

LA DURABILIDAD DE LOS BASALTOS DE LA MESOPOTAMIA EN LOS HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND

Fabian A. Avid¹, Gerardo Paez², Jose Cosentino¹ y Jorge D. Sota¹

¹ GIICMA- Universidad Tecnológica Nacional, FR Concordia. Salta 277, Concordia
Tel. 02215250753- Email jdsota@gmail.com.ar.

² INREM, Universidad Nacional de La Plata.

Palabras clave: basalto, RAS, hormigones, arcillas, durabilidad, canteras

RESUMEN

El trabajo desarrolla algunas consideraciones del comportamiento de los basaltos frente a los métodos de control de la reacción álcali-sílice para su uso en hormigones de cemento portland. Las mismas son tendientes a determinar la factibilidad del uso de triturados basálticos para ser usadas en mezclas de hormigón respondiendo a un diseño de durabilidad que permita suponer un comportamiento adecuado frente a las exigencias de la obra; enfocando la investigación, en el análisis y evaluación de potenciales reacciones deletéreas que se dan entre los agregados y los álcalis del cemento. En este trabajo se estudiaron las canteras en explotación en la mesopotamia Argentina, se analizan los resultados obtenidos de la norma IRAM 1674 y los estudios petrográficos, a la vez que se complementan con observaciones de microscopio óptico con cortes delgados y de SEM. Los resultados indican en primera instancia que no todos los métodos son idóneos para calificar este tipo de agregado. En los casos de barras de mortero con fisuras visibles a ojo desnudo, el volumen de geles observado mediante el examen por microscopía electrónica no se corresponde con las tasas de expansión que se verifican. En este caso la evaluación por expansión no solo se debe adjudicar a la RAS sino también al contenido de arcillas en los espacios intersticiales de la roca en un medio altamente alcalino y en presencia de la hidrólisis de los silicatos de aluminio.

INTRODUCCION

Las erupciones volcánicas contemporáneas con la fragmentación del supercontinente Gondwana dieron origen a una acumulación lávica con un espesor total original de aproximadamente 1700 metros. La potencia de las coladas individuales varía desde aproximadamente 1m hasta más de 70 metros (Melfi et al., 1988). El contacto entre las coladas está la mayoría de las veces, señalado por una brecha con fragmentos de basalto y cuarcita, engarzados en una matriz vítrea con cantidades variables de arena.

La notable extensión areal de las coladas, verificada en estudios de correlación geológica para varios proyectos hidroeléctricos indica la baja viscosidad de los flujos basálticos. La observación detallada de las coladas individuales, en especial aquellas con varias decenas de metros de potencia, permite advertir una zonación vertical, tanto textural como composicional. Dicha zonación significa a la vez una referencia, que determina los niveles de explotación en cantera con roca de mejor calidad geotécnica para su utilización como agregado o enrocado.

La reacción álcali-sílice se observa, en el litoral argentino, con frecuencia en hormigones que contienen agregados de canto rodado en su constitución. También hay algunas manifestaciones en hormigones con roca basáltica, aunque estas no son las más comunes. Las grandes obras construidas con basalto como agregado grueso en los hormigones de cemento portland mantienen en servicio un buen comportamiento (Batic y Sota, 2012; Milanesi, C.A. 2008)

En el último tiempo y en razón de encarar algunas obras viales de importancia se trabajó con basaltos para el hormigón de los pavimentos de la carpeta de rodamiento. Comenzando el cuestionamiento de los mismos a la luz de los resultados obtenidos en los ensayos aplicando la Especificación IRAM 1674.

Con relación a los agregados basálticos, hay dos parámetros cercanamente vinculados con la RAS que deben ser analizados. El primero de ellos es la heterogeneidad textural y mineralógica, la composición y la paragénesis mineral con referencia al nivel estratigráfico de las coladas. En muchos casos estas características no son identificadas al estudiar los diferentes bancos de canteras. El segundo aspecto que requiere atención es la naturaleza y distribución de los minerales secundarios derivados de la alteración de las paragénesis primarias.

PARAGENESIS Y ALTERACION DE LOS BASALTOS

La sección superior de cada colada está formada por basalto de color castaño grisáceo a gris claro, de grano fino a muy fino, vesicular y/o amigdaloides con mayor participación de mesostásis vítrea. Estas características texturales son resultado del rápido enfriamiento y descenso de la presión al producirse el derrame en superficie. La parte central de las coladas está constituida por basalto denso, con colores comprendidos entre el gris oscuro a negro. La granulometría es mediana, ocasionalmente gruesa, aunque tiende a ser de grano fino hacia la base.

El mineral más abundante es la plagioclasa (40%-65%) y composición comprendida por lo general, entre An_{40} – An_{70} . Evidencian poca alteración, y cuando se presenta se localiza en el borde de los cristales, clivajes y fracturas. La alteración de las plagioclasas es fundamentalmente arcillosa. Los minerales máficos son abundantes con predominio de piroxeno (10%-25%) principalmente en su variedad augita y pigeonita con grados variables de desferrización y cloritización. Con respecto a la olivina, que es el primer mineral máfico en formarse en el curso de la cristalización del magma, su participación puede ocasionalmente superar 15% en la parte masiva de las coladas pero rara vez excede 5% hacia el techo y frente de las mismas.

Es conveniente analizar con mayor detalle la paragénesis del par olivina-piroxeno ya que la misma tiene influencia en el potencial reactivo álcali-sílice de los basaltos mesopotámicos. Estas rocas efusivas, que se clasifican como basaltos tholeíticos, están sobresaturadas con respecto al SiO_2 . Teóricamente no deberían contener olivina, pues hay suficiente sílice en el magma como para convertirla en piroxeno. En ocasiones, sin embargo, el rápido enfriamiento de la lava interrumpe la reacción y las olivinas originalmente formadas permanecen. En estas circunstancias, el exceso de sílice queda atrapado en el magma residual que pasará, en última instancia, a formar la mesostásis vítrea. Este material intersticial ha sido identificado en los sistemas basálticos como un residuo con afinidades graníticas (composición ácida y contenido de sílice de 60-75%, [Lambert, et. al.(1896), Hoover, et.al(1896) y Shelley, D]. Ello es consistente con la presencia de cuarzo, ópalo, epidoto y en ocasiones feldespato K en los intersticios ubicados entre los minerales primarios (olivina, piroxeno y plagioclasa) producto de la albitización de las plagioclasas y generalmente asociado con óxidos de hierro y titanio, Figura 1. Esta asociación ha sido también citada por Marfil et al [Marfil, et al 2010] para basaltos de la provincia de Entre Ríos.



Figura 1: Basalto de Entre Ríos

Los basaltos de la Mesopotamia muestran reactividades medias a elevadas en los ensayos acelerados. En comparación, los agregados basálticos de la región patagónica y provincia de Córdoba, tienen respuesta inocua en los mismos ensayos. Estos últimos son del tipo olivínico, debido a la abundancia de este mineral en su composición, y resultan infrasaturados con respecto al SiO_2 , situación que necesariamente se verá reflejada en la composición del fluido residual.

Cuando el magma alcanza la superficie bajo la forma de lava, los gases contenidos escapan, aumentando la viscosidad de la mezcla que solidifica rápidamente bajo la forma de vidrio o de agregados criptocristalinos. La consecuencia fisicoquímica de este proceso es un aumento temporal de la temperatura que se suma a la violenta oxidación de los gases. Los conductos de escape gaseoso determinan la formación de estructuras vesiculares hacia el techo de la colada. Cuando estas soluciones químicamente activas producen cambios en la roca circundante, alterando los minerales primarios y dando origen a neominerales, se habla de alteración deutérica. La alteración deutérica es característica en las rocas volcánicas, y constituye otro parámetro a tener en consideración cuando se evalúa el potencial reactivo (RAS) de los agregados basálticos.

Los minerales secundarios producto de la acción deutérica son fundamentalmente esmectitas y zeolitas. En estos mecanismos de alteración, las fases primarias más sensibles a la disolución y reemplazo por minerales arcillosos son las olivinas y la mesostásis vítrea [Schenato, et al. 2003].

Ocasionalmente se ha postulado que la alteración arcillosa, fundamentalmente montmorillonítica, es consecuencia del intemperismo. Sin embargo, numerosos estudios de detalle de las características petrográficas y petrológicas de coladas basálticas de la Formación Serra Geral y del Grupo Drakensberg en Sudáfrica [Sumner, et al. 2009] indican, en forma inequívoca, su vinculación con eventos de alteración deutérica o reacciones metamórficas de bajo grado durante el enfriamiento de las coladas.

Davidson [Davidson,] postuló tres tipos de alteración deutérica: arcillosa, carbonática y zeolítica. Un tipo adicional de acción deutérica está representada por los fluidos mineralizantes que percolan en la roca y la alteran. Los productos derivados constituyen las venillas y el relleno de cavidades vesiculares.

Algunas asociaciones mineralógicas representativas fueron descritas por Iñiguez [Iñiguez, A.M. 1977.], quien además de montmorillonita cita la presencia de celadonita, nontronita,

saponita, cuarzo y calcita, y por Hayase, K [Hayase et.al 1975] que indica la presencia de estilbita y heulandita en los basaltos de Ayuí.

La hidratación del espacio interlaminar es una propiedad característica de las esmectitas y una consecuencia de cargas eléctricas en su superficie. La naturaleza de dichas cargas en el borde de las láminas de arcilla depende del pH del medio. En un ambiente alcalino como el de la solución de OHNa utilizada en el ensayo de la barra de mortero, la superficie de borde adquiere cargas negativas. Estas cargas eléctricas se compensan con la entrada de cationes de carga opuesta en el espacio interlaminar. La elevada concentración de Na⁺ en la solución hace que se convierta en el principal catión de intercambio.

Dado que las cargas de borde son débiles, el ión Na puede ser intercambiado por los iones positivos de la molécula de agua. En el proceso de hidratación, las cargas positivas de los átomos de hidrógeno de la molécula de agua se adhieren a la superficie de la esmectita, pudiendo sumarse varias capas sucesivas a la primera, expandiendo su volumen a medida que se agrega más agua. La montmorillonita sódica puede expandirse hasta aproximadamente 15 veces su volumen.

Por lo anterior se infiere que con relación a los agregados basálticos, hay dos parámetros cercanamente vinculados con la RAS que deben ser analizados. El primero de ellos es la heterogeneidad textural y mineralógica, la composición y la paragénesis mineral con referencia al nivel estratigráfico de las coladas.

En muchos casos estas características no son identificadas al estudiar los diferentes bancos de canteras. El segundo aspecto que requiere atención es la naturaleza y distribución de los minerales secundarios derivados de la alteración de las paragénesis primarias.

METODOLOGIA DE TRABAJO Y RESULTADOS

Se estudiaron canteras de basalto, de Entre Ríos, Corrientes y Misiones. En la cantera de Entre Ríos se estudiaron dos niveles de explotación, en una de Corrientes cuatro niveles de una misma colada y en las dos restantes una de Corrientes y otra de Misiones solo un nivel.

Los estudios petrográficos clasifican a estos basaltos como Basaltos Tholeíticos.

A una de las muestras se le realizaron estudios complementarios, y sobre la misma se orientan las conclusiones preliminares.

La reactividad potencial frente a la RAS, se determinó mediante el método acelerado de la barra de mortero, Especificación ASTM C 1260 (IRAM 1674) los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.

Las probetas ensayadas muestran a los 14 días expansiones potencialmente deletéreas, superando ampliamente el límite de 0,10 % establecido por la norma. Este comportamiento resulta consistente con resultados similares citados en la bibliografía para los basaltos de la Formación Serra Geral.

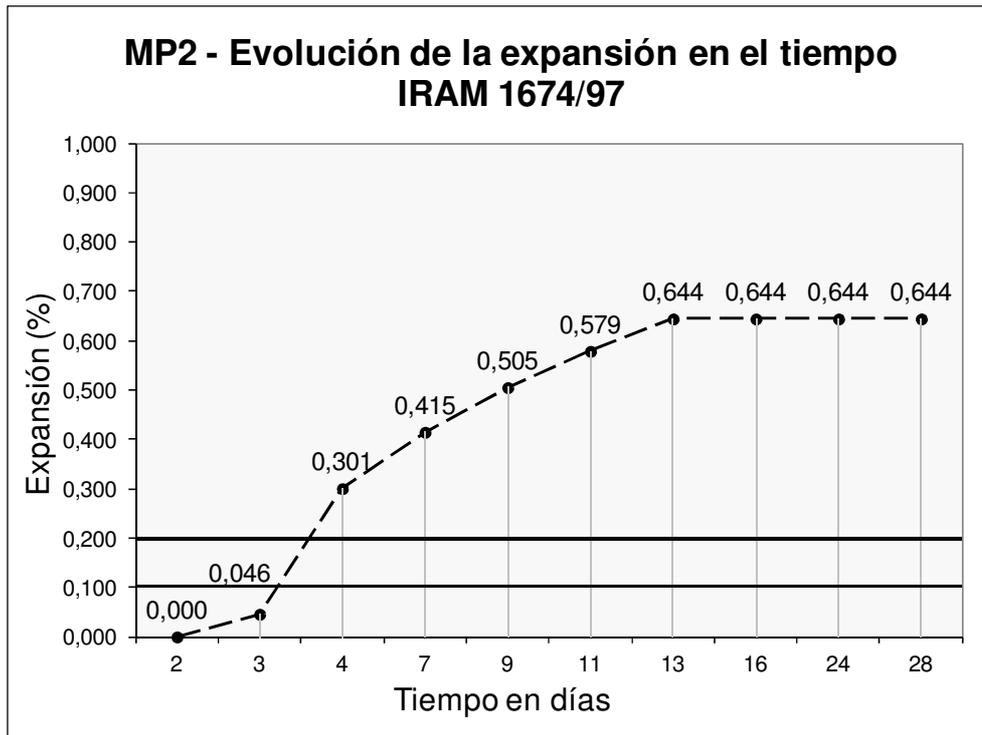


Figura 2 – Muestra MP2-Cantera de Basalto

Transcurrido el período de inducción, y en correspondencia con la edad de 7 días, se comienzan a observar fisuras longitudinales y transversales en alguno de los elementos prismáticos, las que continúan expandiéndose en el transcurso del ensayo.

La muestra tiene valores de expansión a los 14 días superiores a 0,60 %, la aparición de fisuras resulta coherente con la generación de tensiones de tracción al interior de las barras de mortero, Figura 3.



Figura 3: Fisuración en la barra de mortero

Sobre muestras seleccionadas de las barras de mortero se efectuaron observaciones mediante barrido con microscopio electrónico, para examinar con mayor detalle la naturaleza de las

fisuras, utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental ESEM. FEI, Modelo Quanta 200 equipado con un Sistema de Microanálisis por Dispersión de rayos X (EDAX).

El Diagrama de Edax muestra la composición de los geles observados en las barras estudiadas.

La Figura 4 muestra la presencia de geles, pero en cantidad inferior a la esperable atento a las expansiones verificadas, y con la particularidad que los mismos ocupan casi exclusivamente los poros en el mortero. En pocos casos se evidenciaron fisuras, de corto recorrido, con relleno de geles irradiando de los poros. Tampoco fue posible identificarlos en la superficie de las fracturas desarrolladas en las barras de mortero.

En los casos de barras de mortero con fisuras visibles a ojo desnudo, el volumen de geles observado mediante el examen por microscopía electrónica parece no corresponderse con las tasas de expansión que se verifican.

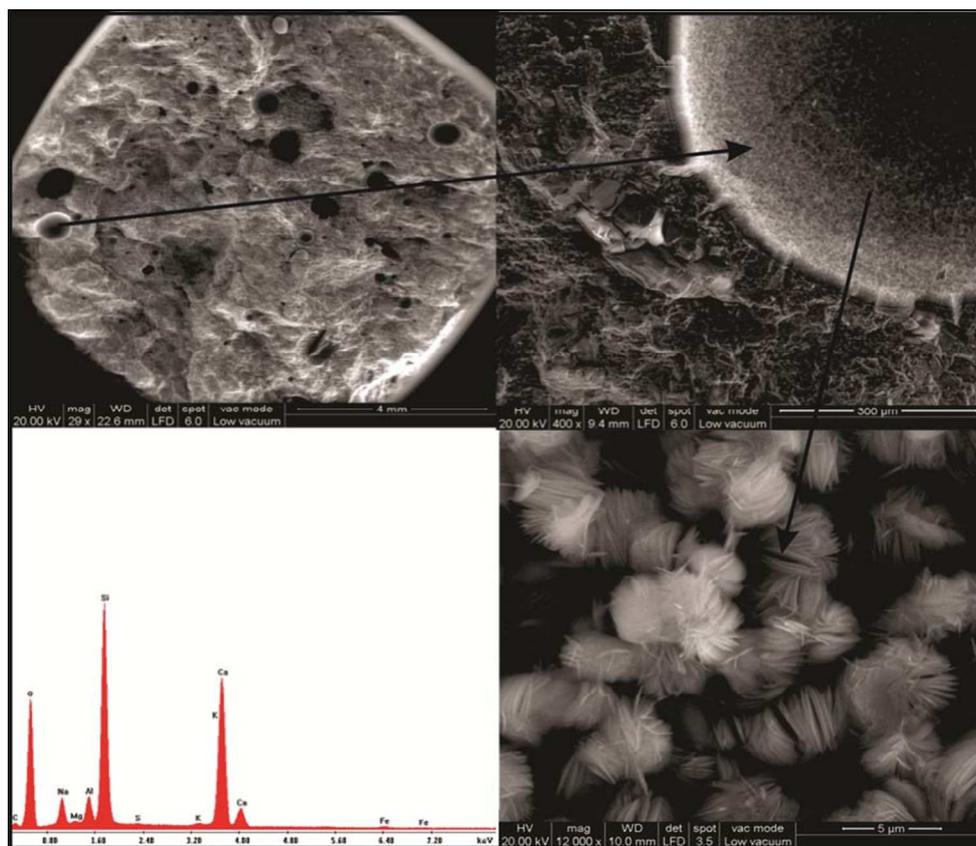


Figura 4: Secuencia de imágenes ESEM. Arriba a la izquierda se aprecia un fragmento de la barra de mortero con poros rellenos de gel. A la derecha un detalle del poro con pequeñas fracturas de corto recorrido irradiando del mismo. Abajo gel en roseta.

Sobre la misma muestra (MP2) se realizaron cortes delgados y Difracción de rayos X.

La muestra estudiada corresponde a una roca volcánica de grano fino, compuesta por una pasta afanítica de coloraciones castaño rojizas donde no se reconoce la presencia de fenocristales a ojo desnudo. Adicionalmente, y a escala de muestra de mano, la pasta se caracteriza por la presencia de una serie de halos concéntricos de coloración rojiza, producto de alteración.

Al microscopio se observan cantidades muy escasas de micro-fenocristales de plagioclasas y clinopiroxenos (augita) de coloraciones castaño verdoso. Los microfenocristales de plagioclasa se caracterizan por un moderado grado de alteración a arcillas de tintes verdosos (posiblemente esmectitas y/o illita), que se reconocen como parches en las partes centrales de los cristales.

La pasta afanítica se caracteriza por una textura intergranular compuesta por un entramado de microlitos de plagioclasas, clinopiroxenos (mayormente augita, aunque se reconocen cantidades muy subordinadas de pigeonita) y opacos. Los minerales máficos y los opacos se encuentran alterados a óxidos de hierro que tiñen la pasta de la roca siguiendo patrones concéntricos. Finalmente, y de manera intersticial, se reconocen trazas de cuarzo anhedral desarrollado entre los cristales de la pasta. Por sectores se observaron parches de arcillas (posiblemente esmectitas) desarrollados de manera intersticial entre los microlitos de la pasta (Figura 5), estas arcillas probablemente representen porciones alteradas de vidrio volcánico alterado.

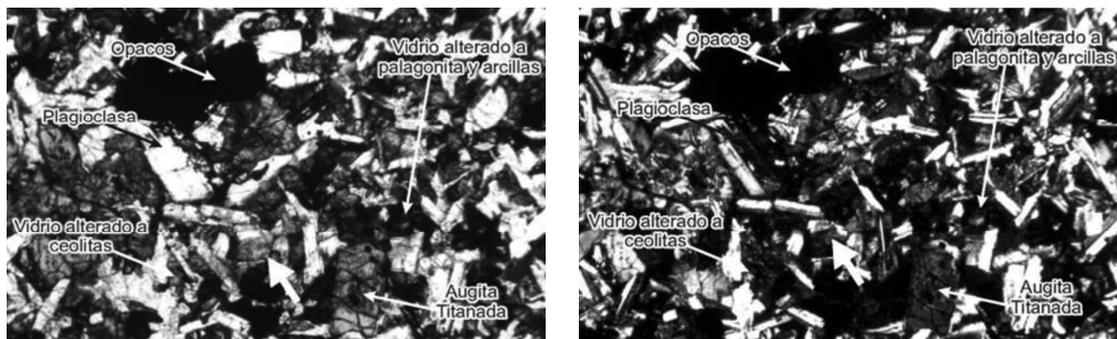


Figura 5 Vista general de las fracturas rellenas de arcillas que recorren parte de la pasta de la muestra (fotos con y sin nicoles respectivamente, x20 Aumentos).

Finalmente, la muestra se caracteriza por la presencia de una baja proporción de cavidades amigdaloides con geometría sub-circular (Figura 6), que se encuentran rellenas por minerales félsicos, mayormente cuarzo masivo y/o con extinción ondulosa (con ángulos de entre 8° y 30°), que es acompañado por cantidades subordinadas de óxidos de hierro y arcillas (posiblemente esmectitas y/o illita).

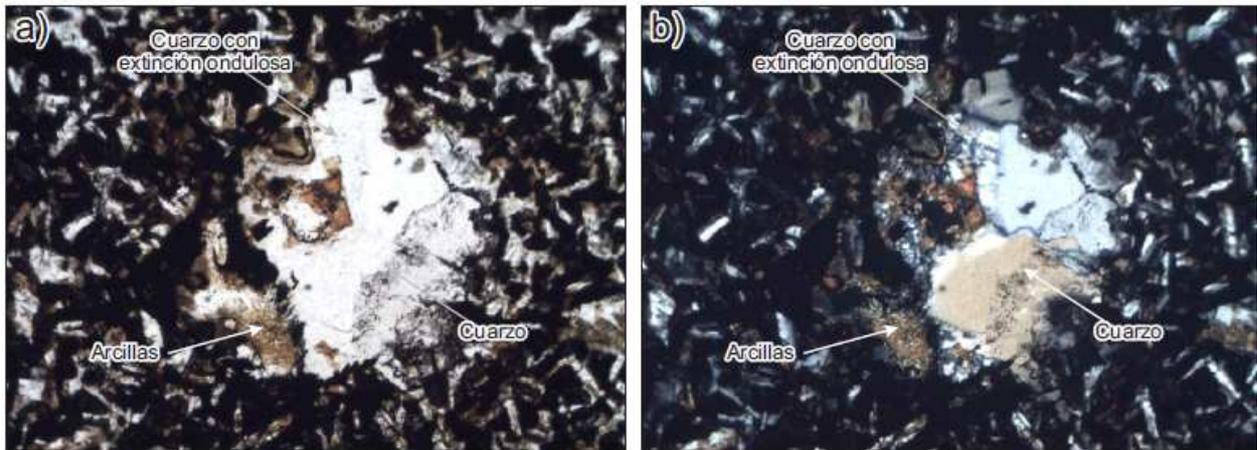
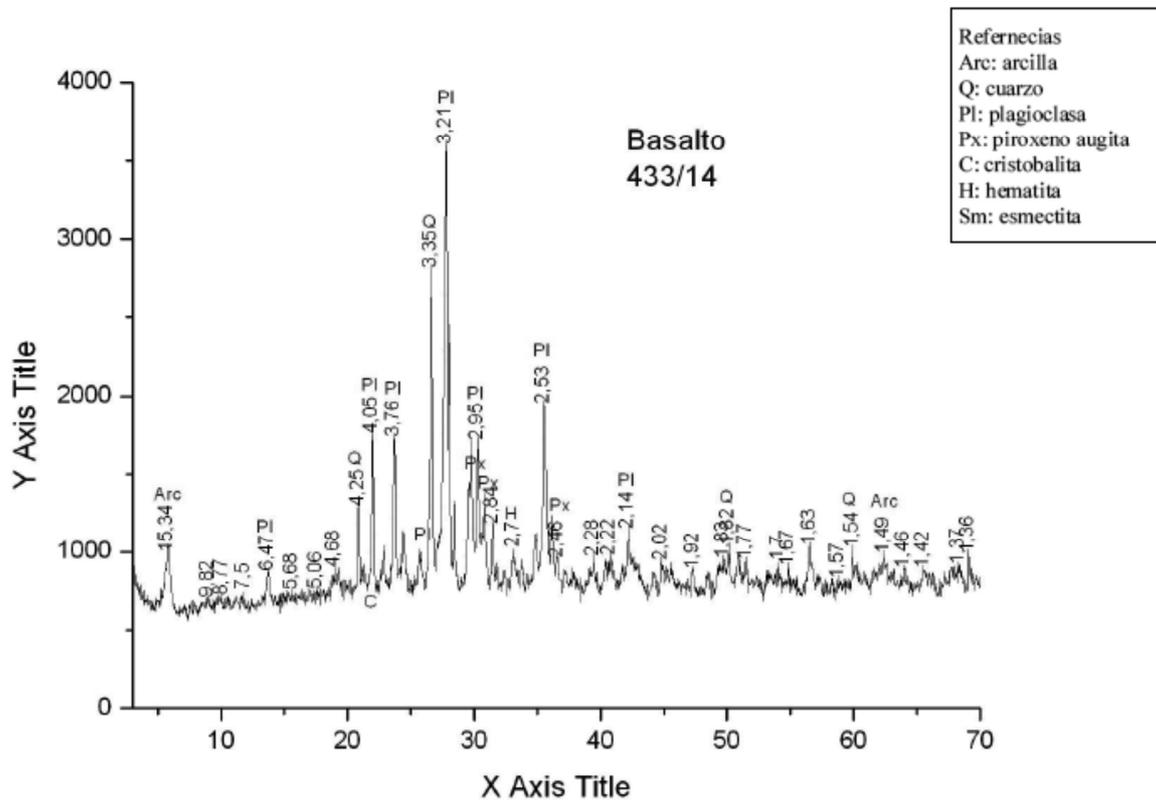


Figura 6. Amígdala rellena por cuarzo (masivo y con extinción ondulosa) y argilominerales, posiblemente esmectitas y/o illita. Foto con nicoles paralelos y con nicoles cruzados (x50 aumentos).

El difractograma se realizó en Goniómetro Philips 3020 con un controlador PW 3710, empleando radiación Cu-K α , filtro de Ni, 40 kV-20 mA. No se utilizó monocromador. El barrido fue realizado entre 5° y 80° con paso de 0.04° y 2 seg./paso.



Valores obtenidos del Difractograma: Cuarzo (SiO $_2$) 7%, Plagioclasa (feldespato cálcico, (CaNa)(Si,Al)4O8): 42%, Sanidina (Feldespato potásico, K(Si3AlO8)): 17%, Augita (Clinopiroxeno) 15%, Esmectita: 13%, Hematita (Fe $_2$ O $_3$): 7%, Cristobalita; trazas

Figura 7. Difractograma DRX MP2.

Estos estudios ponen en evidencia la existencia de arcillas en porcentajes, para el caso de la muestra analizada, superiores a 5%, atribuibles a formaciones deutéricas.

Los difractogramas fueron analizados con el programa FULLPROF de refinamiento estructural a través del método de Rietveld. El método de Rietveld de refinamiento estructural es un método matemático para ajustar un difractograma experimental con uno teórico realizado en base a un modelo cristalográfico y a parámetros experimentales. Se trata de lograr minimizar la diferencia matemática entre las intensidades observadas y las calculadas, punto a punto sobre todo el espectro.

Cabe aclarar que este resultado no tiene en cuenta la presencia de fases amorfas o no detectadas por DRX como ser la materia orgánica o materiales vítreos. El error estadístico del método analizado sobre patrones de muestras naturales, se ha establecido en ($\pm 5\%$ en peso). (Figura 7).

Finalmente a la muestra se la ensayó con diferentes tipos de cementos con adiciones y expuestas en agua sin adición de hidróxido de sodio.

En la Figura 8 se muestran los resultados que indican que la presencia de adiciones que actúan reduciendo la alcalinidad, mejora la performance del basalto, reduciendo su expansión. Si bien la reactividad potencial álcali-sílice que se constata en los basaltos mesopotámicos ha sido demostrada fehacientemente, se plantea la posibilidad, que en algunos casos, no toda la expansión medida según la Norma IRAM 1674, sea atribuible a la RAS.

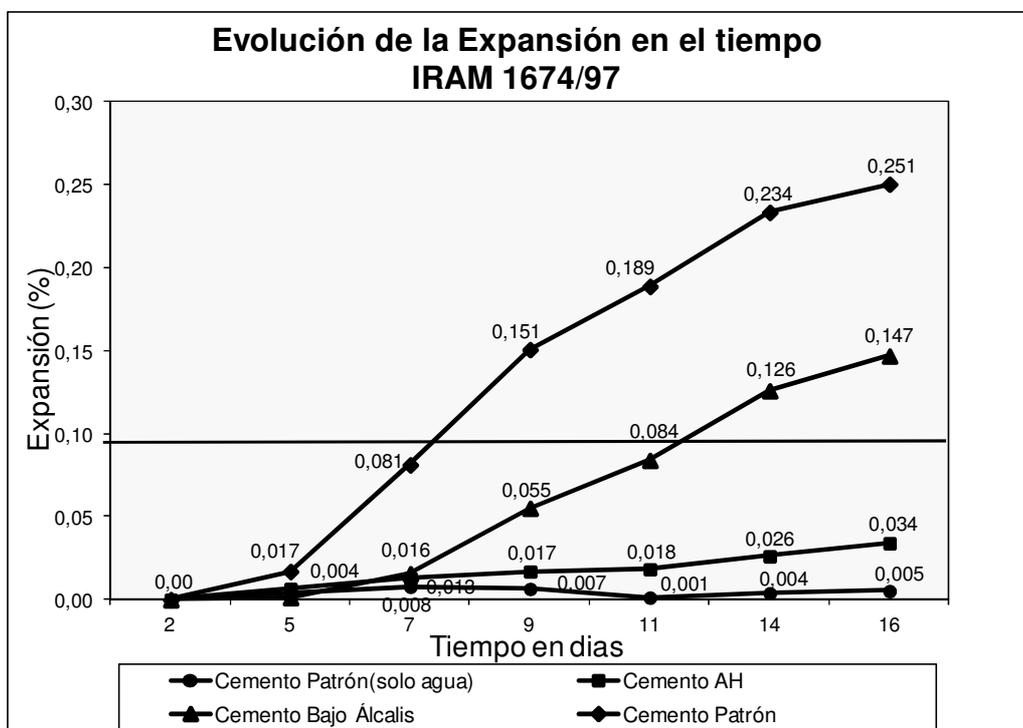


Grafico 7 – Diferentes tipos de cemento

CONSIDERACIONES GENERALES

De estos primeros estudios realizados sobre las muestras de basalto se pueden inferir las siguientes consideraciones:

- a) La expansión medida por la Especificación ASTM C 1260, no debe ser atribuible totalmente a la RAS.
- b) La expansión de las arcillas, suma a la expansión medida en un medio altamente alcalino y en presencia de la hidrólisis de los silicatos de aluminio.
- c) La descompensación eléctrica en las partículas de arcilla y debido al carácter de la estructura dipolar de las moléculas de agua, son factores que contribuyen a la creación de la doble capa difusa eléctrica, que cubre a dichas partículas. Esta doble capa está compuesta por una capa de aniones (carga negativa), situada en la superficie de la partícula rodeada por una capa exterior de carga opuesta (cationes). Esta doble capa se denomina, usualmente, como capa dura de agua o capa de agua adsorbida. El espesor de la doble capa es de 400 Å y crece en función directa con el aumento de la superficie específica de la arcilla.
- d) Las adiciones reducen la expansión al diluir el contenido de hidróxido de calcio que aporta el cemento en las reacciones de hidratación.

BIBLIOGRAFIA CITADA EN EL TEXTO

Batic, O.R. y Sota, J.D. 2012. "Reacciones Deletéreas Internas en Durabilidad del Hormigón Estructural". Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Segunda Edición, pp.157-216.

Davidson, W.H. "The influence of constitution of the engineering properties of crushed volcanic breccias". Proceedings of the 6th Australian Road Research Board Conference 6 (5), pp 70-90.

Hayase, K., Dristas, J.A., Rimoldi, H. 1975 "Presencia de saponita rica en hierro asociada con celadonita, en basaltos de Ayuí Dique de Salto Grande". V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Buenos Aires Tomo III. pp 51-71.

Hoover, D.J., Murphy, W.M. 1989. "Quench fractionation in Columbia River basalt and implications for basalt-ground water interaction. In: Volcanism and Tectonism in the Columbia River Flood-Basalt Province, Boulder, CO". Geological Society of America, Special Paper 239, pp 307-320.

Iñiguez, A.M. 1977. "Influencia de los minerales secundarios en el comportamiento geotécnico de los basaltos del Río Uruguay". Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. 3° Reunión Técnica, Tomo 4, pp.33-0-33-9.

Lambert, R.St.J., Marsh, L.K., Chamberlain, V.E. 1989. "The occurrence of interstitial granite glass in all formations of the Columbia River basalt group and its petrogenic implications, In: Volcanism and Tectonism in the Columbia River Flood-Basalt Province, Boulder, CO". Geological Society of America, Special Paper 239, pp 321-332.

Marfil, S., Batic, O., Maiza, P., Greco, L., Falcone, D. 2010. "Comportamiento de rocas basálticas de las provincias de Corrientes y Entre Ríos frente a las reacción álcali-sílice". VI Congreso Uruguayo de Geología, Montevideo, República del Uruguay.

Melfi J., E.M. Picirillo and A. J.R. Nardy. 1988. "Geological and Magmatic Aspects of the Paraná Basin an Introduction, in: The Mesozoic Flood Volcanism of the Parana Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects". IAG-USP, pp.1-13.

Milanesi, C.A. 2008. "Experiencias sobre la caracterización de algunos basaltos de la provincia de Corrientes frente a la Reacción Alkali-Sílice". III Congreso Internacional y 17ª Reunión Técnica AATH.

Schenato, F., Formoso. M.L.L., Dudoignon, P., Meunier, A., Proust, D.Mas. A.2003. "Alteration processes of a thick basaltic lava flow of the Paraná Basin (Brazil): petrographic and mineralogical studies". Journal of South American Earth Sciences 16, pp. 423-444.

Shelley, D. "Igneous and Metamorphic Rocks under the Microscope", Chapman and Hall, London, 445.
Sumner, P.D., Hall, K.J., van Roy, J.L., Meiklejohn, K.L.2009. "Rock weathering on the eastern mountains of southern Africa: Review and insights from case studies". Journal of African Earth Sciences, 55. pp 236-244.