

Caracterización de agregados pétreos del río La Caldera – Salta – Argentina y su comportamiento en hormigones autocompactables

**H. Cardozo¹⁻² | S. Echazu Lamas¹ | M. Yapur Murillo¹ | O. Suarez¹ |
S. Gonorazky¹ | D. Cazón¹**

Resumen

Ante el crecimiento de los centros urbanos en la provincia de Salta, principalmente en la ciudad y el uso cada vez mayor de hormigones, consideramos importante comenzar el estudio de adecuadas tecnologías para la utilización de hormigones de alto desempeño. Es por ello que la Universidad Nacional de Salta – Facultad de Ingeniería, plantea el estudio de hormigones autocompactables (HAC) con el uso de agregados pétreos producidos en la región.

En el Departamento Capital (Salta) se explotan canteras húmedas en forma directa. Uno de los ríos explotados en forma permanente es el río La Caldera ubicado al norte de la ciudad.

Este río al erosionar su cuenca alta de una variada geología toma fragmentos de conglomerados, cuarcitas, y areniscas de distintas dureza, cohesión y naturalezas que colmatan los lechos fluviales conformando depósitos de gravas y arenas sueltos. El transporte natural de estos produce una primera clasificación con granulometrías diversas, cuyo desgaste provoca la eliminación de partes blandas y alteradas.

Para determinar las características mineralógicas, petrográficas, físicas, mecánicas y químicas se considera el REGLAMENTO CIRSOC 201/05 en el cual se detallan los ensayos granulométricos de fracción gruesa y fina, determinación de forma, redondez, esfericidad, textura superficial, revestimiento, peso específico, ensayo de compresión simple, desgaste los Ángeles. Obtenidas las características de los áridos y empleando cementos de uso comercial más aditivos, el objetivo del trabajo es presentar los resultados de ensayos de distintos pastones de hormigón autocompactable (HAC), cuyas características principales son una alta fluidez, capacidad de llenado y compactación bajo la acción de su propio peso sin riesgos de segregación. Para verificar la condición de autocompactabilidad se realizaron en estado fresco ensayos de Extendido, J-Ring, caja L y Embudo-V; en estado endurecido se determinó resistencia a

¹⁻² Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta

¹ Facultad de Ingeniería e Informática de la Universidad Católica de Salta

compresión y módulo de elasticidad; estudio de la interfase pasta agregado a nivel microscópico en distintos cortes de hormigón endurecido mediante lupa binocular y microscopio electrónico; análisis de resultados, conclusiones. En este trabajo se inicia satisfactoriamente el estudio de los agregados de la región y su comportamiento en HAC, se recomienda el ajuste previo de morteros para la dosificación de HAC y de esta manera estimar con buena aproximación la dosis de aditivo y filler a utilizar.

Introducción

La elaboración de hormigón con materiales disponibles en el medio y una adecuada tecnología, resulta de imperiosa necesidad para dar respuesta rápida a los crecientes problemas ingenieriles cada vez mayores, con ambientes más agresivos, mayores alturas de colocación, menores tiempos para el desencofrado, etc. Los avances realizados al respecto en distintos países, incluso en el nuestro, han permitido la obtención de un hormigón con propiedades mecánicas, trabajabilidad y durabilidad superiores a lo común, o lo que es igual, un Hormigón Autocompactable (HAC).

Uno de los problemas fundamentales y que merecen una atención urgente en la ciudad de Salta y principales centros urbanos del interior provincial es el desarrollo de tecnologías apropiadas de hormigones especiales con agregados de la región y su aplicación en obras de ingeniería de pequeña, mediana y gran envergadura.

Docentes de la Universidad Nacional de Salta – Facultad de Ingeniería, para la obtención de este tipo de hormigón, realizaron la caracterización geológica de los agregados pétreos utili-

zados para evaluar su comportamiento frente a la aplicación de diferentes esfuerzos. Esto, sumado a que los agregados (finos y gruesos) representan entre un 60 y un 80 % del volumen total del hormigón, constituyendo el principal formador de la estructura o esqueleto del mismo.

Estos hormigones autocompactables tienen por característica una alta fluencia en estado fresco permitiendo una mejor trabajabilidad, alta consolidación y baja permeabilidad; mientras que en estado endurecido son importantes las características relacionadas con la durabilidad y el diseño estructural [1] [11] [12] [13].

En sus comienzos los HAC sólo se utilizaban en ciertas estructuras especiales pero en la actualidad han avanzado sobre diversos campos de aplicación, con el fin de alargar la vida útil de obras de ingeniería, reducir los plazos de ejecución en obra y abaratar costes de material.

Para lograr el máximo de resistencia del agregado grueso, se debe utilizar una relación de agua/cemento inferior a 0,4, lo que produce una mayor resistencia de la pasta y de la interfase pasta-agregado, haciéndola similar a la resistencia del agregado grueso [1] [11] [12] [13]. Sin embargo, se debe tener cuidado en rocas con baja resistencia,

ya que las características mineralógicas y texturales de la misma podrían disminuir el valor de resistencia del hormigón, incluso por debajo del valor de la resistencia de la pasta.

El valor de resistencia a la compresión de una roca puede limitar el valor de resistencia a la compresión del hormigón, cuando la resistencia de la primera es menor que la de la pasta del hormigón. En cambio, cuando el valor de la resistencia a la compresión de la roca es mayor que el valor de resistencia de la pasta, entonces será la pasta la que actúe de limitante en la resistencia del hormigón. [1] [14].

Los hormigones de alta resistencia generados con agregados gruesos de 10 mm de tamaño, manifestaban mejores valores de resistencia que hormigones con agregados gruesos de 20 mm. Si bien las características superficiales y mineralógico-texturales de los diferentes agregados pueden incidir directamente en el comportamiento de los hormigones de alta resistencia, es probable que en hormigones de resistencias medias a bajas (30 MPa), esos efectos se reduzcan notablemente, posiblemente debido a un mayor control de la pasta. La resistencia a la tracción está principalmente determinada por la resistencia de la pasta, mientras que la resistencia a la compresión está principalmente influenciada por la resistencia de los agregados gruesos y por sus características. [1] [14].

Como podemos ver, si bien aún hoy en día existen posiciones encontradas

respecto al comportamiento de los hormigones de alto desempeño al variar las propiedades físico-mecánicas y mineralógico-texturales de los agregados gruesos, es indudable que estas propiedades modifican sustancialmente el comportamiento de esos hormigones. [1] [11] [12] [13] [14].

Materiales y métodos

El objetivo del trabajo es la caracterización geológica de las unidades formacionales que proporcionan el agregado pétreo a los ríos que conforman la cuenca del río La Caldera, evaluando su comportamiento en los HAC, su trabajabilidad en estado fresco y resistencia a la compresión en estado endurecido.

El plan de trabajo experimental consistió en:

1. Caracterización del medio (ubicación, hidrología, clima)
2. Caracterización geológica y física de los agregados pétreos.
3. Análisis del comportamiento del hormigón en estado fresco y endurecido.

1 Caracterización del medio (ubicación, hidrología, clima)

1.1. Ubicación e hidrografía

Los agregados utilizados en el HAC, provienen del río La Caldera, ubicado al Norte de la ciudad y del Valle de Lerma, este río tiene como principal colector al río Mojotoro, formado por la

confluencia de los ríos La Caldera y Vaqueros. El primero recoge las aguas de los ríos Wierna, San Alejo, Santa Rufina y numerosos cursos menores; el segundo es formado por la unión del río Lesser con el arroyo Castellanos.

Los principales afluentes del río Wierna son los ríos de las Nieves, Potrero de Castilla y Yacones, los que reciben numerosos tributarios menores. Sus nacientes se encuentran en las altas cumbres de la Cordillera Oriental (Nevado de Castilla 5.487 m s.n.m., cerro Negro 5.028 m s.n.m., y cerro Bayo 4.630 m s.n.m.) y desembocan en el río La Caldera formando un gran cono aluvial, importante desde el punto de vista de provisión de áridos. Este río tiene una extensión de aproximadamente 16 km.

1.2. Clima

El clima, en el Valle, donde se encuentra la ciudad de Salta, es sub-tropical serrano con estación seca. Los vientos predominantes soplan desde el nordeste y este. El régimen pluvial está marcado por dos periodos, uno lluvioso y otro seco. El primero se extiende entre los meses de octubre-noviembre hasta la primera quincena de abril, con mayor registro en los meses de diciembre, enero y febrero. La precipitación anual media es de 666,6 mm.

Las temperaturas medias oscilan, en verano, entre 19,7 y 21,8 °C, con medias máximas entre 25,9 y 28,5 °C., y en invierno, entre 11,6 y 13,1 °C, con medias mínimas de hasta 4 °C.

2. Caracterización geológica

El área de aporte de los agregados se encuentra dentro de la provincia geológica Cordillera Oriental, procediendo estos principalmente de la sierra de Lesser, La Caldera y Vaqueros, y en menor grado de la sierra de Mojotoro, ubicadas al Noroeste y Noreste de la ciudad de Salta, respectivamente. Las unidades litológicas proveedoras de estos agregados a través de los ríos ya nombrados afluentes del río La Caldera, son:

- Formación Puncoviscana (Precámbrico Superior – Eocámbrico), constituido por grauvacas de grano mediano a fino y pizarras de color verde, gris verdosas y gris violáceas; estas rocas se encuentran atravesadas por venas de cuarzo.
- Grupo Mesón, (Cámbrico Medio – Superior), conformado por conglomerados, cuarcitas, areniscas cuarzosas, y alternancia escasa de pelitas (limolitas), predomina el color rosado, morado y verde amarillento, caracterizadas por su elevada madurez mineralógica y textural.
- Grupo Santa Victoria (Cámbrico Superior tardío – Ordovícico Inferior), compuesto por conglomerado polimíctico, areniscas cuarzosas, cuarcitas gruesas y medianas y lutitas limosas y limo arenosas, verde grisáceas y grises oscuras.
- Grupo Orán (Terciario, Neógeno), conformado por areniscas rojas de grano fino a medio, deleznales, limolitas y arcillitas de colores verdosos y pardos,

Caracterización de agregados pétreos del río La Caldera

conglomerados, areniscas conglomeráticas con intercalaciones de areniscas grises.

- Cuaternario temprano, constituido por material clástico poco consolidado, grava-arenosa y arcillas con fangos.

- Cuaternario tardío, depósitos eocénicos o recientes, conforman terrazas modernas, depósitos de pie de monte, llanuras y lechos de cursos actuales, constituyen el relleno moderno del Valle de Lerma. Fig. 1. [2]

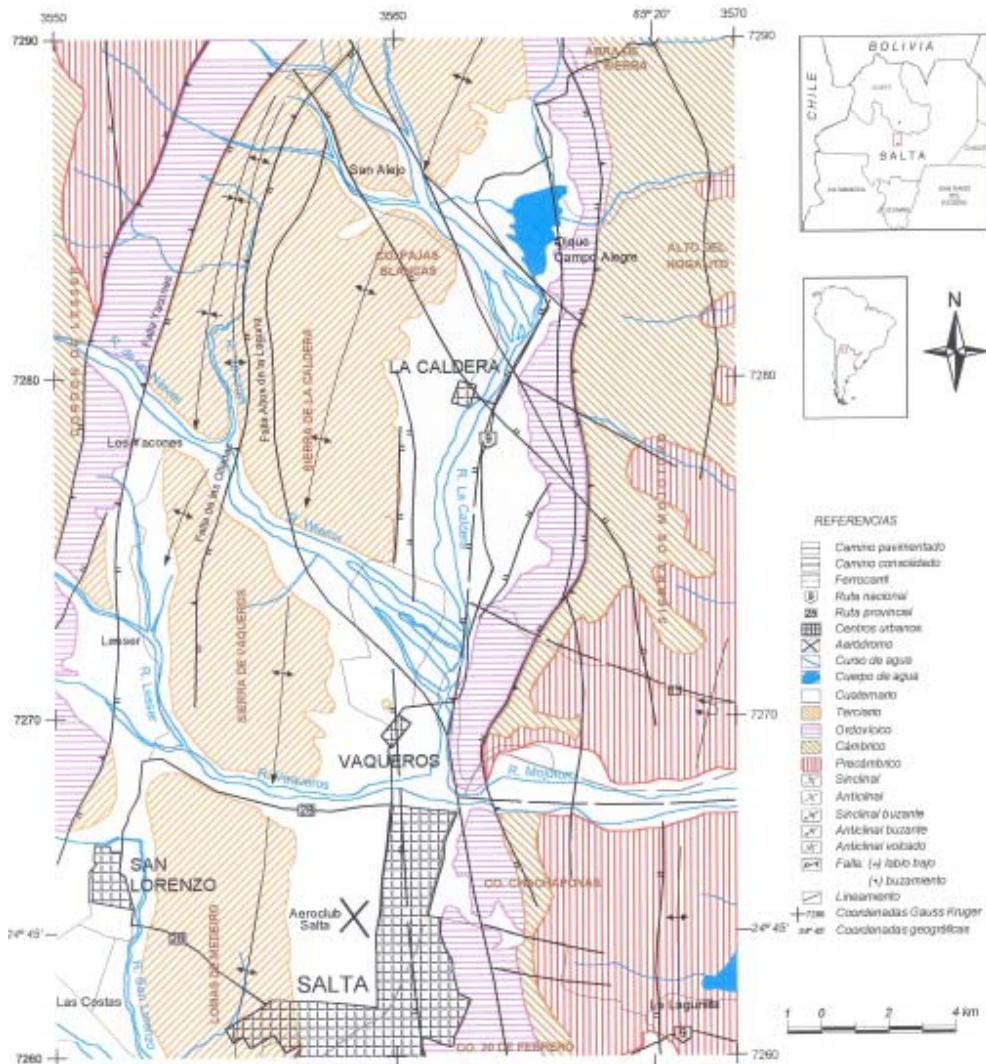


Fig. 1 Mapa geológico del sector norte del Valle de Lerma

El relleno moderno del río está compuesto por material clástico de distinta granulometría, formas, y tamaños, que son el producto de la meteorización física, principalmente, de las unidades litológicas aflorantes en la cuenca alta conformada por las serranías de Lesser, La Caldera y Vaqueros, Estos materiales pueden agruparse en dos, de acuerdo a su abundancia y topología así tenemos:

1. Principalmente se observan conglomerados oligomícticos compuesto principalmente por clastos de cuarzo, areniscas conglomerádicas, cuarcitas, areniscas cuarzosas, grauvacas.
2. En menor proporción pizarras, lutitas limosas y limo arenosas.

Los materiales del primer grupo por su abundancia, forma y tamaño son los más aprovechados como áridos para diversos usos ingenieriles.

El tamaño nominal de los agregados grueso comprende la fracción entre 19 mm y 4,75 mm, por lo que en cantera se trabajó con lo que comercialmente se conoce como 6-19 mm, aunque en ocasiones el material supera dicho tamaño, por lo que fue necesario realizar un ajuste en el tamizado.

Resulta de gran importancia una clasificación acompañada con un lavado agresivo con la finalidad de eliminar los

elementos finos que pudieran recubrir la superficie de los agregados gruesos, con ello se logra mejorar la adherencia de la pasta con dichos elementos, logrando que no se produzcan superficies de discontinuidad en el hormigón debilitando el mismo.

El árido muestreado para el presente trabajo está compuesto por grauvacas, cuarcitas, areniscas cuarzosas, conglomerados y areniscas conglomerádicas, en su mayoría muy bien consolidadas por el tipo de cemento presente de tipo silicio.

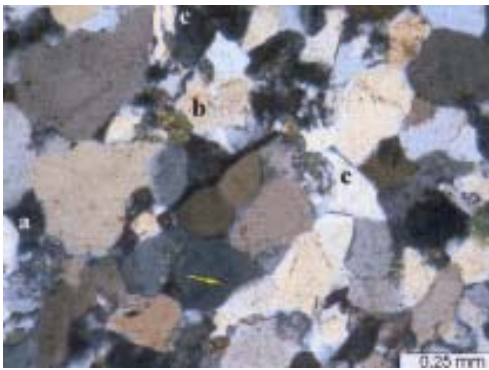
2.1 Caracterización geológica y física de los agregados pétreos.

Agregados gruesos.

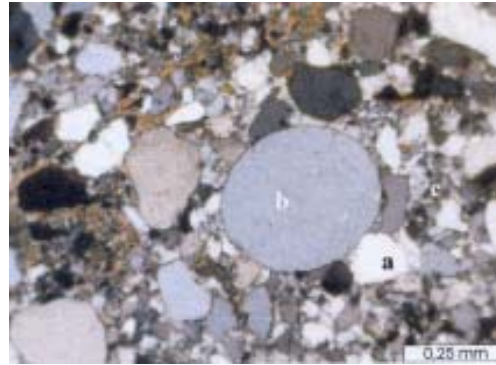
Para la caracterización de los agregados, se describió el marco geológico de ubicación de las diferentes unidades rocosas que suministran los materiales pétreos a las canteras húmedas, ubicadas a lo largo del río La Caldera, donde se realizó el muestreo de estos agregados; posteriormente se realizó la caracterización mineralógico – textural mediante análisis macroscópico bajo lupa binocular y análisis petrográfico sobre cortes delgados con microscopio óptico de polarización.

Caracterización de agregados pétreos del río La Caldera

Descripción microscópica de cortes delgados en muestras tomadas de afloramientos rocosos la cuenca alta del Río La Caldera



Fotomicrografía 1. Nícoles x. (10x). Arenisca cuarzosa bimodal de grano mediano a fino. Granos de cuarzo monocristalino a) con inclusiones, b) y policristalino. c) Elevada redondez de la moda mayor.



Fotomicrografía 1. Nícoles x. (10x). Arenisca cuarzosa bimodal de grano fino. Granos de cuarzo monocristalino: lípidos (a), con vacuolas e inclusiones (b), policristalinos plutónicos (c), alargados (c'). Crecimiento secundario de cuarzo.

Descripción macroscópica de rodados del Río La Caldera, con lupa binocular de gran resolución



Foto 1. Rodado N°1



Foto 2. Rodado N° 2



Foto 3. Rodado N°3

Muestra N°1 Presenta textura muy apretada, sin poros, compacta, dura, con abundante cuarzo color gris amarillento, de grano fino, clastos redondeados con cemento silicio (no reacciona con HCl), en regular cantidad, escasos clastos de minerales oscuros posiblemente turmalinas, poca moscovita y re-

ducida presencia de feldespatos, se trata de una **arenisca cuarzosa**.

Muestra N° 2 Presenta granos de cuarzo de color pardo claro, subredondeados, escasa moscovita y minerales oscuros, la matriz es fina y cemento silicio, leve alteraciones de limonita posiblemente. Es una **Grauvaca**.

Muestra N°3 Roca dura muy compacta, es un agregado entrelazado muy apretado de granos de cuarzo anhedrales, no presenta porosidad, cemento silicio, no reacciona con HCl, con escasos y aislados minerales de color negro sin aureolas de alteración, posiblemente sea turmalina, escasa moscovita. Color blanco. **Cuarcita.**

Todos los clastos presentan un muy buen grado de redondeamiento, y con una esfericidad alta, son rocas muy duras y compactas en general, por su forma, dureza y libre de impurezas superficiales. En la primera ilustración se observa el tamaño de los rodados, para ello se colocó un regla graduada y una birome, se eligieron aquellos que por su tamaño permite un mejor manipuleo.

Geometría del agregado pétreo grueso

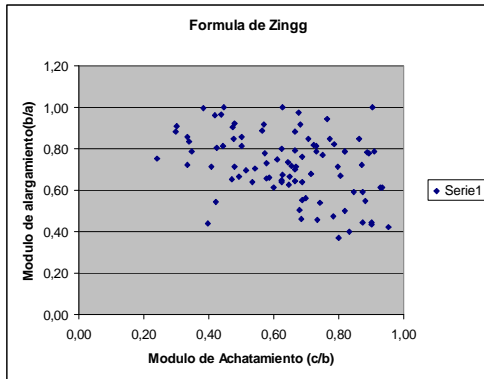


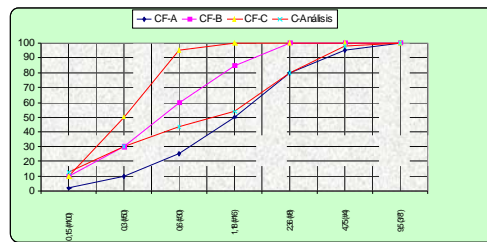
Gráfico de Zingg

De acuerdo a la geometría de los individuos, relación de ejes, las formas predominantes en el conjunto del material grueso corresponden a la equidimensional, tabular y prolar.

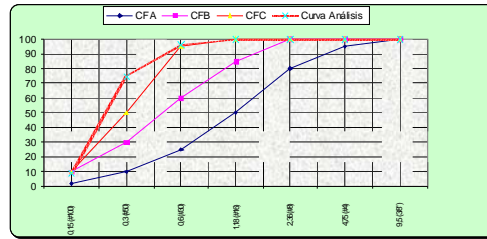
3. Caracterización física

Se determinaron diferentes parámetros físico-mecánicos mediante análisis granulométricos [3][4] de densidad y absorción [5][4]. Se utilizaron agregados del Río la Caldera.

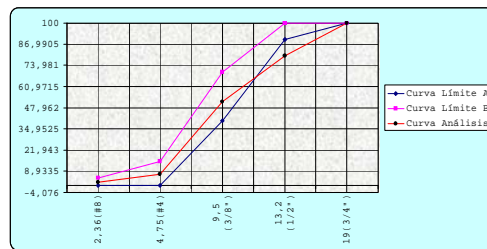
Curvas Granulométricas de agregados (Fino – Grueso – Filler)



Agregado Fino



Agregado Grueso



Filler

Densidad agregado grueso 2,80 (g/cm³) Absorción 0,7%

Densidad agregado fino 2.67 (g/cm³) Absorción 1,7%

Densidad Filler 2.54 (g/cm³)
MF = 1,20

Cemento: Se utilizó cemento portland fillerizado normalizado como CPF 40 de densidad 3,10.

De acuerdo al ensayo de Los Ángeles el desgaste del material es de 16.1% [9], valor que nos permite estimar la resistencia a compresión del agregado grueso en 64 Mpa según [10].

Aditivo: Se utilizó un aditivo superfluidificante a base de éteres policarboxílicos, de densidad 1,09 y contenido sólido de 35,5%.

Dosificación de HAC

Cemento (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Canto Rodado (kg/m ³)	Superfluidificante (kg/m ³)
390	135	450	490	780	5

Resultados

En este trabajo se utilizó el método basado en el ajuste previo de morteros para el diseño de HAC [11] [12] [13] [14].

1. Del hormigón en estado fresco.

Se realizaron ensayos de extendido T50, J-Ring, Caja L y Embudo V [11] obteniendo los siguientes valores que se encuentran dentro de los límites de autocompactabilidad.

T50 (s)	T50 (mm)	J-ring (s)	J-Ring (mm)	E V (s)	Caja L (s)	Caja L(h1/h2)
5	730	6,8	715	16	9	0,81

2. Del hormigón en estado endurecido.

Se moldearon probetas cilíndricas de hormigón [7] y luego de desmoldarlas se ensayaron a compresión a 7 y 28 días [8] obteniendo los siguientes valores $f'c$ (Mpa) 22,1 (7 días) y 39,8 (28 días).

Módulo de Elasticidad del Hormigón E (Gpa) 34,7.

Discusión

Consideraciones sobre las observaciones en rodajas de hormigón:

Las probetas de hormigón se cortaron en rodajas para observación con lupa binocular de diferentes aumentos, se hicieron cortes delgados para una mejor observación.

En la lupa binocular con un aumento de 50 y con el uso de microscopio óp-

tico de polarización MOP, se pudo apreciar interfases nítidas en todos los agregados entre el mortero y cada uno de los elementos, notándose en detalle que en los elementos que presentan mayor angularidad en su superficie, la adherencia entre el mortero y los mismos, una interpenetración, cuyo límite adquiere una forma «suturado», que se asemeja a una soldadura eléctrica, en cambio cuando los elementos del agregado grueso son redondeados la línea de contacto es regular y no presenta interpenetración a pesar que la adherencia es buena.

No se observaron poros en el mortero por lo que seguramente la permeabilidad será muy baja. Otro hecho, que al ser un hormigón de reciente elaboración no registra reacciones entre el mortero y el agregado pétreo, hecho que se espera no se produzca con el tiempo dada la característica intrínseca que presentan los mismos.

Conclusiones

1. Los agregados pétreos mayoritariamente son del tipo cuarcitas o areniscas cuarzosas muy bien cementadas con sílice lo que le confiere una gran dureza, cohesión y consecuentemente una buena resistencia a los esfuerzos.

2. Presentan un elevado grado de redondeamiento lo que se traduce en el hormigón con marcadas líneas de interfase con el mortero.

3. En menor medida se presentan agregados angulosos, estos últimos pre-

sentan un mayor grado de interpenetración con los morteros.

4. En ambos casos presentan buena adherencia con el mortero, de acuerdo a lo observado con la lupa binocular de hasta 50 aumentos.

5. Debido a las características de la cuenca y a la dinámica propia del río la caldera y sus afluentes permite una buena selección de los agregados pétreos para su utilización en hormigones de este tipo.

6. Debido a las características climáticas de la región con un período marcado de lluvias de noviembre a marzo y que el mismo llega valores entre 600 a 700 mm anuales en promedio permite que en general los hormigones en relación a sus agregados pétreos no presente reacciones adversas al mismo.

Si bien son necesarios mayores estudios, los datos proporcionados por otros autores [1] [11] [12] [13] [14] y las experiencias recolectadas en este trabajo, permiten establecer que los agregados pétreos estudiados son aptos para HAC.

Es importante tener en cuenta que la durabilidad del hormigón puede verse afectada no solo por la resistencia de los agregados gruesos, sino también por la presencia de los minerales potencialmente reactivos, en consecuencia resulta de suma importancia seguir estudiando el comportamiento de los agregados que se producen en la región, ya que podrían manifestar reacciones expansivas, afectando la resistencia y durabilidad de los HAC.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los laboratorios de las Facultades de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta y a la Secretaría de Minería de la Provincia de Salta.

Referencias

1. F. Locati, Oshiro A., Positieri M., Baldo E. Triturados pétreos de las Sierras Chicas de Córdoba de canteras localizadas entre Alta Gracia y Villa Allende: caracterización y respuesta en hormigones para pavimentos de habilitación temprana. Facultad Regional Córdoba-Universidad Tecnológica Nacional.
2. C. Bassi. Modelación numérica en el dren horizontal del río Wierna Departamento La Caldera prov. Salta. Universidad Nacional de Salta, 2002.
3. IRAM 1627. Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones, 23 pp, 1997.
4. CIRSOC 201 (Proyecto en trámite de aprobación). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), del Sistema INTI, 2005. <http://www.inti.gov.ar/cirsoc/>
5. IRAM 1533. Agregados gruesos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua, 11pp, 2002.
6. IRAM 1531. Áridos gruesos para Hormigones de Cemento Pórtland, 13 pp, 1994.
7. IRAM 1534. Hormigón de cemento pórtland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorios, 19 pp, 1985.
8. IRAM 1546. Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión, 6 pp, 1992.
9. IRAM 1532. Agregados gruesos. Método de ensayo de resistencia al desgaste con la máquina «Los Ángeles», 12 pp, 2000.
10. A. Kiliç, C.D. Ati^o, A. Teymen, O. Karahan, F. Özcan, C. Bilim, M. Özdemir. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30, 290-296, 2008.
11. EPG 2005. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use. May 2005.pdf
12. Tobes, J. M., Giaccio, G., Zerbino R., «Diseño de hormigones autocompactables: efecto del volumen de la pasta y granulometría de la arena», *Revista Hormigón* 44, pp. 39-49.
13. EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures), 2002.
14. S.K. Al-Oraimi, R. Taha, H.F. Hassan. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 20, 499-503, 2006.