



# CÁLCULO DE UN HORNO DE TAMBOR ROTATORIO PARA LA CALCINACIÓN DE ARCILLAS

Tesis en opción al título de Ingeniería en Metalurgia y Materiales

AUTOR: Mario E. Castillo Sosa



# CÁLCULO DE UN HORNO DE TAMBOR ROTATORIO PARA LA CALCINACIÓN DE ARCILLAS

Tesis en opción al título de Ingeniería en Metalurgia y Materiales

AUTOR: Mario E. Castillo Sosa

TUTORES: Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes

Moa, 2023

## **PENSAMIENTO**

*“La perfección no es alcanzable, pero si perseguimos la  
excelencia conseguiremos la grandeza.”*

*Vince Lombardi*

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo primeramente a Dios, porque cuando más ahogado estuve buscando apoyo en él; a mi familia; en especial a mis padres, hermanos y a mi novia, que estuvieron presentes en cada movimiento y etapa de mi carrera, así como en mi trabajo de tesis, a la ingeniera Adianes Ferrer Batista, por su apoyo y ayuda tanto profesional como personal. Gracias a ellos por su apoyo incondicional.*

*Gracias a todos los profesores de la carrera de Metalurgia y Materiales, que fueron quienes nos instruyeron como futuros ingenieros.*

*Gracias a mis tutores Roger Almenares y a José Carmenaty, por su tiempo e información brindada en la realización de este trabajo*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecido siempre, por el apoyo y esfuerzo de mis padres, Mario y Barbara, de mis hermanos y de mi novia, quienes a pesar de la distancia estuvieron conmigo en cada momento, en cada victoria y cada derrota, agradecido de tenerles. Gracias a mis tíos Gustavo y Yaritza, por su preocupación, amor y ayuda.*

*Gracias a todos los profesores de la carrera de Metalurgia y Materiales, que fueron quienes nos instruyeron como futuros ingenieros.*

*Gracias a mis tutores Dr. Roger Almenares y a Ing. José Carmenaty, por su tiempo e información brindada en la realización de este trabajo.*

*Zuiero dar las gracias a mis compañeros de aula, que fueron los de cuarto también por ser como una familia, por los tiempos que pasamos, por su influencia en el campo profesional y personal.*

*Agradecido especialmente con la ya Ingeniera Adianes, por su tiempo y ayuda en el desarrollo de esta tesis y consejos profesionales y personales.*

## **RESUMEN**

La inexistencia de los parámetros técnicos y mecánicos para el diseño de un horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcilla en la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel conllevó a calcular un horno de tambor para la calcinación de arcillas en el Centro de Investigaciones del Níquel, considerando aspectos técnicos y mecánicos. Basado en la caracterización de la arcilla, y la metodología para el balance de masa y energía, se definió un tiempo de residencia del material en el horno de 19 minutos, con una velocidad de rotación de 3,5 rpm y un flujo de alimentación de mineral al horno se establece en 178,31 kg/min. El índice de consumo de combustible es de 42,90 kg de Fuel oil por tonelada de arcillas alimentadas. Por otro lado, se determinó que el 89 % del calor utilizado se consume en la reacción de transformación del producto, y un 10 % en el calentamiento y evaporación del agua. Se propuso como revestimiento del horno calculado una cubierta de acero y ladrillos refractarios silico-aluminosos, con una capa de chamota como aislante térmico.

## **ABSTRACT**

The absence of technical and mechanical parameters for designing a rotary kiln for clay calcination at the Nickel Research Center's pilot plant led to the calculation of such a kiln, taking into consideration technical and mechanical aspects. Based on clay characterization and the methodology for mass and energy balance, a residence time of 19 minutes for the material in the kiln, a rotational speed of 3.5 rpm, and a mineral feed rate of 178.31 kg/min were established. The fuel consumption rate is 42.90 kg of fuel oil per ton of clay fed. Additionally, it was determined that 89% of the heat used is consumed in the product transformation reaction, while 10% is allocated to the heating and evaporation of water. For the calculated kiln lining, a steel cover and silico-aluminous refractory bricks were proposed, with a chamotte layer as thermal insulation.

| <b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>  | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO .....</b>  | <b>4</b>    |
| 1.1. Calcinación de arcillas caoliníticas.....  | 4           |
| 1.2. Tecnologías para la calcinación de arcillas .....  | 5           |
| 1.3. Horno rotatorio .....  | 6           |
| 1.4. Partes del horno rotatorio.....  | 7           |
| 1.4.1. Cuerpo del horno.....  | 7           |
| 1.4.2. Carcasa .....  | 7           |
| 1.4.3. Revestimiento interior del horno .....   | 8           |
| 1.5. Grado de llenado .....   | 15          |
| 1.6. Pendiente del horno .....  | 16          |
| 1.7. Velocidad del horno .....  | 17          |
| 1.8. Tiempo de residencia y caudales de material en el horno rotatorio .....  | 17          |
| Conclusión del capítulo 1 .....   | 18          |
| <b>CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>   | <b>19</b>   |
| 2.1. Proceso tecnológico propuesto para la calcinación de arcillas en el Centro de Investigaciones del Níquel ..... | 19          |
| 2.2. Caracterización de los materiales empleados.....   | 20          |
| 2.2.1. Caracterización de la arcilla natural o mena inicial.....  | 20          |
| 2.2.2. Caracterización del combustible.....   | 22          |
| 2.3. Leyes y ecuaciones empleadas .....   | 23          |
| 2.4. Metodología para realizar balances de masa y energía del proceso de calcinación .....                          | 25          |
| 2.4.1. Balance de masa.....   | 25          |
| 2.4.2. Cálculo del mineral seco .....   | 26          |



|  |           |
|--|-----------|
| 2.4.3. Cálculo del mineral húmedo .....  | 27        |
| 2.4.4. Cálculo del combustible (Fuel oil).....                                   | 27        |
| 2.4.5. Cálculo de polvo .....  | 27        |
| 2.4.6. Cálculo del producto final .....  | 28        |
| 2.4.7. Cálculo de gases salientes del horno de calcinación .....                 | 28        |
| 2.5. Balance de energía .....  | 28        |
| 2.6. Situación mecánica .....  | 32        |
| Conclusión del capítulo 2 .....  | 35        |
| <b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>                | <b>36</b> |
| 3.1. Resultados del balance de masa para el proceso de calcinación .....         | 36        |
| 3.1.1. Cálculo de la arcilla seca .....  | 36        |
| 3.1.2. Cálculo de la mena húmeda .....   | 37        |
| 3.1.3. Cálculo del producto final del proceso de calcinación .....               | 37        |
| 3.1.4. Cálculo del polvo arrastrado con los gases .....                          | 38        |
| 3.1.5. Cálculo del combustible (Fuel Oil) .....                                  | 38        |
| 3.1.6. Cálculo de los gases salientes .....                                      | 40        |
| 3.2. Resultados del balance de energía del proceso de calcinación.....           | 41        |
| 3.3. Elementos de diseño de horno de tambor rotatorio para calcinar arcilla..... | 42        |
| 3.3.1. Diseño de transmisión .....   | 42        |
| 3.3.2. Sistema de rodamiento.....  | 43        |
| 3.3.3. Sistema de alimentación .....   | 44        |
| 3.3.4. Sistema de quemado.....   | 44        |
| 3.3.5. Extractor de gases.....   | 45        |
| 3.3.6. Resumen de los parámetros y dimensionamiento del horno .....              | 45        |
| Conclusión del capítulo 3 .....  | 46        |

**CONCLUSIONES GENERALES ..... 47**  
**RECOMENDACIONES ..... 48**  
**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 49**

## INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas junto a la Instituto Tecnológico Federal de Lausana (EPFL) en colaboración con otras instituciones ha desarrollado y producido un nuevo sistema cementicio basado en la combinación de materiales arcillosos calcinados, caliza, yeso y clínquer, conocido genéricamente LC3, por su designación en idioma inglés Limestone Calcined Clay Cement, que permite la sustitución de hasta un 50 % clínquer. Otra de sus formulaciones, en ausencia de clinker se puede utilizar cemento P-35, arcilla calcinada, caliza, yeso). La mezcla de arcilla calcinada, caliza, yeso se denomina LC2, el cual permite la sustitución de 50 % de P-35 (Almenares-Reyes, 2020).

Como principales experiencias a escala industrial se tiene la producción de LC3 en el año 2013, realizada en la Fábrica de Cemento Siguaney, donde se empleó como materia prima fundamental las arcillas provenientes del yacimiento Pontezuela en Camagüey, con exitosos resultados en la aplicación del nuevo cemento y características similares a un cemento P-35 (Martirena et al., 2016). En diciembre de 2018 se realizó otra prueba industrial en la misma planta de cemento pero con materia prima arcillosa proveniente del depósito Yaguajay, Sancti Spíritus (Martirena and Alujas, 2020). En esta última ocasión se produjeron 1500 t de LC2. En ambos casos se obtuvieron hormigones con prestaciones similares a las mezclas que utilizan 100 % P-35.

Moa cuenta con valiosos recursos minerales no metálicos en sus yacimientos de aluminio, los cuales han sido recomendados para su uso como materia prima en la fabricación de productos refractarios y ladrillos cerámicos para la construcción (Pons and Leyva, 1996; Pons et al., 1997; Njila et al., 2010a, 2010b; Njila and Díaz-Martínez, 2016). En investigaciones más recientes se han descubierto las potencialidades de los depósitos arcillosos en la región de Cayo Guam como una fuente de materia prima para la producción de materiales cementicios adicionales. Estas arcillas han demostrado tener una alta reactividad en comparación con otras arcillas evaluadas en el país, tal como se ha reportado en diversos artículos científicos, trabajos de diploma y tesis de

maestría y doctorado (Almenares-Reyes et al., 2016; Poll-Legrá et al., 2016; Almenares, 2017). Esta situación abre el camino para el desarrollo de una importante industria en la región, que podría satisfacer la creciente demanda de cemento y fomentar el desarrollo económico a través de la actividad minera en esta zona estratégica de desarrollo industrial.

Existen alternativas tecnológicas para la producción de este sistema en Moa, dentro de las que se destaca el montaje de una planta a pequeña escala a partir de la experiencia en el país en la inversión de pequeñas unidades productivas de LC3. Sin embargo, la situación económica por la que atraviesa el país es muy difícil conseguir créditos internacionales para lograr una compra de este tipo de equipamiento en la actualidad.

Otra alternativa se basa en la experiencia en el sector industrial, donde existen tecnología que puede ser adaptadas a la producción de arcilla calcinada, que cuentan con sistema de molienda, secado, sistemas de limpieza y captación de gases e instrumentación y control en general. Uno de estos ejemplos se encuentra en el Centro de Investigación del Níquel (CEDINIQ), el cual posee una planta piloto, que tiene como fin la realización de investigaciones relacionadas con la industria niquelífera pero que prácticamente la mitad del año está subutilizada. La planta cuenta con prácticamente todos los elementos y accesorios de control necesarios para la producción de 1 a 1.5 t/h de este aglomerante, pero no posee un calcinador que es el núcleo para la producción de arcillas calcinadas.

De aquí surge la necesidad de calcular un calcinador con una capacidad de 1 t/h que permita completar el esquema productivo de cemento como primera alternativa valorada.

El **problema de investigación** radica en la falta de parámetros técnicos y mecánicos como base para el diseño de un horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcilla en la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel.

El **objeto de estudio** lo constituye el horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcilla y el **campo de acción** son los parámetros técnicos y mecánicos del horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcillas.

El **objetivo general** es calcular un horno de tambor para la calcinación de arcillas en el Centro de Investigaciones del Níquel, considerando aspectos técnicos y mecánicos.

Para cumplir el objetivo general propuesto se trazaron los siguientes **objetivos específicos**:

- Determinar los parámetros operacionales para la calcinación de arcilla en un horno de tambor rotatorio tiempo de residencia, velocidad de rotación y el flujo de alimentación).
- Realizar el balance de masa y energía de un horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcilla.
- Proponer los elementos generales de diseño del horno, incluyendo los materiales para el revestimiento del horno para evitar elevadas pérdidas de calor al medio.

La hipótesis que se sostiene entonces es:

Si se calcula un horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcilla en el Centro de Investigaciones del Níquel, sobre la base de criterios técnicos y mecánicos proporcionará el tiempo de residencia, velocidad de rotación y el flujo de alimentación, índice de consumo de combustible, y los materiales para el revestimiento del horno.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Calcinación de arcillas caoliníticas

La arcilla se calienta a una temperatura lo suficientemente alta para que los grupos hidroxilo se desprendan y se libere como agua. Este proceso de descomposición de la estructura cristalina se conoce como deshidroxilación y puede hacer que la arcilla tenga una estructura parcialmente desordenada y reactiva en cementos (Frost and Vassallo, 1996). La reacción de deshidroxilación es endotérmica y se ha informado que ocurre en más de un paso (Tomeczek and Palugniok, 2002; IZADIFAR et al., 2020). Las reacciones para formar productos deshidroxilados se muestran en las ecuaciones 1 para la calcinación de la caolinita (arcilla 1:1). La Figura 1.1 resume los diferentes tipos de reacciones o transformaciones que ocurren durante la calcinación, junto con los rangos de temperatura correspondientes en sistemas de calcinación convencionales.

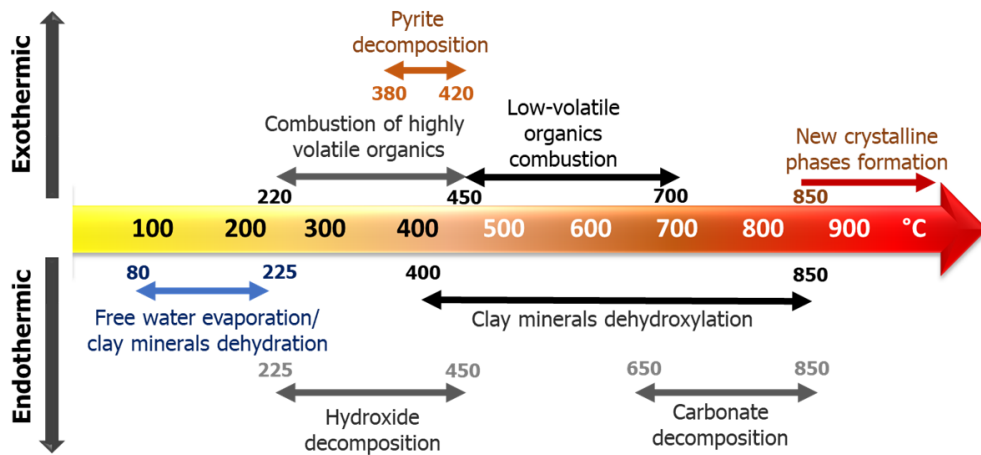
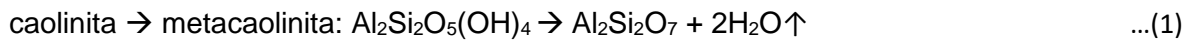


Figura 1.1. Intervalo de temperatura de las reacciones comunes que tienen lugar durante la calcinación de arcillas. Tomado de (Hanein et al., 2022)

Al comenzar el calentamiento de la arcilla se produce una pérdida del agua sobre la superficie y el agua libre interlamilar (agua adsorbida y absorbida) hasta temperaturas de alrededor de 200 °C (deshidratación), y en algunas arcillas este fenómeno se extiende hasta 250 °C (Todor, 1976; Földvári, 2011). A temperaturas superiores, entre los 350 y 850 °C, en dependencia de la naturaleza de la arcilla, ocurre la remoción de los OH<sup>-</sup> estructurales (deshidroxilación) (Todor, 1976; Földvári, 2011). Varios autores

han notificado la deshidroxilación de los minerales del grupo de la caolinita en un amplio rango de temperatura entre 350 y 700 °C (Todor, 1976; He et al., 1994; Frost and Vassallo, 1996; Kakali et al., 2001; Shvarzman et al., 2003; Bich et al., 2009; Földvári, 2011). El grupo de la esmectitas, donde aparece la montmorillonita como mineral más representativo del grupo, tiene lugar la deshidroxilación en el intervalo de temperatura entre 400-850 °C (Todor, 1976; Brown et al., 1987; Földvári, 2011), mientras que los minerales del grupo de la illita pierden sus OH<sup>-</sup> estructurales entre 400 y 900 °C (Todor, 1976; Ramachandran et al., 2002; Jiang et al., 2008; Földvári, 2011). Sin embargo, la temperatura real de deshidroxilación dependerá de varios factores que incluyen la finura de la arcilla, la presión de la atmósfera que rodea a la arcilla, en particular la presión parcial de vapor de agua (IZADIFAR et al., 2020), y también de las características estructurales del mineral arcilloso (como vacantes trans o cis; trioctaédrico o dioctaédrico) y la cristalinidad (Wolters and Emmerich, 2007).

Si la temperatura se incrementa más allá del rango de deshidroxilación, se produce el fenómeno de recristalización, dando lugar a la formación de nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas. Estas fases incluyen espinelas del tipo Si-Al y Mg, mullita, pseudo-mullita, cuarzo, cristobalita, cordierita y enstatita (Bradley and Grim, 1951; G W Brindley and Nakahira, 1959a, 1959b; G. W. Brindley and Nakahira, 1959; Ramachandran et al., 2002; Alujas, 2010; Földvári, 2011). El fenómeno de recristalización para el grupo de la caolinita suele ocurrir generalmente en el rango de 900 a 1000 °C, mientras que para las esmectitas ocurre entre los 850 y los 1000 °C. En el caso de la illita, este fenómeno puede observarse en un amplio rango que va desde los 900 hasta los 1200 °C (Todor, 1976; Földvári, 2011; Snellings, 2011).

## **1.2. Tecnologías para la calcinación de arcillas**

Dentro de las tecnologías más usadas para la calcinación de arcillas se reporta la calcinación en hornos de tambor rotatorio y la calcinación flash (Hanein et al., 2022). Otras tecnologías emergentes que pueden tenerse en cuenta son la calcinación por microondas (Kitchen et al., 2014), la calcinación por calentamiento solar (Meier et al., 2004), el procesamiento por plasma térmico (Samal, 2017) y la calcinación en lecho fluidizado (Muntianu et al., 2013).

La tecnología de horno de tambor rotatorio se ha utilizado para la calcinación de arcillas, y es una tecnología robusta y tolerante a altos contenidos de humedad y distribuciones fluctuantes de tamaño de partículas, en esta se puede lograr operaciones eficientes a escala industrial donde se logra una calcinación relativamente uniforme con un tiempo de residencia de menos de 1 hora a la temperatura de calcinación (Almenares et al., 2017). A medida que la temperatura aumenta, puede ocurrir la aglomeración de partículas de arcilla, lo que aumenta el diámetro medio y disminuye el área de superficie específica (Alujas et al., 2015).

### **1.3. Horno rotatorio**

El horno rotatorio es básicamente un cilindro que es soportado sobre baleros y que posee cierta inclinación sobre la horizontal. Está dotado de una transmisión que le permite rotar sobre su eje longitudinal, se alimenta con el material a calcinar por su extremo superior, mientras el horno rota el material desciende a través de este en paralelo o contracorriente con el flujo de gases calientes que desecan y calcinan la arcilla, descargándose ésta por el extremo inferior del horno (Rodas Ríos, 2005).

El calentamiento en un horno se logra mediante la combustión de gases calientes, como gas natural, fuel-oil u otros combustibles, en los quemadores ubicados en el extremo inferior del horno Figura 1.2. Estos gases generan calor a medida que se queman y fluyen a través del horno hacia la chimenea, que está ubicada en el extremo superior del horno. El extremo inferior del horno tiende a tener una temperatura más alta debido a la combustión de los gases en los quemadores. A medida que los gases fluyen a través del horno, van liberando calor gradualmente hasta llegar a la chimenea. Por otro lado, la carga de material en el horno se realiza desde el extremo superior. A medida que el material se desliza o se mueve de un extremo a otro del horno, en dirección opuesta al flujo de los gases, va ganando calor del ambiente caliente del horno. Esto permite que el material se caliente gradualmente mientras atraviesa el horno (Cárdenas Suquillo, 2014).



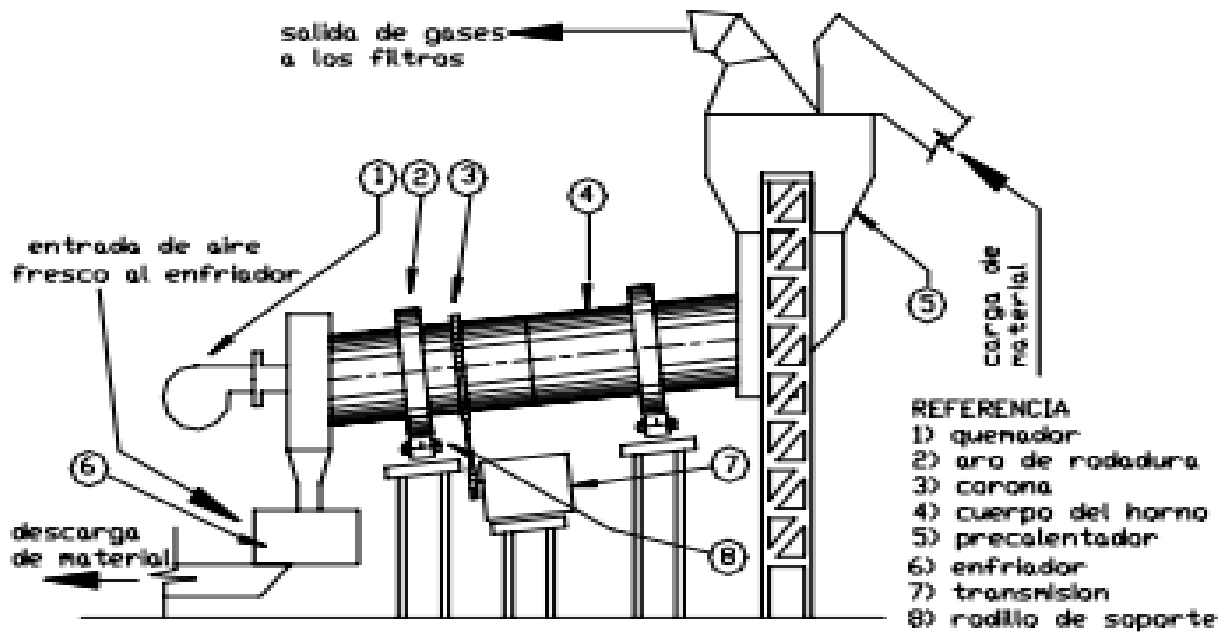


Figura 1.2. Esquema de un Horno de tambor rotatorio en una planta. Tomado de (Rodas Ríos, 2005)

## 1.4. Partes del horno rotatorio

### 1.4.1. Cuerpo del horno

La parte principal del horno la constituye el cuerpo (Figura 1.3), que está formado por la carcasa de acero y por el refractario que ocupa toda la superficie interna de la propia virola y que soportará las elevadas temperaturas de operación (Ramayo Ramos, 2008)

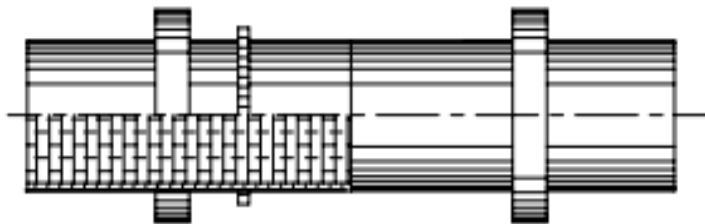


Figura 1.3. Cuerpo del horno de tambor rotatorio

### 1.4.2. Carcasa

La estructura de los modernos hornos rotatorios se construye mediante la soldadura de virolas de acero al 1% de carbono, que tienen un ancho y espesor considerable. El espesor varía dependiendo de la temperatura en cada zona del horno.

La temperatura de la carcasa es crucial en el proceso de cocción, por lo tanto, es común controlarla desde una sala de control utilizando anillos colectores de termopar

ubicados a lo largo del horno. Estos termopares indican y registran las temperaturas internas. Un aumento de la temperatura en una zona específica de la carcasa externa puede ser señal de que se ha perdido parte del revestimiento refractario en esa área, lo cual resulta en una mayor pérdida de calor hacia el exterior. Es importante que la carcasa esté adecuadamente refrigerada con dispositivos de agua o aire.

La carcasa se reviste internamente con ladrillos refractarios para evitar el sobrecalentamiento del acero, lo cual debilitaría la estructura. A veces, se utilizan dos capas de revestimiento en el interior del horno, siendo el revestimiento adherido a la carcasa el que proporciona aislamiento. No es común usar aislamiento en el exterior de la carcasa para evitar el sobrecalentamiento debido a la confinación.

En un horno rotatorio con su extremo frío revestido internamente, es crucial lograr un sellado perfecto entre el revestimiento y la carcasa de acero, ya que podría haber fugas de líquido que atravesasen el revestimiento y lleguen a la envoltura, especialmente cuando se utiliza alimentación húmeda (Ramayo Ramos, 2008).

Con el uso del horno en diferentes empresas, se ha demostrado que la refrigeración de la chapa del horno influye en la duración del refractario. Según (Ramayo Ramos, 2008), el dispositivo de refrigeración consiste en tuberías de riego de con una longitud determinada según el tamaño del horno. Estas en su totalidad tienen agujeros para el riego, son alimentadas individualmente por secciones a lo largo del cilindro del horno. Dicha refrigeración se realiza de manera paulatina, y así se impide un enfriamiento brusco. Además de la refrigeración por agua, también está la refrigeración por aire mediante moto ventiladores, el número de estos varía según las dimensiones del horno.

### **1.4.3. Revestimiento interior del horno**

Para proteger el casco metálico del horno, del calor que en su interior se genera, es necesario brindarle un revestimiento especial, que además de favorecer el ahorro energético, proteja el casco de lámina de acero soldada, ya que éste sufre considerables deformaciones a causa de altas temperaturas (Rodas Ríos, 2005).

El revestimiento interno del horno puede ser de dos tipos, revestimiento refractario y revestimiento aislante, en hornos de calcinación suele encontrarse revestimientos sólo

de refractario o una combinación de refractario y aislante, pero, no es usual encontrar únicamente aislante, por su baja resistencia mecánica (Rodas Ríos, 2005).

Los requisitos que el forro refractario del horno ha de cubrir corresponden a las propiedades siguientes:

- Resistencia mecánica.
- Poder refractario bajo presión.
- Estabilidad ante los cambios de temperatura.
- Capacidad de resistencia química.
- Dilatación por el calor o estabilidad de volumen.
- Conductividad térmica y espesor de refractario.
- Resistencia al rozamiento.

**Resistencia mecánica:** los valores exigidos de resistencia mecánica para los ladrillos de refractario con alto contenido en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es de 350-500  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , y para los ladrillos de dolomita o magnesita 500-700  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Determinar la resistencia mecánica de los ladrillos refractarios en condiciones de frío es un método sencillo que sirve como punto de partida para evaluar su rendimiento a temperaturas de trabajo en los hornos. Es importante tener en cuenta la estabilidad de la carcasa de chapa del horno y sus posibles deformaciones durante su funcionamiento. La deformación máxima, conocida como desviación de la forma circular del horno, generalmente se produce cerca de los anillos de rodadura y soporte del horno. También puede producirse una deformación radial, conocida como ovalidad, que es la diferencia en longitud entre el diámetro vertical y horizontal de la sección del horno durante la rotación, y puede llegar a ser hasta un 0.3% del diámetro. Si el revestimiento refractario no puede soportar las compresiones y expansiones cíclicas resultantes de dichas deformaciones, esto podría conducir a su destrucción.

**Poder refractario bajo presión:** La resistencia a la carga térmica y la presión se evalúa al determinar la temperatura a la cual el material refractario comienza a ablandarse bajo una presión de 2  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Sin embargo, es importante destacar que una

mayor resistencia a la carga térmica y presión no necesariamente garantiza un buen comportamiento, ya que esto puede obstaculizar la formación de una costra protectora.

**Estabilidad ante los cambios de temperatura:** durante el ciclo de operación del horno, que generalmente dura un minuto, el revestimiento refractario del horno se expone a dos fuentes de calor diferentes. Por un lado, se enfrenta a la alta temperatura de los gases del horno, y por otro lado, se expone al material en reacción, que está a una temperatura más baja. Esto genera variaciones repetitivas de temperatura en la superficie del ladrillo, de aproximadamente 400 °C. La capacidad de soportar estos cambios térmicos repetidos se conoce como resistencia a los cambios de temperatura.

Para evaluar la estabilidad ante los cambios de temperatura, se realiza un ensayo en el que se calienta el ladrillo a 950 °C y luego se enfría rápidamente sumergiéndolo en agua fría durante 3 minutos. Este procedimiento se repite hasta que el ladrillo haya perdido el 50% de su peso inicial. Los ladrillos con alto contenido de alúmina deben resistir de 15 a 25 ciclos, mientras que los ladrillos de magnesita deben resistir de 5 a 15 ciclos antes de experimentar una pérdida de peso significativa.

**Capacidad de resistencia química:** Cuando la carga sólida a ser cocida tiene un alto contenido de CaO (65%), se caracteriza por tener un carácter fuertemente básico. En la zona de sinterización, donde las temperaturas son altas, el material exhibe una actividad química muy intensa en relación con el revestimiento del horno. En esta zona, el material contiene aproximadamente un 20-25% de fase fundida, lo que aumenta aún más su reactividad hacia el ladrillo refractario. Este material agresivo en la zona de sinterización afecta casi todos los materiales refractarios, excepto aquellos que tienen características básicas como la dolomita y la magnesita, que son inmunes a la reacción química del clinker.

**Dilatación por el calor o estabilidad de volumen:** A pesar de que el coeficiente de dilatación de la chapa de acero envolvente del horno es más alto que el del revestimiento refractario, la expansión lineal es menor. Esto se debe a que normalmente la temperatura de la chapa no supera los 280-365 °C, mientras que la temperatura promedio del revestimiento refractario está entre 800-900 °C. En la zona de sinterización, la cara interna puede alcanzar temperaturas de hasta 1350-1400 °C, lo

que puede generar fuertes compresiones que pueden conducir al desconchamiento de la capa superior del ladrillo.

**Conductividad térmica y espesor de refractario:** La conductividad térmica y el espesor del revestimiento refractario son factores importantes en la pérdida de calor a través del revestimiento del horno. En la mayoría de los casos, la conductividad térmica de los refractarios aumenta con la temperatura, pero en el caso de la magnesita y la dolomita ocurre lo contrario. La conductividad térmica está vinculada en gran medida con la porosidad del material refractario. La chapa del horno tiene un coeficiente de conductividad térmica de  $\lambda=40$  kcal/mh°C. Si la conductividad térmica del revestimiento refractario es muy alta, se producirá un aumento significativo en la temperatura de la chapa, lo cual ocasionará mayores pérdidas de calor. Por otro lado, si la conductividad térmica es baja, se dificultará la formación de una costra protectora. Además de la conductividad térmica, el espesor del revestimiento refractario es también muy importante.

**Resistencia al rozamiento:** La resistencia al rozamiento es otro aspecto para considerar. Durante la rotación del horno, el material que se desliza sobre el revestimiento refractario genera fricción en los ladrillos. La resistencia al rozamiento depende de la resistencia a la compresión del ladrillo refractario. Esta resistencia se mide en  $\text{cm}^3$  por  $\text{cm}^2$  de superficie expuesta a la fricción. Los ladrillos refractarios de magnesita y dolomita con alto contenido de alúmina deben tener una resistencia al rozamiento no superior a  $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ . Los ladrillos refractarios con una resistencia al rozamiento mayor a  $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  no deben usarse para revestir el horno rotatorio (Ramayo Ramos, 2008).

### **Clasificación del revestimiento**

El revestimiento refractario suele ser un material duro y resistente al calor y al desgaste. Es importante que sea compatible con el material que se va a someter a calcinación, ya que de lo contrario podría ocurrir una reacción química entre ambos. Existe una amplia variedad de productos refractarios disponibles, que se pueden seleccionar en función de la temperatura a la que serán expuestos, las condiciones de trabajo, la

compatibilidad química, la resistencia mecánica y las condiciones de instalación, entre otros factores. Estos productos refractarios se pueden clasificar según su composición química y su forma de presentación (Rodas Ríos, 2005).

### **Clasificación por composición química**

En cuanto a la composición química, los refractarios utilizados para la calcinación de arcillas en hornos rotatorios se dividen generalmente en dos categorías principales: refractarios básicos y refractarios silico-aluminosos. Los refractarios básicos son preferidos debido a su resistencia química y su capacidad para favorecer ciertas reacciones, como en el caso de los hornos de cemento, aunque son sensibles al choque térmico. Por otro lado, los refractarios silico-aluminosos son preferidos cuando se requiere resistencia al choque térmico, lo que les permite soportar paradas más frecuentes en comparación con los refractarios básicos. Aunque su resistencia química es menor, su costo es considerablemente más bajo. Además, su capacidad para soportar altas temperaturas aumenta con un mayor contenido de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Rodas Ríos, 2005).

### **Clasificación por su presentación**

Los productos refractarios según su presentación se clasifican de la siguiente manera:

- ladrillo refractario
- concreto refractario
- mortero refractario
- apisonable o plástico refractario

El **ladrillo refractario**: es el más difundido, posee una resistencia mecánica muy elevada en virtud que durante su fabricación es comprimido y horneado a una temperatura adecuada, esto lo hace capaz de soportar no sólo altas temperaturas, sino también, desgaste superficial y es colocado según se muestra en la Figura 1.4.

El **concreto refractario**: es fabricado sobre la base de un material de relleno y un aglutinante, en esencia, un cemento de cualidades refractarias mezclado íntimamente con material de relleno que puede ser ladrillo refractario triturado.

El **mortero o cemento refractario**: es necesario como elemento de enlace en todo montaje que requiere de ladrillo refractario, consiste en un material capaz de brindar solidez y acabado a las uniones de ladrillo refractario.

Los **apisonables o plásticos refractarios son materiales**: cuya plasticidad es notoria, se aplican colocándolos sobre la superficie a cubrir y golpeándolos con una herramienta con la cabeza de forma adecuada, de tal manera que el apisonable se adhiera fuertemente a la superficie por cubrir, una vez colocados requieren de un tratamiento térmico anterior a su puesta en funcionamiento; su resistencia mecánica es limitada (Rodas Ríos, 2005).

### **Calidades o tipos de ladrillos refractarios**

Los ladrillos refractarios comunes son del tipo bajo en alúmina, contándose con ladrillos de entre 20 y 30 % de alúmina, puede considerarse las siguientes capacidades de algunos ladrillos refractarios.

20 % alúmina 1,200 °C

32 % alúmina 1,500 °C

También es posible encontrar comercialmente, ladrillos refractarios de alta alúmina que tienen aplicación en los rangos indicados a continuación (Rodas Ríos, 2005).

50 % alúmina 1,763 - 1,785°C

60 % alúmina 1,804 - 1,820°C

70 % alúmina 1,820 - 1,835°C

80 % alúmina 1,835 - 1,865°C

### **Colocación del revestimiento refractario**

La colocación del revestimiento refractario en el horno se realiza primordialmente según tres modalidades:

#### **Con mortero**

La colocación del refractario con mortero en el horno rotatorio se realiza utilizando morteros especiales, y es el procedimiento más usado. Después de haber colocado los ladrillos en el semicírculo inferior del horno sobre mortero, hasta la línea media horizontal del horno, se asegura por presión sobre la chapa del horno mediante husillos, después de lo cual es girado el horno 90° dos veces para disponer el ladrillo restante sobre el otro semicírculo. Utilizando mortero, la colocación del revestimiento del horno se hace enlazándolo longitudinalmente (Ramayo Ramos, 2008).

### **A hueso o en seco**

Mediante este método, la colocación del ladrillo se hace individualmente por anillos completos, paralelos a la circunferencia del horno, con la ventaja de que no es necesario girar el horno para realizarla.

La colocación del refractario a hueso se realiza por anillos, después de poner las correspondientes al semicírculo inferior, de cada anillo, se sitúa sobre ellos el andamio en arco, sobre el que después se realiza la colocación de la mitad superior del anillo. Cada uno de los ladrillos de esta parte superior hasta poner el que cierra el anillo, se sujeta sobre la chapa mediante tornillos (Ramayo Ramos, 2008).

### **Mediante la utilización de pegamento**

En los hornos de gran diámetro, no resulta fácil manejar el andamio ni es segura la sujeción con tornillos, además existe la posibilidad de deformar la chapa del horno. Por ello se ideó el procedimiento para revestir hornos de gran diámetro por pegamento sin la ayuda de dispositivos adicionales. En este procedimiento se utilizan pegamentos de gran poder adhesivo que fijan ladrillos refractarios a la chapa del horno. El pegamento usual es una resina artificial modificada (epiclorhidrina y difenilpropano) cuyo poder adhesivo sobrepasa la resistencia a la tracción de los ladrillos. La colocación se realiza poniendo series de ladrillos en franjas preparadas y ladrillos sueltos dispuestos entre aquellos. Sólo se pega a la chapa el 25-30% de los ladrillos refractarios (Ramayo Ramos, 2008).



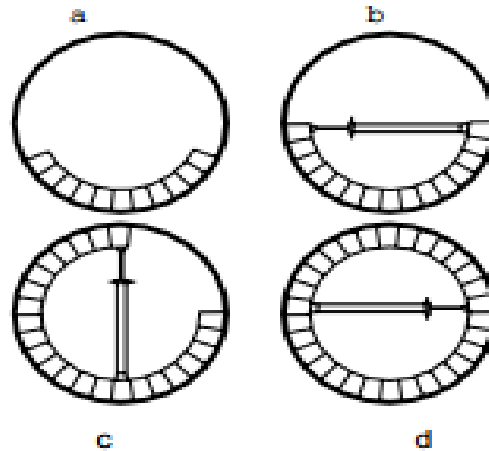


Figura 1.4. Esquema de montaje de ladrillo refractario en el horno de tambor rotatorio

### 1.5. Grado de llenado

El material en el interior del horno no ocupa toda el área transversal disponible, solamente una pequeña fracción de ésta, para permitir el transporte e intercambio de calor. Se denomina grado de llenado al porcentaje de área transversal interior del horno.

Según Walter Duda (Duda, 1977), los grados de llenado fluctúan entre los límites del 5 al 17 %, pero Allis Chalmers , considera que el grado de llenado normal es de 10% y que éste es utilizado para los cálculos de la potencia requerida por el horno (Figura 1.5).

El horno es alimentado automáticamente por un dosificador helicoidal (de gusano) u otro dispositivo adecuado, lo que en cierta manera determina la cantidad de material dentro de él y con ello el grado de llenado durante la operación. El grado de llenado también está relacionado con la pendiente, la velocidad del horno y la relación de longitud del casco a su diámetro  $L/D$  (Rodas Ríos, 2005).

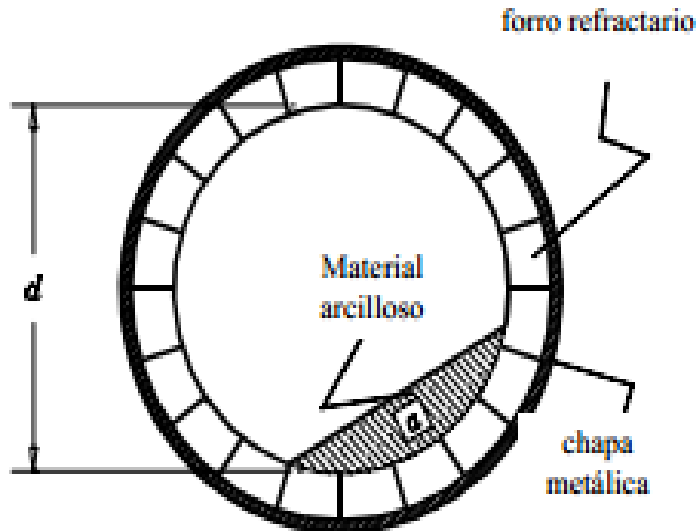


Figura 1.5. Grado de llenado del horno de tambor rotatorio

### 1.6. Pendiente del horno

El material dentro del horno se traslada gracias al movimiento rotatorio, pero se desplaza a través de este, desde un extremo hacia el otro porque el horno cuenta con una inclinación llamada pendiente.

La pendiente de los hornos varía en un rango que va del 2% al 6%, según Walter Duda "la mayoría de los hornos están instalados con pendientes entre el 2-4% con relación a la horizontal...", la pendiente del horno se relaciona con el grado de llenado, de forma tal que al aumentar ésta disminuye el grado de llenado (Rodas Ríos, 2005).

Tabla 1.1. Grado de llenado en función del ángulo

| ÁNGULO $\alpha$ (GRADOS °) | LLENADO DEL HORNO % |
|----------------------------|---------------------|
| 110                        | 15.65               |
| 105                        | 13.75               |
| 100                        | 12.10               |
| 95                         | 10.70               |
| 90                         | 9.09                |
| 85                         | 7.75                |
| 80                         | 6.52                |
| 75                         | 5.40                |
| 70                         | 4.50                |

### 1.7. Velocidad del horno

El término velocidad del horno, se refiere a la rapidez con que, rota el horno sobre su eje, es decir, es la cantidad de revoluciones, o de vueltas que da el horno en un minuto (Rodas Ríos, 2005).

Tabla 1.2. Pendiente del horno contra grado de llenado

| PENDIENTE | LLENADO DEL HORNO % |
|-----------|---------------------|
| 4.5       | 9                   |
| 4.0       | 10                  |
| 3.5       | 11                  |
| 3.0       | 12                  |
| 2.5       | 13                  |

### 1.8. Tiempo de residencia y caudales de material en el horno rotatorio

El tiempo de residencia o de retención es el tiempo promedio que permanece el material en el interior del horno; dicho en otras palabras, el tiempo promedio necesario para que el material recorra el horno de extremo a extremo.

El tiempo de residencia es una variable muy importante, ya que la calidad del material obtenido dependerá en gran medida del tiempo de residencia y de la temperatura de calcinación; para la estimación de los valores óptimos relativos a estos parámetros, es necesario realizar pruebas de calcinación a nivel de laboratorio para la arcilla que sea la base del proyecto. El tiempo de residencia del material se ve afectado entre otras cosas por el ángulo de reposo del material, que es aquel ángulo respecto de la horizontal, aplicado a una superficie sobre la que descansa el material y que provoca que éste se deslice sobre la superficie, es decir, resbale sin mediar otra fuerza externa sobre él más que su propio peso y la fricción, este ángulo es típico de cada material.

Es también conocido como "talud natural del material", cuyo valor para caliza y arcilla por vía seca es aproximadamente de 36°. El tiempo de residencia determinará el flujo de material dentro del horno, por lo que éste es uno de los parámetros básicos para el diseño. Al fijar esta variable puede calcularse otras, para el dimensionamiento del horno (Rodas Ríos, 2005).

## **Conclusión del capítulo 1**

En el capítulo se realizó un estudio y resumen de diferentes fuentes de información para tener un mayor conocimiento sobre la necesidad de desarrollar el trabajo, el proceso de calcinación de arcillas y la estructura del horno de tambor rotatorio:

- La temperatura de calcinación de las arcillas caoliníticas es comúnmente mayor que su temperatura de deshidroxilación más allá de los 750 y menor que 850 °C.
- La tecnología de horno de tambor rotatorio se ha utilizado para la calcinación de arcillas, y es una tecnología robusta y tolerante a altos contenidos de humedad y distribuciones fluctuantes de tamaño de partículas, en esta se puede lograr operaciones efectivas a escala industrial.

## **CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

En el capítulo se describen los materiales y métodos utilizados para el cálculo del horno de tambor rotatorio. En el capítulo se caracterizan los materiales empleados y luego se desarrolla una metodología para los cálculos de balances de masa y de energía en el proceso de calcinación de la arcilla.

### **2.1. Proceso tecnológico propuesto para la calcinación de arcillas en el Centro de Investigaciones del Níquel**

Basado en una tarea técnica desarrollada por especialistas de la Universidad de Moa (Almenares-Reyes et al., 2019), el esquema tecnológico propuesto para la producción de arcillas calcinadas en el Centro de Investigaciones del Níquel se presenta en la Figura 2.1.

La materia prima arcillosa se extrae del depósito Cayo Guam y serán transportadas en camiones hacia la Planta Piloto del Centro de Investigaciones del Níquel donde serán procesadas. El material se somete a secado y luego a la calcinación, la cual se debe llevar a cabo a una temperatura entre 800 y 850 °C en la zona de calcinación, con un tiempo de retención de no menos de 40 minutos, la calcina será sometida a enfriamiento mediante el sistema de enfriamiento de la planta. Posteriormente, el material calcinado frío se envía un molino de bolas para garantizar una finura de más de 90 % por debajo de 0,09 mm y más de 66 % por debajo de la clase 0,045 mm. El material molido se mezclará con caliza y yeso para producir la adición mineral LC2.

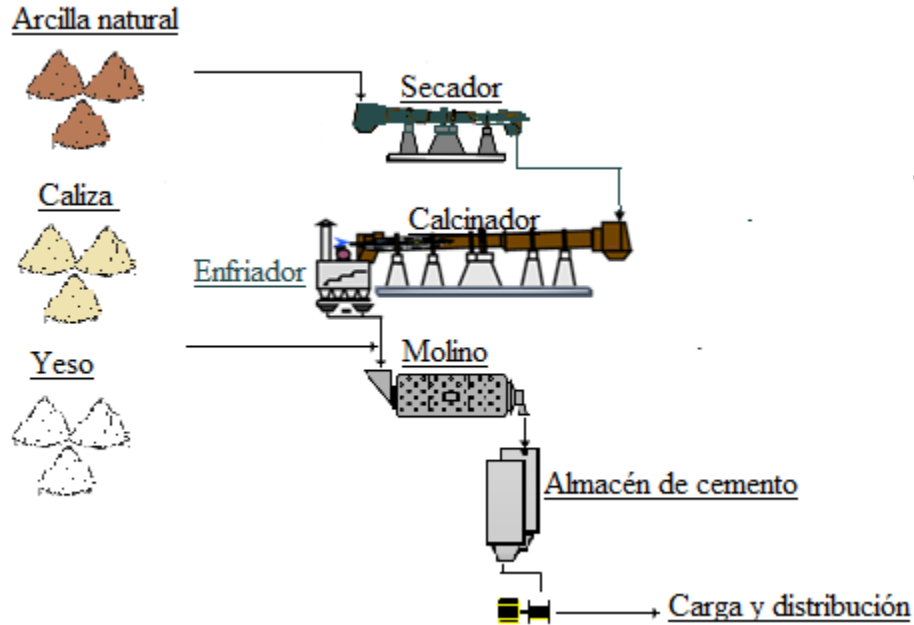


Figura 2.1. Esquema de calcinación de arcillas en el Centro de Investigaciones del Níquel

## 2.2. Caracterización de los materiales empleados

Los materiales empleados en la investigación fueron la arcilla, y el combustible de trabajo (Fuel Oil).

### 2.2.1. Caracterización de la arcilla natural o mena inicial

La composición química y mineralógica de la arcilla tomada de (Almenares, 2017) se presenta en la Tabla 3.1 y 3.2, respectivamente.

Tabla 2.1. Composición química de las muestras compósitos

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Otros | PPI   |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| 39,55            | 31,58                          | 12,68                          | 0,05 | 0,53 | 0,13            | 0,14              | 0,17             | 0,52             | 0,04                          | 0,14                           | 0,24  | 14,37 |

Tabla 2.2. Composición mineralógica de las muestras compósito

| Minerales arcillosos tipo 1:1 | Minerales asociados                |
|-------------------------------|------------------------------------|
| caolinita, halloysita         | cuarzo, gibsita, hematita, goetita |

A continuación, se detalla la caracterización de cada uno de los minerales que componen esta arcilla.

- Hidróxido de hierro; es un compuesto químico que se encuentra en la arcilla en diferentes formas y concentraciones. Este influye en la plasticidad de la arcilla, altas concentraciones de este compuesto pueden influir en la capacidad de la arcilla para retener agua y formar estructuras cohesivas. Además, también puede afectar la temperatura de cocción, mientras mayor concentración de hidróxido de hierro III, mayor debe ser la temperatura de cocción.
- Hidróxido de aluminio; este mineral se conoce como gibbsita o hidrargilita, y se caracteriza por ser un componente esencial en las arcillas de tipo caolinita. Tiene una estructura similar a la del óxido de hierro II y se forma en condiciones de bajas temperaturas y alta humedad.
- Cuarzo; es uno de los minerales más comunes y está compuesto de dióxido de silicio. Aparece en forma de pequeños cristales transparentes o translucidos. En la mena de arcilla, el cuarzo se presenta como partículas finas o inclusiones dispersas.
- Caolinita; se trata de un mineral de arcilla, de color blanco o gris claro, que se forma a partir de la alteración química del feldespato. La caolinita se caracteriza por su estructura en capas y su bajo contenido de hierro y otros elementos metálicos. Es uno de los principales componentes de las arcillas utilizadas en cerámica y porcelana.
- Materiales amorfos que contienen óxido de hierro, óxido de aluminio y óxido de silicio;
- Óxido de hierro; puede encontrarse en forma de hematita o limonita. La hematita es un óxido de hierro III de color rojo oscuro a negro que se forma en ambientes acuáticos oxidantes. La limonita, por lo general es un mineral de hierro III y hierro II, de color amarillo o marrón que se forma en ambientes húmedos y se caracteriza por su apariencia terrosa.
- Óxido de silicio; también conocido como sílice, es un compuesto químico que se encuentra en forma de cuarzo, arena, sílice amorfa, entre otros. Es uno de los principales componentes de la corteza terrestre y suele presentarse en forma de partículas finas en la mena de arcilla.

- Óxido de aluminio; también llamado alúmina, es un químico permanente en la arcilla en forma de hidróxido de aluminio, como se mencionó anteriormente. La alúmina aporta propiedades refractarias a la arcilla y es uno de los componentes clave en la producción de aluminio.

### **2.2.2. Caracterización del combustible**

El Fuel-oil es un tipo de combustible derivado del petróleo crudo. Es una mezcla de hidrocarburos pesados que se utiliza principalmente en motores de barcos y plantas de energía. Presenta una alta viscosidad, por lo cual, es una sustancia espesa y densa. Este además tiene un elevado punto de inflamación por lo que para encender necesita una alta temperatura, una vez ocurrido esto su punto de combustión es alto, lo que lo convierte en un combustible de gran cantidad de energía. Los componentes principales del Fuel-oil incluyen:

- Hidrocarburos saturados: estos son compuestos químicos que consisten en átomos de carbono e hidrogeno unidos por enlaces simples. Los hidrocarburos saturados presentes en el Fuel oil incluyen alcanos.
- Hidrocarburos aromáticos: estos son compuestos químicos que contienen anillos de benceno y se caracterizan por su olor característico. Los hidrocarburos aromáticos presentes en el combustible incluyen compuestos como el naftaleno, el benceno y el tolueno.
- Compuestos de azufre: El Fuel oil también contiene compuestos de azufre, como el tiofeno, disulfuros z mercaptanos. Estos compuestos de azufre son responsables del alto contenido de azufre del combustible z pueden generar emisiones contaminantes al ser quemados.
- Compuestos de nitrógeno: El nitrógeno presente dentro del Fuel Oil está formado como compuesto, como son las aminas y los compuestos heterocíclicos. Estos compuestos contribuyen a la formación de óxidos de nitrógeno durante la combustión.
- Otros compuestos: además de los hidrocarburos y los compuestos de azufre y nitrógeno, el fuel contiene trazas de compuestos de oxígeno, metales pesados, y otros contaminantes.



### 2.3. Leyes y ecuaciones empleadas

Para la realización del cálculo de balance de masa y energía se utilizan las siguientes leyes:

- Ley del contenido
- Ley de equivalencia másica
- Ley de conservación de la masa
- Ley de la conservación de energía

Ley del contenido masico:

Esta ley plantea que el porcentaje de los elementos o compuestos en un flujo masico es la fracción de estos en la masa que los contiene

$$\text{ley}(m(x)) = \frac{m(\text{Me}(x))}{m(\text{MP})} * 100\%$$

Ecuación 1. Ley de contenido mineral

Se despeja la masa del metal, y se obtiene:

$$m(\text{Me}(x)) = \frac{\text{ley}(\text{Me}(x)) * m(\text{MP})}{100\%}$$

Ecuación 2. Masa del mineral

Análisis de unidades:

$$m(\text{Me}(x)) = \frac{\% * \text{kg}}{\%}$$

Ecuación 3. Análisis de unidades

Donde:

Ley (Me(x)), es el porcentaje de metal (x) que hay en la materia prima inicial, %

M(Me(x)), es la masa de metal (x) que se desea calcular, kg

m(MP), es la masa de la materia prima, kg

Ley de equivalencia másica:

La ley de equivalencia másica se basa en la estequiometría. Las relaciones que se obtienen de los coeficientes numéricos entre un elemento y un compuesto

químico son los coeficientes estequiométricos que permiten calcular la cantidad de sustancia del elemento en relación con la del compuesto.

$$\frac{n(\text{comp}(x))}{n(\text{elem}(x))} = \frac{a}{b}$$

$$b * n(\text{comp}(x)) = a * n(\text{elem}(x))$$

$$\frac{b * m(\text{comp}(x))}{M(\text{comp}(x))} = \frac{a * m(\text{elem}(x))}{M(\text{elem}(x))}$$

$$m(\text{elem}(x)) = \frac{a * m(\text{comp}(x)) * M(\text{elem}(x))}{b * M(\text{comp}(x))}$$

Ecuación 4. Aplicando la ley de equivalencia másica para la masa del elemento

Análisis de unidades:

$$m(\text{elem}(x)) = \frac{kg * \frac{g}{mol}}{\frac{g}{mol}} = kg$$

Ecuación 5. Análisis de unidades de la masa del elemento

donde:

$m(\text{elem}(x))$ , es la masa del elemento o compuesto (x) a calcular, kg

$m(\text{comp}(x))$ , es la masa del compuesto o elemento (x) calculado, kg

$M(\text{elem}(x))$ , es la masa molar del elemento (x), g/mol

$M(\text{comp}(x))$ , es la masa molar del compuesto (x), g/mol

Ley de conservación de masa

En esta ley se pone de manifiesto que la materia no se crea, ni se destruye, solo se transforma

$$m(MP(x)) = m(\text{producto}(x)) + m(\text{acumulada}(x))$$

Ecuación 6. Masa de la materia prima

Análisis de unidades:

$$m(MP(x)) = kg + kg = kg$$

Ecuación 7. Análisis de unidades de la materia prima

Donde:

$m(MP(x))$ , es la masa de la materia prima, kg

$m(\text{producto}(x))$ , es la masa del producto (x), kg

$m(\text{acumulada}(x))$ , es la masa acumulada durante el proceso, kg

Ley de conservación de energía

La ley de conservación de la energía expresa que la energía ni se genera, ni se pierde, solo se transforma.

$$\Sigma Q(\text{entrada}(x)) = \Sigma Q(\text{salida}(x)) + \Sigma Qp(x)$$

Ecuación 8. Ley de conservación de la energía

Donde:

$\Sigma Q(\text{entrada}(x))$ , sumatoria de los calores (x) que entran al proceso, kJ

$\Sigma Q(\text{salida}(x))$ , sumatoria de los calores(x) que salen del proceso, kJ

$\Sigma Qp(x)$ , sumatoria de los calores de pérdidas (x), kJ

## **2.4. Metodología para realizar balances de masa y energía del proceso de calcinación**

Los cálculos de dichos balances, para el proceso de calcinación se basaron fundamentalmente en la ley de contenido de los elementos, en los cálculos estequiométricos, en la ley de conservación de la masa y de energía.

### **2.4.1. Balance de masa**

Para el trabajo de la metodología de balance, un paso fundamental es la esquematización del proceso, el cual, para el horno de tambor rotatorio utilizado para el proceso de calcinación, se representa en la siguiente figura:



Figura 2.2. Representación esquemática del horno para el proceso de calcinación

En esta figura se muestra los principales componentes que se alimentan al horno: materia prima y los gases de combustión, y su resultado es el producto final y los gases y polvos.

#### 2.4.2. Cálculo del mineral seco

Con el apoyo en los datos de las composiciones química y mineralógica de la mezcla de mineral y del análisis previo del sistema material, se realiza el primer paso del establecimiento de la base de cálculo del balance para 1000 kg, a través del cálculo de la composición de los elementos y compuestos de los minerales de mena seca. El procedimiento del cálculo consta de los siguientes pasos:

\* Paso 1: Determinar la masa de los compuestos simples:  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{SiO}_2$  (se encuentra como cuarzo, en la composición de la caolinita y en materiales amorfos),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (está presente en la caolinita y en el material amorfo),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , mediante (Ecuación 1. Ley de contenido mineral).

\* Paso 2: Determinar la masa de cada elemento, a partir de la masa del compuesto simple que representa una parte del mineral. Para este proceso se utiliza (Ecuación 2. Masa del mineral).

Los pasos 1 y 2 se aplican a cada uno de los compuestos para determinar la masa de cada uno de ellos y la masa de los elementos que los componen se determina mediante (Ecuación 4. Aplicando la ley de equivalencia másica para la masa del elemento).

\* Paso 3: Una vez realizado los cálculos se procede a determinar la composición racional de los mismos en la materia prima seca.

### 2.4.3. Cálculo del mineral húmedo

El mineral alimentado al horno tiene una humedad de 20%, los primeros cálculos fueron para el mineral seco, por lo tanto, se necesita determinar la masa de agua libre contenida en la mena. La expresión para determinar la masa del agua es:

$$w = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{m(\text{H}_2\text{O}) + 1000} * 100$$

Ecuación 9. Cálculo para determinar la masa del agua

Donde:

m (H<sub>2</sub>O), masa de agua libre contenido en el mineral, kg

W, humedad del mineral inicial, %

Se realiza una tabla de composición racional para el mineral húmedo, la cual mantiene los datos de la tabla de composición racional del mineral seco, lo único que se le agrega es el agua libre calculada.

### 2.4.4. Cálculo del combustible (Fuel oil)

Este cálculo se realiza para un kilogramo de combustible. Primeramente, se calcula la composición racional del combustible y luego se determina la de los gases de combustión y del aire para la combustión. Teniendo en cuenta que existen dos tipos de gases durante el proceso de secado, gases tecnológicos y gases de combustión, por tanto, se deben cuantificar por separados, en tablas diferentes y se integran finalmente en la de gases salientes. La cantidad de combustible se determinará en el balance energético posteriormente. Luego, se multiplica esta cantidad real de combustible por la composición de los gases por unidad, se obtiene su composición racional real.

### 2.4.5. Cálculo de polvo

El cálculo de los polvos tiene como objetivo dar a conocer la cantidad de polvo, en kg, que desprende el mineral dentro del horno durante el periodo de trabajo. En la industria se determina por la cantidad de polvo retenido en los electrofiltros, con respecto a la cantidad de productos que salen del horno.

Dicha composición se determina mediante el contenido de elementos compuestos en el producto final que contiene el polvo.

#### **2.4.6. Cálculo del producto final**

La masa del producto final del proceso se determina utilizando la siguiente forma

$$m(\text{prod final}) = m(\text{prod con polvo}) - m(\text{polvo})$$

Ecuación 10. Determinación del producto final

#### **2.4.7. Cálculo de gases salientes del horno de calcinación**

El gas tecnológico del proceso de calcinación de la arcilla no es más que el vapor de agua generado por la eliminación de humedad del mineral inicial. Una vez determinada la cantidad del vapor de agua que sale del horno finalmente, se integra en la tabla de composición racional real de los productos de combustión. Luego de obtenida la composición racional de todos los materiales que entran y salen del proceso se confecciona la tabla general del balance de masa y posteriormente se realizan los diagnósticos necesarios para evaluar el problema propuesto.

#### **2.5. Balance de energía**

Al igual que el balance de masa, el de energía puede considerarse como una técnica fundamental de la ingeniería en general o de la ingeniería metalúrgica en particular. En este caso, para el balance de energía para el proceso de secado se caracteriza a través de la Figura 2.3.

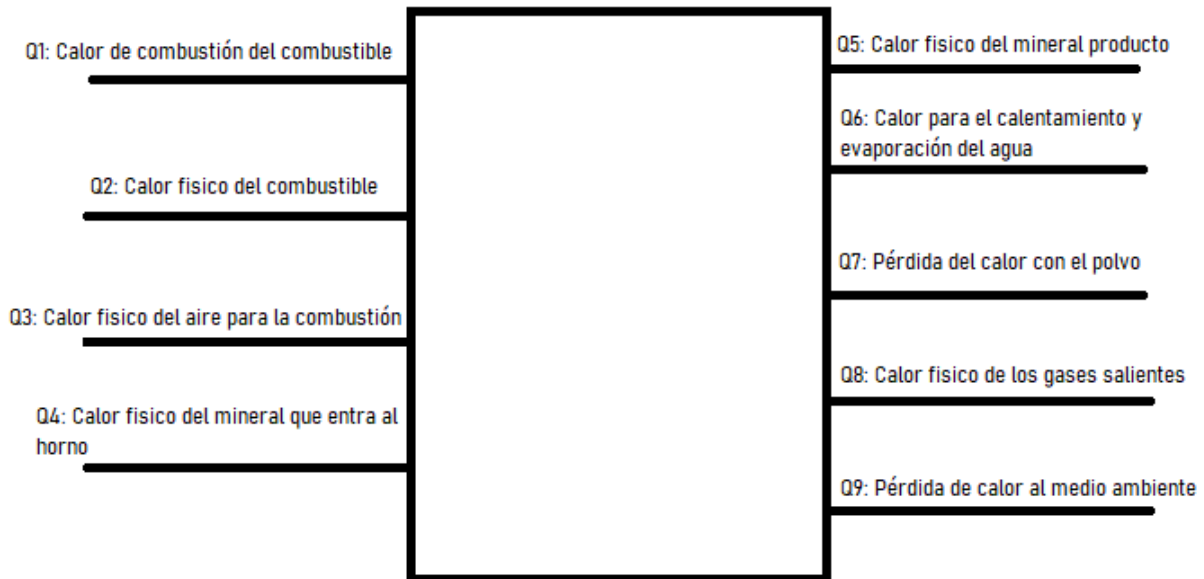


Figura 2.3. Flujos energéticos del proceso de calcinación de la arcilla

En la figura 2 se observa que el sistema energético de este proceso está, fundamentalmente, integrado por los índices de entrada y de salida. El acápite de entrada está compuesto por fuentes de energía como: calor de combustión del combustible, calor físico del combustible, calor físico del aire para la combustión y calor físico del mineral que entra al horno (sin humedad). Mientras que los índices de salida, como calores útiles son: calor físico del mineral producto y el calor para el calentamiento y evaporación del agua, y como calores de pérdidas están las pérdidas de calor con el polvo, con los gases salientes y al medio ambiente.

El procedimiento de realizar los cálculos para determinar cada uno de estos calores se muestran a continuación.

Ecuación 11. Calor de la combustión del combustible ( $Q_1$ )

$$Q_1 = E * X$$

Donde:

E: kJ/kg

X: cantidad de combustible, kg

Ecuación 12. Calor físico del mineral que entra al horno ( $Q_2$ )

$$Q2 = m(MP) - m(H_2O \text{ ext}) * Cp * (Tmat \text{ inic} - 273)$$

Donde:

m(MP): masa de la materia prima

m (H<sub>2</sub>O ext.): masa del agua externa

Cp: capacidad calorífica específica

T (mat inic): temperatura del material inicial

Ecuación 13. Calor físico del mineral producto (Q<sub>3</sub>)

$$Q3 = m(prod) * Cp * T(sal \text{ prod})$$

Donde:

m(prod): masa del producto

Cp: capacidad calorífica específica

T (sal prod): temperatura de salida del producto

Ecuación 14. Calor para el calentamiento y evaporación del agua (Q<sub>4</sub>)

$$Q4 = m(H_2O \text{ ext}) * Cp * (T \text{ ebull} - T \text{ inic}) + m(H_2O \text{ ext}) * \lambda$$

Donde:

m (H<sub>2</sub>O ext.): masa del agua externa

Cp: capacidad calorífica específica

T(ebull): temperatura de ebullición del agua

T (inic): temperatura inicial

λ: calor del vapor de agua

Ecuación 15. Calor de la reacción endotérmica (Q<sub>5</sub>)

$$Q5 = \frac{m(\text{comp}) * \Delta Hr}{n * M(\text{comp})}$$

Donde:



m(comp): masa del compuesto

$\Delta H_R$ : entalpía de la reacción, o resultante

n: cantidad de sustancia

M(comp): masa molar del compuesto

Ecuación 16. Calor físico de los gases ( $Q_6$ )

$$Q_6 = \Sigma V_{gs} * C_p * T(sal prod)$$

Donde:

$\Sigma V_{gs}$ : % volumétrico de los gases

$C_p$ : capacidad calorífica de los gases

$T_{(sal prod)}$ : temperatura de salida de los productos y gases

Ecuación 17. Calor físico de los polvos ( $Q_7$ )

$$Q_7 = m(polvo) * C_p * T(sal prod)$$

Donde:

m(polvo): masa de los polvos

$C_p$ : capacidad calorífica de los polvos

$T_{(sal prod)}$ : temperatura de salida de los productos y gases

Ecuación 18. Pérdidas de calor al medio ambiente ( $Q_8$ )

$$Q_8 = \frac{2\pi * L * t_{bal} * (T_{rev int} - T_{cub hor})}{\frac{1}{\lambda_{cham}} * \ln \frac{di + 1}{di} + \frac{1}{\lambda_{corin}} * \ln \frac{di + 1}{di}}$$

Donde:

L: longitud del horno

$T_{bal}$ : tiempo de balance del proceso

$T_{(rev int)}$ : temperatura del revestimiento interior del horno

$T_{(\text{cub hor})}$ : temperatura de la cubierta externa del horno

$\lambda_{\text{cham}}$ : coeficiente de conductividad térmica de la chamota

$\lambda_{\text{corin}}$ : coeficiente de conductividad térmica del corindón

$d_{i+1}$  y  $d_i$ : diámetro del horno

La cantidad de combustible (x) es hallada por el cálculo de los calores ( $Q_n$ ), expresado por la ecuación:

$$x = \frac{Q4 + Q5 + Q6 + Q7 + Q8 - Q2}{E - V_{g \text{ comb}} * C_{p \text{ gc}} * T}$$

Ecuación 19. Cantidad de combustible

Donde:

$V_{g \text{ comb}}$ : volumen de los gases de combustión

$C_{p \text{ gc}}$ : capacidad calorífica de los gases de combustión

## 2.6. Situación mecánica

Para llevar a cabo la parte mecánica del diseño del horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcilla, se tiene en cuenta los materiales a utilizar en su construcción, al igual que algunos cálculos como el caudal del material al entrar al horno, el área interior del tambor, tiempo de residencia del material dentro del horno, velocidad del material dentro del horno.

El grado de llenado se relaciona con el caudal del material y el área transversal del horno por la ecuación:

$$\text{grado de llenado} = \frac{Q * 100}{60 * V * A}$$

Ecuación 20. Grado de llenado

Donde:

Q: flujo del material,  $\text{m}^3/\text{h}$

V: velocidad con que el material viaja a lo largo del horno, m/min

A: área de la sección transversal del interior del horno, m<sup>2</sup>

Conociendo la pendiente del horno, el tiempo de residencia, largo y diámetro del horno, se calcula la velocidad de rotación del horno mediante la ecuación:

$$t = \frac{1.77 * \sqrt{\theta} * L}{p * d * n}$$

Ecuación 21. Tiempo de residencia del material dentro del horno

Donde:

t: tiempo de residencia, min

L: longitud del horno, m

p: pendiente del horno, grados

d: diámetro del horno, m

n: velocidad de rotación del horno, rpm

$\theta$ : talud natural del mineral, °

El área de la sección transversal del interior del horno se halla matemáticamente, conociendo el diámetro interno del horno, mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

Ecuación 22. Área de la sección transversal del interior del horno

El caudal o flujo del material que se alimenta al horno se determina mediante:

$$Q = \frac{C_h}{\rho}$$

Ecuación 23. Caudal o flujo del material

Donde:

Q: caudal o flujo del material que entra al horno, kg/m<sup>3</sup>

C<sub>h</sub>: capacidad de mineral, kg

ρ: densidad del material, kg/m<sup>3</sup>

Flujo de alimentación

Para calcular el flujo de alimentación se consideró la tabla de porcentaje de llenado, que depende de la inclinación de la pendiente del horno.

Para ello se utiliza la ecuación estándar de flujo másico de alimentación, para conocer la cantidad de material que se puede introducir en el horno.

$$F_t = \frac{M}{t_r} = \frac{V_{ll} * \rho_m}{t_r}$$

Ecuación 24. Fórmula estándar del flujo másico de alimentación

Además, esta ecuación se puede expresar también como:

$$F_t = \frac{L * A_i * \%_{ll} * \rho_m}{t_r} = \frac{L * r_i^2 * \pi * \%_{ll} * \rho_m}{t_r}$$

Ecuación 25. Expresión de la fórmula estándar del flujo másico de alimentación

Donde:

F<sub>t</sub>: flujo de alimentación total, kg/min

M: masa, kg

$t_r$ : tiempo de residencia, min

$V_{II}$ : volumen de llenado,  $m^3$

$\rho_m$ : densidad del material,  $kg/m^3$

$L$ : largo del horno, m

$A_i$ : Área interna del horno,  $m^2$

$r_i$ : radio interno del horno, m

$\%_{II}$ : porcentaje de llenado

Para determinar el diámetro exterior se empleó la siguiente ecuación:

$$D_e = D_i + 2L * \tan \theta$$

Ecuación 26. Diámetro exterior del horno de tambor rotatorio

Donde:

$D_e$ : diámetro exterior del horno

$D_i$ : diámetro interior del horno

$L$ : longitud del horno

$\theta$ : ángulo de inclinación del tambor del horno

El  $\theta$  si se encuentra en grados debe convertirse en radianes, dividiéndolo entre 180 y multiplicándolo por  $\pi$ .

## Conclusión del capítulo 2

- Se presentó la metodología para obtener una adecuada construcción del horno de tambor rotatorio.
- Se describió la composición de la arcilla calcinada y el combustible, elementos fundamentales para el cálculo del horno.
- Se presentó la metodología y ecuaciones para la realización del balance de masa y energía, así como para el cálculo de la parte mecánica del horno.

### CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el capítulo se contabiliza mediante la aplicación del análisis de los balances de masa y energía. Estos cálculos posibilitan un mayor acercamiento a las condiciones reales de explotación de un horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcilla.

Es importante destacar que mientras más precisión se requiera en el modelo, más complejo se tornará el mismo, por lo que es necesario definir su nivel de exactitud, el cual depende de las concepciones generales que se emplearán en los balances, ya que por la complejidad del proceso se despreciaran fases y se asumirán las transformaciones de minerales muy complejos, de los cuales es muy difícil definir sus interacciones reales, en este caso se encuentra la caolinita, y los materiales amorfos que componen la arcilla. Con todos estos juicios y concepciones precisas se podrán llegar a conclusiones importantes sobre los balances de masa y de energía para los procesos de calcinación, y luego determinar la norma de consumo de Fuel Oil como combustible de trabajo.

#### 3.1. Resultados del balance de masa para el proceso de calcinación

Los cálculos del balance de masa para el proceso de calcinación se realizaron para 1000 kg de mena seca alimentada. Los resultados de este balance utilizando Fuel Oil como combustible en calcinación, se detallan a continuación.

##### 3.1.1. Cálculo de la arcilla seca

Al emplear el procedimiento acápite 0, se realizaron los cálculos para determinar la composición racional de los elementos y compuestos en la mena alimentada (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Composición racional para 100 kg de arcilla seca

| Elem/Comp           | Fe           | Al            | Si            | O             | H            | Total, kg      | %              |
|---------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|----------------|----------------|
| Fe(OH) <sub>3</sub> | 1,568        |               |               | 1,347         | 0,085        | 3,000          | 3,000          |
| Al(OH) <sub>3</sub> |              | 0,692         |               | 1,231         | 0,078        | 2,000          | 2,000          |
| SiO <sub>2</sub>    |              |               | 0,467         | 0,533         |              | 1,000          | 1,000          |
| Mat. amorfa         | 8,332        | 4,025         | 2,095         | 9,548         |              | 24,000         | 24,000         |
| Caolinita           |              | 14,632        | 15,231        | 39,044        | 1,093        | 70,000         | 70,000         |
| <b>Total, kg</b>    | <b>9,899</b> | <b>19,349</b> | <b>17,793</b> | <b>51,703</b> | <b>1,256</b> | <b>100,000</b> |                |
| <b>%</b>            | <b>9,899</b> | <b>19,349</b> | <b>17,793</b> | <b>51,703</b> | <b>1,256</b> |                | <b>100,000</b> |

### 3.1.2. Cálculo de la mena húmeda

Una vez obtenido los resultados de la composición racional de la mena seca, se determinan la cantidad de agua libre y luego se integra en la Tabla 3.2. Los resultados del cálculo de la composición racional de la mena húmeda alimentada se ilustran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Composición racional para la arcilla húmeda

| Elem/Comp               | Fe    | Al     | Si     | O      | H     | H <sub>2</sub> O | Total, kg | %       |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|------------------|-----------|---------|
| Fe(OH) <sub>3</sub>     | 1,568 |        |        | 1,347  | 0,085 |                  | 3,000     | 2,400   |
| Al(OH) <sub>3</sub>     |       | 0,692  |        | 1,231  | 0,078 |                  | 2,000     | 1,600   |
| SiO <sub>2</sub>        |       |        | 0,467  | 0,533  |       |                  | 1,000     | 0,800   |
| Mat amorfa              | 8,332 | 4,025  | 2,095  | 9,548  |       |                  | 24,000    | 19,200  |
| Caolinita               |       | 14,632 | 15,231 | 39,044 | 1,093 |                  | 70,000    | 56,000  |
| H <sub>2</sub> O (ext.) |       |        |        |        |       | 25,000           | 25,000    | 20,000  |
| Total, kg               | 9,899 | 19,349 | 17,793 | 51,703 | 1,256 | 25,000           | 125,000   |         |
| %                       | 7,919 | 15,479 | 14,235 | 41,362 | 1,004 | 20,000           |           | 100,000 |

Estos resultados muestran que el porcentaje del agua libre en la mena es de 20%, considerada la humedad inicial de la mena procesada, mientras que la cantidad de mena húmeda a procesar es de 125 kg

### 3.1.3. Cálculo del producto final del proceso de calcinación

El proceso de calcinación tiene como objetivo principal, eliminar la humedad de la mena alimentada, por tanto, resultó necesario calcular la cantidad de agua libre a eliminarse de la mena inicial.

Durante el proceso no tuvieron lugar las transformaciones químicas de la fase sólida en la mena procesada, por lo tanto, la composición racional de los productos sólidos sin humedad es la misma de la mena seca inicial.

Una vez determinada la cantidad de agua libre en los productos sólidos, se obtuvieron los resultados de la composición racional de los mismos (Tabla 3.3)

Tabla 3.3. Composición racional de los productos con contenido de polvo

| Elem/Comp               | Fe     | Al      | Si      | O       | H      | H <sub>2</sub> O | Total, kg       | %       |
|-------------------------|--------|---------|---------|---------|--------|------------------|-----------------|---------|
| Fe(OH) <sub>3</sub>     | 12,542 |         |         | 10,779  | 0,679  |                  | 24,000          | 2,400   |
| Al(OH) <sub>3</sub>     |        | 5,534   |         | 9,845   | 0,620  |                  | 16,000          | 1,600   |
| SiO <sub>2</sub>        |        |         | 3,739   | 4,261   |        |                  | 8,000           | 0,800   |
| Mat amorfa              | 66,653 | 32,203  | 16,760  | 76,383  |        |                  | 192,000         | 19,200  |
| Caolinita               |        | 117,056 | 121,846 | 312,352 | 8,745  |                  | 560,000         | 56,000  |
| H <sub>2</sub> O (ext.) |        |         |         |         |        | 200,000          | 200,000         | 20,000  |
| <b>Total, kg</b>        | 79,194 | 154,794 | 142,346 | 413,621 | 10,045 | 200,000          | <b>1000,000</b> |         |
| %                       | 7,919  | 15,479  | 14,235  | 41,362  | 1,004  | 20,000           |                 | 100,000 |

Los resultados de la Tabla 3.3 demuestran que la cantidad del agua libre en el producto es de 20 % y la composición de los demás elementos y compuestos es la misma que la de la mena alimentada.

#### 3.1.4. Cálculo del polvo arrastrado con los gases

Una vez calculado la cantidad de polvo arrastrado por los gases salientes del proceso de calcinación, se obtuvo la composición racional del polvo (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Composición racional de los polvos arrastrados con los gases

| Elem/Comp               | Fe    | Al     | Si     | O      | H     | H <sub>2</sub> O | Total, kg | %       |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|------------------|-----------|---------|
| Fe(OH) <sub>3</sub>     | 1,254 |        |        | 1,078  | 0,068 |                  | 2,400     | 2,400   |
| Al(OH) <sub>3</sub>     |       | 0,553  |        | 0,985  | 0,062 |                  | 1,600     | 1,600   |
| SiO <sub>2</sub>        |       |        | 0,374  | 0,426  |       |                  | 0,800     | 0,800   |
| Mat. amorfa             | 6,665 | 3,220  | 1,676  | 7,638  |       |                  | 19,200    | 19,200  |
| Caolinita               |       | 11,706 | 12,185 | 31,235 | 0,875 |                  | 56,000    | 56,000  |
| H <sub>2</sub> O (ext.) |       |        |        |        |       | 20,000           | 20,000    | 20,000  |
| <b>Total, kg</b>        | 7,919 | 15,479 | 14,235 | 41,362 | 1,004 | 20,000           | 100,000   |         |
| %                       | 7,919 | 15,479 | 14,235 | 41,362 | 1,004 | 20,000           |           | 100,000 |

La Tabla 3.4 demuestran que el polvo que sale con los gases tiene la misma composición racional que el producto final, lo que exige de su recirculación al mineral de alimentación.

#### 3.1.5. Cálculo del combustible (Fuel Oil)

Para el cálculo se utilizó un kilogramo de Fuel Oil como combustible y a partir de esta cantidad se obtuvo la masa real de aire para la combustión, así como los gases de este proceso (Tabla 3.5).



Tabla 3.5. Composición racional para 1 kg de combustible

| Elementos           | C     | H      | O      | N      | Otros  | Total   |
|---------------------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Entrada             |       |        |        |        |        |         |
| Combustible         | 0,253 | 0,0359 |        |        | 0,711  | 1,000   |
| Aire                |       |        | 0,958  | 3,446  |        | 4,405   |
| Total, kg           | 0,253 | 0,0359 | 0,958  | 3,446  | 0,711  | 5,405   |
| %                   | 4,677 | 0,664  | 17,730 | 63,768 | 13,162 | 100,000 |
| Salida              |       |        |        |        |        |         |
| Gases de combustión | 0,253 | 0,0359 | 0,958  | 3,446  | 0,711  | 5,405   |
| Total, kg           | 0,253 | 0,0359 | 0,958  | 3,446  | 0,711  | 5,405   |
| %                   | 4,677 | 0,664  | 17,730 | 63,768 | 13,162 | 100,000 |

Se observa en la Tabla 3.5 que, para la combustión de un kilogramo de Fuel Oil, se necesita 4,405 kg de aire y se generan 5,405 kg de gases de combustión.

El balance de energía obtenido como resultado de la combustión de un kilogramo de Fuel Oil, permitió comprobar que el consumo del Fuel Oil durante el proceso de calcinación es de 42.895 kg. Los resultados del balance material para la combustión se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Composición racional para 42,895 kg de combustible

| Elementos           | C      | H     | O      | N       | Otros  | Total   |
|---------------------|--------|-------|--------|---------|--------|---------|
| Entrada             |        |       |        |         |        |         |
| Combustible         | 10,842 | 1,540 |        |         | 30,514 | 42,895  |
| Aire                |        |       | 41,104 | 147,836 |        | 188,940 |
| Total,kg            | 10,842 | 1,540 | 41,104 | 147,836 | 30,514 | 231,835 |
| %                   | 4,677  | 0,664 | 17,730 | 63,768  | 13,162 | 100,000 |
| Salida              |        |       |        |         |        |         |
| Gases de combustión | 10,842 | 1,540 | 41,104 | 147,836 | 30,514 | 231,835 |
| Total,kg            | 10,842 | 1,540 | 41,104 | 147,836 | 30,514 | 231,835 |
| %                   | 4,677  | 0,664 | 17,730 | 63,768  | 13,162 | 100,000 |

Como resultado del análisis de estos cálculos es importante prestar atención a la cantidad de dióxido de carbono y de vapor del agua generado en los gases de combustión, ya que estos son indeseables, tanto desde el punto de vista tecnológico como ecológico.

### 3.1.6. Cálculo de los gases salientes

La cantidad de los gases salientes se determinó sumando los gases de combustión y los del agua eliminada en forma de vapor. Los resultados del cálculo de la composición racional de los gases salientes del horno de calcinación (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Composición racional de los gases salientes

| Elementos               | O       | H      | H <sub>2</sub> O | C      | N       | Total, kg | %       |
|-------------------------|---------|--------|------------------|--------|---------|-----------|---------|
| H <sub>2</sub> O        | 9.281   | 1.169  |                  |        |         | 10.450    | 1.340   |
| Mat amorfo              | 68.745  |        |                  |        |         | 68.745    | 8.813   |
| Caolinita               | 281.117 | 7.871  |                  |        |         | 288.988   | 37.049  |
| H <sub>2</sub> O (ext.) |         |        | 180.000          |        |         | 180.000   | 23.076  |
| Gases comb              | 41.104  | 1.540  |                  | 10.842 | 147.834 | 231.833   | 29.722  |
| Total, kg               | 400.247 | 10.580 | 180.000          | 10.842 | 147.834 | 780.016   |         |
| %                       | 51.313  | 1.356  | 23.076           | 1.390  | 18.953  |           | 100.000 |

Como se ilustra en la Tabla 3.7, los gases de combustión, el agua externa y el vapor de agua producto de la deshidroxilación de la caolinita son los gases salientes que poseen los mayores porcentajes. A pesar de estos gases no son nocivos para el medio ambiente, desde el punto de vista tecnológico el vapor de agua es perjudicial, ya que al salir del horno este vapor es posible condensarse e influye negativamente en el sistema de captación de polvo.

Los resultados de los cálculos correspondientes al balance de masa, para 1000 kg de mena húmeda alimentada, fueron integrados en la Tabla 3.8. A partir de los resultados mostrados en esta tabla, se concluye que se necesita 42,90 kg de combustible Fuel Oil y 188,94 kg de aire para la combustión del combustible para la obtención de 351,82 kg de mineral seco. Además, la cantidad de los gases generados durante el proceso es de 780,02 kg, la cual es notable y es una de las características típicas de la combustión de estos combustibles y de la gran cantidad de agua evaporada en el sistema.

Tabla 3.8. Composición del mineral considerando el combustible

| Elementos             | Fe    | Al     | Si     | O      | H     | C     | N      | H <sub>2</sub> O | Total, kg      | %      |
|-----------------------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|------------------|----------------|--------|
| <b>Entrada</b>        |       |        |        |        |       |       |        |                  |                |        |
| <b>Materia prima</b>  | 79.19 | 154.79 | 142.35 | 413.62 | 10.04 |       |        | 200.00           | 1000.00        | 81.18  |
| <b>Combustible</b>    |       |        |        |        | 1.54  | 10.84 |        |                  | 42.90          | 3.48   |
| <b>Aire</b>           |       |        |        | 41.10  |       |       | 147.83 |                  | 188.94         | 15.34  |
| <b>Total,kg</b>       | 79.19 | 154.79 | 142.35 | 454.72 | 11.58 | 10.84 | 147.83 | 200.00           | <b>1231.83</b> |        |
| <b>%</b>              | 6.43  | 12.57  | 11.56  | 36.91  | 0.94  | 0.88  | 12.00  | 16.24            |                | 97.52  |
| <b>Salida</b>         |       |        |        |        |       |       |        |                  |                |        |
| <b>Producto final</b> | 71.28 | 139.31 | 128.11 | 13.12  |       |       |        |                  | 351.82         | 28.56  |
| <b>Polvos</b>         | 7.92  | 15.48  | 14.23  | 41.36  | 1.00  |       |        | 20.00            | 100.00         | 8.12   |
| <b>Gases</b>          |       |        |        | 400.25 | 10.58 | 10.84 | 147.83 | 180.00           | 780.02         | 63.32  |
| <b>Total, kg</b>      | 79.19 | 154.79 | 142.35 | 454.72 | 11.58 | 10.84 | 147.83 | 200.00           | <b>1231.83</b> |        |
| <b>%</b>              | 6.43  | 12.57  | 11.56  | 36.91  | 0.94  | 0.88  | 12.00  | 16.24            |                | 100.00 |

### 3.2. Resultados del balance de energía del proceso de calcinación

Para el desarrollo del balance de energía, es necesario definir las temperaturas a las cuales los flujos entran y salen del horno de calcinación. Posteriormente se realizó el cálculo de las capacidades caloríficas promedios para la materia prima, el producto final, el polvo y los gases salientes del proceso. Después de realizar los cálculos del balance de energía, se integran los resultados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Tabla general del balance de energía

| Índices de entrada                                    | kJ/t        | %              |
|---|-------------|----------------|
| 1. Calor de la combustión del combustible             | 1672.924    | 99.999         |
| 2. Calor físico del mineral que entra al horno        | 0.024       | 0.001          |
| <b>Total</b>  | <b>1673</b> | <b>100.000</b> |
| Índices de salida                                     |             |                |
| Calor útil  |             |                |
| 4. Calor físico del mineral producto                  | 3.202       | 0.191          |
| 5. Calor para el calentamiento y evaporación del agua | 166.800     | 9.970          |
| 6. Calor de la reacción endotérmica                   | 1489.779    | 89.051         |
| Pérdida de calor                                      |             |                |
| 7. Calor físico de los gases                          | 12.491      | 0.747          |
| 8. Calor físico de los polvos                         | 0.476       | 0.028          |
| 9. Pérdidas de calor al medio ambiente                | 0.200       | 0.012          |
| <b>Total</b>  | <b>1673</b> | <b>100.000</b> |

### 3.3. Elementos de diseño de horno de tambor rotatorio para calcinar arcilla

El horno de tambor rotatorio calculado consta con una cubierta de acero y ladrillos refractarios en su interior con una capa de chamota como aislante térmico. Este posee un largo de tambor de 15 m, un diámetro exterior de 1,24 m, y un diámetro interior de 1.05 m (Figura 3.1). Dentro del tambor tiene situado paletas para el movimiento y volteo del material arcilloso, mientras el tambor gira.

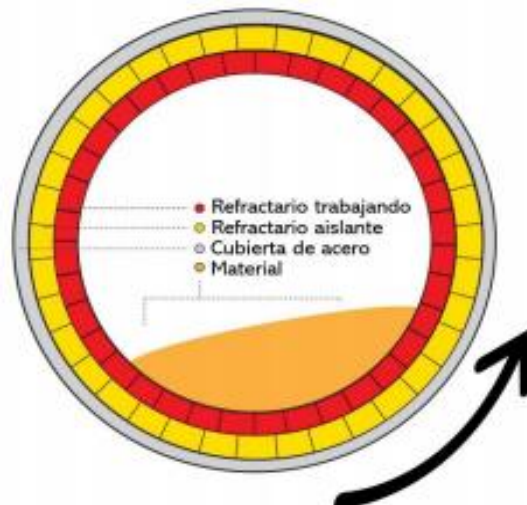


Figura 3.1. Diagrama de la parte interior de un horno de tambor rotatorio

#### 3.3.1. Diseño de transmisión

En este contexto, el diseño de un horno de tambor rotatorio se convierte en un elemento crucial para garantizar eficiencia y calidad en la calcinación de la arcilla. Este tipo de horno se caracteriza por su funcionamiento continuo, en el cual la arcilla es introducida en un tambor que, rota, lo que facilita la distribución uniforme del calor y asegura un procesamiento homogéneo del material. La Figura 3.2 muestra un horno de tambor rotatorio.

La Figura 3.3, presenta el sistema de transmisión. El motor utilizado para la transmisión ha de ser eléctrico, aunque se puede instalar según convenga cualquier otro, debido a las altas revoluciones de los motores eléctricos es necesario una reducción extremadamente fuerte. Esta etapa de reducción puede iniciarse por correas ya que el torque de la etapa inicial es bajo. La segunda etapa sería el paso de la transmisión a una caja reductora, a la cual se le debe poner atención, en los torques de entrada y

salida que podría soportar, y compararlos. En caso de que no cumpla con los requisitos requeridos, construir una.

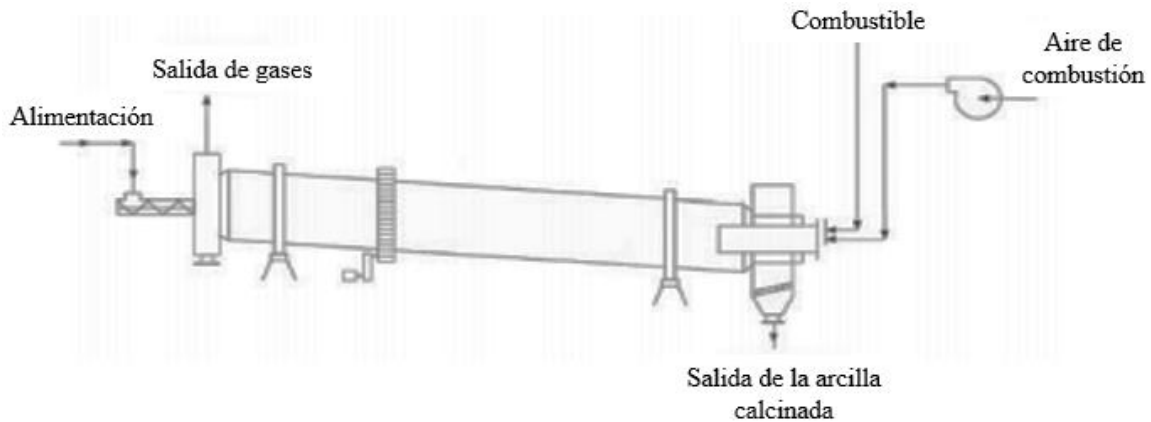


Figura 3.2. Diagrama de un horno de tambor rotatorio

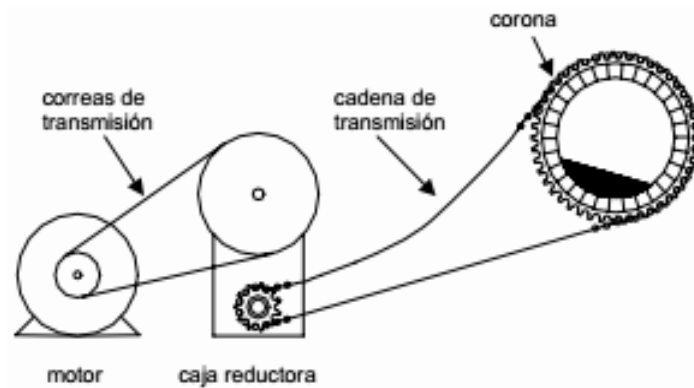


Figura 3.3. Esquema de transmisión del horno de tambor rotatorio

### 3.3.2. Sistema de rodamiento

Este sistema cuenta con aros de rodamiento donde descansa el horno de tambor rotatorio, estos aros están situados sobre unos rodillos (Figura 3.4) que se apoyan sobre bases fijas mediante rodamientos en cajas diseñadas para esto (Figura 3.5). Cada aro está situado sobre dos rodillos que están ubicados transversalmente con respecto al centro del horno.

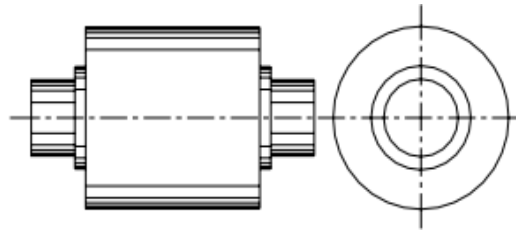


Figura 3.4. Diseño de un rodillo de rodamiento

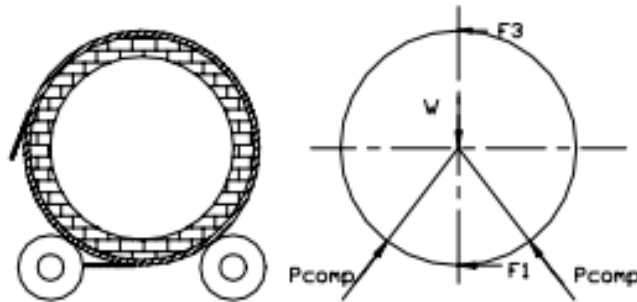


Figura 3.5. Posición de los rodillos con respecto al centro del horno

### 3.3.3. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación planteado es mediante un transportador helicoidal, el cual tiene como función empujar el mineral dentro del horno, este debe llevar un cargado constante para la distribución uniforme dentro del tambor. Aunque así lo determine la empresa o fabricante puede ser un transportador de banda, además, el transportador helicoidal puede fabricarse en la misma empresa donde se monte el horno.

### 3.3.4. Sistema de quemado

Para la calcinación de arcilla el horno de tambor rotatorio debe alcanzar altas temperaturas y formar un perfil adecuado de temperatura, para ello se necesita controlar la posición del quemador dentro del horno, forma y longitud de la llama (Figura 3.6). La temperatura se controla con la relación aire-combustible, la posición de la llama debe quedar aproximadamente cercana al material o en el centro del horno para evitar que el mineral o los refractarios de las paredes se quemem.

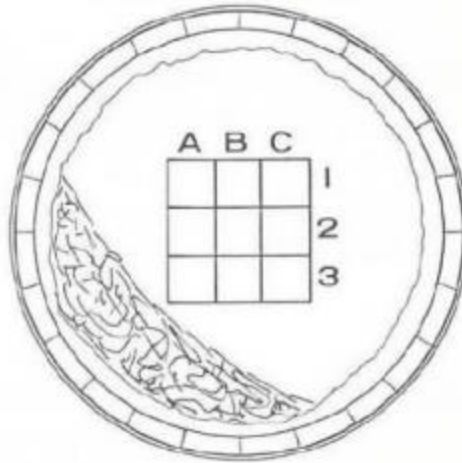


Figura 3.6. Esquema para describir la posición de la llama

### 3.3.5. Extractor de gases

Los gases salientes del proceso, con ayuda de un extractor, reincorporarlos al proceso, con el objetivo que sean absorbidos antes de salgan por la chimenea y sean incorporados por la parte inferior donde está situado el quemador y la entrada de aire para el proceso de combustión, el cual debe ser controlado mediante un variador de frecuencia para una mayor eficiencia, y el aire restante de la chimenea puede ser enviado a un secador externo donde se concentre el material mientras el transportador helicoidal alimenta el horno.

### 3.3.6. Resumen de los parámetros y dimensionamiento del horno

Se dimensionó el horno rotatorio para calcinar arcilla de alto contenido de caolinita con combustible Fuel-Oil, con una capacidad de 1000 t. Presenta un talud natural de 36° del material, el grado de llenado del horno es de 10%. El material presenta una densidad de 2600 kg/m<sup>3</sup>. El largo del horno es 15 m y el diámetro interior es de 1,05 m.

Tabla 3.10. Resumen de los parámetros del horno

| Variables                                       | Resultado  | Unidad de medida  |
|---|------------|-------------------|
| Velocidad del material en el interior del horno | 7.4067408  | m/min             |
| Tiempo residencia                               | 18.9287942 | Min               |
| Área del interior                               | 0.8654625  | m <sup>2</sup>    |
| Caudal de material a la entrada                 | 0.38461538 | kg/m <sup>3</sup> |
| Flujo másico de alimentación                    | 178.315835 | kg/min            |
| Diámetro exterior                               | 1.242      | M                 |

### **Conclusión del capítulo 3**

- Mediante el balance de masa se determinó que el índice de consumo combustible Fuel Oil, es de 42,90 kg/t.
- Durante el proceso de calcinado las pérdidas de calor por los gases y polvo son bajas ya que estas se recuperan e introducen al proceso, para la construcción se seleccionan como materiales refractarios, ladrillos refractarios y chamota como termoaislante.
- Para el procesado del mineral se tuvo en cuenta el tiempo de residencia del mineral dentro de horno que es de aproximadamente 19 minutos, con una velocidad de 7,41 m/min dentro del tambor, el caudal del material que entra es de 0,39 kg/m<sup>3</sup> con un flujo de alimentación de 178,31 kg/min.
- El horno presenta una longitud de tambor de 15 m, su diámetro interior de 1,05 m y mediante cálculos se determinó el diámetro externo con una dimensión de 1,24 m.



## **CONCLUSIONES GENERALES**

A partir del cálculo de un horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcillas en el Centro de Investigaciones del Níquel, considerando aspectos técnicos y mecánicos se concluye:

Los parámetros operativos definidos para la calcinación de arcilla en un horno de tambor rotatorio son un tiempo de residencia del material en el horno de 19 minutos, con una velocidad de rotación de 3,5 rpm. Asimismo, el flujo de alimentación de mineral al horno se establece en 178,31 kg/min.

El análisis del balance de masa y energía define que, para la calcinación de la arcilla en el horno de tambor rotatorio calculado, se necesitan 42,90 kg/t de combustible Fuel-Oil. El 89 % del calor utilizado se consume en la reacción de transformación del producto, y un 10 % en el calentamiento y evaporación del agua, mientras que el calor los polvos es y las pérdidas de calor al medio ambiente es de solo 1 %.

Se describieron los elementos a tener en cuenta en el diseño del horno de tambor rotatorio para la calcinación de arcillas calcinadas. El horno calculado consta con una cubierta de acero y ladrillos refractarios silico-aluminosos, con una capa de chamota como aislante térmico.

## **RECOMENDACIONES**

- Pasar la etapa de diseño del horno de tambor rotatorio a partir de los resultados de este trabajo.
- Hacer un nuevo balance de masa y energía tomando en cuenta combustibles alternativos (aceites gastados, etc.).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almenares-Reyes, R.S., 2020. Potencialidades, alternativas y retos para la producción de cemento LC3 en la provincia Holguín. *Boletín Sapiencia* 1, 21–23.
- Almenares-Reyes, R.S., Alujas-Díaz, A., Poll-Legrá, L., Bassas-Noa, P.R., Betancourt-Rodríguez, S., Martirena-Hernández, J.F., Leyva-Rodríguez, C.A., 2016. Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer – arcilla calcinada – caliza (LC3). *Minería y Geol.* 32, 63–76.
- Almenares-Reyes, R.S., Leyva Rodríguez, C.A., Pérez García, L.A., 2019. Producción de cemento LC2 en las instalaciones de la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel.
- Almenares, R.S., 2017. Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios (Tesis Doctoral). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Almenares, R.S., Vizcaíno, L.M., Damas, S., Mathieu, A., Alujas, A., Martirena, F., 2017. Industrial calcination of kaolinitic clays to make reactive pozzolans. *Case Stud. Constr. Mater.* 6, 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.03.005>
- Alujas, A., 2010. Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente (Tesis Doctoral). Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K., Martirena, F., 2015. Pozzolan reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Appl. Clay Sci.* 108, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>
- Bich, C., Ambroise, J., Péra, J., 2009. Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin. *Appl. Clay Sci.* 44, 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.01.014>
- Bradley, W.F., Grim, R.E., 1951. High temperature thermal effects of clay and related materials. *Am. Mineral.* 36, 182–201.

- Brindley, G W, Nakahira, M., 1959a. The Kaolinite-Mullite Reaction Series: I, A Survey of Outstanding Problems. *J. Am. Ceram. Soc.* 42, 311–314.
- Brindley, G. W., Nakahira, M., 1959. The Kaolinite-Mullite Reaction Series: II, Metakaolin. *J. Am. Ceram. Soc.* 42, 314–318.
- Brindley, G W, Nakahira, M., 1959b. The Kaolinite-Mullite Reaction Series: III, The High-Temperature Phases. *J. Am. Ceram. Soc.* 42, 319–324.
- Brown, W.M., MacKenzie, K.J.D., Meinhold, R.H., 1987. The thermal reactions of montmorillonite studied by high-resolution solid-state <sup>29</sup>Si and <sup>27</sup>Al NMR. *J. Mater. Sci.* 22, 3265–3275.
- Cárdenas Suquillo, A.D., 2014. Diseño y simulación de un horno rotatorio para materiales celulósicos.
- Duda, W., 1977. Manual tecnológico del cemento, Español. ed. Editores técnicos asociados S.A., Barcelona, España.
- Földvári, M., 2011. Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice: Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary. Geological Institute of Hungary, Budapest, Hungary.
- Frost, R.L., Vassallo, A.M., 1996. The dehydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy. *Clays Clay Miner.* 44, 635–651.
- Hanein, T., Thienel, K.-C., Zunino, F., Marsh, A.T.M., Maier, M., Wang, B., Canut, M., Juenger, M.C.G., Ben Haha, M., Avet, F., Parashar, A., Al-Jaberi, L.A., Almenares-Reyes, R.S., Alujas-Diaz, A., Scrivener, K.L., Bernal, S.A., Provis, J.L., Sui, T., Bishnoi, S., Martirena-Hernández, F., 2022. Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Mater. Struct.* 55. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-6>
- He, C., Makovicky, E., Osback, B., 1994. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. *Appl. Clay Sci.* 9, 165–187. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0169-1317(94)90018-3)

- IZADIFAR, M., THISSEN, P., STEUDEL, A., KLEEBERG, R., KAUFHOLD, S., KALTENBACH, J., SCHUHMANN, R., DEHN, F., EMMERICH, K., 2020. COMPREHENSIVE EXAMINATION OF DEHYDROXYLATION OF KAOLINITE , DISORDERED KAOLINITE , AND DICKITE : EXPERIMENTAL STUDIES AND DENSITY FUNCTIONAL THEORY. *Clays Clay Miner.* <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00082-w>
- Jiang, T., Li, G., Qiu, G., Fan, X., Huang, Z., 2008. Thermal activation and alkali dissolution of silicon from illite. *Appl. Clay Sci.* 40, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.08.002>
- Kakali, G., Perraki, T., Tsivilis, S., Badogiannis, E., 2001. Thermal treatment of kaolin: The effect of mineralogy on the pozzolanic activity. *Appl. Clay Sci.* 20, 73–80. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00040-0](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00040-0)
- Kitchen, H.J., Vallance, S.R., Kennedy, J.L., Tapia-Ruiz, N., Carassiti, L., Harrison, A., Whittaker, A.G., Drysdale, T.D., Kingman, S.W., Gregory, D.H., 2014. Modern microwave methods in solid-state inorganic materials chemistry: From fundamentals to manufacturing. *Chem. Rev.* 114, 1170–1206.
- Martirena, F., Alujas, A., 2020. The Dissemination of the Technology “LC3” in Latin America. Challenges and Opportunities, in: RILEM Bookseries. Springer, pp. 777–783. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4\\_86](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_86)
- Martirena, F., Alujas, A., Vizcaino, L., Berriel, S., Díaz, E., Abdel, P., Almenares, R., Scrivener, K., Antoni, M., Habert, G., Favier, A., 2016. Desarrollo y producción industrial de un cemento de bajo carbono en Cuba. *An. la Acad. Ciencias Cuba* 6, 1–8.
- Meier, A., Bonaldi, E., Cella, G.M., Lipinski, W., Wuillemin, D., Palumbo, R., 2004. Design and experimental investigation of a horizontal rotary reactor for the solar thermal production of lime. *Energy* 29, 811–821.
- Muntianu, G., Platon, N., Arus, V.A., Rosu, A.M., Nistor, D.I., Jinescu, G., 2013. Hydrodynamic study of clay particles in fluidized bed. *J. Eng. Stud. Res.* 19, 70.

- Njila, T., Díaz-Martínez, R., 2016. Estudio químico-mineralógico de los perfiles lateríticos ferrosialíticos en los sectores Téneme, Farallones y Cayo Guam en el noreste de Cuba. *Rev. Geológica América Cent.* 54, 67–83. <https://doi.org/10.15517/rgac.v54i0.21149>
- Njila, T., Díaz, R., Orozco, G., Rojas, L.A., 2010a. An overview of non-nickeliferous weathering crusts in Eastern Cuba. *Minería y Geol.* 26, 14–34.
- Njila, T., Díaz, R., Proenza, J., Orozco, G., 2010b. Semi-quantitative mineralogical valuation of the non-nickeliferous weathering crusts in the northeast of Cuba. *Minería y Geol.* 26, 1–15.
- Poll-Legrá, L., Almenares-Reyes, R.S., Romero-Ramírez, Y., Alujas-Díaz, A., Leyva-Rodríguez, C.A., Martirena-Hernández, J.F., 2016. Evaluación de la actividad puzolánica del material arcilloso del depósito La Delta Moa, Cuba. *Minería y Geol.* 32, 15–27.
- Pons, J., Leyva, C., 1996. Empleo de las arcillas ferrocaoliníticas – gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición. *Minería y Geol.* 13, 93–97.
- Pons, J., Pérez, O., Ramírez, B., Ramírez, M., 1997. Caracterización de las arcillas refractarias de la zona de Cayo Guam y su empleo en la fundición. *Minería y Geol.* 14, 19–23.
- Ramachandran, V.S., Paroli, R.M., Beaudoin, J.J., Delgado, A.H., 2002. *Handbook of thermal analysis of construction materials.* Noyes Publications/ William Andrew Publishing, Norwich, New York, United States.
- Ramayo Ramos, M., 2008. Dimensionamiento de un horno rotatorio para la producción de clinker de cemento Portland.
- Rodas Ríos, H.R., 2005. Guía para el diseño de un horno rotatorio para calcinación de arcilla por la vía seca. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Samal, S., 2017. Thermal plasma technology: The prospective future in material processing. *J. Clean. Prod.* 142, 3131–3150.

- Shvarzman, A., Kovler, K., Grader, G.S., Shter, G.E., 2003. The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. *Cem. Concr. Res.* 33, 405–416. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00975-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00975-4)
- Snellings, R., 2011. Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites (Tesis Doctoral). Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Bélgica.
- Todor, D., 1976. *Thermal Analysis of Minerals*, 1st ed. Abacus press, Tunbridge Wells, Kent.
- Tomeczek, J., Palugniok, H., 2002. Kinetics of mineral matter transformation during coal combustion. *Fuel* 81, 1251–1258.
- Wolters, F., Emmerich, K., 2007. Thermal reactions of smectites—relation of dehydroxylation temperature to octahedral structure. *Thermochim. Acta* 462, 80–88.