. b. granos de cuarzo de grano fino, con extinción ondulante. c. calcedonia. d. feldespato (sanidina). e. feldespato (plagioclasa). f. olivino.

Feldespatos

Constituyen un grupo muy abundante entre los minerales formadores de roca en la corteza terrestre. Se dividen en feldespatos potásicos y plagioclasas, diferenciados por su composición química y cristalográfica. Dentro de los primeros se encuentran ortosa, (Figura 1d), sanidina y microclino. Las plagioclasas (Figura 1e), forman una serie isomorfa entre el extremo sódico (albita) y el cálcico (anortita), con miembros intermedios oligoclasa, andesina, labradorita y bytownita. Son muy estables en medio alcalino y suelen presentarse alterados a minerales arcillosos del

grupo de la illita y/o caolinita, ya que se hidrolizan en medio ácido.

Minerales ferromagnesianos

Olivinos, piroxenos y anfíboles

Tanto las rocas ígneas como metamórficas contienen minerales oscuros o máficos que son generalmente silicatos de hierro y/o magnesio. Estos minerales incluyen el grupo de los olivinos, (Figura 1f) que forman una serie isomorfa entre el extremo de hierro (fayalita) y el de magnesio (forsterita); los

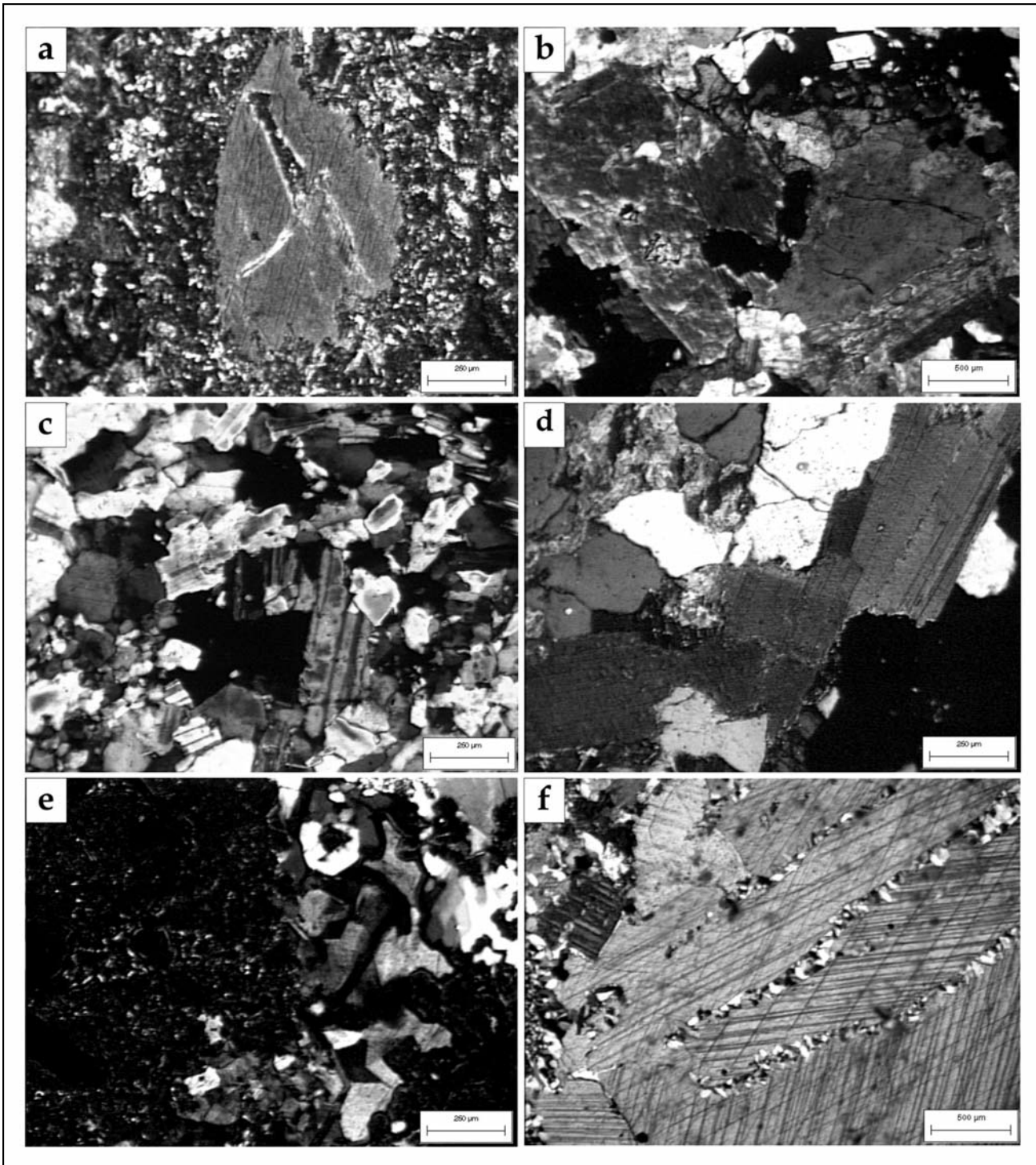


Figura 2. Minerales: a. piroxenos (augita). b. anfíboles (hornblenda). c. micas (moscovita) d. micas (biotita). e. ceolitas (clinoptilolita-heulandita). f. calcita.

piroxenos (el más común es la augita (Figura 2a)) y anfíboles (el más común es la hornblenda (Figura 2b)).

Si bien estos minerales son metaestables en el ambiente exógeno en especial los olivinos, no provocan reacciones deletéreas cuando constituyen agregados para hormigón.

Son muy frecuentes constituyentes de las rocas básicas y ultrabásicas y menos abundantes en las ácidas, sobre todo los

anfíboles y algunos piroxenos. Se los puede encontrar en las arenas, pero debido a la facilidad de disgregación y a la susceptibilidad de meteorización, generalmente no son constituyentes monominerales comunes. Bajo esta forma se los identifica fácilmente por su color (negro, rojizo, verdoso) y sus clivajes característicos.

Micas

Los minerales de este grupo se caracterizan por tener clivaje muy perfecto en una dirección y por lo tanto suelen formar láminas extremadamente finas. Cuando constituyen parte de los agregados pueden presentar problemas precisamente por esa propiedad. Dentro de las micas se pueden agrupar en las incoloras o levemente coloreadas: muscovita (Figura 2c) y las oscuras: biotitas (Figura 2d).

Minerales arcillosos

Son minerales secundarios, en general de grano muy fino, formados por alteración de los principales minerales primarios formadores de roca y del vidrio volcánico. Estos minerales pueden clasificarse como grupo de la montmorillonita, la illita y el caolín. La montmorillonita tiene alta capacidad de intercambio catiónico y cambia de volumen por humedecimiento y secado. Esta propiedad lo torna un material peligroso cuando constituye parte de los agregados pétreos. Por lo común no se reconocen clastos de estos minerales, ni en los agregados gruesos ni en las arenas aunque son constituyentes principales de las lutitas, limolitas, arcilitas y de algunas rocas metamórficas y vulcanitas alteradas. Es común hallarlos en las adherencias de clastos de rodados y arenas. Pueden encontrarse como integrantes de la mayoría de los clastos líticos en proporciones muy variables. Su identificación es difícil ya que su cristalinidad es pobre y su estructura no siempre es uniforme.

Ceolitas

Se caracterizan por su alta capacidad de intercambio catiónico y por su contenido variable de agua. Son minerales secundarios formados principalmente como relleno de cavidades, en el interior de fisuras dentro de las rocas ígneas, como producto de alteración hidrotermal o por procesos exógenos de los minerales primarios formadores de roca. Algunas ceolitas como las del grupo de la heulandita, natrolita y laumontita pueden producir efectos deletéreos en el hormigón, debido a su capacidad de aportar álcalis al medio, aunque son minerales estables en medio alcalino. Son componentes principales de las tobas alteradas y comúnmente se originan a partir de las fases vítreas en medio alcalino. (Bish et al. 2001). En la Figura 2e se observa una ceolita del grupo de la clinoptilolita - heulandita.

Carbonatos

La calcita, (Figura 2f) es el principal constituyente de las calizas sedimentarias y metamórficas (mármoles), aunque se encuentra en muchos otros tipos de roca. Aparece en cavidades de las rocas ígneas, como adherencia superficial, en venillas, rellenando diaclasas y en la mayoría de las rocas aflorantes de la corteza terrestre, especialmente cementando sedimentos modernos (tosca), muchas veces asociada a ceolitas. La dolomita es un mineral muy común, se la encuentra en vetas y yacimientos de reemplazo en calizas y dolomías sedimentarias y metamórficas (mármoles magnesianos).

Debe tenerse especial cuidado cuando el agregado presenta dolomita en su composición, en especial si es de grano fino ya que en medio alcalino se produce el fenómeno de dedolomitización dando como producto final calcita con un consecuente incremento de volumen que produce expansiones deletéreas en el hormigón.

Sulfatos

El más común es el yeso ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), formado como consecuencia de la hidratación de anhidrita (SO_4Ca), la que

puede encontrarse en el yeso como mineral residual. El yeso aparece en venillas. Puede estar asociado a calcita, dolomita y halita.

Es un constituyente común de las rocas sedimentarias, especialmente de depósitos salinos marinos y continentales precipitado por evaporación. En yacimientos sedimentarios está asociado a limos, arcillas y margas vinculado con la oxidación de sulfuros.

Oxidos e hidróxidos de hierro

Los óxidos de hierro más comunes son la magnetita (Fe_3O_4) y la hematita (Fe_2O_3). De los hidróxidos se destaca la goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$). Los óxidos se presentan como minerales accesorios en muchas rocas ígneas oscuras y son comunes como detritos en arenas y sedimentos. La limonita es el producto de alteración de minerales que contienen hierro. En muchas rocas sedimentarias aparece como cemento ferruginoso, como crustificaciones en clastos de grava o tiñendo rocas de cualquier origen.

ROCAS

De acuerdo a su origen se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estos tres grupos se subdividen de acuerdo a su composición química y mineralógica, textura y estructura interna.

Estas rocas constituyen agregados gruesos (piedra partida y canto rodado) y finos (arenas naturales y de trituración). Cuando el agregado es piedra partida su evaluación es simple ya que está constituido por un solo tipo de roca, que podrá presentar a lo sumo variaciones texturales y en la intensidad de la alteración. Las arenas provenientes de la trituración de rocas tienen un tratamiento similar.

Los cantos rodados y arenas naturales son más difíciles de evaluar ya que en general son agregados polimícticos constituidos por una variedad de rocas y minerales, en general de diferente origen, composición y grado de alteración. Por ello su examen debe abarcar el mayor número de clastos individuales o agrupados por semejanzas litológicas y ser exhaustivo. Debe ponerse especial cuidado cuando el agregado presenta pátinas superficiales que enmascaran la mineralogía y/o grado de alteración.

ROCAS IGNEAS

Se considera que entre el 65 y 70 % de la corteza terrestre está constituido por rocas ígneas. En la superficie terrestre los afloramientos de estas rocas no son cuantitativamente homogéneos ya que la roca plutónica más abundante es el granito/granodiorita (roca ácida) (Figura 3a) y la volcánica es el basalto (roca básica) (Figura 3b) (Williams 1968).

Las rocas básicas, tanto plutónicas como volcánicas, son menos evolucionadas, menos diferenciadas que las rocas ácidas. Se forman a mayor temperatura y en condiciones fisicoquímicas particulares por lo que cualquiera de sus componentes mineralógicos sufrirá procesos de desintegración más rápidamente al quedar expuestas al ambiente exógeno. Se meteorizará más rápido un olivino que un piroxeno y éste a su vez que un anfíbol. Fenómenos similares se desarrollarán entre una anortita y una albita y entre ésta y la ortosa. En la tabla I se comparan desde el punto de vista de la composición química las rocas mencionadas. La tabla II indica la mineralogía simplificada.

Tabla 1. Composición química promedio de las rocas ígneas

Oxidos principales	Gabro/ Basalto (%)	Diorita/ Andesita (%)	Granito-granodiorita / riolita-dacita (%)
SiO ₂	45 / 50	55 / 60	65 / 70
Al ₂ O ₃	15 / 17	14 / 16	13 / 15
Fe ₂ O ₃	19 / 22	14 / 16	4 / 6
MgO	7 / 9	3 / 5	0,5 / 2
Na ₂ O	2 / 3	4 / 5	5 / 6
K ₂ O	0,5 / 1	3 / 4	3 / 6

Tabla 2. Composición mineralógica promedio de las rocas ígneas

Principales minerales	Gabro / Basalto (%)	Diorita / Andesita (%)	Granito-granodiorita / riolita-dacita (%)
Cuarzo	< 5	<10	25 / 35
Plagioclasa	45 / 55	50 / 65	30 / 35
Feld. alcalinos	< 5	< 10	25 / 30
Pirox. + anf. + biot.	20 / 25	10 / 15	< 5
Olivinos	5 / 10	-	-
Opacos	2,5 / 5	1,5 / 4,0	0,5 / 2

Desde el punto de vista litológico, si son holocristalinas, estas rocas no presentan minerales que puedan considerarse deletéreos. Esta característica determina que ninguno de sus componentes sean metaestables o que puedan reaccionar dentro de un período de tiempo que por lo menos represente la vida útil de la obra.

Totalmente diferente es el comportamiento de las rocas volcánicas. Estas, dependiendo de la velocidad de enfriamiento, generarán distintas cantidades y tipos de vidrio volcánico. La metaestabilidad del vidrio volcánico dependerá de la edad de la roca (a mayor edad, mayor desvitrificación), de su composición (son más vulnerables los vidrios básicos que los ácidos) de sus texturas (los más compactos y masivos son más resistentes que los porosos o de texturas perlíticas), del desarrollo de los procesos de alteración, factor que acelera notablemente la desvitrificación y de la condición química del medio que favorezca la hidrólisis.

Una riolita holocristalina (Figura 3c) tendrá un comportamiento semejante a un granito, pero si tiene texturas que indican presencia de vidrio (holohialina, vitroclástica, vitrofídicas) será altamente reactiva (Figura 3d).

ROCAS SEDIMENTARIAS

Se producen por la descomposición física y/o química de los minerales y rocas desarrollándose una serie de procesos que van desde la disgregación hasta la hidrólisis, que conduce desde un aumento de la permeabilidad hasta el colapsamiento de las estructuras cristalinas liberando aniones y cationes en medios hidromórficos de quimismos que van desde ácido ($\text{pH} \cong 4$) al alcalino ($\text{pH} \cong 9$) y desde francamente oxidante a reductor.

Afectados los componentes primarios estarán sometidos en diferentes etapas con distinta intensidad a meteorización, erosión, transporte y depositación, condicionados por los ras-

gos fisiográficos y climáticos. No siempre actuarán todos los procesos que caracterizan a cada etapa y a la vez serán sometidos a cambios postdeposicionales generalmente agrupados en la diagénesis.

El análisis químico es útil para comprender la evolución del material desde el punto de vista geoquímico e interpretar los sedimentos o diferenciarlos. Generalizando, puede decirse que los sedimentos tienden a enriquecerse en sílice, hierro y alúmina y a empobrecerse en calcio, magnesio y elementos alcalinos.

Teniendo en cuenta el tamaño de los componentes litológicos de las rocas sedimentarias pueden agruparse como: sedimentos detríticos o clásticos y los de precipitación química. Los clásticos pueden clasificarse por tamaño decreciente como: grava, arena, limo y arcilla. Solo se considera el tamaño del grano y no su composición mineralógica ni química, características fundamentales a tener en cuenta cuando los sedimentos mencionados serán utilizados como agregados (*Pettijohn 1976; Adams 1997*).

Los sedimentos de origen químico más comunes son:

Calizas, dolomías, cherts, ftanitas, siderita, óxidos e hidróxidos de hierro, glauconita, celadonita, fosforita, yeso, otros evaporados y residuos orgánicos.

Como agregados, con muchos reparos pueden considerarse las calizas y dolomías. Estas últimas son potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-carbonato y como siempre contienen cantidades variables de sílice generalmente como chert y arcillas, también frente a la reacción álcali-sílice (RAS).

Todas las formas de sílice micro, cripto y policristalinas de cualquier tipo de sedimentos tornan a estos en potencialmente reactivos.

En la tabla 3 se muestra la composición química de algunas rocas sedimentarias.

Tabla 3. Composición química de las principales rocas sedimentarias.

Oxidos (%)	Areniscas	Lutitas	Arcillitas	Calizas	Chert
SiO ₂	70 / 95	60 / 70	50 / 65	0 / 10	90 / 95
Al ₂ O ₃	< 5	10 / 20	10 / 12	0 / 3	0 / 3
Fe ₂ O ₃	2 / 5	4 / 8	5 / 10	0 / 0,5	0 / 1
MgO	1 / 2	0 / 1	2 / 4	3 / 6	0 / 0,5
CaO	1 / 3	2 / 4	0 / 1	35 / 40	0 / 0,5
Na ₂ O	0 / 0,5	0,5 / 1,5	1 / 3	0 / 0,5	0 / 0,5
K ₂ O	1 / 2	2 / 4	2 / 4	0 / 0,2	0 / 0,3

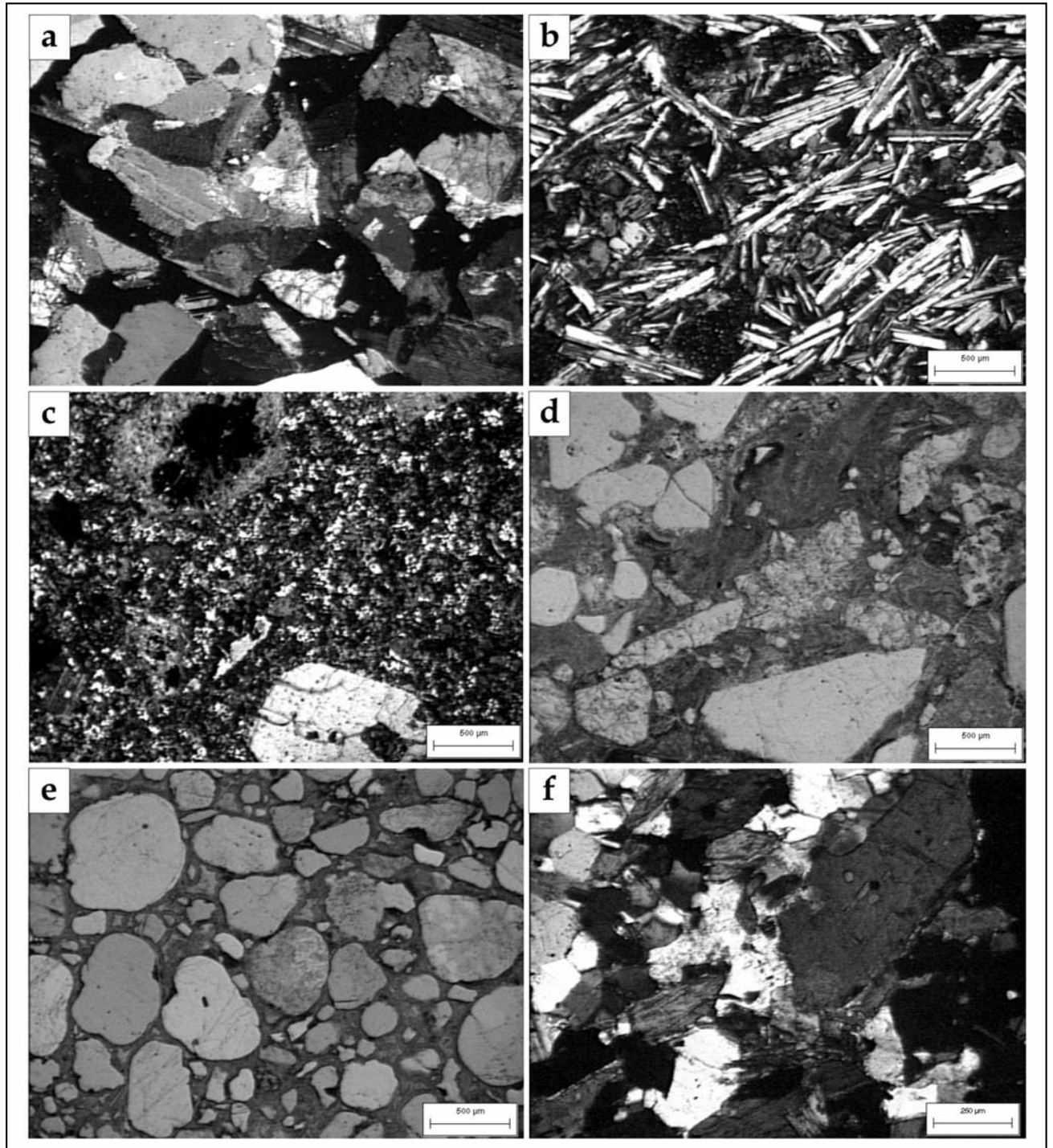


Figura 3. Rocas: a. granito. b. basalto. c. riolita holocristalina. d. riolita vítrea. e. arenisca silicea, cementada por sílice criptocristalina. f. esquistó anfibólico.

La composición mineralógica y litológica de los sedimentos puede ser oligomíctica (constituidos por un solo mineral o roca) o polimíctica (integrado por varios minerales o rocas). De esta forma una arena puede estar constituida casi exclusivamente por granos de cuarzo, de vulcanitas, de granito, fragmentos de pizarras, o mezcla de ellos, y seguirá siendo arena mientras se mantenga dentro de los límites de tamaño. Además conservará sus características y denominación la mezcla de todas las arenas mencionadas. Este mismo comentario es válido para las gravas.

Cuando estos sedimentos son estudiados para establecer su incorporación a un hormigón, los componentes deben agruparse en conjuntos de minerales y rocas cosanguíneas y de cada uno de ellos determinar la litología y/o mineralogía.

Los sedimentos consolidados, conglomerados, brechas, areniscas, lutitas, arcillitas, etc., están constituidos por los sedimentos correspondientes cementados por sílice, carbonatos, cementos ferruginosos. El proceso de cementación natural se realiza a partir de agua enriquecida en los iones mencionados y por reacción química, consolidan al sedimento. Estos procesos se agrupan generalmente bajo la denominación de litificación y diagénesis. Pueden contribuir a ellos la temperatura y la presión dependiendo de las condiciones de la cuenca de sedimentación donde se desarrolla el proceso. Los sedimentos consolidados para su uso en hormigón son considerados como una roca y deberán ser sometidos a trituración para obtener el tamaño adecuado. Los cementos silíceos o la sílice contenida en los cementos carbonáticos o ferruginosos, presentan elevados índices de lixiviación, razón por la cual deben ser estudiados con mucho detalle. En la Figura 3e se muestra una arenisca silícea, constituida por clastos de cuarzo cementados por sílice criptocristalina.

ROCAS METAMORFICAS

El metamorfismo puede ser puramente mecánico o puramente térmico sin modificaciones químicas importantes aunque hay cambios texturales y mineralógicos.

Cuando en el proceso se producen aportes o salidas de materiales principalmente gases magmáticos se desarrollará un proceso neumatolítico y si predominan los fluidos el proceso será hidrotermal. Si el proceso llega a tal temperatura y presión que se alcanza a la fusión parcial, se estaría desarrollando la migmatización y si es total se alcanzará la anatexis. Las características petrográficas de las rocas metamórficas permiten diferenciar cada uno de los procesos citados aunque las zonas de transición entre la diagénesis y el metamorfismo de bajo grado y entre el metamorfismo y la fusión total (granitos de anatexis) son dificultosos.

Los principales cambios mineralógicos que se manifiestan en las rocas metamórficas son de tipo polimórfico (cianita, andalucita, sillimanita), la generación de especies nuevas por aporte o pérdida de elementos (ceolitas, prehnita, pumpelita, arcillas, etc.) y deformación, trituración y hasta modificación de la estructura cristalina por la acción de tensiones, principalmente de cizalla.

Desde el punto de vista de las rocas metamórficas como agregados para hormigón, los factores más importantes que deben tenerse en cuenta son: las condiciones de formación de las nuevas especies ya que serán más inestables los minerales formados a mayor presión y temperatura; la deformación que presentan especialmente los minerales tenaces (cuarzo), ya que las

texturas de mortero, la policristalinidad y la presencia de especies como tridimita, cristobalita y aún la sílice amorfa, serán muy perjudiciales. (Monttana, 2002)

Generalizando se puede concluir que las rocas graníticas a medida que progresa el metamorfismo se transformarán en brechas tectónicas y terminarán como milonitas. Una limolita evolucionará desde la pizarra (metamorfismo de bajo grado) a filita, a micacita y culminará en gneis. Si alcanza a la fusión parcial en una granulita o hornfels de cuarzo, finalizará en una metacuarcita y una caliza como ya se dijo en mármol.

En la Figura 3f se muestra un corte delgado de un esquistos anfibólico.

ROCAS PIROCLASTICAS Y TOBAS

Estas rocas están constituidas principalmente por vidrio volcánico, cristales y clastos líticos. Si están compuestas principalmente por vidrio o partículas vítreas se denominan "tobas vítreas", si predomina la fracción cristalina "tobas cristalinas" y si predominan los fragmentos líticos "tobas líticas".

Además estos componentes son comunes a casi todos los sedimentos por lo que a las arcillas, limos, arenas y gravas que contienen un porcentaje importante de tobas se les agregará la denominación "tobáceas". Por sus características petrográficas (por lo general muy vesiculares) y físicas (materiales livianos) hace que durante su distribución sufran procesos de diferenciación importantes, tanto por la acción del viento como por el agua ya que algunos son tan livianos que pueden alejarse considerablemente de la fuente de origen y hasta flotar en el agua. Composicionalmente, si bien son, por mucho, más abundantes las tobas ácidas (riolíticas y dacíticas), también se producen las basálticas y andesíticas. En general puede asegurarse que estos materiales rápidamente se meteorizan ya que el vidrio es metaestable, son muy permeables y están expuestos en medios químicos totalmente diversos. En un ambiente alcalino, originarán montmorillonita (saponita, nontronita, si la toba es básica), beidélita y se caolinizarán si el medio es ácido, existiendo fases transicionales entre estos extremos. En todos los casos hay un excedente importante de sílice que comúnmente cristalizará como tridimita, cristobalita, ópalo y/o calcedonia originando una silicificación que podrá constituirse en el proceso de cementación más importante de la litificación.

Cuando estas rocas son identificadas como componentes de agregados tanto gruesos como finos, deben tomarse todos los recaudos necesarios para prever su potencial reactividad, especialmente determinar su composición mineralógica, litológica, textura y alteraciones dirigiendo la atención a la presencia de vidrio volcánico, fresco, alterado, relíctico y a la identificación de los minerales de alteración, montmorillonita, ceolitas y arcillas. Además de definir las características de la sílice y demás componentes del cemento de la toba su porción cristalina y lítica, puede ser importante, relacionarla con su origen ya que es aceptado que las tobas más antiguas que el Terciario no tendrían vidrio relíctico y las formas de sílice metaestables habrían adquirido cierta estabilidad.

ALTERACIONES

Prácticamente no existen rocas expuestas en el ambiente exógeno que no muestren evidencias de la acción de procesos erosivos sean estos físicos, químicos o biológicos. Pueden afectar a las rocas a distinta profundidad, que dependerá de la per-

Tabla 4. Sustancias nocivas (IRAM 1531 y 1512)

Sustancias nocivas	Máximo admisible en peso (%) (Agregado grueso)	Máximo admisible en peso (%) (arena)
Terrones de arcilla	0,25	1
Partículas blandas	5,00	2
Ftanita ("chert") contenido como impureza y no como uno de los constituyentes principales.		
a) obras en clima frío	1	
b) obras en clima templado	5	
Material que pasa tamiz 74 μ	1	2 a 5
Materia carbonosa		
a) cuando interese el aspecto superficial de la estructura.	0,5	0,5
b) en todos los demás casos.	1	1
Sulfatos expresados como anhídrido sulfúrico	0,0075	0,1
Otras sales solubles	1,5	1,5

meabilidad, del grado de fracturamiento y de su composición mineralógica y textura.

Los principales procesos químicos que se desarrollan se enmarcan en la hidratación e hidrólisis, oxidación y reducción, acción del CO₂ (carbonatación) y disolución. Los materiales que no son modificados, permanecerán como inatacados.

Todos los minerales primarios al ser afectados por los procesos mencionados sufrirán un aumento de volumen, a veces considerable o aportarán iones al medio que lo tornará más agresivo. Tendrán características físicas que las harán menos resistentes, sus componentes serán alcanzados más rápida y fácilmente, favoreciendo su desintegración, aportarán al medio aniones y cationes que dependiendo de las condiciones químicas originarán arcillas (si el medio es ácido, se formarán caolinites; si el medio es alcalino, montmorillonita/smectitas, ceolitas y si es neutro a levemente alcalino, illita).

En la mayoría de estos procesos de alteración hay una tendencia a relacionar químicamente a la sílice y la alúmina tomando del medio los cationes disponibles y necesarios para formar las nuevas estructuras cristalinas, especialmente Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Fe⁺⁺, etc. y si ello no es posible migrarán como iones solubles o complejados principalmente por la materia orgánica. (Melgarejo 1997; Delvigne 1998; González Bonorino 1972).

En muchas de estas reacciones la cristalización de las nuevas especies mineralógicas consumirá parcialmente la sílice disponible. El exceso puede migrar como complejo solubilizado si el medio es francamente alcalino o precipitar en alguna de las formas de sílice, desde totalmente estable como cuarzo a una forma lábil como el ópalo.

Los agregados que serán utilizados en hormigones deben ser evaluados considerando el desarrollo de los procesos de alteración y calificando el nivel alcanzado. Entre los minerales primarios, los feldespatos pueden presentar caolinización (si el medio es ácido) o sericitización (si es neutro a levemente alcalino). En ambos casos habría exceso de sílice. Si el feldespato es una plagioclasa es muy probable que también haya carbonatación (a pH levemente alcalino) proceso que fijará al calcio movilizado.

La biotita, anfíboles y piroxenos al hidrolizarse liberarán hierro y magnesio dando lugar a la cristalización de cloritas. Este grupo de minerales incorporará los cationes mencionados, junto con la sílice y alúmina disponible. En todos los casos la

sílice estará en exceso dando lugar a la cristalización de algunas de sus formas cristalinas ya que el medio será levemente ácido a neutro.

A pesar de que el cuarzo es un mineral muy resistente y las demás formas de la sílice no tanto, el medio que se desarrolla en el hormigón es muy alcalino y por lo tanto, todas las superficies estarán expuestas a su lixiviación.

Si el agregado es una roca, influirán en su reactividad, toda la superficie y subsuperficie donde los minerales primarios y los de alteración participan desarrollando un complejo proceso de reacción, cuyo resultado es la sumatoria de cada una de las reacciones en cada mineral.

ENMASCARAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LOS AGREGADOS POR ADHERENCIAS SUPERFICIALES

Muchas de las partículas que constituyen los agregados pétreos están recubiertos parcial o totalmente por la precipitación de carbonatos, sílice, material arcilloso/limoso, materia orgánica, sulfatos o por otros sedimentos los que dificultan seriamente su determinación. Es prácticamente una costumbre denominar a estos granos como "alteritas", criterio que se propone eliminarlo ya que es peligroso su uso.

La depositación de carbonato de calcio sobre agregados gruesos naturales es muy común a partir de la precipitación de calcita desde aguas continentales circulantes o percolantes ya sea por saturación o por desecación, fenómeno que se manifiesta sobre sedimentos de cualquier composición.

Al realizar observaciones aún con ayuda de un estereomicroscopio, sólo podrá observarse la superficie externa cubierta por calcita y no será posible identificar la composición litológica del clasto. Si está recubriendo una roca granítica o un casto de cuarzo no ocasionará inconvenientes, pero si enmascara terrones blandos, arcillosos, o vidrio volcánico o calcedonia o areniscas opalizadas será un problema serio.

No tan frecuente, en la naturaleza se presentan clastos de composición litológica muy variada, constituyendo yacimiento de gravas cuyo origen es principalmente fluvial. Los componentes líticos de gravas y arena pueden estar enmascarados por sílice criptocristalina o por óxidos de hierro asociados con sílice, tornándolos reactivos. En el caso del carbonato, podría eliminarse la cobertura utilizando una solución ácida, pero el segundo es muy difícil.

Estos fenómenos no son los únicos, pues es común que haya adherencias superficiales de sedimentos más finos que no permiten determinar al núcleo cubierto. Más raro son los enmascaramientos por materia orgánica los que podrían eliminarse utilizando peróxido de hidrógeno.

Todos los problemas mencionados deben resolverse identificando la especie mineralógica y /o litológica ya que pueden participar activamente en las reacciones del hormigón sea mediante la eliminación de la capa externa que los oculta y mediante la utilización de secciones delgadas con el microscopio de polarización.

En el agregado grueso se resuelve más fácilmente ya que los individuos de interés pueden ser estudiados en cortes delgados individuales. No es así con las arenas ya que se deberán aglutinar para su estudio utilizando algún cemento que permita obtener una pastilla que soporte el tratamiento al ser confeccionada la sección delgada. De esta forma es posible identificar a cada uno de los minerales o rocas que los componen.

ESTABILIDAD QUÍMICA

Si bien la mayoría de los minerales y rocas formados a elevadas presiones y temperaturas son metaestables bajo las condiciones ambientales, las principales especies que producen reacciones deletéreas cuando son utilizadas como agregados en hormigón y que pueden afectar seriamente la durabilidad de las obras son: el vidrio volcánico, las variedades de sílice micro y policristalina, algunas arcillas o rocas arcillosas y el cuarzo tensionado con elevado ángulo de extinción ondulante.

Estas especies en medios fuertemente agresivos como es el pH elevado del hormigón tienden a solubilizarse (hidrolizarse), liberando sílice y elementos alcalinos que se combinan para formar en principio geles que luego cristalizan en estructuras ceolíticas con el consecuente incremento de volumen y desarrollo de presiones que superan la resistencia a la tracción del hormigón.

Estas reacciones se producen si, además de las condiciones químicas, se dan factores tales como elevadas temperatura y humedad. Deben sumarse las adherencias superficiales que pueden presentar los clastos principalmente los rodados, cuando se trata de minerales arcillosos en especial materiales expansivos del tipo montmorillonita, sílice criptocristalina libre o asociada con carbonatos.

RESISTENCIA FÍSICA Y/O MECÁNICA

En este punto se deben tener en cuenta dos aspectos principales. El primero vinculado a las características estructurales de los minerales y rocas dados por desarrollo de planos de clivaje muy perfecto en una dirección (micas), planos de fisilidad o esquistosidad muy marcados (filitas, esquistos, pizarras) y rocas sedimentarias finamente estratificadas. Esto disminuye notablemente la resistencia de los materiales en esos planos lo que provoca su desintegración o rotura en esas direcciones, degradando las estructuras que lo contienen.

El otro aspecto está vinculado con la dureza de los clastos del agregado, por ejemplo la presencia de minerales de alteración tipo montmorillonita, terrones blandos, o rocas blandas o muy alteradas, que lo tornan deleznable.

La presencia de crustificaciones superficiales provoca, por otra parte una notable disminución en la adherencia agregado/mortero, llegando en muchos casos a la separación total.

ENSAYOS NORMALIZADOS

Existen normas que especifican los requisitos a tener en cuenta para realizar los estudios petrográficos de los materiales a ser utilizados como agregados. Entre ellas puede citarse la norma *IRAM 1649* (Aridos para hormigón. Examen petrográfico), *IRAM 1531* (Aridos gruesos para hormigones de cemento Portland) e *IRAM 1512* (Arido fino natural para hormigones de cemento portland).

Para que el agregado sea aceptado no debe contener sustancias nocivas en proporciones mayores a las indicadas en la tabla IV (*IRAM 1531* y *1512*) y la suma de los valores obtenidos no deberá superar el 5%.

Para evaluar la durabilidad, el agregado debe ser sometido al ensayo por ataque con sulfato de sodio según la norma *IRAM 1525* y al ensayo de desgaste Los Angeles (*IRAM 1532*). Petrográficamente debe ser analizado desde el punto de vista de la reacción álcali agregado, en especial cuando la obra estará sometida a la acción de humedad. Para ser aceptado el contenido de especies deletéreas no debe superar los porcentajes indicados en la tabla 5.

Tabla 5. Examen petrográfico (*IRAM 1531*)

Rocas y minerales	% máximo
Opalo y fanita ("chert") opalizada	0.25
Fanita ("chert") cuarzosa o calcedónica	5
Riolitas, dacitas, latitas o andesitas, vítreas o criptocristalinas y sus correspondientes tobas, ceolitas y vidrio volcánico	3

CONCLUSIONES

El estudio petrográfico de los materiales a ser utilizados como agregados para hormigón es de fundamental importancia antes de decidir su uso.

Debe ponerse especial cuidado en los minerales considerados potencialmente reactivos. Estos son: las variedades pobremente cristalizadas de la sílice (tridimita, cristobalita, ópalo, calcedonia) y el vidrio volcánico, tanto fresco como alterado (desvitrificado) contenidos en clastos individuales o en las pastas de rocas volcánicas ácidas y/o básicas.

Las adherencias superficiales producen enmascaramiento de los componentes del agregado y en algunos casos dependiendo de su composición pueden generar falta de adherencia o reacciones deletéreas.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ADAMS, A. E.; MACKENZIE, W. S. AND GUILFORD, 1997.
Atlas of sedimentary rocks under the microscope.
Longman. England. 104 pag.
- ASTM C-294, 1981.
Standard descriptive nomenclature of constituents of natural mineral aggregates.
Annual Book of ASTM Standards, Part. 14. Philadelphia, USA
- BISH, D. L. AND D. W. MING, 2001.
Natural zeolites: occurrence, properties, applications.
Reviews in mineralogy and Geochemistry. Vol. 45. Mineralogical Society of America. 654 pag. Washington D.C.
- CHANG, L. L.; HOWIE P. A. AND M. A. ZUSSMAN , 1998.
Rock-forming minerals.
2nd. Edition. Vol I, II, III, IV and V.
- CORNEILS, K. AND C. S. HURLBUT JR., 1993.
Manual of Mineralogy.
After J. D. Dana. Ed. John Wiley and Sons Inc.
- DANA, J. D. AND E. S. DANA, 1951.
Manual of Mineralogy.
Vol. II. Ed. John Wiley and Sons Inc.
- DELVIGNE, J. E., 1998.
Micromorphology of mineral alteration and weathering.
Mineralogical Association of Canada. 494 pag. Canadá.
- GONZÁLEZ BONORINO, F., 1972.
Introducción a la Geoquímica.
OEA. Ed. Chesneau. Washington D. C. 140 pag.
- IRAM 1512, 1968.
Arido fino natural para hormigón de cemento portland.
- IRAM 1525, 1985.
Agregados. Método de ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio.
- IRAM 1531, 1968.
Aridos gruesos para hormigones de cemento portland.
- IRAM 1532, 2000.
Agregados gruesos. Método de ensayo de resistencia al desgaste con la máquina "Los Angeles".
- IRAM 1649, 1968.
Reactividad alcalina potencial en áridos. Exámen petrográfico.
- MELGAREJO C., 1997.
Atlas de las Asociaciones minerales en lámina delgada.
Coor. Joan Carls Melgarejo. Ed. Universitat de Barcelona. Pp. 1052.
- MONTTANA, A.; SASSI, F. P.; THOMPSON, J. B. AND S. GUGGENHEIM, 2002.
Micas. Crystal chemistry and metamorphic petrology.
Reviews in mineralogy and geochemistry. Vol. 46. 499 pag. Washington D. C.
- PETTIJOHN, F. J., 1976.
Rocas Sedimentarias.
3ra. Edición. Editorial Universitaria de Buenos Aires. 731 pag.
- WILLIAMS, W. TURNER, F. J. Y GILBERT, 1968.
Petrografía.
Editorial Continental. México. 430 pag.
- WINCHELL, A. N., 1933.
Elements of optical mineralogy. Part II. Descriptions. Of minerals.
John Wiley and Sons. 459 pag. London.