



Defectos petrogenéticos de las rocas metamórficas de Córdoba utilizadas en la construcción

Bonalumi, Aldo¹ - Sfragulla, Jorge¹ - Locati, Francisco¹ - Campos, Darío¹

Recibido: 14 de Febrero de 2007 • Aceptado: 06 de Febrero de 2009

Resumen

En este trabajo se reconoce la reacción álcali-agregado en rocas metamórficas de Córdoba, que se utilizan como agregados para hormigón en obras civiles. A pesar de no poseer minerales considerados normalmente deletéreos, algunas de estas rocas se mostraron reactivas o potencialmente reactivas en los ensayos realizados. Se atribuye la reactividad a la presencia de cuarzo que ha sufrido procesos de deformación con reducción de tamaño del grano y recristalización, ya sea por esfuerzos o blastesis.

Palabras clave: petrogénesis, metamorfitas, Córdoba, reacción álcali agregado.

Abstract

In this paper the alkali-aggregate reaction in metamorphic rocks from Córdoba is described. These rocks are used as aggregates for concrete in public works. Despite not having minerals usually considered deleterious, some of these rocks have been reactive or potentially reactive in the tests carried out. This reactivity has been attributed to the presence of quartz which has undergone processes of deformation, with a decrease in grain size and re crystallization, either by strain or blastesis.

Keywords: petrogenesis, metamorphites, Cordoba, alkali aggregate reaction.

INTRODUCCIÓN

En los últimos cinco años, la fuerte demanda producida por la construcción civil ha puesto de manifiesto el problema de la reacción álcali-agregado (RAA) en algunos de los materiales pétreos utilizados como agregado grueso en la provincia de Córdoba. El alto nivel de crecimiento en el consumo ha sido potenciado por los actuales programas de obras públicas lanzados a nivel nacional, lo que de alguna manera ha provocado falta de control en la explotación, en cuanto al tipo de roca explotada y su calidad.

Las Sierras Pampeanas Orientales, en su sector conocido como Sierra Chica de Córdoba, es el cordón orográfico más cercano al litoral que posee la República Argentina, vale decir

que de estas formaciones geológicas se debe abastecer de materiales pétreos y minerales para la obra pública y civil a toda la provincia de Santa Fe, norte de Buenos Aires y Córdoba. Por otra parte, toda el área en su conjunto representa una de las zonas más productivas y densamente pobladas del país.

El aumento de la producción que este tipo de materiales experimentó se manifiesta de dos formas diferentes: por un lado las plantas de trituración ya instaladas aumentaron su producción al límite de sus posibilidades y en algunos casos, han invertido en mayor capacidad; por otra parte se abrieron nuevas canteras o se reactivaron algunas que estaban paralizadas. En todos los casos los avances en los frentes de explotación acusaron un fuerte incremento y, si se tiene en cuenta la heterogeneidad de las rocas metamórficas, algunos frentes alumbraron rocas de calidad notablemente menor y que potencialmente podrían afectar la durabilidad de la obra. El principal objetivo de esta investigación es definir los defectos de ciertas rocas que, por su composición mineralógica, no serían consideradas perjudiciales, pero que en realidad lo son.

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales -
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Vélez Sársfield 1611. X5016GCA. Ciudad Universitaria.
Córdoba. Argentina.
✉ abonalumi@com.uncor.edu

ASPECTOS GEOLÓGICOS

Las Sierras Pampeanas Orientales están constituidas petrológicamente por unidades litológicas de origen ígneo, metamórfico y sedimentario en proporciones aproximadas del 30%, 65% y 5% respectivamente. Las rocas ígneas y metamórficas son las que se utilizan específicamente como agregados gruesos, aunque algunos sedimentos de tipo aluvional se suelen aprovechar también.

Las rocas metamórficas objeto de esta investigación cubren una gran superficie en la Sierra de Córdoba, y afloran en todos los cordones orográficos de la provincia, tanto en el extremo oeste, en las Sierras de Guasapampa y Pocho, como en el central, en las Sierras Grande y de Comechingones, y en el extremo este, en las Sierras Chica, de Los Cóndores y de Las Peñas. Por una razón esencialmente geográfica que incide directamente en los costos comerciales, en la actualidad las principales canteras se ubican en la Sierra Chica, y producen en conjunto casi el 40% del consumo argentino.

Los principales complejos metamórficos en Córdoba están constituidos por rocas de grado medio y alto, esquistos biotíticos, gneises y migmatitas anatócticas. Solo un bajo porcentaje está representado por afloramientos de grado bajo, de composición filítica.

La calidad de la roca

Los principales problemas de calidad que poseen las rocas metamórficas de Córdoba están relacionados a su petrogénesis, mineralogía y deformación, factores que a veces individualmente y otras potenciándose mutuamente convierten en prácticamente no utilizables a algunos agregados.

Petrogénesis

Todas las rocas investigadas son producto del metamorfismo regional o dinámico que provienen de sedimentos u otros protolitos preexistentes, que se han transformado por acción de factores tales como temperatura, presión y fluidos, los que mediante mecanismos de difusión iónica, nucleación y crecimiento mineral han generado un nuevo material pétreo.

Los protolitos de las rocas parametamórficas de Córdoba han sido sedimentos más o menos maduros muy ricos en aluminio, que responden a composiciones arcilíticas y en menor grado grauwáquicas. El metamorfismo regional es en esencia un fenómeno de transformación mineral de una roca preexistente, que ha producido el crecimiento paragenético de minerales ricos en aluminio, en los cuales el hierro y magnesio acompañan en proporciones significativamente menores, pero que permiten el crecimiento de minerales que causan problemas en la calidad de los agregados pétreos, tales como las micas. Estas rocas tienen un rango termobárico de formación que oscila entre los 400-820°C y 2.2-8.8 kBr, (Gordillo 1984, Gordillo y Bonalumi 1987, Martino et al. 1994). Estos indicadores petrogenéticos demuestran que la transformación de los sedimentos se ha experimentado a más de 25 Km de profundidad, y que posteriormente han sido exhumados durante la evolución del orógeno del que forman parte, para aflorar como metamorfitas.

El estrés soportado por estas unidades litológicas en su evolución geológica posterior a la formación de los minerales, (520 millones de años, Rapela et al. 1998) la fragilidad de algunos, la ductibilidad de otros y la generación de lineaciones, foliaciones, esquistosidad, etc., ocasionada por los factores

geológicos actuantes, hacen que estas rocas sean considerablemente heterogéneas, con concentraciones de minerales deformados, planos de esquistosidad formados por acumulación de minerales laminares y presencia de alteraciones meteóricas que integralmente son responsables de disminuir la calidad de algunos agregados pétreos. La Tabla 1 muestra cuatro análisis químicos de gneises ubicados en áreas diferentes y que podrían ser considerados como típicos. Esta geoquímica muestra una importante presencia de silicio, que satura la composición y es representada en gran parte por cuarzo. Si se observa el cálculo C.I.P.W. (Cross, et al. 1903) Este cálculo permite geoquímicamente, identificar los minerales que componen las rocas, cuando estos están muy deformados, son granulométricamente muy pequeños o no han alcanzado a cristalizar), se concluye que el cuarzo en las rocas metamórficas de Córdoba no sólo está presente, sino que es muy abundante (23,94% al 44,97%). Precisamente esta característica, asociada a problemas de deformación, hace que haya que tener cuidado en la utilización de algunas rocas ricas en cuarzo.

Tabla 1. Composición geoquímica de las rocas metamórficas potencialmente reactivas. 1. La Calera. 2. Río Avalos. 3. Calamuchita. 4. Punilla. Porcentaje en peso.

Roca / Elemento	1	2	3	4
SiO ₂	61,37	61,60	59,35	67,12
TiO ₂	1,00	0,98	1,21	0,66
Al ₂ O ₃	18,24	16,81	18,67	14,90
Fe ₂ O ₃	1,00	8,27	1,81	4,15
FeO	6,65		9,29	
MnO	0,15	0,14	0,24	0,12
MgO	4,02	3,48	5,03	1,19
CaO	1,26	1,39	2,04	1,69
Na ₂ O	1,82	2,47	1,10	2,05
K ₂ O	3,39	3,74	0,45	1,86
P ₂ O ₅	0,13	0,18	0,57	0,42
H ₂ O	1,05	1,17	0,35	0,96
C.I.P.W.				
Cuarzo	29,50	23,94	44,97	41,78
Feldspatos estables	46,08	55,19	21,27	42,78
Ferromagnesianos estables	13,83	12,61	19,08	5,14
Oxidos estables	10,31	7,88	13,04	9,30
Otros (Fosfatos y Oxidos)	0,27	0,38	1,28	1,01

Mineralogía

Se puede afirmar que las rocas metamórficas que afloran y son explotadas en Córdoba en su gran mayoría no poseen minerales deletéreos que estén fuera de las exigencias de las normas que actualmente rigen las calidades de las rocas y sus componentes (Tabla 2). La mayoría de las rocas metamórficas de diferentes grados están compuestas por cuarzo, plagioclasa y feldespato potásicos (feldspatos estables), granate, cordierita, biotita y estauroilita (ferromagnesianos estables), biotita y clorita (micas ferromagnesianas inestables), sericitita y muscovita (micas inestables),

magnetita e ilmenita (óxidos estables), y otros minerales metamórficos asociados que tienen un impacto insignificante, tanto desde el punto de vista reactivo o perjudicial como de su volumen. Por lo tanto, y si se está frente a rocas que no presentan procesos de alteración visible, de estructura maciza o levemente esquistosa, y sin deformación acentuada, desde el punto de vista mineralógico éstas no presentan inconveniente alguno para su utilización industrial. Como se dijo, siempre y cuando sus estructuras y procesos de deformación no alteren la mineralogía primaria, ya que en general estos aspectos no son contemplados por las normas en su real dimensión. Con frecuencia se considera utilizable una roca que no contiene minerales potencialmente reactivos en los porcentajes indicados, sin considerar los coeficientes de alteración, el grado de deformación o la propia estructura de la roca.

Tabla 2. En condiciones normales de alteración, deformación estructural, y granulometría, no existen en las rocas metamórficas de Córdoba minerales potencialmente reactivos o perjudiciales

Minerales potencialmente reactivos y perjudiciales	Minerales de las rocas metamórficas de Córdoba
Chert	Cuarzo
Pedernal	Plagioclasas
Calcedonia	Ortoclasa
ridimita	Microclino
Cristobalita	Granates
Vidrio volcánico	Sillimanita
Cuarzo criptocristalino	Disteno
Cuarzo muy tensionado	Andalucita
Cuarzo recristalizado fino	Cordierita
Esmectita	Muscovita
Montmorillonita	Biotita
Micas de grano muy fino	Clorita

Es importante dejar en claro que la reacción álcali-agregado se produce solo en presencia de tres factores principales que deben converger: humedad, agregados con suficiente cantidad de minerales potencialmente reactivos y suficiente cantidad de álcalis disponibles en los poros del hormigón.

Se acepta generalmente que esta reacción comprende a dos tipos principales de agregados: los agregados de reacción rápida y los de reacción lenta/tardía (Wigum, 1995). En principio, los agregados reactivos fueron relacionados a varios minerales de sílice de estructura heterogénea, porosos y a veces hidratados, tales como ópalo, calcedonia, chert y a algunos tipos de vidrio volcánico, los que fueron hallados como fuertemente reactivos en condiciones adecuadas. Mas recientemente se demostró la reactividad de ciertos tipos de rocas cuarzosas bien cristalizadas y mas densas (p.ej. metagrauvascas, metaareniscas, filitas, cataclasitas y otros tipos de rocas con signos de deformación), tal como se observa en la Figura 1, aunque en este caso los mecanismos de reacción son mas lentos y producen expansión y daños retardados. Precisamente a este tipo de reacción es al que se asocia al cuarzo deformado.

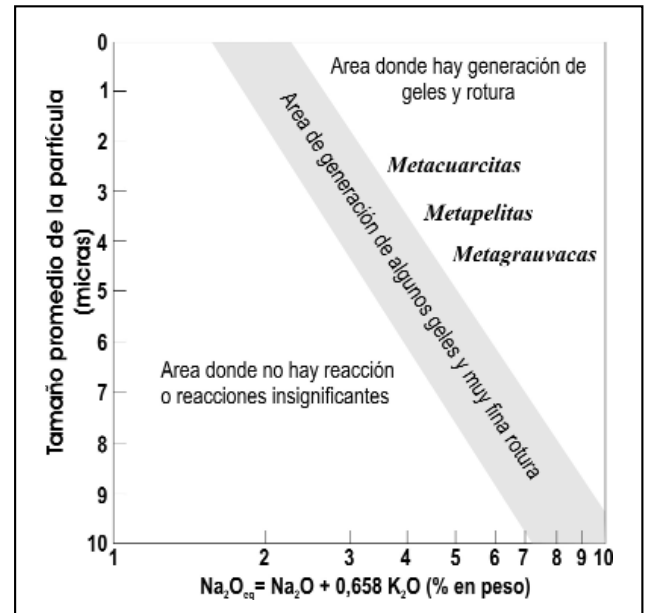


Figura 1. Tamaño de la partícula vs. reactividad de Na equivalente (French 1992)

Un dato geológico a tener en cuenta es la presencia de rocas con diverso grado de deformación en todos los complejos metamórficos de Córdoba. Las rocas deformadas conforman los principales lineamientos y fracturas que permitieron la elevación de la sierra. Esta deformación se refleja en el cambio de volumen o de forma por aplicación de una tensión y son el resultado de movimientos diferenciales sobre superficies en el interior de la roca. Este proceso produce cataclasis, que es la deformación de una roca acompañada por fractura y rotación de granos minerales caracterizada por granulación mecánica y que finaliza generando una textura de "flujo" o foliación cataclástica o bandeado con laminación de color o composición que se presenta en las rocas denominadas cataclásticas (Tabla 3). Si estas rocas presentan cohesión primaria darán lugar a agregados compactos y aparentemente de buena calidad, pero en realidad todo el cuarzo que las compone está reticularmente alterado y convertido en lo que internacionalmente se denomina *strained quartz*, el que es considerado potencialmente reactivo.

Tabla 3. Clasificación de las rocas cataclásticas (Higgins 1971)

Rocas sin cohesión primaria	Rocas con cohesión primaria			
	Cataclasis dominantes sobre neomineralización - recristalización	Neomineralización - recristalización domina sobre cataclasis		
	Rocas sin estructuras de flujo	Rocas con estructuras de flujo		
Brechas de falla	Microbrecha	Protomilonita	Gneis milonítico	
	Granulometría visible a simple vista			
Harina de falla	Cataclasita	Milonita Ultramilonita	Filonitas	>2mm Blastomilonita

Origen de la reacción álcali-agregado tardía (Wigum, 1995 y bibliografía allí citada)

En 1973, Gotge (*en Wigum, 1995*) señaló que la reactividad de ciertos tipos de rocas cristalinas de la India estaba relacionada a la cantidad relativa y efectos de deformación en el cuarzo. Ha sido luego reconocido que la reactividad de ciertas rocas con reactividad tardía se debe a rasgos microestructurales de la misma, mas que a su composición mineralógica y clasificación petrográfica.

Se ha reportado la RAA tardía en agregados portadores de cuarzo, que exhiben rasgos microestructurales tales como extinción ondulosa, bandas de deformación, desarrollo de lamelas y subgranos. Todos estos rasgos se producen durante los períodos de deformación y recuperación, y todos ellos pueden influenciar la reactividad del cuarzo.

Algunos autores sugieren que mas que a la extinción ondulosa en el cuarzo, la reactividad se debería a la presencia de cuarzo microcristalino en los agregados, aunque otros afirman que cualquier roca conteniendo cuarzo deformado es potencialmente reactiva ya sea que ellos exhiban lamelas de deformación, estén cataclásados o contengan granos microcristalinos en límites de granos mayores o a lo largo de planos de fractura de varios tipos.

Otros estudios sugieren que la fuente de reactividad en algunos agregados está en conexión con áreas con gran cantidad de límites de grano, dadas por granos de tamaño pequeño y en la alta densidad de dislocaciones presente dentro de muchos de esos granos. En la investigación sobre reactividad de milonitas se ha demostrado que, además de los efectos del cuarzo microcristalino, la reactividad depende del grado de foliación de la roca, y que la reacción ocurre en los límites de grano del cuarzo microcristalino formado por recristalización dinámica de cuarzo deformado (Figura 6). En otros trabajos se investigó la reactividad de varios componentes texturales y mineralógicos de rocas metamórficas deformadas. Los estudios mostraron que el componente mas reactivo parece ser el cuarzo microcristalino que ha sufrido gran desarrollo de subgranos, pero no recristalización. También se vio que zonas con notable extinción ondulosa no eran significativamente mas reactivas que otras de cuarzo no deformado.

Sitios preferenciales de reacción

Se ha establecido que una reacción debe superar una cierta energía de activación y tiene lugar a una cierta velocidad bajo una cierta fuerza motriz. La energía de activación puede ser vista como una barrera que la reacción debe superar para tener lugar y será diferente dependiendo del tipo de sílice. Los cambios y reacciones están también acompañados por la nucleación de nuevas fases. *En la presencia de impurezas, tales como partículas, límites de grano, dislocaciones y áreas deformadas, la nucleación ocurrirá con energías de activación más bajas que en cristales homogéneos.* La formación de un núcleo en una superficie existente o dislocación involucra la destrucción de parte de dicha superficie. La nucleación se favorece en puntos triples, esquinas, o límites de alto ángulo y es ayudada por la densidad de dislocaciones producidas durante la deformación. Wintsch y Dunning (1985, *en Wigum, 1995*) calcularon los efectos de la densidad de dislocación sobre la solubilidad en agua del cuarzo deformado y demostraron que a muy altas densidades de dislocación la solubilidad del cuarzo aumentó significativamente. Sin embargo, el volumen total de cuarzo con estas características es bastante pequeño, y se encuentra principalmente en las

paredes de los subgranos, lo que produce un incremento de solubilidad en esos sectores.

Accesibilidad del reactante

Para producir la reacción (RAA) los alcalis y iones hidroxilos deben poder llegar desde la pasta de cemento al interior del agregado. Entre varios tipos de defectos microestructurales en cristales, las fracturas y cavidades pueden actuar como vías de acceso para los álcalis. Los planos de clivaje y microfracturas, rasgos muy comunes en las rocas, ayudan a la difusión, y muchas de las cavidades que se encuentran en los límites intergranulares son sólo visibles con microscopio electrónico. La accesibilidad de los álcalis puede ocurrir a lo largo de planos de debilidad producidos durante la trituración, o a través de planos naturales de debilidad, tales como planos de estratificación o foliación, en muchos casos por alineamiento preferencial del cuarzo y filossilicatos paralelamente a la foliación milonítica (Figura 2). Kerrick y Hooton (1992, *en Wigum 1995*) encontraron una marcada dependencia entre expansión y estructura foliada en la roca.

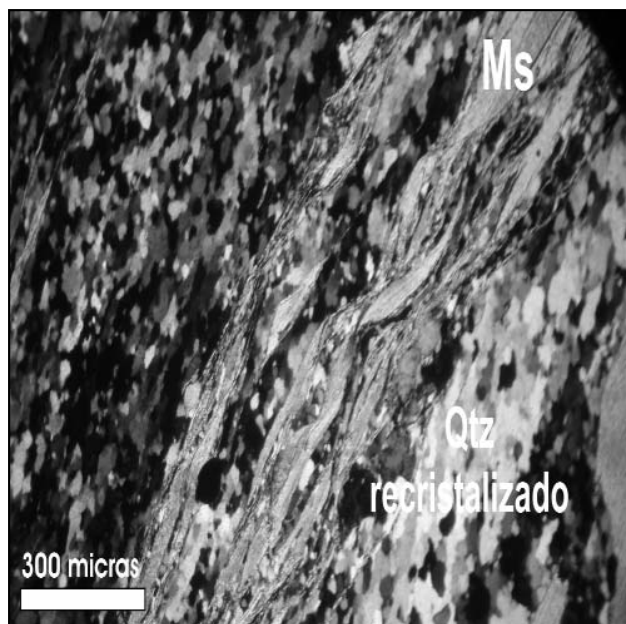


Figura 2. Fotomicrografía de la milonitización de una roca donde se observa colas de micas y recristalización de cuarzo. Este cuarzo es potencialmente reactivo. Nicoles cruzados

El cuarzo como mineral problema

El cuarzo está presente en mayor o menor medida en las rocas metamórficas que se explotan en Sierras Pampeanas e integra como promedio casi el 30% del volumen total de la roca (Tabla 1). Texturalmente es uno de los componentes más abundantes y refleja sin excepción la historia geológica de la propia roca, indicando con su granulometría no solo el grado metamórfico alcanzado, sino además el nivel de deformación, si ha habido segregaciones secundarias producidas por presiones, milonitización o fusión parcial. En otras palabras, el cuarzo junto a otros minerales críticos de origen metamórfico define con precisión los valores termobáricos, el nivel de blastesis, la deformación, la cataclisis frágil o dúctil y el alcance de la recristalización en caso de haberse producido.

El cuarzo microcristalino y/o cuarzo con defectos estructurales causados por algún tipo de deformación ha sido determinado como el principal responsable de la reactividad de los agregados de reacción lenta/tardía.

La aparición de productos de reacción (gel) en microfracturas es el principal rasgo diagnóstico de la RAA. La microfracturación asociada a esta reacción se genera por fuerzas debidas a la expansión de partículas de agregados y/o el cambio de tamaño del gel dentro y alrededor de las partículas reactantes.

Los agregados de reacción rápida ya citados reaccionan por disolución para formar un gel de álcali-sílice en la superficie y el interior del agregado. La reacción aparece en zonas o parches dentro del agregado, asociada en ambos casos a microfracturación y procesos de disolución que transforman partes de la partícula en gel. Las partículas pequeñas con mayor superficie específica reaccionarán más rápidamente. Este fenómeno no se observa en las rocas metamórficas de Córdoba ya que estas no presentan minerales reactivos tales como ópalo, calcedonia, chert, vidrio u otros.

En los agregados de reacción lenta/tardía la reacción se origina probablemente en grietas originales, variedad mineralógica y límites de granos, los que actúan como vías de circulación para las soluciones alcalinas presentes en los poros del hormigón, y sólo algunos sectores de las partículas deben ser considerados reactivos. En tal caso, solo se produce una mínima formación de gel, el que sin embargo es capaz de separar los límites de grano y producir la expansión y agrietamiento del agregado. Las fisuras resultantes aparecerán más marcadas, largas y definidas, y serán más susceptibles a los esfuerzos dentro de la estructura de concreto. Este es el tipo de reacción potencial presente en las rocas de Córdoba y que tienen como principal fuente al cuarzo deformado.

Influencia del tamaño de la partícula

Varios investigadores han demostrado que la RAA depende del tamaño de la partícula de agregado. La influencia es diferente según si el agregado es de reacción rápida o tardía. Se ha observado que en agregados muy reactivos, tales como chert y vidrio volcánico, el rango granulométrico más peligroso está entre 3 y 7 mm. En areniscas y metacuarcitas esto ocurre con partículas entre 10 y 20 mm. En rocas tales como grauvacas y arcilitas los efectos más nocivos ocurren en agregados de varios cm de diámetro.

Trabajos experimentales (*Wigum, 1995* y bibliografía allí citada) revelaron que hormigones confeccionados solo con agregados reactivos finos mostraron un rápido incremento de la expansión durante la parte inicial de la reacción. Por el contrario, la expansión del concreto con agregado grueso reactivo aumentó lentamente al inicio, pero continuó durante un largo periodo de tiempo. Para un contenido dado de agregado reactivo, la reactividad se incrementaba a medida que bajaba el tamaño del agregado, lo que sugiere que la reactividad era función del volumen de la partícula y no de su superficie.

Para agregados de reacción tardía se observó que ciertas fracciones contribuyen a la RAA más que otras. Como se ha visto, este tipo de reacción tiene lugar a lo largo de discontinuidades estructurales del agregado, tales como límites de granos y foliación, y el ingreso de álcalis y reacción se producirá donde esas estructuras contienen gran cantidad de granos finos y subgranos. Para contener esas estructuras, los granos deberán ser de un determinado tamaño; las partículas más pequeñas que el ancho de la foliación de la roca no tendrán discontinuidades y no darán acceso a los álcalis.

En petrología metamórfica las causas del tamaño que alcanza un cristal de cuarzo en el proceso de blástesis son bien conocidas; en primer lugar hay que destacar que la granulometría de una roca es función directa del grado metamórfico, y a mayor tamaño de grano, mayor grado metamórfico. En segundo lugar, el tamaño de grano también es función directa del grado de deformación alcanzada, pero en este caso, a mayor deformación, hay mayor destrucción de minerales frágiles, y el cuarzo es el más afectado. Este mineral no solo ve reducido su tamaño, y alcanza granulometrías que oscilan entre 3μ y 10μ , sino que generalmente recrystaliza y alcanzan tamaños similares o aún menores a los producidos por cataclisis. Así dadas las cosas, la potencialidad en la reacción está demostrada ampliamente, en cuanto al tamaño del grano, ya que como se muestra en la Figura 2, la deformación alcanza a las micas que generan "colas" criptocristalinas de tamaños menores a 1μ , aportando nuevos elementos minerales como son los filosilicatos (micas) a la potencial reactividad.

Texturas mirmequíticas

Se denomina mirmequita al intercrecimiento simplectítico de cuarzo vermicular y plagioclasa, resultante del reemplazo retrogrado de feldespatos potásico. Las mirmequitas son un rasgo común en muchas rocas de diferentes orígenes, son muy frecuentes en rocas plutónicas graníticas, en rocas metamórficas de grado medio alto, en rocas parcialmente fundidas (migmatitas) y también en rocas deformadas, donde el proceso generado por los esfuerzos que conducen a la deformación parece contribuir a la nucleación de las mirmequitas (*Vernon, 1991*), ya que la concentración de esfuerzos pueden destruir el equilibrio Kfs-Qtz-Pl e inducir el reemplazo. Debido al estado de inestabilidad de las mirmequitas, se ha observado que éstas son unos de los primeros componentes que recrystalizan en las rocas deformadas. El estado de inestabilidad del cuarzo y su probable baja cristalinidad son rasgos a tener en cuenta para considerar a un agregado como potencialmente reactivo.

Las mirmequitas son frecuentes en rocas cuarzosas de los diferentes complejos metamórficos de Sierras Pampeanas. La figura 3 muestra las características texturales y el tamaño de estos intercrecimientos minerales. Un detalle muy importante a los fines prácticos es que si bien los mismos son muy frecuentes, en muy pocos casos superan el 5% del volumen total de la roca, lo que minimizaría el riesgo de reacción.

Ejemplificación de la problemática en rocas de la provincia de Córdoba

Campos (2005) y *Locati (2006)*, realizaron una primera aproximación sobre los defectos que presentan las rocas de un sector de la Sierra Chica de Córdoba. El área estudiada se encuentra ubicada en el sector sur del flanco oriental del sistema orográfico mencionado, y comprende una serie de bancos calco-dolomíticos asociados a cuerpos anfibolíticos, de orientación general N $310^{\circ}/64^{\circ}$ O, los cuales se disponen en contacto neto con gneises biotíticos granatíferos-sillimaníticos deformados, de similar orientación y mayor extensión areal. También se han identificado rocas con acentuada deformación que se clasificaron como protomilonitas (leucogranito), las cuales podrían estar asociadas a las ya descritas en el sector de Calmayo por *Martino y Fagiano (1982)*, luego enmarcadas dentro de la Faja Soconcho por *Martino (2003)*.

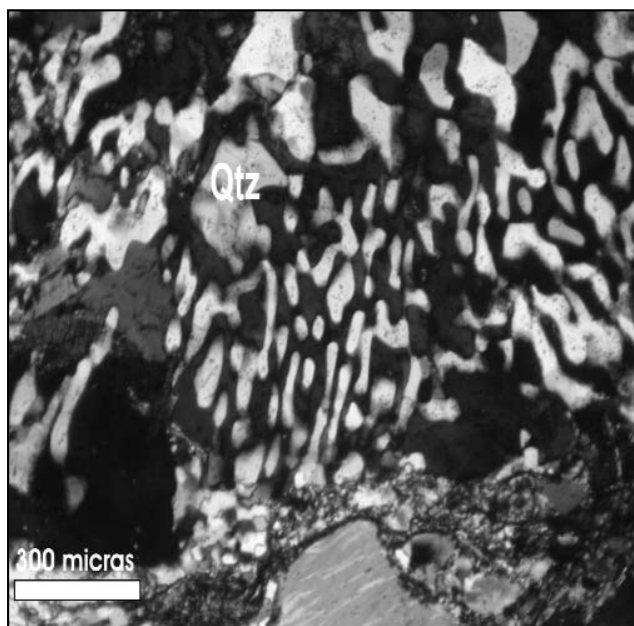


Figura 3. Fotomicrografía de texturas mirmerquíticas. Nícoles cruzados

Dicha faja fue definida por *Martino et al. (1995)* como una zona de aproximadamente 2 km de ancho y 35 km de largo, que corta completamente la Sierra Chica y que internamente presenta gneises granatíferos bandeados, con venas foliadas de granitos biotíticos desmembrados con forma de ojos y pliegues intrafoliares, que definen un boudinage con cuellos orientados N 344°/30° O. Los gneises son encajonantes de clastos sigmoidales de mármoles forsteríticos y anfibolitas deformadas internamente (*Martino 2003*). Este dato es de suma importancia ya que posiblemente sea el proceso geológico que generó la mayor parte de las evidencias de deformación en las rocas estudiadas.

A su vez, todo el complejo se encuentra intruído por diques y filones de composición granítica. *Martino y Fagiano (1982)*, también destacaron en las proximidades de Calmayo la presencia de migmatitas (desembocadura del Arroyo Tacurú), gneises sin granate, gneises con disteno y esquistos.

Durante el estudio se han podido identificar dentro de las rocas, zonas de importante recrystalización, principalmente en los dominios cuarzosos de las protomilonitas (leucogranito) y del gneis biotítico granatífero-sillimanítico deformado, asociadas a mineralogías de connotación hidrotermal (epidoto, clorita, calcita, sericita, cuarzo); en los mármoles olivínicos con flogopita se destaca la serpentización del olivino y recrystalización intercrystalina de calcita-dolomita.

En los calcáreos se han encontrado además zonas de fallamiento intenso, con material triturado principalmente sericitico. Esto podría corresponder a la reactivación en un régimen frágil de la Faja Soconcho, nucleando sobre su margen nororiental al lineamiento Soconcho (*Martino y Fagiano 1982, Martino et al. 1995, Bonalumi et al. 2000*), que controla el arroyo del mismo nombre en la llanura Chaco-Pampeana adyacente al este. Esta reactivación se manifiesta en forma de clivaje de fractura penetrativo en las rocas ígneas de la región, principalmente en el margen nororiental de la Tonalita Calmayo y en las numerosas aplitas que se encuentran en la región. La orientación general de este clivaje es N 350° y buza 60° O a subvertical (*Martino 2003*). No se conoce la edad de la faja Soconcho,

si bien puede asegurarse que el clivaje de fractura es posterior al magmatismo trondhjemítico de la región, asignado al período cámbrico-ordovícico (480-500 Ma, *Rapela et al. 1998, en Martino 2003*).

Muestreo

Se recolectaron un total de 9 muestras en nueve pilas de acopio, respetándose lo descrito en la Norma IRAM 1509, para la obtención de muestras de material. Las mismas fueron extraídas de distintas alturas y lugares de la pila principal, de la cual se obtiene una mezcla compuesta de campo.

Además se coleccionaron 4 muestras de mano en frentes de cantera, tratando de escoger las litologías mayoritarias, de modo de poder lograr una caracterización representativa, realizándose idéntico tratamiento que a las muestras de los acopios. La cantidad de material recolectado fue de aproximadamente 50 kg para cada muestra.

En laboratorio cada muestra se dividió dos grupos, de los cuales uno se utilizó para la descripción macroscópica y análisis petrográfico.

Análisis microscópico

Se realizaron 65 análisis petrográficos sobre cortes delgados realizados en las muestras recolectadas en acopios y frentes de cantera con el fin de determinar los diferentes litotipos presentes en el área de estudio (Tabla 4).

Ensayos

En primer lugar se efectuó la caracterización tecnológica de los agregados y el cemento utilizado (Tablas 5 y 6):

Posteriormente se confeccionaron un total de 39 probetas, que fueron sometidas al ensayo acelerado de la barra de mortero (*según Norma IRAM 1674*), con el objeto de evidenciar el comportamiento de las muestras recolectadas frente a la reacción álcali-agregado (Tabla 7). Las características de los morteros son: Número de morteros realizados con cada muestra: 13. Materiales de cada mortero: 990 gr de agregados, 440 gr de cemento y 206,8 gr de agua. Relación a/c: 0,47 %

Cantidad de probetas por mortero: 3

Los diferentes comportamientos pueden observarse en los gráficos de variación de la longitud. En la figura 4 se puede observar el comportamiento inocuo ($n < 0,10$ % de variación según *Norma IRAM 1674*) para la Muestra C2; el comportamiento potencialmente reactivo a 16 días ($0,10$ % $< n < 0,20$ % de variación), pero deletéreo a 28 días ($n > 0,20$) para la Muestra A-07; y el comportamiento deletéreo ($n > 0,20$) para la Muestra A-06.

Microscopía sobre probetas

Se realizaron un total de 38 análisis petrográficos sobre cortes delgados efectuados en las probetas previamente sometidas al ensayo acelerado de la barra de mortero. Analizando el conjunto de la figura 4 (gráfico de la variación de la longitud), en la tabla 8 puede observarse el trabajo desarrollado sobre tres morteros de diferente comportamiento frente a la reacción álcali-sílice, (mortero 11), donde se usaron agregados de la muestra C2 dando comportamiento inocuo; mortero 7, donde se usaron agregados de la muestra A-07 mostró comportamiento potencialmente reactivo a 16 días y deletéreo a 28 días; y mortero 6, donde se usaron agregados de la muestra A-06 acusando comportamiento deletéreo. También se determinaron tamaños y formas de los agregados, se describieron los espacios vacíos

Tabla 4. Litotipos identificados en las muestras recolectadas en pilas de acopio y frentes de cantera

Muestras	Litotipos identificados
A-01 (pila de acopio)	Mármol, Protomilonita (Leucogranito), Mármol olivínico flogopítico serpentizado con y sin espinelo, Gneis granatífero sillimanítico deformado
A-02 (pila de acopio)	Mármol, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Agregado granítico, Protomilonita (Leucogranito)
A-03 (pila de acopio)	Agregado granítico, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Gneis biotítico deformado
A-04 (pila de acopio)	Agregado granítico, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Protomilonita (Leucogranito)
A-05 (pila de acopio)	Mármol olivínico flogopítico serpentizado
A-06 (pila de acopio)	Agregado piroxenítico, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Protomilonita (Leucogranito), Agregado granítico, Agregado sericítico
A-07 (pila de acopio)	Agregado sericítico, Agregado granítico cataclastizado, Protomilonita (Leucogranito), Gneis biotítico deformado, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Agregado piroxenítico
A-08 (pila de acopio)	Agregado piroxenítico, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Protomilonita (Leucogranito), Agregado sericítico, Agregados serpentínicos, Mármol, Agregado graníticos, Agregado anfibolítico, Mármol tremolítico,
A-09 (pila de acopio)	Protomilonita (Leucogranito), Agregado sericítico, Gneis granatífero biotítico deformado, Mármol
C1 (frente de cantera)	Mármol olivínico flogopítico serpentizado con espinelo
C2 (frente de cantera)	Mármol olivínico flogopítico serpentizado
D-01 (frente de cantera)	Gneis granatífero biotítico-sillimanítico deformado
D-02 (frente de cantera)	Protomilonita (Leucogranito)

Tabla 5. Caracterización tecnológica de los agregados

Nº	Agregado	M. Fina	T. Máx. (mm)	Observ.	Nº	Agregado	M. Fina	T. Máx. (mm)	Observ.
1	A-01	4,26	Fino		8	A-08	3,42	Fino	
2	A-02	5,81	4,75	2	9	A-09	3,41	Fino	
3	A-03	5,09	12,5	3	10	C1		Muestreo en frentes de cantera	Grueso
4	A-04	6,40	19	4	11	C2			
5	A-05	7,28	19	5	12	D-01			
6	A-06	7,00	12,5	6	13	D-02			
7	A-07	7,32	25	7					

Tabla 6. Características físicas y químicas del cemento utilizado. Según protocolo

Cemento 1. Cemento Pórtland con Filler Calcáreo CPF 40			
Análisis Químico	Um	Resultados	Req. Iram
Pérdida de calcinación	%	3,70	< 12
Trióxido de Azufre	%	2,66	< 3,5
Óxido de Magnesio	%	1,09	< 6
Dióxido de Silicio	%	20,62	No hay
Óxido de Calcio	%	61,38	No hay
Óxido de Aluminio	%	4,30	No hay
Óxido de Hierro	%	4,19	No hay
Óxido de Sodio	%	0,36	No hay
Óxido de Potasio	%	0,85	No hay
Óxido de sodio equivalente (Na₂O + 0.658 K₂O)	%	0,92	No hay
Residuo insoluble	%	2,46	< 5
Ensayos Físicos	Um	Resultados	Req. Iram
Retenido Tamiz 75 mm	%	2,0	< 15
Super. Específica Blaine	M ² /Kg	384,8	< 250
Expansión en autoclave	%	0,02	< 1
Tiempo de fraguado inicial	H:min.	02:45	> 0:45
Tiempo de fraguado final	H:min.	03:45	< 10:00

del mortero y las manifestaciones reactivas cuando estuvieron presentes en la muestra. Esto sirvió para identificar y caracterizar las mineralogías potencialmente reactivas, para caracterizar el gel de RAA producto de la reacción, para determinar cuáles fueron los procesos geológicos que afectaron las litologías potencialmente reactivas y para estimar cuáles serían los porcentajes que podrían permitirse para que los agregados potencialmente reactivos no produzcan expansiones de importancia cuando son utilizados en estructuras de hormigón.

Tabla 7. Resumen del comportamiento reactivo de los materiales (según NORMA IRAM 1674)

Mortero	Resultados IRAM - 1674.
1 (muestra A-01)	INOCUO
2 (muestra A-02)	INOCUO
3 (muestra A-03)	INOCUO
4 (muestra A-04)	INOCUO
5 (muestra A-05)	INOCUO
6 (muestra A-06)	DELETÉREO
7 (muestra A-07)	POTENC. REACTIVO - DELETÉREO (a 28 días del ensayo)
8 (muestra A-08)	INOCUO
9 (muestra A-09)	POTENC. REACTIVO (a 28 días del ensayo)
10 (muestra C1)	INOCUO
11 (muestra C2)	INOCUO
12 (muestra D-01)	DELETÉREO
13 (muestra D-02)	POTENC. REACTIVO (a 28 días del ensayo)

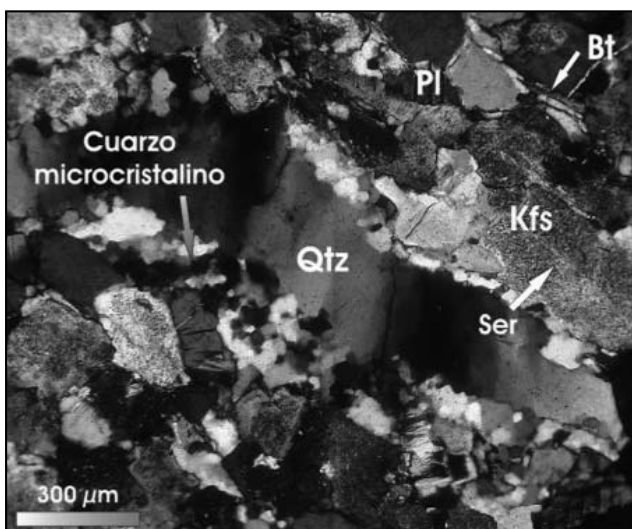


Figura 5. Fotomicrografía de un agregado leucogranítico milonitizado con cuarzo muy deformado. Roca reactiva. Nícoles cruzados

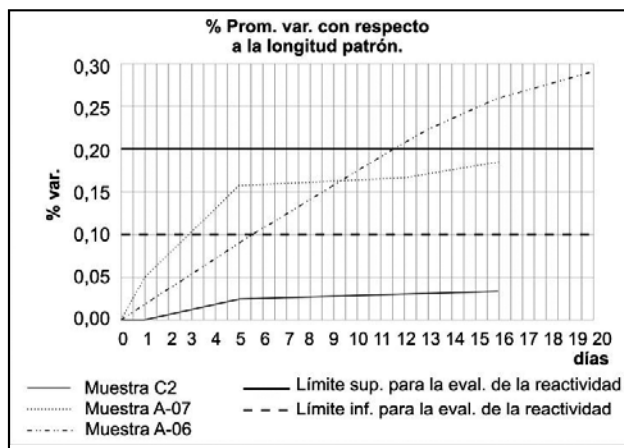


Figura 4. Variación de longitud del mortero.

CONCLUSIONES

- Los agregados que manifestaron reactividad frente a la Reacción Álcali-Agregado y que fueron identificados mediante los análisis petrográficos son: Protomilonita (Leucogranito), (Figuras 5 y 6) Gneis granatífero biotítico-sillimanítico deformado, Agregado sericítico, (Figura 8)
- El agregado sericítico sufrió principalmente microfisuración de tipo intragranular y perigranular (Figura 8), y en la mayor parte de los casos es el que proporciona el espacio donde precipita el gel producido por la reacción (conjuntamente con los espacios vacíos propios del hormigón).
- Como componente mineral de importancia del gneis granatífero biotítico-sillimanítico deformado (en menor proporción) y de la protomilonita (leucogranito), en mayor proporción, *aparece el cuarzo comprendido entre 0 y 100 μm*. Este último es el que actúa al ser sometido a reacción acelerada, produciendo el gel generador de microfisuras por expansión, el que posteriormente rellena, parcial o totalmente, los espacios vacíos propios del hormigón y los producidos principalmente por el agregado sericítico (Figura 7-8).

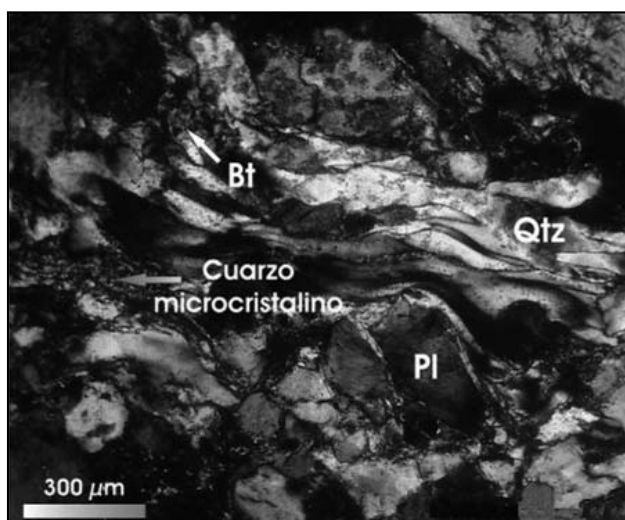


Figura 6. Fotomicrografía de un agregado leucogranítico muy deformado. Roca reactiva. Nícoles cruzados

Tabla 8. Distribución porcentual aproximada de agregados, espacios vacíos y pasta o matriz

Distribución	Muestra C2		Muestra A-07		Muestra A-06	
	% aproximados (sobre el total de la muestra)	% aproximados (sobre el total de los agregados)	% aproximados (sobre el total de la muestra)	% aproximados (sobre el total de los agregados)	% aproximados (sobre el total de la muestra)	% aproximados (sobre el total de los agregados)
Agregados	Mármoles	40,00%	100,00%	10,00%	17,86%	23,81%
	Granitoides	-	-	35,00%	62,50%	59,52%
	Metamorfitas	-	-	1,00%	1,79%	-
	Agregados Piroxeníticos	-	-	3,00%	5,36%	5,00%
	Agregados Sericíticos	-	-	7,00%	12,50%	4,76%
Espacios vacíos	10,00%	-	10,00%	-	7,00%	-
Pasta o matriz	50,00%	-	34,00%	-	51,00%	-
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	40,00%

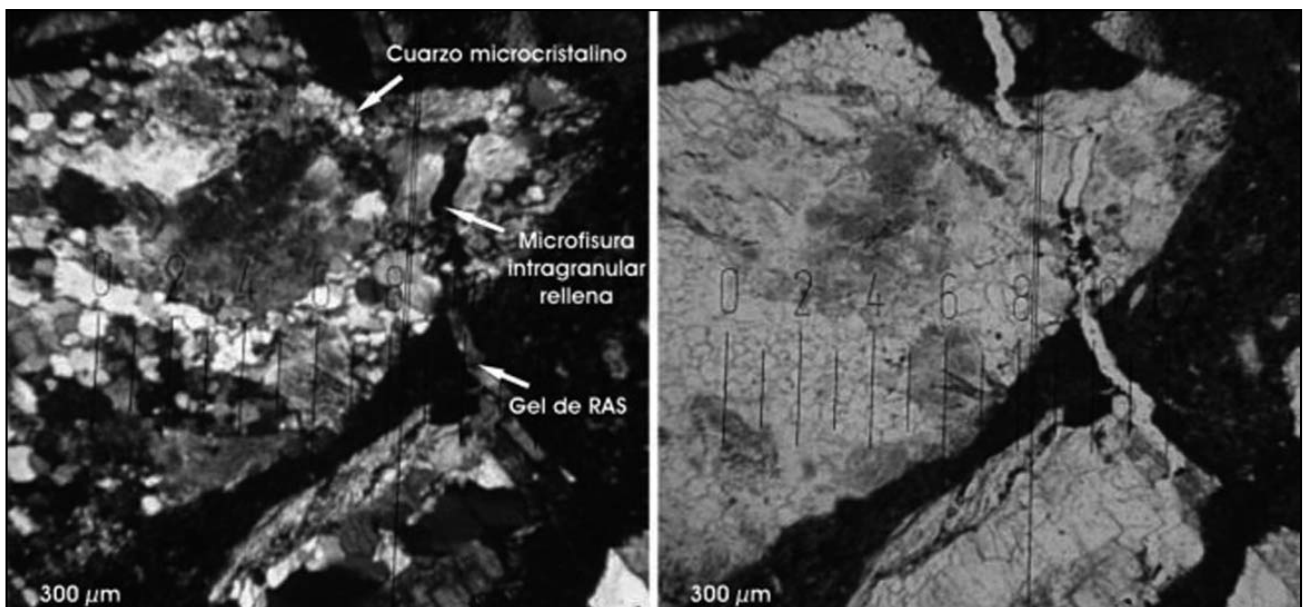


Figura 7. Fotomicrografía de un agregado leucogranítico milonitizado microfisurado. Roca reactiva. Nicoles cruzados y paralelos

- Los tres tipos de agregado producen expansiones de importancia cuando se encuentran en un porcentaje aproximado del 30% o más, del total de la probeta, lo que debería tenerse en cuenta a la hora de analizar los métodos extractivos y/o los porcentajes utilizados en mezclas de diferentes litologías correspondientes al área de explotación. A partir de estos datos, fue posible identificar y caracterizar agregados reactivos y otros que son potencialmente reactivos, que provienen de rocas metamórficas comunes de la provincia de Córdoba:

Agregados que poseen cuarzo de tamaño menor a $90 \mu\text{m}$, con extinción ondulosa y con signos de recristalización.

Agregados que forman venas, fajas o recristalizaciones perigranulares que adoptan formas alargadas (cintas de cuarzo) o en mosaicos microcristalinos y criptocristalinos con bordes suturados producto de procesos cataclásticos particularmente intensos.

Agregados que son el producto de recristalizaciones por tensión y deformación (Figuras 5 y 6).

Este estudio establece un antecedente respecto a la existencia de agregados potencialmente reactivos en las Sierras Chi-

cas de la Provincia de Córdoba, proporcionando una primera aproximación sobre los causantes de la misma, información esencial para efectuar acciones tendientes a remediar los efectos producidos por la Reacción Álcali-Agregado.

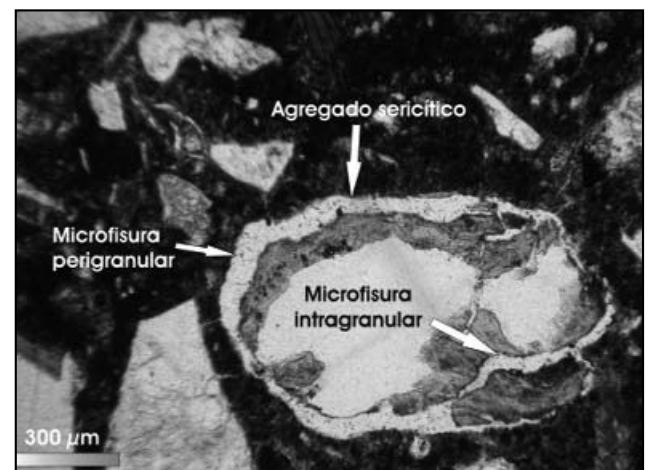


Figura 8. Fotomicrografía de un agregado sericítico microfisurado. Roca reactiva. Nicoles paralelos

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BONALUMI A., MARTINO R., SFRAGULLA J., CARIGNANO C. Y A. TAUBER, 2000
 Hoja Geológica 3363-I (Villa María). Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina.
Esc. 1:250.000. SEGEMAR. Boletín N°:347. 74 pp. Bs. As.
- CAMPOS D. G., 2005
 Estudio potencial de la reacción álcali-agregado con agregados de la provincia de Córdoba (Cantera 1).
Trabajo Final (inédito). Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. 131 pp.
- CROSS W., IDDIGS J., PIRSSON L. Y H. WASHINGTON, 1903
 Quantitative Classification of Igneous Rocks.
 286 p. *William Wesley & Son. London.*
- FRENCH W., 1992
 The characterization of potentially reactive aggregate.
In Poole, A. (Editor), Proc, 9th Conf Alkali-aggregate Reactions in Concrete, Concrete Society Publications CS.104, Vol.1, London. 338-346.
- GORDILLO C., 1984
 Migmatitas cordieríticas de las Sierras de Córdoba; condiciones físicas de la migmatización.
Miscelánea 68: 1-40, Academia Nacional de Ciencias. Córdoba.
- GORDILLO C. Y A. BONALUMI, 1987
 Termobarometría de la faja migmatítica de "La Puerta", Departamento Cruz del Eje. Provincia de Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. XLII (3-4): 255-259. Buenos Aires.
- HIGGINS M., 1971
 Cataclastic Rocks. U.S.
Geological Survey Professional Paper. 687.
- IRAM (NORMA) 1509
 Agregados para hormigones.
Muestreo. 1987.
- IRAM (NORMA) 1674
 Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.
Junio 1997.
- LOCATI F., 2006.
 Estudio de la potencialidad de la Reacción Álcali-Agregado usando agregados de la provincia de Córdoba, un enfoque petrológico.
Trabajo Final (inédito). Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. 169 pp.
- MARTINO D. R. Y R. M. FAGIANO, 1982
 "Los intrusivos de la Sierra Chica Sur de Córdoba".
Trabajo Final, U. N. C., F. C. E. F. y N., Escuela de Geología. Pág. 1-58. (Inédito).
- MARTINO R., MUNN B., KRAEMER P., ESCAYOLA M. Y A. GUERESCHI, 1994
 Thermobarometry at 32° LS in the Pampean Ranges near Córdoba, Argentina.
Abstracts GSA with programs, A-226.
- MARTINO R., KRAEMER P., ESCAYOLA M., GIAMBASTIANI M. Y M. ARNOSIO, 1995
 Transecta de las Sierras Pampeanas de Córdoba a los 32°LS.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 50 (1-4): 60-77.
- MARTINO R., 2003
 Las fajas de deformación dúctil de las Sierras Pampeanas de Córdoba: Una reseña general.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. v. 58. n. 4. p. 549-571.
- RAPELA C.W., PANKHURST R. J., CASQUET C., BALDO E., SAAVEDRA J., GALINDO C. Y C. M. FANNING, 1998
 The Pampean orogeny of the southern proto-Andes: evidence for Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba.
En: Pankhurst, R.J y Rapela, C.W. (Eds.) The Proto-Andean Margin of South America, the Geological Society London, Special Publication N° 142: 182-217.
- WIGUM B.J., 1995
 Alkali-aggregate reactions in concrete. Properties classification and testing of norwegian cataclastic rocks.
Tesis Doctoral, Universidad de Trondheim, Noruega.