

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“OBTENCIÓN DE ÓXIDO DE ALUMINIO ( $Al_2O_3$ ) A PARTIR DE  
ARCILLA CAOLINÍTICA PROVENIENTE DEL  
DEPARTAMENTO DE JUNÍN”**

## **TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:**

**HAROLD HERBERT HIDALGO MEDRANO  
JORGE LUIS VICUÑA SIMEÓN**

**LIMA – PERÚ**

**2010**

**“OBTENCIÓN DE ÓXIDO DE ALUMINIO ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) A PARTIR DE ARCILLA  
CAOLÍNICA PROVENIENTE DEL DEPARTAMENTO DE JUNÍN”**

A nuestros padres y hermanos por el apoyo constante y por incentivarnos a cumplir nuestros objetivos en la vida.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA por las facilidades brindadas para llevar a cabo el desarrollo de la Tesis. A los ingenieros: José Pérez Gálvez, Carlos Morales Comettat, Emilia Hermoza Guerra, Dra. Susana Petrick Casagrande de la Facultad de Ciencias de la UNI, al Ing. David Martínez de la Facultad de Minas, a todos ellos por ayudarnos a absolver nuestras preguntas y dudas.

Un agradecimiento especial al Ing. Rafael Chero Rivas nuestro asesor por el constante apoyo hacia nosotros a lo largo del desarrollo de la Tesis, también uno muy especial a los profesionales de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos: Ing. Ana María Osorio Anaya (Facultad de Ingeniería Química), Dr. Ángel Bustamante Domínguez (Facultad de Ciencias Físicas) que nos apoyaron desinteresadamente en el análisis y caracterización de nuestras muestras.

También agradecemos la ayuda prestada por los encargados de los laboratorios: Sr. Esteban Mujica Gálvez del Laboratorio N° 15, Sra. Soledad Visa Llenque del Laboratorio N° 21, Sr. Oscar Vvacary del Laboratorio N° 14.

A todas las personas que nos apoyaron de una u otra manera en el desarrollo de la tesis.

## INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>2. ASPECTOS GENERALES.</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Las arcillas.</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1 Generalidades.</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2 Clasificación.</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3 Características físicas de la arcilla.</b>	<b>6</b>
<b>2.2. El óxido de aluminio.</b>	<b>6</b>
<b>2.2.1 Descripción del óxido de aluminio.</b>	<b>7</b>
<b>2.2.2 Propiedades físicas y químicas del óxido de aluminio.</b>	<b>8</b>
<b>2.2.3 Aplicaciones industriales.</b>	<b>8</b>
<b>3. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD.</b>	<b>11</b>
<b>3.1 Especificaciones de materia prima e insumos químicos.</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Especificaciones del ácido.</b>	<b>12</b>
<b>3.3 Hidróxido de amonio.</b>	<b>12</b>
<b>4. MERCADO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.</b>	<b>13</b>
<b>4.1 Mercado.</b>	<b>13</b>
<b>4.2 Explotación de materia prima.</b>	<b>13</b>
<b>4.3 Definición del problema.</b>	<b>15</b>
<b>5. PARTE EXPERIMENTAL.</b>	<b>16</b>
<b>5.1 Resumen del Proceso.</b>	<b>16</b>
<b>5.2 Selección de la materia prima (arcilla utilizada).</b>	<b>18</b>
<b>5.3 Evaluación de variables.</b>	<b>24</b>
<b>5.3.1 Evaluación de la variable dependiente.</b>	<b>24</b>
<b>5.3.2 Evaluación de la variable Independiente.</b>	<b>25</b>
<b>5.4 Proceso a nivel laboratorio.</b>	<b>25</b>
<b>5.4.1 Lixiviación.</b>	<b>25</b>
<b>5.4.1.1 Evaluación de las variables en el proceso de lixiviación.</b>	<b>25</b>
<b>5.4.1.1.1 Evaluación de la variable dependiente.</b>	<b>25</b>
<b>5.4.1.1.2 Evaluación de las variables independiente.</b>	<b>26</b>

5.4.1.1.2.1 Evaluación del porcentaje en peso de ácido sulfúrico en la solución de lixiviación.	26
5.4.1.1.2.2 Evaluación de la temperatura de lixiviación.	28
5.4.1.1.2.3 Evaluación del tiempo de lixiviación.	29
5.4.1.2 Evaluación del pH.	30
5.4.2 Pre-calcinación.	33
5.4.2.1 Evaluación del efecto de la temperatura.	34
5.4.2.1.1 Evaluación de las variables.	35
5.4.3. Molienda.	38
5.4.3.1 Evaluación del tamaño de partícula.	39
5.4.4 Filtración.	40
5.4.4.1 Formación de precipitado (Cristales de alumbre).	40
5.4.4.2 Evaluación del porcentaje de sólidos obtenidos.	43
5.4.4.3 Formación de precipitado de mayor tamaño.	44
5.4.5. Calcinación.	44
5.4.5.1. Pérdida de peso y tiempo de calcinación.	45
5.4.5.1.1. Determinación de los parámetros óptimos para la obtención del óxido de aluminio.	45
5.5. Caracterización del producto.	48
5.5.1. Primer método - análisis por Difracción de Rayos X.	48
5.5.2. Segundo método - análisis por Absorción Atómica.	51
5.6. Cinética de reacción.	55
5.7. Prueba banco.	61
6. DESARROLLO DEL PROCESO AL NIVEL INDUSTRIAL	68
6.1 Diagrama de flujo.	68
6.2 Bases de diseño.	70
6.2.1 Capacidad de planta.	70
6.2.2 Parámetros de diseño.	72
6.3 Diseño y selección de equipos.	72
7. EVALUACIÓN ECONÓMICA.	91
7.1 Descripción.	91
7.2 Cálculos de costo de capital.	91
7.2.1 Costos de capital fijo.	91

7.2.2 Costo de instalaciones auxiliares.	91
7.2.3 Costo de mano de obra.	91
7.2.4 Costo de materias primas.	91
7.2.5 Ingreso por ventas.	91
7.3 Costos de manufactura.	92
7.4 Análisis de rentabilidad.	92
7.4.1 Datos para la evaluación económica.	92
7.4.2 Depreciación lineal.	92
7.4.3 Flujo de caja proyectado.	92
7.4.4 Tiempo de recupero.	92
8. UBICACIÓN DE PLANTA.	101
9. CONCLUSIONES.	106
10. RECOMENDACIONES.	109
11. BIBLIOGRAFÍA.	110
12. APENDICE.	115

## RESUMEN

El presente trabajo, está enfocado en el proceso de obtención del óxido de aluminio (alúmina), a partir de arcilla del tipo caolinítico, material existente en nuestro país.

Consiste en la extracción de óxido de aluminio, también llamado alúmina, mediante lixiviación de arcilla con ácido sulfúrico con determinados parámetros de operación como: temperatura, tiempo, porcentaje de concentración del ácido, densidad y tamaño de grano; que son evaluados mediante pruebas experimentales a fin de obtener datos óptimos, los que determinan su eficiencia.

Se realizan los respectivos balances de materia y energía, con el fin de desarrollar el dimensionamiento de los principales equipos industriales que intervienen, mediante el uso de teorías como: transferencia de calor, termodinámica, cantidad de movimiento, transferencia de masa, entre otros.

Se desarrolla el diagrama de proceso, ubicando de manera ordenada y adecuada, cada uno de los equipos con el fin de seguir un lineamiento favorable de producción.

Cada equipo es seleccionado de manera adecuada mediante evaluaciones teóricas y que se encuentran dentro del rango de las especificaciones técnicas que existen en el mercado, para fácil disposición de ellos.

Posteriormente, mediante el uso del método de factores, se procede a localizar la planta, siendo el adecuado, aquel que obtenga el mayor puntaje de entre los lugares que se hayan propuesto.

Finalmente, se desarrolla el respectivo análisis económico con el objetivo de evaluar su rentabilidad, la inversión y el tiempo de recupero de éste, que haría posible su industrialización.



## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el proceso que se usa para la obtención del óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) es el proceso Bayer.

El proceso Bayer usa bauxita para la obtención de óxido de aluminio, la bauxita es una roca sedimentaria que contiene un porcentaje elevado de óxido de aluminio en su composición química.

El Perú carece de bauxita, debido a su geología y a las condiciones climáticas en que se encuentra ubicado; no favoreciéndonos con tan valioso elemento natural. Los grandes yacimientos de bauxita se encuentran ubicados en: Australia, Nueva Guinea, Jamaica, Brasil y Venezuela; siendo este último país, gran productor del óxido de aluminio (mediante el proceso Bayer), con el fin de obtener el metal aluminio, que es comercial en todo el mundo.

Estados Unidos a pesar de no poseer Bauxita, es gran productor y consumidor de aluminio en el mundo, debido a que este país importa su materia prima de otros continentes.

A partir de los diferentes estudios realizados anteriormente el aluminio es uno de los elementos de mayor abundancia en el mundo, se encuentra distribuido en las diferentes conformaciones morfológicas tanto metálicas y no metálicas (llamados comúnmente arcillas), siendo este último (en especial las del tipo caolinítico), ricas en óxido de aluminio dentro de su composición química (hasta en 45%, los provenientes de países asiáticos), asegurándose de esta manera como segunda alternativa para obtener el óxido de aluminio.

Nuestro país es poseedor de grandes reservas de arcillas tipo caolinítica (que se utiliza en la actualidad en la fabricación de materiales refractarios, por ser ésta una de sus principales propiedades, y utilizados dentro de la industria como aislante térmico), que se encuentran ubicados, en gran parte, de nuestra sierra norte y centro, cuya composición química contiene hasta un 30% de óxido de aluminio, lo cual la hace factible como principal materia prima en la extracción de dicho óxido.

El óxido de aluminio comúnmente llamado alúmina, es uno de los elementos de mayor uso industrial como: adsorbentes, esmaltes o pinturas, en la industria del papel, como cloruro de aluminio para coagulantes, como abrasivo,

en la producción de sulfato de aluminio de mayor calidad, aluminato de sodio, en la producción de aluminio metálico, en la industria petrolera como catalizador, en medicina para la fabricación de piezas dentales o fabricación de implantes, etc.

La alúmina es un producto de gran demanda en el mercado nacional, lo cual es importado de otros países. A pesar de poseer la segunda materia prima existente en el mundo para su producción, hasta el momento no se ha desarrollado una industria que pueda darle uso para su obtención, sino destinándolo para fines comerciales en la elaboración de productos de bajo costo (ladrillos refractarios, cerámicos, vajillas, etc.), sin aprovechar sus componentes individuales, que son de útiles en nuestra industria.

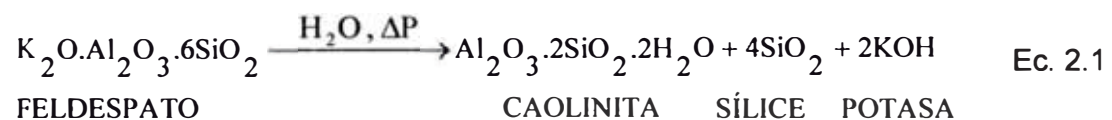
Cabe resaltar que existen diferentes tipos de arcillas y las cuales están destinados a diferentes usos industriales como: la bentonita en la elaboración de arcillas activadas para la decoloración de los aceites, las del tipo mormorillonítica para catalizadores, etc.

## 2. ASPECTOS GENERALES

### 2.1 Las arcillas:

#### 2.1.1 Generalidades:

“Arcilla es una asociación de minerales arcillosos (silicatos complejos hidratados de aluminio), de pequeño tamaño de partícula originada por la alteración hidrotermal de rocas ígneas (granitos, riolitas, dioritas, basaltos) que, bajo condiciones propias de presión, temperatura, acidez, etc., desilicifican a minerales arcillosos, sílice libre y alcalies que se lixivian según la reacción:



La arcilla no es un mineral sino un agregado de minerales y de sustancias coloidales que se han formado mediante la desintegración química de las rocas alumínicas. Está compuesta principalmente por sílice, alúmina y agua; conteniendo también otras sustancias como fragmentos de rocas, de óxidos hidratados de hierro, álcalis y materiales coloidales.

La alteración es hipogénica si es debajo de la superficie y epigénica si es en ella. La naturaleza de la roca y el proceso de alteración fijan las características de los minerales que se forman, definiendo su estructura y composición química. Así, rocas a condiciones ácidas producen minerales como caolinita mientras que medios básicos forman montmorillonita o talco.

Respecto a su composición química las arcillas presentan determinadas composiciones químicas, una composición típica se puede observar en la tabla 2.1.

Todas las arcillas, poseen una determinada estructura que las hacen diferentes unas a otras.

La composición y su naturaleza determinan el uso y el valor de la arcilla.

- **La sílice** aumenta la plasticidad.
- **La alúmina** la hace refractaria.
- **El óxido de hierro** disminuye la temperatura de fusión, actúa como fundente y también es un poderoso agente colorante.

Las arcillas han sido clasificadas de acuerdo al tipo y estas a su vez, han sido subdivididas de acuerdo a la estructura en que se encuentran distribuidas en la naturaleza.

**Tabla 2.1: Composición química de las arcillas.**

%	Caolinita	Halloysita	Montmorillonita	Beidellita	Nontrita	Illita
SiO <sub>2</sub>	43,6 - 54,7	40 - 45,8	47,9 - 51,2	45,3 - 47,7	-----	50,1 - 51,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,0 - 40,2	33,8 - 39,2	20 - 27,1	12,2 - 27,8	-----	21,7 - 32,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3 - 2,0	0 - 0,4	0,2 - 1,4	0,8 - 18,5	15,2 - 40,8	0 - 6,2
MgO	0 - 1	0,3	2,1 - 6,6	0,2 - 3	0,1 - 4	2 - 4,5
CaO	0,003 - 1,5	0,1 - 0,8	1 - 3,7	0,5 - 2,8	0,6 - 4,5	0 - 0,6
K <sub>2</sub> O	0 - 1,5	0,3	0,2 - 0,6	0,1	0,1 - 0,4	6,1 - 6,9
Na <sub>2</sub> O	0 - 0,2	0,1 - 0,2	0,3 - 0,8	0,1 - 1	0 - 0,2	0,1 - 0,5
TiO <sub>2</sub>	0 - 14	-----	-----	0,8	0 - 0,1	0,5
H <sub>2</sub> O	11 - 14,3	13,4 - 23,7	17,1 - 22,6	17,3 - 22,6	5,1 - 13,1	6,4 - 7

Fuente: Enciclopedia de tecnología química

**Tabla 2.2: Estructura química de las arcillas.**

<b>Caolín</b>	Nacrita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O
	Diquita	
	Caolinita	
	Anauxita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O
	Metahalorcita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O
	Haloisita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O
	Alofurita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .mSiO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O
<b>Esmectita</b>	Pirofilita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .4SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O
	Montmorillonita	(Mg, Ca) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .5SiO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O
	Nontronita	(Al, Fe) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SiO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O
	Beidellita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SiO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O
	Saponita	2MgO <sub>3</sub> .3SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O
<b>Mica</b>	Mica arcillosa	K <sub>2</sub> O.MgO.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .7SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O

Fuente: Biblioteca digital.

### **2.1.2.-Clasificación:**

La clasificación de las arcillas, desde el punto de vista geológico, es simple. Fundamentalmente se distinguen entre primarias y secundarias, casi siempre de origen hipogénico.

#### **A) Arcillas primarias o residuales:**

Son las formadas en el lugar de sus rocas madres y no han sido por tanto transportadas por el agua, el viento o el glaciar. Cuando han sido limpiadas de fragmentos de roca, son relativamente puras, blancas y libres de contaminación con materiales arcillosos.

#### **B) Arcillas secundarias:**

Son las que han sido desplazadas del lugar de las rocas madres originales. Éstas son mucho más corrientes que las anteriores y tienen una constitución más compleja debido a que están compuestas por material procedente de distintas fuentes: hierro, cuarzo, mica, materias carbonosas y otras impurezas. Otra clasificación distingue entre caolines, bentonitas, hidrómicas o illitas y cloritas, según el grupo mineralógico dominante.

La clasificación aceptada por la industria y en geología de minerales no metálicos y que en último grado fija su valor económico, admite los siguientes tipos:

#### **Caolín, arcilla “china”, blanca o para papel.**

Son arcillas residuales, in situ, originadas por alteración hidrotermal, hipogénica o epigénica, de rocas ígneas ácidas (granitos, dióritas, riolitas).

Durante la alteración, feldespatos alcalinos son atacados por soluciones líquidas o vapores ácidos, a presiones y temperaturas moderadamente elevadas para formar: caolinita, sílice libre y alcalies solubles. La alteración también ocurre en condiciones atmosféricas.

Siendo depósitos primarios, su mineralogía es la derivada directamente de la roca original e incluye caolinita, cuarzo y mica, en proporciones que varían según el grado de alteración y que pueden llegar hasta 80 a 100% de caolinita, menos de 30% de cuarzo y menos de 10% de mica.

#### **Arcillas plásticas, bola o “Ball Clays”.**

Arcillas sedimentarias, de origen similar al de los caolines pero que, al contrario de éstos, fueron acarreados a lugares distintos al de su formación, por

el mismo acarreo pasaron por una selección que las hizo de fino tamaño de partícula y consiguientemente, más plásticas.

La mineralogía es la derivada de la roca original pero de mayor pureza por el proceso de acarreo que movió la fracción arcillosa ligera y dejó la no arcillosa pesada (cuarzo, feldespatos, roca sin alterar). Incluye caolinita (30 – 80%), hidrómica y/o montmorillonita (0 – 40%), cuarzo (0 – 50%), materia orgánica (0 – 8%) y escasos contenidos de feldespatos, mica rutilo y limonita.

#### **Arcillas refractarias.**

Son de alto cono perimétrico, con punto de reblandecimiento superior a los 1600°C y compuestos de caolinita con pequeñas cantidades de cuarzo, mica, anatasa, rutilo y óxido de hierro. Contienen de 40 a 60% SiO<sub>2</sub>, 25 A 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, de 1 a 5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, menos de 4% MgO y CaO y menos de 3% de alcalies.

#### **2.1.3 Características físicas de la arcilla.**

##### **A) Plasticidad:**

Mediante la adición de una cierta cantidad de agua, la arcilla puede adquirir la forma que uno desee. Esto puede ser debido a la atracción química entre las partículas.

##### **B) Merma:**

Debido a la evaporación del agua contenida en la pasta se produce un encogimiento o merma durante el secado.

##### **C) Refractariedad:**

Todas las arcillas son refractarias, es decir resisten los aumentos de temperatura sin sufrir variaciones, aunque cada tipo de arcilla tiene una temperatura de cocción.

##### **D) Porosidad:**

El grado de porosidad varía según el tipo de arcilla. Esta depende de la consistencia más o menos compacta que adopta el cuerpo cerámico después de la cocción.

#### **2.2. El óxido de aluminio:**

El óxido de aluminio, más conocido como alúmina, es un material muy versátil, puede soportar altas temperaturas, posee elevada dureza que la hace

indispensable en la industria del abrasivo, además es utilizado para obtener aluminio metálico, etc.

La alúmina existe en la naturaleza en forma de corindón y de esmeril. Ciertas piedras preciosas, como el rubí, el zafiro, son formas de alúmina coloreadas por indicios de óxidos de metales pesados. Se halla también en forma de óxidos hidratados que son los componentes de la bauxita y de la laterita (esta consta principalmente de hidróxido aluminico, férrico, sílice y menores proporciones de otros óxidos). Junto con la sílice, es el ingrediente más importante en la constitución de las arcillas y los barnices.

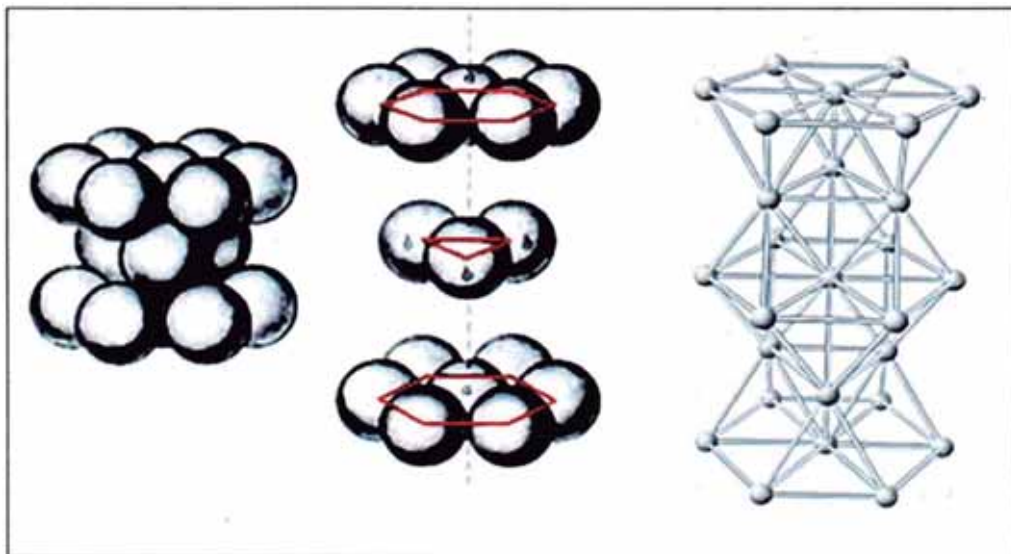
A temperatura ordinaria, el óxido de aluminio es insoluble en todos los reactivos químicos comunes.

### 2.2.1 Descripción del óxido de aluminio:

La estructura de la alúmina es octaédrica en la cual 6 grupos hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) o átomos de oxígeno están dispuestos de tal manera que cada uno forma un vértice de un octaedro que se mantiene unido en el centro por un átomo de aluminio.

La alúmina tiene como celda unitaria la forma HCP (hexagonal compacta), la figura 2.1 nos ayuda a visualizar como es la estructura de la alúmina.

Figura 2.1 Representación de la estructura de la alúmina.



### 2.2.2 Propiedades físicas y químicas del óxido de aluminio:

En la tabla 2.3 se observa las propiedades físicas y químicas del óxido de aluminio (alúmina).

**Tabla 2.3: Propiedades físicas y químicas de la alúmina.**

<b>Propiedades Físicas</b>	<b>Medida</b>
Absorción de agua - saturación (%)	0
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3,95
Porosidad aparente (%)	0
Temperatura de fusión (°C)	2050
<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Dureza -Knoop (kgf/mm <sup>2</sup> )	2100
<b>Resistencia Química</b>	
Ácidos - concentrados	Buena
Ácidos - diluidos	Buena
Álcalis	Buena
Metales	Buena
Halógenos	Buena

### 2.2.3 Aplicaciones industriales:

La alúmina tiene gran cantidad de aplicaciones entre las más importantes se tiene:

#### A) Alúmina como abrasivo y refractario:

La alúmina calcinada tiene muchos usos como abrasivos y materiales refractarios. Hay dos tipos principales de abrasivos artificiales: el carburo de silicio y el óxido de aluminio, que en general no compiten entre sí.

Generalmente se dispone de cuatro tipos para uso cerámico:

- Alúmina calcinada, se presenta en varias formas según sea el grado de calcinación.
- Alúmina tabular, que posee una riqueza en alúmina cristalizada como alfa alúmina de casi el 100%, por lo tanto es más puro que el tipo anterior.
- Alúmina hidratada, es más ampliamente utilizada en cerámica por su alta o mayor reactividad. Por su alto punto de fusión se utiliza comúnmente como capa intermedia entre las piezas a cocer y los soportes y placas refractarias



dentro de los hornos (se pintan los refractarios con una pasta de alúmina hidratada).

En general, la alúmina es un excelente elemento mediante el cual se puede controlar el brillo o la matización de los esmaltes. Una función importante es evitar su desvitrificación.

La alúmina incrementa la refractariedad, opacidad, la resistencia al ataque químico y endurece los esmaltes haciéndolos más resistentes al impacto y al rayado.

### **B) Alúmina para la obtención de aluminio:**

Es usada para obtener el metal aluminio, que tiene cada vez más demanda mundial.

El proceso es llevado a cabo por vía electrolítica desde la reducción de alúmina con carbón, pero esta es sólo posible a altas temperaturas y la reacción inversa ocurre sobre el enfriamiento. Por la química del aluminio, el medio electrolítico no puede ser agua; de hecho, casi toda la producción comercial del aluminio durante los últimos 90 años ha sido un medio de criolita fundida,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ .

Los pasos que siguen en la producción de aluminio metálico son:

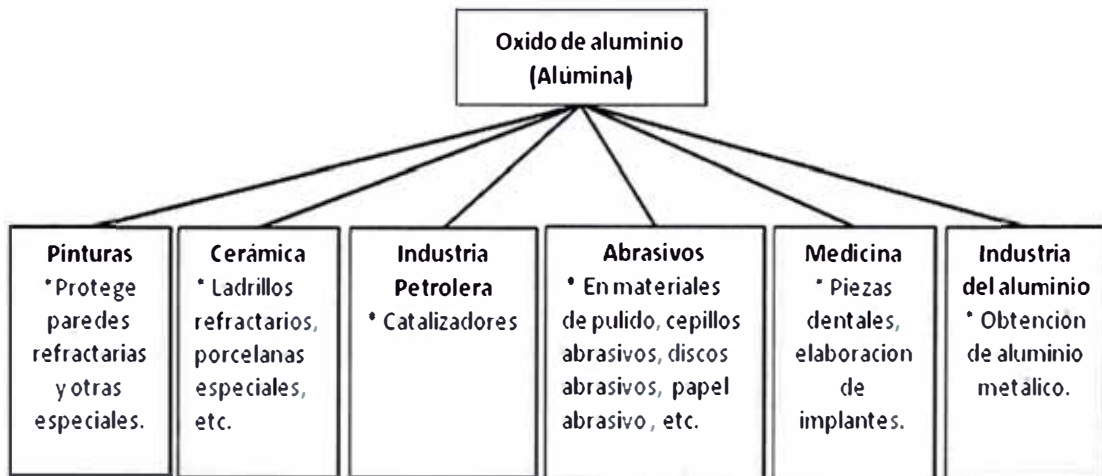
- Se instala o se reemplaza el recubrimiento de la celda.
- Se manufacturan los ánodos de carbono.
- Se prepara el baño de criolita y se controla su composición.
- Se disuelve la alúmina en el baño de criolita fundida.
- La solución de aluminio en la criolita fundida es electrolizada para formar aluminio metálico, que sirve como cátodo.
- El electrodo de carbono es oxidado por el oxígeno liberado.
- El aluminio fundido se extrae de las celdas, aleado (si se desea), fundido en lingotes y enfriado.

### **C) Alúmina como catalizador y portador de catalizadores:**

La alúmina tiene usos importantes como catalizador y portador de catalizadores y para este fin se emplean diversos tipos, según las características que se desean.

La alúmina empleada como portador de catalizadores puede modificar notablemente la función del catalizador aunque por si misma tenga poca actividad respecto de la reacción catalizada. Es necesario escoger el tipo adecuado de alúmina para determinada aplicación. Además es preciso determinar la cantidad de agente activo que ha de sostener la alúmina, considerando debidamente la actividad, estabilidad y el costo de la composición.

**Figura. 2.2 Usos industriales de la alúmina.**



### 3. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD.

#### 3.1 Especificaciones de materia prima e insumos químicos:

Frecuentemente los minerales extraídos de la superficie terrestre presentan grados altos de heterogeneidad debido a la presencia de las impurezas que los acompañan. Dependiendo de las condiciones atmosféricas y geológicas de la región, así como del grado de alteración del entorno de donde se extrae la arcilla, impurezas tales como: hematita, limonita, ilmenita, pirita, magnetita, cromita, etc., suelen estar presentes. Estos minerales aportan un número importante de elementos cromóforos (conjunto de átomos de una molécula responsable de su color), además del Fe y Ti, tales como Cr, Mn y Ni los cuales presentan la propiedad de pigmentar la materia prima y, por ende, el producto final procesado. El contenido de estos elementos cromóforos en las materias primas juega un papel muy importante en los procesos industriales, dado que pequeñas variaciones por encima de la concentración permisible de estos conducen a alteraciones significativas en la pigmentación del producto final.

#### 3.2. Especificaciones del ácido:

Se requiere ácido sulfúrico de 98% de concentración y de alta pureza, por ejemplo el ácido que se usa para realizar la lixiviación en esta tesis fue donado como muestra por una empresa particular y tiene las siguientes características:

**Tabla 3.1: Porcentajes de impureza del ácido sulfúrico utilizado.**

<b>Propiedades - metales presentes</b>	<b>Valores - porcentaje</b>
Densidad a 20°C ( g/ml )	1,835
Concentración	98,40%
Cobre ( Cu ) máx	0,0002%
Hierro ( Fe ) máx	0,0150%
Manganeso ( Mn ) máx	0,0002%
Mercurio ( Hg ) máx	0,0005%
Níquel ( Ni ) máx.	0,0002%
Zinc ( Zn ) máx.	0,0005%
Cloruros ( Cl ) máx.	0,0020%
Metales pesados como plomo ( Pb ) máx.	0,0100%

### 3.3 Hidróxido de amonio:

También donado como muestra por una empresa particular y tiene las siguientes características:

**Tabla 3.2: Porcentaje de impureza en el hidróxido de amonio utilizado.**

<b>Propiedades - metales presentes</b>	<b>Valores - porcentaje</b>
Gravedad específica a 60°/60°F	0.902-0.896
Concentración (como NH <sub>3</sub> )	28.0-30.0%
Residuos después de ignición	0.001%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,002%
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	0,00005%
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	0,00005%
Azufre total (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	0,0001%
Hierro (Fe)	0,00001%
Níquel (Ni)	0,00001%
Cobre (Cu)	0,00001%
Metales pesados	0,00005%

#### 4. MERCADO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

##### 4.1 Mercado:

En la actualidad el mercado del óxido de aluminio se encuentra en su mayor parte concentrada en la industria cerámica.

Según datos de ADEX y ADUANAS, las empresas que más importaron alúmina en el año 2008 son:

**Tabla 4.1: Lista de importadores de alúmina en el año 2008.**

<b>EMPRESA</b>	<b>PESO (kg)</b>
Refractarios Peruanos S.A	241803
Cerámica San Lorenzo S.A.C	201632
Cerámica Lima S.A	144000
Abrasivos Industriales S.A	133220
Química Anders S.A.C	42750
Refractarios y crisoles S.A	27480
Mazal Corp S.A	9300
Ferreyros S.A.A	9072
Industria Peruana de Refractarios S.A.C	6725
Crubher S.C.R	4795
Eb pareja Lecaros S.A	2640
Abrasivos S.A	1400
Aceros del Peru S.A.C	1136
Corporacion Mara S.A	1050
Consortio Terminales S.A	1043
<b>TOTAL</b>	<b>833179</b>

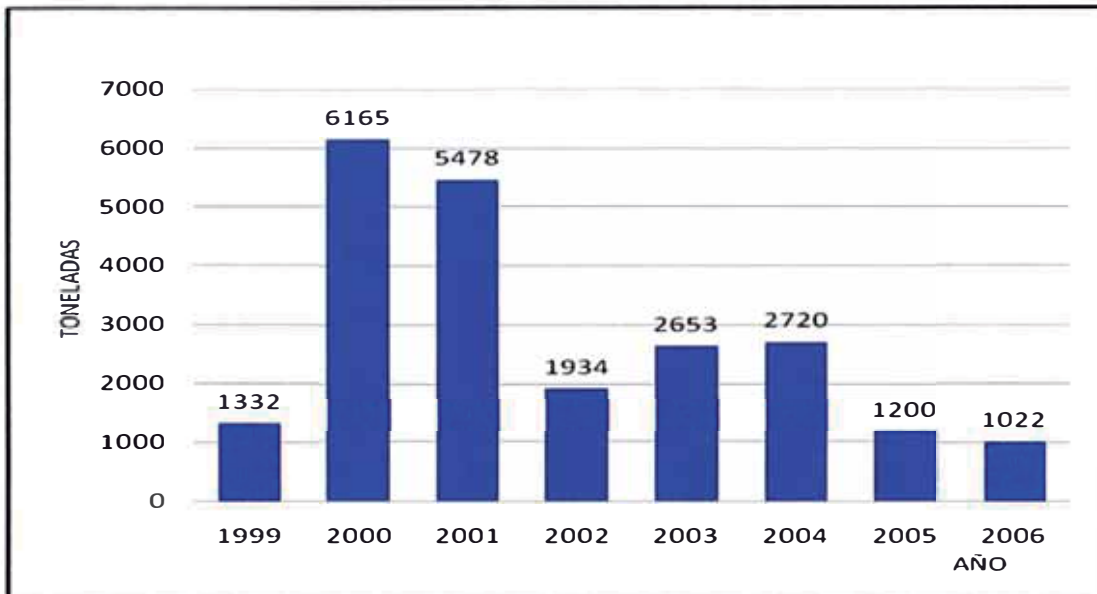
**Fuente: Asociación de Exportadores- ADEX.**

##### 4.2. Explotación de materia prima:

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran la tendencia en la explotación de las arcillas caoliníticas y las arcillas refractarias en el Perú según la Dirección General de Minería - Ministerio de Energía y Minas.

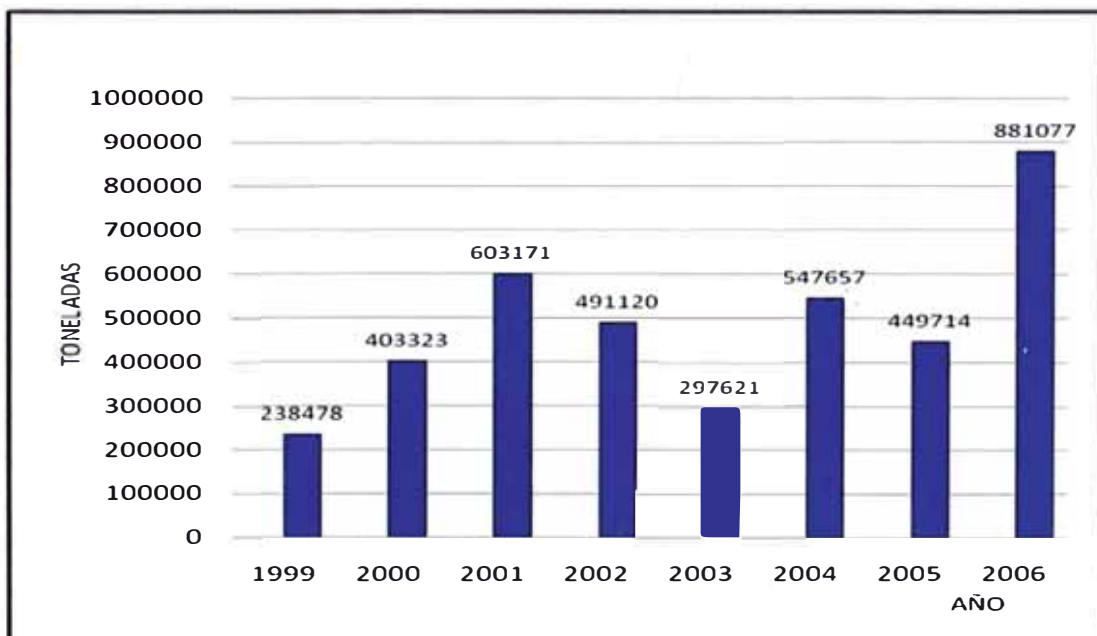
En general la explotación de arcilla caolinítica y refractaria es irregular ya que depende de la exportación que muchas veces no es fija y su uso en el Perú casi no se da.

**Figura 4.1: Explotación anual de arcilla del tipo caolinítica en el Perú.**



**Fuente: Dirección General de Minería-MEM**

**Figura 4.2: Explotación anual de arcillas refractarias en el Perú**



**Fuente: Dirección General de Minería-MEM**

#### 4.3. Definición del problema:

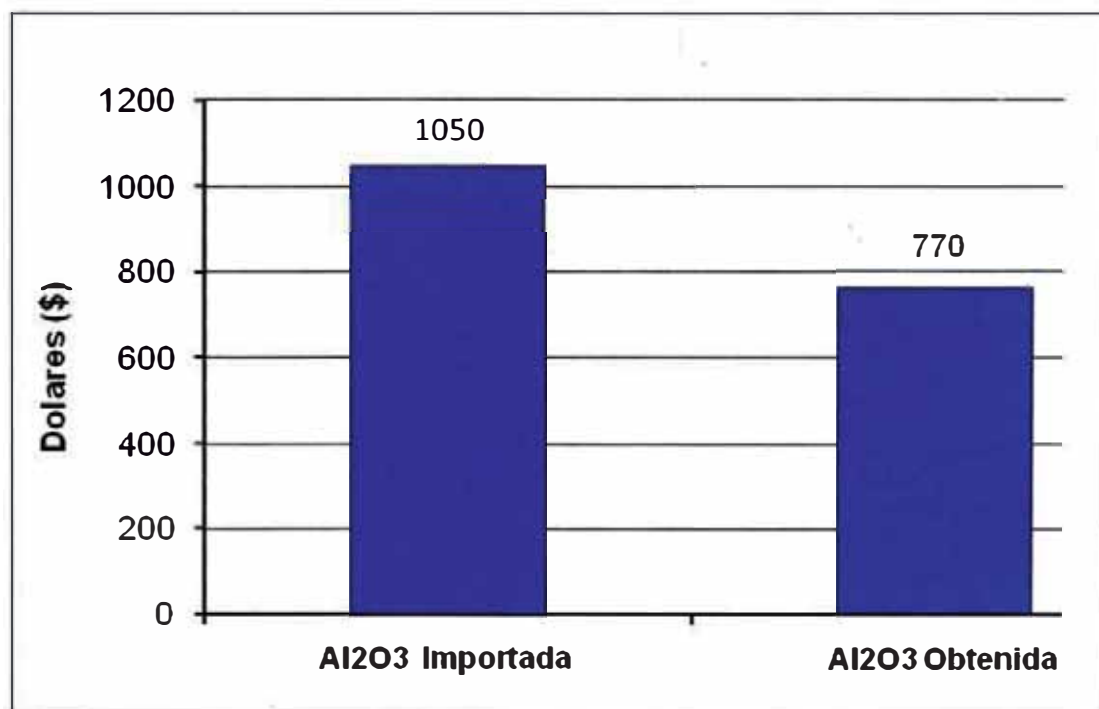
La importación de alúmina hace que el Perú, dependa de los países productores de éste material. Produciendo alúmina podemos empezar un poco a independizarnos a la vez que se crea empresa, se genera trabajo y mayores ingresos al estado por los impuestos que se paga.

Dar valor agregado a nuestras materias primas, es tarea de las industrias en general y no exportar solo materia prima a precios bajos, que luego son devueltos al país convertidos en materiales e indumentarias con altos precios.

Mediante el proceso que se plantea, se obtiene alúmina de alta pureza (mayor al 96%) a partir de arcilla del tipo caolinítica, y de esta manera se da valor agregado a la arcilla rica en óxido de aluminio con el que contamos en varias zonas de nuestro país.

Se presenta costos comparativos de alúmina (precio FOB) de importación con el precio estimado que nos podría costar obtenerlo mediante este proceso, en la parte de la evaluación económica se detalla más a cerca de los costos.

**Figura 4.3: Costos comparativos por tonelada de alúmina importada y alúmina obtenida por el proceso propuesto.**



## **5. PARTE EXPERIMENTAL**

### **5.1 Resumen del proceso:**

El presente trabajo se determino con mejores resultados cuando se tiene como intermediario la formación de la sal de aluminio y amonio (sal de alumbre), y su calcinación respectiva, para obtener el óxido de aluminio. Se realizó el siguiente procedimiento:

#### **1. Selección de la materia prima:**

La arcilla seleccionada, es el de tipo caolinítico y como se menciona en la parte de la materia prima, es debido a que este tipo de arcillas contienen mayor cantidad de óxido de aluminio dentro de su composición.

#### **2. Caracterización de la materia prima:**

La arcilla seleccionada, fue pasada a través de Difracción de Rayos X, con el objetivo de determinar la naturaleza de la arcilla y para obtener datos cuantitativos de la cantidad de óxido de aluminio presente, lo que determinara su viabilidad.

#### **3. Molienda:**

Parte de la materia prima es sometida a una molienda, con el fin de reducir el tamaño de grano, que hace que la superficie específica sea máxima.

Para encontrar los valores donde el proceso de extracción es óptimo. Este proceso se realiza moliendo la materia prima, para posteriormente seleccionarlo con el tamizado donde es seleccionado por el tamaño del pasante y finalmente determinar con cuál de ellos se obtiene mejores resultados.

#### **4. Pre-calcinación de la arcilla:**

La arcilla fue pre-calcinada en una mufla a 750 °C, con la finalidad de eliminar el agua presente ya sea en forma de composición o en su forma química (dentro de su estructura molecular); así como las partículas volátiles y finalmente, que la arcilla pase a la fase meta-caolín, donde la materia prima es mas soluble cuando reacciona con ácidos en altas temperaturas



### 5. Lixiviación con ácido:

La arcilla pre-calcinada es lixiviada en agitación con ácido sulfúrico, tomando en cuenta la temperatura, tiempo, concentración del ácido y densidad de la solución, para obtener el respectivo sulfato de aluminio, porque si no están en un valor determinado los parámetros mencionados, podrían originar la formación de otras sustancias la cual originaría la contaminación del producto final.



### 6. Primer filtrado:

El sulfato de aluminio obtenido, es filtrado del sólido.

### 7. Formación de la sal de alumbre de aluminio y amonio:

La solución de sulfato de aluminio obtenida en la lixiviación ácida, luego de ser filtrada, es trasladada a un recipiente con agitador magnético donde se suministra por goteo, el hidróxido de amonio, teniendo como resultado, la formación de la sal doble de aluminio y amonio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ , siendo de la forma de pequeños cristales blancos. El tamaño de los cristales, depende del tipo de tratamiento al que es sometida la solución, porque estos varían de acuerdo al tiempo y solubilidad del sólido formado. El color blanco de los cristales da como referencia la mínima existencia del óxido de hierro  $3^+$ , debido a que este tipo de elemento colorea al producto (es un elemento cromóforo), considerándose de esta manera, un contaminante.

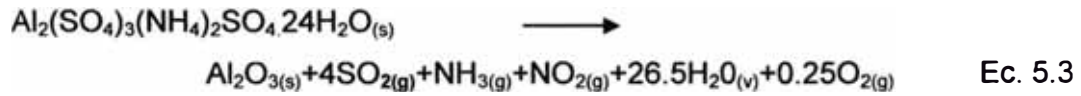


### 8. Segundo filtrado:

El precipitado formado es separado de la solución y secado a temperatura ambiente.

### 9. Calcinación del alumbre:

Como parte final del proceso, el alumbre obtenido es sometido a calcinación en una mufla donde se obtiene como producto el óxido de aluminio con un color blanco intenso en polvo, característica de este producto.



## 5.2. Selección de la materia prima (arcilla utilizada).

La arcilla fue seleccionada con la información que INGEMMET proporciona en su base de datos, luego obteniendo una muestra se hizo un análisis de Difracción de Rayos X, cuyo difractograma se muestra en la figura 5.1.

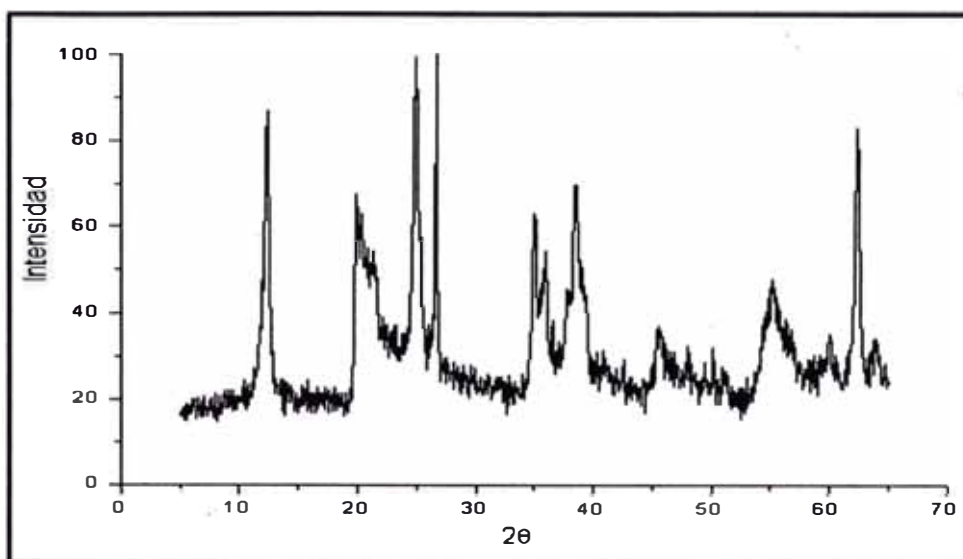
La arcilla elegida es del departamento de Junín, es de color plomo (muy parecido al cemento), no ofrece resistencia a ser quebrado, casi no presenta burbujeo al contacto con ácido acético, lo cual nos indica que casi no posee sales como carbonatos u otros, los volátiles (materia orgánica, etc.) son eliminados por tratamiento térmico.

A continuación se muestra el análisis del difractograma realizado a la arcilla seleccionada (el análisis fue realizado en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM).

La muestra elegida es analizada por Difracción de Rayos X, con el fin de determinar que se trata de una arcilla del tipo caolinítica y además el porcentaje de la misma; con el objetivo de conocer, si es la correcta (alto contenido de alúmina).

Analizando el difractograma obtenido del barrido de rayos, se tiene:

**Figura 5.1: Difractograma de la arcilla utilizada.**



Realizado en los Lab. UNMSM (Facultad de Ciencias Físicas 2008).

La Difracción de Rayos X es uno de los métodos más valiosos para determinar a nivel estructural los diferentes tipos de minerales.

El equipo utilizado, fue un Difractómetro de Rayos X marca TUR, modelo M62; usando un tubo de cobre cuya longitud de onda fue  $1,542 \text{ \AA}$

De la Ley de Bragg:

$$d = \frac{\lambda}{2 * \text{Sen}\theta} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Donde:

d: Distancia interplanar.

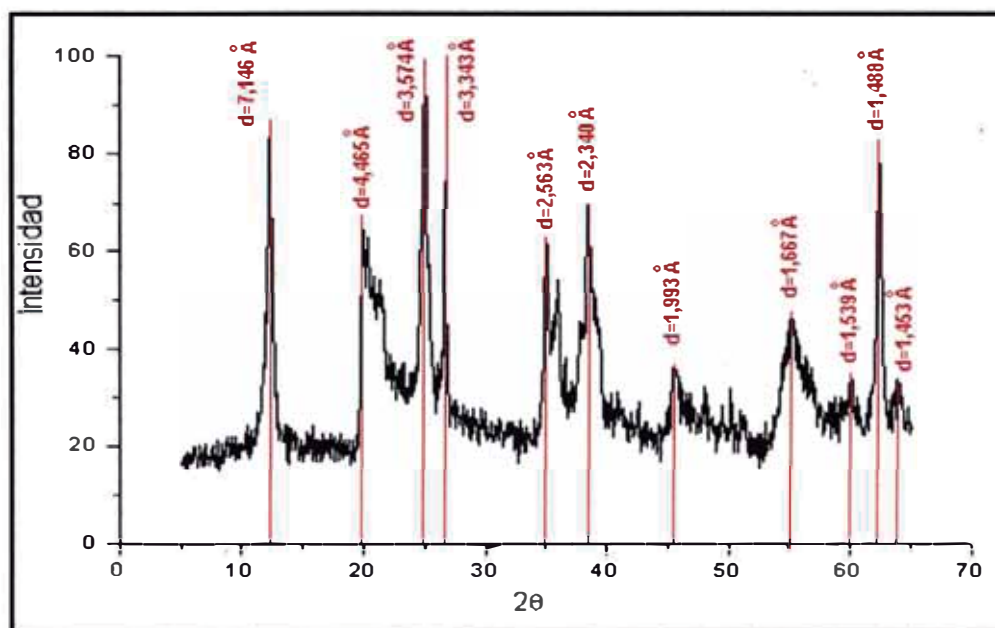
$\lambda$ : Longitud de onda

$\theta$ : Ángulo de incidencia

El software utilizado para graficar la información dada por el difractómetro fue el Origin Lab 8.0, este muestra todas las coordenadas del difractograma.

Con estos resultados se puede ubicar la intensidad de acuerdo a las longitudes de onda obtenidas, con el fin de reconocer los picos en el difractograma en mención y comparar los obtenidos con el de las normas ASTM, con esto se logra conocer con mayor certeza la naturaleza de la muestra (arcilla).

**Figura 5.2: Resaltando los picos del difractograma de la arcilla utilizada.**



**Tabla 5.1: Datos obtenidos con el programa Origin Lab 8.0 para la arcilla.**

<b>2<math>\theta</math></b>	<b>Intensidad</b>	<b>d(A°)</b>
12,260	86,914	7,220
<b>12,388</b>	<b>84,236</b>	<b>7,146</b>
12,716	32,410	6,962
<b>19,886</b>	<b>67,316</b>	<b>4,465</b>
24,377	37,979	3,652
24,776	89,988	3,594
<b>24,919</b>	<b>99,148</b>	<b>3,574</b>
25,232	62,021	3,530
<b>26,672</b>	<b>100,000</b>	<b>3,343</b>
34,954	59,495	2,567
<b>35,011</b>	<b>62,721</b>	<b>2,563</b>
35,867	50,152	2,504
37,805	42,970	2,380
<b>38,475</b>	<b>69,477</b>	<b>2,340</b>
40,956	29,337	2,204
<b>45,518</b>	<b>36,701</b>	<b>1,993</b>
50,863	22,824	1,795
<b>55,112</b>	<b>45,770</b>	<b>1,667</b>
<b>60,129</b>	<b>35,058</b>	<b>1,539</b>
<b>62,410</b>	<b>82,593</b>	<b>1,488</b>
<b>64,107</b>	<b>34,084</b>	<b>1,453</b>

De la figura 5.2 y 5.3 se puede observar que los picos característicos del difractograma, cumple con los picos establecidos por las normas ASTM, con lo cual se concluye con total seguridad, que la materia prima es una arcilla del tipo caolinítico (rica en alúmina), siendo el indicado para el proceso, por los datos obtenidos de la bibliografía (“Enciclopedia de Ingeniería Química” Raymond Kirk), debido a que dentro de su composición química se puede encontrar la mayor cantidad de óxido de aluminio, compuesto que se extraerá.

**Figura 5.3: Ficha ASTM para la identificación del caolín.**

D	3,58	7,18	1,49	7,18	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$		
I/I1	100	100	100	100	Aluminium Silicate Hidrate <b>KAOLINITE 1MD</b>		
Rad. Coka	$\lambda = 1,7902 \text{ \AA}$		Filter FE		dA	I/I1	Hkl
Dia.19.20 CM	Cut off		Coll.		7,18	100	001
I/I1 VISUAL			d COTT.Abs?		4,48	80s	02-
Ref. Robertson, Brindley, Mackenzie, AM.MIN.39 118-38 (1954)					3,58	100+	002
					2,565	80	201,130
					2,502	80	131,300
					2,386	80	003
					2,341	90s	202,131
					2,206	10s	132,201
					1,989	40	203,132
					1,789	40	004
Sys. PSEUDO-MONOCLINIC			S.G.		1,666	50	204,133
'a° 5,16	'b° 8,93	'c° 7,39	A0.578	C0.828	1,541	10s	134,203
$\alpha$	$\beta 104.5^\circ$	$\gamma$	Z2	Dx.2.600	1,488	100	060,31
					1,458	30	332,061
					1,432	20	330
					1,375	10s	0,05
					1,39	10	333,062
							331
							135
					1,310	10s	204
					1,287	30	261,401
							334,063
					1,265	10s	32
							262,400
					1,249	s	403,261
					1,236	30s	006
					1,194	10	
KAOLIN CLAY FROM PUGU. TANGANTIKA. ALSO ELECTRON, AND DIFFEENTIAL TERMAL DATA AND CHENICAL ANALISIS GIVEN.							





Fuente: Normas ASTM (2004).

Para validar el análisis, una parte de la muestra de la materia prima, se analizó en los laboratorios de Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Los resultados del análisis instrumental obtenido mediante Difracción de Rayos X en INGEMMET, es mostrado en la figura 5.4 con su respectivo difractograma en la figura 5.5.

Los resultados de INGEMMET ratifican los resultados que se obtuvo en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM.

**Figura 5.4: Resultado del análisis de Difracción de Rayos X a la arcilla.**

		 Sector Energía y Minas Instituto Geológico Minero y Metalúrgico																	
<b>DIRECCION DE LABORATORIOS LABORATORIO DE RAYOS "X"</b>																			
<b>REPORTE N° 046 2008-LRX</b>																			
ORDEN DE TRABAJO	:	078/2008																	
SOLICITADO POR	:	Universidad Nacional de Ingeniería																	
N° DE MUESTRAS	:	01																	
FECHA	:	Lima 15 de Abril de 2008																	
<p>Para el análisis, se utilizó tubo de Cu en un difractorómetro SHIMADZU modelo XRD-6000, con energía de 40 Kv 30 mA</p> <p><b>RESULTADOS DEL ANALISIS:</b></p> <p>MUESTRA SIN CODIGO</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>N°</th> <th>Mineral</th> <th>Fórmula</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Caolinita</td> <td>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub></td> <td>56.36</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Cuarzo</td> <td>SiO<sub>2</sub></td> <td>33.39</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Amorfo</td> <td>-</td> <td>10.25</td> </tr> </tbody> </table>				N°	Mineral	Fórmula	%	1	Caolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	56.36	2	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	33.39	3	Amorfo	-	10.25
N°	Mineral	Fórmula	%																
1	Caolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	56.36																
2	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	33.39																
3	Amorfo	-	10.25																
		 Espec. PALERMO CARRASCO GUERRERO Laboratorio de Rayos X <b>INGEMMET</b>																	
Av. Canadá 1470, San Borja – Apartado 889 Lima 41, Perú Teléfono: 616-9800 – Fax: (051-1) 225-3063 / (051-1) 225-4540 / (051-1) 476-7010 http://www.ingemmet.gob.pe E-mail: informacion@ingemmet.gob.pe																			

**Realizado en los Lab. INGEMMET.**

Realizado en los Lab. NGEMMET

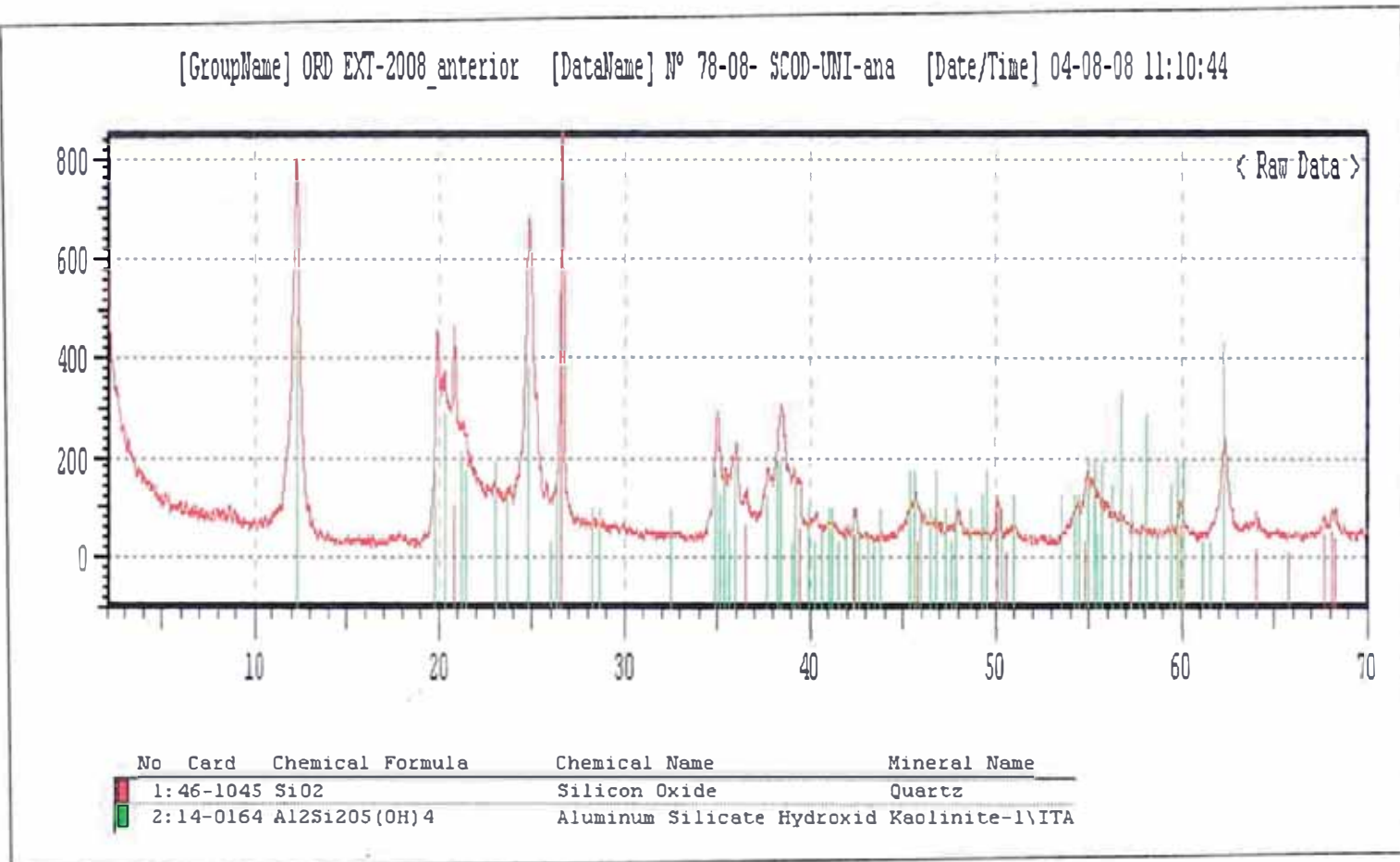


Figura 5.5: Difractograma del análisis de Difracción de Rayos X a la a cilla

### 5.3. Evaluación de variables:

#### 5.3.1. Evaluación de la variable dependiente:

Este punto es de vital importancia para el proceso; es fijado de acuerdo a una metodología presentada a nivel laboratorio, la cual está determinada por la mayor cantidad de óxido presente en cada prueba y su respectivo análisis instrumental, ya sea mediante métodos de Absorción Atómica y análisis de Difracción de Rayos X, con lo cual se tiene mejores resultados.

Pero por lo dificultoso en el uso de los equipos mencionados, debido a la cantidad de pruebas a realizar (mínimo 50 pruebas), se determinó otra alternativa de trabajo que hace posible que el procedimiento sea el adecuado y mayor facilidad de manejo, con lo cual se optó por el uso de la **densidad del sulfato aluminio** obtenido en cada proceso. Es muy cierto que la solución de sulfato obtenido de la lixiviación ácida, está conformada por elementos como el calcio, magnesio, potasio entre otros, que forman parte de estructura molecular de la arcilla tipo caolinítica utilizada, pero cabe mencionar, que por encontrarse este tipo de elementos en poco porcentaje dentro de la materia prima, es factible considerarlo como mínimo, además, de acuerdo al cuadro de solubilidades presentada en el gráfico (5.10), los sulfatos de estos elementos presentan menor solubilidad a temperaturas en que se determina la lixiviación del sulfato de aluminio para nuestro proceso en estudio, siendo por lo tanto no tan apreciable su presencia y solo encontrándose estos en pequeñas trazas. Pero, ¿Cómo saber que este tipo de variable es el adecuado para la determinación de los parámetros óptimos?, Esta pregunta será respondida en la parte final del proceso, cuando se analice el producto final mediante análisis de Absorción Atómica, y se muestre el porcentaje de extracción del óxido de aluminio así como su rendimiento.

Solo en el caso de la determinación del proceso de calcinación, se tomara como variable dependiente, el peso de óxido de aluminio que se obtuvo.

La variable elegida como dependiente, a partir de ahora será la densidad del sulfato y se utilizará para determinar las variables óptimas en cada proceso, que hacen la extracción del óxido de aluminio sea máxima.



### **5.3.2. Evaluación de la variable Independiente:**

Esta variable es evaluada de acuerdo al proceso que se está ejecutando, debido a que no todas intervienen en todos los procesos. Así por ejemplo:

#### **1. Proceso de Lixiviación:**

Las variables independientes a evaluar son:

- ✓ Temperatura.
- ✓ Tiempo.
- ✓ Concentración del ácido.

#### **2. Precalcinación:**

Las variables independientes a evaluar son:

- ✓ Temperatura de precalcinación.
- ✓ Tiempo de precalcinación.
- ✓ Tamaño de grano.

#### **3. Calcinación:**

Las variables independientes a evaluar son:

- ✓ Temperatura de calcinación.
- ✓ Tiempo de calcinación.

Como es visto, las variables independientes, están sometidos al proceso que en esos precisos momentos se están trabajando.

### **5.4. Proceso a nivel laboratorio:**

#### **5.4.1. Lixiviación:**

La lixiviación es considerada, parte central de este proceso; por ello, su análisis exhaustivo. También, se tiene de fuentes bibliográficas los valores cuantitativos de las variables las cuales serán utilizadas como base para la determinación de los parámetros óptimos en cada prueba a realizar.

##### **5.4.1.1. Evaluación de las variables en el proceso de lixiviación:**

###### **5.4.1.1.1. Evaluación de la variable dependiente:**

Como fue explicado, en la **determinación de la variable dependiente**, se tomará la densidad del sulfato formado después de la lixiviación como variable dependiente con el objetivo de determinar las variables que harán óptima el proceso.

#### **5.4.1.1.2. Evaluación de las variables independiente:**

Se analiza tres variables independientes y se toma la que mejor represente como óptimo.

Las variables independientes son:

- A) Porcentaje en peso de ácido sulfúrico en la solución de lixiviación.
- B) Tiempo de lixiviación.
- C) Temperatura de lixiviación.

El equipo utilizado para realizar la lixiviación cuenta con:

- Un sistema térmico de control automático.
- Un balón pírrex.
- Un condensador de vidrio (conocido como refrigerante de bolas).
- Termómetro.

La densidad como variable dependiente, en este experimento funciona bien, porque su valor es directamente proporcional a la cantidad de sales que se extrae en la lixiviación; además el caolín es el compuesto que está presente en mayor cantidad y reacciona con el ácido; entonces es lógico que la densidad aumenta cuando se extrae mayor cantidad de sales (sulfato de aluminio en especial).

Este parámetro, apoya como variable dependiente que es utilizado para determinar la extracción de sulfato de aluminio; y esto procede de la siguiente manera:

Cuanto mayor es la densidad, el grado de extracción es mayor, hasta el punto en que la solución se torna de color pardo (la solución de sulfato de aluminio es verde), tomando como limite esta característica, debido a que la solución se encuentra contaminada por otros elemento que empiezan a formarse, los cuales conforman la estructura química de la arcilla tipo caolinítica, en especial, el hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ).

#### **5.4.1.1.2.1. Evaluación del porcentaje en peso de ácido sulfúrico en la solución de lixiviación:**

Se plantea la siguiente metodología: se toma una temperatura cualquiera como constante, también un tiempo y lo que se hace variar es el porcentaje en peso de ácido de la solución de lixiviación. Utilizando como variable dependiente

(que se mide) a la densidad y manteniendo un volumen constante de la solución lixiviada, se obtiene una gráfica (% ácido vs densidad), donde se observa cual es el porcentaje óptimo.

Se toman 7 muestras de arcilla pre-calcinada; cada una se lixivia con diferentes porcentajes en peso de ácido sulfúrico. Se fija un volumen de 25 ml de solución final para medir la densidad; esto con el fin de poder comparar cuál de ellas extrajo más solución de sulfatos.

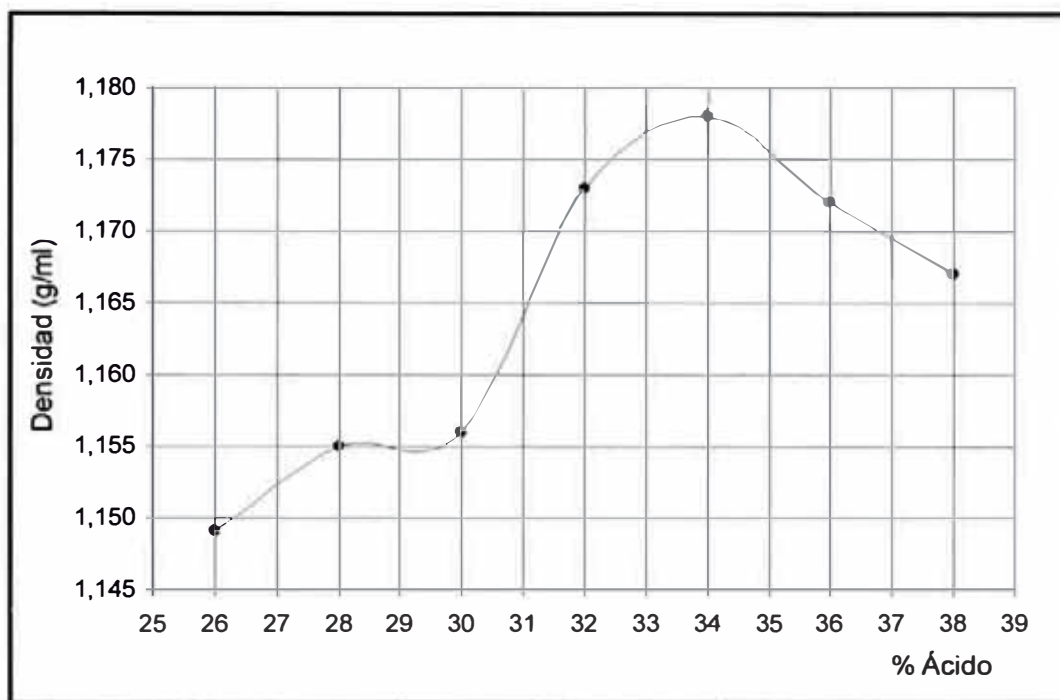
Datos:

Peso de cada muestra:	5 g
Volumen de ácido:	2 ml
Temperatura:	90 °C
Tiempo de lixiviación:	30 min

**Tabla 5.2: Porcentaje en peso de ácido sulfúrico óptimo.**

Prueba	% ácido en peso	Densidad(g/ml)
1	26	1,149
2	28	1,155
3	30	1,156
4	32	1,173
<b>5</b>	<b>34</b>	<b>1,178</b>
6	36	1,172
7	38	1,167

**Figura 5.6: Porcentaje en peso de ácido de lixiviación.**



#### 5.4.1.1.2.2. Evaluación de la temperatura de lixiviación:

Se mantienen constantes las variables:

- Porcentaje de ácido igual a 34% (Obtenido en la experiencia anterior).
- Tiempo de lixiviación de 30 min.

Se toman 7 muestras de arcilla pre-calcinada; las cuales fueron lixiviadas con ácido sulfúrico al 34% en peso a diferentes temperaturas: 50, 60, 70, 80, 90, 97 y 104°C.

Se fija un volumen de 25 ml de solución final para medir la densidad; esto con el fin de poder comparar cuál de ellas extrajo más solución de sulfatos.

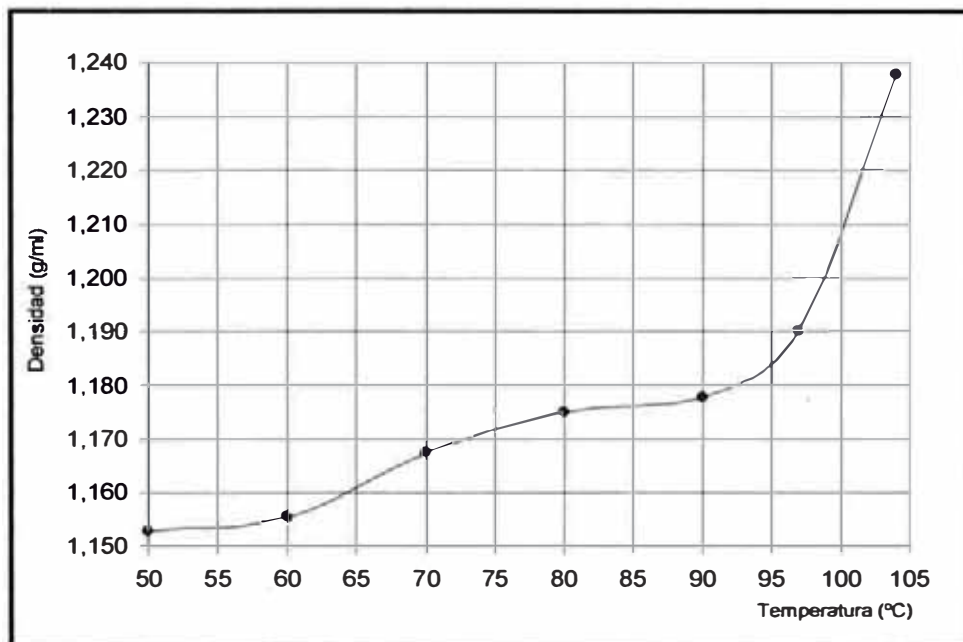
Datos:

Peso de cada muestra:	5 g
Volumen de ácido:	2 ml
Concentración de ácido:	34 %
Tiempo de lixiviación:	30 min

**Tabla 5.3: Obtención del la temperatura de lixiviación.**

Prueba	T (°C)	Densidad (g/ml)
1	50	1,153
2	60	1,155
3	70	1,167
4	80	1,175
5	90	1,178
6	97	1,190
7	104	1,238

**Figura 5.7: Obtención de la temperatura de lixiviación.**



#### 5.4.1.1.2.3. Evaluación del tiempo de lixiviación

Se mantienen constantes las variables:

- Temperatura de lixiviación de 104°C (obtenido anteriormente)
- Porcentaje en peso de ácido 34% (obtenido anteriormente).

Se toman 6 muestras; las cuales son lixiviadas con ácido sulfúrico a 34% en peso y a 104°C y a diferentes tiempos: 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 min.

La variable medida es la densidad. Para medirla, se fija un volumen de 25 ml de solución final; esto con el fin de poder comparar cuál de ellas extrajo más solución de sulfatos.

Datos:

Peso de arcilla calcinada:	5 g
Volumen de ácido:	2 ml
Temperatura de lixiviación:	104 °C
Concentración de ácido:	34 %

**Tabla 5.4: Obtención del tiempo de lixiviación.**

Tiempo (min)	Densidad sulfato (g/ml)
0	1,1780
5	1,1900
10	1,2120
15	1,2261
20	1,2370
25	1,2380
30	1,2380

#### **5.4.1.2. Evaluación del pH:**

Se procede a medir el pH de la solución de las sales obtenidas usando el pHmetro HANNA PH 211 Instruments Microprocessor pH Meter del Laboratorio de Investigación y Química Aplicada N° 21; obteniéndose como resultado de pH igual a 3.

También se mide el pH a la cual termina la formación de cristales de alumbre de aluminio y amonio sin la precipitación de hierro; siendo el resultado de pH igual a 3.5.

Figura 5.8: Obtención del tiempo de lixiviación.

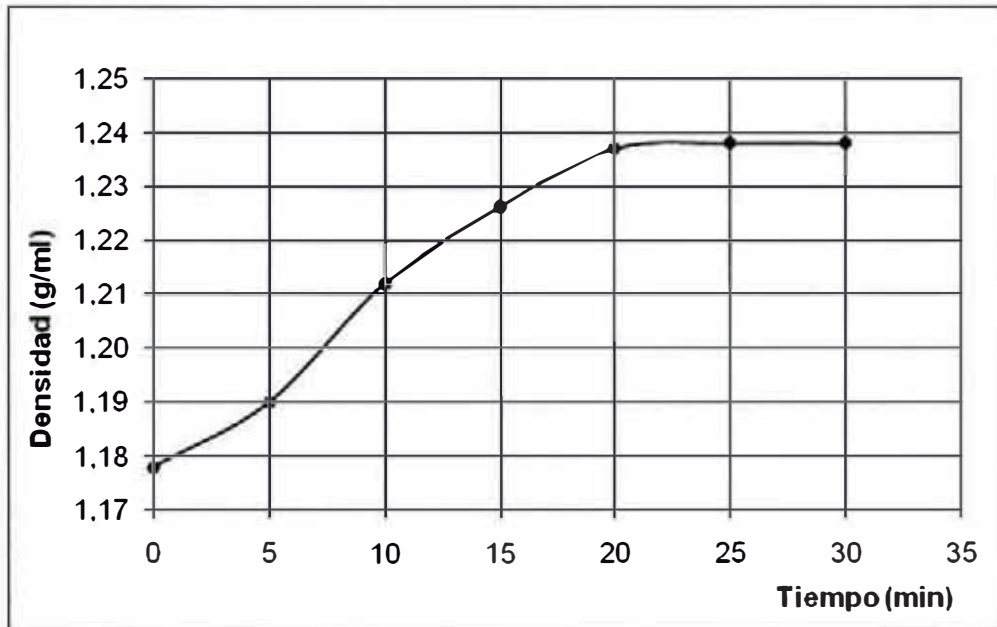
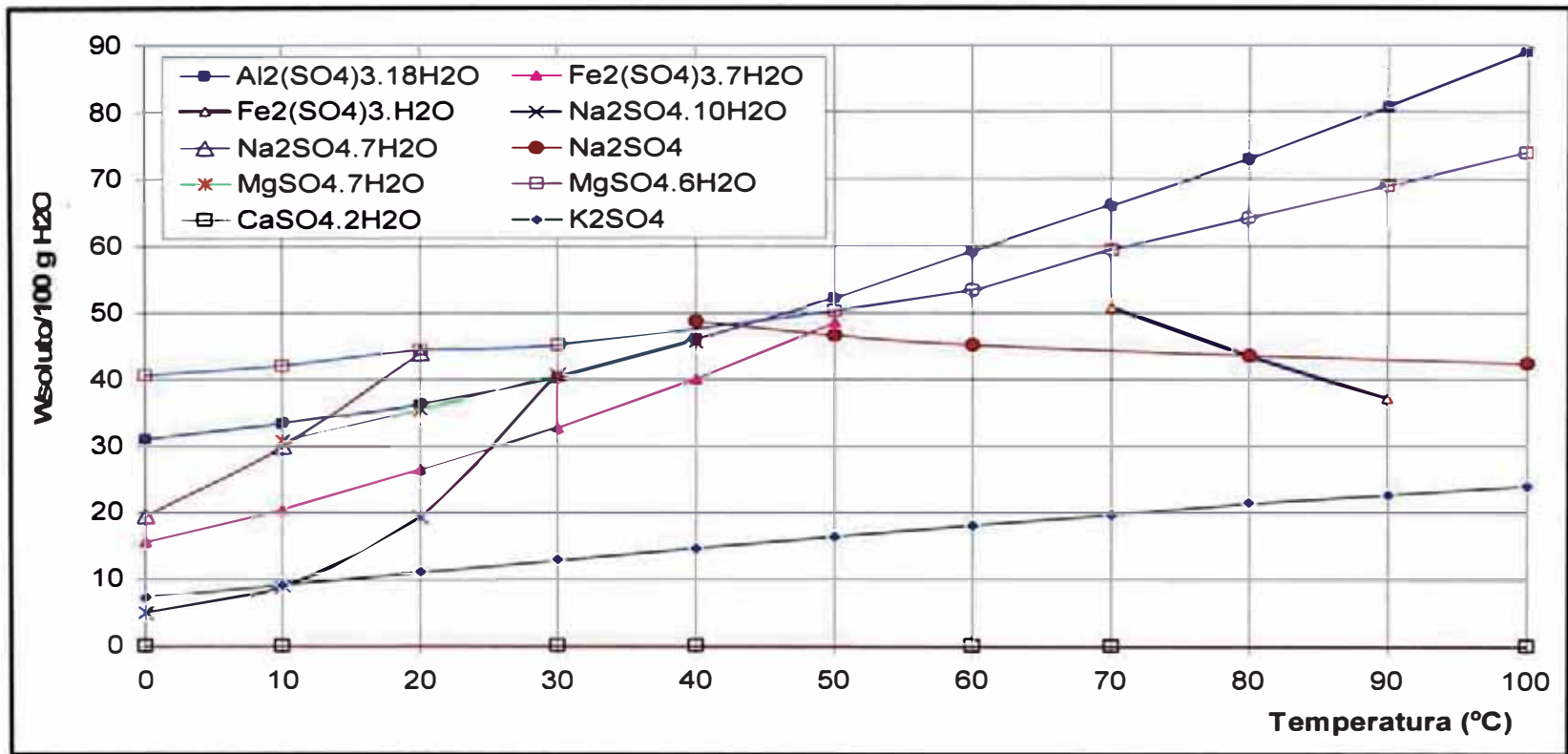


Figura 5.9: Medición del pH de la solución lixiviada.



Figura 5.10: Solubilidad de diversos sulfatos en agua.



Fuente: "Manual del Ingeniero Químico" Robert Perry



El tiempo óptimo evaluado de lixiviación, es de 30 minutos. En el gráfico de solubilidad de los sulfatos a diferentes temperaturas (figura 5.10), es notorio que al mantener la lixiviación por un tiempo superior al óptimo, se obtiene como resultado la formación de los sulfatos de: hierro, magnesio, potasio, calcio, apreciándose por el cambio brusco de coloración (como se indica en la figura 5.11), lo cual nos indica que la solución está siendo contaminada por metales que interfieren en la formación del sulfato de aluminio, y esto daría por resultado, la obtención de una alúmina de muy baja calidad.

**Figura 5.11: Muestra contaminada con óxido de hierro.**



#### **5.4.2. Pre-calcinación:**

Teniendo establecido las variables independientes en el proceso de lixiviación, se procede a determinar, la temperatura de pre-calcinación, que hará óptima la extracción del óxido de aluminio. Para entender mejor, del porqué se desarrolla una pre-calcinación, se puede explicar lo siguiente:

A ciertas temperaturas, se logra el debilitamiento de los enlaces de los compuestos que conforman la arcilla. La bibliografía nos brinda los siguientes datos al respecto:

**Tabla 5.5: Efecto térmico sobre la caolinita pura.**

<b>Fase</b>	<b>Acción del calor</b>
<b>Fase de desecación</b>	Transcurre hasta unos 120 °C y supone la pérdida primero de agua de mojadura, externa, y del agua intersticial después.
<b>Fase de deshidratación</b>	Trascurre hasta unos 250 °C con la eliminación del agua de hidratación.
<b>Fase de descomposición</b>	Termina hacia los 700 °C por eliminación del agua de constitución. Primero la caolinita se transforma en meta caolín: $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , que ya no puede ser replastificado al ponerlo en contacto con el agua. La alúmina del meta caolín es extraíble por ácidos fuertes. A unos 900°C el meta caolín se disocia en $\text{SiO}_2$ y $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
<b>Fase de reacción</b>	Hasta los 1200°C reaccionan la sílice y la alúmina para dar sillimanita ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) en reacción exotérmica. Luego se forma mullita: $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ; la sílice sobrante está como cristobalita-beta. La alúmina ya no es extraíble por ácidos.

**Fuente: “Enciclopedia del Ingeniero Químico”, Robert Kirk**

#### **5.4.2.1. Evaluación del efecto de la temperatura:**

Para realizar la pre-calcinación de la arcilla se utilizó una mufla marca Barnstead Thermolyne modelo Furnace 47900, del Laboratorio de Investigación y Química Aplicada N°21.

**Figura 5.12: Mufla utilizada en la pre-calcinación de la arcilla.**



Se realizó pruebas de pre-calcinación de la arcilla para poder obtener el porcentaje de pérdida en peso.

**Tabla 5.6: Resultados de la pre-calcinación de la arcilla.**

T (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	%Pérdida de peso
750	20	60	52,7	12,17
750	20	60	52,6	12,33
750	20	240	211,1	12,04
% Promedio				12,18

Por lo tanto, la pérdida en peso luego de la pre-calcinación es 12%.

La temperatura base a pre-calcinar es tomada de bibliografía, siendo la temperatura encontrada de 700 °C.

#### **5.4.2.1.1. Evaluación de las variables:**

##### **a) Variable dependiente:**

Son las variables que se analizan sus cambios, para ello utilizaremos las variables independientes, esto significa que las variaciones en la variable independiente repercutirán en variaciones en la variable dependiente.

Para determinar el tamaño de la partícula que hace posible que la extracción del óxido de aluminio sea máximo, se establecerá una variable

dependiente (tiempo y la temperatura de pre calcinación) de otra que será fijada como independiente.

**b) Variables independientes:**

Como variable independiente se tomará la densidad del sulfato de aluminio, y como se mencionó antes se toma como variables independientes el **tiempo y la temperatura de pre calcinación.**

**b.1) Tiempo óptimo de pre-calcinación:**

**Procedimiento:**

Se cogen 10 g de la arcilla tomando como base una temperatura constante de 700 °C, para cada prueba, de un total de 5 pruebas, para determinar el óptimo. La arcilla pesada que se encuentra en un crisol, es introducida en la mufla, a la temperatura mencionada por una hora (base de acuerdo a la bibliografía). Después de transcurrido el tiempo, se retira el crisol y se deja enfriar a temperatura ambiente. Luego se determina la densidad mediante el método utilizado en la parte de la lixiviación.

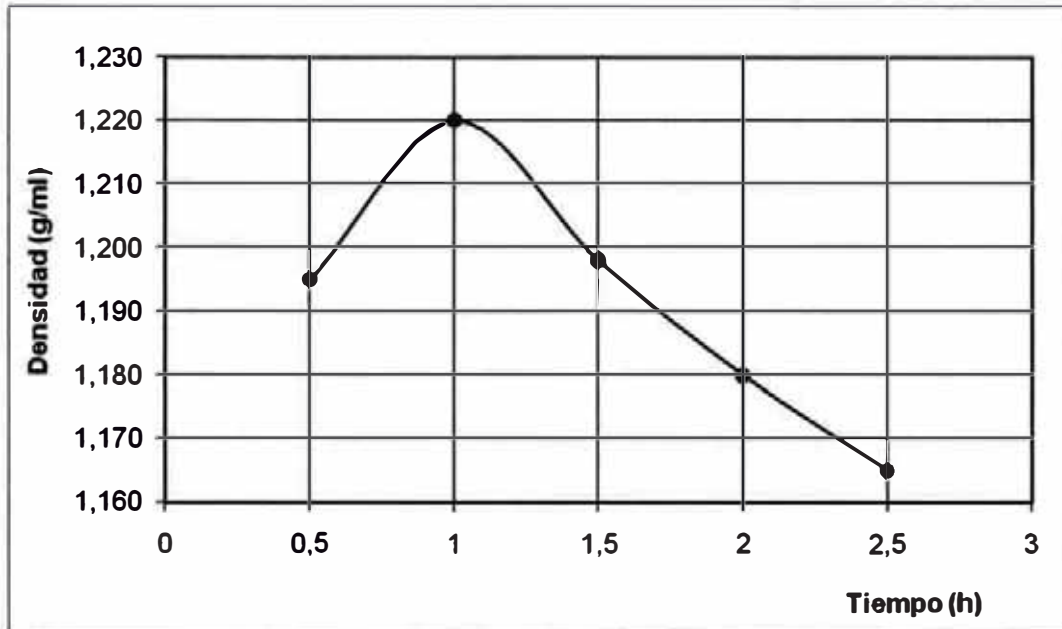
Este procedimiento se desarrolla para cada prueba, variando el tiempo cada 30 minutos y manteniendo constante la temperatura seleccionada y el peso de la muestra.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

**Tabla 5.7: Tiempo óptimo de pre-calcinación:**

<b>Tiempo (h) de pre-calcinación</b>	<b>Densidad (g/ml) del sulfato de aluminio</b>
0,5	1,195
1,0	1,220
1,5	1,198
2,0	1,180
2,5	1,165

**Figura 5.13: Tiempo óptimo de pre-calcinación:**

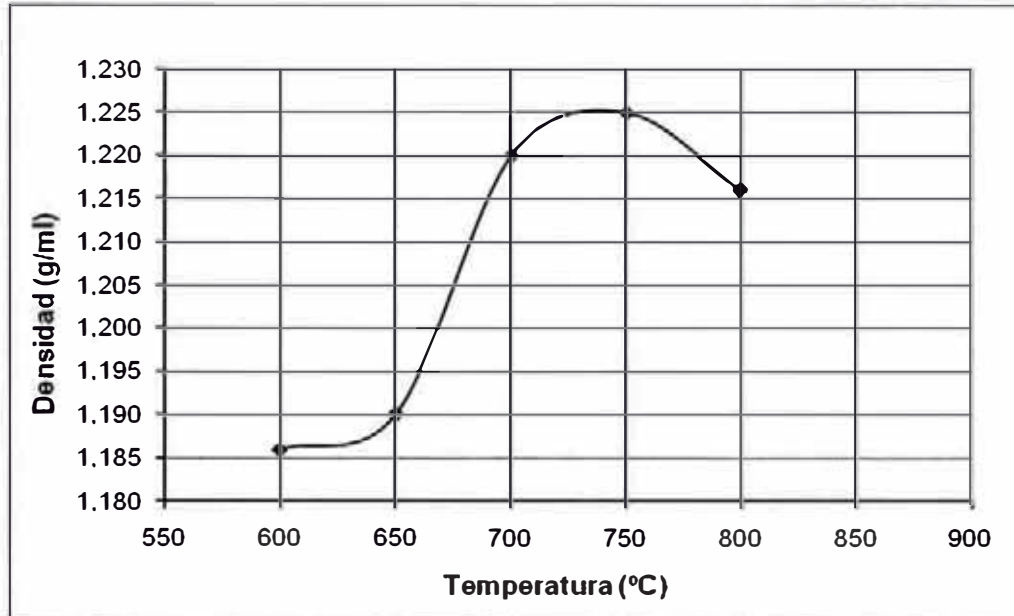


**b.2) Temperatura óptima de pre-calcinación:**

Del mismo modo, se toman 10 g de muestra y se somete a pre-calcinación por el tiempo óptimo encontrado en la experiencia precedente, con el fin de hallar la temperatura óptima para la extracción de mayor cantidad de óxido de aluminio, los resultados son los siguientes:

**Tabla 5.8: Temperatura óptima de pre-calcinación.**

Temperatura de pre-calcinación (°C)	Densidad (g/ml) del sulfato de aluminio formado
600	1,186
650	1,190
700	1,220
750	1,225
800	1,216

**Figura 5.14: Temperatura óptima de pre-calcinación**

De ambos análisis, se puede concluir que el tiempo óptimo de pre calcinación es 1 hora y la temperatura de pre calcinación óptima es de 750 °C.

#### 5.4.3 Molienda:

El menor tamaño de partícula proporciona mayor área de contacto entre sólido y líquido (necesaria para la lixiviación).

La molienda es realizada en el laboratorio 21A, donde se escoge el pasante de malla 100 Tyler estándar para realizar la evaluación de los demás procesos.

**Figura 5.14: Tamizado de la arcilla.**

#### 5.4.3.1. Evaluación del tamaño de partícula:

Establecido la temperatura óptima y tiempo óptimo de pre-calcinacion, procedemos a encontrar el tamaño de grano óptimo para el proceso.

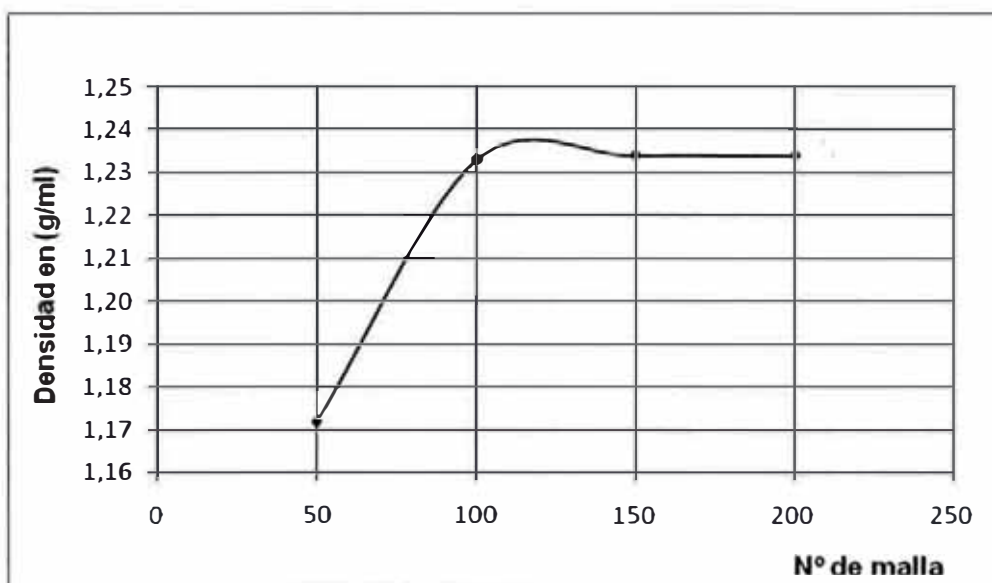
Para esto, se toman 10 g. de muestra de un total de 5 seleccionados para la prueba, quienes son sometidos a las variables óptimas encontradas, con el fin de determinar el tamaño de grano.

Se muestran los siguientes resultados:

**Tabla 5.9: Tamaño óptimo de grano:**

Nº de malla	Densidad en (g/ml) del sulfato de aluminio formado
+50	1,172
+100	1,233
+150	1,234
+200	1,234

**Figura 5.15: Tamaño óptimo de grano.**



#### 5.4.4. Filtración:

Al nivel laboratorio, la filtración se realiza con papel filtro estándar. Se obtuvo un líquido (sulfatos) de color verde claro cristalino, de consistencia viscosa, se midió su densidad, viscosidad y pH a la temperatura ambiente (19 °C).

El sólido (con alto contenido de sílice) que se obtiene se separa, de ahora en adelante solo se trabaja con el líquido filtrado.

**Tabla 5.10: Medida de propiedades del líquido filtrado.**

Densidad (g/ml)	Viscosidad (Kg/m.s)	pH
1,238	0,0079	3,0

##### 5.4.4.1. Formación de precipitado (Cristales de alumbre):

A la solución obtenida en la lixiviación se le añade hidróxido de amonio en forma lenta con una agitación constante de 60 RPM; la cantidad a añadir es la estequiométrica. Como se trabaja con 5 g de arcilla pre-calcinada se añade aproximadamente 2,54 ml de hidróxido de amonio al 30%.

Se observa la formación de un precipitado color blanco. El proceso termina antes que la solución se torne amarillenta (donde empieza a precipitar el óxido de hierro III). Al analizar mediante Difracción de Rayos X el precipitado obtenido, se tiene como resultado el sulfato doble de aluminio y amonio. En la figura 5.17, se muestra el difractograma obtenido.

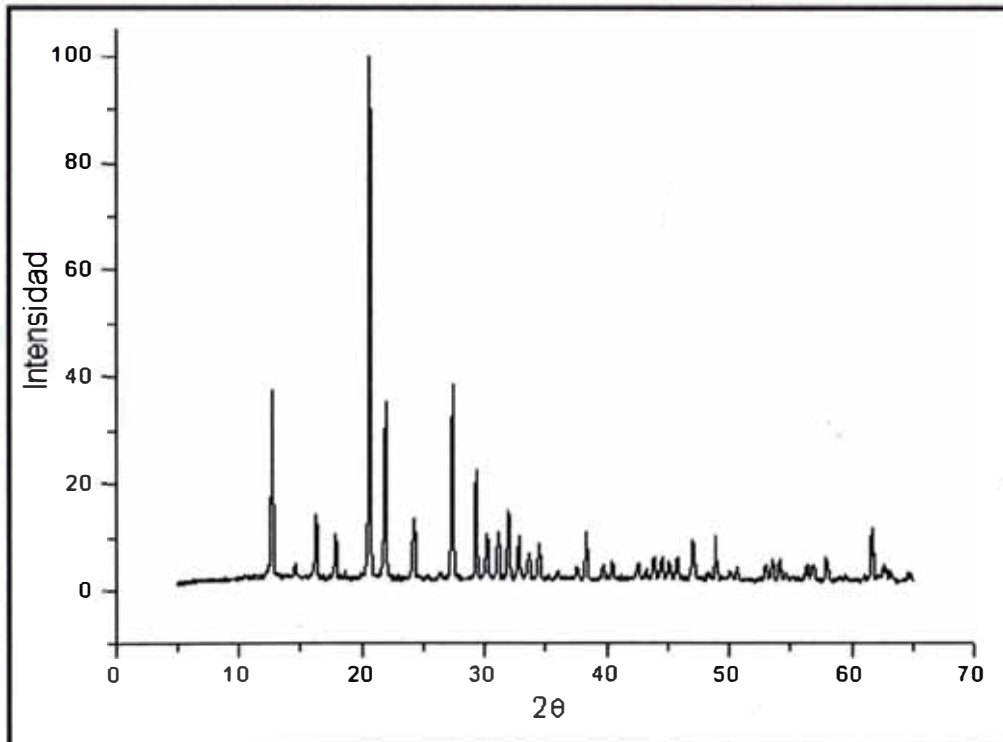
Con el fin de analizar el difractograma obtenido realizamos el mismo procedimiento de la parte de la caracterización de la materia prima con el fin de determinar la naturaleza del precipitado formado, en la tabla 5.11, figura 5.18 y figura 5.19 se observa este análisis:



**Figura 5.16: Precipitado obtenido.**



**Figura 5.17: Difractograma del precipitado formado.**



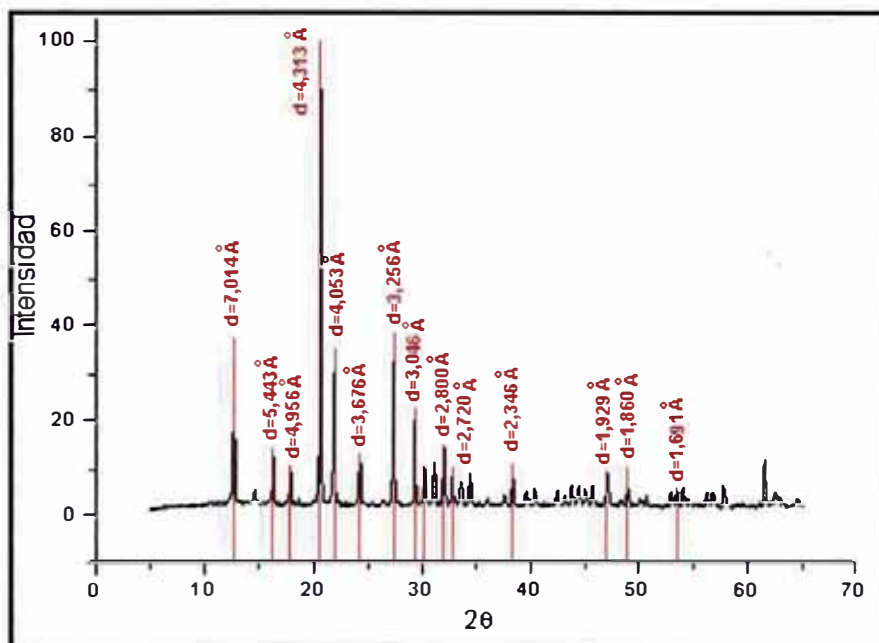
**Realizado en los Lab. UNMSM (Facultad de Ciencias Físicas 2008).**

**Tabla 5.11: Datos obtenidos con el programa Origin Lab 8.0 para el alambre**

$2\theta$	Intensidad	$d(\text{Å})$
12,622	37,357	7,014
16,287	13,834	5,443
17,900	10,604	4,956
<b>20,595</b>	<b>100,000</b>	<b>4,313</b>
21,935	35,302	4,053
24,217	13,377	3,676
27,398	38,401	3,256
29,323	22,512	3,046
31,961	14,878	2,800
32,931	10,147	2,720
38,379	10,734	2,356
47,122	9,410	1,929
48,982	9,853	1,860
54,253	5,742	1,691

Ubicando las intensidades con las respectivas longitudes de onda en el difractograma se obtiene:

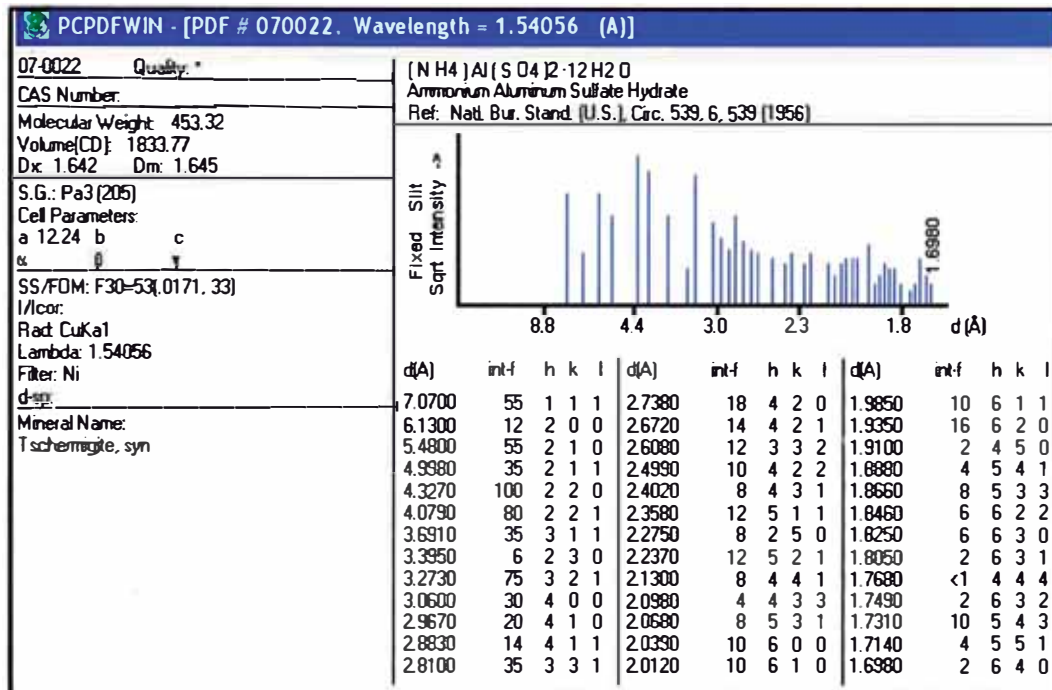
**Figura 5.18: Picos del difractograma del alambre obtenido.**



Comparando el difractograma donde se localizan los picos característicos figura 5.18, con el difractograma de la base de datos PCPDFWIN figura 5.19, se

observa claramente la coincidencia de la mayoría de ellos, que sin duda alguna resulta que se trata de la formación de la sal doble de aluminio y amonio.

**Figura 5.19: Picos característicos del alumbre de aluminio y amonio**



**Fuente: Programa PCPDFWIN (base de datos para la identificación de minerales por Difracción de Rayos X)**

Por lo expuesto, se puede afirmar que el precipitado es el sulfato doble de aluminio y amonio y son pequeños cristales de esta sal doble.

Acerca del PCPDFWIN se puede decir que es un programa que permite gestionar la base de datos Powder Diffraction File (PDF). En esta base de datos están recogidas las fichas que contienen la información sobre los diagramas de difracción en muestra policristalina de la mayor parte de los compuestos conocidos.

#### 5.4.4.2. Evaluación del porcentaje de sólidos obtenidos:

La cantidad de sólidos obtenidos (precipitado) son separados por decantación y secados a temperatura constante de 60°C un por espacio de 24 horas, hasta conseguir un peso constante.

**Tabla 5.12: Porcentaje en peso de extracción del precipitado.**

Peso (g)		% De extracción
Teórico	Experimental	
8,43	8,00	95

**5.4.4.3. Formación de precipitado de mayor tamaño:**

Al precipitado separado de la solución por decantación, se le adiciona agua caliente a una temperatura de 80°C; entonces, éste se solubiliza, luego se enfría la solución a temperatura ambiente y se observa la formación de precipitados de mayor tamaño. La cantidad de agua a añadir, está en relación de 1:1.

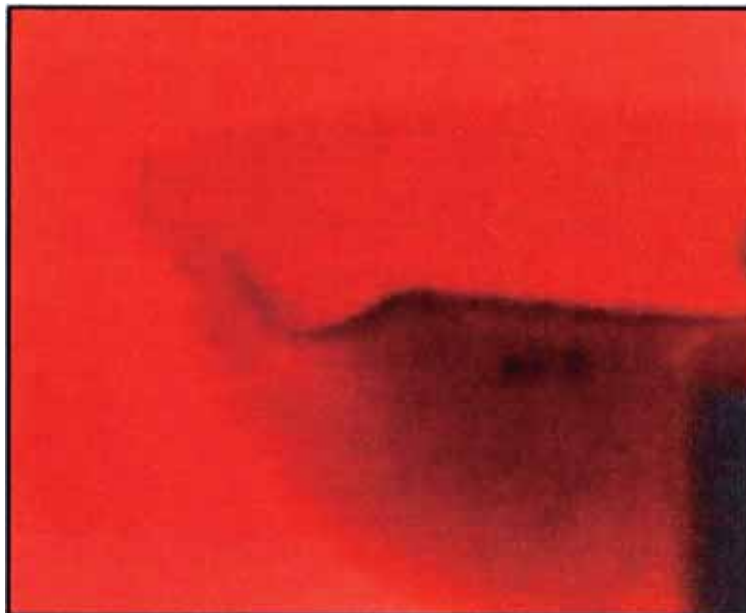
Cuando es enfriado a temperatura ambiente, el sólido es separado por decantación, dejando caer todo el líquido. Posteriormente, se realiza la etapa de calcinación del precipitado.

Cabe mencionar que no es de importancia el tamaño de la sal de alumbre, debido a que todo el sólido se calcina.

**Figura 5.20: Precipitado de mayor tamaño obtenido.****5.4.5. Calcinación**

El alumbre calcinado obtenido, es analizado mediante pruebas de Difracción de Rayos X, siendo este procedimiento el más adecuado, para verificar que los polvos blancos obtenidos, es realmente el óxido de aluminio que se requiere.

**Figura 5.21: Calcinación del precipitado.**



#### **5.4.5.1. Pérdida de peso y tiempo de calcinación:**

La temperatura y el tiempo de calcinación son tomados de bibliografía, siendo estos de 1000 °C y 2 horas respectivamente, como base para la determinación de los mismos, donde el proceso se hace óptimo.

El porcentaje de pérdida de peso se calcula al final, los resultados se muestran en la tabla 5.15.

#### **5.4.5.1.1. Determinación de los parámetros óptimos para la obtención del óxido de aluminio:**

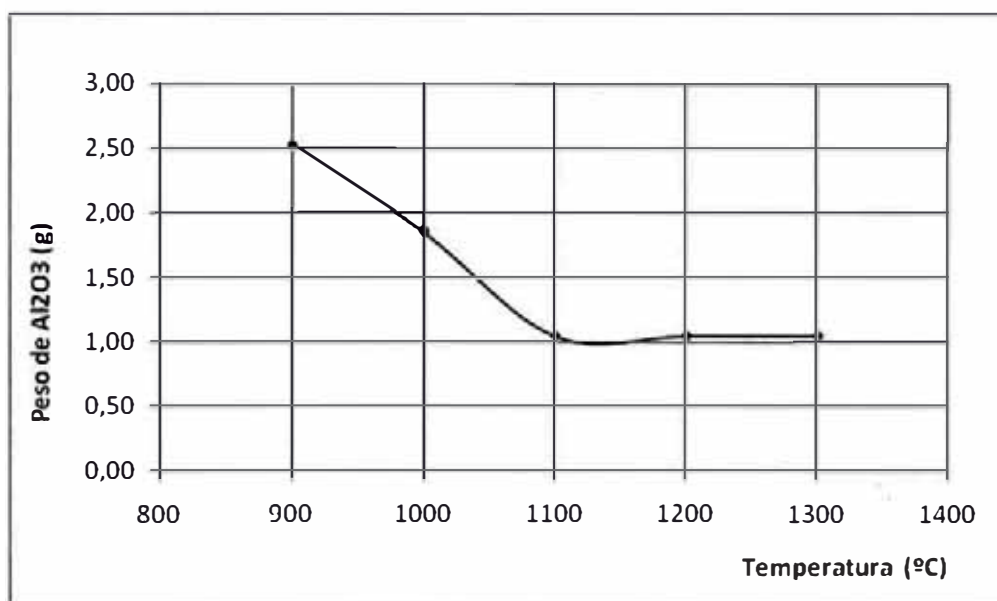
Se determinan las siguientes variables:

##### **a) Temperatura óptima de calcinación:**

Se toma 5 muestras de 8 gramos de alumbre, que serán sometidas a diferentes temperaturas de calcinación, manteniendo constante el tiempo (2 horas), para cada muestra. Del procedimiento dicho, se obtiene el siguiente cuadro como resultado:

**Tabla 5.13: Temperatura óptima de calcinación.**

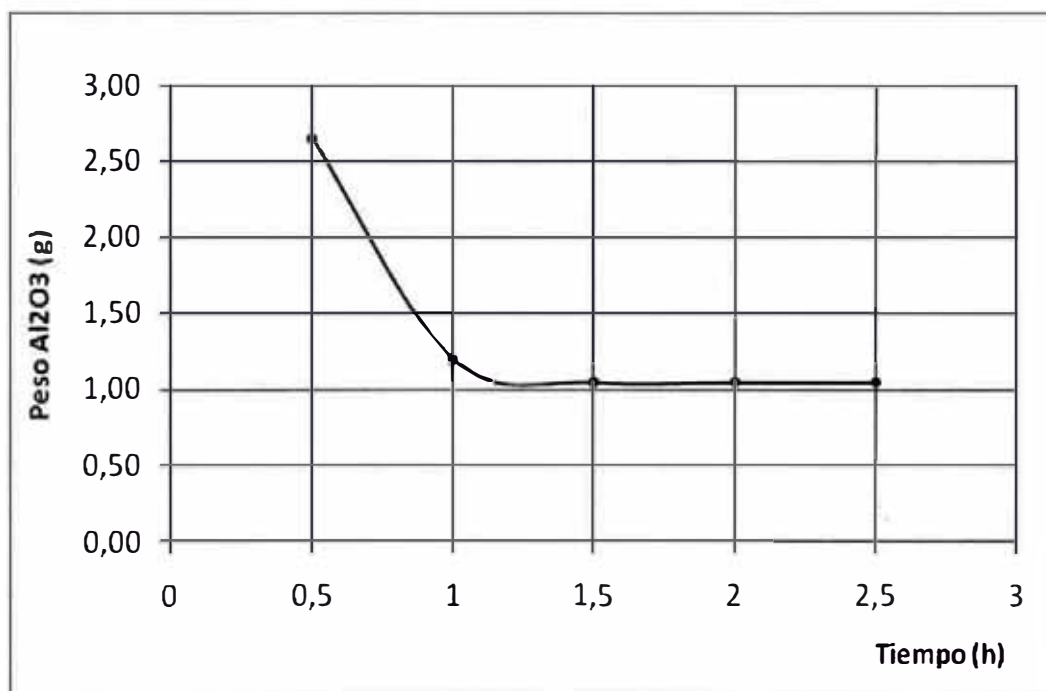
Temperatura de calcinación T (°C)	Peso final Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)
900	2,530
1000	1,853
1100	1,052
1200	1,052
1300	1,052

**Figura 5.22: Temperatura óptima de calcinación.****b) Tiempo óptimo de calcinación:**

De igual manera, se toman 5 muestras de 8 g. de alumbre, que serán calcinadas a diferentes tiempos, manteniendo constante la temperatura optima hallada. Del proceso se obtiene como resultado, el siguiente cuadro:

**Tabla 5.14: Tiempo óptimo de calcinación:**

Tiempo de calcinación (h)	Peso final $\text{Al}_2\text{O}_3$ (g)
0,5	2,652
1,0	1,195
1,5	1,052
2,0	1,052
2,5	1,052

**Figura 5.23: Tiempo optimo de calcinación.**

Con los resultados obtenidos, se desarrolla el siguiente cuadro de las variables optimas que hacen el proceso sea el mejor.

**c) Resumen de los parámetros óptimos:**

**Tabla 5.15: Resumen**

T (°C)	t (h)	Peso inicial (g) Sal de alumbre	Peso final (g) Oxido de aluminio	%
1100	1,5	8	1,052	88,48

**¿Cómo saber si el uso de la densidad como variable dependiente es lo correcto para el proceso desarrollado?**

Esta pregunta se podrá responder de acuerdo a la siguiente explicación:

Se determina cada uno de estos parámetros que hacen optimo extraer el óxido de aluminio, únicamente tomando como base o variable dependiente, la densidad del sulfato obtenido en la lixiviación con ácido sulfúrico; pero, para comprobar que el procedimiento elegido es el adecuado, se procede a realizar el respectivo análisis mediante el método de absorción atómica al producto blanquecino obtenido de la calcinación de la sal de alumbre, resultando lo siguiente, de acuerdo a sus características que se presentan a continuación:

**5.5. Caracterización del producto:**

Las características del producto obtenido en la calcinación son:

- Color blanco.
- Forma de polvo fino.
- Soporta altas temperaturas.
- Es más denso que el agua e insoluble en esta.
- Es bastante resistente al ataque químico por ácidos o bases.

Los cuales fueron analizados por Difracción de Rayos X y por Absorción Atómica.

**5.5.1. Primer método - análisis por Difracción de Rayos X:**

La muestra obtenida, es analizada en un equipo de Difracción de Rayos X, en los laboratorios de la Facultad de ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, donde se tiene por resultado el difractograma mostrado en la figura (5.24), como antes se realizó para el análisis de la muestra y para el

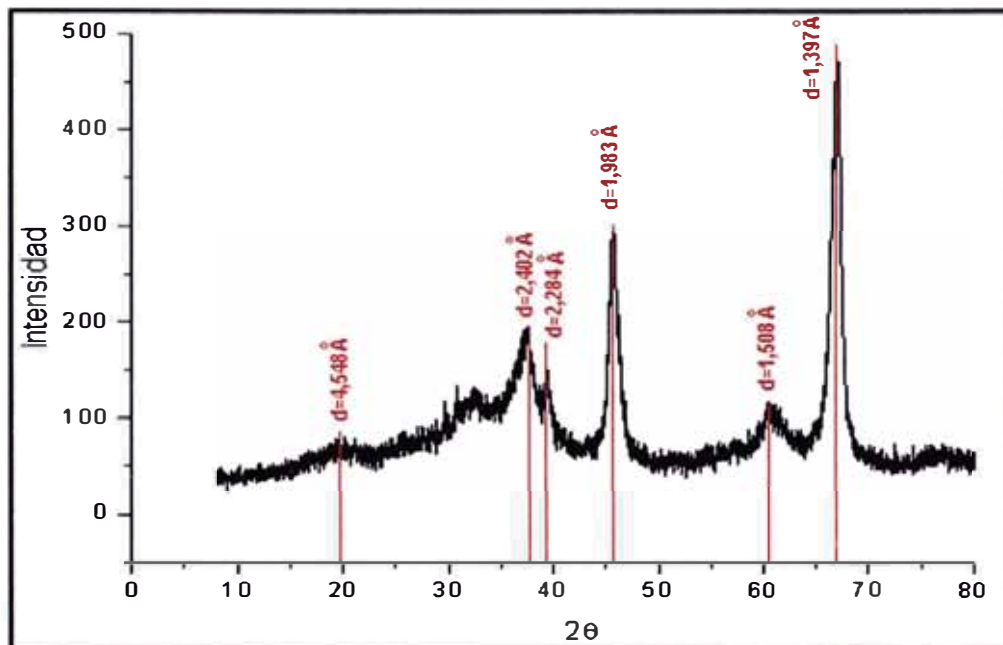


precipitado también se realiza el análisis de los picos característicos del difractograma y esto se observa en la figura 5.24 y figura 5.25 donde se compara los picos característicos del difractograma obtenido con el de la base de datos PCPFDWIN para el óxido de aluminio y resultando que coinciden y por tanto el polvo blanco obtenido es óxido de aluminio (figura 5.27).

**Tabla 5.16: Datos obtenidos con el programa Origin Lab 8.0 para la alúmina obtenida.**

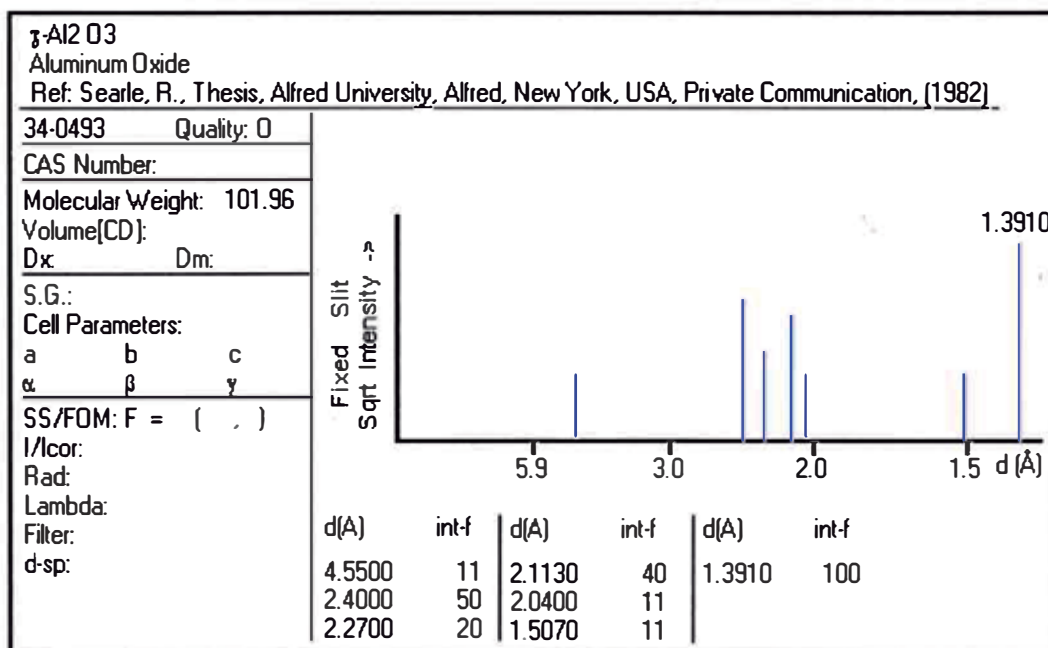
<b>2θ</b>	<b>Intensidad</b>	<b>d(Å)</b>
19,480	13,292	4,557
<b>19,520</b>	<b>15,133</b>	<b>4,548</b>
19,560	14,213	4,539
<b>37,441</b>	<b>39,366</b>	<b>2,402</b>
39,441	30,470	2,285
<b>39,461</b>	<b>36,503</b>	<b>2,284</b>
39,501	30,573	2,282
<b>42,241</b>	<b>15,951</b>	<b>2,140</b>
42,281	13,395	2,138
<b>45,761</b>	<b>61,452</b>	<b>1,983</b>
61,461	17,178	1,509
<b>61,501</b>	<b>21,575</b>	<b>1,508</b>
61,541	19,121	1,507
<b>67,021</b>	<b>100,000</b>	<b>1,397</b>
67,081	90,695	1,395

Figura 5.24: Picos del difractograma de la alúmina obtenida.



Realizado en los Lab. UNMSM (Facultad de Ciencias Físicas 2008).

Figura 5.25: Difractograma de una alúmina gamma típica.



Fuente: PCPDFWIN

### 5.5.2. Segundo método - análisis por Absorción Atómica:

Para saber la pureza del óxido de aluminio obtenido otra parte de la misma muestra es analizada mediante Absorción Atómica, del cual se obtiene el siguiente resultado:

**Tabla 5.17: Resultado del análisis de absorción atómica del producto.**




Elemento	% en peso
Al	50,89
Fe	0,36
Si	0,11

De este recuadro se puede observar sin duda alguna, que el producto final, es realmente el óxido de aluminio, por la presencia del aluminio en mayor porcentaje y solo pequeñísimas cantidades de hierro y silicio.

Al comparar ambos difractogramas de acuerdo a los datos del programa Origen Lab 8.0 y el resultado proveniente de los análisis de absorción atómica, se llega a la conclusión que el producto **obtenido es el óxido de aluminio**.

En la figura 5.26 se puede observar el resultado del análisis por absorción atómica realizada en los laboratorios de la UNMSM en la Facultad de Ingeniería Química.

Figura 5.26: Resultados por Análisis de Absorción Atómica.

	<p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA UNIDAD DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS</p>										
<p><b>INFORME DE ENSAYO</b> N° 341-08</p>											
<p>Cliente Dirección Atención Referencia USAQ Muestras Cotización Fecha de Recepción Fecha de Emisión</p>	<p>⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮</p>	<p><b>HAROLD HIDALGO MEDRANO</b> Jr. Sechin Mz. B Lt. 9 Portada del Sol – La Molina Sr. Jorge Vicuña Simón 216-01 OXIDO DE ALUMINIO 240-2008/USAQ 01/07/08 11/07/08</p>									
<p><b>RESULTADO DE ANÁLISIS DE OXIDO DE ALUMINIO</b></p>											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Código USAQ.</th> <th>Código Cliente</th> <th>Determinaciones</th> <th>Resultados (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>216-01</td> <td>OXIDO DE ALUMINIO</td> <td>Aluminio Hierro Silicio</td> <td>50,89 0,36 0,11</td> </tr> </tbody> </table>	Código USAQ.	Código Cliente	Determinaciones	Resultados (%)	216-01	OXIDO DE ALUMINIO	Aluminio Hierro Silicio	50,89 0,36 0,11			
Código USAQ.	Código Cliente	Determinaciones	Resultados (%)								
216-01	OXIDO DE ALUMINIO	Aluminio Hierro Silicio	50,89 0,36 0,11								
<p>Muestra proporcionada por el cliente</p>											
<p>Métodos: Metales FAAS: USAQ-ME-04. Determinación de metales por Absorción Atómica. Silice (Gravim.) APHA 4500-Si C</p>											
 <p><i>Atta</i> <b>Quim. María Angélica Rodríguez Best</b> Directora de la AQ CQP: 597</p>											
<p><b>Nota:</b> El presente informe sólo es válido en su estado original y se refiere únicamente a la muestra analizada, cualquier corrección o enmienda en el contenido del presente informe lo anula automáticamente.</p>											
<p><b>Observación:</b> La muestra podrá ser devuelta dentro del plazo de 30 días calendario de recepción. Sin embargo cualquier consulta de resultados podrá ser atendida dentro de los 15 días calendario de emitido el Informe de Ensayo, dado el tiempo indicado no se aceptarán reclamos.</p>											
<p>IE-341-08 (Página 1 de 1)</p>											
<p>Av. Venezuela cdra. 34 - Ciudad Universitaria - Pabellón B Química. Central Telefónica: 619-7000 anexo 1203, Fax 1218 E-mail: usaq@unmsm.edu.pe</p>											

**Figura 5.27: Producto obtenido después de la calcinación.**



Como es mostrado en los resultados de la tabla (5.17), el único elemento encontrado en mayor cantidad es el aluminio, y solamente mostrándose trazas de fierro y silicio, lo cual da con total firmeza, que el procedimiento es el apropiado para este tipo de investigación, demostrándose una nueva metodología tomando como recurso de investigación la **densidad**, lo cual es utilizado en otros procesos dentro de la industria manufacturera.

De acuerdo a los valores mostrados en la tabla 5.17, se procede a calcular al porcentaje real del óxido de aluminio obtenido, resultando:

**Tabla 5.18: Comparación del peso real con el peso formula de los elementos analizados.**

<b>Pesos</b>	<b>Aluminio</b>	<b>Silicio</b>	<b>Hierro</b>
<b>Peso atómico</b>	27	28,1	55,85
<b>%W (real)</b>	50,89	0,11	0,36
<b>%W (formula)</b>	52,94	46,76	53,78

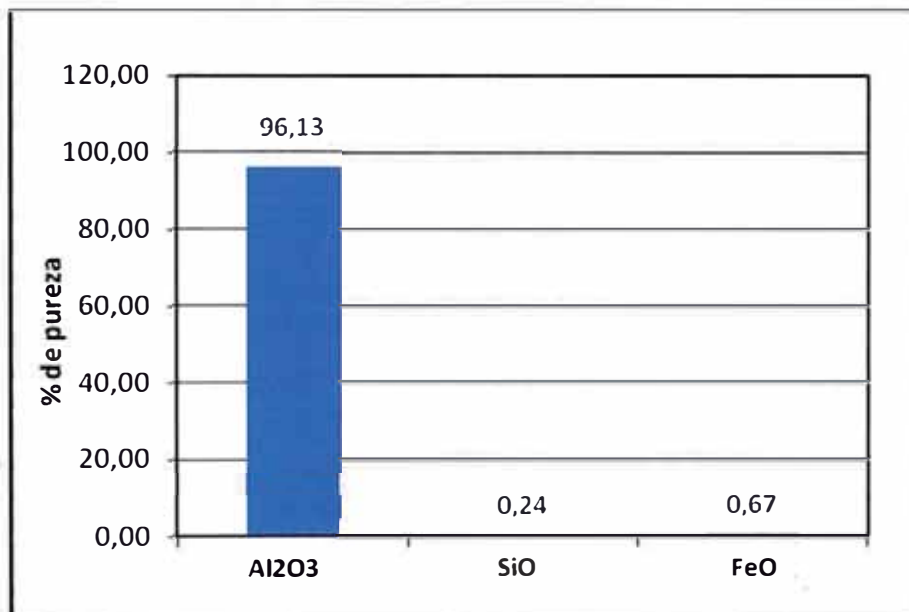
Con estos datos, se procede a calcular el porcentaje de extracción del óxido de aluminio que se extrajo con este proceso.

Por tratarse de un cálculo matemático, se muestra el resumen de los valores obtenidos en la siguiente tabla:

**Tabla 5.19: Porcentaje de los óxidos obtenidos.**

Pesos	Oxido de Aluminio	Oxido de Silicio	Oxido de Hierro
Porcentaje (%)	96,13	0,24	0,67

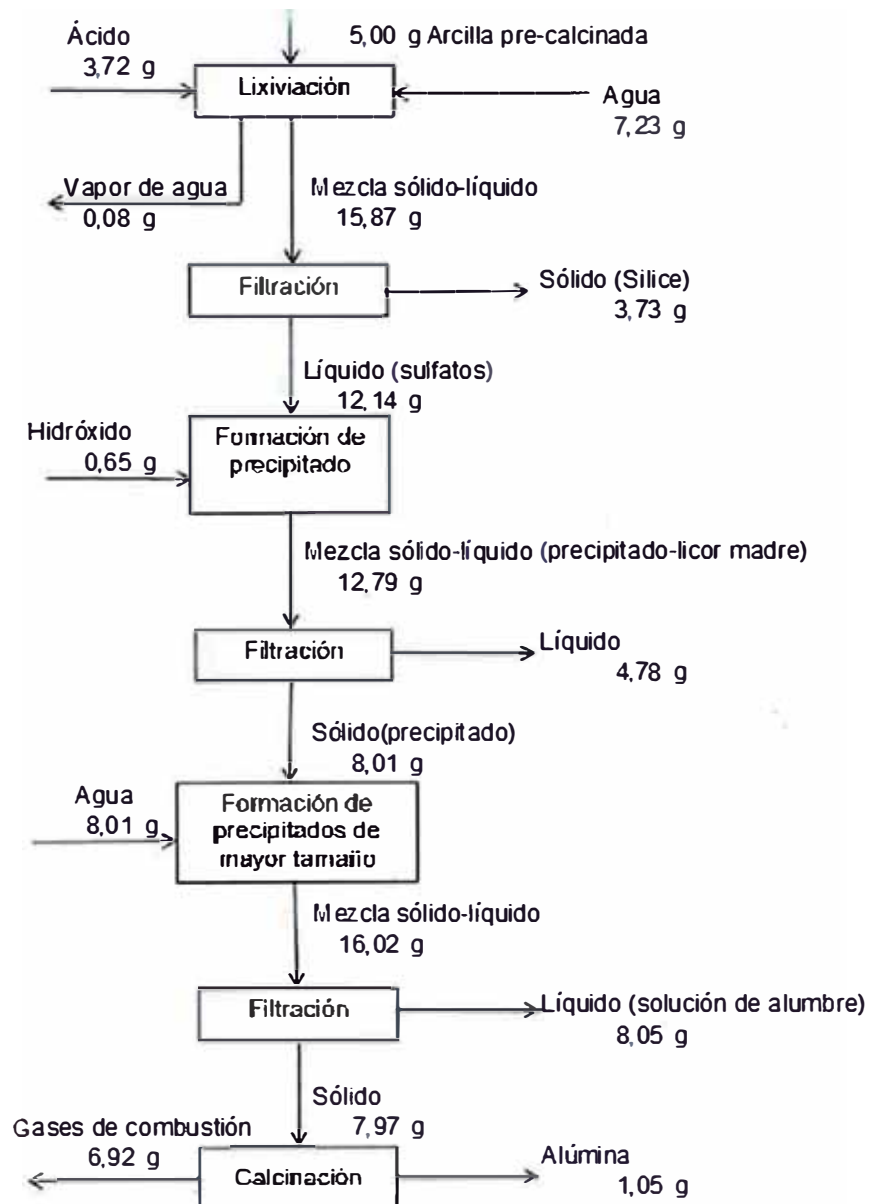
Como se puede observar en el cuadro mostrado, el porcentaje de pureza del óxido de aluminio obtenido es el que se muestra mayor en todos, pero si comparamos a través de un grafico por bloques, se aprecia lo siguiente:

**Figura 5.28: Porcentaje del óxido de aluminio obtenido.**

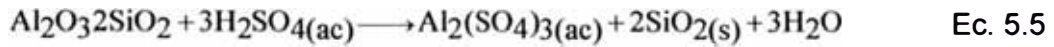
Como se puede apreciar, la barra con mayor tamaño nos muestra que se ha logrado obtener el óxido de aluminio con alta pureza, lo cual refleja un trabajo adecuado para este tipo de proceso, utilizando la densidad como variable dependiente que a un inicio fue elegido.

### 5.6. Cinética de reacción:

Figura 5.29: Balance de materia al nivel laboratorio.



De la siguiente reacción:



Por cada molécula de caolín, reaccionan tres moléculas de ácido sulfúrico para formar una molécula de sulfato de aluminio.

En este caso, de 5 g de arcilla pre-calcinado, el 56.36% es caolinita (obtenido del resultado del barrido por rayos x), por lo que de caolín tenemos 2,7 g, y dado a la estequiometria, para esta cantidad se necesita 3,47 g de ácido sulfúrico. Para la experiencia, se requerirá un exceso del 5% por lo que realmente necesitamos 3,65 g de ácido sulfúrico; pero esta cantidad se encuentra al 100% de pureza siendo necesario corregir este valor dividiéndolo entre 98% y de esta manera se obtiene 3,72 g de ácido sulfúrico.

La densidad del ácido sulfúrico al 98% en peso es 1,84 g/ml por lo que necesitamos 2 ml de ácido sulfúrico.

Se calcula cuánto de agua se necesita para diluir esta cantidad de ácido y llevarlo al 34% en peso de solución.

Al considerar 3,72 g como el 34% en peso del ácido sulfúrico y al realizar una operación por regla de tres con el objetivo de determinar el peso de ácido contenido en el 100% se obtiene que es 10,94 g del ácido. Se considera la densidad del agua 1 g/ml (por razones de cálculo será igual a su peso), y al realizar la diferencia del peso del ácido al 100% menos, el peso del mismo ácido al 34%, se obtiene que la cantidad de agua a añadir que es 7,22 ml o 7,22 g.

Con estos datos se calcula la densidad del ácido al 34%, y de acuerdo a la ecuación:

$$D_{\text{H}^+, 34\%} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{H}^+, 98\%}}{V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{H}^+, 98\%}} \quad \text{Ec. 5.6}$$

$$D_{\text{H}^+, 34\%} = \frac{7,42 + 3,82}{7,42 + 2} \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$D_{\text{H}^+, 34\%} = 1,18 \text{ g/ml}$$

Por lo tanto, la densidad inicial del ácido es 1,18 g/ml para un tiempo cero (cuando se inicie la reacción).



El valor obtenido se acerca al valor experimental calculado (1,178 g/ml) por lo que confirma la validez del procedimiento, lo cual es mostrado en el cuadro (5.20).

Las soluciones de sulfato se hacen reaccionar con el hidróxido de amonio del cual se obtiene los cristales de sulfato doble de aluminio y amonio (alumbre), que al ser calcinados resulta como producto el óxido de aluminio.

En el proceso de lixiviación, se toman muestras de 5 g de arcilla a diferentes tiempos, y con las soluciones obtenidas, resultan diferentes pesos de cristal del sulfato doble de aluminio y amonio (alumbre).

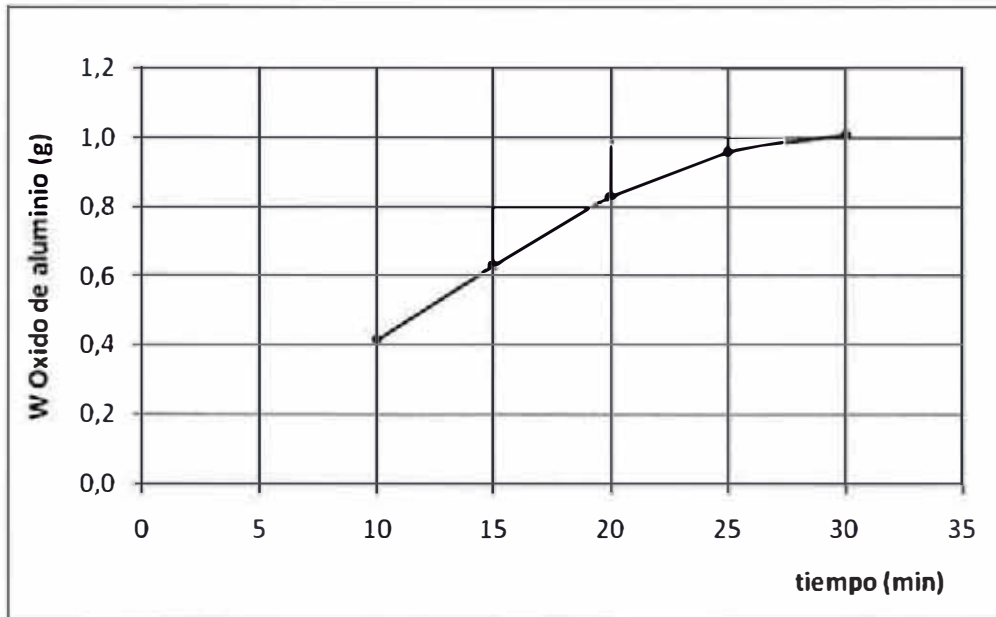
**Tabla 5.20: Tiempo de formación del cristal de alumbre y su peso**

Tiempo (min)	Peso del cristal
0	0,000
5	1,602
10	4,540
15	6,422
20	7,878
25	8,011
30	8,011

Calcinando los cristales se obtiene el peso de alúmina:

**Tabla 5.21: Peso del óxido de aluminio después de la calcinación.**

Tiempo (min) de lixiviación	W (g) de óxido de aluminio
10	0,418
15	0,633
20	0,831
25	0,959
30	1,011
35	contaminado
40	contaminado

**Figura 5.30: Peso de alúmina vs tiempo de calcinación.**

Porcentaje en peso comparado al peso real del óxido de aluminio que se encuentra contenido en la materia prima y que se logra extraer, es mostrado en el siguiente cuadro:

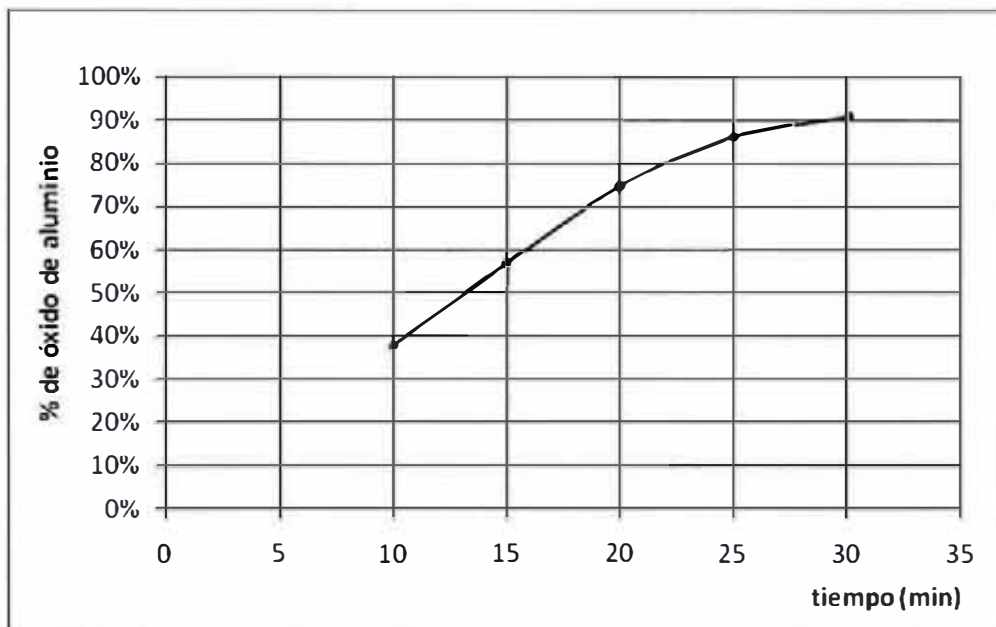
**Tabla 5.22: Porcentaje en peso del óxido de aluminio extraído.**

Tiempo (min) de lixiviación	%W de oxido de aluminio
10	37,563%
15	56,819%
20	74,693%
25	86,178%
30	90,838%
35	contaminado
40	contaminado

Para determinar la cinética de reacción del proceso de lixiviación, es importante tener en cuenta que necesariamente se requiere conocer los porcentajes en que se encuentran tanto las soluciones de los reactantes (ácido sulfúrico), como de los productos (sulfatos formados), con lo cual se determinará la concentración de consumo del ácido o la concentración de la sal formada, pero al no tener los datos exactos es imposible calcular la cinética de

reacción que gobierna el sistema. Por estudios realizados anteriormente en la obtención de la alúmina a partir de la arcilla, este tipo de investigación no escapó del tema, debido a que se logró determinar la velocidad de reacción. Uno de estos estudios fue llevado a cabo por los doctores S.F. Hulbert y D.E. Huff en su estudio publicado en el artículo denominado: Kinetics of reaction from alumina, el cual será tomado para el estudio presente y de acuerdo a cálculos y procedimientos previos adecuados, se determinará si esta ecuación es válida para la investigación.

**Figura 5.31: Porcentaje en peso de alúmina vs tiempo de calcinación.**



El procedimiento a utilizar es parecido al método diferencial para calcular el orden de reacción de la velocidad o cinética química, en donde si los resultados obtenidos luego de su evaluación tiende a la linealidad respecto a la velocidad de reacción a comparar, entonces se puede considerar que el procedimiento es válido para el proceso, o en caso contrario no resulte la linealidad de la función, se considera no adecuado. Por lo mencionado, se procede de la siguiente manera:

Las variables óptimas determinadas, como: la temperatura (T), tiempo (t), porcentaje de concentración de ácido (%); son las variables que hacen la extracción sea máxima, y esto está ligado directamente con su cinética. Estudios

realizados para obtener la cinética de reacción en la lixiviación del caolín con ácido sulfúrico demuestran que la velocidad con que ocurre la reacción sigue el siguiente modelo:

$$\text{Ln} \frac{1}{(1-X)} = k * t^m \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde:

X : conversión.

K : constante cinética.

m : parámetro del mecanismo de reacción.

t : tiempo de reacción (min).

Linealizando la ecuación de la siguiente forma:

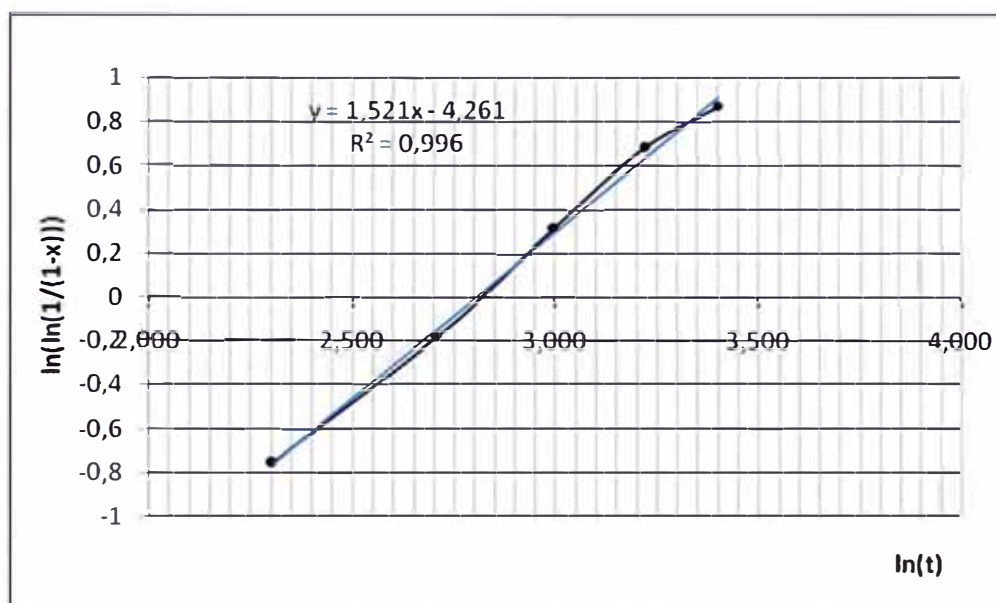
$$\text{LnLn} \frac{1}{(1-X)} = m * \text{Lnt} + \text{Lnk} \quad \text{Ec. 5.9}$$

Con los datos planteados se procede a graficar y se obtiene los valores de k y m, siendo:

**Tabla 5.23: Valores de linealización de acuerdo a la ecuación (5.9).**

t	ln(t)	x	ln(t)	ln(ln(1/(1-x)))
10	2,303	0,376	2,303	-0,753
15	2,708	0,568	2,708	-0,175
20	2,996	0,747	2,996	0,318
25	3,219	0,862	3,219	0,683
30	3,401	0,908	3,401	0,871

**Figura 5.32: Ecuación de la recta.**



De la linealización se obtiene:

$$m = 1,5204$$

$$k = 0,0827$$

$$r = 0,9968$$

Como se muestra mediante este procedimiento, los datos óptimos del peso de óxido de aluminio obtenido, mostrados en la tabla (5.23), y al ser graficados los valores de la tabla 5.32, teniendo como abscisa el  $\ln(t)$  y como ordenada  $\ln(\ln(1/(1-x)))$ , de acuerdo a la ecuación (5.9), se puede observar que tiende a una linealidad, con lo cual se demostraría que los resultados se ajustan al modelo citado, y considerándose este modelo como la velocidad de reacción para el proceso de lixiviación.

### 5.7. Prueba banco:

Se realiza este tipo de prueba, utilizando los valores óptimos encontrados en la parte experimental a nivel laboratorio, con el objetivo que las variables fijadas cumplan con el proceso, cuando se trabaja con una mayor cantidad de materia prima e insumos químicos.

Este tipo de prueba, se realiza construyendo un equipo que contara de los siguientes materiales:

- Un balón pírex de un litro de capacidad.
- Dos condensadores de vidrio con sus respectivas mangueras para el agua de enfriamiento.
- Termómetro con medida de 150°C máximo.
- Un sistema de calentamiento.
- Un soporte universal.

#### **Procedimiento I:**

Primeramente se toma el soporte universal, donde se acoplan aros y pinzas metálicas, que soportaran tanto el condensador y el balón de fondo redondo (figura 5.33).

El sistema de calentamiento estará formado por un recipiente que contendrá aceite comestible, que es calentada por un mechero, ubicado en la parte baja de dicho material y se mantendrá controlada la temperatura mediante un termómetro, con el objetivo que se mantenerla fija o contante durante el tiempo optimo determinado en la prueba a nivel laboratorio.

La cantidad de insumos a utilizar son los siguientes:

- 120 g de arcilla pre-calcinada a 750 °C.
- 90 g de ácido sulfúrico al 98% de concentración.
- 174 g de agua des ionizada para dilución del ácido al 34% en peso.
- 15,6 g de hidróxido de amonio.

#### **Procedimiento II:**

Los 120 g. de arcilla pre calcinada, es mezclada con acido sulfúrico al 34% en el balón de fondo redondo de 1 litro de capacidad y sometida a calentamiento a temperatura constante con reflujo a 104 °C, por unos 20 minutos hasta que la densidad sea de 1,236 g/ml, y la solución se torne de una coloración verde cristalina.

La solución (sulfato de aluminio), es separada de la arcilla lixiviada, mediante filtración.

A dicha solución, se hace reaccionar con el hidróxido de amonio 15 N, donde se observa la formación de pequeños granos de solido blanco, la cual representa a la sal doble de aluminio y amonio (alumbre).

Los sólidos formados, son separados del licor mediante una segunda filtración.

Finalmente, los cristales formados, son calcinados en una mufla a la temperatura de 1100 °C por un lapso de 2 horas, obteniéndose de esta manera el óxido de aluminio.

Del proceso mencionado se obtiene como resultado:

- 237 ml de solución de sulfatos con una densidad de 1,236 g/ml.
- 89.6 g de sólido (sílice).
- 193 g de alumbre de aluminio y amonio (después de la reacción de la solución de sulfatos con el hidróxido de amonio).
- 177 g de precipitado de alumbre de aluminio y amonio de mayor tamaño.
- 21 g de óxido de aluminio en su fase gamma (después de calcinar el alumbre).

En las figuras que se muestran a continuación se observa el equipo utilizado en la prueba.

**Figura 5.33: Diseño a reflujo del proceso de lixiviación.**



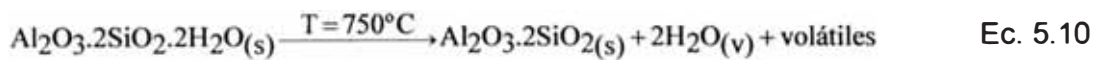
**Figura 5.34: Sulfato hidratado de aluminio y amonio obtenido en la prueba banco.**



En la figura 5.35 se puede observar el balance de materia hecho para el nivel banco y a continuación se muestra las principales reacciones involucradas en cada etapa del proceso:

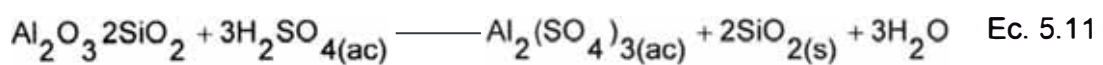
**A) Pre-calcinación:**

La caolinita se transforma en meta caolín, la alúmina es atacable por los ácidos.



**B) Lixiviación:**

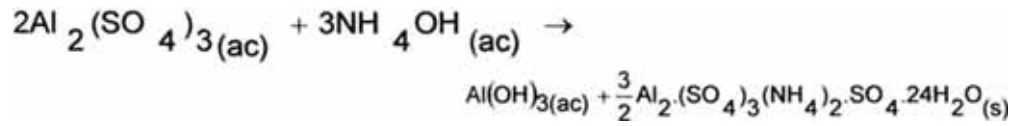
El ácido sulfúrico ataca la alúmina y se forma el sulfato de aluminio.





**C) Formación de precipitado:**

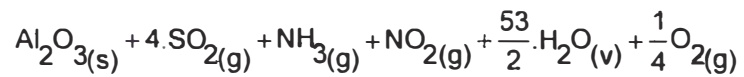
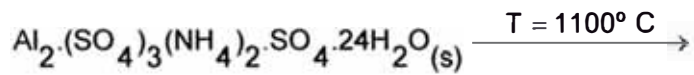
El sulfato de aluminio con el hidróxido de amonio forma una sal doble de aluminio y amonio conocido como alumbre.



Ec. (5.12)

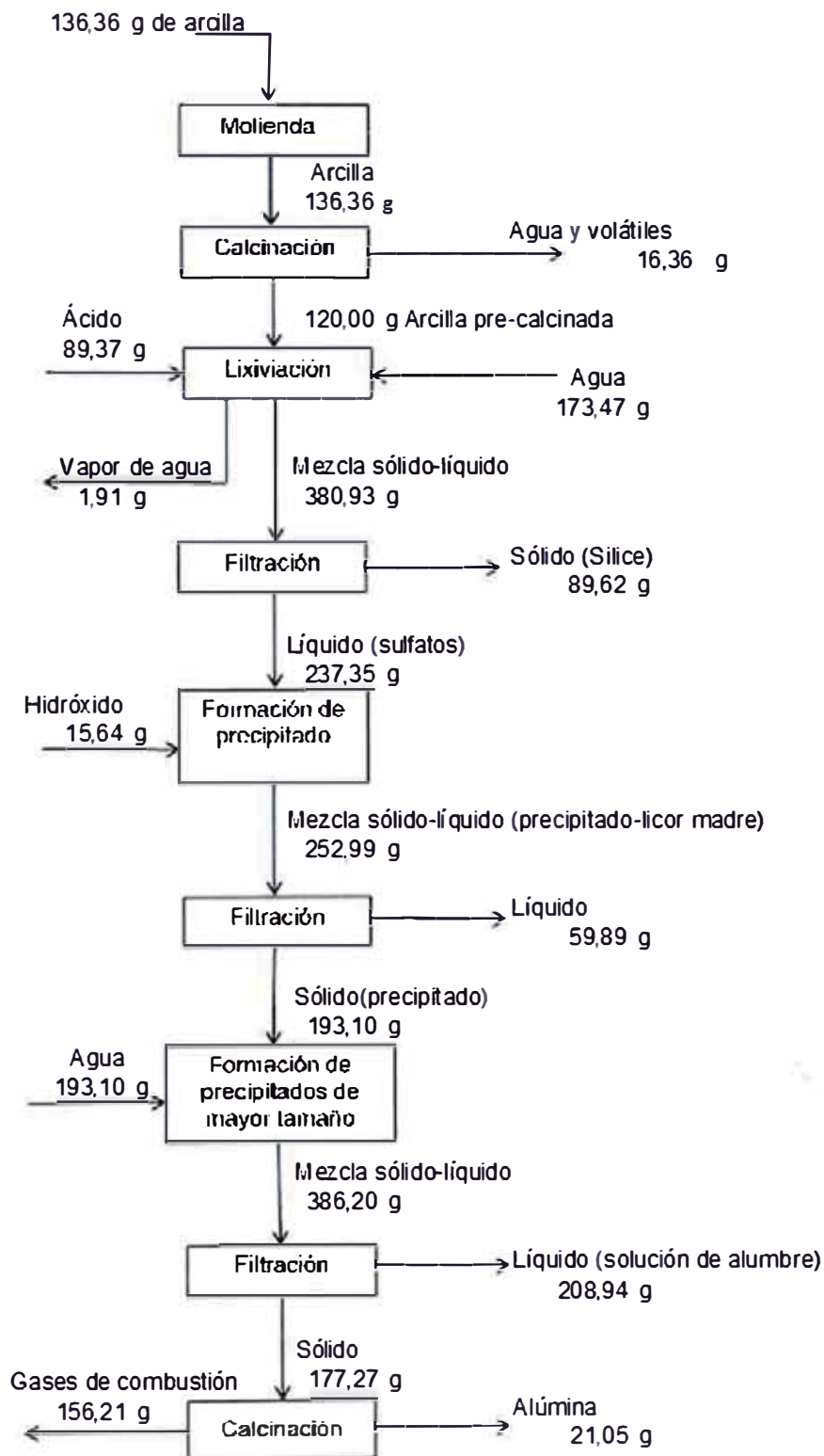
**D) Calcinación:**

El alumbre al ser calcinado se transforma en alúmina.



Ec. 5.13

Figura 5.35: Diagrama de bloques del resultado final de la prueba banco.



**Discusión de Resultados:**

De las ecuaciones químicas establecidas para el proceso, se establece el diagrama final, donde se obtienen resultados teóricos, los cuales al ser comparados con los obtenidos en la parte experimental, se refleja una ligera variación en cada uno de los procesos.

Los resultados que se obtienen al nivel banco, en líneas generales se acercan a lo obtenido al nivel laboratorio, sin embargo el sistema se hace más difícil de controlar por ejemplo en mantener la temperatura en el valor óptimo calculado en el laboratorio (el control de procesos por instrumentación ayudará en sobremanera al nivel industrial).

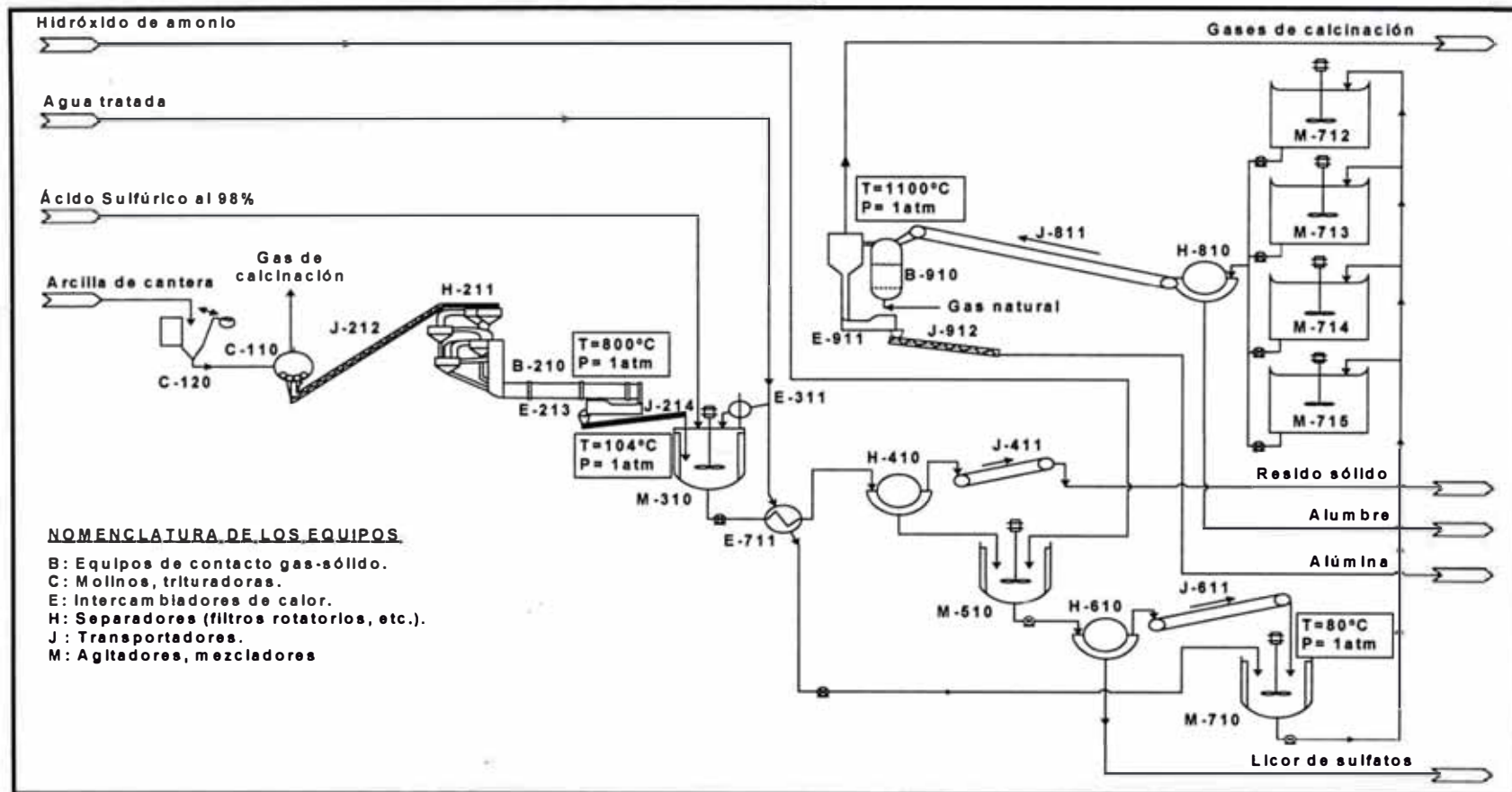
Sin embargo a pesar de incrementar el volumen de producción, las variables tanto dependientes como independientes establecidas, son los adecuados y no varían si la cantidad de materia prima a utilizar, se incrementa.

Por cada kilo de arcilla cruda se obtiene 154 g de alúmina, se obtiene alúmina más pura cuando se cristaliza por segunda vez obteniéndose cristales de mayor tamaño.

## 6. DESARROLLO DEL PROCESO AL NIVEL INDUSTRIAL.

### 6.1. Diagrama de flujo del proceso:

Figura 6.1: Diagrama de flujo del proceso.



**Tabla 6.1 Lista de equipos y su operación en el proceso.**

<b>Equipo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Operación</b>
C-130	Chancadora primaria.	Reduce tamaño de partícula.
C-120	Chancadora secundaria.	Reduce tamaño de partícula.
C-110	Molino.	Reduce tamaño de partícula.
J-212	Transportadora	Transporta materia prima a los ciclones.
H-211	Ciclones de pre-calentamiento.	Precalienta la arcilla, para el ingreso al horno rotatorio.
B-210	Horno rotatorio	Pre-calcina la arcilla.
E-213	Enfriador de sólidos	Enfría la arcilla que sale del horno rotatorio.
J-214	Transportadora	Transporta arcilla calcinada al tanque de lixiviación.
M-310	Tanque de lixiviación	Lixiviación de la arcilla con el ácido.
E-311	Condensador	Condensa los vapores que salen del tanque de lixiviación.
E-711	Intercambiador de calor	Intercambia calor entre agua y la mezcla de salida del tanque de lixiviación.
H-410	Filtro al vacío	Filtra la mezcla sólido líquido que Sale del tanque de lixiviación.
J-411	Transportadora	Transporta la sílice.
M-510	Tanque de precipitados	Se produce la formación de precipitados de alumbre de aluminio.
H-610	Filtro al vacío	Filtra la mezcla sólido líquido que sale del tanque de precipitados.

<b>Equipo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Operación</b>
J-611	Transportadora	Transporta el precipitado al tanque de disolución.
M-710	Tanque de disolución	Solubiliza el precipitado por calor.
M-712 / M-715	Tanques de agitación	Se produce la formación de precipitados de alumbre de aluminio de mayor tamaño.
H-810	Filtro al vacío	Separa el precipitado de mayor tamaño de la solución madre.
J-811	Transportadora	Transporta el precipitado de mayor tamaño al horno de calcinación.
B-910	Horno de lecho Fluidizado	Calcina el precipitado de mayor tamaño.
E-911	Enfriador de sólidos	Enfría el producto que sale de calcinar.
J-912	Transportadora	Transporta el producto final.

## **6.2 Bases de diseño:**

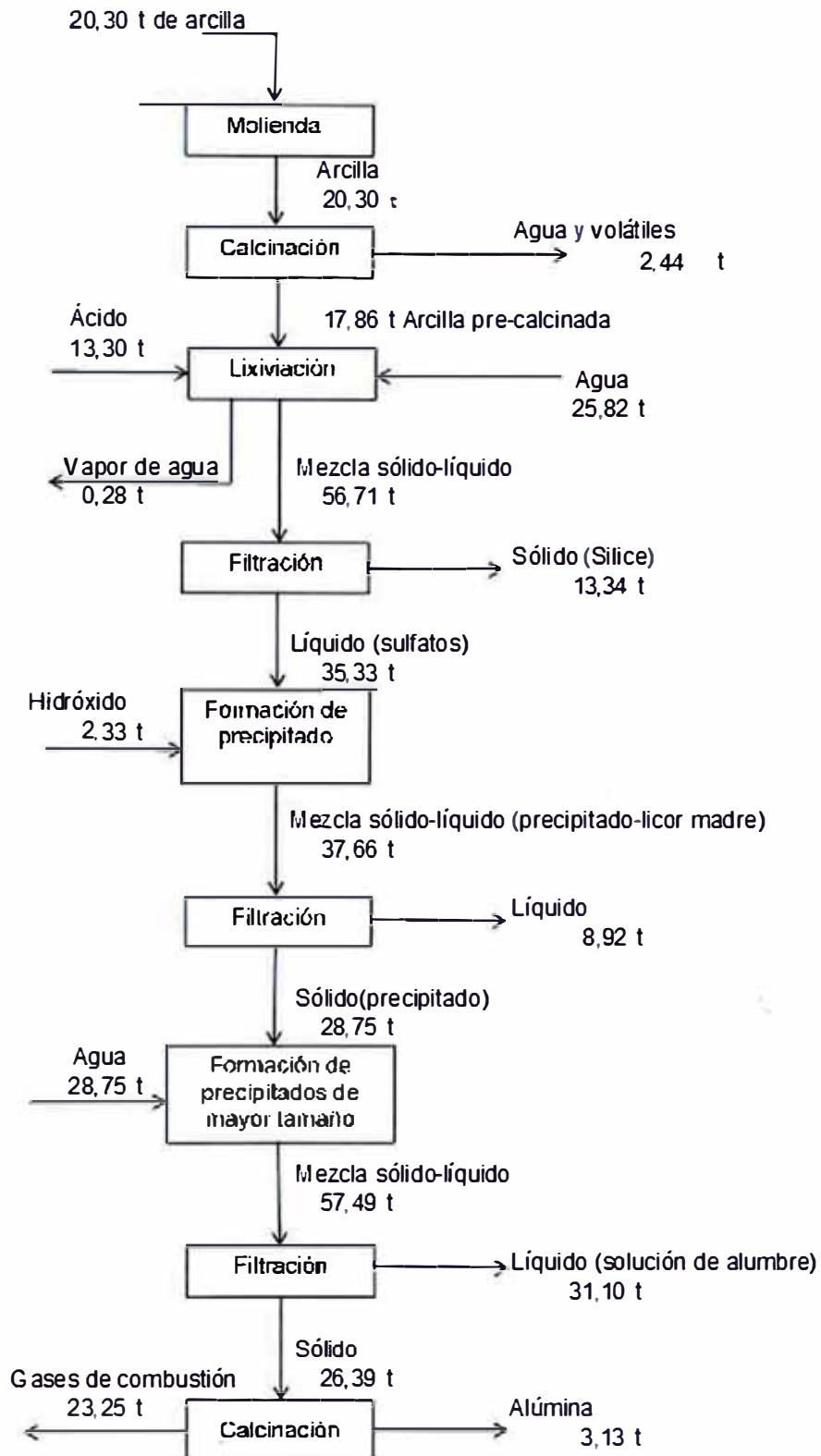
### **6.2.1 Capacidad de planta:**

La capacidad de planta se escogió partiendo de los requerimientos del mercado peruano.

Según la Asociación de Exportadores (ADEX), las industrias que más importan alúmina son: la refractaria, empresas dedicadas a la fabricación de ladrillos refractarios, la industria de cerámica, de abrasivos y la industria química.

De acuerdo a los datos de la tabla 4.1, la capacidad de planta determinada para la producción de óxido de aluminio es de 20305 Kg de arcilla de cantera por hora; con esta capacidad cubrimos el mercado peruano y lo restante se dedica a la exportación.

**Figura 6.2: Balance de masa para el diseño de equipos.**



### 6.2.2 Parámetros de diseño:

Para hacer el diseño de los equipos a utilizar en esta industria, se requieren de parámetros que se encuentran involucrados en la parte experimental, siendo éstos, los que determinan (de acuerdo a las especificaciones técnicas), un desarrollo industrial adecuado.

Como se puede observar en el diagrama de bloques para el balance de masa (figura 6.2), se parte con un capacidad de planta de 14.2 t/h, pero por cuestiones de diseño, se toma como capacidad nominal mayor a la capacidad real, debido a los posibles incrementos de producción, evitando de esta manera la adquisición de nuevos equipos, que generalmente se ven reflejados en los costo de producción. Este incremento (sabido mediante bibliografías de diseño), es de un 30% más de lo real; es decir, la nueva capacidad de planta es de **20.3 t/h**. Entonces:

Los parámetros que se toman para el dimensionamiento, son:

- Capacidad de planta (t/h)
- Tiempo (h)
- Temperatura (°C)
- Viscosidad (kg/m.s)
- Diámetro de la materia prima (m)

### 6.3 Diseño y selección de los equipos:

En esta parte el balance de energía es usado en forma directa, para obtener el dimensionamiento de los equipos a utilizar.

#### - Maquinas para el desmenuzamiento:

Las maquinas para desmenuzar están en un orden relativamente grande (trituradores), a un rango de escala de finos (molinos).

#### - Reducción de las de las Materias Primas:

La materia prima obtenida de cantera, por tajo abierto o por socavones, se han de reducir de tamaño a efectos de elaboración ulterior. La subdivisión se realiza mediante trituradores y molinos.

Se dispone de una variedad de procedimientos y de dispositivos que permiten la elección correcta de las maquinas para reducción de tamaños.



**- Relación de reducción:**

La relación de reducción (definición de acuerdo al “Manual Tecnológico del Cemento”), es la relación de la mayor dimensión lineal del material antes de la subdivisión (D), a la mayor dimensión lineal del material desmenuzado (d). En consecuencia, el valor de (R) está representado por:

$$R = \frac{D_{\max}}{d_{\max}} \quad \text{Ec. 6.1}$$

Los valores determinados para el  $D_{\max}$  y el  $d_{\max}$ , son el diámetro (tanto a la entrada y salida de la materia prima), que son llamados también  $d_{80}$  y estas son:

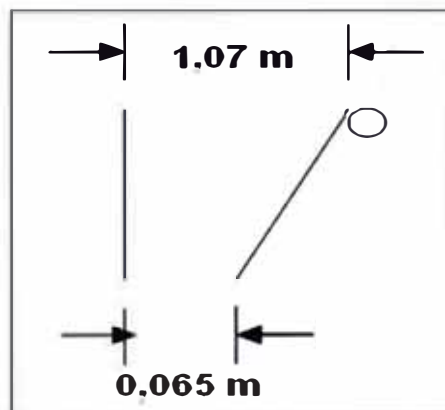
$$D_{\max} = 93.98 \text{ cm. (Entrada)}$$

$$d_{\max} = 5.1 \text{ cm. (Salida)}$$

Entonces el grado de desmenuzamiento es: 18,5

Se trabaja con un caudal de 20,3 t/h de arcilla.

**Figura 6.3: Chancadora del tipo mandíbula.**



Se requiere que el tamaño de la alimentación para el molino sea de 1,02 cm, lo cual se logrará mediante la instalación de una línea de 2 trituradores, el primero (triturador primario), que reducirá el tamaño de la materia prima a un tamaño intermedio, y el segundo (triturador secundario), a un tamaño final de 1,02 cm.

**a) Trituradora de mandíbulas (primaria):**

Se requiere de una trituradora de mandíbulas que tengan las siguientes especificaciones técnicas.

**- Capacidad de trituración:**

Targgart desarrolló una formula práctica para determinar la capacidad de producción de los trituradores de mandíbulas, cuya expresión es:

$$Q = 0,09 * b * d \dots \dots \text{Ec. 6.2}$$

Donde:

Q=capacidad en t/h

b = ancho de la mandíbula; cm.

d = tamaño del material de alimentación; cm.

Para el proceso requerimos de los siguientes datos:

$$b = 106,68\text{cm.}$$

$$d = 46,99\text{cm.}$$

Reemplazando los datos en la formula, obtenemos:

$$Q = 475,55 \text{ t/h} \quad \text{ó}$$

$$Q = 431,32 \text{ t/h}$$

**Energía para el acondicionamiento:**

La energía para el acondicionamiento de la trituradora de mandíbulas, se obtiene de acuerdo a la formula de Virad:

$$N = 0,0155 * b * D \dots \dots \dots \text{Ec. 6.3}$$

Donde:

N = potencia del motor del triturador de mandíbulas en Cv.

b = ancho de la mandíbula triturante, en cm.

D = dimensión máxima del material de alimentación, en cm.

Entonces:

Requerimos de los siguientes datos:

$$b = 106,68 \text{ cm.}$$

$$D = 46,99 \text{ cm.}$$

Reemplazando los datos en la formula, obtenemos:

$$N = 77.7 \text{ CV } \acute{o}$$

$$N = 57.13 \text{ kw}$$

Por lo tanto, se requiere de una trituradora de 57.13 kw de potencia para triturar 431.32 t/h de materia prima.

#### - Trituradores comunes:

Tenemos los siguientes de mayor uso industrial:

- ✓ Trituradores de mandíbula.
- ✓ Trituradores giratorios, trituradores de cono.
- ✓ Trituradores de cilindros.

En la industria, los trituradores giratorios se utilizan como desmenuzadores previos, lo mismo que los de mandíbulas. Los trituradores giratorios ofrecen de dos a tres veces los caudales correspondientes a los trituradores de mandíbulas de iguales dimensiones. El triturador rotatorio no tiene movimiento vacío alguno y trabaja ininterrumpidamente durante el movimiento circular de su eje. Medido por el consumo de energía, el caudal del triturador giratorio por kwh es de 1,5 hasta 1,6 del triturador de mandíbulas. En vacío, los trituradores giratorios consumen, aproximadamente, al 30% de la energía a plena carga, mientras que los de mandíbulas lo hacen en cuantías que varían del 45% al 50%.

Por lo expuesto, se va a seleccionar un triturador del tipo mandíbulas con las siguientes especificaciones:

**Tabla 6.2: Especificaciones técnicas del triturador.**

Tamaño de la boca de alimentación (cm.)	91,44 x 106,68
Peso para transporte (kg.)	56,34
Vueltas/m en el eje de acondicionamiento	200
Tamaño de la polea de acondicionamiento	78 x 15
Tamaño del volante (cm.)	78 x 15
Potencia máxima exigida kw	93,21
Abertura de salida (cm.)	6,5

**Fuente: "Manual Tecnológico del Cemento".**

Se selecciona este tipo de triturador debido a que sus parámetros especificados cumplen con lo establecido en nuestro proceso.

Para la trituración secundaria, la trituradora tipo **short head**, es el indicado.

Tamaño de alimentación en cm.	.....	15,24
Tamaño del producto en cm.	.....	2,05 - 0,32
Relación de reducción	.....	4 - 6

#### - Trituradora short head (secundaria)

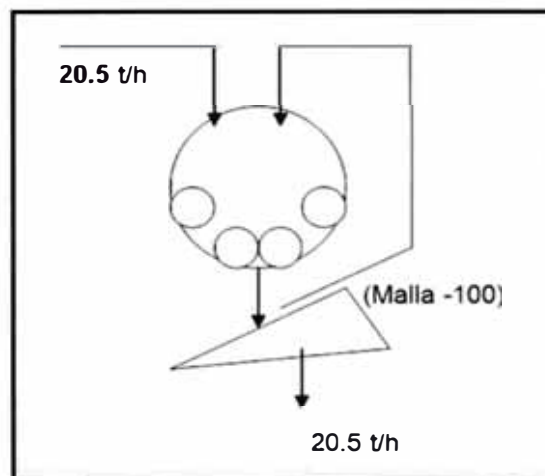
Este tipo de trituradora posee las siguientes especificaciones técnicas:

Tamaño de alimentación.....	5,080 cm.
Tamaño del producto .....	1,016 cm.
Relación de reducción .....	5

#### b) Molino de bolas:

El molino de bolas, reducirá el tamaño de la partícula de 1,02 cm. a 0,0147 cm., los cuales han de ser separados mediante un tamiz interior de (malla -100), que es el permitido para el pre-calcinación en el horno rotatorio. De los datos presentados anterior, sabemos que el  $d_{80}$  es todo aquello que atraviesa la malla especificada; entonces tenemos el siguiente balance:

**Figura 5.3: Proceso de Molienda.**



### Ecuación de Bond

Permite el cálculo de la potencia que se suministra a la trituradora para hacer efectiva su trabajo, está determinado por:

$$W = 10 * 1.3 * W_i * \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \dots \dots \dots \text{Ec. 6.4}$$

Donde:

W = Potencia por tonelada corta (kWh/t)	5,94
W <sub>i</sub> = índice del trabajo de la molienda	6,30
P = Tamaño del producto en um	147,00
F = Tamaño de la alimentación en um	10000,00
W <sub>r</sub> = potencia requerida (KWh)	178,20
T = capacidad de planta igual (tc/h).	22,40

Para los valores obtenidos y utilizados industrialmente, se tiene el valor de la potencia requerida igual a 178,20 Kw ó 238,97 HP

Para la selección de los molinos, tenemos los más comunes:

Molino de bolas, Molino de tubos y Molino Compount

Para determinar las dimensiones del molino, se desarrollan mediante las siguientes formulas:

$$HP = K_b * D^{3,5} * (\%V_p)^{0,661} * (\%C_s)^{1,505} * \left( \frac{L}{D} \right) \quad \text{Ec. 6.5}$$

Donde:

HP = Potencia del molino	1246,8
K <sub>b</sub> = Constante	5,456E-05
D = Diámetro del molino (pies)	4,2
%V <sub>p</sub> = Fracción del molino que ocupa por medio de molienda	40,0
%C <sub>s</sub> = porcentaje de la velocidad critica	78,0
L = longitud del molino (pies)	12,6
(L/D) = relación de longitudes del molino	3,0

Del cuadro podemos deducir, que las dimensiones de diámetro y longitud del molino son 4.186 pies ó 1.28 m y 12.59 pies ó 3.84 m respectivamente.

#### Determinación de las bolas de reemplazo:

$$B = \sqrt{\frac{F_{80}}{Kt}} * 3 \sqrt{\frac{Wi * \rho}{Cs * D}} \dots \quad \text{Ec. 6.6}$$

Donde:

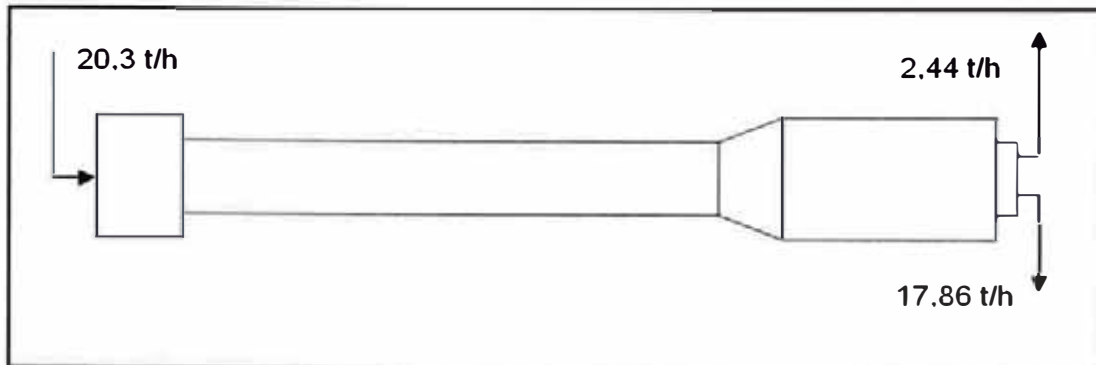
B = diámetro de la bola de reemplazo pulg	2,52
F <sub>80</sub> = partícula de alimentación (micras)	10000,00
rho = densidad especifica del mineral (g/cc)	2,23
Wi = índice de trabajo (kWh/tonelada corta)	7,10
Cs = porcentaje de velocidad critica	78,00
D = diámetro interior del molino pies	4,18
Kt = constante (seco - circuito cerrado)	335,00

Desarrollando la ecuación, se puede decir, que el tamaño de la bola de reemplazo del molino debe ser de 6,43 cm., siendo el tamaño correspondiente a molinos de estas dimensiones.

#### c) Pre-calcinador:

La pre-calcinación se realiza en hornos del tipo rotatorio, que poseen un determinado ángulo de inclinación y a una velocidad específica de giro, que determina una distribución uniforme de transferencia de calor, con el objetivo de preparar la materia prima, que será lixiviada con el fin de obtener un elevado rendimiento de la separación de los elementos, en este caso es el óxido de aluminio.

De los cuadros anteriores con respecto a la composición química de las arcillas, se puede notar que tenemos un 10% de agua de composición y aproximadamente un 2% de volátiles, que hacen una reducción de peso después de ser calcinados, teniéndose entonces:

**Figura 6.4: Proceso de calcinación en el horno rotatorio**

Del balance se puede notar que se pierde 2,44 t/h (entre agua de composición y volátiles), y que se tratan 17,86 t/h de materia prima que pasaran al reactor de lixiviación

La calcinación en el interior del horno, será a llama directa, por lo cual es necesario determinar la energía necesaria para la operación.

La transferencia de calor que se produce entre el medio y la materia prima es a contracorriente en contacto directo, debido a que en uno de los extremos se da la entrada de la materia prima, y por el otro extremo se produce la llama (donde se encuentra el quemador), dándose de esta manera la transferencia de calor.

**Tabla 6.3: Dimensiones y capacidad del horno rotatorio.**

Capacidad	20,305	t/h
Volumen del horno	9,770	m <sup>3</sup>
Diámetro	1,500	m
Longitud	5,530	m
L/D	3,690	
Horas de trabajo por día	24,000	h
Consumo de gas por día	6977,120	Kg. de gas

**Diseño: Anexo B**

Los cálculos para determinar cada uno de estos parámetros, se encuentran en el apéndice C.

**Grado de llenado del material:**

El material ocupa un segmento de la sección del horno rotatorio. A la relación del área de este segmento a la sección total del horno, expresada en porcentaje, se le llama grado de llenado del horno

Los grados de llenado fluctúan entre los límites del 5% a 17%. Independiente del diámetro del horno el grado de llenado expresado en función del ángulo central  $\alpha$ , del segmento ocupado por el material se indica a continuación:

**Tabla 6.4: Llenado del Horno de acuerdo al ángulo central.**

Angulo central ( $\alpha^\circ$ )	Llenado del horno (%)
110	15,65
100	13,65
95	10,70
90	9,09
85	7,75
80	6,52
75	5,40
70	4,50

Fuente: "Manual Tecnológico del Cemento"

**Pendiente del horno:**

Las pendientes pequeñas requieren velocidades más altas. Esto ofrece la ventaja de favorecer la mezcla del material y origina un intercambio de calor más intenso. También si la inclinación es más pequeña se alcanza un grado de llenado más alta. Las pendientes de los hornos que se indican a continuación corresponden a los grados de llenado logrados como óptimos.

**Tabla 6.5: Pendiente del horno y grado de llenado**

Pendiente del horno (%)	Grado de llenado correspondiente (%)
4,5	9,0
4,0	10,0
3,5	11,0
3,0	12,0
2,5	13,0

Fuente: "Manual Tecnológico del Cemento"



La pendiente para hornos de hasta de 2,8 m de diámetro es de 5%.

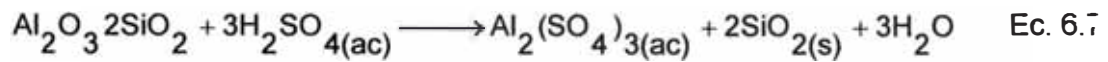
**Velocidad angular:**

Para la explotación económica del horno se utilizan velocidades periféricas de 38-40 cm/s ó 0.5-0.75 vueltas/min.

**d) Filtración:**

Después de ser lixiviado la materia prima, toda la carga proveniente del reactor, pasa por el filtro rotatorio de vacío.

Para el balance de masa nos basamos de acuerdo a la siguiente reacción:

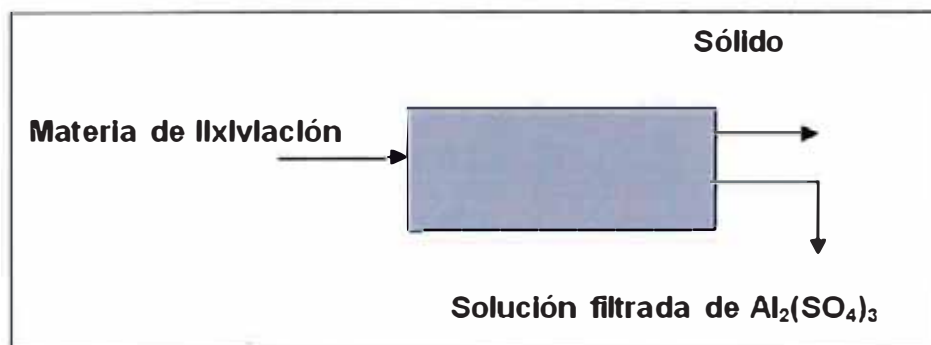


Del balance de la ecuación, podemos determinar la cantidad de filtrado que se va obtener después de pasar por el equipo de filtración; entonces:

**Tabla 6.6: Masa obtenida en el proceso de lixiviación.**

Compuestos	t / h
Caolín	17,86
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	13,3
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35,33
SiO <sub>2</sub>	13,34
H <sub>2</sub> O	25,82

**Figura 6.5: Balance de masa en el proceso de filtración.**



**Filtro rotatorio al vacío:**

Este filtro produce una velocidad de filtración alta para un espacio de piso dado. El medio filtrante es una hoja de forma de cuña recubierta de un medio filtrante. En este caso las hojas giran en un plano vertical alrededor de un eje de filtrado. A medida que la hoja se sumerge en el licor, recolecta una torta sobre sus superficies, mientras el filtrado pasa a un sistema central de descarga. La hoja transporta, entonces a la torta filtrada hacia la mitad superior de su rotación, mientras que el aire succionado a través de la torta la seca. La torta se raspa de las hojas mediante cuchillas o se desprende con aire comprimido que se alimenta al interior de las hojas antes que se sumerjan de nuevo en la suspensión. Si una tela filtrante se gasta o rasga, es posible eliminar y reemplazar solo ese segmento con uno nuevo en forma relativamente rápida.

Los parámetros de operación son:

- Velocidad de rotación: 1 rpm
- Capacidad de filtración: 4-5 litros de reacción/m<sup>2</sup>/min.
- Lavado: Se requieren 5 litros de agua cruda y 5 litros de agua desionizada por cada litro de reacción.

Las especificaciones técnicas del equipo de vacío que intervendrá en el proceso son:

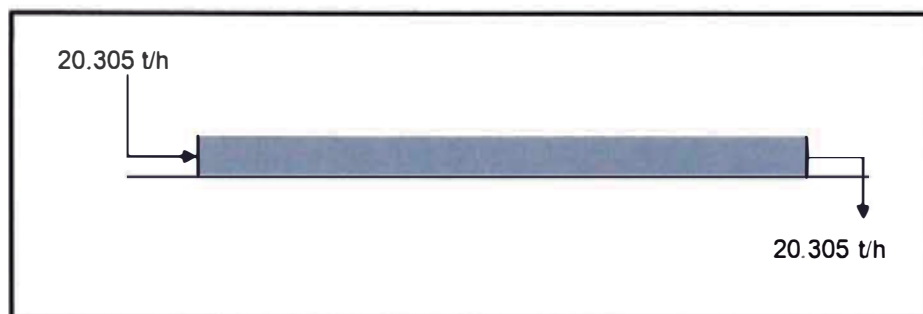
Filtro de vacío continuo de:	5' ø x 4' de cara.
Sumergida de:	10 a 25%.
Área de filtración:	63 pies cuadrados.
Materiales de fabricación:	acero al carbón A – 36 con revestimiento.
Motores:	eléctrico horizontal, 220/440 volts, 60 ciclos transmisión, agitador 1,49 kw.

En el apéndice C, se muestra la ficha técnica del fabricante, para mayores detalles.

**e) Tornillo sin fin:**

Este equipo, solo permite el transporte de los sólidos.

**Figura 6.6: Balance de masa en el tornillo sin fin.**



Este equipo, está constituido por un tornillo de Arquímedes de gran longitud dentro de un tubo sobre el que se encuentran soldados, casi en cada una de sus extremidades, dos piezas de conexión, una para la alimentación, otra para la salida de la materia prima. El paso del tornillo es constante durante los primeros metros, luego aumenta a fin de evitar los atascos.

**Principales características de los tornillos sin fin (valores medios):**

Caudal en t/h	:	20,0
Velocidad máxima vueltas/minuto	:	200,0
Potencia del motor en kw	:	2,2
Longitud en metros	:	10,0
Diámetro en mm	:	150,0
Angulo de inclinación máxima respecto a la horizontal	:	60°

La ficha técnica del fabricante, es mostrado en el apéndice F, para mayor detalle al seleccionar, un adecuado equipo para el transporte de los sólidos.

**f) Bombas:**

La bomba que es utilizado es del tipo centrífugo, debido a la simplicidad de su diseño, bajo costo inicial, bajo mantenimiento y flexibilidad de aplicación. En su forma más simple consiste en un impulsor rotando dentro de una carcasa. El fluido entra a la bomba cerca del centro impulsor rotatorio y es impulsado hacia fuera por acción centrífuga.

El tipo de bomba seleccionado posee las siguientes características:

Capacidad en l/s	20
Carga en m	20
Temperatura en °C	90
Potencia en HP	3

Estos datos son obtenidos de las bombas de marca Foras

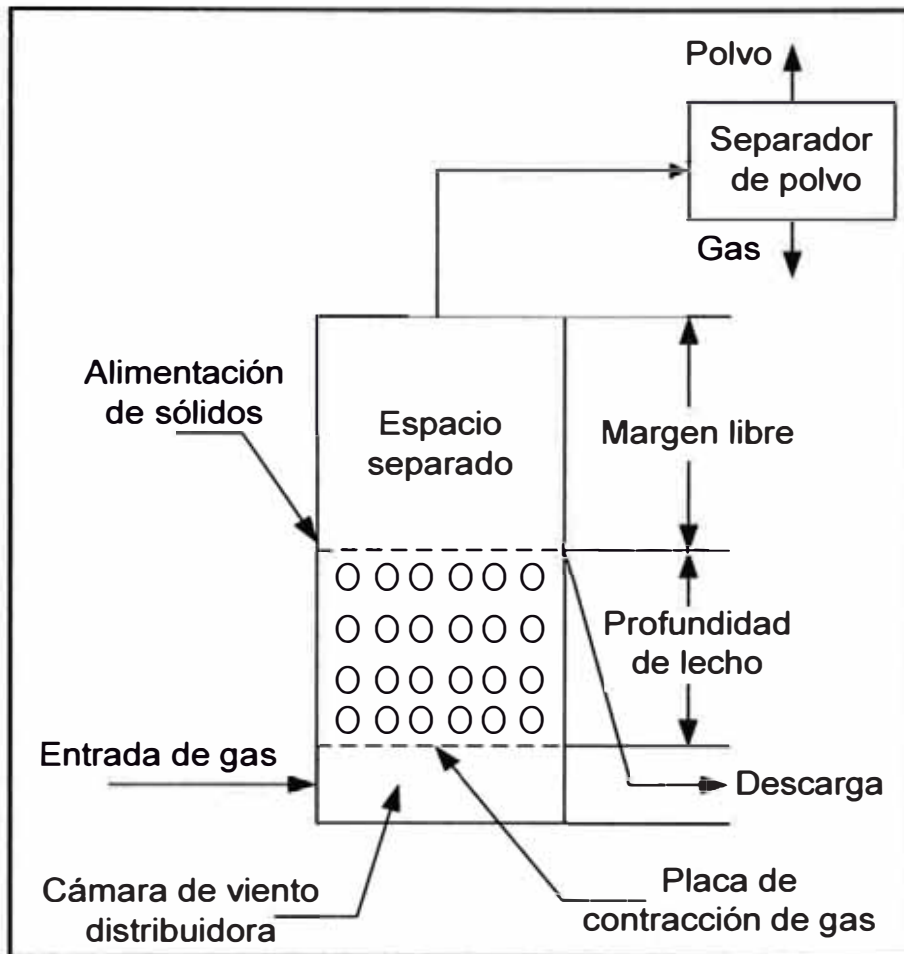
**g) Horno de lecho fluidizado:**

Estos lechos se utilizan en forma satisfactoria en varios procesos, tanto catalíticos como no catalíticos. Entre los catalíticos se encuentran la desintegración catalítica y reformación de los hidrocarburos, entre otros. Algunos empleos no catalíticos son el tostado de los minerales de sulfuro, la coquización de los residuos del petróleo, la calcinación de la piedra caliza, del hidróxido de aluminio y los minerales de fosfatos, el secado y la clasificación.

En el proceso de obtención del óxido de aluminio, se requerirá del tipo no catalítico heterogéneo, debido a la calcinación del alumbre de amonio a alúmina en un proceso fluidizado que dará lugar a un producto de alta calidad.

Las partes más importantes de un lecho fluidizado son las siguientes:

**Figura 6.7: Sistema de lecho fluidizado.**



**Fuente: Manual del "Ingeniero Químico" Robert Perry**

### Recipiente de fluidización

Para determinar el recipiente de fluidización, la forma más común, es un cilindro vertical. El volumen arriba del lecho se conoce como espacio de separación. El área de la sección transversal se determina mediante el flujo volumétrico del gas y la velocidad del gas permitida o requerida para efectuar la fluidización en las condiciones de operación.

### Lecho:

La altura del lecho, se determina por varios factores ya sea en forma individual o colectiva como:

1. Tiempo de contacto con el gas.
2. Razón L/D requerida para asegurar una formación de etapas.

3. Espacio necesario para los intercambiadores de calor.
4. Tiempo de retención de los sólidos.

De acuerdo a estos factores, se muestra el cuadro, donde ubicamos los siguientes valores para un lecho fluidizado:

**Tabla 6.7: Parámetros del lecho fluidizado.**

Parámetros	Lecho fluidizado
Diámetro del lecho, D (m)	1,0
Altura del lecho, H(m)	3,0
Espacio libre(espacio sobre el lecho), (m)	0,4
Tamaño de la partícula (m)	0,00001 a 0,01
Velocidad superficial (torre vacía), del fluido ( m/s).	2,55
Máxima temperatura del recipiente(°C)	> 1500,00
Temperatura (°C)	
Recubierto con material refractario	

**Fuente: Manual del "Ingeniero Químico" Robert Perry**

El lecho fluidizado seleccionado, posee las siguientes características:

**Tabla 6.8. Parámetros del lecho fluidizado seleccionado.**

Parámetros	Lecho f
Diámetro del lecho, D (m)	1 - 10
Altura del lecho, H(m)	0,3 - 15
Espacio libre(espacio sobre el lecho), (m)	0,4 D
Fracción de volumen del vacío(porosidad) $\epsilon$	0,6 - 0,8
Tamaño de la partícula $D_p$ (m)	0,00001 a 0,01
Velocidad superficial del fluido (m/s).	0,1 - 5
Máxima temperatura del recipiente(°C)	>1500
Temperatura (°C)	
A recubierto con material refractario	
Coefficiente global de transferencia de calor (J/s.m <sup>2</sup> .K).	400 - 800

**Fuente:"Manual del Ingeniero Químico" Perry**

**h) Enfriador de sólidos:**

Este tipo de enfriador es de parrillas, donde la materia prima después de ser pre-calcinada, la temperatura con que sale, es reducida hasta una temperatura adecuada para el ingreso al tanque de lixiviación que al ser mezclada con el ácido a su concentración óptima, la temperatura de lixiviación permanece constante; para ello es necesario tener en cuenta el área de la parrilla por donde circula la materia prima. En la tabla 6.9 se dan los datos técnicos para este tipo de enfriador.

**Tabla 6.9. Datos técnicos para e, enfriador de parrilla.**

Parámetros	Dimensiones	Unidades
Temperatura de ingreso	750,00	°C
Temperatura de salida	443,60	°C
Área superficial de intercambio	4,07	m <sup>2</sup>

**i) Condensador:**

Este tipo de condensador es de coraza y de tubos, donde el vapor circula por el tubo interno. Este equipo es usado para mantener la concentración del ácido de lixiviación, invariable con el tiempo.

**Tabla 6.10: Datos técnicos para el condensador.**

Parámetros	Dimensiones	Unidades
Temperatura de ingreso	20,0	°C
Temperatura de salida	60,0	°C
Área superficial de intercambio	2,6	m <sup>2</sup>
Coeficiente global de calor	1420,0	J/m <sup>2</sup> .s.K

**j) Intercambiador de calor:**

Consiste en un intercambiador del tipo coraza y tubos donde el agua circula por la coraza y los sulfatos por el tubo interno. Este equipo es utilizado con el fin de reducir la temperatura de los sulfatos provenientes de la lixiviación, con el fin de no causar daño alguno al filtro rotatorio al vacío.

**Tabla 6.11: Datos técnicos para el intercambiador de calor.**

Parámetros	Dimensiones	Unidades
Temperatura de ingreso	20,0	°C
Temperatura de salida	80,0	°C
Area superficial de intercambio	8,3	m <sup>2</sup>
Coeficiente global de calor	995,0	J/m <sup>2</sup> .s.K

**k) Tanque de lixiviación:**

Este tipo de tanque es la parte central del proceso, donde se lleva a cabo la reacción del ácido y la arcilla, con el fin de obtener los sulfatos de aluminio, mediante el uso de todos los parámetros que son hallados en la parte experimental. Cabe mencionar que el equipo está recubierto con placa de teflón, debido a que este tipo de material es muy resistente al ataque ácido, con movimiento y altas temperaturas

Los datos técnicos de este tipo de equipo se encuentran ubicados en la tabla 6.12.

**Tabla 6.12: Datos técnicos del tanque de lixiviación.**

<b>Parámetros</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Unidades</b>
Volumen del tanque	14,00	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	2,61	m
Diámetro del agitador	0,87	m
Ancho del agitador	0,17	m
Altura del tanque	2,61	m
Altura del agitador	0,87	m
Ancho del baffle	0,07	m
Tiempo de residencia	20,00	h
En una hora	3,00	Turnos
Altura del tanque (Seguridad)75%	5,00	m
Potencia	3,50	hp
Revoluciones	60,00	RPM

**l) Tanque de precipitado:**

Tanque donde se lleva a cabo la formación de la sal doble de aluminio y amonio (alumbre de aluminio), mediante la reacción del sulfato con el hidróxido de amonio, a través de movimientos turbulentos de la solución, con un agitador cuyas especificaciones se encuentran ubicadas en la tabla 6.13.



**Tabla 6.13: Datos técnicos para el tanque de precipitación.**

Parámetros	Dimensiones	Unidades
Volumen del tanque	19	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	2,89	m
Diámetro del agitador	0,96	m
Ancho del agitador	0,19	m
Altura del tanque	2,89	m
Altura del agitador	0,96	m
Ancho del baffle	0,08	m
Tiempo de residencia	30	min
En una hora	2	Tornos
Altura del tanque (Seguridad)75%	3,85	m
Potencia	3.5	hp
Revoluciones	60	RPM

**m) Tanque de dilución:**

En estos tanques, se llevan a cabo la dilución de los cristales de alumbre, con el objetivo de enviar dicha solución a los tanques de agitación.

**Tabla 6.14: Datos técnicos de dilución.**

Parámetros	Dimensiones	Unidades
Volumen del tanque	24,26	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	3,14	m
Diámetro del agitador	1,05	m
Ancho del agitador	0,21	m
Altura del tanque	3,14	m
Altura del agitador	1,05	m
Ancho del baffle	0,09	m
Tiempo de residencia	30,00	min
En una hora	2	Tornos
Altura del tanque (Seguridad)75%	4,2	m
Potencia	3,5	hp
Revoluciones	60,00	RPM

**n) Tanques de agitación:**

En estos tanques, se realiza la cristalización del alumbre a cristales de mayor tamaño, con el fin que el producto final (óxido de aluminio), se encuentre con una mayor pureza. Este procedimiento se lleva a cabo con una agitación moderada, para que los cristales no se adhieran a las paredes del tanque.

**Tabla 6.15: Datos técnicos del tanque de agitación.**

<b>Parámetros</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Unidades</b>
Volumen del tanque	189,34	m <sup>3</sup>
Diámetro del tanque	6,22	m
Diámetro del agitador	2,07	m
Ancho del agitador	0,41	m
Altura del tanque	6,22	m
Altura del agitador	2,07	m
Ancho del baffle	0,17	m
Tiempo de residencia	4,00	h
En una hora	1,00	Turnos
Altura del tanque (Seguridad)75%	7,78	m
Potencia	3,50	hp
Revoluciones	30,00	RPM

## **7. EVALUACIÓN ECONÓMICA:**

Se realiza el análisis económico, con el propósito de verificar la rentabilidad que puede tener la puesta en marcha de este proceso.

### **7.1. Descripción:**

Para realizar el análisis económico se utiliza la metodología planteada en la bibliografía, tomando en cuenta los costos de equipos proporcionados por la Asociación de Exportadores (ADEX) (listado de importaciones 2008).

### **7.2 Cálculo del costo de capital:**

ADEX, proporciona datos de importaciones de todos los equipos que Perú importa; dichos datos son tomados de ADUANAS.

#### **7.2.1. Cálculo del capital fijo:**

Los precios FOB (precios de importación) de los equipos incluidos los costos de instalación se muestran en la tabla 7.1.

#### **7.2.2 Costo de instalaciones auxiliares:**

Según la bibliografía el costo está dentro del 20 al 30% del capital fijo.

Por lo que se le suma al costo de capital fijo para obtener el costo de capital.

El costo total que se muestra en la tabla 7.1, donde se incluye el costo de instalaciones auxiliares.

#### **7.2.3. Costo de mano de obra:**

Es el costo que se paga a cada operario, siendo de S/1500.00 mensuales más el 50% de beneficios sociales.

#### **7.2.4. Costo de materias primas:**

Incluye el costo de las materias primas involucrados en el proceso. Estos datos se muestran en la tabla 7.3.

#### **7.2.5. Ingreso por ventas:**

Incluye los ingresos por ventas de los productos finales. Estos valores son mostrados en la tabla 7.4.

**7.3 Costo de manufactura:**

En las tablas, se muestran el resultado de los cálculos basados en las relaciones del balance de masa y los precios de los productos e insumos químicos tomados de ADEX (2008).

**7.4 Análisis de rentabilidad:**

Mediante los datos obtenidos en los cuadros anteriores, se analiza la rentabilidad de este proyecto. Para tal fin se muestran las tablas siguientes:

**7.4.1 Datos para la evaluación económica:**

Es el reflejo de todos los datos obtenidos, para realizar (mediante operaciones matemáticas), el tiempo de recupero de la inversión.

**7.4.2 Depreciación lineal:**

Según la legislación peruana, se aplican la depreciación lineal para todo proyecto.

Para el análisis económico, se toma 10 años como el tiempo de operación de planta, este tipo de depreciación, es mostrado en la tabla 7.7 y figura 7.2.

**7.4.3 Flujo de caja proyectado:**

Con el fin de obtener la ganancia neta después de los impuestos, se tabula el flujo de caja proyectado que se muestra en la tabla 7.8.

**7.4.4 Tiempo de recupero:**

Con el flujo neto de fondos acumulado (FNFA), y los años, se procede a graficar el tiempo de recupero, que no es otra cosa el tiempo de recupero del capital invertido.

La grafica del tiempo de recupero, es mostrado en la figura 7.4. y tabla 7.8.

Tabla 7.1: Cálculo del costo de capital.

EQUIPOS DE PROCESO	Especificaciones de Capacidad	Units	Número	Costo compra del equipo	Factor De instalación	Costo base módulo simple	Total (M\$)
Chancadoras primaria	10	HP	1	51516	2	103031	103,031
Chancadora secundaria	10	HP	1	51516	2	103031	103,031
Molino de bolas	238,97	HP	1	83309	2	166619	166,619
Tornillo sin fin	3,9	HP	3	25676	1,5	38513	115,540
Ciclones	6	HP	4	21919	2	43838	175,350
Horno rotatorio	8,84	m2	1	175350	3,5	613725	613,725
Horno de lecho fluidizado	1	m	1	233800	3,5	818300	818,300
Intercambiador de calor	1	m2	1	43838	2	87675	87,675
Tanque de agitación	14	m3	3	28200	5	140998	422,993
Filtro al Vacío	5,85	m2	3	34591	2	69183	207,548
Faja transportadora	3,5	HP	3	17287	2	34575	103,725
Tanques de Cristalización	190,00	m3	4	28199	1,5	42299	169,196
Bombas de elevación de líquidos	20,00	m	6,00	318,35	1,40	445,69	2,674
Terreno	3000,00	m2	1,00	20,00	-	60000,00	60,00
						<b>Sub-total</b>	<b>3149,408</b>
						<b>Instalaciones auxiliares</b>	<b>944,822</b>
						<b>Total</b>	<b>4094,230</b>

**Fig. 7.1: Balance de materia para realizar la evaluación económica.**

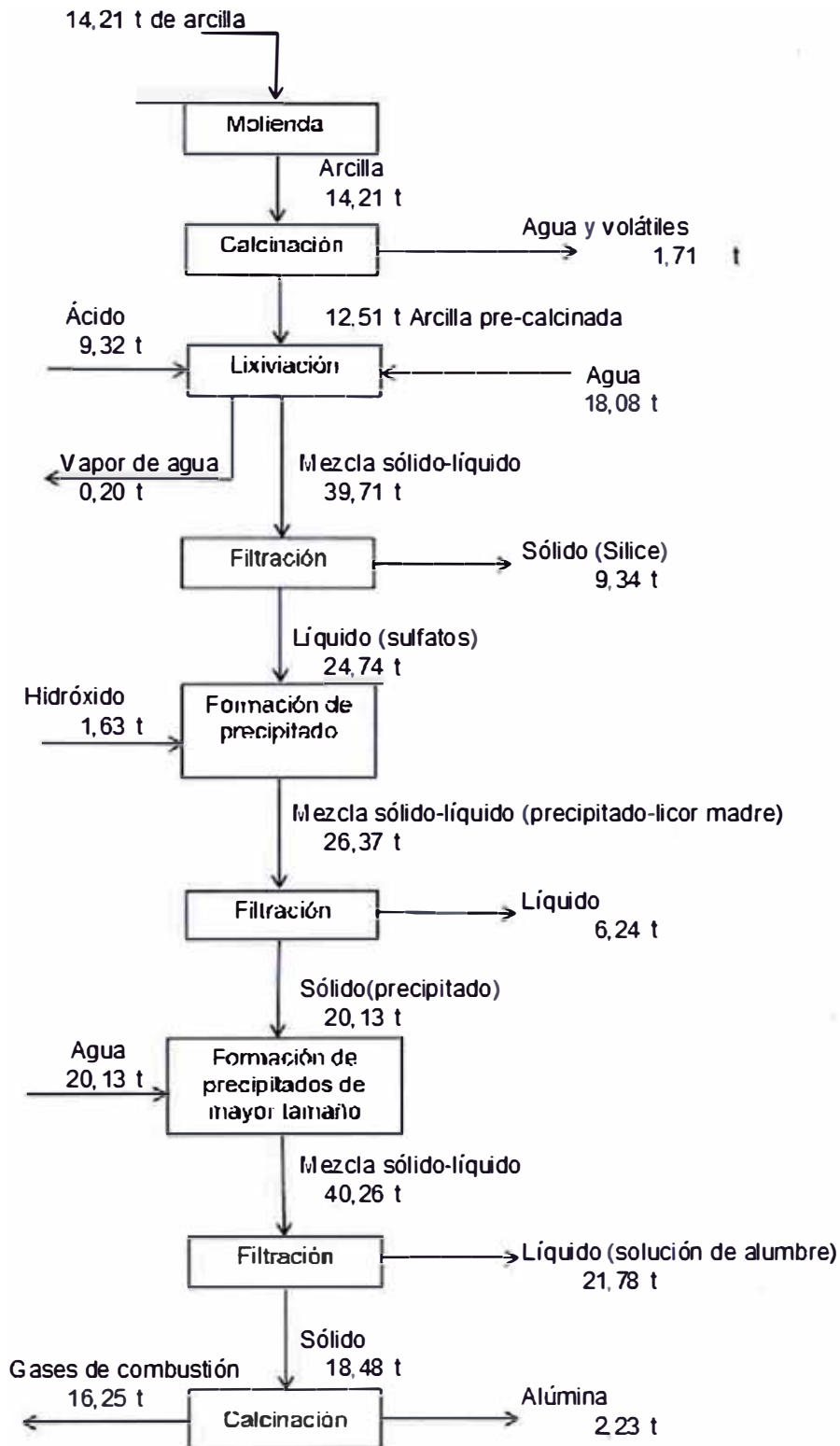


Tabla 7.2: Costo de mano de obra.

Equipos	Operadores por unidad	Cantidad	Costo mano de obra de operación (M\$)
	por turno		
Molino y tornillo sin fin	3	12	108000
Tanques agitados	3	12	108000
Fajas transportadoras	2	8	72000
Hornos	2	8	72000
Producto final	2	8	72000
	12	48	
<b>COSTO TOTAL (M\$/año)</b>			<b>432,000</b>

Tabla 7.3: Costos directos por materia prima.

Materia prima	Consumo		Precio en el mercado(\$/t)	Gasto (M\$/año)
	t/h	t/año		
Ácido	10,270	89719,157	30,00	2691,57
Hidróxido	1,630	14239,680	566,67	8069,16
Agua	43,100	376521,600	0,17	62,88
Arcilla	14,214	124173,504	20,00	2483,47
Gas natural	0,581	5075,616	250,00	1268,90
Flete	-	124173,504	16,67	2069,60
Total				16645,58

Tabla 7.4: Ingreso por ventas

Producto	Producción		Precio de venta (\$/t)	Ingreso (\$/año)
	t/h	t/año		
Alúmina	2,2343	19304,352	770	14864351,04
Sílice	9,3408	80704,512	80	6456360,96
Alumbre	1,6667	14400,288	245	3528070,56
Total				24848782,56

Tabla 7.5: Cálculo del costo de manufactura

<b>COSTO DE MANUFACTURA</b>	
<b>PROYECTO:</b> <b>“OBTENCIÓN DE ÓXIDO DE ALUMINIO (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) A PARTIR DE ARCILLA CAOLINÍTICA PROVENIENTE DEL DEPARTAMENTO DE JUNÍN”</b>	
<b>LOCALIZACIÓN:</b> Huancayo-Junín.	
<b>CAPACIDAD ANUAL (kg/año):</b>	19 267,20
<b>CAPITAL FIJO (MUS\$/Año):</b>	4 094,23
<b>CAPITAL TRABAJO (MUS\$/Año):</b>	818,84
<b>INVERSION CAPITAL TOTAL(MUS\$/Año):</b>	4 913,07
<b>COSTOS</b>	<b>MUS\$/Año</b>
<b>COSTO MANUFACTURA</b>	
<b>GASTOS DIRECTOS</b>	
MATERIAS PRIMAS	16645,58
MANO OBRA OPERACIÓN	432,00
SUPERVISION Y MANO OBRA OFICINA	15% 64,80
MANTENIMIENTO Y REPARACIONES	6% 245,65
SUMINISTROS DE OPERACIÓN	15% 36,85
CARGOS DE LABORATORIO	15% 64,80
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>17 489,69</b>
<b>GASTOS INDIRECTOS</b>	
GENERALES, EMPACADO, ALMACEN	60% 445,47
IMPUESTOS LOCALES	1,5% 61,41
SEGUROS	0,5% 20,47
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>527,36</b>
<b>COSTO MANUFACTURA TOTAL (no incluye depreciación)</b>	<b>18 017,04</b>
<b>DEPRECIACION</b>	<b>409,42</b>
<b>GASTOS GENERALES (OVERHEAD)</b>	
GASTOS ADMINISTRATIVOS	25% 111,37
GASTOS DE DISTRIBUCION Y VENTAS	10% 1 853,78
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>1 965,15</b>
<b>GASTO TOTAL</b>	<b>20 391,62</b>
<b>INGRESOS Y MARGEN</b>	
<b>INGRESOS POR VENTAS</b>	<b>24 848,78</b>
<b>GANANCIA ANUAL NETA</b>	<b>4 457,16</b>
<b>IMPUESTO RENTA</b>	30% 1 337,15
<b>GANACIA NETA DESPUES DE IMPUESTO</b>	<b>3 120,02</b>



**Tabla 7.6: Datos tomados para la evaluación económica.**

Datos	MMUSS\$/año - Porcentaje
Capital fijo total	4,094
Capital fijo total año 0	4,094
Inicio operación de planta : año 1	
Capital Trabajo ( 20% Capital fijo total)	0,818
<b>Después arranque Planta</b>	
Ingresos por ventas	<b>24,848</b>
Costo Manufactura sin depreciación	<b>18,017</b>
Tasa impuesto renta $i =$	30%
Valor rescate Planta $S =$	0,409
Depreciación lineal a 10 años	0,368
Tasa descuento $i =$	12%

**Tabla 7.7: Calculo de la depreciación lineal**

n =	10	AÑOS									
año/ k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FCI <sub>L</sub>	4,09										0,41
d <sub>k</sub>	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
BV <sub>k</sub>	4,09	3,73	3,36	2,99	2,62	2,25	1,88	1,51	1,15	0,78	0,41

Figura 7.2: Grafica de la depreciación lineal.

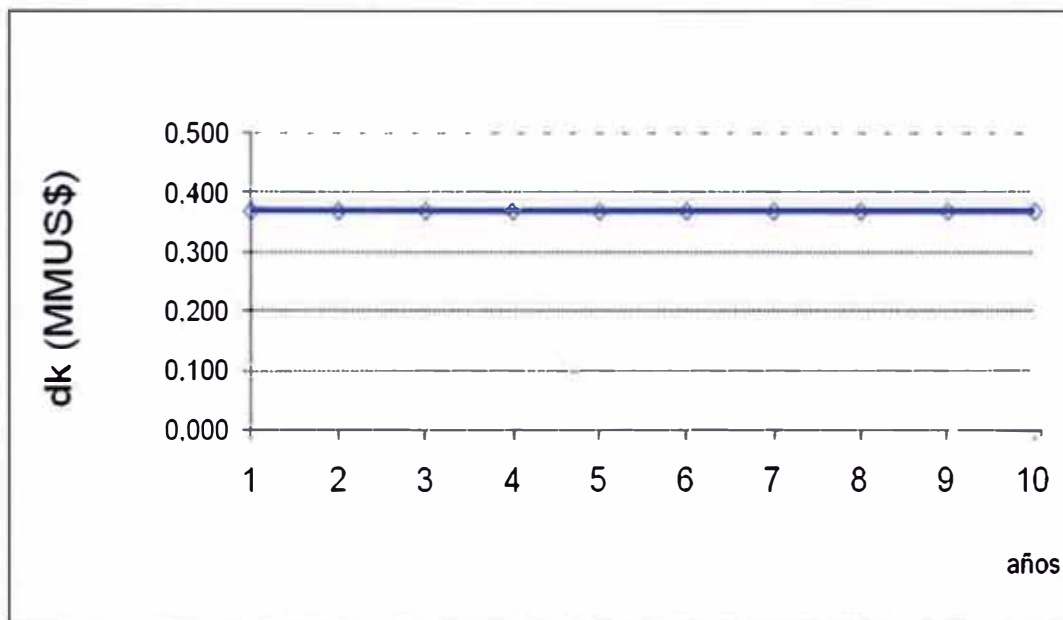


Figura 7.3: Grafica de la depreciación acumulada.

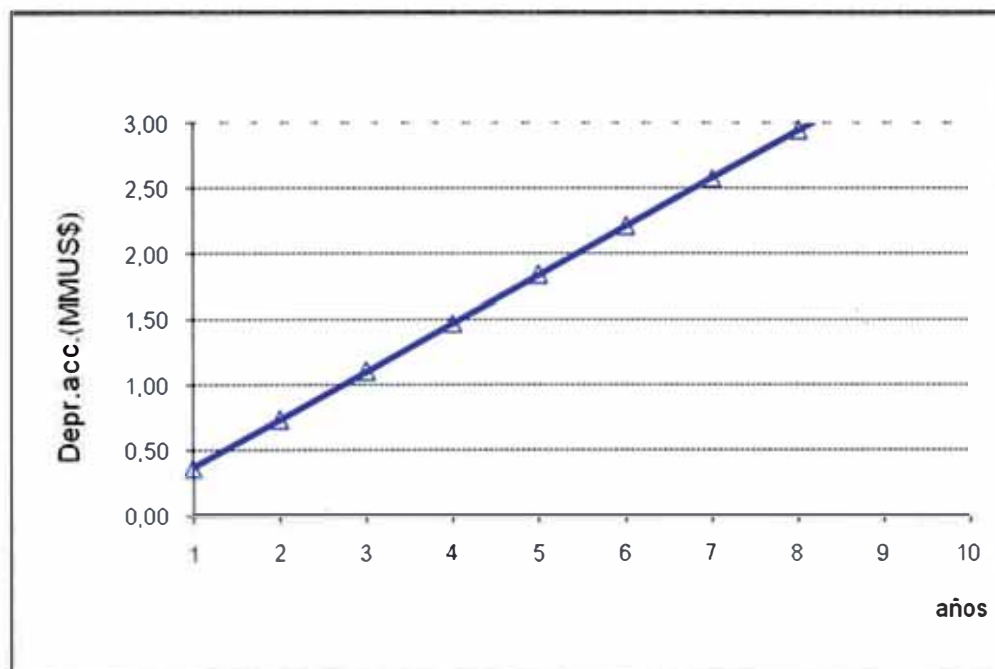
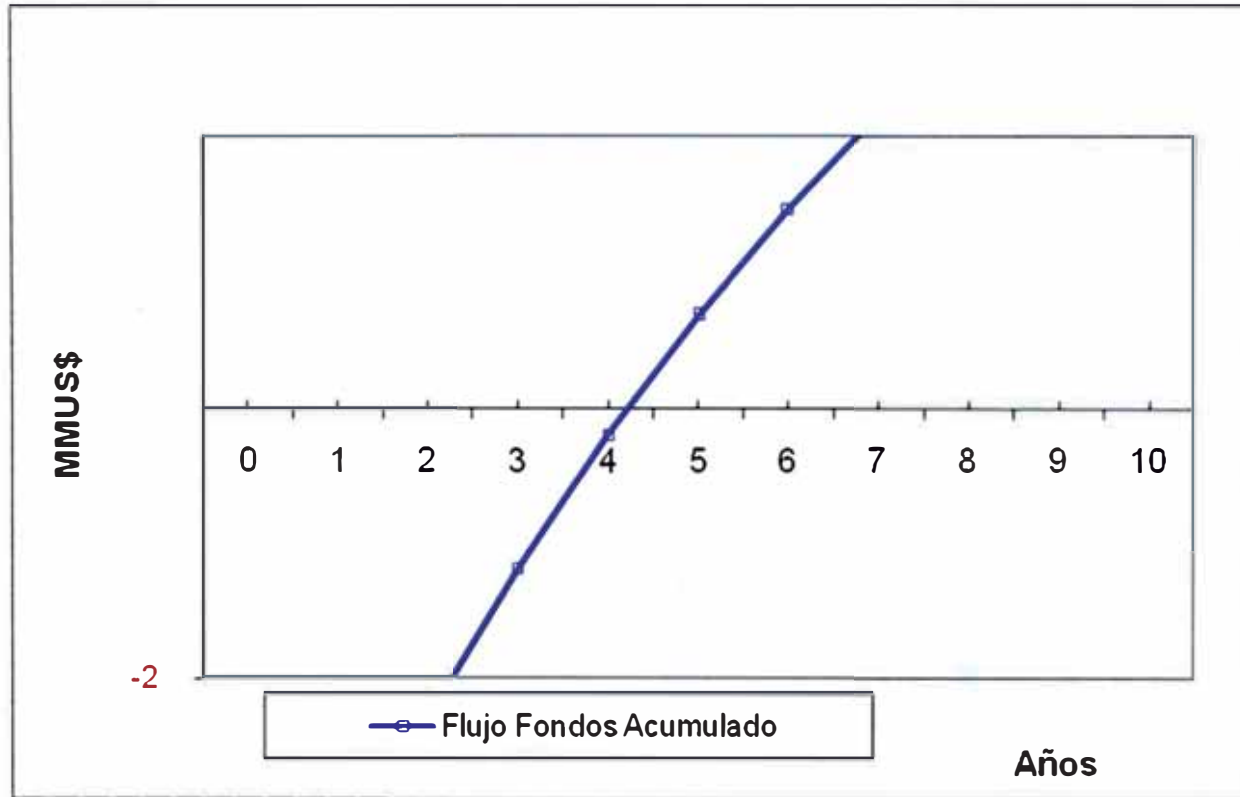


Tabla 7.8: Flujo de caja proyectado.

MMUS\$	Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión Capital Fijo		-4,09										0,41
Inversión Capital Trabajo		-0,82										0,82
Inversión Total		-4,91										1,23
Ingresos			24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8
Egresos			-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0
Margen Bruto	Utilidad Bruta		6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83
Inversión Capital Fijo		3,15										1,23
Depreciación	$d_k$		0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
	Valor en libros		2,78	2,41	2,04	1,68	1,31	0,94	0,57	0,20	-0,17	-0,54
	$d_k$		-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37
Margen Antes Impuestos			6,46	6,46	6,46	6,46	6,46	6,46	6,46	6,46	6,46	6,46
Impuestos	0,3		-1,94	-1,94	-1,94	-1,94	-1,94	-1,94	-1,94	-1,94	-1,94	-1,94
Margen Después Impuestos			4,52	4,52	4,52	4,52	4,52	4,52	4,52	4,52	4,52	4,52
Depreciación	$d_k$		0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Flujo Neto Fondos	FNF	-4,91	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Flujo Neto Fondos Descontado	FNFD*	-4,91	1,39	1,24	1,11	0,99	0,88	0,79	0,70	0,63	0,56	0,50
FNFD Acumulado		-4,91	-3,53	-2,29	-1,18	-0,20	0,68	1,47	2,17	2,80	3,36	3,86
		-3,15	-1,76	-0,53	0,58	1,57	2,45	3,23	3,94	4,56	5,12	5,62

TIR = 29.15%

Figura 7.4: Tiempo de recupero.



## 8. UBICACIÓN DE PLANTA:

En la mayoría de los casos, la razón primordial para un estudio de ubicación de planta, es encontrar el lugar en donde la planta puede otorgar la utilidad más alta sobre el capital invertido. Con frecuencia la naturaleza del proceso o del producto limita la selección potencial de sitios a un número relativamente pequeño de zonas posibles.

Para muchas plantas químicas, el problema de la ubicación no se puede reducir con facilidad a unos cuantos factores de control. En ese caso, se tienen que estudiar todos los aspectos posibles de los costos.

A continuación, se presenta todos los factores posibles que podrían determinar una adecuada ubicación de planta, las que se reflejará con mayor notoriedad en su rentabilidad. Cada factor, estará avaluado con un determinado valor de calidad, que es como sigue:

Excelente	100
Bueno	80
Regular	60
Malo	40

Se proponen las ciudades que a continuación son mostradas para su respectiva evaluación:

**Huancayo:** por su cercanía a la cantera de la materia prima y por poseer parte de los servicios de producción.

**Huancavelica:** por su cercanía a la cantera de la materia prima y por poseer parte de los servicios de producción.

**Callao (Lima):** por poseer casi la totalidad de los servicios de producción y su cercanía al mar.

La evaluación, para la ubicación de planta, se realiza mediante el método de factores, donde mediante la asignación de puntajes a cada factor involucrado en la evaluación, y la suma de estas, da un resultado global, para su evaluación, lo determinamos en el siguiente cuadro.

**Tabla 9.1: Método de factores**

<b>FACTORES</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>HUANCAYO</b>	<b>HUANCAVELICA</b>	<b>LIMA</b>
<b>Servicios</b>	El lugar, debe tener el suministro adecuado de agua, desagüe, energía eléctrica y servicios de telefonía (fijo y móvil).	100	60	100
<b>Combustibles</b>	Hay que tener consideraciones muy importantes respecto a la disponibilidad económica de gas. Se pueden suponer los costos más bajos en las zonas de origen del combustible; pero esto se contrarresta a veces con el envío de los productos.	80	40	100
<b>Materias Primas</b>	<p>Este factor, es la parte más importante para la ubicación de planta. De manera invariable, las plantas podrían ubicarse cerca de los yacimientos. En otros casos, la mayoría de las operaciones químicas, el bajo costo de las materias primas se debe sopesar con los costos de producción.</p> <p>Se debe tener en cuenta, su geografía y los medios de transporte.</p>	80	100	40

<b>FACTORES</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>HUANCAYO</b>	<b>HUANCAVELICA</b>	<b>LIMA</b>
<b>Mano de Obra</b>	La mayoría de las plantas químicas se caracterizan por su fuerza laboral. Es importante tener una fuente de mano de obra de un grado de competencia así como también, el costo que este puede llevar al proceso productivo.	100	80	100
<b>Mercado</b>	Es muy conveniente que la planta esté situada en la zona de mercado o cerca de ella; hay que tener presente que mientras más nos alejemos de este factor, esto se podría traducir en el incremento de los costos de producción.	80	80	100
<b>Legislación</b>	Las leyes relativas a las disposiciones sanitarias y de seguridad pueden excluir ciertos tipos de plantas o hacer que su funcionamiento sea relativamente costoso. Se deben verificar las leyes, ordenanzas municipales, etc. que favorezcan y beneficien la ubicación de la planta de producción.	80	80	60

FACTORES	CARACTERISTICAS	HUANCAYO	HUANCAVELICA	LIMA
<b>Transporte</b>	Las personas y los bienes se deben trasportar hacia la planta y a partir de ella. Para eso se debe contar con instalaciones satisfactorias. Los camiones y cisternas están obteniendo una importancia cada vez mayor. Sin embargo los ferrocarriles transportan todavía una parte importante de las materias primas y de los productos terminados, sobre todo a grandes distancias.	100	60	100
<b>Características Geográficas</b>	Además del costo razonable del terreno, el sitio debe estar casi nivelado y tener de preferencia valores de soporte de suelo. De modo ideal, se debe llegar a él por buenas carreteras, ferrocarriles, ríos navegables u otras vías acuáticas cercanas. El clima puede tener efecto sobre el tipo y el tamaño de la estructura, así como también de las operaciones.	100	60	100
<b>Total</b>		<b>720</b>	<b>560</b>	<b>700</b>



**DISCUSION DE RESULTADO:**

El resultado obtenido en el método de factores, para determinar la ubicación de la planta, resulta la ciudad de Huancayo, debido a que obtiene el mayor puntaje comparado al resto de las dos ciudades propuestas.

En el análisis, se toman en cuenta dos aspectos importantes: la económica y el porcentaje de residuos sobrantes luego de la extracción del producto en estudio.

**Aspecto económico:**

Como es tomado en el cuadro de factores, la mayoría de los temas analizados dependen del aspecto económico, debido a que sería más costoso el transporte del combustible (GNV, GLP, diesel 2, gasolina entre otros). Pero por tratarse de una ciudad en desarrollo, este tipo de aspecto tiende a reducirse con el tiempo debido a que se están facilitando el transporte de los insumos combustibles, lo cual hacen que lleguen a las provincias con mayor facilidad y a menores costos, además existe proyectos para llevar el gas natural a las industrias en Huancayo.

**Aspecto residual:**

El óxido de silicio, es recuperado como un sub producto, que luego de un proceso de purificación, es vendido como materia prima en la industria del vidrio y otros similares. Y finalmente, el resto de materia denominada inerte, que no tiene ningún valor aprovechable es trasladado a rellenos sanitarios, luego de un pre tratamiento.

Del análisis se concluye, que el mejor lugar donde se puede situar la planta es la ciudad de Huancayo, por ser una provincia en desarrollo y poseer similares condiciones que se pueden encontrar en la capital, desde el punto de vista energético, medios de comunicación, proveedores y mano de obra calificada y no calificada, lo cual hace en lugar propicio de instalación.

## 9. CONCLUSIONES:

- La materia prima es arcilla refractaria del tipo caolinitico, producto no metálico con un alto porcentaje de óxido de aluminio dentro de su composición química, siendo este, el resultado obtenido de pruebas instrumentales de Difracción de Rayos X, comparando los difractogramas de la arcilla usada con la ficha ASTM para identificación de una sustancia mineralógica.
- Para obtener los valores de las variables adecuadas del proceso se realiza un sin número de pruebas previas con el objetivo de llegar a obtener los resultados mostrados en los cuadros y gráficos de la parte experimental.
- En la evaluación de las variables, se obtuvieron como resultados óptimos, que hacen que el proceso sea eficiente, los siguientes: tamaño de grano de 147  $\mu\text{m}$ , porcentaje en peso de ácido para la lixiviación de 34%, temperatura de lixiviación de 104°C, tiempo de lixiviación de 20 min, temperatura de pre-calcinación de la arcilla de 750°C, temperatura de calcinación del alumbre de 1100°C, tiempo de calcinación del alumbre de 1,5 horas.
- La cantidad de ácido a utilizar es el resultado de la estequiometria de la reacción Ec. 5.1; y la cantidad de agua que se añade es la que modifica el porcentaje en peso de ácido presente en la solución.
- La densidad es tomada como variable dependiente, porque su valor es directamente proporcional a la cantidad de sales que se extrae de la lixiviación.
- A mayor tiempo de calcinación de la arcilla y temperaturas por encima de 1100°C, el proceso es contaminado por óxido de hierro (coloración anaranjada), la cual forma el alumbre contaminado.
- Un exceso tiempo de lixiviación, por encima del calculado (30 a más minutos), favorece la presencia de los elementos cromóforos que colorean la solución.
- Mediante este procedimiento, se logra disminuir en gran porcentaje la presencia del óxido de hierro.
- La calidad de los insumos químicos es fundamental para el desarrollo del proceso.
- Los productos (alumbre y óxido de aluminio), obtenidos, son analizados mediante pruebas de Difracción de Rayos X.

- Al comparar el Difractograma de Rayos X del precipitado formado, con la base de datos PCPDFWIN, cuya ficha es PDF # 070022, se obtiene que se trata del sulfato doble de aluminio y amonio, coincidiendo los picos.
- De la misma manera, al comparar el Difractograma de Rayos X del producto obtenido después de la calcinación con la base de datos PCPDFWIN, cuya ficha es PDF # 340493, obtenemos que pertenece al óxido de aluminio en su fase gamma y observándose que los picos de los difractogramas coinciden.
- El óxido de aluminio obtenido es del tipo gamma por el resultado del Difractograma de Rayos X y es de alta pureza por el resultado del análisis de Absorción Atómica y con esto podemos decir que este producto se acerca a ser del tipo Dense Corundum (98% de pureza), debido a que se acerca con los datos técnicos que son mostrados en el apéndice E.
- El resultado del análisis por Absorción Atómica del producto después de la calcinación, corrobora el resultado del análisis de Rayos X, dando como resultado que el producto tiene alto contenido de aluminio.
- Para la producción del óxido de aluminio a escala industrial, todos los parámetros determinados en la parte experimental, son validos, debido a que al realizar estas mismas experiencias a una escala mayor (escala banco), todos los datos obtenidos, se acercan a lo obtenido al nivel laboratorio.
- De cada 100% de arcilla, se obtiene 88% de arcilla pre-calcinada, 136,7% de sulfato doble de aluminio y amonio y 15,4 % de alúmina.
- El porcentaje de extracción (eficiencia), para la obtención del óxido de aluminio es del 90,83%.
- Para la producción de óxido de aluminio, la forma del cristal del alumbre para la calcinación, no es muy importante, porque éste al momento de ser calcinado, tiene una etapa de licuación para posteriormente pasar al estado sólido y de esta manera continuar con la calcinación hasta el producto final.
- De acuerdo a los datos estadísticos obtenidos del Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú (INEI) y de INGEMMET, nuestro país cuenta con grandes reservas de materia prima, lo que hace posible la producción de óxido de aluminio y satisfacer la demanda local y parte de la demanda extranjera.

- Existen subproductos que serán comercializados, debido a que posee algunos requisitos técnicos que son de uso para la industria que permiten un mayor ingreso y recuperar en menor tiempo la inversión.
- La industria del óxido de aluminio no solo genera este producto, sino también sub-productos como sulfato de aluminio, producto de gran importancia en el sector industrial en especial para el tratamiento de aguas y la industria papelera.
- Los lechos fluidizados, son utilizados de una manera adecuada para no contaminar el medio ambiente, mediante la adición de piedra caliza o dolomita al lecho, que reaccionan con el  $\text{SO}_2$  para formar el  $\text{CaSO}_4$ .
- La capacidad de planta puede incrementarse de acuerdo a la demanda del producto, debido al proceso que se encuentra trabajando al 70% de la capacidad nominal.
- La planta se encontrara ubicada en la provincia de Huancayo (en el departamento de Junín), siendo la mejor ubicación al analizar por el método de factores, cumpliendo la mayoría de los factores y obteniendo el mayor puntaje comparado con las otras dos ubicaciones propuestas.
- De acuerdo al análisis económico, obtenemos un tiempo de recupero de 4 años y tres meses aproximadamente y con una tasa interna de retorno (TIR), de 29,15%.

## 10. RECOMENDACIONES:

- El actual proceso propuesto, en la calcinación dentro del horno de lecho fluidizado, se eliminan gases de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) (% total de gases), proveniente de la calcinación de la sal doble de amonio y aluminio, conocido comúnmente como alumbre ( $\text{Al}_2\text{NH}_4 \cdot 2(\text{SO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ). Para evitar la expulsión de este contaminante a la atmósfera, se instaló un equipo de desulfuración, que consiste en la reacción del  $\text{SO}_2$  con caliza (óxido de calcio), para formar el sulfato de calcio, que posteriormente es enviado a rellenos.

Del análisis económico se puede observar que si se recupera estos gases, se hace aún más rentable este proceso, por lo cual nuestra recomendación es un estudio de la instalación de una planta de recuperación del ácido sulfúrico, los parámetros y su respectivo análisis económico.

- Es muy importante tener en cuenta, que para realizar una extracción casi en su totalidad del óxido de aluminio de la materia prima, es necesario que se origine un gran debilitamiento de los enlaces de cada uno de los componentes, que mediante efectos térmicos (pre-calcinación de la arcilla), se puede lograr dicho objetivo. En la parte experimental, esta variable se tomó de referencia de estudios realizados a la arcilla anteriormente y que se encuentran ubicadas en bibliografías (Robert Kirk), siendo el compuesto de estudio, proveniente de los Estados Unidos y como es sabido, cada arcilla del mismo tipo pero de diferentes localizaciones, varía dentro de su proceso; por lo cual, se recomienda realizar el estudio de la temperatura de pre-calcinación vs %extracción de óxido de aluminio haciendo un Análisis Térmico Diferencial de la arcilla en la pre-calcinación.

**11. BIBLIOGRAFÍA:**

1. Altiokka Mehmet R., Hosgun Halit L, 2007 "Investigation of the dissolution kinetics of kaolin in HCL solution", Elsevier-Hydrometallurgy 68, pág. 77-81.
2. Al-Zahrani A. A, Al-Shahrani S.S. and Al-Tawil Y. A., 2000, "Study on the activation of Saudi natural bentonite, Part II: Caracterización of the produced active clay and its test as an adsorbing agent", Arabia Saudita, J. King Saud Univ. Vol. 13, pag. 193-203.
3. Al-Zahrani A. A, Al-Shahrani S.S. and Al-Tawil Y. A., 2001, "Study on the activation of Saudi natural bentonite, Part I: Investigation of the conditions that give best results and kinetics of the sulfuric acid activation process", Arabia Saudita, J. King Saud Univ. Vol. 13, pag. 57-72.
4. Bartlett Robert W., Bolles Thomas R., 1985 "Process from the production of alumina", Estados Unidos, United States Patent 4526763.
5. Bauer Donald J., Eisele Judith A., Eichbaum Barnale R., 1978. "Acid process from recovery of alumina from clay", Estados Unidos, United States Patent 4094955.
6. Bazin C., El-Ouassiti K., Ouellet V., 2007 "Sequential leaching for the recovery of alumina from a Canadian clay", Quebec-Canada, Elsevier-Hydrometallurgy 88, pág. 196-201.
7. Beamesderfer Orono Maine Jhon W., Morris Gordon Horton H., 1967, "Acid treatment calcined kaolin", Estados Unidos, United States Patent 3318718.
8. Brumblay Ray U., 1995, "Análisis Cualitativo", México, Compañía Editorial Continental S.A, pág. 171.
9. Calzado Suarez Rolando Luis, Penedo Medina Margarita, 1999. "Sistema de purificación de alumbre y obtención de hidróxido de aluminio a escala de laboratorio", España, Tecnología Química vol. 19 N° 1. pág 25-29.
10. Colina Fernando G., 2002, "High-Temperature reaction of kaolin with sulfuric acid", Estados Unidos, Ind. Eng. Chem. Res., , 41, pág. 4168-4173.
11. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2002 "Técnicas de análisis y caracterización de materiales", Madrid-España, Editoras Marisol Faraldos Consuelo Goberna, Imprenta Roal S.L pág. 395-438.

12. Cormon Piere, 1979, "Fabricación del Hormigón", Barcelona – España, Editores técnicos asociados, Pags. 51 – 53.
13. Duda Walter H., 1977 "Manual Tecnológico del Cemento", Barcelona-España, Editores Asociados S.A., pág.144 – 241.
14. Elsele J. A., Bauer D. J., and Shanks D.E., 1983, "Bench – Scale Studies To Recover Alumina from Clay by a Hydrochloric Acid Process", Estados Unidos Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., 22, pág. 105-110.
15. Faust Alan S., 1993, "Principios de Operaciones Unitarias", México, primera edición, Editorial Continental.
16. Gael Ulrich, 1986, "Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química" México, Editorial Interamericana S.A. pág. 255.
17. Galan Liberto de Pablo, 1986, "Solubilidad de metacaolinita y de caolinita en medio ácido", México, Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, revista, Vol. 6 N° 2, pag. 163-170.
18. Gruzensky William G., Lebanon, Olsen Alvany Richard S. "Extraction of aluminum from clay", 1983, Estados Unidos, United States Patent 4388280.
19. Hignett T. P., 1947, "Production of alumina from clay by a modified Pedersen process", Estados Unidos, Pilot plants – Industrial and engineering chemistry Vol. 39, N° 8.
20. Hobday Robert W., Wilmington, 1982, "Non-Evaporative process for the production of aluminum sulfates", Estados Unidos, United States Patent 4332778.
21. Holman J. P., 1998, "Transferencia de Calor", Madrid-España, Editorial McGraw –Hill Interamericana de España S.A.U., pág. 359.
22. Hulbert S. F., 1969, "Kinetics of alumina removal from a calcined kaolin with nitric, sulphuric and hydrochloric acids" Estados Unidos- Carolina, Universidad de Clemsom.
23. Instituto Mario Samamé Boggio, 1999, "Minerales industriales del Perú", Lima-Perú, Imprenta INGEMMET, pág. 143-152.
24. Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2007 "Compendio Estadístico 2007", Lima-Perú,
25. Kirk Raymond E., 1961, "Enciclopedia de Tecnología Química", México, Unión Tipográfica Editorial Hispano – Americana, tomo 2, pág. 118.



26. Lowenstein Moses Hyman, Lowenstein Arthur Michael, 1976, "Alumina production", Estados Unidos, United States Patent 3983212.
27. McCabe Warren L., Smit Julian C., Harriot Meter, 1991, "Operaciones Unitarias en Ingeniería Química", México, Editorial McGraw Hill, Panamericana Editores, S.A., , pág. 259-269, 288-288.
28. Mendoza Atilio A., Ojeda Ch. María, 1986. "Geoquímica y Estructura de Arcillas", Lima-Perú, TECNIA. Vol.3, N° 1, Pág. 41- 47.
29. Mikami Yasuie, Takei Ippo, Soma Kazuo, 1977, "Production of aluminum sulfate", Estados Unidos, United States Patent 4039615.
30. Ministerio de Industria y Energía. "Técnicas de Conservación Energético en la Industria". Madrid . pág. 460 y 461.
31. Muñoz Patricio H., Delmás Dora R., 2001, "Síntesis de Alúmina a partir de la solución ácida de  $AlCl_3$  y caracterización por Rx", Lima-Perú, Rev. Per. Quím. Vol. 4, N°2, Pags. 68-71.
32. Ness Van, 1997, "Introducción a la Termodinámica para Ingeniería Química", México, Editorial Mc Graw Hill quinta edición, pág. 233.
33. Park Young Kyun, Jinki Jeong, 1996, "Manufacture of Low-Soda Alumina from Clay", Estados Unidos, Ind. Eng. Chem. Res., 35, pág. 4379-4385.
34. Perry Robert, 1980, "Manual del Ingeniero Químico", México, Ed. Mc Graw Hill, quinta edición, Pags. 25-1 a 25-54.
35. Peters Max S., Tiemmerhaus Klaus D., 1968 "Diseño de plantas y su Evaluación Económica para Ingenieros Químicos", Buenos Aires-Argentina, Editorial Geminis S.R.L, Págs. 508-514.
36. Price Charles R., Abercrombie Willian F., 1974. "Controlling the leaching of kaolin clay", Estados Unidos, United States Patent 3853984.
37. Rase Howard F., 1973 "Ingeniería de proyecto", México, Compañía Editorial Continental, S.A. pág. 19-33, 253.
38. Redlich Otto, March C. C., Adams M. F., Sharp F. H., Holt E. K., and Taylor J. E., 1946. "Extraction of Alumina from Clay", Industrial and Engineering Chemistry, Pág. 1181-1187.
39. Rodríguez Rosa M., Gutierrez Delia, Reverón Helen, Moya Marcotulio, 2002, "Purificación de un sub-producto Bayer a través del uso de un agente quelante (EDTA)" Venezuela, Anales de la Universidad Metropolitana vol 2 N°1. pág. 149.



40. Vázquez F., Torres L. M., Garza L. L., Martínez A., López W., 2009, "Caracterización por XANES, análisis mineralógico y aplicación industrial de un depósito de caolín de México", México, Materiales de construcción Vol. 59, 294, pág. 113-121.
41. Vian Ortuño Ángel, 2006, "Introducción a la Química Industrial", Barcelona-España, Editorial Reverté S.A. pág. 175.
42. Vogel Arthur I., 1960, "Química Analítica Cuantitativa", Buenos Aires-Argentina, Editorial Kapelusz S.A., pág. 136-155.
43. Ziegenbalg Siegfried, Haake Gerhard, Geiler Gunter, 1981, "Process for the production of pure aluminum oxide", Estados Unidos, United States Patent 4244928.

**SOFTWARE USADOS:**

- ORIGINLAB 8.0: Software para análisis de datos graficandolos.

<http://www.originlab.com/index.aspx>

- PCPDFWIN: Base de datos Powder Diffraction File (PDF).

<http://www.ehu.es/imacris/PIE04/web/progPDF.htm>

**PAGINAS WEB USADOS:**

- Las arcillas, clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales.

<http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/epoca03/de-pablo.pdf>

- Arcillas.

<http://www.ingemmet.gob.pe>

- Las arcillas propiedades y usos:

<http://campus.usal.es/~delcien//doc/GA.PDF>

- Alúmina:

<http://www.textoscientificos.com/quimica/alumina>

- Alúmina:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Al%C3%BAmina>

- Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

- [http://www.quiminet.com.mx/art/ar\\_%25C7%258A%2525B%25F7%258D%258E%253B.php](http://www.quiminet.com.mx/art/ar_%25C7%258A%2525B%25F7%258D%258E%253B.php)

- Alúmina:

<http://www.monografias.com/trabajos35/alumina/alumina.shtml>.

## 12. APENDICE:

### Apéndice A: Valores del índice de trabajo para el dimensionamiento del molino.

**Figura A1: Índice de trabajo en vía seca o vía húmeda**

Material	Dens. rel.	Índice de trabajo, $W_i$
Bauxita	2,20	8,78
Clinker de cemento	3,15	13,45
Materias primas de cemento	2,67	10,51
Arcilla	2,51	6,30
Carbón	1,4	13,00
Coque	1,31	15,13
Granito	2,66	15,13
Grava	2,66	16,06
Yeso	2,69	6,73
Mineral de hierro (hematites)	3,53	12,84
Piedra caliza	2,66	12,74
Roca fosfática	2,74	9,92
Cuarzo	2,65	13,57
Pizana	2,63	15,87
Esquisto	2,57	14,30
Roca volcánica	2,87	19,32

## Apéndice B:

### B1. Diseño del intercambiador de calor:

Cálculo del área de intercambio de calor:

$$A = \frac{\overset{\circ}{Q}}{U \cdot \Delta T_m} \quad \text{Ec. (B1)}$$

Donde:

$A \text{ (m}^2\text{)}$ : Área de intercambio de calor.

$\overset{\circ}{Q} \text{ (J/s)}$ : Flujo de calor.

$U \text{ (J/m}^2\text{.s.K)}$ : Coeficiente global típico del intercambiador de calor.

$\Delta T_m \text{ (K)}$ : Diferencia media de temperaturas.

Cálculo de  $\Delta T_m$ :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad \text{Ec. (B2)}$$

Donde:

$\Delta T_1$ : Diferencia de temperatura en un lado del intercambiador.

$\Delta T_2$ : Diferencia de temperatura en el otro lado.

**Tabla B1: Condensador del tanque de lixiviación.**

Características del equipo	
Fluido:	En contracorriente
Coraza:	Agua
Tubos:	Vapor de agua
U ( J/m <sup>2</sup> .s.K):	1420
Material:	Acero al carbono

**B2. Potencia de tornillo sin fin:**

Se utiliza la ecuación:

$$P = 0,07 * m^{0,85} * L + 0,012 * m * H \quad \text{Ec. (B3)}$$

Donde:

P (kw): Potencia.

$m$  (kg/s): Flujo másico.

L (m): Longitud.

H (m): Altura.

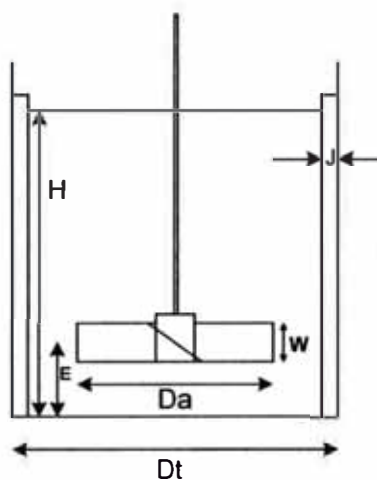
Para los demás equipos se trabaja con los cuadros de diseño corto propuesto por Ulrich.

**Tabla B2: Diseño rápido del equipo de transporte de sólidos.**

Intervalo de equipos comunes.	Tipo de transportador	
	Correa	Sin fin (tornillo helicoidal)
Diámetro o ancho, D (m)	0,3 - 2	0,15 - 0,50
Longitud, L (m)	10 - 50	5 - 25
Capacidad máxima de sólidos (m <sup>3</sup> /s)	1,0	0,007 - 0,08
Acciones simultaneas		Mezcla, calentamiento, enfriamiento, secado.

**B3. Dimensiones de un tanque agitado:**

**Figura B1: Diseño estándar de turbina.**



Donde:

$D_t$  (m): Diámetro del tanque.

$D_a$  (m): Diámetro del agitador.

$W$  (m): Anchura del rodete

$E$  (m): Altura del impulsor por encima del fondo del tanque.

$H$  (m): Profundidad o altura del líquido en el tanque.

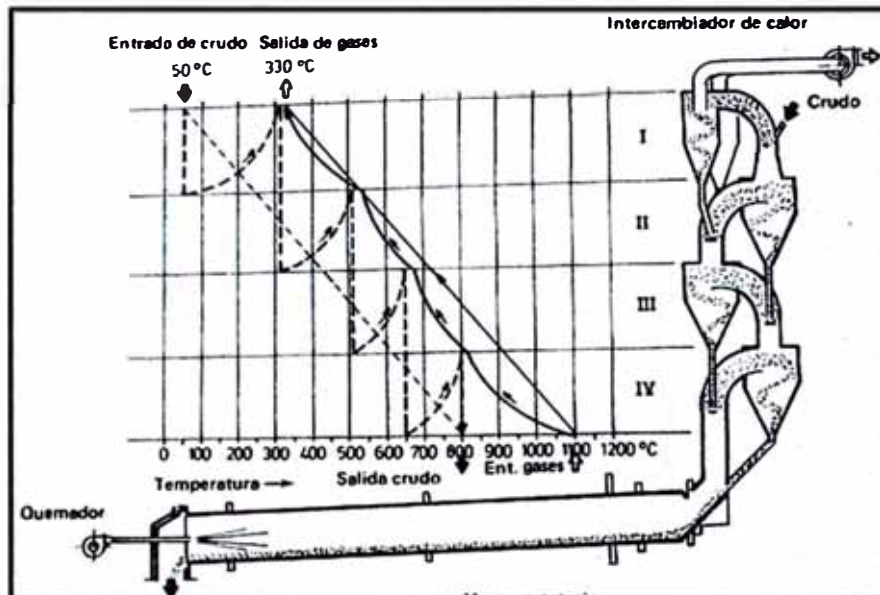
$J$  (m): Anchura de los deflectores.

**Tabla B3: Relación de las dimensiones del tanque agitado.**

Relación de dimensiones	Valores
Da/Dt	1/3
H/Dt	1
E/Dt	1/3
W/Da	1/5
J/Da	1/12

**B4. Diseño del Horno Rotatorio**

**Figura B2: Horno rotatorio.**



De la ecuación:

$$Q_m = C_e \cdot (t_2 - t_1) \dots\dots \dots \text{Ec. (B4)}$$

Donde:

$Q_m$  = Calor entregado a la materia prima.

$C_e$  = calor específico de la materia prima (arcilla).

$T_1$  = temperatura de entra de la materia prima.

$T_2$  = temperatura de salida de la materia prima.

Para cuestiones de diseño se requieren de los siguientes datos:

$$C_e = 0.224 \text{ Btu/Lb}^\circ\text{F}$$

$$T_1 = 122 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_2 = 1472 \text{ }^\circ\text{F}$$

Remplazando los valores en formula, obtenemos:

$$Q_m = 302.4 \text{ Btu/lb } \acute{o}$$

$$Q_m = 168 \text{ kcal /kg}$$

Por lo tanto, se requieren de 168 Kcal / Kg para pre calcinar la arcilla.

Al iniciar el diseno del horno, es -operado con los valores de calcinación; entonces, se determinara a partir del balance de energía del combustible (gas natural), la energía necesaria, así como también, el volumen de combustible necesario.

De la ecuación de combustión del gas natural:



Sabemos que el gas natural, es una composición de diferentes gases orgánicos, y que además, el oxigeno para la combustión, proviene del aire, que también es un mezcla de diferentes compuestos.

De lo expuesto anteriormente, resumiremos en el siguiente cuadro:

#### Combustión de gas natural:

El calculo que sigue de los volúmenes y pesos de los gases de combustión de gas natural se basan a los citados aquí (Sounthern Natural Gas Company, Bass Juntion Georgia, EEUU.).

**Tabla B4: Composición del gas natural.**

Componente	Volumen %	Btu/pie <sup>3</sup>	Q calculado
N <sub>2</sub>	0,5	0	0
CO <sub>2</sub>	0,88	0	0
CH <sub>4</sub>	94,89	1012,3	956
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,89	1773,1	51
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,79	2522,8	20
I-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,16	3261,5	5
N-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,18	3269,5	6
I-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,07	4009,3	3
N-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,05	4018,3	2
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> +*	0,09	5355,1	5

\*El signo + significa que en la partida están contenidos todos los hidrocarburos superiores.

De la tabla se obtiene 1048 Btu/pie<sup>3</sup> ó de 9323 kcal/m<sup>3</sup>

El medidor del gas afora al gas saturado de vapor de agua; por tanto es necesario, debido a la acrecencia del vapor de agua, detraer el 1,73% del volumen medido. Para casos de estudio, se toman valores establecidos por diferentes investigaciones que sustentan el siguiente procedimiento, lo cual está basado según el libro: "Manual Tecnológico del Cemento"; para lo cual:

$$(1,0000 - 0,0173) = 9162 \text{ kcal/m}^3$$

Este gas tiene la siguiente composición gravimétrica:

**Tabla B5: Composición gravimétrica del gas natural.**

Compuesto	Volumen (l)		Peso (g)
CH <sub>4</sub>	943,9	(94 * 16) / 22,4	674
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	28,9	(28,9 * 30) / 22,4	39
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	7,9	(7,9 * 44) / 22,4	15
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3,4	(3,4 * 58) / 22,4	9
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2,1	(2,1 * 72) / 22,4	7
N <sub>2</sub>	5	(5 * 28) / 22,4	6
CO <sub>2</sub>	8,8	(8,8 * 44) / 22,4	17

A veces el poder calorífico del gas natural se refiere también en kilos

$$1 \text{ kg. De gas natural } (9162 * 1000)/767 = 11945 \text{ kcal}$$

La combustión de 1 m<sup>3</sup> de gas natural suministra:

**Tabla B6: Reacciones químicas de la combustión del gas natural.**

674g CH <sub>4</sub>	+ 2696g O <sub>2</sub>	+ 9026g N <sub>2</sub>	→	1853g CO <sub>2</sub>	+ 1517g H <sub>2</sub> O	+ 9026g N <sub>2</sub>
39g C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	+ 146g O <sub>2</sub>	+ 489g N <sub>2</sub>	→	115g CO <sub>2</sub>	+ 70g H <sub>2</sub> O	+ 489g N <sub>2</sub>
15g C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	+ 54g O <sub>2</sub>	+ 181g N <sub>2</sub>	→	45g CO <sub>2</sub>	+ 24g H <sub>2</sub> O	+ 181g N <sub>2</sub>
9g C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	+ 32g O <sub>2</sub>	+ 107g N <sub>2</sub>	→	29g CO <sub>2</sub>	+ 14g H <sub>2</sub> O	+ 107g N <sub>2</sub>
7g C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	+ 25g O <sub>2</sub>	+ 84g N <sub>2</sub>	→	21g CO <sub>2</sub>	+ 11g H <sub>2</sub> O	+ 84g N <sub>2</sub>
6g N <sub>2</sub>			→			6g N <sub>2</sub>
17g CO <sub>2</sub>			→	17g CO <sub>2</sub>		
767 g de gas +	2953g O <sub>2</sub>	+ 9887 g de N <sub>2</sub>	→	2078g de CO <sub>2</sub>	+ 1636g de H <sub>2</sub> O	+ 9893g de N <sub>2</sub>
1 m <sup>3</sup> de gas +	9,932m <sup>3</sup> de aire		→	1,051 m <sup>3</sup> de CO <sub>2</sub>	2,036 m <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> O	7,909m <sup>3</sup> de N <sub>2</sub>
	10,93 m <sup>3</sup>				10,996 m <sup>3</sup> de gases de combustion	



Si la combustión se realiza con un 10% de exceso de aire, entonces el volumen de los gases de combustión es:

$$10,996 \cdot 100 / 90 = 12,219 \text{ m}^3$$

Volumétricamente el exceso de aire es:

$$12,219 - 10,996 = 1,223 \text{ m}^3.$$

Y está compuesto por:

$$1,223 \cdot 0,21 = 0,257 \text{ m}^3 \text{ O}_2 = 367 \text{ g.}$$

$$1,223 \cdot 0,79 = 0,966 \text{ m}^3 \text{ N}_2 = 1208 \text{ g.}$$

La composición de los gases de combustión es:

**Tabla B7: Composición de los gases de combustión.**

Compuesto	m3	%volumen	W(gramos)	%Pesos
CO <sub>2</sub>	1051	8,6	2078	13,7
H <sub>2</sub> O	2036	16,772	1636	10,8
N <sub>2</sub>	8875	72,6	11101	73,1
O <sub>2</sub>	0,257	2,1	367	2,4
<b>Total</b>	<b>12,219</b>	<b>100</b>	<b>15182</b>	<b>100</b>

El peso de los gases de combustión es igual al peso de los productos de partida:

Aire de combustión	12,840	g
Exceso de aire	1,575	g
Gas natural	0,767	g
<b>Total</b>	<b>15,182</b>	<b>g</b>

Si se hubiera partido de 1 pie<sup>3</sup>, entonces 1pie<sup>3</sup> normal de gas natural hubiera producido durante su combustión 12219 pie<sup>3</sup> normales de gases de combustión.

La combustión de 1pie<sup>3</sup> de gas natural suministra gases de combustión de la composición que sigue (en pie<sup>3</sup> normales y libras).

**Tabla B8: Masa de gases de combustión por volumen.**

Compuesto	m3		libras
CO <sub>2</sub>	1,051 *	0,1234 =	0,1297
H <sub>2</sub> O	2,036 *	0,05013=	0,102
N <sub>2</sub>	8,875 *	0,07808 =	0,6929
O <sub>2</sub>	0,257 *	0,08921 =	0,0229
<b>Total</b>	12,219		0,9475

De los gases de combustión (tomando como referencia para una combustión completa), se puede determinar, el volumen de combustible a usar y las dimensiones del horno que se requieren para el proceso; entonces de acuerdo al siguiente cuadro, tenemos el balance de energía:

**Tabla B9: Calor específico de los gases de combustión**

Compuesto	%Volumen	%Peso	$\Delta H$ (Kcal/m3)
CO <sub>2</sub>	8,6	13,7	12,5
H <sub>2</sub> O	16,7	10,8	9,5
N <sub>2</sub>	72,6	73,1	7,7
O <sub>2</sub>	2,1	2,4	8,12
<b>Metano</b>			9162
<b>Propano</b>			22442

Un kilo de gas natural  $9162 \cdot 1000 / 767 = 11945$  kcal , entonces, 2,205 lb de gas natural es equivalente a 47401,591 Btu de energía. Tomando como base 100 lbmol de gas de chimenea.

**Tabla B10: Composición molar.**

Compuesto	mol
CO <sub>2</sub>	8,6
H <sub>2</sub> O	16,7
N <sub>2</sub>	72,6
O <sub>2</sub>	2,1
total	100

Pero la composición del aire con que se alimenta al quemador, es:

**Tabla B11: Porcentaje molar del aire.**

Compuesto	%
Nitrógeno	71
Oxígeno	29
Total	100

El aire está compuesto de 21%(mol) de oxígeno y 79%(mol) de nitrógeno, por lo que el 72,6 mol de N<sub>2</sub> aparece en los 100 mol de gases de combustión seco fue suministrado por el aire y el O<sub>2</sub> que acompaña a esta cantidad de nitrógeno es:

**Tabla B12: Moles de agua contenidos en la reacción de combustión.**

Oxígeno	Moles
Suministrado	19,299
En el gas seco	10,700
La diferencia representa el contenido de agua	8,599

Del cuadro notamos que 8,559 moles, representan las moles de agua que se forman por la reacción de combustión.

La cantidad de carbono en el combustible se determina mediante un balance de carbono. De la tabla 6.2, se tiene:

Moles de C en los gases de combustión 8,6 moles

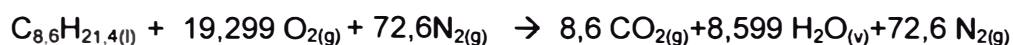
Por, consiguiente, el peso de combustible quemado para producir 100 lbmol de gases de combustible en seco es

$$(8.6)*2 + (8,6)*12 = 120,397 \text{ lbmol}$$

Si esta cantidad de combustible se quema completamente dando CO<sub>2</sub> (g) y H<sub>2</sub>O (l) A 25°C, el calor de combustión será:

$$\Delta H^\circ = 258838,732 \text{ Btu}$$

Sin embargo la reacción que ocurre en realidad no representa una combustión total y el H<sub>2</sub>O se forma como vapor más que como líquido. Las 120.3974 lbm de combustible pueden representarse mediante la fórmula empírica C<sub>8,6</sub> H<sub>21,4</sub> y la reacción se puede escribir de la siguiente manera:



Esta ecuación se obtiene sumando las siguientes reacciones:

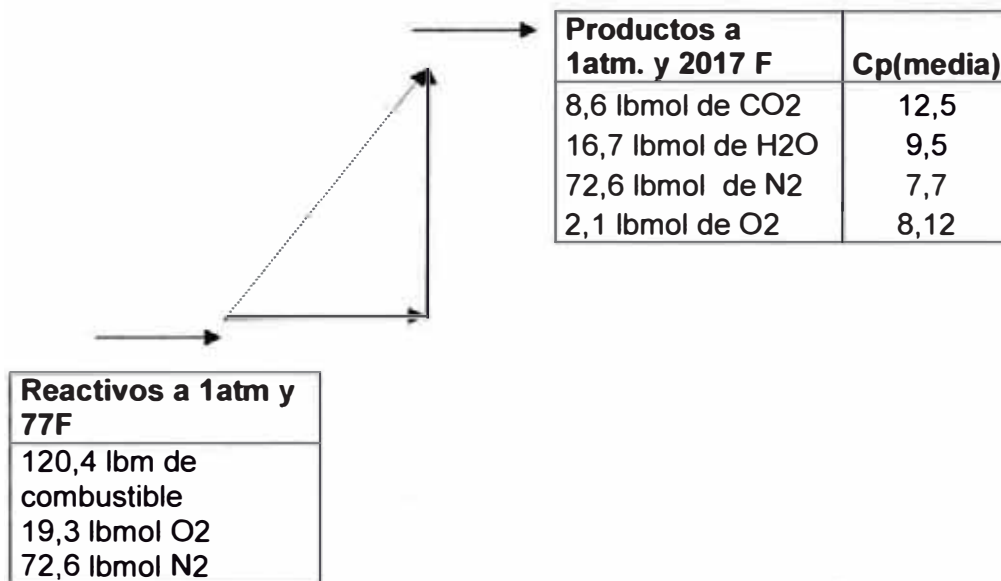


La suma de las expresiones de la reacción y la suma de los valores de pro a 298K, proporciona el calor estándar de reacción a 25°C para el mecanismo de desarrollo, siendo este igual a:

$$\Delta H^\circ = -2288837,518 \text{ Btu}$$

Este valor servirá para calcular el efecto térmico de los procesos en estudio. El método se representa con el diagrama siguiente:

**Figura B3: Método Grafico para la determinación del  $\Delta H^\circ$**



El proceso real que conduce de los reactivos a 77 °F a los productos a 2012 F se representa por medio de la línea punteada del diagrama. Para calcular del proceso, se puede seguir cualquier planteamiento conveniente. El trazo con líneas continuas es el más lógico, ya que los cambios de entalpía de estas etapas se calculan con facilidad. El cambio de entalpía provocado por el calentamiento de los productos de reacción, de 77 a 2012 °F, se calcula con suma sencillez utilizando las capacidades térmicas medidas que se toman de la figura, entonces:

$$\Delta H_p = \sum (n * Cp(media) * (2012 - 77)) \dots \dots \dots \text{... Ec. (B5)}$$

Donde:

$$\Delta H_p = (8.6 \cdot 12.5 + 16.7 \cdot 9.5 + 72.6 \cdot 7.7 + 2.1 \cdot 8.12) \cdot (626 - 77)$$

$$\Delta H_p = 462379,878 \text{ Btu}$$

$$\Delta H = \Delta H^\circ(298k) + \Delta H_p \dots\dots \dots \text{Ec. (B6)}$$

$$\Delta H = -2751217,396 \text{ Btu} + 462379,878 \text{ Btu}$$

$$\Delta H = -2288837,518 \text{ Btu.}$$

Como se trata de un proceso de flujo uniforme para el cual el trabajo de eje y los términos de energía potencial y energía cinética en el balance de la ecuación son cero desdeñable, entonces  $\Delta H$  es igual a  $Q$  es igual a  $-2288837.518$  Btu en otras palabras, se dispone de  $2288837.518$  Btu. De calor pasa transferirlos a la combustión por cada  $100 \text{ lbmol}$  de gases de combustión. Esto representa:

$$(2751217,396 / 2288837.518) \cdot 100 = 83.194$$

Es decir, la combustión posee un rendimiento de  $83.194$  que están siendo aprovechados. Por lo tanto:

**"La cantidad necesaria para producir  $100 \text{ lbmol}$  de gases de combustión es de  $120,4 \text{ lbm}$  ó  $54,615 \text{ kg}$  de gas y  $2288837,518 \text{ Btu}$  ó  $576777,3524 \text{ kcal}$  de energía del mismo gas"**

Ahora, se requiere conocer cuanta energía es necesario producir para calcinar la arcilla y la masa de combustible que son necesarios para la calcinación, entonces:

Se requieren  $302,4 \text{ Btu/lb}$  de arcilla, pero se tienen una tonelada de dicha materia prima; además de la tabla 18.14 del **"Manual tecnológico del cemento"**, se tiene que el poder calorífico del metano (gas natural), es  $1011,33 \text{ Btu/ft}^3$  de gas, que al operar estos datos, se obtiene  $658.02 \text{ ft}^3$  de gas natural por tonelada de arcilla. Del mismo manual, se obtiene como dato que  $1,69 \text{ lb}$  de gas ocupan un volumen de  $35,31 \text{ ft}^3$ ; entonces, para el volumen establecido, se requieren de  $31.56 \text{ lb}$ , gas por tonelada de arcilla.

Ahora, es necesario conocer el volumen que ocupan los  $100 \text{ lbmol}$  de gas. Se conoce por teoría de gases ideales que "para altas temperaturas y bajas presiones, todo gas real tiende a comportarse como gas ideal".

Por la ecuación universal de los gases ideales, tenemos:

**Tabla B13: Determinación del volumen gas de combustión.**

<b>Presión</b>	1	atm.
<b>Volumen</b>	3869,93	l
<b>R (constante)</b>	0,082	atm*l/K*mol
<b>Temperatura</b>	1373,15	K
<b>n (numero de moles)</b>	34,37	mol
<b>Volumen</b>	15,48	m <sup>3</sup> gas de combustión

Del cuadro, se requieren de 86.16 ft<sup>3</sup> de gas de combustión para calcinar 3.433 t/h de arcilla (2288837.52Btu/302.4Btu/ lb de arcilla); entonces, como la capacidad nominal de planta es 20.305t/h necesitaremos de 15.48 m<sup>3</sup> de gases de combustión, que es volumen necesario del horno(solo la parte interna, debido a que este horno tendrá un recubrimiento de materiales refractarios que actúan como aislantes y que determinados elementos dispondrán de un espesor dado, que hacen que el diámetro total sea mayor).

Ahora es necesario determinar las dimensiones del horno, y esto se logra solo operando las formula geométrica del cilindro, lo cual es:

$$Vol = \frac{3,1416 * D^2 * L}{4} \dots \quad Ec. (B7)$$

Donde:

D = Diámetro del horno.

L = longitud del horno.

Reemplazando datos para un diámetro de 1.5 m. tenemos: L = 8,76 m

### APENDICE C: Dimensionamiento del filtro rotatorio al vacío

Figura C1: Dimensiones del filtro rotatorio al vacío.

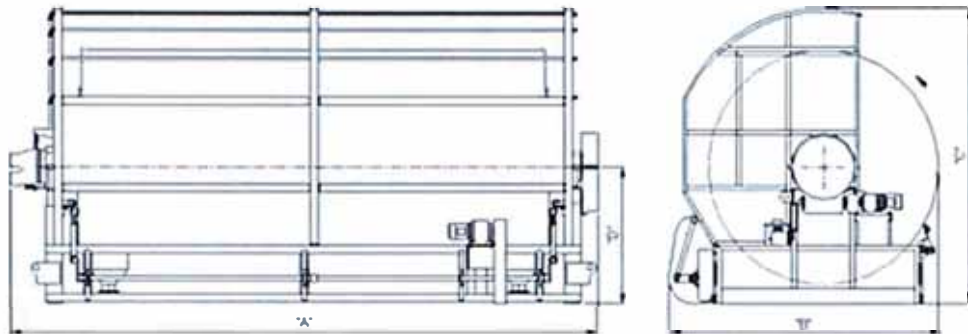


Tabla C2: Especificaciones técnicas del filtro al vacío.

TAMAÑO FILTRO (PIES)	AREA FILTRADO (PIES <sup>2</sup> )	DIMENSIONES GENERALES (METROS)				PESO APROXIMADO (Kg.)
		A	B	C	D	
5' x 4'	63	1,5	2,3	1,8	1,0	2,000
6' x 5'	94	2,7	3,2	2,1	1,1	2,300
8' x 9'	226	4,3	3,0	3,1	1,5	5,500
8' x 12'	302	5,2				6,000
8' x 14'	352	5,8				6,500
8' x 16'	402	6,4				9,000
10' x 14'	440	5,9				10,000
10' x 16'	503	6,5	3,6	3,7	1,8	10,500
10' x 17'	534	6,8				11,500
10' x 18'	565	7,1				11,700
10' x 20'	628	7,7				12,000
12' x 20'	754	7,8				4,2
13' x 24'	980	9,3	4,8	4,8	2,3	22,000
13' x 32'	1307	11,7	4,8	4,8	2,3	27,000

Fuente: BASS Ingeniería S.A Colombia.

**APENDICE D: Composición química del sulfato de aluminio comercial.**

Referencia	Contenido de Aluminio como % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Contenido de Hierro como % de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Contenido de Insolubles
Tipo B Sólido	15,3 % min.	2,0 % máx.	8 % máx.
Tipo B Líquido	7,3 % min.	1,2 % máx.	0,1 % máx.
Tipo A Sólido	17,0 % min.	0,75 % máx.	0,5 % máx.
Tipo A Líquido	8,0 % min.	0,4 % máx.	0,10 % máx.
Tipo Iron Free Sólido	17 % min.	0,008 % máx.	0,10 % máx.
Tipo Iron Free Líquido	8,3 % min.	0,004 % máx.	0,03 % máx.
Super B Especial	16,2 % min.	0,25 % máx.	4,5 % máx.

Fuente: Productos Químicos Panamericanos S.A. Colombia.

**APENDICE E: Composición química de la alúmina tipo Dense Corundum.**

Composición química	Arena (>0.1mm)	Polvo (=0.1 mm )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % ≥	99,0	98,6
SiO <sub>2</sub> % ≤	1,0	1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % ≤	0,15	0,2
TiO <sub>2</sub> % ≤	0,1	0,1
CaO%≤	0,1	0,1
MgO%≤	0,1	0,1
Na <sub>2</sub> O% ≤	0,1	0,1
C% ≤	0,12	0,14

Fuente: CE Minerals USA.



**APENDICE F: Datos técnicos para la selección de un tornillo sin fin.**

**Tabla F: Especificaciones técnicas para un tornillo sin fin.**

LONGITUD metros	DIAMETRO DEL TORNILLO SIN FIN	150 mm				200 mm				250 mm				300 mm							
		CAUDAL A 0°C				CAUDAL A 0°C				CAUDAL A 0°C				CAUDAL A 0°C							
		0°	15°	30°	45°	60°	0°	15°	30°	45°	60°	0°	15°	30°	45°	60°	0°	15°	30°	45°	60°
1	potencia CV	3	3	3	3	3	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	13,5 CV - 2 velocidades				
	caudal t/h	25	23	21	20	18	50	49	46	42	40	40	40	40	40	40	100	100	95	90	85
2	potencia CV	3	3	3	3	3	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	13,5 CV - 2 velocidades				
	caudal t/h	25	23	20	19	16	50	49	44	40	39	39	39	39	39	39	100	100	90	85	80
3	potencia CV	3	3	3	3	3	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	13,5 CV - 2 velocidades				
	caudal t/h	24	22	19	17	15	50	48	42	38	37	37	37	37	37	37	100	90	85	80	75
4	potencia CV	3	3	3	3	3	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	13,5 CV - 2 velocidades				
	caudal t/h	24	21	18	16	13	48	46	40	37	35	35	35	35	35	35	90	90	80	75	70
5	potencia CV	3	3	3	3	3	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	13,5 CV - 2 velocidades				
	caudal t/h	23	20	17	15	13	47	46	39	36	35	35	35	35	35	35	90	85	80	75	70
6	potencia CV	3	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	13	13	13	13	13	13	13	13,5 CV - 2 velocidades				
	caudal t/h	22	20	16	15	12	46	44	39	36	33	33	33	33	33	33	85	80	75	70	65
7	potencia CV	3	3	5,5	7,5	7,5	7,5	7,5	13	13	13	13	13	13	13	13,5 CV - 2 velocidades					
	caudal t/h	22	19	16	14	12	46	44	37	34	31	31	31	31	31	31	80	75	70	65	60