

COMPORTAMIENTO DE HORMIGONES ELABORADOS CON DIFERENTES ÁRIDOS DE LOS ALREDEDORES DE MEDELLÍN

BEHAVIOR OF CONCRETES ELABORATED WITH DIFFERENT STONY AGGREGATES OF THE SURROUNDINGS OF MEDELLIN

JORGE IVAN TOBÓN

Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, jitobon@unal.edu.co.

ERIKA ÁNGEL

Ingeniero Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

VANESSA GÓMEZ

Ingeniero Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

Recibido para revisar 27 de Junio de 2006, aceptado 14 de Agosto de 2006, versión final 28 de Septiembre de 2006

RESUMEN: Se presentan las comparaciones en resistencia a compresión a edades de 3, 7, 28 y 101 días (según NTC-673); durabilidad y análisis petrográficos entre hormigones de 28 MPa de diseño, hechos con cemento Pórtland tipo I y áridos de cinco canteras diferentes de los alrededores de Medellín (rocas ígneas, metamórficas y depósitos aluviales). Los resultados de resistencia a 28 días mostraron que los valores más altos se obtuvieron con áridos de roca ígnea, haciéndose evidente, para este estudio, la influencia de la resistencia, rigidez y dureza del tipo de roca en las propiedades del hormigón.

La evaluación de durabilidad fue hecha comparando los testigos de hormigón elaborados con los materiales de cada cantera después de 28 días de curados. Encontrándose que los testigos elaborados con áridos de CC presentaron mejor estabilidad ante los agentes químicos, aún en concentraciones mayores, que los otros tipos de rocas.

El análisis petrográfico se hizo mediante el microscopio óptico de luz polarizada y SEM, sobre pulidos hechos de trozos de cilindros fallados a compresión a los 28 días, para comparar la relación entre la pasta de cemento, el árido grueso y el árido fino. Se encontró que las muestras con menores resistencias presentaron mayor cantidad de poros en la pasta y reacciones entre la pasta y los áridos.

PALABRAS CLAVE: Hormigón, Durabilidad, Resistencia a la compresión, Petrografía, Áridos.

ABSTRACT: This paper presents comparisons in compressive strengths to ages of 3, 7, 28 and 101 days (according to NTC-673); durability and petrographic analysis among concretes of 28 MPa of design, made with Portland type I cements and aggregates of five different quarries of the surroundings of Medellín (igneous, metamorphic rocks and alluvial deposits). The results of strengths to 28 days showed that the highest values were obtained with aggregates of igneous rocks, becoming evident, for this study, the influence of the strength, rigidity and hardness of the rock type in properties of concrete. The comparisons of durability were made in concrete cylinders elaborated with the materials of each quarry after 28 days of curing. Finding out that the cylinders elaborated with aggregates of CC presented better stability in front of the chemical agents, still in high concentrations that the other types of rocks.

The petrographic analysis included description under the optic microscope and in SEM, of probe made of cylinders fragments failed to compression to the 28 days, to compare the relationship between the cement paste, the thick and fine aggregates. It was found that the samples with smaller strengths presented bigger quantity of pores in the paste and reaction between the paste and the aggregates.

KEY WORDS: Concrete, Durability, Compression strength, Petrography, Aggregates.

1. INTRODUCCIÓN

La explotación de rocas ígneas, metamórficas y depósitos aluviales para hormigones y pavimentos es muy común en Medellín y sus alrededores. Para este estudio se tomaron muestras de cinco canteras (CC, SR, CON, AN e IND) de características geológicas diferentes, las cuales se describen a continuación de acuerdo con los trabajos hechos por varios autores [1, 2, 3, 4 y 5]:

Dunita de Medellín (CC)

Es una roca de color verde oliva a oscuro, a veces amarillenta en superficies de falla. Homogénea y finogranular. El mineral predominante es olivino magnésico y como accesorios cromita y magnetita. Los minerales de serpentina son los productos de alteración más comunes, predominando antigorita con cantidades menores de crisotilo y lizardita. Además, presenta lentes de serpentina, clorita y venas de carbonato. Los minerales fibrosos y carbonatos se consideran positivos para el hormigón. La roca está intensamente cizallada por efecto de fallas geológicas, de hecho no se utiliza explosivo en su arranque. Esto podría ser una desventaja en su uso en hormigones, pero las fisuras y microfisuras están bien cementadas.

Stock de Altavista (SR)

Es una roca ígnea intrusiva que varía desde porfídica hasta equigranular (fanerítica) composicionalmente andesitas, dioritas, tonalitas y gabros; en los bordes presenta facies gabroides y son comunes zonas de brecha, en los contactos con la anfibolita que lo rodea. Se encuentra parcialmente meteorizado y fresco. El color varía desde casi negro en los contactos hasta gris

Actualmente, la durabilidad del hormigón es tan importante para definir parámetros de diseño y elección de materiales como la resistencia a compresión esperada (f_c) [6 y 7]. A pesar de esto, son pocos los estudios que se refieren al ataque por agentes agresores en el hormigón, la mayoría se enfocan en ensayos de durabilidad de morteros o patologías. Popovic [7] reporta el

claro. Mineralógicamente está compuesto por plagioclasa, ortoclasa, cuarzo, hornblenda reemplazada por biotita y epidota. Los minerales accesorios más comunes son apatito, circón y óxidos de hierro y como productos de alteración sericita y caolín (poco convenientes) provenientes de los feldespatos y clorita-epidota de los máficos.

Depósitos aluviales del Río Medellín (CON y AN)

Son depósitos cuaternarios que están asociados al Río Medellín y sus afluentes. Este material está constituido por limos, arcillas, arenas (finas y gruesas) y gravas, conformados petrográficamente por dunitas, anfibolitas, gabros, dioritas y granodioritas principalmente. Recientemente se han realizado perforaciones para búsqueda de agua, encontrándose que muchas zonas tienen agua salobre (obteniéndose salinidades hasta de 25.000 ppm de cloruro), lo que exige que este material sea lavado antes de usarse como árido para el hormigón.

Gneis de La Iguana (IND)

Es una unidad metamórfica pequeña, localizada a la margen derecha de la Quebrada La Iguaná. En la roca predominando el cuarzo, plagioclasa (andesina sódica), microclina, epidota y biotita. Su intensa meteorización produce un saprolito rojizo o amarillo-rojizo de textura limo-arcillosa. En variedades más oscuras aparecen pequeñas cantidades de hornblenda. En esta unidad se desarrollan principalmente explotaciones de arena y arenilla.

En este proyecto se complementó el estudio de resistencia de los testigos de hormigones elaborados con áridos de diferentes canteras con análisis petrográficos y ensayos de durabilidad. cambio volumétrico de cilindros de hormigón ante agentes agresores, utilizando sulfato de sodio en concentraciones del 5% en peso y sometiendo las muestras después de 30 días de curado. La importancia del estudio de durabilidad de hormigones es verificar los posibles daños a estructuras en funcionamiento, lo cual no ocurre normalmente antes de 28 días

de colocación. Bajo esta premisa se decidió - en esta investigación- trabajar la durabilidad en el hormigón endurecido. Se resalta esto porque hay agentes que son más agresivos o solamente actúan sobre el hormigón fresco [11].

La procedencia del árido para hormigón interviene en las propiedades físicas y químicas de éste [9 y 10], ya que se ve influenciado por sus componentes y por las reacciones que se puedan presentar con el cemento, como puede ser la reacción álcali-árido [11].

Los procesos de deterioro del hormigón provocados por reacciones químicas están vinculados a interacciones entre los agentes del ambiente externo y a los constituyentes de éste. Las formas de ataque al hormigón se pueden clasificar en tres grupos: químico, físico y combinación de ambos. Los medios agresivos para el hormigón están caracterizados por suelos y aguas superficiales o freáticas que contienen sustancias que lo atacan químicamente [12], también por la manipulación de sustancias agresivas en la industria. En la Tabla 1, se presentan los más comunes y se resaltan los seleccionados para este trabajo.

Se escogieron tres productos químicos que presentaran diferentes efectos a distintas velocidades, como lo son el ácido clorhídrico, el cloruro de calcio y el sulfato de sodio, además por ser de uso común en el medio, fácil consecución y bajo riesgo de manipulación.

Ataque de sulfatos.

Las sales inorgánicas más comunes en el ambiente son los sulfatos, que son un riesgo para las estructuras de hormigón ya que producen cambios volumétricos y el deterioro prematuro de éstos. La condición más desfavorable es cuando están solubles en agua y en altas concentraciones.

Ataque por ácidos.

La acción de los ácidos inicia con la disolución de la capa de carbonatos presente en la superficie del hormigón (dada generalmente por

recarbonatación – reacción de la portlandita con el CO₂ del ambiente-), para continuar su ingreso por los poros y lixiviar compuestos internos, especialmente, el hidróxido de calcio mediante la reacción ácido-base [13].

Cloruros.

El principal efecto de los cloruros, en el hormigón endurecido, es la cristalización de sales dentro de sus poros, las cuales puede producir rupturas debidas a la presión ejercida. [14]. Varios autores, cuando no se producen en exceso, las consideran positivas porque ayudan a reducir la porosidad. De otro lado, el cloruro de calcio es usado como aditivo para acelerar el fraguado, pero solamente en hormigones sin refuerzo porque éstos facilitan la corrosión del acero.

La petrografía aplicada al hormigón endurecido proporciona información básica, como las características físicas y químicas del árido, de la pasta, y la interacción entre estos. Con estas técnicas se puede desarrollar un material que se adecue a las necesidades de diseño, certificando un buen desempeño del hormigón durante su vida útil, es decir, este método es una herramienta fundamental en el control de la calidad [15 y 16]. En la descripción petrográfica del hormigón endurecido se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Tamaño, forma y distribución de los áridos en la pasta.
- Grado de meteorización y fracturación de los áridos; si han reaccionado con la pasta circundante o se han alterado dentro del hormigón.
- Coloración de la pasta de cemento, definida fundamentalmente por el grado de hidratación.
- Presencia y naturaleza de vacíos y fisuras.
- Evidencia del ataque de sulfatos, tipos de ataque químico y reacciones álcali-árido,

si existen, y en circunstancias favorables una valoración de su severidad.

Tabla 1. Efectos en el hormigón de algunos productos químicos de uso común. [Tomado de 13]
Table 1. Effects of some chemical products of common use in the concrete. [Taken from 13]

Velocidad de ataque T° Ambiente	Ácidos Inorgánicos	Ácidos Orgánicos	Soluciones Alcalinas	Soluciones Salinas	Diversos
Rápido	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	-	Cloruro de Aluminio	-
Moderado	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de Sodio >20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de Mg Sulfato de calcio	Bromo (gas) Sulfito líquido
Lento	Carbónico	-	Hidróxido de Na (10-20%) Hipoclorito de Na	Cloruro de amonio Cloruro de Mg Cloruro de sodio	Cloro (gas) Agua de mar Agua suave
Mínimo	-	Oxálico Tartárico	Hidróxido de Sodio <10%* Hidróxido de Amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de sodio	Amoniaco (Líquido)

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño de la mezcla

El método usado por el American Concrete Institute [6], presenta resultados aceptables para hormigones simples elaborados con dos tipos de granulometría en los áridos (grueso y fino), de masa unitaria entre 2.000 kg/m³ y 2.500 kg/m³ y con requisitos de resistencia menores a 42 MPa, que es el caso aquí expuesto. La dosificación de las mezclas se hizo mediante el programa Tolva 1.0 [17], para un asentamiento de 80 mm y una

resistencia esperada (f'c) de 28 MPa. Se uso cemento Pórtland tipo I con Peso específico de 3,0

2.2 Definición del número de muestras Cilindros de resistencia

Se hicieron 60 cilindros o testigos de hormigón, en total para las cinco canteras, usando el material pétreo tal cual fue suministrado, para someterlos al ensayo de compresión a 3, 7, 28 y 101 días según la norma NTC 673 [18] (Fig. 1).



Figura 1. Diagrama de la cantidad de cilindros de resistencia a la compresión.

Figure 1. Diagram of the quantity of compression strength cylinders.

Cilindros de durabilidad:

Para las cinco canteras se obtuvieron 30 cilindros (Figura 2). A los cilindros sometidos a los agentes químicos en concentración del 20% y

10% en peso, se les hizo un control continuo de peso, hasta la edad de 101 días cuando fueron fallados a compresión.



Figura 2. Diagrama de la cantidad de cilindros de durabilidad.
Figure 2. Diagram of the quantity of durability cylinders.

2.3 Análisis petrográfico

Se escogieron fragmentos de los cilindros fallados a 28 días de curado, para la elaboración de las secciones pulidas tanto para microscopía óptica [19] como para la electrónica de barrido (SEM). A estos se les dio forma usando una cortadora de disco diamantado, lubricando con alcohol para evitar la hidratación en la pasta. Se buscaba identificar las causas de falla, verificar el contenido de poros presente, la calidad de la adherencia entre los áridos y la pasta y su grado de hidratación, además de detectar productos de neoformación (nocivas o no), entre otras características.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Cilindros de resistencia

Resistencia a 3 días: Los cilindros presentaron resistencias mayores a 16 MPa, a excepción de las muestras de AN (Figura 3).

Resistencia a 7 días: El aumento de resistencia promedio de CC entre los 3 días y los 7 días de curado no fue significativa (3%), comparada con los testigos fabricados con materiales de las otras canteras que en general fueron mayores al 14%. El material de la cantera SR, de roca ígnea, presentó un aumento de resistencia del 39%, siendo el mayor valor a esta edad (Figura 3).

Resistencia a 28 días: El incremento de resistencia promedio desde los 7 días hasta los 28 días de curado de las canteras fue la siguiente (Figuras 3 y 4):

- CC: 63%; siendo el mayor y el único que alcanzó los 28 MPa esperados según el diseño de mezcla, a pesar de que su material está altamente tectonizado o cizallado, esto

debido al cementante presente en las fracturas (carbonato de calcio)

- SR: 10%; alcanzó 27.5 MPa, muy cerca de la resistencia de diseño.
- IND: 18%, alcanzó los 26 MPa, cerca de la resistencia de diseño
- AN: 47%; aunque siguió siendo el menor de los valores.
- CON: 7%; aumento poco significativo a pesar de que presentó alta resistencia a edades tempranas.

Se lograron mayores resistencias promedio con áridos de roca ígnea que con los otros tipos de roca, haciéndose evidente la influencia de la resistencia, rigidez y dureza del tipo de roca en las propiedades del hormigón.

Resistencia a 101 días: Los cilindros de CC no siguieron ganando en resistencia después de los 28 días. Los de SR superaron los 28 MPa (resistencia esperada) llegando a 29,7 MPa, un aumento del 8% con respecto a la resistencia promedio a 28 días. Esto demuestra que después de 28 días de curado el hormigón sigue ganando resistencia. AN tuvo un aumento en su resistencia del 14% con respecto a los 28 días, pero aún así no alcanzó los 28 MPa de diseño. El hormigón elaborado con material de esta cantera fue el que obtuvo menor resistencia en todas las edades. CON logró alcanzar una resistencia de 28.9 MPa, que representa un aumento del 19% con respecto a los 28 días. A pesar de que el material de esta cantera es el mismo de AN desde el punto de vista petrográfico, las resistencias de CON fueron mayores en todas las edades, posiblemente debido a su menor porcentaje de lodos y materia orgánica. IND presentó un bajo incremento en la resistencia a 101 días respecto a 28 días (2,6%), esto se explica por la foliación de la roca y al alto

contenido de lodos, de materia orgánica y porcentaje de absorción de los áridos; lo que afecta química y físicamente al hormigón. Se puede decir que el hormigón fabricado con este último material ya alcanzó su tope de resistencia (Figura 3 y 4).

Resistencia en el tiempo:

Los cinco grupos de probetas presentan un comportamiento totalmente diferente, en virtud del tipo de árido empleado en ellas. Así, las de AN son las que desarrollan, con el tiempo, una menor resistencia a compresión, no superando los 28 MPa a los 101 días (la extrapolación de su función asociada permite estimar que este valor será superado a partir de los 140 días), mientras que las probetas fabricada con CON, superan esta resistencia a los 90 días, en los que dicha curva tiende hacia una pendiente más suave, tocando los 30 MPa a los 141 días aproximadamente. A su vez los cilindros fabricados con SR alcanzan los 28 MPa a los 42 días, estabilizándose su resistencia de tal forma que toca, ligeramente, 30 MPa a los 125 días, mientras que el comportamiento de los testigos elaborados con CC son los que mayores resistencias proporcionan en los 28 primeros días, superando en este período los 28 MPa, aunque después sigue una tendencia ligeramente decreciente (Figura 4).

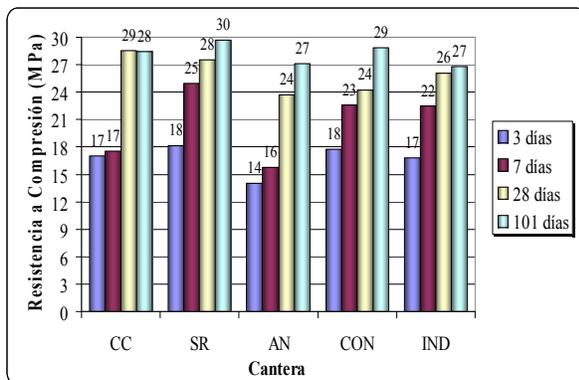


Figura 3. Resistencias a diferentes edades de curado.
Figure 3. Strengths to different ages of curing.

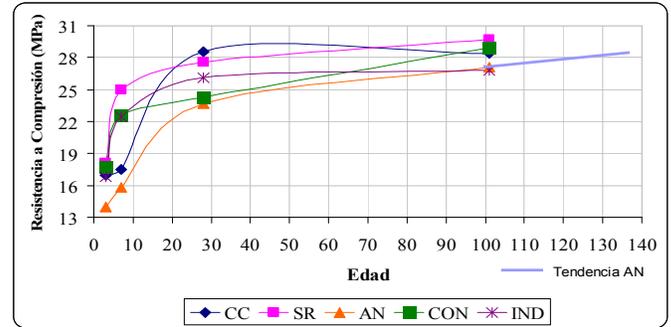


Figura 4. Resistencias en el tiempo.
Figure 4. Strengths in time.

3.2 Cilindros de durabilidad (Control de peso)

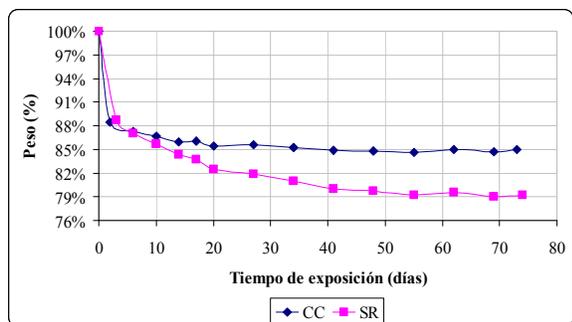
Ácido Clorhídrico:

Los cilindros de CC y los de SR estuvieron sometidos al ataque durante 73 y 74 días respectivamente, al 20%; AN a 69 días al 10%, CON e IND a 73 días al 10%.

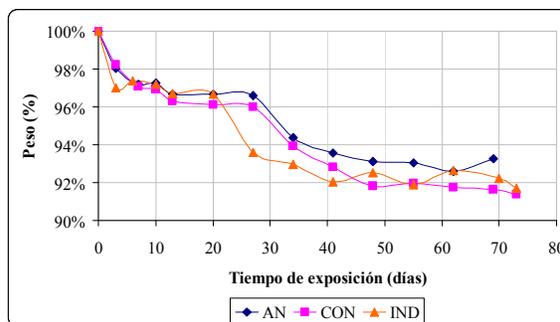
Los testigos de CC y SR registraron pérdida de peso a partir del vigésimo día de inmersión en la solución, hasta el 21% del peso inicial, estabilizándose a partir del día 48 y siendo más agresivo el ataque sobre las muestras de SR (Figura 5a). Los sometidos al 10% de concentración no llegaron a regular su peso, manteniendo siempre una tendencia de decrecimiento (Figura 5b).

El comportamiento de los cilindros elaborados con materiales de las canteras de depósitos aluviales y roca metamórfica al ataque de este ácido fue muy similar, perdiendo en promedio un 8% de su peso inicial.

Es importante resaltar que en los primeros días del ensayo los áridos no se vieron afectados por el ácido y que, al final, tuvieron un deterioro considerable presentando desintegración y oxidación en la pasta.



(a) 20% de concentración



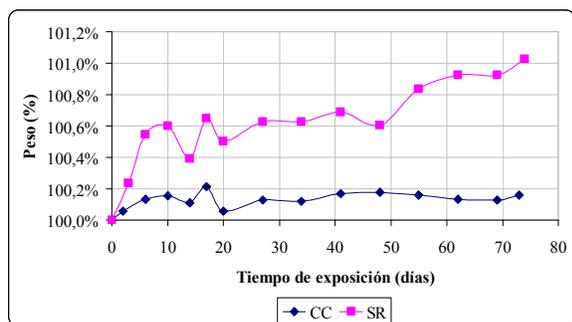
(b) 10% de concentración

Figura 5. Control de peso con ácido clorhídrico.
Figure 5. Weight control with hydrochloric acid.

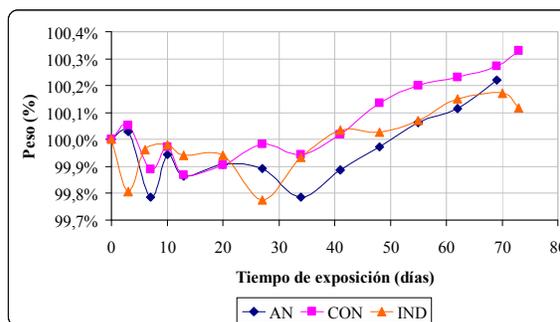
Cloruro de Calcio:

Los cilindros de SR, sometidos al 20% de concentración, tuvieron mayor aumento de peso (1% más) que los de CC (Figura 6a). Las curvas de AN, CON e IND dibujan oscilaciones, debido a problemas de secado de los cilindros en el momento de las mediciones, pero al final mantuvieron la misma tendencia de crecimiento en su peso hasta lograr un aumento del 0.22%,

0.33% y 0.17% respectivamente (Figura 6b). El aumento de peso en las muestras se puede explicar por el crecimiento de cristales de sal en los poros, y aunque en general estos cambios de peso no son tan significativos (menores al 1%) se prefieren interpretar de esta forma y no como que están dentro del rango de error del método experimental por la tendencia creciente de las curvas.



(a) 20% de concentración



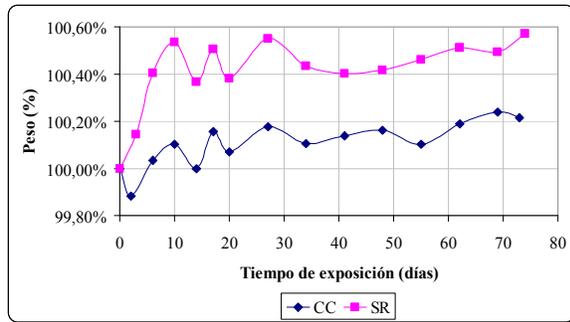
(b) 10% de concentración

Figura 6. Control de peso con cloruro de calcio.
Figure 6. Weight control with calcium chloride.

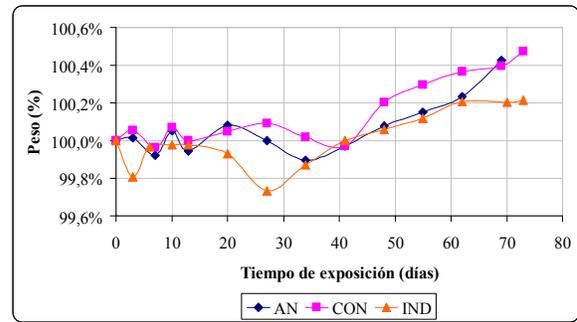
Sulfato de Sodio:

Esta sal (NaSO_4) genera yeso aumentando el volumen y el peso de los cilindros. A partir de los porcentajes obtenidos se observa que una mayor concentración de solución no implica un mayor aumento de peso, característica influenciada principalmente por la presencia de poros en el hormigón.

Los cilindros de SR presentaron un aumento de su peso en 0,57%, los de CC aumentaron pero solamente 0,24% (Figura 7a). Al igual que en el Cloruro de Calcio, los cilindros sometidos en soluciones al 10%, mostraron diferentes oscilaciones, pero manteniendo la misma tendencia de incremento en el peso, así: AN 0,43%, CON 0.47% e IND 0,20% (Figura 7b).



(a) 20% de concentración



(b) 10% de concentración

} **Figura 7.** Control de peso con sulfato de sodio.

Figure 7. Weight control with sodium sulfate.

Resistencia a 101 días:

CC (20%): Los cilindros sumergidos en cloruro de calcio y sulfato de sodio tuvieron mayor resistencia que los de curado normal. Los sometidos a ácido clorhídrico alcanzaron una resistencia promedio de 11 MPa, sólo el 40% de la resistencia de los cilindros con curado normal (Figura 8).

SR (20%): La resistencia de los cilindros sumergidos en cloruro de calcio y sulfato de sodio fueron muy similares: 27,92 MPa y 27,95 MPa respectivamente; por otra parte, los sometidos a ácido clorhídrico sólo alcanzaron una resistencia promedio de 9,7 MPa (Figura 8).

La resistencia promedio de las muestras de CC sometidas a Sulfato de sodio fue 6% mayor que las de curado normal, mientras que la de SR fueron 6% menor en promedio. La resistencia obtenida por las muestras atacadas con ácido clorhídrico fue mayor en CC que en SR (Figura 8), lo que se esperaba de acuerdo con lo observado en el control de peso. Estos cilindros no presentaron fallas normales en el ensayo de compresión simple, es decir, fallaron por desmoronamiento de la superficie. Se observó que el ataque del ácido penetró en promedio 5mm en las muestras de ambas canteras.

AN (10%): Los cilindros sometidos al cloruro de calcio y sulfato de sodio presentaron resistencias muy similares a 101 días: 24,7 MPa y 24,6 MPa respectivamente, aunque menores que las obtenidas con el curado normal (27,1 MPa), lo que implica una disminución de un 9%. El Ácido Clorhídrico afectó a la resistencia de las

muestras correspondientes a esta cantera, obteniendo sólo un 54% de la resistencia de los cilindros con curado normal (Figura 8).

CON (10%): Los testigos sometidos a sulfato de sodio tuvieron mayor resistencia que los de curado normal, teniendo un incremento del 2%. Los sumergidos en ácido clorhídrico obtuvieron una resistencia del 59% de la promedio de los cilindros con curado normal. Este resultado se puede asociar a la naturaleza de los áridos procedentes de los depósitos aluviales, por similitud con los obtenidos con las muestras de AN. A diferencia de AN, los cilindros sometidos al sulfato de sodio presentaron resistencia más alta (29.4 MPa), comparados con los sometidos a cloruro de calcio (23.4 MPa) y con los de AN (Figura 8).

IND (10%): Igual que en CON la mayor resistencia se dió en los cilindros sometidos al sulfato de sodio (27.9 MPa). La pérdida de resistencia debida al ataque con ácido clorhídrico fue menor que en las probetas realizadas con áridos de las otras canteras. Las muestras sometidas a Cloruro de Calcio proporcionaron resultados similares a los de AN y CON.

En general, se constató un mejor resultado resistencia con los áridos provenientes de CC frente al ataque de las soluciones químicas al 20% de concentración, con respecto a la resistencia de los cilindros con curado normal; y para los cilindros sometidos a concentraciones del 10% los realizados con material de IND obtuvieron el mejor comportamiento (Tabla 2)

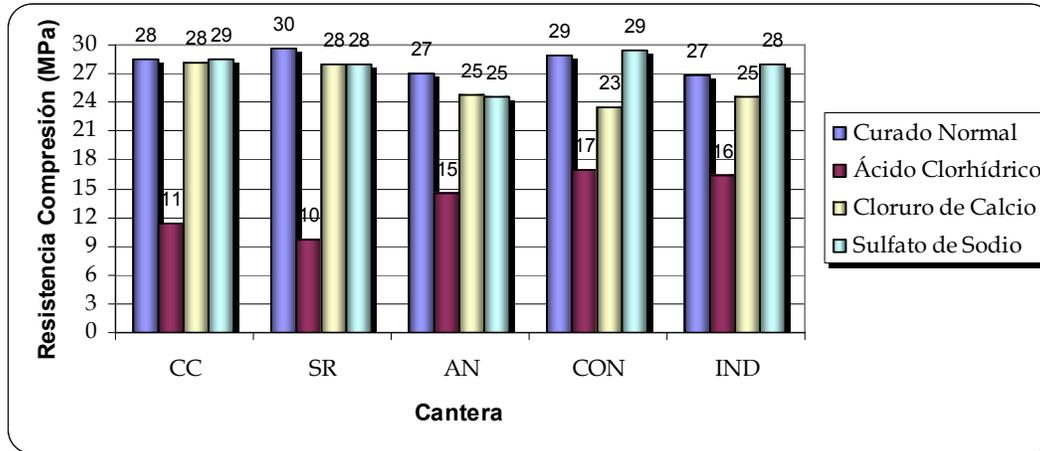


Figura 8. Resistencia a 101 días.
Figure 8. Strength to 101 days.

Tabla 2. Relación (%) resistencias de cilindros sometidos a químicos, con los de curado normal a 101 días.

Table 2. Relationship (in %) between the strengths of cylinders subjected to chemical attacks, with those of normal curing to 101 days.

Cantera	Ácido Clorhídrico	Cloruro de Calcio	Sulfato de Sodio
CC	40%	99%	101%
SR	33%	94%	94%
AN	54%	91%	91%
CON	59%	102%	81%
IND	61%	104%	92%

3.3 Petrografía

Al comparar las descripciones petrográficas se puede colegir que las muestras con menores resistencias tenían mayor cantidad de poros en la pasta y desarrollaban reacciones entre la pasta y los áridos (Tabla 3 y Figura 9).

En el caso de las muestras de AN se observó mala adherencia entre la pasta y los áridos lo que puede asociarse a la baja resistencia a la compresión que mostraron; seguramente debido a la cantidad de finos y materia orgánica presentes en los áridos procedentes de esta cantera. A pesar de que el material de CON es el mismo que el de AN se observaron muchas diferencias, sobretodo en la adherencia de los áridos y la pasta y en la porosidad de los

cilindros. Las muestras con rocas ígneas (CC y SR) presentaron mejor adherencia y menor cantidad de poros que las muestras con materiales de los depósitos aluviales y de roca metamórfica (Tabla 3).

El análisis petrográfico de las probetas de hormigón con luz polarizada se complementó con observaciones en el Microscopio Electrónico de Barrido donde se logran mayores resoluciones. En las probetas fabricadas con áridos de CC se apreciaron muchas microfisuras limpias internamente, es decir, no se detectó pasta de cemento ni crecimiento de minerales en su interior (Figura 9a). Las fisuras “limpias” indican que se produjeron en el ensayo de compresión simple y no a presiones internas en el hormigón. En las muestras con SR se observó gran cantidad de tobermorita, fase que se genera en el proceso de hidratación del cemento y que ayuda a la adherencia con los áridos. Se detectaron fisuras sólo a grandes aumentos y algunas estaban cubiertas por tobermorita. Igual que en el análisis óptico no se encontraron poros en el SEM. En las muestras de AN se observó claramente la baja adherencia entre los áridos y la pasta y el interior de los poros donde se vieron fisuras y partículas en forma de escamas (Figura 9b y 9c), también vistas en agrupaciones en la pasta, lo que posiblemente explica la diferencia en el color de la pasta descrita en las observaciones en el microscopio óptico.

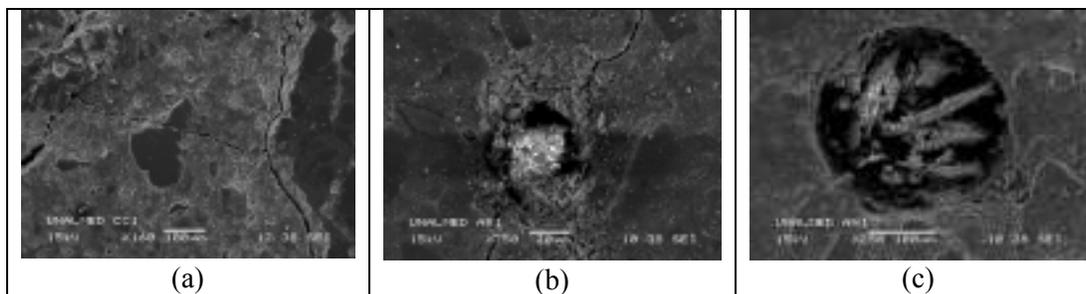


Figura 9. Imágenes de SEM
Figure 9. SEM images

Tabla 3. Descripción petrográfica de las muestras.

Table 3. Petrographic description of samples

MUESTRA	CC - 28 días (28.6 MPa)	SR - 28 días (27.5 MPa)
PASTA	Coloración uniforme con buena distribución de finos de diferentes tamaños.	Coloración no homogénea, buena distribución de finos de tamaños que varían entre 4 μm hasta 150 μm .
ÁRIDOS	Gruesos de color verde, café y gris, forma angular, subangular y subredondeados. No presentan porosidad, pero sí fisuras en su superficie. El tamaño de los granos varía entre 10 μm y 600 μm .	Color gris, verde, naranja, blanco y negro, forma angular, subangular, y subredondeados. Muchos granos alargados.
ADHERENCIA Y REACCIÓN	Buena adherencia entre los áridos y la pasta, algunas reacciones en la pasta color ocre.	Buena adherencia entre los áridos y la pasta. Reacciones color gris claro en la pasta y ocre en el grano.
POROS	Tamaños entre 30 μm y 90 μm .	No se detectaron poros.
FISURAS	Varias, algunas muy profundas en áridos que se extendían por la pasta, de más de 1cm.	No detectables a la escala de observación.

MUESTRA	AN - 28 días (23.7 MPa)	CON - 28 días (24.3 MPa)	IN - 28 días (26.1 MPa)
PASTA	Color homogéneo, en algunas zonas con buena distribución de los granos, en otras era más oscura con aglomeraciones de finos la mayoría redondeados y subredondeados.	Color variable entre gris claro en un 80%, donde se distinguía buena adherencia y distribución de finos; y círculos de color gris oscuro con aglomeraciones de granos casi del mismo tamaño con buena adherencia.	Color homogéneo, aunque en algunas zonas se presentaba más oscuro; buena distribución de granos finos, subredondeados y sin reacción.
ÁRIDOS	Colores variados: naranja, gris, verde, negro brillante. Redondeados, subredondeados y subangulares. Presentaron fisuras y porosidad en la superficie. Los finos entre 20 μm y 70 μm .	Redondeados gris, café, negros, verdes, rojizos y ocreos. Subredondeados y subangulares y alargados. Porosos y fisurados, no profundas ni comunicadas con la pasta.	Diferentes colores negro, café, café verdoso y blanco. Subangulares y angulares, con algunos subredondeados. Presentaban porosidad, con fisuras internas.
ADHERENCIA Y REACCIÓN	Algunos áridos no presentaron buena adherencia con la pasta. Hay reacción entre la pasta y los áridos, color variable de gris a ocre oscuro.	La adherencia fue generalmente buena con reacción color café en la mayoría de los áridos observados	En general buena adherencia entre la pasta y los áridos, y sin reacción aparente.
POROS	Gran cantidad, diámetros entre 50 μm y 200 μm .	Pocos, tamaños entre 50 μm y 80 μm .	Muchos poros, de tamaños entre 70 μm y 570 μm .
FISURAS	Se encontraron algunas que llegaban a medir 1mm.	Se presentaron algunas alrededor de los áridos.	Se observaron varias alrededor de los granos.

CONCLUSIONES

A los 28 días, los cilindros realizados con los materiales de las dos canteras de roca ígnea (CC y SR) presentaron las mayores resistencias. Los elaborados con roca metamórfica (IND) presentaron valores intermedios y los fabricados con las muestras de roca sedimentaria (AN y CON) los más bajos. Por esto se puede afirmar que para este estudio se hace evidente la influencia de la resistencia, rigidez y dureza del tipo de roca en las propiedades del hormigón, propiedades éstas que como se sabe están en orden decreciente al comparar rocas ígneas (dunitas, dioritas, porfidos, gabros) con rocas metamórficas (gneiss que a pesar de ser cristalina presenta foliación que se comporta como planos de debilidad preexistentes) y con materiales sedimentarios no consolidados como en este caso.

Después de los 28 días los cilindros siguen aumentando su resistencia, a excepción de los elaborados con el material de CC que por sus características físico-mecánicas (intensidad de fracturamiento, aunque las fracturas estuvieran cementadas con carbonato de calcio) han llegado a su valor límite. Las resistencias a 101 días mostraron como los mejores hormigones a los que contenían rocas de SR (roca cristalina y poco fracturada) y los menos buenos a los fabricados con la roca metamórfica de IND, esta última se vio perjudicada por su foliación.

Los cilindros elaborados con los sedimentos provenientes de AN dieron los menores valores de resistencia en todas las edades de falla y en todos los ensayos. Esto se debe seguramente al mayor contenido de fracción fina (limo y arcilla), a su mayor grado de meteorización y a la heterogeneidad de los materiales. En comparación con los cilindros con materiales de CON se encontró, mediante la petrografía, que estos desarrollan mayor adherencia y menor porosidad que los fabricados con materiales provenientes de AN.

Los cilindros elaborados con áridos de CC presentaron mejor estabilidad ante los agentes agresores que los de SR. La variación en el tiempo del peso de los materiales de las canteras

de depósitos aluviales y roca metamórfica por el ataque de los productos químicos fue muy similar.

Se observó que una mayor concentración de sulfato de sodio no implica un mayor aumento de peso. Esta característica está influenciada principalmente por la presencia de poros en el hormigón. En general, se dio mayor resistencia de estos cilindros que los que tuvieron un curado normal.

De los cilindros elaborados con áridos de las tres canteras sometidas a soluciones de químicos al 10%, los de IND presentaron el mejor comportamiento en relación entre las resistencias promedio de los cilindros comparado con los de curado normal a 101 días. Esto debido al grado de meteorización de los áridos de las otras dos canteras, que los hacen más susceptibles al ataque químico.

Las muestras que tuvieron menores resistencias presentaron en los análisis petrográficos, mayor cantidad de poros en la pasta y reacción entre la pasta y los áridos.

A partir de los resultados de resistencia a la compresión y durabilidad de las muestras analizadas en este estudio no se descarta ningún material usado, pero sí se pueden establecer claras diferencias entre los hormigones realizados con los materiales pétreos de las diferentes canteras.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Cementos Argos, Planta Cairo, por su apoyo económico y logístico. A las canteras CC, SR, CON, AN e IND por el suministro de las muestras. Al laboratorio de Estructuras de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia – Medellín.

REFERENCIAS

[1] RESTREPO, J.J y TOUSSANT, J. F. Acreciones sucesivas en Colombia: un nuevo modelo de evolución geológica. Memorias 5^{to} Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, 1984.

- [2] GUTIÉRREZ, M. C. y LONDOÑO, M. C. Aspectos geológicos y geomecánicos de la cantera Metromezclas Ancón Norte – Copacabana. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Facultad de Minas. Medellín. 1988.
- [3] RENDON, D. Cartografía y caracterización de las unidades geológicas de la zona urbana de Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 1999.
- [4] MAYA, M. Zonas potenciales para materiales de construcción en los alrededores de Medellín, Colombia. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear. Ministerio de Minas y Energía. Santafé de Bogotá, 2003.
- [5] GIRALDO, M y SÁNCHEZ, D. Cartografía geológica del contacto del cuerpo sur de la Dunita de Medellín con sus rocas asociadas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2004.
- [6] American Concrete Institute A.C.I. “Guide to durable concrete”. Comité 201 Manual Concrete Practice Detroit. 1993.
- [7] POPOVICS, S. Strength and related properties of concrete: a quantitative approach. John Wiley and Sons. USA, 1998.
- [8] RODRÍGUEZ, R. E.; DÁMAZO, D. y URIBE, R. Instituto Mexicano del Cemento y del Hormigón, A.C. Revista Construcción y Tecnología. Julio, 2000.
- [9] LEGG, F.E. Jr. Aggregates: Chapter 2. Concrete construction handbook. Cuarta Edición. McGraw-Hill. USA, 1998.
- [10] QUIROGA, P. The effect of the aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete.
- [11] THE UNIVERSITY OF TEXAS. Austin, Diciembre de 2003.
- [12] FARBIARZ, J. Hormigón, el material: Principios básicos de la tecnología del hormigón. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2001.
- [13] URIBE, R. Hormigón durable, el inicio del cambio. XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Monterrey, Nuevo León. México, 2000.
- [14] GÓMEZ, J. Durabilidad del hormigón. Artículo presentado en la Reunión del Hormigón. 1994.
- [15] GIRON, H. A. Ataque por cloruros en el hormigón. UNAM, 2003.
- [16] GIRALDO, J y PÉREZ, R. Hormigón bajo el microscopio, Petrografía: ciencia aplicada al estudio del hormigón y sus materias primas. Revista NOTICRETO N° 61. Octubre, Noviembre, Diciembre. 2001
- [17] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Petrographic methods of examining hardened concrete: a petrographic manual. Virginia. Noviembre, 1997.
- [18] MESA, H y RIVERA, S. Sistematización de los procedimientos para el diseño de mezclas de hormigón, programa Tolva 1.0. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2003.
- [19] NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS (NTC). Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá, 2000.
- [20] ASTM C 295-98. Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete.