

ESTUDIO DEL LODO ANODIZADO Y SUS POSIBLES USOS

YURANI ACEVEDO COLON

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2015**

ESTUDIO DEL LODO ANODIZADO Y SUS POSIBLES USOS

YURANI ANDREA ACEVEDO COLON

Ingeniera Ambiental

Trabajo de grado para optar al Título de Especialista en Química Ambiental

Director

MARÍA KOPYTKO

Ingeniera química

Doctorado Engineering Ecology

Magister en química

Esp. Tratamiento de aguas

Esp. Química ambiental

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUIMICA

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2015

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. ESTUDIO DEL LODO ANODIZADO Y SUS POSIBLES USOS	17
1.1 EL PROCESO DE ANODIZADO DEL ALUMINIO	17
1.1.1 Tratamiento del agua residual de un proceso de anodizado.....	21
1.1.2 Técnicas de membrana.....	24
1.1.2.1 La electrodiálisis.....	24
1.1.2.2 Concentración de baños de lavado.....	24
1.1.2.3 Diálisis por difusión.....	25
1.1.2.4 Osmosis.....	25
1.1.2.5 La osmosis inversa.....	25
1.1.3 Agua de cierre de bucle.....	26
1.1.4 Aplicación de ósmosis inversa para la reutilización de lodos anodizados. ..	27
1.1.4.1 Flujo.....	27
1.1.4.2 Membrana de agua de mar de dow filmtec.....	27
1.1.4.3 Corrientes de ácido.....	28
1.1.5 Aplicación de electrodiálisis en el proceso de reciclaje de las aguas residuales del proceso de anodizado de aluminio	29
1.1.6 Aplicación de diálisis por difusión en el proceso de reciclaje de las aguas residuales del proceso de anodizado de aluminio	29
2. POSIBLES USOS DEL LODO ANODIZADO.....	31
2.1 USO DEL LODO ANODIZADO EN TUBOS DE EXTRUSIÓN DE ALUMINA..	32
2.2 UTILIZACIÓN DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE ANODIZADO DE ALUMINIO EN LA INDUSTRIA CERÁMICA.....	34
2.2.1 El proceso de fabricación de cerámica utilizando aguas residuales del proceso de anodizado de aluminio	36
2.3 LOS LODOS ANODIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTOS.....	39
2.3.1 El proceso experimental.....	42
2.3.2 Pruebas físicas.....	43
2.3.3 Estudio de la porosidad y la conductividad térmica del cemento modificado.	43
2.3.4 Resultados del experimento de Vargas y Montero.....	44

2.4 UTILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES DE LOS PROCESOS DE ANODIZADO DE ALUMINIO, EN PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y ADOQUINES	47
2.4.1 El proceso experimental.....	47
3. CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA.....	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Proporciones de cemento/lodo para el estudio del comportamiento del material.....	20
Tabla 2. Características de toxicidad en el lixiviado para metales pesados.....	22
Tabla 3. Prueba de la formulación CP y AP.....	34
Tabla 4. El análisis elemental del lodo seco y la evolución de la concentración total de algunos elementos por lavado con la temperatura de tratamiento térmico.....	41
Tabla 5. Composiciones de las mezclas utilizadas por Vargas & Montero.....	42
Tabla 6. Tiempos de fragua para diferentes mezclas	44
Tabla 7. Componentes utilizados en la fabricación de ladrillos y adoquines.....	48
Tabla 8 Componentes usados en la elaboración de ladrillo.....	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Anodizado del Aluminio.....	18
Figura 2. Planta de anodizado de Aluminio.....	19
Figura 3. Water closed loop system.....	26
Figura 4. Tubos de Alúmina.....	32
Figura 5. Esquema de pasos relevantes para la preparación de la muestra.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Grafica 1. Absorción de agua en las mezclas lodo – cemento.....	46

GLOSARIO

ANODIZADO: Es un proceso de oxidación basado en la electrólisis que se desarrolla en el aluminio a partir de su inmersión en ácido sulfúrico con una corriente de aproximadamente 6000 amperios a 20 voltios.

ANIÓN: Son iones cargados negativamente.

ALÚMINA: Mejor conocido como óxido de aluminio (Al_2O_3). Se emplea en la elaboración de la arcilla y esmaltes, brindando resistencia y aumenta su temperatura de maduración.

BARBOTINA: Mezcla de arcilla y agua

CATIÓN: Son iones cargados positivamente.

CEMENTO PORTLAND: Es un conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón

CRETIB: Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad o Agentes Biológico-Infeciosos), que les confieran peligrosidad.

DIATOMITA: Es una roca silícica, sedimentaria de origen biogénico, compuesta por esqueletos fosilizados de las frústulas de las diatomeas

ELECTRODIÁLISIS: Es una tecnología que permite extraer sustancias ionizadas disueltas en una solución acuosa a partir de un campo eléctrico y una membrana selectiva.

ELECTROLISIS: Es un proceso mediante el cual se logra la disociación de una sustancia llamada electrolito, en sus iones constituyentes (aniones y cationes), gracias a la administración de corriente eléctrica

INERTIZACION: Es un tratamiento de "dejar quieto", "dejar inactivo", se aplica en la ingeniería ambiental para indicar un proceso de tratamiento de residuos catalogados como residuo peligroso, sean líquidos o sólidos, para inactivar o minimizar su potencial naturaleza química y su posterior disposición final.

MULLITA: Es una cerámica de aluminosilicato con buena estabilidad a temperaturas elevadas.

pH: Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[\text{H}_3\text{O}]^+$ presentes en determinadas disoluciones.

SILICATO BICÁLCICO: (Se denomina también Ca_2Si o belita en su forma mineral) es un silicato cálcico hidratado que resulta ser un ingrediente típico en los clinkers de los cementos Portland.

SILICATO TRICÁLCICO: (Se denomina también C_3S o alita) es un silicato cálcico hidratado existente en los clinkers de los cementos Portland (40% a 60%).

SINTERIZACIÓN: Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

ZEOLITAS: Son minerales aluminosilicatos microporosos que destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse reversiblemente

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL LODO ANODIZADO Y SUS POSIBLES USOS*

AUTOR: YURANI ANDREA ACEVEDO COLÓN **

PALABRAS CLAVES: Lodos de anodizado y sus usos, proceso de anodizado.

El presente documento recopila una revisión bibliográfica acerca de los posibles usos de las aguas residuales provenientes del proceso de anodización de aluminio. La primera parte del documento muestra un acercamiento a los conceptos básicos del proceso de anodizado de aluminio y el comportamiento de la industria en Colombia y el mundo.

En la segunda parte del documento, se define el proceso de anodizado de aluminio detallando cada una de las etapas que se llevan a cabo para terminar el revestimiento de los elementos metálicos, esto con el fin de lograr aumentar artificialmente hasta mil veces el espesor de la capa natural de óxido del aluminio, obteniendo así una gran protección contra la corrosión y la abrasión, una resistencia a la abrasión, lograr un aislamiento a la electricidad y por último tener una mejora estética en el acabado. Durante este apartado se muestra además el detalle de uno de los procesos más utilizados en la industria para descontaminar las aguas residuales resultantes del anodizado de aluminio.

La tercera parte del documento constituye la parte central del estudio propuesto, presenta una revisión bibliográfica de diferentes estudios experimentales que han buscado alternativas para la reutilización de los lodos anodizados en las industrias de la cerámica, cemento, ladrillos y adoquines, encontrando que la mejor alternativa es la industria de la cerámica, ya que el material no se ve afectado en calidad, y por el contrario le brinda características físicas que lo hace más estético.

*Monografía

**Facultad de ciencias. Escuela de Química. Especialización en Química Ambiental.
Director. Ingeniera química. María kopytko

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF SLUDGE ANODIZED AND ITS POSSIBLE USES*

AUTHOR: YURANI ANDREA ACEVEDO COLÓN**

KEYWORDS: ANODIZING SLUDGE AND USES, ANODIZING PROCESS

This study compiles a literature review on the potential uses of wastewater from the process of anodizing aluminum. The first part of the paper shows an approach to the basics of the process of anodized aluminum and behavior of industry in Colombia and the world.

In the second part of the document, the aluminum anodizing process detailing each of the steps carried out to finish the coating of metallic elements is defined, this in order to achieve artificially increased to a thousand times the thickness of the natural layer of aluminum oxide, thus obtaining a great protection against corrosion and abrasion, abrasion resistance, insulation achieve electricity and finally have an aesthetic improvement in the finish. During this section also shows the detail of one of the most widely used in industry to decontaminate wastewater resulting anodized aluminum processes.

The third part of the paper, which is the central part of the proposed study presents a literature review of different experimental studies which have sought alternatives for reuse of sludge anodized ceramic industries, cement, bricks and pavers, finding that better alternative is ceramic industry, since the material is not affected in quality, and instead gives physical characteristics that make it more aesthetic.

*Monograph

**Faculty of Sciences. School of Chemistry. Specialization in Environmental Chemistry.
Director. Chemical Engineer. María Kopytko

INTRODUCCIÓN

El mercado de la industria cerámica, decoración y artesanías, resulta cada vez más exigente en cuanto a durabilidad, resistencia y maleabilidad de los materiales con que trabaja ésta. Así pues, el aluminio anodizado se convierte en un recurso potencial para la realización de este tipo de productos finales, generando crecientes beneficios de resistencia a la corrosión y el teñido, por lo que se encuentra en capacidad de estar a la intemperie.

Alutions (2010) define el anodizado de aluminio como un proceso electroquímico, mediante el cual se forma un revestimiento anódico sobre una placa de aluminio, a través de un proceso de oxidación electrolítico, generalmente de óxido, la cual lo protege de la corrosión y al mismo tiempo le da un aspecto decorativo ya que se pueden obtener varios colores en la superficie. El proceso de anodizado se hace normalmente en las pequeñas y medianas empresas (PYME) que tienen una o dos líneas de producción. El aluminio es el material más importante para ser anodizado, aunque, en una escala mucho menor, magnesio, titanio, tantalio y niobio también reciben este tratamiento (Álvarez, 2008).

Existen diversos métodos para realizar el anodizado de aluminio, que dependen de las condiciones de producción de la compañía en cuanto a costos, finalidad del producto y el resultado esperado del mismo. “El proceso de ácido sulfúrico es el método más común para el anodizado, debido a las condiciones económicas, los resultados satisfactorios obtenidos y los medios utilizados para obtenerlos. Se emplea una concentración de ácido sulfúrico 16-18%, una temperatura de 18-20 °C y una densidad de corriente de 1-2 Am⁻². Durante el anodizado, algunos gramos de aluminio se pierden en la solución del baño en el que se mantiene la concentración por debajo de 15 a 20 gl⁻¹ de procesamiento adecuado. Esto produce recubrimientos de tratamiento por lo general entre 5 y 25 micras de espesor, dependiendo del uso final de los materiales anodizado (decorativos y/o

de protección). Todo el proceso se compone normalmente de varias etapas consecutivas: limpieza, decapado/brillo, neutralizado, anodizado, colorantes y sellado.” A continuación se describe cada una de estas etapas:

- **Limpieza:** Elimina una capa fina de aluminio y su superficie, para darle un aspecto más mate. “Este tratamiento se lleva a cabo en soluciones de hidróxido de sodio con concentraciones que oscilan entre 50 y 200 gl^{-1} a temperaturas de 50-60 °C.”
- **Decapado/brillo:** Pulido químico de la superficie de aluminio mediante el tratamiento con una mezcla de ácidos, nítrico (3-6%), sulfúrico (10-20%) y fosfórico (80-85%), resultando en una superficie de espejo brillante.
- **Neutralizado:** Elimina las partículas de la superficie que no se eliminaron mediante el proceso de grabado, y que no son deseables durante el proceso de anodizado.
- **Anodizado:** El baño es una celda galvánica en la cual el ánodo es el perfil y por tanto va a ser oxidado, lo que se logra sumergiéndolo en una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de concentración entre 180 y 200 g/L.
- **Coloración:** Proporciona el color del perfil del aluminio en la gama de los bronce. El perfil se sumerge en una solución de sulfato de estaño (SnSO_4), con el objetivo de que dicho elemento ingrese al poro de la superficie y lo rellene, formando el color. Dependiendo de la cantidad de estaño depositado, se genera un tono más claro más oscuro.
- **Sellado:** Cierra los poros abiertos durante el proceso de anodizado, convirtiendo la superficie en un material más resistente a la corrosión y la tinción.

A partir de la anodización del aluminio, se obtiene un material, como ya se mencionó, más resistente ante la corrosión y el teñido por diversas circunstancias, que permiten utilizar el material en diversas aplicaciones, generalmente decorativas. Sin embargo, el provecho de este material va más allá de los

posibles resultados que se puedan obtener a partir del producto final. Recientemente, se ha comenzado a dar un uso a las aguas residuales en procesos cerámicos, ya que aportan las características ferrosas que necesita la arcilla para tomar una coloración más fuerte y perdurable. “El color de los productos, de algunas fábricas de cerámica, es pálido debido a la pequeña cantidad de Óxido de hierro (Fe_2O_3) y gran cantidad de carbonatos de dispersión fina en la arcilla. El color de los productos de cerámica puede ser alterado mediante la introducción de aditivos de tintura, tales como óxidos, colorantes solubles y pigmentos a la masa de formación. Estos aditivos tiñen de un color determinado un producto durante su proceso de grabación (KIZINIEVIČ, 2012)”.

Jaramillo (2006) afirma que las aguas residuales del proceso de anodización brindan la oportunidad de añadir estos elementos ferrosos a la arcilla, sin incurrir en grandes costos para la compañía, y además mejorar la calidad del producto final, generando una solución para el impacto ambiental que estas representan, por sus altos contenidos químicos de Hidróxido de Sodio (NaOH) y Ácido Sulfúrico (H_2SO_4).

Este documento presenta un estudio detallado acerca de los posibles usos de los aluminios anodizados y de sus residuos, en las diferentes industrias, con el fin de servir como material de apoyo para posteriores investigaciones y adelantos de innovación en la industria manufacturera en Colombia y el mundo.

1. ESTUDIO DEL LODO ANODIZADO Y SUS POSIBLES USOS

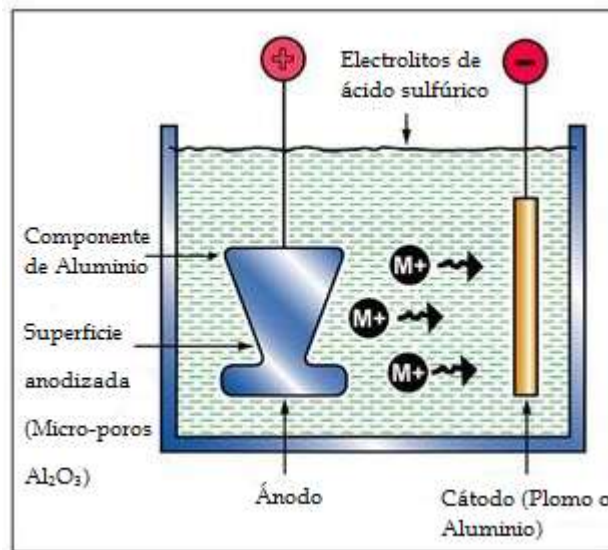
1.1 EL PROCESO DE ANODIZADO DEL ALUMINIO

El aluminio es uno de los metales de mayor utilización en los últimos años, alcanzando cifras de 20 millones de toneladas anuales alrededor del mundo. Sus principales usos se dan a nivel industrial, transporte y equipo mecánico entre otros (Frey, 1972; Nethercot, 2002; Xie, 2006). El aluminio por su baja densidad, alta conductividad térmica y eléctrica, bajo punto de fusión y resistencia a la corrosión permite que sea fácilmente reciclado (Fariaut, 2001). Este aumento de aplicación del aluminio ha llevado que la industria del acabado con fines decorativos, crezca muy rápidamente dando un aporte muy importante a la economía mundial.

El anodizado es un proceso mediante el cual se genera una protección artificial al aluminio mediante su propia oxidación. Es un proceso electroquímico de oxidación forzada, por medio del cual se da una capa protectora de óxido de aluminio sobre la superficie base. El proceso consiste en someter al aluminio a una inmersión de ácido (generalmente sulfúrico). Al pasar corriente se libera el oxígeno que se dirige al ánodo que al reaccionar con el aluminio genera una capa de óxido cuyo espesor varía con el tiempo de paso de corriente. Para cerrar los poros que presenta la superficie del aluminio anodizado se lo sumerge en agua caliente. Todo el proceso, puede observarse en la Figura 1.

El proceso de anodizado se pueden clasificar en dos tipos, denominados como el anodizado normal y anodizado, cuya principal diferencia es la concentración de ácido sulfúrico, que es de 150 g/L y 300 g/L, respectivamente. En ambos casos, los baños de proceso son seguidos por baños de lavado (Franken, 2003).

Figura 1. Anodizado del Aluminio



Fuente. ECOCHILLERS Incorporation. [en línea]. <<http://www.ecochillers.com/Chillers-anodizado-aluminio>> [citado el 19 de septiembre 2007]

El primer paso del tratamiento consiste en el desengrase o limpieza, mediante el cual se eliminan todas aquellas impurezas o materiales aceitosos que contiene el material, de modo que se pueda pulir el material hasta obtener un acabado uniforme en el proceso de satinado o matizado. Posteriormente, el decapado del aluminio elimina la capa superficial del material para cumplir los requerimientos del acabado, que se complementa con el neutralizado que retira todos los elementos residuales que queden sobre el metal.

Una vez concluido el pre tratamiento, el perfil del aluminio entra a una cuba de anodizado (ver Figura 2.) donde ocurre el proceso de electrólisis, con la que se forma la capa anódica. Ya formada la capa anódica, los perfiles de aluminio entran al tanque de electrocolor, donde se obtiene el color deseado. El color que se busque obtener depende del tiempo de tratamiento que los perfiles de aluminio permanezcan en el tanque. A medida que los perfiles duren más tiempo, el color que se obtendrá será más oscuro.

Figura 2. Planta de anodizado de Aluminio



Fuente. ANODIZING. [en línea]. <http://grupoandalucia.org/metals/products_anodizing.php#image-2> [citado el 18 de octubre 2014]

El siguiente paso del proceso de anodizado es el sellado, donde ocurre la reacción entre el óxido de aluminio y el agua desmineralizada en condiciones especiales donde se transforma la superficie de los recubrimientos mediante la eliminación o la disminución drástica de su porosidad, obteniendo de esta forma las condiciones de durabilidad esperadas ante la efectos como la corrosión.

Durante este proceso se utiliza una gran cantidad de agua, que termina como un elemento residual (lodo anodizado) ya que no se absorbe completamente por el producto. Estas grandes cantidades de agua de desperdicio, son contaminadas por los agentes ferrosos, y de esta manera generan una amenaza ecológica. Por lo tanto, se han investigado diferentes alternativas para la reutilización o reciclaje de las aguas residuales de los procesos de anodizado del aluminio, encontrando en la cerámica la manera más efectiva de reutilizar el lodo anodizado.

A pesar de un alto contenido de metales pesado como sulfato de plomo, sulfato de cobre, óxidos de plomo, arsénico, antimonio. Bismuto, níquel, seleniuros de cobre

y plata, por tanto este lodo residual ha sido catalogado como no peligroso a pesar de tener un alto grado de movilidad de metales en soluciones acuosas. Por otra parte, existen dificultades para reducir su volumen ya que los métodos de filtro-presión adecuados, requieren altos costos de transporte para su eliminación (22-30 US \$/ton). En los países de la UE, se generan en la actualidad alrededor de 100.000 toneladas métricas por año (Ribeiro et al, 2002) y no hay aplicaciones interesantes que hayan sido aplicadas hasta ahora.

Por otro lado, los altos contenidos de alúmina de tales residuos calcinados y su constancia de composición a lo largo del tiempo los hace muy atractivos para los procesos de reciclado. Varios materiales se han investigado como matrices de inertización, tales como hormigón, vidrio y cerámica, dando como resultado a partir de una prueba de granulometría denominada gruesa, en donde aproximadamente el 67% de la masa retenida corresponde a tamaños entre 425 y 150 micrómetros y el contenido de alúmina fue de $(47,63 \pm 0,04)$ % m/m y de sulfatos $(4,27 \pm 0,02)$ % m/m (Vargas y Montero, 2006).

Tabla 1. Proporciones de cemento/lodo para el estudio del comportamiento del material.

Mezcla	% de cemento	% de lodo	% de Al ₂ O ₃
1	100	0	4,14
2	75	25	15,01
3	50	50	25,89
4	25	75	36,75

Fuente: Vargas Camareno, Maricruz y Montero Villalobos, Mavis (2006). Estudio del uso del lodo residual de la empresa Extralum S.A. como material alternativo en la fabricación de cementos especiales. Tecnología en Marcha. 19(3).

Algunas otras aplicaciones posibles para el lodo de alúmina en bruto se han intentado utilizar como un pegamento para la producción de papel, o como un agente de floculación que contiene sulfato en los procesos de purificación de aguas residuales para procesos químicos y metalmecánicos dando resultados de prueba CRETIB negativo (Manejo ambientalmente adecuado de los lodos provenientes de plantas de tratamiento, 2000).

Este tipo de iniciativas tienen efectos muy positivos, ya que si los residuos no van a los rellenos sanitarios, se aumenta la vida útil de dichos espacios. Igualmente al revisar el posible aprovechamiento de los lodos se logra generarles un valor agregado. Esta monografía tiene la finalidad de actualizar la revisión bibliográfica que existe sobre el tratamiento o posible reúso de esta clase de lodos.

1.1.1 Tratamiento del agua residual de un proceso de anodizado. Los residuos de aluminio de anodizado después de un ajuste de pH y filtración resultan con un contenido de 80% de componentes como hidróxidos de aluminio y sales de sodio, y en ocasiones puede que existan pequeñas aleaciones de metales.

En la Tabla 2, se muestra los distintos metales presente en un lodo de anodizado de acuerdo a una Caracterización realizada en una Planta de Anodizado.

Tabla 2. Características de Toxicidad en el Lixiviado para metales pesados

Parámetro	Unidades	Límite de Detección	Decreto 4741/05¹ y Regulación CFR² EPA 40, Parte -261³	Lodo de Anodizado
Arsénico	mg As/L	0.552	5.0	Menos de 0.552 ± 0.044
Bario	mg Ba/L	0.031	100	Menos de 0.031 ± 0.001
Cadmio	mg Cd/L	0.006	1.0	0.010 ± 0.003
Cromo	Mg Cr/L	0.054	5.0	Menos de 0.088 ± 0.003
Mercurio	µg Hg/L	0.488	200	Menos de 0.488 ± 0.063
Plata	mg Ag/L	0.0032	5.0	Menos de 0.0032 ± 0.0001
Plomo	mg Pb/L	0.0032	5.0	Menos de 0.031 ± 0.001
Selenio	mg Se/L	0.0032	5.0	Menos de 0.230 ± 0.009
Cobalto Total en el lodo	mgCo/Kg. Bs*	0.500	N.A	Menos de 0.500 ± 0.020

*Base seca

Fuente: ALUTIONS. Sistema de Gestión Integral. Procedimiento control de Procesos en la Planta de Anodizado. (4). 2010

¹ Decreto 4741/05, por cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión ambiental.

² Code of Federal Regulations, CFR

³ Environmental Protection Agency, EPA

La gestión integral de los residuos generados de una planta de anodizado es un tema muy importante, tanto en el ámbito industrial, como medioambiental y de salud pública, debido a que por el elevado desarrollo económico ha crecido significativamente la cantidad de materiales inertes o peligrosos que deben ser eliminados de una manera segura y económica o preferiblemente ser reutilizados cuando sea posible.

Los residuos producidos por una industria específica con frecuencia pueden ser considerados como materia prima útil para otras industrias, logrando así reducir el impacto ambiental negativo asociado a al vertimiento y a la preservación de los recursos naturales no renovables tales como el agua.

En la industria del aluminio es preocupante la enorme cantidad de lodo producido cada año y el problema que lleva asociado, ya que su almacenamiento, transporte y eliminación son costos notables para la empresa.

Jaramillo (2006), Manejo ambientalmente adecuado de los lodos provenientes de plantas de tratamiento (2000), Vargas y Montero (2006) han registrado intentos para incorporar este tipo de residuos en varios materiales tales como hormigón, vidrio, cerámica, materiales arcillosos pesados y zeolitas, sin embargo el alto contenido de agua y la consistencia similar a la de un gel que ha dificultado la obtención de mezclas homogéneas y aumentan la contracción de los cuerpos cerámicos.

Una de las técnicas que se ha venido implementando para lograr la reutilización de los lodos adonizados consiste en permearlos a través de la utilización de una membrana con el fin de eliminar el contenido de agua y, a partir del proceso de electrodiálisis, dar tratamiento a los lodos para una segunda utilización del lodo concentrado y transferirlo al proceso nuevamente usando la diálisis de difusión (Franken, 2003), proceso similar que fue apoyado por el Gobierno de Holanda en la planta de anodizado BGT Oppervlaktebehandeling BV, con sede en Venlo,

Países Bajos. Este proceso consistió específicamente en un tratamiento particular e innovador, que describe en su artículo *Agua cierre de lazo en una planta de anodizado de aluminio*, y que comprende las fases de la técnica de membrana, agua de cierre de bucle, aplicación de ósmosis inversa, de electrodiálisis, y de diálisis por difusión.

1.1.2 Técnicas de membrana. Esta primera fase del proceso de tratamiento busca absorber el agua desde la membrana, para lo cual se realizan siguientes procesos:

1.1.2.1 La electrodiálisis. La electrodiálisis es un procedimiento de membrana en el que las membranas del aluminio se utilizan para eliminar iones de corrientes acuosas. La fuerza impulsora es una diferencia de potencial eléctrico. Las partículas con carga negativa (aniones) son atraídas por el ánodo y las partículas con carga positiva (cationes) son atraídas por el cátodo. Mediante la colocación de membranas de intercambio de iones entre los electrodos, se puede lograr una separación del agua del material.

Las membranas con carga positiva y membranas con carga negativa se colocan alternativamente en la pila de electrodiálisis. Como esto, se obtiene una corriente concentrada (concentrado) en un compartimiento, y una corriente diluida (diluido) se obtiene en el otro compartimento

1.1.2.2 Concentración de baños de lavado. En la industria de tratamiento de la superficie, la electrodiálisis se puede utilizar para la concentración de baños de lavado que contienen iones de metal y un ácido o base en una manera tal que el concentrado puede ser dirigido hacia el baño de proceso y el material diluido puede ser enviado de vuelta al baño de aclarado. Cuando el concentrado no puede ser reutilizado, esta corriente debe ser descargada.

1.1.2.3 Diálisis por difusión. La diálisis por difusión es un proceso de membrana que es comparable con la hemodiálisis (el proceso utilizado por un riñón artificial).

En este proceso, la fuerza impulsora para la separación es la diferencia de concentración a través de la membrana. En la diálisis de difusión, una membrana de intercambio de aniones se utiliza para recuperar los ácidos fuertes de los flujos de residuos ácidos, tales como los contenidos de los baños de decapado que se utilizan en la industria de tratamiento de superficie.

Las membranas que se utilizan para la recuperación de ácidos son, en principio, las mismas membranas que se utilizan en la electrodiálisis. Un ajuste especial se hace a las membranas para que intercambien fácilmente iones de H^+ junto con los aniones, pero también tienen una buena retención de los iones metálicos positivos (pesados).

La recuperación de bases también es posible, pero en este caso las membranas de intercambio iónico especiales son necesarias para la recuperación de los iones OH^- junto con los cationes monovalentes, y una buena retención para iones de metales pesados multivalentes también es necesaria (Franken, 2003).

1.1.2.4 Ósmosis. El fenómeno de la ósmosis está basado en el equilibrio, es decir que dos soluciones con diferentes concentraciones de sólidos disueltos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Se presenta además la situación de la separación por una membrana permeable, donde el fluido que se moverá será el de menor concentración de tal forma que pase al de mayor concentración (Lenntech, 2009).

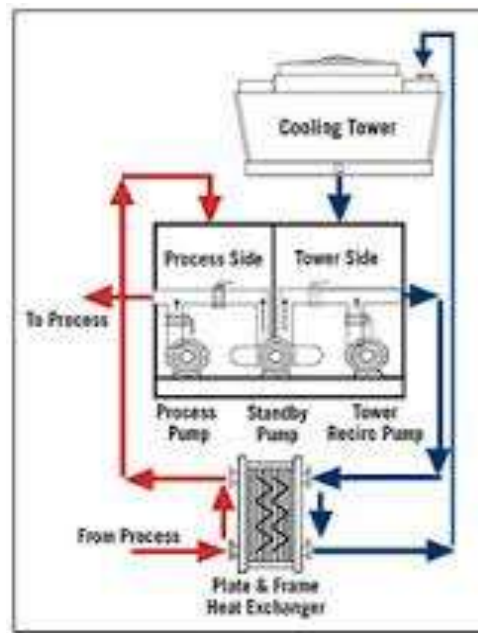
1.1.2.5 La ósmosis inversa. La ósmosis inversa es un proceso de membrana conocido en el que se rechazan los componentes de bajo peso

molecular (tales como sales). Particularmente en el intervalo de concentración de 0,1-20 g/L, esta técnica de separación es más económica. Muy a menudo, la ósmosis inversa se aplica como una técnica de concentración en el que se concentra el agua de los baños de lavado en cascada y en el que el permeado se reutiliza en el proceso como el agua de enjuagado.

La aplicación de ósmosis inversa bajo condiciones ácidas requiere un enfoque especial. En primer lugar, las membranas deben ser capaces de resistir las condiciones ácidas (muy a menudo se requiere un pH menor que 1), y además el desarrollo del resto del sistema requiere una atención especial. En particular, las bombas, válvulas y equipos de medición deben ajustarse para las condiciones ácidas.

1.1.3 Agua de cierre de bucle. Con el fin de ser capaz de cerrar el circuito de agua, el segundo baño de enjuague se desconecta de la secuencia de enjuague en cascada y se utiliza como un baño independiente o segundo enjuague.

Figura 3. Water closed loop system



Fuente: Cooling Technology (2012)

1.1.4 Aplicación de ósmosis inversa para la reutilización de lodos anodizados. Comenzando con el segundo baño de aclarado, la ósmosis inversa se aplica como la técnica de reciclaje. Según los estudios realizados por (Franken, 2003) la concentración del baño de enjuague, durante las pruebas de viabilidad en BGT Oppervlaktebehandeling, era aproximadamente 1,5-2 g/l. Esto significa un pH de aproximadamente 1,9 y una conductividad de la alimentación de 6 mS/cm (en unidades del SI, mili Siemens por cm). Para estos experimentos, se hace uso de la misma membrana llamada Desal-5 membranas de ósmosis inversa.

Luego de realizar algunas pruebas, se encontró que aparentemente el rechazo de ácido sulfúrico a temperatura ambiente y una presión de aproximadamente 25 bar era entre 96 y 98% resultando más bajo que la retención de Cloruro de Sodio (NaCl) como se indica por el proveedor (mayor que 99%), pero estos valores no son inusuales a valores de pH más bajos.

1.1.4.1 Flujo. Los valores de flujo evaluados por Franken, se encontraban en el orden de 18-20 v/t por 2 horas. A valores de concentración más altos de la alimentación (partiendo de un valor de concentración de 10, un pH que es menor que 1 y una conductividad de 60 mS/cm) el flujo se redujo a un valor de aproximadamente 10 L/m por 2 horas.

A pesar de que las especificaciones del fabricante de la membrana Desal-5 mencionan que el pH no debe ser inferior a 2, no hay problemas detectados con los módulos de membrana incluso cuando se usan durante períodos más largos, en las plantas de BGT Oppervlaktebehandeling.

1.1.4.2 Membranas de agua de mar de Dow Filmtec (SW30). Debido a los relativamente altos costos de los elementos de membrana Desal-5 y el relativamente bajo flujo, también se han llevado a cabo pruebas utilizando membranas de agua de mar de Dow Filmtec (SW30).

La conductividad del permeado, durante el proceso realizado por Franken en BGT Oppervlaktebehandeling. Fue de entre 0,1mS / cm y 0,5 mS/cm, dependiendo del factor de concentración aplicado. Este valor de la conductividad es lo suficientemente bajo para la reutilización del permeado como el agua de enjuagado.

1.1.4.3 Corrientes de ácido. Franken (2003) comenta que en BGT Oppervlaktebehandeling se quería utilizar una instalación de ósmosis inversa para la recuperación de toda el agua de enjuague de las corrientes de ácido. La ventaja de tal sistema es que los costes serían inferiores. Sin embargo, la desventaja es que la reutilización del concentrado no sería posible.

Con el fin de examinar la posibilidad de combinar las corrientes de ácido, se hizo una prueba a cabo con una mezcla de ácido sulfúrico y ácido nítrico. El resultado de la prueba con la mezcla era que el rechazo 'global' de las membranas (tal como se mide por la conductividad) se redujo a aproximadamente 80%. A partir de un análisis adicional del permeado, parecía que la retención de iones de sulfato era todavía muy alta (97%), pero la retención de iones de nitrato fue menor de 60%. El último resultado es incluso inferior al de retención, obtenido a partir de ensayos con las soluciones de ácido nítrico solo.

Una explicación de este resultado es que se encuentra la presencia de dos ácidos diferentes. Los iones de H^+ siempre pasarán fácilmente a través de las membranas de ósmosis inversa, pero en el caso de dos ácidos diferentes van a arrastrar el anión, el cual pasará más fácilmente a través de la membrana, por lo que se prefiere el ión nitrato monovalente sobre el ion sulfato bivalente.

Con base en el resultado anterior, el estudio concluyó la importancia de mantener las corrientes de ácido separadas, lo que significa que la ruta al cierre del bucle de agua era todavía una posibilidad.

1.1.5 Aplicación de electrodiálisis en el proceso de reciclaje de las aguas residuales del proceso de anodizado de aluminio. El sistema de ósmosis inversa utilizado en el experimento de Franken (2003) consistió en un sistema de electrodiálisis (usando 1m^2 de área de superficie de la membrana), en el que se utiliza una densidad de corriente de 3 A/dm^2 .

Debido a que la alimentación del sistema de electrodiálisis tiene una concentración de aproximadamente $15\text{-}30\text{ g/l}$ de ácido sulfúrico, y la corriente se debe concentrar hasta un valor de aproximadamente 150 g/L , una densidad de corriente más alta puede ser utilizada en la situación en la que la concentración de diluido sea menor. Si la concentración de diluido deseada es menor (por ejemplo, este sería el caso del segundo baño de enjuague que sería tratado con un sistema de electrodiálisis) debe usarse una densidad de corriente inferior (1 A/dm^2 , o menor). Esto daría lugar a mayores costes para la instalación de electrodiálisis.

Otra ventaja de la combinación de electrodiálisis inversa y como se sugirió anteriormente, es que el segundo baño de enjuague se 'filtra'. Esto significa que también se elimina la "suciedad", y que la calidad del agua de lavado se mantiene en un nivel superior.

1.1.6 Aplicación de diálisis por difusión en el proceso de reciclaje de las aguas residuales del proceso de anodizado de aluminio. Al devolver la corriente de concentrado de ácido sulfúrico a partir del sistema de electrodiálisis para el baño de proceso, todos los iones de aluminio se devuelven al baño de anodizado. Con el tiempo, la concentración de iones de aluminio (que se disuelve en el ácido como un resultado del proceso de anodización) se incrementará. Aunque otros iones metálicos también son liberados de los productos de aluminio, no se presta atención especial a estos iones ya que su concentración es muy baja y la retención en la electrodiálisis y la diálisis de difusión es siempre mejor que la retención de iones de aluminio.

En el proceso de diálisis por difusión, una cantidad de 10 L/hora se retira continuamente del baño de anodizado y tratado. La corriente de alimentación para el sistema de diálisis por difusión consiste en aproximadamente 300 g/L de ácido sulfúrico y aproximadamente 7 g/L de iones de aluminio y se trata en contracorriente con una corriente (10 L/hora) de agua desionizada.

2. POSIBLES USOS DEL LODO ANODIZADO

Durante todo el proceso de anodizado del aluminio, se va generando un efluente de agua como consecuencia de los enjuagues que se alternan entre los distintos baños, el cual se dirige a una planta de tratamiento de aguas residuales. En la planta de tratamiento se presentan los procesos de neutralización, floculación (formación del lodo), sedimentación.

Este lodo está constituido principalmente de agua, con una humedad aproximada de 80%, por lo tanto se implementa el uso de un filtro prensa para la disminución de agua a un 50% formando de esta manera una torta de lodo semiseco. Los contaminantes presentes en este tipo de corrientes residuales están estrechamente relacionados con el tipo de proceso, de manera general éstos contendrán metales como cromo, manganeso, zinc, hierro, cadmio, cobre, estaño, aluminio, aceites, grasas, y compuestos químicos utilizados como agentes de limpieza, entre los que se encuentran desengrasantes (en algunos casos disolventes orgánicos halogenados) y detergentes. Adicionalmente la utilización de diversos aditivos químicos, en menor cantidad, genera la presencia en este efluente de boratos, oxalatos, fluoruros, acetatos de níquel y cobalto, amonio, fósforo y tintes orgánicos.

Este tipo de lodo proveniente del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales del proceso de anodizado produce una cantidad aproximada de 70 toneladas al mes de residuo, que no recibe ningún tratamiento. Tan solo son llevados al relleno sanitario para cumplir con la disposición final. A pesar de que el lodo tiene un potencial alto de metales, este lodo ha sido caracterizado como no peligroso. Es por ello, que la reducción, la reutilización, el reciclaje, el co-procesamiento son algunas de las oportunidades apropiadas para la gestión ambiental de estos residuos, y que las industrias deben aprovechar para

solucionar el problema de disposición y de impacto negativo ambiental, ganando así un producto con valor económico.

2.1 USO DEL LODO ANODIZADO EN TUBOS DE EXTRUSIÓN DE ALUMINA

Ribeiro et al (2006) afirman que los tubos de Alúmina son utilizados generalmente en convertidores catalíticos de automóviles, muebles para hornos auto limpiantes e intercambiadores de calor para turbinas industriales de gas. Para la fabricación de este tipo de elementos, se ha demostrado que es efectiva la utilización de lodos anodizados. " La extrusión es fuertemente dependiente de la composición de los materiales y de la plasticidad resultante de las pastas. Para que el proceso tenga éxito, las condiciones de diseño y operación deben ser considerados en detalle."

Figura 4. Tubos de Alúmina



Fuente: EARTHWAREFIRE. [en línea]. <<http://www.earthwaterfire.com/sheaths.htm>> [citado el 16 de julio de 2014]

Mediante pruebas de tensión y deformación, para las pastas cerámicas obtenidas con la utilización de los lodos anodizados, realizadas por Ribeiro et al. (2006) se pudo determinar que:

- “Las pruebas de tensión-deformación de pastas bajo compresión demuestran que son una herramienta confiable para la determinación del valor de rendimiento de pastas cerámicas de plástico. Proporciona información muy sensible en el nivel de plasticidad y reduce el número de parámetros que es preciso instalar en la aplicación de las ecuaciones Benbow-Bridgwater, la cual define un modelo simple para el flujo de pastas en un extrusor de pistón. Si el material se comporta como un plástico perfecto en el grueso, y el trabajo realizado en la región de entrada de la matriz es idéntica a la de compresión homogénea, la caída de presión de entrada de la matriz viene dada por:

$$P_1 = 2\sigma_y \ln\left(\frac{D_0}{D}\right)$$

Donde σ_y es el esfuerzo de fluencia uniaxial, D_0 es el diámetro del cilindro y D es el diámetro de la tierra troquel.

Esto es particularmente importante cuando sólo las matrices de tubo están disponibles para experimentación, donde α es la velocidad del factor dependiente para el flujo convergente, β es la velocidad del factor dependiente para el flujo paralelo, n y m son exponentes, σ_0 es el valor de rendimiento mayor de la pasta, τ_0 es la característica de tensión de cizallamiento inicial de la pasta, D_0 y D son los diámetros del cilindro y de la matriz, respectivamente, L es la longitud de puesta a tierra y, V es la velocidad de extrusión. En esta ecuación, la entrada (P_e) y la puesta a tierra (P_i) son las presiones separadas. Por lo tanto para el tubo, ha sido desarrollada una rutina matemática que comprende dos etapas, a partir de las variables. En primer lugar tres parámetros τ , α , β y m se calculan a partir de la presión diferencial entre una larga y una corta hilera. En segundo lugar los parámetros calculados derivados de la prueba de estrés de deformación se utilizan para resolver los dos parámetros finales que forman la caída de presión total. En esta metodología se encontró que era útil para predecir y optimizar el comportamiento de extrusión de cordierita (CP, cordieriti paste) y alúmina (AP,

Alumina Paste), pastas que contienen lodos de Aluminio anodizado, con contenido de talco y diatomita.

Tabla 3. Prueba de la formulación CP y AP

Composition	Zusoplast C28 (wt.%)	Zusoplast PS1 (wt.%)	Zusoplast O59 (wt.%)	Moisture content (%)
CP/withoutad45.8H	–	–	–	45.8
CP/6P4L45.8H	–	6	4	45.8
AP/withoutad47.1H	–	–	–	47.1
AP/6P4L40.2H	6	-	2	40.2

Fuente: Ribeiro et al (2006)

El análisis de componentes de tensión dinámicos (αVn and βVm) reveló que la extrusión de materiales CP está dominado por la contribución convergente, mientras que la caída de presión total en el momento de extrusión de pastas de AP está dominado por la contribución de flujo paralelo plástico.”

Finalmente, se demostró que el coeficiente de fricción estática (μ) de extruidos es otro parámetro relevante en la definición de los problemas de extrusión y una excelente calidad de superficie de las muestras.”

$$\mu = \frac{\tau_0}{\sigma_0}$$

2.2 UTILIZACIÓN DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE ANODIZADO DE ALUMINIO EN LA INDUSTRIA CERÁMICA

Muy a menudo las materias primas tradicionales se utilizan para la producción de productos de cerámica, es decir, arcilla, arena y breakstone de ladrillos triturados. Sin embargo, últimamente se presta cada vez más atención a la utilización de

diversas materias primas tecnogénicas y residuos. La utilización de materiales de desecho en una producción ayuda a ahorrar materias primas tradicionales, energía, los recursos naturales e influye en el medio ambiente (Kizinievic, 2013), debido a la reducción de desechos y agentes contaminantes. Torres et al (2004) comenta que la cerámica tradicional, por lo general cuenta con una alta heterogeneidad debido a la amplia gama de la composición de las arcillas naturales utilizadas como materia prima en su fabricación. De este modo, hay una alta tolerancia para la incorporación de grandes cantidades de desechos adecuados como materias primas. Este hecho atrae más importancia, ya que la industria cerámica, que se clasifica como industria ambientalmente pesada, ambientalmente contribuye a la disminución de los recursos minerales, y donde el reciclaje de desechos tiene un impacto tanto ambiental como económico evidentemente beneficioso dado que la alta temperatura de cocción puede convertir los desechos generados que contienen componentes peligrosos, en desechos inertes y seguros para la salud.

Así, Ribeiro (2004) comenta que siendo la industria del anodizado de aluminio conocida por su gran utilización de cantidades de agua (alrededor de 100.000 toneladas métricas por año en los países de la UE) que resultan al final del proceso en residuos, ya que contienen partículas de elementos metálicos que no son aptos para el consumo humano o animal. El lodo está principalmente constituido por sulfatos coloidales de hidróxido de aluminio, de sodio o de calcio (generados a partir de soluciones neutralizantes) y aluminio el cual es utilizado como agente floculante, y agua (hasta 85% en peso.)

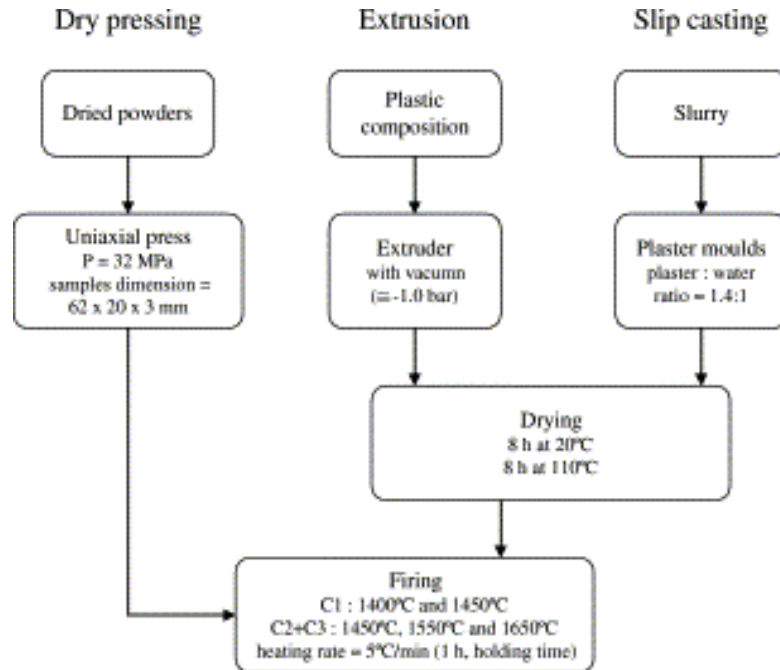
Ribeiro, Tulyanganov, Ferreira y Labrincha (2004), realizaron un estudio en la empresa Extrusal S.A. de Portugal, donde utilizaron para la fabricación de productos cerámicos una gran cantidad de aguas provenientes de los procesos de anodizado de aluminio. Para la realización de este estudio, la fabricación de la

cerámica incluyó procesos de prensado en seco, extrusión y deslizamiento de fundición en moldes.

2.2.1 El proceso de fabricación de cerámica utilizando aguas residuales del proceso de anodizado de aluminio. Todas las composiciones de lodo anodizado que se utiliza para la fabricación de cerámica, se muelen en un molino de bolas durante 15 horas. Las suspensiones fueron deshidratados en moldes de yeso hasta que el contenido de agua de aproximadamente 25-35% en peso, se encontró adecuado para la extrusión, siendo estos los valores permitidos. Una parte de estas mezclas se secó en un horno (110 ° C durante 24 h), a continuación, fueron desglosados en un molino de secado rápido durante 15 minutos, y se utilizaron para consolidar cuerpos por prensado en seco. Las suspensiones para moldeo en barbotina (compuesta por agua y arcilla), se prepararon en presencia de una cantidad adecuada de agente dispersante (Dolapix PC 67, Zshimmer y Schwarz, G. donde su apariencia es líquido amarillento, con una densidad de 1.20 g/cm³ con pH 7), que permitió a la carga de sólidos aumentar entre 45-65% en peso.

Ribeiro et al (2004) afirma que para la extrusión se utilizó una extrusora de vacío especialmente adaptada para pastas de baja plasticidad. Esta adaptación especial implicó la utilización de una tercera hélice de compresión de menor diámetro y baja profundidad de canal, y un ajuste de la matriz, ya que las pastas de baja plasticidad requieren un ángulo de cono inferior.

Figura 5. Esquema de pasos relevantes para la preparación de la muestra



Fuente: Ribeiro, et al. (2004)

Con este experimento, los autores encontraron que el lodo anodizado está conformado por partículas muy finas, que tienen un diámetro aproximado de 0,25 micras, y con casi 100% del material con partículas entre 0,7 y 0,8 micras. Vale la pena señalar que los diámetros medidos pueden ser más grandes que el tamaño de las partículas primarias, debido a la consistencia similar a gel de los lodos y su pobre capacidad de dispersión incluso bajo agitación ultrasónica, lo que hace posible su utilización para la fabricación de cerámica.

Se encontró que para la fabricación de cerámica a partir de la utilización de aguas residuales producto del proceso de anodizado de aluminio, depende de las siguientes condiciones para determinar el éxito del proceso: (i) el estado físico de los lodos (como se recibe, seco o calcinado); (ii) la naturaleza de otros componentes utilizados en la formulación; (iii) la técnica de conformación adoptada para consolidar los productos.

Mediante las técnicas experimentales utilizadas, se encontró que la calcinación ayuda a destruir la estructura del aglomerado fuerte entre las partículas finas de hidróxido de aluminio y descompone parcialmente las sales solubles presentes, mejorando así la capacidad de procesamiento de todos los métodos de consolidación probados como prensado en seco, extrusión y moldeo en barbotina en moldes de yeso. Las sales solubles restantes ejercen efectos nocivos sobre la capacidad de dispersión y de proceso húmedo de los polvos, mientras que en el caso de la extrusión podría ser útil en la aplicación de las fuerzas corto alcance que permiten llegar a las altas densidades que deben alcanzarse. Estos cuerpos densos y más homogéneos mejorarán las propiedades de los materiales finales. El prensado en seco mostró un rendimiento de procesamiento intermedio en comparación con los otros dos métodos de conformación (extrusión y moldeo en yeso).

El proceso de fabricación de cerámica, demostrado por Ribeiro et al. (2004), se convierte entonces en una alternativa viable para la reutilización de estos grandes flujos de agua residuales del proceso de anodizado de aluminio, de modo que resulta beneficioso para las dos industrias y sobre todo para el medio ambiente, ya que en primer lugar se disminuyen los costos de la fabricación de la cerámica pues su materia prima es el residuo de otro proceso, y por otra parte, con la reutilización de estos flujos de agua, el consumo de ésta en el proceso de cerámica se reduce y a su vez se eliminan los agentes contaminantes que podrían afectar al ambiente y la salud de personas y animales en caso de desecharse. Por ejemplo, en un estudio similar, los autores encontraron que el uso de lodos ricos en aluminio procedentes de procesos de anodizado como el componente principal en la formulación de los cuerpos prensados parece ser un destino de reciclaje interesante para esta abundantes. Su uso (tal como se recibió y previamente secado o calcinado), como una sola materia prima o en combinación con componentes cerámicos comunes, da buenas composiciones finales en base a alúmina, mullita o mezclas de las dos fases después de la sinterización a 1450 a

1650 ° C. Una de las conclusiones del trabajo es que la mezcla de materiales como alúmina y mulita, permitirían el diseño de propiedades tecnológicas interesantes, tales como alta resistencia eléctrica y mecánica, la refractariedad, etc., las cuales se encontró que era fácilmente realizable mediante el control de la formulación de la mezcla inicial y/o el calendario de sinterización. Su adaptabilidad a varias técnicas que configuran ahora en progreso (Ribeiro, 2004).

2.3 LOS LODOS ANODIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTOS

Vargas y Montero (2006) comentan que el cemento es un material de construcción que ha sido utilizado por más de 2.000 años en algunas de sus formas. En general, se distinguen dos tipos de cementos: naturales y artificiales. Los primeros, los cuales se obtienen de materiales naturales, lleva un proceso sencillo de fabricación y su composición depende de las zonas de obtención de materias primas. Actualmente, los más utilizados son los cementos artificiales, de los que existe un considerable número de ellos, el más importante y de mayor utilización es el cemento Pórtland, que fue el primer cemento moderno fabricado por Joseph Aspdin, en Gran Bretaña, alrededor de 1825.

Con el fin de reciclar los residuos provenientes del proceso de anodización del aluminio, se han intentado diversos experimentos que lleven a la reutilización de las grandes cantidades de agua residuales, como en la modificación de la cerámica, aplicada para diferentes usos. Una de estas alternativas, dada la atractiva posibilidad de reducción de costos, pues el proceso de fabricación de cemento no solamente requiere grandes cantidades de energía, sino de inversión en materias primas, siendo el agua uno de los componentes principales. Sin embargo, se ha encontrado que estas aguas contienen grandes cantidades de sales solubles que en contacto con la arcilla producen una especie de líquido

viscoso parecido al gel, de modo que se complica el proceso de producción de los cementos.

El alto contenido de agua y la consistencia similar a gel de lodos hacen difícil la obtención de mezclas homogéneas con las otras materias primas y aumentan la contracción por secado de cuerpos cerámicos. Por otro lado, los lodos ricos en Al previamente secados a 100°C, exhiben una fuerte estructura aglomerada que también impide una buena mezcla con las demás materias primas. Una mezcla no homogénea significa que discretas porciones refractarios de lodos sin reaccionar, se mantendrán dentro de una baja temperatura de maduración de la matriz de arcilla roja. Esto explica las propiedades mecánicas y la disminución de los valores de absorción de agua cada vez mayor de los productos como disparados (Ferreira y Otero, 2002)

Considerando que el cemento es un producto con demanda creciente, que para su producción requiere altos consumos de energía, cualquier avance que se realice para disminuir el consumo energético, tiene importantes beneficios económicos y ambientales. Dentro de las soluciones posibles, se encuentra la utilización de materiales alternativos que pueden ser utilizados como materias primas o materiales cementosos de reemplazo parcial o total del cemento Pórtland.

Las pruebas realizadas a las diferentes mezclas demuestran que el lodo incorporado al cemento como relleno, modifica sus características iniciales, acelerando los tiempos de fragua, aumentando la porosidad del material, condición que afectó, negativamente la resistencia del cemento, pero aumentó su capacidad aislante (Vargas y Montero, 2006). Esto debido a la concentración de elementos pesados y porciones de metales que se encuentran altamente concentrados en estas aguas provenientes de los procesos de anodizado. Una vez secado a 100 °C, se identificó la siguiente composición:

Tabla 4. El análisis elemental del lodo seco y la evolución de la concentración total de algunos elementos por lavado con la temperatura de tratamiento térmico

Elemento	Concentraciones elementales (% en peso)				
	El lodo se seca a 100 ° C	Lixiviados después de los lodos en el tratamiento térmico			
		100 ° C	500 ° C	800 ° C	1400 ° C
Na	0.62	0.184	0.4632	0.598	0.607
K	0.23	0.002	0.008	0.031	0.021
Mg	0.07	0.0168	0.0628	0.0636	0.03
Ca	0.65	0.093	0.57	0.59	0.43
Sn	0.30				
Al	24.10	0.426	0.776	1.176	0.46
Fe	0.41				
Cr	0.25				
Si	0.46				
Cl	0.15				
P	0.21				
S	4.51				
SO	13.50	0.6896	5.59	12.8	9.49

Fuente: Vargas & Montero (2006)

A continuación se presenta el proceso llevado a cabo por Vargas & Montero, para determinar si es posible reciclar el agua residual de los procesos de anodizado de aluminio en el proceso de fabricación del cemento.

2.3.1 El proceso experimental. Para el estudio de Vargas y Montero (2006), se recibieron aproximadamente 400 kg de lodos residuales húmedos (con el 80% de humedad aproximadamente), que fueron secados en estufas a 110 °C por 24 horas, para eliminar la humedad, resultando una cantidad de 85 kg aproximadamente, de material seco.

Este material seco fue procesado mediante molido y cernido, para obtener material en polvo, resultando 35kg. “Se obtuvo un recubrimiento en tamaños de partícula que oscilan entre los 1,5 µm y 90 µm, con lo que el lodo podría tener un tamaño similar a un cemento grueso, para lo cual se preparó una muestra de granulometría denominada gruesa, en donde aproximadamente el 67% de la masa retenida corresponde a tamaños entre 425 y 150 micrómetros. El contenido final en la muestra de lodo de aluminio expresado como Al₂O₃ fue de (47,63 ± 0,04) % m/m y de sulfatos (4,27 ± 0,02) % m/m.” (Vargas y Montero, 2006). La Tabla 5 muestra las mezclas utilizadas en el experimento”.

Tabla 5. Composiciones de las mezclas utilizadas por Vargas & Montero.

Mezcla	% de Cemento	% de Lodo	%Al₂O₃⁴
1	100	0	4,14
2	75	25	15,01
3	50	50	25,89
4	25	75	36,75

Fuente: Vargas & Montero (2006)

⁴ Cálculo con base en el dato reportado por la empresa HOLCIM para el cemento de uso general y el análisis de aluminio del lodo de trabajo.

2.3.2 Pruebas físicas. Para el cemento, es importante que se cumplan algunas condiciones físicas que determinan que el material sea de calidad, tales como la maleabilidad, la consistencia normal, el tiempo de fragua y la resistencia mecánica.

Todas las mezclas evaluadas en el estudio de Vargas y Montero, que contenían lodo anodizado cumplieron las pruebas, presentando como características generales: la norma ASTM-C-305- 99⁵ para el proceso de mezclado y la norma ASTM-C-778-00⁶ para las especificaciones de la arena estándar utilizada en las pruebas de morteros. (Vargas y Montero, 2006).

2.3.3 Estudio de la porosidad y la conductividad térmica del cemento modificado. La prueba de porosidad se realizó en sumersión en agua por 24 horas de las mezclas realizadas, y la medida se sacó comparando la masa de la pieza húmeda con la masa de la pieza seca.

Se valoró la conductividad térmica del material lodo-cemento, mediante un método basado en la medición del flujo de calor a través de varios materiales y la aplicación de la ecuación de Fourier⁷. Se prepararon tres placas de material, con la siguiente composición: cemento 100%, 50% lodo fino - 50% cemento, 50% lodo grueso - 50% cemento. En el experimento de Vargas y Montero (2006) se siguió el procedimiento descrito por Vásquez (1989), utilizando un equipo que consta de una plantilla de calentamiento como fuente de calor, sobre las cuales se dispone una serie de placas de materiales en el siguiente orden: cobre, aluminio, material

⁵ ASTM. "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency". C 305-99

⁶ ASTM. "Standard Specification for Standard Sand"

⁷ $\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{kA}{x}(T_1 - T_2)$ donde $\frac{\Delta Q}{\Delta T}$ es el calor transmitido en la unidad de tiempo, k es la conductividad térmica. A es el área de la superficie de contacto, $(T_1 - T_2)$ es la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el frío, y, x es el espesor del material.

(k desconocida), aluminio, baño de agua. Se colocaron termopares entre cada una de las placas, para determinar los cambios de temperatura en el proceso de transferencia de calor Vargas y montero (2006).

2.3.4 Resultados del experimento de Vargas y Montero. Las pruebas realizadas a las diferentes mezclas demuestran que el lodo incorporado al cemento modifica sus características iniciales, al acelerar los tiempos de fragua, aumentan la porosidad del material, condición que afectó negativamente la resistencia del cemento, pero aumentó su capacidad aislante. La Tabla 6. Muestra los tiempos de fragua obtenidos para cada mezcla.

Tabla 6. Tiempos de fragua para diferentes mezclas

Mezcla ⁸	Tiempo de fraguado	
	Fraguado inicial (minutos)	Fraguado final (minutos)
1	195	296
2	10	32
3	26	59
4	393	553

Fuente: Vargas & Montero (2006)

En la Tabla 6 se observa que las condiciones de los cementos se alteran, obteniendo deficiencias en aspectos claves, para la maleabilidad del material, lo que afecta el trabajo con éste y el rendimiento del mismo en las estructuras. En coherencia con Gómez y Montero (2006), normalmente, el cemento Pórtland solidifica después de 1 a 3 horas, periodo en el cual las finas agujas de cristales

⁸ De acuerdo con los porcentajes de composición expuestos.

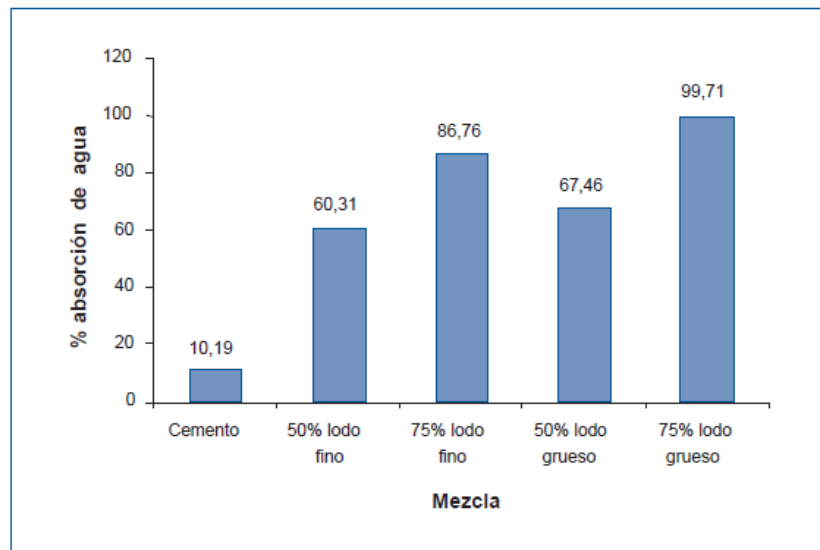
de estringita recristalizan en forma de agujas más largas, en la cual enlazan las partículas de cemento.

En el caso particular de las mezclas lodo cemento, posiblemente el Calcio (CaO) del cemento reaccionó con los óxidos de aluminio hidratados aportado por el lodo, generando así más Aluminato de Calcio ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) hidratado, lo cual también inhibió la hidratación del silicato tricálcico y silicato dicálcico. Por lo tanto, la carencia de sulfato de calcio propició el fraguado rápido de las mezclas por la formación directa a aluminatos de calcio hidratado, reacción que fue también favorecida al suministrarse una mayor cantidad de óxido de aluminio (Vargas y Montero, 2006)

Sin sulfato de calcio, el aluminato de calcio reacciona con agua directamente a aluminato de calcio hidratado, llenando los espacios entre las partículas de cemento con cristales grandes, generando una falsa pero muy rápida solidificación de la pasta de cemento, no permitiendo ello la hidratación del silicato tricálcico y silicato dicálcico, los cuales son los responsables del desarrollo de la resistencia del cemento Pórtland.

Otro factor importante que afectó la resistencia de las mezclas fue la cantidad de agua utilizada en las mezclas, ya que existe una relación inversamente proporcional entre la cantidad de agua y la resistencia del cemento. En el experimento de Vargas y Montero (2006) se emplearon diferentes mezclas de cemento utilizando lodos en dos granulometrías: fino y grueso con el fin de determinar la porosidad. La prueba de porosidad se realizó sumergiendo en agua por 24 horas midiendo por triplicado la masa de la pieza en base seca y húmeda. Se determinó que el incremento de la cantidad de lodo incorporado al cemento modifica sus características iniciales y aumentan la porosidad, condición que repercute drásticamente en la resistencia pero aumenta su capacidad aislante. (Ver gráfico 1).

Gráfico 1. Absorción de agua en las mezclas Lodo - Cemento



Fuente: Vargas & Montero (2006)

De acuerdo con lo expuesto en el Gráfico 1 por Vargas y Montero (2006) se debe buscar una alternativa viable para el uso de estos cementos modificados, dado que no es apto para la construcción por su alta porosidad, lo que los hacen más livianos. El estudio tenía como objetivo determinar usos alternativos de cementos modificados, fijándose en que las estructuras a construir considerando la baja exigencia de resistencia, absorción de agua y soportar la alta conductividad térmica. Se determina con el estudio que este tipo de cementos modificados son ideales para el uso en aislantes con fines constructivos, ya que presenta conductividades térmicas muy similares a las del asbesto.

2.4 UTILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES DE LOS PROCESOS DE ANODIZADO DE ALUMINIO, EN PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y ADOQUINES

Uno más de los estudios encaminados al reciclaje de los residuos de lodos anodizados de aluminio, plantea la utilización de este tipo de material en la fabricación de ladrillos y adoquines para la construcción.

En la investigación de Granda & Plaza (2012), para la realización de los adoquines se utilizaron materiales comunes como: cemento, arena, chispa piedra (sílex, SiO_2), agua y el lodo residual en base seca y húmeda; para los ladrillos en cambio se utilizaron materiales como: caolín, arcilla, diatomita, agua y el lodo residual en base seca y húmeda; su composición se determinó en diferentes porcentajes. Los equipos utilizados para la realización de la prueba piloto de adoquines fueron una mezcladora, una máquina prensadora moldeadora, una carretilla para el transporte de los adoquines moldeados, y un pallet llano para el asentamiento de los adoquines y su secado al ambiente.

2.4.1 El proceso experimental. La prueba piloto para la elaboración de los adoquines se realizó de la siguiente manera: Se mezcló en primera instancia la chispa piedra (sílex, SiO_2) y el granzón (material obtenido de ríos y/o minas compuesto por mezcla de grava, arena y material llenante para base y sub-base) manualmente apaleando con una pala manual, luego la mezcla realizada se la colocó en la mezcladora, añadiendo de pequeñas cantidades en pequeñas cantidades el cemento; luego a la mezcla resultante le añadieron el lodo y se mezcló hasta obtener una masa homogénea.

Colocaron la mezcla en los moldes de la prensa de adoquines y la sometieron a alta presión, aproximadamente a 140 psi. Luego procedieron a desmoldar los

adoquines prensados y se colocó en unos coches para ser llevados al secado a temperatura ambiente. Finalmente, se les marcó para tener trazabilidad donde permanecen por un lapso de 28 días de secado para proceder a realizar las pruebas de compresión.

Para la elaboración de ladrillos pesaron los componentes de la mezcla tanto del caolín, diatomita, arcilla y el lodo residual para luego colocarlos en envases previamente identificados, se procedió a mezclar manualmente los componentes y se va añadiendo pequeñas cantidades de agua hasta formar una masa que alcance la contextura adecuada, luego de esto se lo coloca en unos moldes en donde se le da una forma rectangular, se marcan los ladrillos para tener trazabilidad y se los colocó en una plataforma lisa para dejarlos secar por 5 días a temperatura ambiente, para luego llevarlos al horno y proceder a la cocción a una temperatura aproximada de 1000 °C durante 12 horas, para luego proceder a su almacenamiento, y después de 28 días realizar las pruebas de compresión. Las Tablas 7 y 8 muestran las diferentes mezclas de lodo utilizadas en el experimento y sus componentes.

Tabla 7. Componentes utilizados en la fabricación de ladrillos y adoquines

Muestra	Tipo de Residuo	Cantidad Residuo (%)	Cantidad Chispa Piedra (%)	Cantidad Granzón (%)	Cantidad Cemento (%)
LH1	Lodo Húmedo	10	40	30	20
LH2	Lodo Húmedo	20	30	30	20
LS1	Lodo Seco	10	40	30	20
LS2	Lodo Seco	20	30	30	20

N1	No aplica	0	40	40	20
*La humedad de lodo seco es 42% y la de lodo húmedo era 81%					

Fuente: Granda & Plaza (2012)

Tabla 8. Componentes usados en la elaboración de ladrillos

Muestra	Tipo de Residuo	Cantidad Residuo (%)	Cantidad Caolín (%)	Cantidad Arcilla (%)	Cantidad Diatomita (%)
LH1	Lodo Húmedo	10	40	40	10
LH2	Lodo Húmedo	20	30	40	10
LH3	Lodo Húmedo	30	30	30	10
LH4	Lodo Húmedo	40	25	25	10
LS1	Lodo Seco	10	40	40	10
LS2	Lodo Seco	20	30	40	10
LS3	Lodo Seco	30	30	30	10
LS4	Lodo Seco	40	25	25	10
N1	No aplica	0	50	40	10
*La humedad de lodo seco es 42% y la de lodo húmedo era 81%					

Fuente: Granda & Plaza (2012)

Posterior al periodo de reposo de 28 días, se realizaron pruebas de dimensión de las muestras, peso y ubicación en la máquina de compresión obteniendo como resultado, un comportamiento variable de cada una de las muestras utilizadas con diferentes proporciones de lodo anodizado, encontrando que las muestras de lodo húmedo con una composición en peso del 20%, 30% y 40% y la de lodo seco al

40% se destruyeron al ingresar al horno y no se pudieron realizar las pruebas de compresión.

Mientras que la muestra con lodo seco al 10% en peso luego de realizar la prueba de compresión arrojó un resultado de 46.7 kg/cm² por lo que según la norma NTE INEN 297:78 se puede elaborar ladrillos huecos con este material.

Por otra parte, con la muestra con lodo seco al 20% (LS2) y con lodo seco al 30% (LS3), y con lodo húmedo al 10% (LH1) se conformaron los ladrillos pero no se obtuvo valores de resistencia que puedan justificar su elaboración según la norma INEN 297:78

En cuanto a los adoquines, las pruebas realizadas con las muestras en base de lodo seco y lodo húmedo, donde la muestra compuesta de lodo en base húmeda al 20% se rompió antes del ensayo en la máquina, la de 10% en base húmeda dio una resistencia muy baja en el ensayo a la compresión de 6.6 kg/cm²; y las muestras compuestas en base seca al 10% y 20% se conformaron y se realizaron los ensayos de compresión donde se obtuvo resistencias de 65 kg/cm² y 79.1 kg/cm² respectivamente, sin embargo no cumplieron ninguno de los parámetros establecidos en la norma NTE 1488:87, por lo que se recomienda su producción solo para fines decorativos.

3. CONCLUSIONES

El proceso de anodización del aluminio permite crear superficies más resistentes a la intemperie y la corrosión gracias al revestimiento que se crea a partir de este proceso en las estructuras metálicas de aluminio. Así pues, se convierte en un material muy demandado en la industria de la cerámica, la decoración y las artesanías.

Los lodos anodizados contienen gran cantidad de partículas y elementos químicos, tales como sales y metales que si bien no son considerados peligrosos, requieren de un alto costo para realizar una descontaminación que permita su posterior aplicación.

El reciclaje potencial de las aguas residuales del proceso de anodizado beneficia tanto a las empresas dedicadas a esta actividad, como a aquellas que las reutilizarán en sus procesos, generando impactos tanto ambientales (por la reducción de utilización de masas de agua descontaminadas y posiblemente aptas para el consumo), como de tipo económico, al reducir el gasto en el proceso descontaminante por una parte, y en la adquisición de materias primas, por otra.

La industria en la que se ha observado mayor posibilidad de reciclaje de estos lodos anodizados es la industria cerámica, ya que se han identificado elementos ferrosos en las aguas residuales que son un facilitador para que la arcilla tome coloraciones más fuertes y perdurables.

Se encontró que para la fabricación de cerámica a partir de la utilización de aguas residuales producto del proceso de anodizado de aluminio, se debe tener en cuenta tanto el estado físico del lodo como la naturaleza del mismo y la técnica de conformación utilizada para la conformación del producto.

Mediante las técnicas experimentales utilizadas, se encontró que la calcinación ayuda a destruir la estructura de aglomerado fuerte entre las partículas finas de hidróxido de aluminio y descompone parcialmente las sales solubles presentes, mejorando así la capacidad de procesamiento de todos los métodos de consolidación probados.

Las pruebas realizadas a las diferentes mezclas demuestran que el lodo incorporado al cemento como relleno, modifica sus características iniciales, acelerando los tiempos de fragua, aumentando la porosidad del material, condición que afecta, negativamente, la resistencia del cemento, pero aumenta su capacidad aislante.

Se encontró que los cementos modificados no son aptos para la construcción por su alta porosidad, lo que los hace más livianos, fijándose en que las estructuras a realizar con este tipo de cemento, han de tener baja exigencia de resistencia, absorción de agua y soportar la alta conductividad térmica. Por ende, se determinó que este tipo de cementos modificados son apropiados para el uso en aislantes para fines constructivos, ya que presenta conductividades térmicas muy similares a las del asbesto.

Las pruebas realizadas con las muestras en base de lodo seco y lodo húmedo para la fabricación de adoquines a partir del lodo anodizado, demuestran baja resistencia del material por lo que se puede utilizar únicamente para fines decorativos.

La baja resistencia de los ladrillos producidos con la adición de las aguas residuales de proceso de anodizado de aluminio indica, que no es conveniente el reciclaje de estas aguas en la producción de ladrillos.

BIBLIOGRAFÍA

ALUTIONS. Sistema de Gestión Integral. Procedimiento control de Procesos en la Planta de Anodizado. Cuarta Revisión. (2010).

ÁLVAREZ Ayuso, E. (2008). Enfoques para el tratamiento de desechos de la industria de anodización de Aluminio.

ANODIZING. [en línea]. <http://grupoandalucia.org/metals/products_anodizing.php#image-2> [citado el 18 de octubre 2014].

ASTM. "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency". C 305-99.

ASTM. "Standard Specification for Standard Sand". C778-00.

EARTHWAREFIRE. [en línea]. <<http://www.earthwaterfire.com/sheaths.htm>> [citado el 16 de julio de 2014].

ECOCHILLERS incorporation. [en línea]. <<http://www.ecochillers.com/Chillers-anodizado-aluminio>> [citado el 19 de septiembre 2007].

FARIAUT, F., Boulmer-Leborgne, C., Le Menn, E., Sauvage, T., Andreatza, C., Andreatza, P., Langlade, C. (2001). Surface carburization of aluminum alloys by excimer laser. *Surface and Coatings Technology*, (146-147), 324-330.

FERREIRA, J.M y Otero, S. (2002). Al-rich sludge treatments towards recycling. *Journal of the European Ceramic Society*.

FRANKEN, Tony. (2003). Water-loop closure in an aluminium anodizing plant. *Membrane Technology*. (1).

FREI, H. (1972). The application of aluminium in the construction of particle accelerators. *Metals and Materials*, 6 (8), 347-348.

GÓMEZ, S; Iván et al. (2013) Estudio de absorción de agua en moldes de yeso y yeso-cemento para vaciado de suspensiones. Ingenierías, 16(59).

GRANDA, I; Plaza, G. (2012). Utilización de lodos residuales de una planta de anodizado de aluminio para la fabricación de ladrillos y adoquines. Corporación Ecuatoriana de Aluminio Cedal S.A.

KIZINIEVIČ, O; Žurauskienė, R; Kizinievič, H; Žurauskas, R. (2012). Utilización de residuos de lodos de tratamiento de agua para productos cerámicos.

LENNTECH ¿Qué es ósmosis inversa?. [en línea]. < <http://www.lenntech.es/biblioteca/osmosis-inversa/que-es-osmosis-inversa.htm>> [citado el 30 de abril de 2009].

M, J; Ribeiro, S; Blackburn, J.M; Ferreira, J.A; Labrincha. (2006). Extrusion of alumina and cordierite-based tubes containing Al-rich anodising sludge. Journal of the European Ceramic Society. Elsevier.

NETHERCOT, D. A. (2002). Structural use of aluminium in the construction industry. Aluminum Alloys. Their Physical and Mechanical Properties Pts, 1-3, 396 (4), 15-20.

NEVILLE, A. (1989). Tecnología del Concreto. Tomo II. Editorial Limusa.S.A.: México.

RIBEIRO; Tulyaganov; Ferreira, Labrincha (2002). Recycling of Al-rich industrial sludge in refractory ceramic pressed bodies. Ceramics International.

RIBEIRO; Tulyaganov; Ferreira; Labrincha (2004). Production of Al-rich sludge-containing ceramic bodies by different shaping techniques. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier.

TORRES; Fernández; Agathopoulos; Tulyaganov; Ferreira. (2004). Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations. Journal of the European Ceramic Society. Elsevier.

VARGAS; Montero. (2006). Estudio del uso del lodo residual de la empresa Extralum S.A. como material alternativo en la fabricación de cementos especiales. Tecnología en Marcha.19-(3).

VÁSQUEZ, A. (1989). Diseño de un Laboratorio para la medición de la Conductividad Térmica y la Capacidad Calorífica. Tesis, Universidad de Costa Rica.

XIE, G., Thompson, D., Jones, C. (2006). A modelling approach for the vibroacoustic behaviour of aluminium extrusions used in railway vehicles. Journal of Sound and Vibration. 293 (3-5), 921-932.