

Uso de rípios provenientes de procesos de lixiviación del cobre en la fabricación de hormigones

The usage of originating debris of copper leaching processes in cement concretes

Luís Aguilar*, Walter Roldán*, Vicente Zetola**, Carlos Urrutia***

*Universidad Católica del Norte, Antofagasta, CHILE

**Zona Norte. Cementos BíoBío, Antofagasta, CHILE

***Proyecto Escondida Norte. BHP Chile Inc. Santiago, CHILE
aguilar@ucn.cl

Fecha de recepción: 28/ 09/ 2005
Fecha de aceptación: 01/ 12/ 2005
PAG. 223 - 232

Resumen

La minería del cobre genera grandes volúmenes de rípios que provienen de procesos de lixiviación por ácido sulfúrico, los que luego son desechados y acumulados. En la búsqueda de usos alternativos, el presente estudio pretende aportar con fundamentos técnicos cuantitativos las bondades y los inconvenientes que puede producir su utilización en hormigones de cemento, dado que ellos acumulan una cantidad apreciable de sulfatos de cobre y otras impurezas que a priori tienden a desechar su utilización. Fue necesario lavar el árido antes de su uso, debido a la gran cantidad de finos, sulfatos y cloruros que posee. Se confeccionaron hormigones con diferentes relaciones agua/cemento (w/c) manteniendo constante la docilidad y la relación gravilla/arena; variando también el tipo de cemento y comparando resultados con un hormigón patrón elaborado con áridos grueso normal. Los resultados muestran que el lavado tiene una gran eficiencia en la eliminación de finos, no así de cloruros y sulfatos. Las probetas confeccionadas con rípios de lixiviación pese a tener buenas resistencias en los primeros días muestran una tendencia que indicaría una pérdida de resistencia con la edad. Del estudio se concluye recomendar su uso para hormigones de estructuras secundarias, de corta vida útil y en ambientes de desempeño de baja humedad.

Palabras Clave: Rípios, lixiviación, cobre, hormigón, sulfatos

Abstract

The Mining of copper generates great amounts of debris which come from the process of leaching by Sulfuric acid, which are discarded and then accumulated. In the process of finding alternative methods, the present research pretends to find the positive and negative effects of using this type of concrete, given the fact that these accumulate an appreciable amount of copper sulphate and some other impurities, which tend to reject their utilization. Because of the great amount of fines, sulphates and chlorides it was necessary to wash out the material before it was used. Concretes were made, each an every one had a different water/concrete (w/c) relationship, maintaining the consistency and the relationship burdens-sand constant, also varying the type of cement and comparing results with a pattern concrete elaborated with barren normal thickness. The results show us that the washing out of the materials only has a great efficiency in the elimination of fines, but not in the elimination of chlorides and sulphates. The test concretes made of leaching debris had a slightly greater resistance the first days and show a tendency that would indicate a lost one of resistance with the age. The survey concluded that this material can be used for secondary concrete structures, which would be useful for a short time in dry surroundings.

Keywords: Debris, leaching, copper, concretes, sulphates

1. Introducción

El desarrollo de planes de expansión en la minería del cobre genera la utilización masiva de hormigones de cemento, lo que a su vez demanda el uso de grandes volúmenes de materiales pétreos.

Por la formación geomorfológica de los suelos del norte de Chile hay poca disposición de empréstitos adecuados para los hormigones, los que en su gran mayoría se encuentran en las proximidades costeras, distantes de los centros productores mineros que normalmente se encuentran hacia el interior de la región.

Esta situación genera una escasez de materiales pétreos que se suple con traslados a grandes distancias y, por ende, aumenta considerablemente el precio del hormigón.

Previendo la escasez, los primeros hormigones con uso de rípios de lixiviación con altas dosis de sulfato de cobre y otras impurezas, se utilizaron en Chuquicamata en la construcción de fundaciones de la ampliación de la Fundición efectuada a partir del año 1985. Un control del comportamiento de dichos hormigones se efectuó 9 años más tarde. Los resultados fueron promisorios al



2. Ripios de Lixiviación

comprobarse su buen comportamiento, lo que estaría dado, principalmente por su desempeño en un medio ambiente de muy baja humedad (Lanas, 1995).

Dada la disposición de empréstitos con altas dosis de sulfatos y principalmente para conocer la acción de estos al interior del hormigón en su fase plástica, un estudio desarrollado por Miric (1996), constata que una elongación de la masa del hormigón y su deterioro ocurre con altos contenidos de estas sustancias, lo que demostraría la formación de etringita y bruxita de carácter expansivo; además una elongación del hormigón endurecido ocurre sólo cuando existe un ambiente húmedo externo por lo que, cuando los hormigones se sitúan en zonas secas, es de esperarse un buen comportamiento de estos.

Las demandas actuales de hormigón son crecientes y se hacen esfuerzos por responder en atención a las especificaciones técnicas que señala la normativa nacional. Es por ello que las exigencias granulométricas a los áridos es la que determina la ubicación de empréstitos eficientes en cuanto al rendimiento de volúmenes de material procesado versus volumen de material utilizable, transformando la decisión de uso de estos empréstitos en una cuestión económica, en donde también la distancia influye en los costos de producción.

En muchos casos, por los procesos de obtención utilizados, la minería del cobre genera grandes volúmenes de ripios que provienen de procesos de lixiviación por ácido sulfúrico, los que luego son desechados y acumulados. Por este motivo también los proyectos mineros causan un severo impacto ambiental en la zona. Por su parte, el Estado impone su propia legislación, la cual exige un listado de estudios de impacto ambiental que podrían afectar al proyecto minero, incluyendo un listado de medidas correctoras que se deben adoptar, como por ejemplo del manejo de los materiales de desecho.

En la búsqueda de usos alternativos y con la finalidad de reducir costos, el presente estudio pretende aportar con fundamentos técnicos cuantitativos las bondades y los inconvenientes que puede producir la utilización de estos ripios en hormigones, dado que ellos acumulan una cantidad apreciable de sulfatos de cobre y otras impurezas que a priori tienden a desechar su utilización (Aguilar, 2005).

Luego de la explotación en mina, el mineral de cobre es transportado en su secuencia de tratamiento a las pilas de lixiviación. El material portador de cobre que llega a las pilas proviene de un proceso de chancado primario que lo reduce a tamaño máximo 3/4", acopiándose al aire libre en canchas de gran extensión (pilas), con una altura que varía entre 6 m a 15 m. Cada pila es irrigada en la superficie con una solución de ácido sulfúrico débil, la que disuelve el cobre del mineral. La solución de lixiviación resultante se filtra a través de las pilas para ser recuperada en el fondo de estas, que normalmente existe un revestimiento de geomembrana. Las soluciones que se obtienen son enviadas a piscinas de recolección para continuar con el proceso de extracción por solvente para finalizar en el proceso de EW (electrowinning).

Terminado el proceso de lixiviación de la primera pila, el material es compactado en superficie para soportar una carpeta de impermeabilización para la siguiente pila y así sucesivamente.

Muestras de material pétreo integral obtenidas de una pila que ha concluido el proceso de lixiviación de cobre junto con muestras de áridos de otros empréstitos, pero de uso habitual en faenas mineras fueron analizadas, presentándose los resultados en la Tabla 1. En dicha Tabla el material definido como "Integral (MEL)" corresponde a una muestra de ripio de lixiviación integral, tal como se obtiene de pilas de lixiviación en desecho.

En la misma Tabla, los resultados de análisis obtenidos cuando el ripio de lixiviación integral es cortado en laboratorio en malla N°4 ASTM, se identifican en la columna "Gravilla (MEL)" para el material retenido y en la columna "Arena (MEL)" para el material inferior.

Se entregan también los resultados obtenidos cuando el ripio de lixiviación es lavado y separado en gravilla y arena según se indican en las columnas "Gravilla Lavada (MEL)" y "Arena Lavada (MEL)", respectivamente. Finalmente se muestran los resultados de áridos grueso y fino comúnmente utilizado en hormigones en mina, según se indican en las columnas "Gravilla El Way" y "Arena Varilla", respectivamente.

Tabla 1. Identificación y características de muestras de áridos

CARACTERÍSTICAS		MUESTRAS						
NCh. mm.	ASTM	Integral (MEL)	Gravilla (MEL)	Gravilla El Way	Arena (MEL)	Arena Varilla	Gravilla Lavada (MEL)	Arena Lavada (MEL)
Tamices		Granulometría (% que pasa en peso)						
80	3"							
50	2"							
40	1.1/2"			100				
25	1"			99				
20	3/4"	100	100	87			100	
12,5	1/2"	97	92	32			85	
10	3/8"	85	63	18		100	56	100
5	Nº 4	62	6	0	100	95	5	99
2,5	Nº 8	47	0		78	88	0	45
1,25	Nº 16	32			53	74		17
0,63	Nº 30	20			34	37		8
0,315	Nº 50	11			19	18		5
0,16	Nº 100	6			10	7		3
Módulo de finura			6,31	6,95	3,06	2,81	6,39	4,23
P.E. Apar. Suelto Kg/m ³			1.300	1.385	1.365	1.660	1.315	1.325
P.E. Apar. Comp. Kg/m ³			1.410	1.520	1.545	1.825	1.475	1.515
P.E. Real s.s.s. Kg/m ³			2.551	2.665		2.683	2.517	2.562
Huecos %			45	43	41	32	41	41
Humedad %		7,75	1,52	0,42	2,30	0,20	3,93	10,81
Absorción %			4,48	1,24	2,04	0,40	4,16	2,77
Impurezas (Fino menor 0,08 mm %)		11,88	6,19	0,17	28,16	2,44	0,90	6,44
Sulfatos Totales (Kg SO ₄ /Kg árido)		7,80E-03	4,73E-03	8,51E-05	5,97E-04	4,12E-04	2,84E-03	5,35E-04
Cloruros Totales (Kg Cl-/Kg árido)		4,23E-04	2,41E-04	1,22E-04	9,60E-04	2,82E-04	1,10E-04	8,19E-04

En la tabla anterior se observa que la "Gravilla (MEL)", obtenida al cortar el ripio de lixiviación, presenta cantidades de impurezas y absorción mayores a la norma NCh-163 (INN, 1977). La muestra "Arena (MEL)" presenta altas cantidades de impurezas que hace inconveniente su uso. Se hace notar que la humedad, impurezas, sales y finos del ripio de lixiviación dependen de la profundidad en que se ha obtenido la muestra, por lo que las características descritas en la Tabla 1 no representan necesariamente condiciones generales del ripio de lixiviación en pila, sino más bien características puntuales de las muestras obtenidas. En el caso particular de esta investigación, no hubo intento de controlar el lugar específico de la toma de muestras ya que a priori se aventuraba una gran dispersión de dichos valores lo que puede caracterizarse bien con el tratamiento posterior de dichos rípos cómo se describe más adelante.

De acuerdo a los análisis efectuados, uno de los problemas que afecta a la utilización de este material pétreo es la gran cantidad de finos que posee. La cantidad de finos debe ser controlada debido a que puede debilitar la mezcla de hormigón al absorber un volumen mayor de agua, lo cual aumenta la relación "w/c", y a su vez ocupa un mayor volumen en el hormigón fresco que debería ser utilizado por el cemento, el cual es el principal conglomerante.

Un proceso de lavado de los rípos de lixiviación muestra que bajan las impurezas. En el caso de la "Arena Lavada (MEL)" su granulometría resulta inconveniente para ser usada en hormigones, dado que tiene muy poco material bajo malla Nº 16 (1,25 mm), y las impurezas a pesar de su reducción producto del lavado, se mantienen por sobre las exigencias de la norma NCh-163. Otra característica medida al ripio integral de lixiviación fue el pH, obteniéndose un valor de 3,2. Esta acidez, más el contenido de impurezas, indica que no sería posible usar estos materiales sin que se sometan a tratamiento de lavado. La "Arena Lavada (MEL)" es granulométricamente inconveniente (sin uso de un corrector) y con finos altos. Por lo tanto se define que la alternativa de árido para continuar con las pruebas, es "Gravilla Lavada (MEL)" y "Arena Varilla".

2.1 Tratamiento a que será sometido el ripio de lixiviación

A menudo es preciso someter los áridos a diversos procesos de mejoramiento para corregir índices que miden sus calidades, hasta llevarlos a intervalos de valores admitidos en las especificaciones de las obras y fabricación de hormigones. En este sentido el ripio de lixiviación fue sometido a los siguientes procesos para obtener "Gravilla Lavada (MEL)".



2.1.1 Obtención de la Gravilla

Dado los resultados granulométricos, éstos permiten obtener una curva aceptable para el árido combinado, por lo que sólo es necesario cortar en malla N°4 ASTM definiéndose la “Gravilla (MEL)” como el retenido en dicha malla.

2.1.2 Eliminación de impurezas

De los métodos existentes, se eligió el de eliminación de impurezas mediante agua. El lavado del material por intermedio de agua, permite eliminar la arcilla, diluye sales solubles, remueve y separa materiales indeseados como pizarras, materia orgánica, esquistos, carbón y otros. Los áridos gruesos se lavan normalmente en la operación de tamizado. También se utilizan rampas especiales de lavado, tromeles, lavadores de paleta y tornillos sinfin fundamentalmente para aquellos casos en los que el lavado debe ser más eficiente. Las arenas pueden someterse a procesos similares a las gravas.

En el presente estudio la “Gravilla (MEL)” se sometió a lavado en betonera de 60 lt, realizando una experiencia para observar la mayor eficiencia en el procedimiento de lavado de acuerdo a la cantidad de agua utilizada respecto a la masa de árido. Para una cantidad fija de árido (6 Kg), se definieron distintas relaciones de agua/árido utilizando desde 3 lt hasta 18 lt de agua.

En la Figura 1 se pueden observar los resultados obtenidos de la serie de lavados aplicados a la “Gravilla (MEL)”, referidos a resultados de ensayos de la muestra antes de lavar, con 4,73E-03 kg. de SO₄ por cada kg de árido; 2,41E-04 kg de Cl por cada kg de árido y 6,19% de finos.

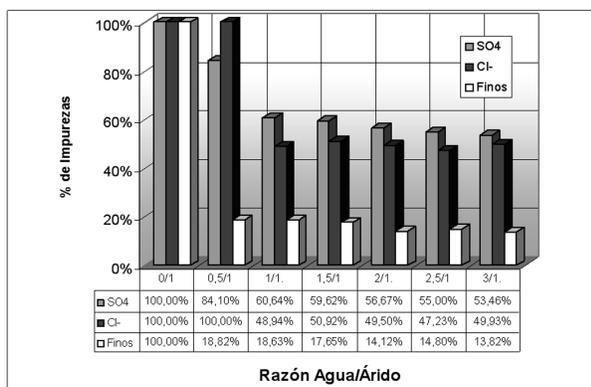


Figura 1. Eficiencia del lavado del árido

En general, aun aplicando algún método de lavado para disminuir el contenido de sulfatos, los ripios

no cumplen con la exigencia de la norma NCh 163. En efecto, en el caso del lavado (3/1) con 18 lt de agua, el sulfato disminuye a la cantidad de 2.53E-03 kg/kg de árido, por lo que, para una dosificación tentativa con un contenido de grava de 850 kg, resultará un hormigón con al menos 2.15 kg de SO₄ por m³, lo cual está por sobre los 0.6 kg. de SO₄ que exige la norma. En el caso de los cloruros estos ripios cumplen con lo recomendado por la norma NCh 163, al igual que en el % de finos para el caso de la gravilla.

En la Figura 1 se puede observar una tendencia de disminución asintótica de las impurezas contenidas en el ripio de lixiviación con el lavado, al aumentar la cantidad de agua. De acuerdo a estos resultados y a un razonamiento de tipo económico se determina que la relación agua/árido a utilizar en los lavados del ripio de lixiviación será 1/1; en consecuencia, en los hormigones elaborados en la presente investigación se utilizaron gravillas lavadas con esta última relación.

3. Zona en estudio

En general los grandes yacimientos mineros se encuentran en la II Región, por lo que se describen algunas características climáticas propias de la zona como parte del análisis de factibilidad de uso, ya que el clima puede imponer condiciones restrictivas importantes al transformarse en un medio agresivo en el cual debe desenvolverse este tipo de hormigón.

En la zona interior de la región es posible encontrar grandes yacimientos mineros en altitudes que van de los 1.000 a 3.500 m sobre el nivel del mar. A modo de ejemplo, Minera Escondida, un yacimiento de cobre que está ubicado a una altitud media de 3.100 m en pleno desierto de Atacama, a 170 km. al sudeste de la ciudad de Antofagasta, II Región de Chile.

3.1 Clima

El clima de la zona es importante en el estudio de durabilidad, debido al gran contenido de sulfatos contenidos en el ripio, los cuales tienen la capacidad de dañar al hormigón de acuerdo a las condiciones de humedad a la que sea sometido, lo que podría generar estringita diferida al interior de la masa de hormigón y ésta a su vez fisuras y desprendimientos de masa superficial provocando una posible reducción de resistencia (Biczok, 1972)

En el interior de la región, el clima es de tipo desértico altiplánico, con temperaturas que oscilan entre los -6 °C y 18 °C en los meses de invierno y entre los 5

°C y 25 °C en los meses de verano, con temperaturas anuales promedio de 11°C. Las principales características climáticas de la región interior son la limpidez de la atmósfera, la baja humedad relativa del aire con un promedio anual de 22% y las escasas precipitaciones, reduciéndose a pequeñas lluvias y algunas nevadas ocasionales en invierno entre los meses de Junio y Agosto y en verano entre los meses de Enero y Febrero, por influencia del invierno altiplánico, con un promedio de precipitaciones de 5 a 10 mm de agua por año.

Tabla 2. Datos climáticos interior II Región años 2003-2004

	Año 2003	Año 2004
Precipitaciones mm (prom. Anual)	1,06	0,05
T° máx ° C	22,47	21,05
T° mín ° C	-3,31	-5,61
T° prom ° C	10,14	9,35
Humedad % (promedio anual)	20,78	22,69
Vel. Viento m/s (promedio anual)	3,47	3,80
Presión mm/Hg (promedio anual)	552,87	551,97

4. Diseño de mezclas de hormigón

Se asume que las propiedades que requiere el hormigón endurecido vienen dadas por las especificaciones de diseño de la estructura y condiciones de servicio; que las propiedades del hormigón fresco se rigen por el tipo de construcción y por las técnicas de transporte y colocación. Estos dos grupos de requisitos permiten determinar la composición de una mezcla, teniendo presente el grado de control que se ejercerá en la obra. Así el diseño de mezclas determina las cantidades relativas con el fin de producir económicamente el hormigón que asegure al menos las condiciones requeridas, traducidas principalmente en resistencia especificada, condiciones de trabajabilidad y durabilidad.

4.1 Dosificación del hormigón

El criterio a imponer para obtener una adecuada dosificación, desde el punto de vista técnico, es disponer de una trabajabilidad aceptable en el hormigón fresco; resistencia adecuada, presentación uniforme y durabilidad apropiada para el hormigón endurecido. Debe señalarse que no es posible realizar un diseño estricto de mezcla ya que los rípos de lixiviación empleados poseen características esencialmente variables y muchos parámetros no pueden estandarizarse cuantitativamente, por lo que para dosificar se buscaron las mejores combinaciones de los componentes, con aplicación de relaciones establecidas en forma empírica

a través de curvas de relación “w/c” versus resistencia.

4.1.1 Áridos

De acuerdo con los análisis de los áridos, se utilizó gravilla lavada obtenida de rípos de lixiviación y arena del pozo Varilla. Este pozo se encuentra en las cercanías del sector La Negra, distante 25 km al sur-este de Antofagasta. Para satisfacer las condiciones de árido combinado establecidas por la NCh 163, se consiguió mezclando los áridos en relación en peso “árido grueso/árido fino = 1/1”, situación que se ilustra en la Figura 2.

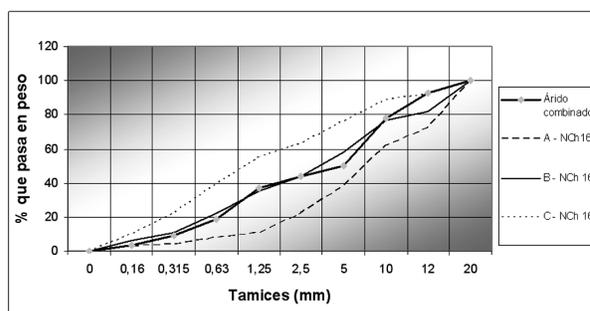


Figura 2. Gráfico árido combinado, para tamaño máx. 20mm

4.1.2 Cemento

Para mejorar la resistencia al ataque por sulfatos, se empleó un cemento con adiciones minerales, como la puzolana natural que ayuda adicionalmente a la reducción de permeabilidad, mejora la resistencia al fisuramiento térmico e incrementa la resistencia a edades tardías (Remachandran, 1996). El uso de puzolanas ha sido eficaz para mitigar el efecto de los sulfatos (Prusiski y Carrasquillo, 1995), por ello, en la mayoría de las muestras de prueba se usó cemento pórtland-puzolánico del tipo alta resistencia, y también en una de las muestras se utilizó cemento puzolánico del tipo especial o corriente (ver Tabla 3).

4.1.3 Agua

Tanto para el lavado de áridos como para el amasado se utilizó agua potable. Debido que las cantidades de áridos poseen humedad producto del proceso de lavado anterior, las dosificaciones se deben corregir adecuadamente en cuanto a las cantidades de áridos y agua a pesar.

4.1.4 Aditivos

En la búsqueda de condiciones óptimas operacionales, a una de las mezclas de prueba se le

incorporó un aditivo plastificante retardador de fraguado para estudiar su efecto en este tipo de áridos (ver Tabla 3).

4.2 Hormigones de prueba

Para asegurar la calidad de la mezcla de hormigón, el diseño incluyó las siguientes etapas:

- Conocimiento de los antecedentes básicos de las especificaciones, como materiales a usar en la mezcla y ambiente de exposición.
- Proporcionamiento o dosificación estimada de las mezclas, de acuerdo a los antecedentes disponibles e indicaciones de la norma NCh170 (INN, 1985).
- Realización de hormigones de prueba, con diferentes relaciones “w/c”.

4.2.1 Trabajabilidad o docilidad

En la etapa experimental, se mantuvo constante el asentamiento de cono de Abrams de los hormigones en 6 cm.

4.2.2 Curado de probetas

Las probetas con muestras de hormigón una vez confeccionadas se mantuvieron en cámara húmeda, a

20 °C y una humedad relativa superior al 90%.

4.2.3 Identificación de probetas

Para este estudio se confeccionaron 5 hormigones de prueba, como indica la Tabla 3, elaborándose una muestra de hormigón patrón (M5) con gravilla procedente del pozo El Way (“Gravilla El Way”) y arena del pozo Varilla (“Arena Varilla”), a fin de comparar sus resultados con los de los hormigones elaborados con árido grueso provenientes del proceso de lixiviación.

Las mezclas M1 y M2 utilizaron gravilla lavada procedente de depósitos de rípios de lixiviación y arena procedente del pozo Varilla. Ambas mezclas se confeccionaron similarmente en todas sus propiedades con el fin de validar los procedimientos experimentales.

La mezcla M3 se diferencia de las mezclas M1 y M2 sólo en el tipo de cemento utilizado y la mezcla M4 en la incorporación de aditivo plastificante. Se destaca que la “Gravilla El Way” y la “Arena Varilla”, son utilizadas habitualmente por las empresas premezcladoras en la elaboración de hormigones para faenas mineras, de tal modo que la muestra patrón (M5) revela resultados de un hormigón con características normales de fabricación.

Tabla 3. Identificación de muestras de hormigón. Dosificación para 1 m³

Identificación Muestra	Arido grueso		Arido fino		Cemento		Aditivo		Agua
	Tipo	Cant. (kg)	Tipo	Cant. (kg)	Tipo	Cant. (kg)	Tipo	Cant. (lt)	Cant. (lt)
M1.a	GLM	906	AV	933	P.P	200			195
M1.b	GLM	862	AV	888	P.P	300			193
M1.c	GLM	819	AV	844	P.P	400			198
M2.a	GLM	961	AV	950	P.P	190			191
M2.b	GLM	879	AV	901	P.P	300			195
M2.c	GLM	876	AV	865	P.P	380			187
M3.a	GLM	922	AV	946	Puz.	200			205
M3.b	GLM	879	AV	901	Puz.	300			216
M3.c	GLM	836	AV	857	Puz.	400			204
M4.a	GLM	941	AV	965	P.P.	200	Plast.	0,87	236
M4.b	GLM	898	AV	921	P.P.	300	Plast.	1,03	202
M4.c	GLM	855	AV	876	P.P.	400	Plast.	1,74	175
M5.a (Patrón)	GW	870	AV	1070	P.P.	200			189
M5.b (Patrón)	GW	829	AV	1020	P.P.	300			186
M5.c (Patrón)	GW	788	AV	970	P.P.	400			186

Para complementar la identificación de los resultados experimentales, se anexa la variable de mayor recurrencia como es la relación “w/c” requerida en cada caso para mantener constante la docilidad de los hormigones de prueba, tal cómo se ilustra en las Figuras 3, 4 y 5.

4.3 Resistencia de los hormigones de prueba

Para cada uno de los tipos de hormigones de prueba se confeccionaron 3 muestras de hormigón variando la cantidad de agua para mantener constante la docilidad. Se ensayaron las probetas cúbicas de 20 cm a la compresión simple a edades de 3, 7 y 28 días para aquellas confeccionadas con dosis de 200 y 400 kg de cemento por m³ de hormigón (Figuras 3 y 5 respectivamente) y se ensayaron probetas a 3, 7, 28, 60 y 90 días para aquellas confeccionadas con dosis de 300 kg de cemento por m³ de hormigón (Figura 4). Cabe mencionar que en las gráficas se agrega a la identificación de la muestra la relación “w/c” correspondiente a cada una de ellas.

En la Figura 3 nótese que las mezclas con rípio de lixiviación y cemento portland puzolánico alcanzan la docilidad deseada para relaciones “w/c” similares y el comportamiento de resistencias resulta también similar en el tiempo y levemente inferiores al hormigón patrón. En el caso del hormigón con plastificante (M4), el comportamiento de la mezcla fresca no fue el esperado ya que para obtener la docilidad deseada hubo que agregar agua más allá del caso sin plastificante por lo que se aumentó la relación “w/c” y con ella disminuyó la resistencia observada respecto a los resultados obtenidos para las muestras M1 y M2.

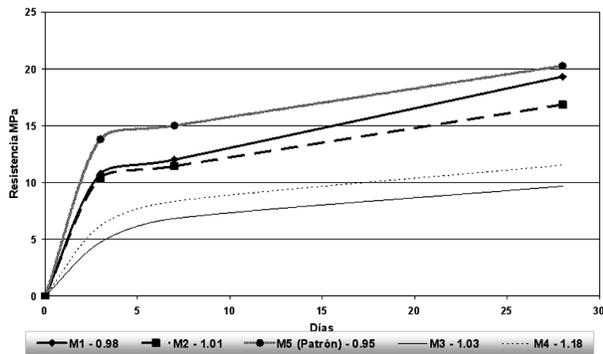


Figura 3. Resistencia a compresión hormigones con 200 kg de cemento por m³ e igual asentamiento de cono

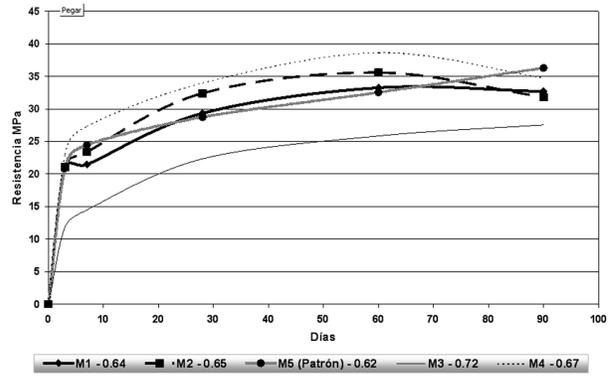


Figura 4. Resistencia a compresión hormigones con 300 kg de cemento por m³ e igual asentamiento de cono

En la Figura 4 se continúan observando comportamientos similares entre las mezclas con rípio de lixiviación con cemento Portland puzolánico, M1 y M2, y casi sin diferencias con el hormigón patrón M5. Hay una mejora notable para el caso de las mezclas con aditivo plastificante donde la dosis de cemento mejora su acción y por ende una reducción notable de la cantidad de agua.

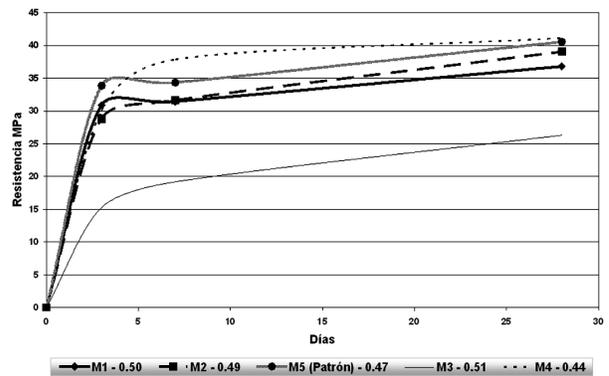


Figura 5. Resistencia a compresión hormigones con 400 kg de cemento por m³ e igual asentamiento de cono

En la Figura 5 se mantienen las condiciones de similitud en los resultados de resistencia para mezclas elaboradas con rípio de lixiviación, M1 y M2, con pocas diferencias con el hormigón patrón M5 quien se elabora con árido sano. Nuevamente el uso del plastificante mejora notablemente las condiciones de trabajabilidad y resistencia a temprana edad demostrando que para su accionar en este tipo árido grueso se requiere una dosis mínima de cemento.

4.4 Resistencia (R₂₈) v/s Relación agua – cemento (w/c)

En auxilio de procedimientos de dosificación para este tipo de hormigones, se utilizan los valores de

la relación “w/c” y los resultados de resistencia a compresión obtenidos de los respectivos hormigones a los 28 días (R_{28}). Con ellos se obtuvieron curvas “(R_{28}) v/s (w/c)” típicas para las condiciones específicas del hormigón estudiado.

Cuando se ordenan y grafican los valores de la relación “(R_{28}) v/s (w/c)”, la tendencia es una curva que puede ser ajustada a una forma hiperbólica; por ello, dado que es más fácil trabajar linealmente, se ocupa la ecuación de la recta, asumiendo resistencia media a 28 días como ordenadas y la relación cemento-agua (c/w) como abscisas, con cuya expresión se trabaja para determinar los parámetros que caracterizan esta curva (Veliz, et al., 1998). En efecto, la ecuación se define cómo:

$$R_{28} = m (c/w) + b \quad (1)$$

Despejando la relación agua-cemento (w/c):

$$w/c = m / (R_{28}-b) \quad (2)$$

Con m y b parámetros a definir empíricamente.

Utilizando estas relaciones se pueden obtener para cada mezcla de hormigón una curva, que se puede expresar en una fórmula de fácil aplicación, como puede observarse en la Tabla 4, con R_{28} en MPa.

Tabla 4. Valores de w/c en función de la relación R_{28} para cada muestra de Hormigón

Muestra	Relación w/c
M1	$w/c = 17,61 / (R_{28}-1,495)$
M2	$w/c = 21,51 / (R_{28}+3,29)$
M3	$w/c = 16,26 / (R_{28}+4,0)$
M4	$w/c = 20,10 / (R_{28}+2,04)$
M5 (Patrón)	$w/c = 18,55 / (R_{28}-0,047)$

De acuerdo con las funciones asumidas, en la Figura 6 siguiente se pueden observar las distintas curvas “(R_{28}) v/s (w/c)” para los distintos hormigones confeccionados.

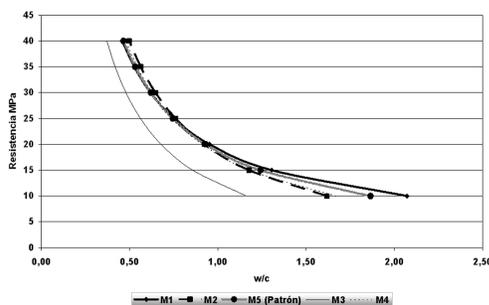


Figura 6. Gráfico Resistencia (R_{28}) v/s relación agua/cemento (w/c)

De acuerdo a estas curvas se puede recomendar dosificar distintos hormigones con las características de cada una de las muestras, como se señala a modo de ejemplo en la Tabla 5.

Tabla 5. Dosificaciones recomendadas para distintas resistencias a la compresión (f_c) a 28 días y asentamiento de cono 6 cm

M1			
f_c (Mpa)	W/C	Agua (Lt)	Cemento (Kg)
20	0,95	195	205
25	0,75	195	260
30	0,62	195	316
M3			
f_c (Mpa)	W/C	Agua (Lt)	Cemento (Kg)
20	0,68	208	307
25	0,56	208	371
30	0,48	208	435
M5 (Patrón)			
f_c (Mpa)	W/C	Agua (Lt)	Cemento (Kg)
20	0,93	187	201
25	0,74	187	252
30	0,62	187	302
M2			
f_c (Mpa)	W/C	Agua (Lt)	Cemento (Kg)
20	0,92	195	211
25	0,76	195	257
30	0,65	195	302
M4			
f_c (Mpa)	W/C	Agua (Lt)	Cemento (Kg)
20	0,91	204	224
25	0,74	204	275
30	0,63	204	325

5. Análisis de los resultados

Las cantidades de agua son un promedio de lo que realmente se utilizó para la confección de cada hormigón considerando para todos una misma docilidad (cono 6 cm).

5.1 De los ripsos de lixiviación

- El ripo integral, proveniente de los procesos de lixiviación contiene una gran cantidad de finos, con muchas impurezas, presentando condiciones inadecuadas para la utilización en hormigones, es la razón por la cual se recomienda tamizar el árido y desechar tamaños bajo malla N° 4.
- La gravilla proveniente del ripo de lixiviación, en combinación adecuada con arena, resulta de una granulometría apta para hormigones, pero sobrepasa en el doble el porcentaje de absorción y alrededor de seis veces el contenido de finos que recomienda la norma NCh 163. En el caso de las sales, los cloruros cumplen lo recomendado por esta norma, sin embargo los sulfatos la sobrepasan en 4 veces.

- La arena que resulta de la separación del integral lixiviado presenta una alta cantidad de finos bajo malla 200 (28.16%) lo que la hace inadecuada para ser usada en hormigones. Además la cantidad de sulfatos también sobrepasan lo especificado en la NCh 163 por lo cual se decide eliminar la fracción fina definida como arena en la separación del integral.
- Para mejorar las condiciones de la gravilla proveniente del ripio de lixiviación, es conveniente efectuarle un lavado logrando así reducir su porcentaje de finos y contaminación de cloruros y sulfatos.
- El lavado como método de eliminación de impurezas aplicado nos señala que existe una gran eficiencia en la eliminación de finos (81%), en cambio proporciona una leve disminución sulfatos (40%) y cloruros (54%).

5.2 De las muestras de hormigón

- Se puede observar que mezclas de hormigón confeccionadas con cemento Puzolánico adquieren menor resistencia, indistintamente de la cantidad de cemento, comparados con los confeccionados con cemento pórtland-puzolánico de alta resistencia.
- No se aprecian diferencias sustanciales entre mezclas confeccionadas con gravillas de lixiviación lavadas y mezcla patrón (confeccionada con "Gravilla El Way"), para las diferentes dosis de cemento en la calidad pórtland-puzolánico de alta resistencia.
- Para el caso de mezclas confeccionadas con 300 kg. de cemento, las cuales se ensayaron hasta los 90 días, los resultados indicarían una disminución de resistencia con la edad cuando se utilizan gravillas de lixiviación. En el análisis de este fenómeno no se puede ser concluyente porque fueron las únicas muestras ensayadas a esa edad y bien puede ser producto de las dispersiones propias e implícitas en los resultados experimentales, aunque el proceso de fraguado húmedo a que quedan expuestas las probetas de mayor edad pueden reflejar la canalización de fenómenos de degradación producto de las sales aún en estado incipiente.
- Las curvas resistencia versus w/c son una buena herramienta de dosificación de acuerdo a experiencias hechas en laboratorio. De esta manera, establecida la necesidad de alcanzar una resistencia especificada, mediante dichas curvas se provee información para determinar la relación agua/cemento necesaria para el diseño, y de esta forma conocer a su vez la cantidad de cemento a utilizar para la docilidad especificada. En este caso, según lo observado en la Tabla 4, las curvas obtenidas para cemento pórtland puzolánico de alta resistencia no tienen diferencias significativas entre sí.

6. Conclusiones

- Los ripios sobrantes del proceso de lixiviación de cobre, como es lógico, no cumplen con las recomendaciones de la norma de áridos para morteros y hormigones, NCh 163.
- La eliminación de impurezas por medio del lavado con agua potable, tiene una gran eficiencia en cuanto a la eliminación de finos. Sin embargo, no es tan eficiente en la eliminación de sulfatos y cloruros que contaminan la muestra.
- Como era de esperar los ensayos de resistencia muestran claramente que el cemento puzolánico aporta menores resistencias que el cemento Portland puzolánico de alta resistencia.
- Los ripios de lixiviación debido a su gran absorción necesitan una mayor cantidad de agua de amasado. De esta forma darían una mayor oportunidad a la formación de etringita en la mezcla, la cual disminuye la resistencia del hormigón en el tiempo.
- Las curvas resistencia versus w/c a pesar de ser una buena herramienta para dosificar en condiciones de laboratorio, no muestran la real diferencia entre la utilización de un ripio u otro, debido a que estas curvas son diseñadas con la resistencia a los 28 días, instante en el cual aún no es demostrativo el daño provocado por la presencia de sales o por etringita en formación.
- En base a los resultados experimentales, el uso de hormigones con ripio de lixiviación cumple satisfactoriamente las resistencias al obtener resultados similares a los del hormigón patrón. Sin embargo, de este mismo estudio y debido al poco tiempo comprometido en el seguimiento de las probetas en relación a lo que demanda un estudio de durabilidad, no se puede ser concluyente en recomendar su uso abiertamente ya que por los contenidos de sales los problemas se manifestarán dependiendo de las condiciones medioambientales en que se desenvuelva la estructura que utilice este hormigón.
- Dadas las especiales condiciones climáticas del norte de Chile (sequedad ambiental y muy baja pluviometría anual), estos hormigones pueden recomendarse para estructuras secundarias de corta vida útil y que no queden sometidas a condiciones de humedad y ataque de otros agentes agresivos. Es así que su uso se recomienda a estructuras tipo muros de sostenimiento de tierras o rellenos de estabilización de suelos, cuya



demanda también es alta en volumen en las faenas de la gran minería del cobre.

- Es recomendable emprender estudios de más alta duración tendientes a precisar el comportamiento de este hormigón a más larga edad, así como las condiciones de durabilidad para determinar la vida útil dependiendo de las condiciones medioambientales de desempeño.

6. Referencias

- Aguilar L. (2005), "Factibilidad de uso de ripios de lixiviación en hormigones en la gran minería". Memoria de Título. Dpto. Ingeniería Civil. U. Católica del Norte. Antofagasta. Chile.
- Biczok I. (1972), "Corrosión y Protección del Hormigón". Ediciones Urmo
- INN (1977), NCh-163.Of79, Instituto Nacional de Normalización. "Áridos para Morteros y Hormigones. Requisitos Generales". Instituto Nacional de Normalización. Chile.
- INN (1985), NCh-170.Of85. "Hormigón. Requisitos Generales". Instituto Nacional de Normalización. Chile.
- Lanas P. (1995), "Influencia de la presencia de los sulfatos en los hormigones de cemento de Chuquicamata". Memoria de Título. Dpto. Ingeniería Civil. U. Católica del Norte. Antofagasta. Chile.
- Miric P. (1996), "Evaluación del efecto provocado en el hormigón por los sulfatos contenidos en los áridos y como agente externo al hormigón". Memoria de Título. Dpto. Ingeniería Civil, U. Católica del Norte. Antofagasta. Chile.
- Prusiski y Carrasquillo (1995), Fifth CANMET/ACI International Conference Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP-153, vol 1, Milwaukee, Wisconsin, USA, pp 43-65.
- Ramachandran V.S (1996), "Concrete Admixture Handbook. Propiedades", Science and Technology, Noyes Publications. p 304.
- Veliz F., Serrano O. y Zetola V. (1998), "Análisis de Parámetros para dosificar descritos en NCh170". XII Jornadas Chilenas del Hormigón. U. de Concepción. Concepción. Chile.