

USO DE ESCORIAS DE COBRE EN LA FABRICACIÓN DE ADOCRETOS DE HORMIGÓN

A. Nazer ⁽¹⁾, O. Varela ⁽¹⁾, O. Pavez ⁽²⁾, S. Fuentes ⁽¹⁾, P. Castillo ⁽¹⁾, L. González ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Tecnológico, Universidad de Atacama

⁽²⁾ Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, CRIDESAT
Av. Copayapu 485 - Copiapó.
amin.nazer@uda.cl - osvaldo.pavez@uda.cl

RESUMEN

En este trabajo se estudia el uso de escorias de cobre en la elaboración de prefabricados de hormigón, a partir del reciclaje de este residuo metalúrgico desde tres escoriales abandonados de la Región de Atacama. Con este propósito se estudió la factibilidad técnica-económica de un proyecto de construcción y puesta en marcha de una planta industrial productora de pavimentos de adocretos utilizando escorias de cobre en reemplazo de áridos normales. En el desarrollo del trabajo se presentan antecedentes sobre la obtención de la materia prima, el proceso de fabricación de prefabricados, el estudio de mercado y la evaluación económica. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que el proyecto de fabricación de adocretos de hormigón utilizando escorias de cobre tiene viabilidad de producción y es económicamente rentable.

Palabras claves: Escorias de cobre, prefabricados de hormigón, escoriales abandonados, reciclaje.

ABSTRACT

This paper addresses the use of copper slag in the production of precast concrete, by recycling this waste from three abandoned dumps in the Atacama Region. For this purpose, it was investigated the technical-economical feasibility of a project comprising the construction and start up of an industrial plant to produce concrete pavements using copper slags replacing normal aggregates. In the development of the work information is presented on obtaining raw materials, manufacturing process of precast, market study and economical evaluation. The results obtained in this study allow us to conclude that the proposed precast concrete manufacturing using copper slag is viable and economically profitable.

Keywords: Copper slag, precast concrete, abandoned dumps, recycling

1. INTRODUCCIÓN

En la Región de Atacama el proceso de fundición de minerales de cobre desarrollado en el siglo XIX y XX generó grandes volúmenes de escorias, los cuales se depositaron en vertederos al aire libre en lugares cercanos a los yacimientos mineros. Los vertederos abandonados más importantes de la región que permanecen hasta ahora se ubican geográficamente en las localidades de Nantoco, Canto del Agua y Caldera.

El crecimiento económico experimentado por la región permite estimar que en los próximos 10 años la actividad de la construcción tendrá un notable incremento de la superficie construida, asociándose a ello el aumento de la demanda de materiales para pavimentos de las edificaciones [1]. Desde hace varios años, los autores de este trabajo han desarrollado estudios sobre el uso de escorias de cobre en reemplazo de áridos normales en la fabricación de morteros y hormigones en la industria de la construcción, estimando que el uso de escorias resulta altamente atractivo debido a que mejora la resistencia a la compresión y flexo-tracción en morteros y hormigones [2, 3, 4].

En el presente trabajo se estudia la fabricación de adocretos de hormigón a escala industrial, teniendo como materia prima escorias de cobre procedentes de tres vertederos abandonados existentes en la Región de Atacama. En el desarrollo de este estudio se han considerado aspectos económicos y ambientales.

2. METODOLOGÍA

2.1. Caracterización Química y Mineralógica de las Escorias de Cobre

Los análisis químicos y mineralógicos de las muestras de escorias fueron realizados en el

Departamento de Geología de la Universidad Católica del Norte. Las características del método utilizado en los análisis químicos fueron las siguientes:

Método Analítico: Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (muestra en base seca). Pérdida por calcinación a 980 °C durante 1 hora y Humedad a 105 °C durante 2 horas.

Análisis Mineralógico: Se utilizó un Difractómetro de Rayos X marca Siemens, modelo D5000 automático y computarizado.

2.2. Selección de los depósitos de escoria de cobre y de la localización de la fábrica de adocretos

Los depósitos de escorias de cobre se seleccionaron a través de la base de datos regional *Slags* 1.0 [5,6]. Para ello se tuvo en cuenta lo siguiente: Cercanía del depósito a la fábrica, aspectos legales, técnicos, económicos y ambientales.

En el estudio de la localización del proyecto fueron considerados los siguientes factores: Ubicación y superficie del terreno, aspectos legales, distancias a los centros de distribución de insumos, nivel de producción, calidad del producto e inversión.

Aspectos legales. El proyecto de construcción de la fábrica se ajustó a los requerimientos y regulaciones comunales establecidas en Plan Regulador Comunal de Copiapó, y las exigencias para los proyectos de servicios básicos.

Distancia a los centros de distribución de insumos. La cercanía a los centros de distribución de insumos y abastecimiento de materia prima resulta muy importante ya que abarata los costos del proyecto.

Nivel de producción. El estudio del nivel de producción de adocretos está relacionado con

la selección del tamaño de la planta y la potencial demanda del mercado consumidor determinadas mediante encuestas a personas naturales, empresas públicas y privadas. El proceso productivo consideró la selección de maquinaria, equipos y recursos humanos necesarios. Un aspecto importante en la selección del proveedor de estos equipos fue el criterio de disponibilidad y soporte técnico.

Calidad del producto. Tiene real importancia la caracterización de la materia prima y el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos en las Normas Chilenas determinados por ensayos de laboratorio. Los adocretos estarán compuestos por cemento, árido de escoria, agua y otros aditivos. La resistencia a la compresión debe cumplir con la resistencia mínima de 300 kg/cm².

Inversión. Se analizó la inversión necesaria para iniciar la producción, estimando el valor del terreno, construcción, maquinarias y equipos, capacitación del personal, controles de calidad, infraestructura y servicios entre otros.

2.3. Selección de la Dosificación

Para poder establecer la dosificación es necesario conocer la densidad aparente y los pesos específicos de los materiales, los que debe realizarse en un laboratorio. La dosificación considera las cantidades en que deben mezclarse sus componentes para cumplir con las condiciones necesarias, para que el mortero pueda utilizarse en la fabricación de baldosas. El mortero estará compuesto por cemento, árido de escoria, agua y otros aditivos. Para estimar la fórmula de la dosificación del mortero fue necesario confeccionar adocretos, los cuales se ensayaron por resistencia a la compresión para comprobar que la dosificación a emplear cumplía con la resistencia mínima de 300

kg/cm² exigidas por norma para estos prefabricados.

2.4. Selección de Equipos

Para la selección de los equipos, fue necesario considerar primero los equipos que se encuentran en la línea de proceso y los equipos que sirven de apoyo para la labor de éstos. En segundo lugar se consideró la capacidad de producción, requerido en el diseño de la fábrica, definida por el estudio de mercado. En tercer lugar está el criterio de disponibilidad y soporte técnico, punto muy importante, ya que si bien el equipo puede ser muy adecuado, la casa matriz puede encontrarse en una localización geográfica apartada, por ejemplo, otro país, en ese caso se privilegiará al fabricante más cercano, o que tenga un soporte sólido disponible y adecuado.

2.5. Estudio de Mercado

La evaluación del proyecto considera un estudio de mercado, que permite estimar, cualitativamente, a través de la aplicación de encuestas a personas y empresas, las posibilidades de consumo para remodelar, renovar o incorporar en sus proyectos pisos de baldosa de escoria de cobre de mayor duración, alta calidad y bajo precio. Además, el estudio de mercado considera un análisis cuantitativo, apoyado en estimaciones de proyecciones del mercado potencial de recubrimiento de pisos de superficie por construir, expresados en metros cuadrados, para los próximos 10 años (periodo 2013-2023), en la comuna de Copiapó.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización química y mineralógica de las escorias de cobre

En la tabla 1 se muestra el análisis químico de las escorias de cobre de los escoriales seleccionados, Playa Negra, Canto del Agua y

Nantoco. Por otra parte, la caracterización mineralógica mediante Difracción de Rayos X

de las escorias de cobre de los tres escoriales se presenta en las tablas 2, 3 y 4.

Tabla 1. Análisis químico de las escorias de cobre de los tres escoriales

Óxidos	Playa Negra (%)	Canto del Agua (%)	Nantoco (%)
Fe₂O₃	14,23	12,87	13,58
FeO	18,99	29,60	22,71
SiO₂	35,00	39,39	38,58
CaO	17,05	4,32	7,66
Al₂O₃	6,69	4,62	6,57
MgO	1,41	1,30	1,14
P₂O₅	0,49	0,75	0,70
SO₃	0,40	1,14	0,53
CuO	0,77	1,40	1,83
K₂O	1,21	0,32	1,01
Na₂O	0,81	0,33	0,58
TiO₂	0,27	0,14	0,23
MnO	0,17	0,05	0,30

Tabla 2. Análisis mineralógico de las escorias de cobre de Playa Negra

Compuesto	Fórmula	Contenido (%)
Augita	Ca(Fe, Mg)Si ₂ O ₆	35,60
Ferrosilita	FeSiO ₃	16,20
Silicato de hierro	Fe ₂ SiO ₄	8,60
Clinoferrosilita	FeSiO ₃	7,10
Ortoferrosilita	FeSiO ₃	6,30
Silicato de hierro, magnesio y calcio	Ca ₂ Fe _{1.2} Mg _{0.4} Si _{0.4} O ₅	5,90
Silicato de calcio, hierro y magnesio	Mg _{1.56} Fe _{0.39} Ca _{0.05} SiO ₆	3,90
Hierro	Fe	8,30
Óxido de hierro	Fe _{0.94} O	7,10
Tenorita	CuO	0,40
Óxido de hierro y cobre	CuFe ₅ O ₈	0,60

Tabla 3. Análisis mineralógico de las escorias de cobre de Canto del Agua

Compuesto	Fórmula	Contenido (%)
Silicato de hierro	Fe_2SiO_4	22,60
Cuarzo	SiO_2	18,20
Óxido de hierro y cobre	$(\text{Cu}_{0,21}\text{Fe}_{0,79})(\text{Cu}_{0,705}\text{Fe}_{1,295})\text{O}_4$	12,10
Magnesioferrita	MgFe_2O_4	11,10
Magnesita	Fe_3O_4	9,40
Cristobalita	SiO_2	6,50
Ferrosilita	FeSiO_3	5,30
Clinoferrosilita	FeSiO_3	4,10
Ortoferrosilita	FeSiO_3	3,40
Wuestita	$\text{Fe}_{0,9712}\text{O}$	5,40
Dolerofanita	$\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$	0,80
Cuprita	Cu_2O	0,60
Paramelaconita	$6\text{CuO} \cdot \text{Cu}_2\text{O}$	0,50

Tabla 4. Análisis mineralógico de las escorias de cobre de Nantoco

Compuesto	Fórmula	Contenido (%)
Magnesioferrita	MgFe_2O_4	23,40
Silicato de hierro	Fe_2SiO_4	16,00
Clinopiroxeno	$\text{Fe}_{1,6}\text{Ca}_{0,4}(\text{SiO}_3)_2$	17,10
Cuarzo	SiO_2	8,50
Cristobalita	SiO_2	8,30
Silicato de aluminio y potasio	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	10,70
Clinoferrosilita	FeSiO_3	8,30
Óxido de hierro	FeO	4,30
Silicato de aluminio, calcio y sodio	$\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$	1,60
Nantokita	CuCl	1,80

3.2. Antecedentes de la planta productora de adocretos y de los escoriales de Playa Negra, Canto del Agua y Nantoco

Para la localización y tamaño del proyecto, se decidió la ciudad de Copiapó por ser la capital regional, lo que presenta una gran ventaja dado que en ella se encuentra la mayor cantidad de proyectos urbanos y mineros, y

además se concentra la mayor cantidad de habitantes de la región.

La fábrica de prefabricados de hormigón de escoria de cobre, al igual que las oficinas comerciales, estarán ubicadas en el Barrio Industrial de la comuna, aproximadamente a 20 km de la ciudad de Copiapó. El terreno seleccionado posee 2.400 m², es extenso y permite una expansión de la planta

La planta será una fabrica de tipo industrial, con una capacidad de produccion anual de 740.000 m² de baldosas de escoria de cobre. Los escoriales de Nantoco, Canto del Agua y Playa Negra abastecerán la fabrica, y por lo tanto seran explotados directamente por la empresa. Además, la planta se ubicará a menos de 20 km de distancia de plantas de chancado y de plantas de ventas de áridos.

En la tabla 5 se presentan diversos antecedentes de los depósitos de escorias de cobre de Playa Negra, Canto del Agua y Nantoco. La distancia de estos escoriales a la fábrica de prefabricados de hormigón es de 122 km (Canto del Agua), 24 km (Nantoco) y 90 km (Playa Negra).

Tabla 5. Antecedentes de los escoriales seleccionados

Lugar	Latitud	Longitud	Área (m ²)	Altura aproximada (m)	Volumen (m ³)	Toneladas totales (t)
Canto del Agua (*) Nantoco Playa Negra	-28090912	-	92.604	7,92	908.567	2.035.190
	-	709119844				
	281505343	-				
	-	709094095	18.381	3,00	55.144	123.523
	281472139	-				
	-	709241509				
275416718	70269356	18.801	3,00	56.403	126.343	
2706075	708123136	18.801	3,00			

(*) En Canto del Agua hay 03 escoriales, por lo cual el dato de la altura es un valor promedio.

3.3. Proceso de fabricación de los prefabricados de hormigón (dosificación, equipos y etapas del proceso)

Para establecer la dosificación para la fabricación de 01 m² de prefabricados de hormigón, es necesario conocer la densidad aparente y peso específico de los materiales (tabla 6). Por otra parte, la cantidad de

material a usar por m² es la siguiente: 10,0 kg de cemento, 28,5 kg de escoria de cobre y 3,0 L de agua.

Los equipos seleccionados para el proyecto (capacidad, cantidad y costo total) se presentan en la tabla 7.

Tabla 6. Densidad aparente y peso específico del cemento, arena (escoria de cobre) y agua

Material	Densidad aparente (kg/L)	Peso específico (kg/L)
Cemento	1,20	3,00
Arena (escoria de cobre)	2,26	3,98
Agua	1,00	1,00

Tabla 7. Equipos seleccionados para el proceso de fabricación de prefabricados de hormigón

Equipo	Cantidad	Costo (pesos chilenos) (*)
Silos	4	6.000.000
Estanque de agua	1	500.000
Tolva para escorias	1	5.000.000
Tractor pala	1	6.300.000
Dosificación de pigmentos y aditivos	6	2.100.000
	1	5.670.000
Mezcladora de eje vertical	3	11.250.000
Cinta transportadora	2	4.000.000
Prensa giratoria	2	5.000.000
Prensa hidráulica central	3	2.700.000
Pulidora	1	2.500.000
Gravilladora	2	361.980
Olvadora	2	600.000
Camara de curado	9	3.510.000
Bandeja apiladora	4	14.400.000
Sampimóvil (elevador móvil)	3	36.000.000
Camiones de carga y transporte		

(*) 1 USD = 503 pesos chilenos

El proceso de fabricación de los prefabricados de hormigón de escorias de cobre está compuesto de las siguientes etapas:

Recepción y almacenamiento de las materias primas.

Dosificación y amasado de la capa vista y revés.

Vibroprensado.

Curado.

Tratamiento de acabado.

Inspección y control de calidad.

Paletizado e identificación.

Almacenamiento.

Suministro y recepción de obra.

3.4. Análisis de las encuestas a personas y al sector industrial

Análisis de la encuesta a personas. El análisis cuantitativo y cualitativo del estudio de mercado permite estimar una participación, en promedio, de un 5% con respecto al

mercado potencial, dirigido principalmente a dos segmentos del mercado, el primero son consumidores que estarían dentro del grupo etario entre 21 y 40 años de edad, principalmente propietarios de sus viviendas, trabajadores dependientes, preferentemente del género masculino, ubicados en la categoría socio económica C2 y C3, segmentos que perciben un ingreso familiar mensual entre \$ 300.000 y \$ 3.000.000, los que presentan una baja sensibilidad a los precios, aunque en los casos más cercanos al segmento C3, la sensibilidad al precio está más presente. Estos segmentos poseen una fidelidad media hacia la marca de recubrimiento de pisos, pero estarían dispuestos a pagar entre \$ 4.000 a \$ 6.000 el metro cuadrado de baldosas construidas con escoria de cobre.

Análisis de la encuesta al sector industrial. La encuesta en el sector industrial está dirigido

a empresas de alto impacto, con niveles de ventas netas anuales sobre 25.000 UF (*), dedicadas principalmente al rubro de la minería con una cobertura de actividad a nivel nacional, que en promedio supera a los 1.000 trabajadores contratados y que perciben buenas oportunidades de negocio en el corto y mediano plazo, en la región. Esto significa que tendrán la necesidad de ampliar sus dependencias o realizar construcciones nuevas, lo que presenta un escenario favorable para ofrecer baldosas de escoria de cobre, además este rubro tiene conocimiento de estos pasivos ambientales y se muestran

muy interesados en utilizarlos en sus proyectos de revestimientos de pisos.

(*) En el mes de octubre/2012, 1 UF = 22.600 pesos chilenos (aproximadamente)

3.5. Resumen de costos de la fabricación de prefabricados de hormigón y viabilidad económica del proyecto

El resumen de los costos totales de la fabricación de prefabricados de hormigón de escorias de cobre se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Resumen de costos

Costos	Valor anual (pesos chilenos)
Costo de inversión	197.729.131
Capital fijo	40.986.194
Capital intangible	17.389.534
Costo publicidad	3.292.488
Capital de trabajo	137.268.000
Total	396.665.347

Bajo la metodología del Valor Actual Neto (VAN), un horizonte de tiempo de 10 años, y una tasa de descuento del 40% , arroja un VAN positivo, con una Tasa Interna de Retorno (T.I.R) de 47,3%, esto significa que el proyecto es rentable económicamente, que podría soportar costos de endeudamiento con tasas de interés real anual de hasta un 47,3%, tomando en consideración que las tasas de mercado del sector financiero chileno varían entre tasas reales anuales del 30% al 40%, es factible financiar una parte con deuda del sector financiero chileno.

Por último, bajo el método de pay back o plazo de recuperación, el cual no considera tasas de descuento, la inversión inicial se recupera entre el tercer y cuarto año.

4. CONCLUSIONES

- En la fabricación de adocretos de hormigón a escala industrial se ha

considerado como materia prima las escorias de cobre de los depósitos de Canto del Agua, Nantoco y Playa Negra, de la Región de Atacama.

- Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que el proyecto de fabricación de adocretos tiene viabilidad de producción y es económicamente rentable. El proyecto podría soportar costos de endeudamiento con tasas de interés real anual de hasta un 47,3%, tomando en consideración que las tasas de mercado del sector financiero chileno varían entre tasas reales anuales del 30% al 40%, es factible financiar una parte con deuda del sector financiero chileno. La inversión inicial se recupera entre el tercer y cuarto año.

- Los costos totales del proyecto ascienden a la suma de 396.665.347 pesos chilenos.
- Un número considerable de personas o clientes estarían dispuestos a comprar este nuevo producto. Estas personas se ubicarían en el grupo etario de 21 a 40 años, y serían principalmente trabajadores dependientes que pertenecen a la clase socio económica C2 y C3.
- Las empresas que estarían muy interesadas en utilizar estos adocretos de hormigón en sus futuras construcciones o proyectos serían las empresas de alto impacto, con niveles de ventas netas anuales sobre 25.000 UF, dedicadas principalmente al rubro de la minería con una cobertura de actividad a nivel nacional, que en promedio supera a los 1.000 trabajadores contratados y que perciben buenas oportunidades de negocio en el corto y mediano plazo en la región.

5. REFERENCIAS

- [1] A. Nazer, S. Fuentes, P. Castillo, L. González, O. Pavez, O. Varela, O. Lanás. 2012. Baldosas de escorias se cobre. Innovación en producción limpia. Iberoamerican Journal of Project Management, Vol. 3, N° 2.
- [2] A. Nazer, O. Pavez, F. Rojas. 2012. Use of copper slag in cement mortar. REM: Revista Escola de Minas, Vol. 65, N° 1, p. 87-91.
- [3] A. Nazer, O. Pavez, I. Toledo. 2013. Effect of type cement on the mechanical strength of copper slag mortars. REM: Revista Escola de Minas, Vol. 66, N° 1, p. 85-90.
- [4] A. Nazer, O. Pavez, F. Rojas, C. Aguilar. 2010. Una revisión de los usos de las escorias de cobre. CONAMET/SAM 2010, USACH, PUCV, Viña del Mar, 2-5 noviembre, 2010.
- [5] A. Nazer, O. Pavez, R. Aros. 2012. Diseño e implementación de una base de datos de escoriales abandonados de la Región de Atacama. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Atacama, N° 28, p. 14-19.
- [6] A. Nazer, O. Pavez, R. Aros. 2012. Diseño e implementación de una base de datos de escoriales abandonados de la Región de Atacama, Chile. CONAMET/SAM 2012, USM, Valparaíso, 22-26 octubre 2012.