



# Factibilidad del reemplazo del agregado fino por arena de relave en el hormigón

## Feasibility of using sand tailings instead of fine aggregate in concrete making process

**Lira Cifuentes G.1**

**Autores: Guillermo Alejandro Lira Cifuentes**

**Rodrigo Hernán Osses Peña**

**Universidad de La Frontera**

**glira@ufro.cl, phone: 56-45-2325685**

**rosses@ufro.cl, phone: 56-45-2325545**

### INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del  
artículo:

Recibido  
09-05-2013  
Aceptado  
22-11-2013  
Publicado  
20-12-2013

Palabras Claves:  
Concreto  
Medio Ambiente  
Impacto ecológico  
Arena de relave

### Resumen

---

Considerando los impactos ambientales de la construcción y minería, el presente artículo, analiza la factibilidad técnica de reemplazar el agregado fino en el hormigón, por arenas de relave de la explotación del cobre. Los áridos son la estructura soportante del hormigón, constituyendo el 70 al 80% del volumen. Su reemplazo permitiría disminuir la explotación indiscriminada de ríos minimizando los efectos de las crecidas. Por otra parte los procesos mineros depositan arena en tranques que generan impactos ambientales y riesgos de avalanchas. Chile ha incrementado su producción de cobre gracias a nuevos flujos de inversión. Esto ha impulsado el desarrollo quedando atrás un mayor compromiso en la sustentabilidad de la construcción y descontaminación.

Las actividades del estudio fueron:

Obtención de parámetros de diseño para hormigones de los áridos en estudio.

Establecer la dosificación de diseño de los áridos patrones y el equivalente con la arena de relave.

Evaluar la resistencia a compresión que entrega la arena de relave comparada con los áridos patrones

Finalmente resulta factible la utilización de la arena de relave, obteniéndose resistencias mayores a edades tempranas y de cálculo, justificándose iniciativas que permitan aprovechamiento del material.



## INFORMACIÓN DEL ARTICULO

### Article history:

Received  
09-05-2013  
Accepted  
22-11-2013  
Available  
20-12-2013

Keywords:  
Concrete,  
Environment,  
Ecological impacts  
Sand of tailings

## Abstract

---

This paper analyses the feasibility of using sand tailings instead of fine aggregate in concrete making process which has important implications considering the negative environmental effects of building activities as well as mining exploitation.

These implications are given by the fact that aggregates are between 70 to 80% of concrete composition and they represent their supportive structure. Therefore, its replacement by sand tailings implies a positive effect since reduces river's bank exploitation activities and its resulting mismanagement of river bank resources which are an important cause of human produced floods.

Additionally, copper extraction activities produce large amounts of sand tailings, which are deposited in surface dams. As a consequence, the risk of floods and the negative impact on the environment and the landscape are increased. Mining companies do not have a practical usage of this residual material of their extraction activities.

The production of refined copper in Chile has experienced an outstanding pace of growth in the last years, which is mainly explained by the increasing flows of foreign direct investment. The expansion of the mining sector has boosted Chilean economic growth, but at the same time has increased the challenge of improving environmental sustainability of mining and construction activities. In this context, this paper explores the feasibility of using sand tailings from the mining activity in the production of concrete, as a way to alleviate the environmental impact of both activities.

In order to address this question the following activities were performed:

Getting the design parameters for the concrete aggregates under study.

Establish the amount of fine aggregate in the elaboration of concrete and compare it with the required amount of sand tailings.

Compare the mechanical resistance to compression of concrete made using sand tailings versus concrete using traditional fine aggregates.

Finally, this analysis concludes that the using of sand tailings in the elaboration of concrete is feasible. The results show higher resistance at early ages and calculation of concrete made using sand tailings rather than fine aggregates. Therefore, this paper justifies the use of sand tailings in construction activities, which implies a positive impact for environmental decontamination.

## 1. Introducción

La minería el cobre es la más importante en Chile, aportando un considerable porcentaje del producto interno bruto, sin embargo el impacto ambiental que genera esta actividad es una preocupación importante tanto para las empresas como el Estado. Para ello se realizan esfuerzos para manejar los desechos en forma controlada. Los residuos industriales sólidos (RIS) se disponen en vertederos autorizados y los líquidos (RIL), se depositan en grandes tranques.

Se considera que del total de mineral extraído en una mina, aproximadamente sólo el 1% corresponde al metal, el resto es descartado como desechos, donde la arena de relave es uno de ellos.

No cabe duda que la utilización práctica de estos desechos como en este caso, contribuiría de manera importante al proceso de descontaminación.



Fig. 1.- Tranque de relave (Fuente: Serrano 2010)

### 1.1 Arena de relave

El relave corresponde a una suspensión de mineral residual en agua que se elimina de las plantas concentradoras y que, generalmente, se deposita en un tranque. El relave contiene aproximadamente un 50% de material sólido, compuesto por especies minerales muy poco solubles y 50% de agua. En el tranque la parte sólida decanta, mientras la parte acuosa forma una laguna artificial, parte de la cual puede evacuarse al medio, constituyendo un residuo industrial líquido (RIL).

### 1.2 Origen del relave

En el proceso de concentración, específicamente en el proceso de flotación se producen los residuos llamados relaves.

### 1.3 Procesos de chancado y molienda

El objetivo del proceso de concentración, es liberar y concentrar las partículas de cobre que se encuentran en forma de sulfuros en las rocas mineralizadas. Este se realiza en instalaciones de superficie (planta) lo más cerca posible de la mina.

Este proceso se divide en:

#### Etapa 1 chancado

El mineral proveniente de la mina presenta una granulometría variada, desde 1 hasta 100mm, por lo que se debe reducir el tamaño de las partículas mayores hasta un tamaño uniforme de  $\frac{1}{2}$  pulgada (12,5mm).

Para esto se combinan tres equipos en línea que reducen el material a 8", luego a 3" y finalmente a  $\frac{1}{2}$ ".

#### Etapa 2 molienda

En esta etapa se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener una granulometría máxima de 180 micrones (0,18mm.), la que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales de cobre en forma de partículas individuales.

La molienda se realiza de dos formas, un proceso de molienda semi autógena (SAG) mineral más agua y cal desde el chancador primario, y uno convencional de chancado, en este último caso mediante molinos de barras y de bolas. En ambos casos el mineral se mezcla con agua obteniéndose un material reducido a un tamaño máximo de de 180 micrones, y luego esta pulpa es llevada a la siguiente etapa.

#### Etapa 3 flotación

La flotación es un proceso físico-químico que permite la separación de los minerales sulfurados de cobre y otros elementos como el molibdeno, del resto de los que componen la roca original.

La pulpa que ya tiene incorporados los reactivos necesarios para la flotación, se introduce en receptáculos (celdas de flotación). Desde el fondo de las celdas se hace burbujear aire y se mantiene la mezcla en constante agitación para que el proceso sea intensivo.

Los reactivos cumplen las siguientes funciones:

Reactivos espumantes: producen burbujas resistentes.

Reactivos colectores: impregnan las partículas de sulfuros de cobre y molibdeno para que se separen del agua y se unan a las burbujas.

Reactivos depresantes: producen el efecto inverso al de los colectores, para evitar la recolección de otros minerales como la pirita, que es un sulfuro que no tiene cobre.

Cal: estabiliza la acidez de la mezcla en un valor de pH determinado proporcionando un ambiente adecuado para que ocurra todo el proceso de flotación.

Las burbujas arrastran consigo los minerales sulfurados hacia la superficie, donde rebasan por el borde de la celda hacia canaletas las conducen hacia estanques especiales, desde donde la pulpa es enviada a la siguiente etapa.



Fig. 2.- Planta de flotación (Fuente: Serrano 2010)

El proceso es reiterado en varios ciclos de manera que cada ciclo va produciendo un producto cada vez más concentrado. El concentrado final de cobre es secado mediante filtros y llevado al proceso de fundición.

El espesamiento del relave permite recuperar una parte del agua utilizada. Finalmente el relave es conducido en el caso de la mina El Teniente, por una canoa de más de 85Km. desde la cordillera de los Andes hasta el tranque de relave Carén, en la cordillera de la Costa.

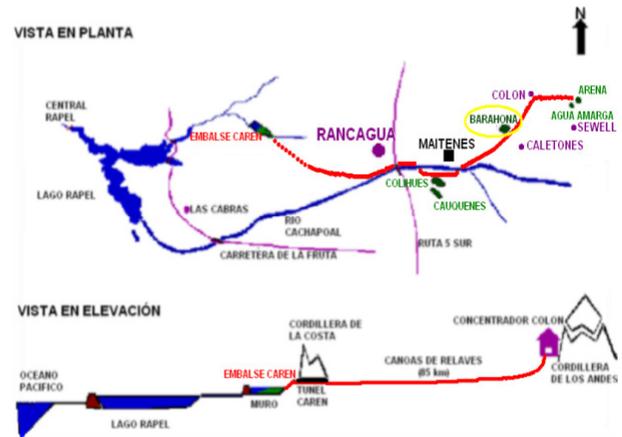


Fig. 3.- Traslado del relave (Serrano 2010)



Fig. 4.- Disposición final (Fuente: Serrano 2010)

## 2. Fase experimental del estudio

Para llevar a cabo el estudio de factibilidad, se confeccionaron 24 probetas de hormigón en cubos de 20 cms. de arista, de las cuales 12 de ellas fueron patrón y las otras 12 de estudio (con arena de relave). Se dosificaron con respecto a diferentes dosis de cemento (200, 300, 400kg./m<sup>3</sup>), para su posterior comparación mediante el análisis de ensayos a la compresión a 7, 14 y 28 días. Esto se realizó en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, de la Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración, de la Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

**Cemento:**

Cemento Melón Especial, Clase Puzolánico, Grado Corriente.

**Grava, gravilla y arena gruesa:**

Áridos extraídos del acopio de una planta hormigonera de Temuco.

**Arena fina:**

Árido extraído del acopio de una planta hormigonera de Temuco.

**Arena de relave:**

Árido extraído del acopio de Codelco, División El Teniente.

**Agua:**

Agua potable directamente de la red del laboratorio.

La extracción y preparación de las muestras se efectuó según la NCh 164 Of.76.



Fig. 4.- Método de cuarteo a la arena de relave (Fuente: Serrano 2010)

El tamizado y determinación de la granulometría se realizó según la norma NCh 165 Of. 77.

Para la determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas se aplicó la norma NCh 1117 Of.77.



Fig. 5.- Determinación de densidades (Fuente: Serrano 2010)

Para la determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las arenas se utilizó la norma NCh 1239 Of.77.

Áridos	Densidad real saturado superficialmente seco	Densidad real seco	Densidad neta	Absorción de agua
	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	%
Grava	2.644	2.620	2.686	0,95
Gravilla	2.672	2.643	2.722	1,09
Arena gruesa	2.695	2.652	2.770	1,60
Arena fina	2.646	2.604	2.719	1,60
Arena relave	2.724	2.704	2.761	0,80

Tabla 1.- Tabla de densidades real y neta

Para la determinación de la densidad aparente se aplica la norma NCh 1116 Of.77.

Áridos	Densidad aparente compactada	Densidad aparente suelta
	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )
Grava	1.586	1.448
Gravilla	1.544	1.429
Arena gruesa	1.770	1.629
Arena fina	1.601	1.499
Arena relave	1.544	1.381

Tabla 2.- Tabla de densidad aparente

Para la determinación colorimétrica de la presencia de impurezas orgánicas en las arenas para hormigones se aplica la norma NCh 166 Of 52.



Fig. 6. Determinación colorimétrica (Fuente: Serrano 2010)

## 2.1 Determinación de la dosificación

De acuerdo a las condiciones determinadas de tamaño máximo de áridos, fluidez, consistencia y razón agua/cemento, se pueden calcular las cantidades de los diferentes componentes del hormigón.

**Dosis de agua:** se definen empíricamente tablas de demanda de agua libre en función de: asentamiento del cono, tamaño máximo del árido, tipo de hormigón y contenido de cemento. Se establece la cantidad de agua expresada en litros por metro cubico de hormigón colocado y compactado.

**Dosis de cemento:** en este caso, se establece la dosis de cemento y dada el agua determinada, se obtiene la razón agua /cemento.

**Dosis de árido grueso:** se determina a partir del modulo de finura de la arena y el tamaño máximo de árido. Como la dosis se expresa en litros por metro cubico se debe multiplicar por la densidad aparente compactada seca de los áridos gruesos para que quede expresada en kilos por metro cubico.

**Dosis de árido fino:** para su cálculo se deben sumar los volúmenes absolutos de agua, cemento, aire, áridos grueso y áridos finos, lo cual debe ser igual a un metro cubico. Ello permite definir el volumen absoluto de el árido fino, el cual, multiplicado por su densidad real, conduce al valor de la dosis de árido fino, expresada en kilo por metro cubico.

**Dosis de aire:** se toma de tablas validadas empíricamente, y se determina según el tamaño máximo del árido. Estos datos determinados se refieren a una dosificación de hormigón en estado saturado superficialmente seco, por lo tanto, es necesario conocer la absorción de los áridos para obtener la dosificación del hormigón en peso seco. Al tener las dosis de los componentes del hormigón en peso seco, se debe realizar una corrección por humedad de estos valores, de tal manera de obtener la dosificación del hormigón en peso húmedo. La humedad se determina pesando los áridos en estado natural y después secarlos en estufa a masa constante, para luego registrar el peso final.

La humedad se determina pesando los áridos en estado natural y después secarlos en estufa a masa constante, para luego registrar el peso final

$$\frac{(PH-PS) * 100}{PS}$$

Donde:

H: humedad del árido (%)

PH: peso en estado natural del árido (Kg.)

PS: peso después de secado (Kg.)

Con este método de diseño se realizaron seis tipos de dosificaciones de hormigón por dosis de cemento, tres para el hormigón patrón (con arena fina) y tres para el hormigón de estudio (con arena de relave). Por lo tanto, se confeccionaron un total de 24 probetas cubicas de hormigón.

Para el diseño anteriormente señalado se consideraron las siguientes condiciones específicas para este estudio:

**Dosificación por dosis de cemento:** se realizó para tener una tendencia, y se obtiene la curva de diseño de dosis de cemento para cada tipo hormigón, haciendo más fácil el cálculo del hormigón. Las dosis de cemento establecidas para el presente estudio son de 200, 300 y 400 kg/m<sup>3</sup>, lo cual abarca la mayor parte de los hormigones despachados a nivel nacional.

**Módulo de finura de arena:** siendo un valor esencial en la determinación de la dosis del árido grueso, se estableció un mismo módulo de finura de la arena para ambos hormigones. En el hormigón patrón, se combinó la arena gruesa con la arena fina en una proporción de 75 y 25% respectivamente, dando un módulo de finura de la arena de 2,99. Para que las curvas de árido combinado de los hormigones fueran similares, se combino la arena gruesa con la arena de relave, de tal manera de obtener el mismo módulo de finura de 2,99 que el hormigón patrón, arrojando diferentes proporciones de las arenas, siendo un 83% de arena gruesa y un 17% de arena de relave.

**Tamaño máximo de árido:** se estableció debido a que estudios demuestran que hormigones de prueba con tamaño máximo de 40 mm. presentan menor dispersión en resistencia y densidad, que hormigones confecciones con tamaño máximo de áridos menores.

**Asentamiento del cono:** de 6 cm, es el que se emplea usualmente para los hormigones. La elección de tamaño máximo (40 mm.) y el asentamiento de cono (6 cm.), se debió principalmente a que corresponde al producto con el cual se mide la dosis de cemento de una planta de hormigón (HN30(90)40-06), y dicho valor es lo más relevante en el cálculo del precio de un hormigón.

Hormigón	Insumos	Designación	Tipo de hormigón (DO)	Dosis de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Tamaño máximo árido (mm)	Asentamiento del cono (cm)	Número de probetas
Patrón	Cemento	DO200(00)40-06	Hormigón dosificado por dosis de cemento	200	40	6	4
	Agua total						
	Grava Gravilla						
Estudio	Arena Gruesa Arena Fina	DO300(00)40-06	Hormigón dosificado por dosis de cemento	300	40	6	4
	Cemento	DO400(00)40-06	Hormigón dosificado por dosis de cemento	400	40	6	4
	Agua total						
Grava Gravilla							
Estudio	Arena Gruesa Arena Relave	DO200(00)40-06	Hormigón dosificado por dosis de cemento	200	40	6	4
	Cemento	DO300(00)40-06	Hormigón dosificado por dosis de cemento	300	40	6	4
	Agua total						
Grava Gravilla							
Estudio	Arena Gruesa Arena Relave	DO400(00)40-06	Hormigón dosificado por dosis de cemento	400	40	6	4
	Cemento	DO200(00)40-06	Hormigón dosificado por dosis de cemento	200	40	6	4
	Agua total						
Grava Gravilla							

Tabla 3. Tabla de dosificaciones



Fig. 7.- Tipos de hormigón que se dosificarán

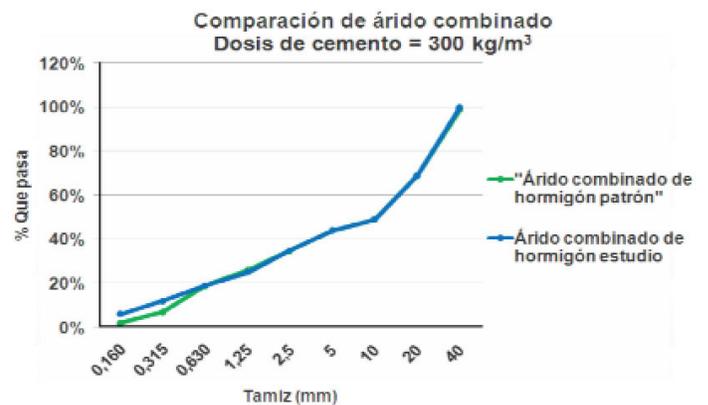


Fig. 9.- Gráfico comparativo de las curvas de árido combinado de los hormigones con dosis de cemento de 300kg./m<sup>3</sup>

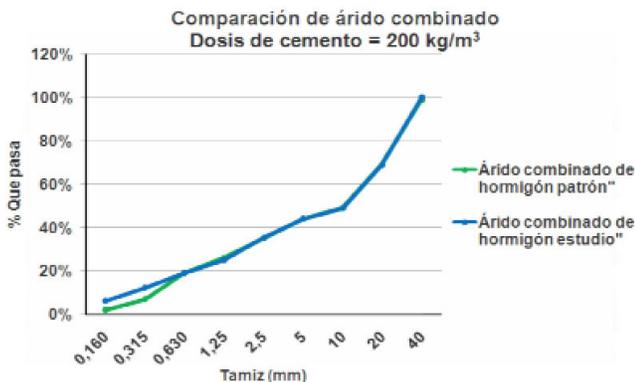


Fig. 8.- Gráfico comparativo de las curvas de árido combinado de los hormigones con dosis de cemento de 200kg./m<sup>3</sup>

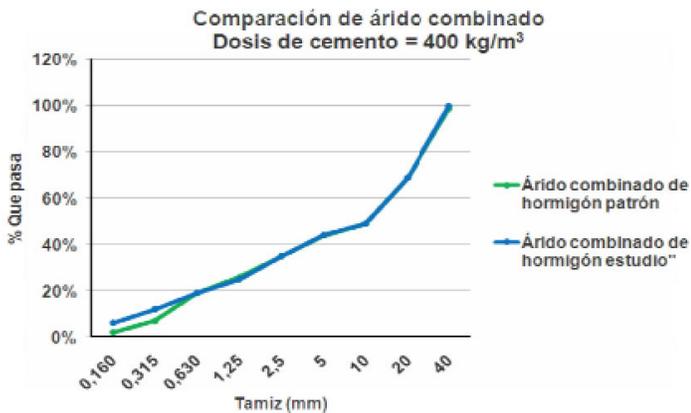


Fig. 10.- Gráfico comparativo de las curvas de árido combinado de los hormigones con dosis de cemento de 400kg./m<sup>3</sup>

Para las distintas dosis de cements se puede observar que ambas curvas de áridos combinados son muy similares, esto es debido a que se estableció el mismo modulo de finura para ambas arenas.

### 3. Ensayos de resistencia a la compresión de las probetas & analisis de resultados

La resistencia es una de las propiedades más importantes del hormigón (principalmente cuando se le utiliza con fines estructurales). Por esto, se expresan de forma gráfica los resultados a la compresión de las probetas, estableciendo la comparación entre las curvas de los hormigones patrones con los de estudio mediante diferentes dosis de cements, como se indica:

Probeta	Resistencia a Compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )				
	R7	R14	R28 <sup>(1)</sup>	R28 <sup>(2)</sup>	R28 (promedio)
Patrón	55	94	151	145	148
Estudio	73	117	152	160	156

Tabla 4.- Resistencia a la compresión con dosis de cemento de 300kg/m<sup>3</sup>

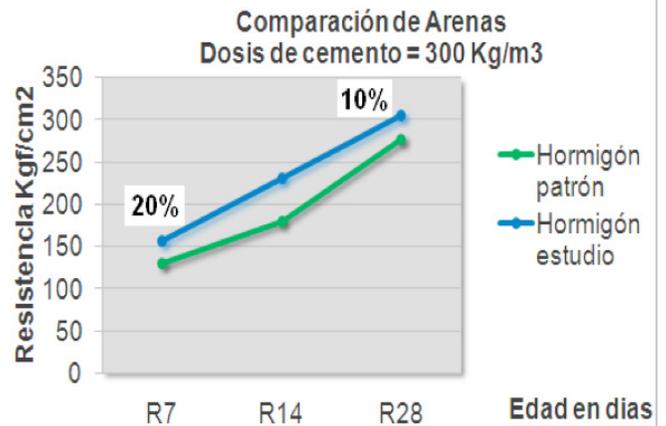


Fig. 12.- Gráfico de resistencia v/s edad, con dosis de cemento de 300kg./m<sup>3</sup>

Probeta	Resistencia a Compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )				
	R7	R14	R28 <sup>(1)</sup>	R28 <sup>(2)</sup>	R28 (promedio)
Patrón	145	227	301	291	296
Estudio	170	260	315	323	319

Tabla 5.- Resistencia a la compresión con dosis de cemento de 400kg/m<sup>3</sup>

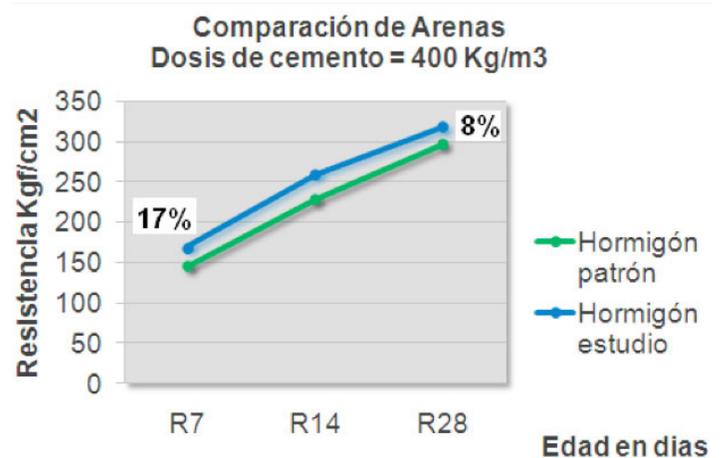


Fig. 13.- Gráfico de resistencia v/s edad, con dosis de cemento de 400kg./m<sup>3</sup>

Cabe señalar que el aumento de las resistencias se ajusta a lo esperado, según las distintas dosis de cemento establecidas.

La tendencia de la resistencia a la compresión a temprana edad (7 días) en el hormigón de estudio en todos los casos, es significativamente superior al hormigón patrón, disminuyendo esta diferencia a los 28 días, denotando que la incorporación de la arena de relave es favorable para el incremento en la resistencia del hormigón.

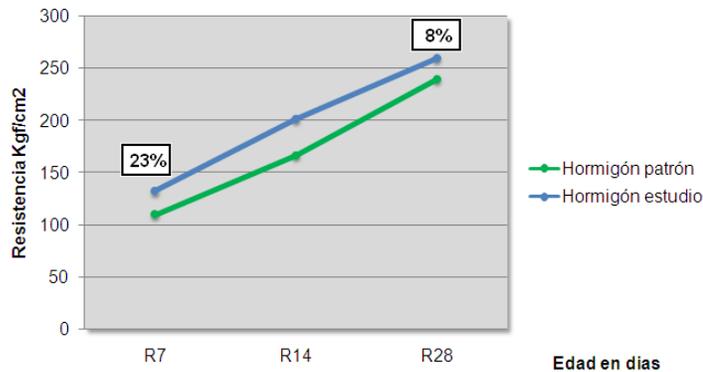


Fig. 14.- Gráfico promedio de resistencia v/s edad

#### 4. Conclusiones

De la investigación y análisis de datos se puede señalar que la resistencia lograda en el hormigón de estudio (con arena de relave) es superior que el hormigón patrón, a las distintas dosis de cemento establecidas.

Esta diferencia de resistencia es más significativa a temprana edad, a los 7 días, con un promedio de un 23%, disminuyendo a los 28 días con una diferencia promedio entre los hormigones del 8%.

A modo de conclusión general, como estudio de factibilidad se puede afirmar que el uso de arena de relave de procesos mineros en el hormigón, es factible desde el punto de vista de la resistencia mecánica a la compresión.

Esta investigación corresponde a una primera fase que se puede complementar con otros estudios de factibilidad a futuro, tales como; determinación de los componentes mineralógicos, ensayos a la flexotracción, abrasión, adherencia (para uso como morteros) durabilidad del hormigón en el tiempo, comportamiento en la aplicación en el hormigón armado (armadura), utilización del hormigón en condiciones ambientales desfavorables, reacción con los aditivos, entre otros.

Como recomendaciones para futuros estudios uno muy interesante, sería el reducir la dosis de cemento en el hormigón, debido a que es el insumo de mayor costo. Todo esto sin que se vea disminuida la resistencia, gracias a la arena de relave y sus propiedades de incremento en la misma según lo demostrado en el presente estudio.

En lo más importante, este estudio propone una alternativa innovadora en cuanto a la utilización de un material de desecho, para incorporarlo como insumo en la fabricación del hormigón.

Esto aporta en soluciones de carácter:

Medioambientales (disminución de la contaminación visual y ambiental de los relaves, además de la disminución de la presión en la extracción de áridos en cursos naturales).

Económicas (optimización de costos de elaboración del hormigón por la vía de reemplazo del árido fino, aditivos y dosis de cemento).

Técnicas (aumento de la resistencia mecánica a la compresión en el hormigón en masa, oportunidad de desarrollo de hormigones de rápida puesta en servicio "fast track").

#### Bibliografía

- 1.- Trabajo de Título: Autor: Viviana Isabel Serrano Pizarro, Prof. Guía: Guillermo Lira Cifuentes, 2010 "Estudio de Factibilidad del uso de Arenas de Relave de Procesos Mineros en el Hormigón", Temuco, Chile, Universidad de La Frontera.
- 2.- Manual: Autor: Zabaleta G., Hernán, Mayo 1992, "Compendio de Tecnología del hormigón", Instituto Chileno del Hormigón.
- 3.- Libro: Autor: Günter Joseph, 1999, "Copper, Its Trade, Manufacture, Use, and Environmental Status", U.S.A., Edited by: Konrad J.A. Kundig