



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

GUÍA PARA EL DISEÑO DE UN HORNO ROTATORIO PARA
CALCINACIÓN DE ARCILLA POR LA VÍA SECA

Hugo Roberto Rodas Rios
Asesorado por el Ing. José Arturo Estrada Martínez

Guatemala, febrero de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

GUÍA PARA EL DISEÑO DE UN HORNO ROTATORIO PARA
CALCINACIÓN DE ARCILLA POR LA VÍA SECA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HUGO ROBERTO RODAS RIOS
ASESORADO POR ING. JOSÉ ARTURO ESTRADA MARTÍNEZ

GUATEMALA, FEBRERO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Keneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Videz Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales González
EXAMINADOR	Ing. Maurice Bernard Mulet Lezieur
EXAMINADOR	Ing. Jaime René Urbina
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Edgar José Bravatti Castro

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**GUÍA PARA EL DISEÑO DE UN HORNO ROTATORIO PARA
CALCINACIÓN DE ARCILLA POR LA VÍA SECA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica con fecha 8 de febrero de 2005.

Hugo Roberto Rodas Rios

ANEXO

**TABLA X. LADRILLO NECESARIO PARA FORMAR CÍRCULOS
SEGÚN SU DIÁMETRO (CÍRCULOS COMPLETOS)**

Diámetro (m)	arco #2	arco #1	total
1.52	41	32	73
1.55	39	35	74
1.57	38	37	75
1.60	38	38	76
1.62	36	41	77
1.65	35	43	78
1.67	34	45	79
1.70	33	47	80
1.72	32	49	81
1.75	32	50	82
1.77	30	53	83
1.80	29	55	84
1.82	28	57	85
1.85	27	59	86
1.88	26	61	87
1.90	25	63	88
1.93	24	65	89
1.95	23	67	90
1.98	21	71	92
2.00	20	73	93
2.03	19	75	94
2.05	18	77	95
2.08	17	79	96
2.10	16	81	97
2.13	15	83	98
2.16	14	85	99
2.18	13	87	100
2.21	12	89	101

Fuente: catalogo Refractarios A. P. Green, pp. 115.

**CONTINUACIÓN TABLA X. LADRILLO NECESARIO PARA FORMAR
CÍRCULOS, SEGÚN SU DIÁMETRO
(CÍRCULOS COMPLETOS)**

2.26	10	93	103
2.28	9	95	104
2.31	8	97	105
2.33	7	99	106
2.36	6	101	107
2.38	5	103	108
2.41	4	105	109
2.43	3	107	110
2.46	2	109	111
2.49	1	111	112

Fuente: catalogo Refractarios A. P. Green, pp. 115.

B. TRANSPORTADORES HELICOIDALES

Los transportadores helicoidales o de gusano, son elementos de transporte que empujan materiales líquidos o granulares. Están constituidos por un eje central alrededor del cual se desarrolla una franja helicoidal, de acuerdo con los requerimientos de precisión los transportadores helicoidales se construyen ya sea maquinados sobre su eje o como sucede para la mayoría de productos, en que es posible construirlos con lámina soldada a un tubo que sirve de eje. Este dispositivo permite lograr buenos resultados y costos bajos de construcción. El gusano transportador se ubica en el interior de una carcaza de lámina, la que confina al material y permite el trabajo de transporte del helicoidal; la carcaza debe separarse ligera y gradualmente del eje del gusano, es decir, que se coloca desalineada o en cuña en relación al eje con el objeto que el material no se atore en su camino. Es necesario tomar en cuenta a la hora de seleccionar los materiales de construcción, que dentro del transportador de gusano tiene lugar una fuerte abrasión por el deslizamiento del material contra las paredes de la hélice del gusano.

Al hacer uso de un análisis con coordenadas cilíndricas, es fácil demostrar que para un diámetro de eje (tubo) D y un paso p de las espiras del gusano, el diámetro interno d de los anillos de lámina que sería necesario cortar para generar cada espira, está dado por la siguiente ecuación;

$$d = \sqrt{D^2 + (p/\pi)^2}$$

El flujo de material en el interior del gusano transportador está determinado por varios factores, a saber, el diámetro del eje (tubo) D , el diámetro exterior de la hélice del gusano Φ , la velocidad de rotación del gusano en rpm, el paso del gusano p , la densidad ρ del material que se transporta y el grado de llenado del transportador del gusano, ya que de acuerdo a la aplicación que se está haciendo y de las características del material que se transporta varía el grado de llenado. Para aclarar este punto piense que no será el mismo grado de llenado el que se utilice en un transportador de caliza molida al usado en un sistema de inyección de plástico; de acuerdo con ello el caudal a través del gusano transportador está dado por;

$$Q = \pi/4 * \% \text{ llenado} * (\Phi^2 - D^2) * p * \rho * \text{rpm}$$

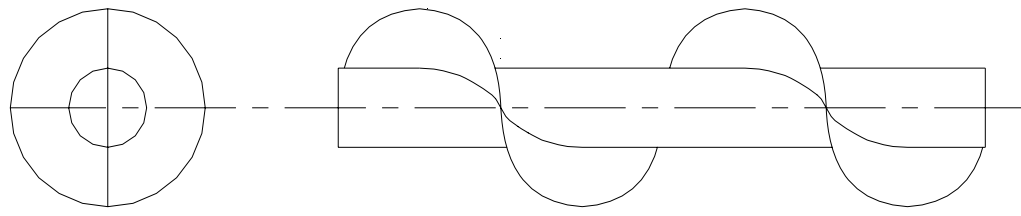
La potencia necesaria para accionar un transportador de gusano, (de acuerdo con un folleto de "operaciones unitarias" y corrigiendo el denominador presentado como 45,000, por 4,500), está dada por la siguiente ecuación,

$$CV = \frac{(\text{COEFICIENTE})(\text{CAPACIDAD Kg/min})(\text{LONGITUD m})}{4,500}$$

el coeficiente es

- = 4.0 para las cenizas
- = 2.5 para el carbón
- = 1.3 para los granos

FIGURA 27. TRANSPORTADOR DE GUSANO



APÉNDICE A. EJERCICIO DE DISEÑO

Dimensionar un horno rotatorio para calcinar arcilla de alto contenido de alúmina. Se requiere para ello 2.12×10^6 J/Kg de material, con una capacidad de 2 TM/hora (2,000 Kg/hora) de arcilla a calcinar, como combustible se utilizará diesel (*fuel oil #2*), el talud natural del material es 36° , se usará un grado de llenado del 10 %, la densidad del arcilla es $2,200 \text{ Kg/m}^3$, el horno trabajará por la vía seca. Asíumase que el largo del horno es de 20 m y el diámetro interior de 1.75 m

Caudal de material

$$\begin{aligned} Q &= \text{capacidad} / \text{densidad del material} \\ &= (2,000 \text{ Kg/hora}) / (2,200 \text{ Kg/m}^3) \\ &= 0.9091 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

Area interior

$$\begin{aligned} A &= \pi \cdot d^2 / 4 \\ &= \pi \cdot (1.75)^2 / 4 \\ &= 2.4053 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Velocidad del material en el interior del horno

$$\text{Grado de llenado} = \frac{Q \cdot 100}{60 \cdot V \cdot A}$$

entonces,

$$V = (0.9091 * 100)/(60 * 0.10 * 2.4053)$$

$$= 6.299 \text{ m/min}$$

Velocidad de rotación

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

entonces,

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

$$n = \frac{1.77 * 36 * 20 * 1}{p * 1.75 * 15}$$

si se considera que el grado de llenado sea del 10 %, la pendiente correspondiente sería del 4 %, es decir, de 2.29°.

$$n = \frac{1.77 * 36 * 20 * 1}{2.29 * 1.75 * 15} = 3.53 \text{ rpm}$$

Determinación e integración de cargas

Si se asume que el espesor de refractario es de 4" y el espesor de pared metálica de 3/8".

Considérese el diámetro de los aros de rodadura 0.40 m mayor que el diámetro del cuerpo metálico,

Carga muerta

$$P = \pi * D * e * l * \gamma_{\text{metal}} + \pi (D - 2e) * s * l_{\text{ais}} * \gamma_{\text{ais}} + \pi (D - 2(e + s)) * t * l_{\text{ref}} * \gamma_{\text{ref}}$$

pero,

$$D = 1.75 + 2 * (4 * 0.0254 \text{ m}) = 1.95 \text{ m}$$

entonces,

$$P = \pi (20) (1.95 * (3/8 * 0.0254) * 7840 + 1.75 * 0.10 * 2,300 \text{ Kg/m}^3) = 34,439.28 \text{ Kg}$$

Carga viva

$$Q_1 = 0.1 * d^2 / 4 * l * \rho_{\text{mat}} = 0.1 * 2.4053 * 20 * 2,200 = 10,583.32 \text{ Kg}$$

luego, la carga total sería,

$$Q = P + Q_1 = 34,439.28 + 10,583.32 = 45,022.60 \text{ Kg}$$

Reacciones

$$w = \frac{Q \cos \theta}{l} = \frac{45,022.60 \text{ Kg} * \cos 2.29^\circ}{20 \text{ m}} = 44,986.64 \text{ Kg}$$

$$= \frac{\quad}{20 \text{ m}} = 2,249.33 \text{ Kg/m}$$

por simetría del modelo, $p_y = q_y$,

$$p_y + q_y = w * l = 44,986.64 \text{ Kg}$$

entonces se supone que $p_y = q_y$

$$2 p_y = 44,986.64 \text{ Kg}$$

$$p_y = 22,493.32 \text{ Kg}$$

si se desea lograr que el momento flexionante sea el mismo tanto en el centro de la luz entre apoyos como en los apoyos mismos,

$$wx^2/2 = (pl - (wl + 2p)x + 2wx^2)/4 - wx^2/2$$

$$4wx^2 = pl - (wl + 2p)x + 2wx^2$$

$$\text{pero, } 2p = wl \quad \text{ó} \quad p = wl/2$$

se sustituye,

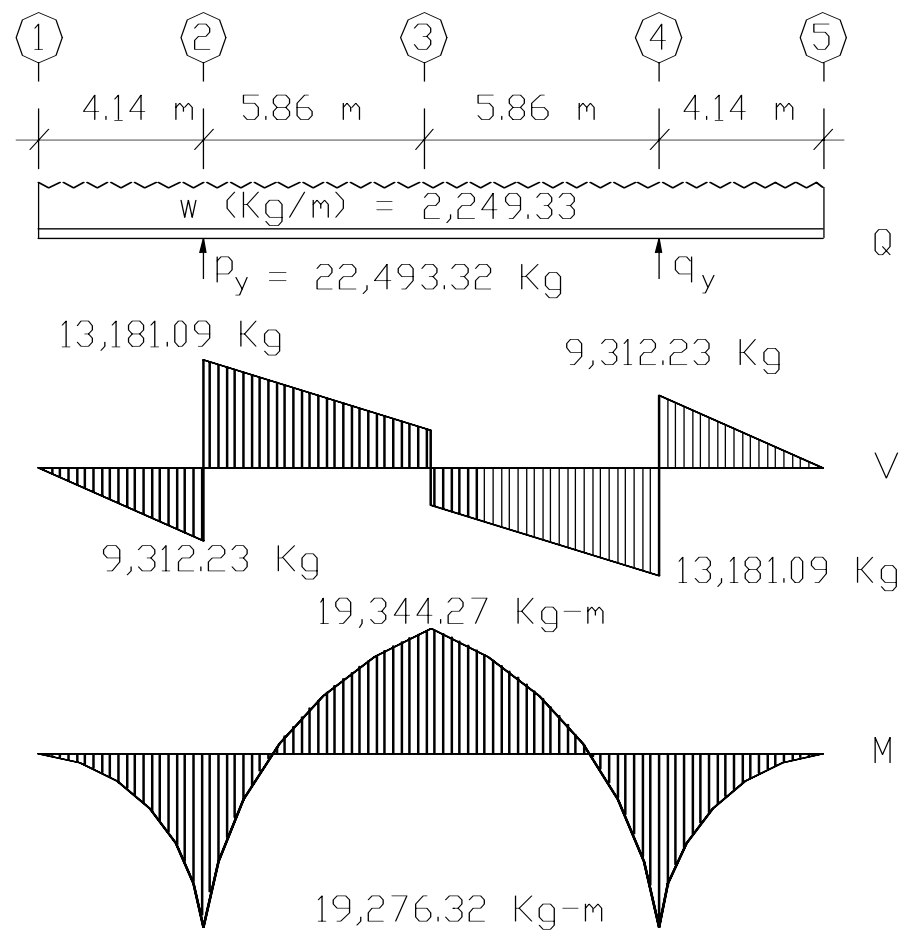
$$4x^2 + 4lx - l^2 = 0$$

se resuelve,

$$x = \frac{-1 + \sqrt{2}}{2} l = 0.207 l$$

de manera que el diagrama de corte y momento quedaría como,

FIGURA 26. DIAGRAMAS DE CORTE Y MOMENTO



Potencia requerida

$$P_f = W \cdot b \cdot d \cdot t \cdot N \cdot F \cdot 5.9569 \times 10^{-4} / r_d =$$
$$= \frac{44,986.46 \cdot 0.10 \cdot 2.35 \cdot 3.53 \cdot 0.06 \cdot 5.9569 \times 10^{-4}}{0.20}$$

$$= 6.67 \text{ KW}$$

$$P_m = (D \sin \theta)^3 \cdot N \cdot L \cdot K =$$
$$= (1.75 \cdot 0.73)^3 \cdot 3.53 \cdot 20 \cdot 0.918 =$$
$$= 13.51 \text{ KW}$$

$P = P_f + P_m = 6.67 + 13.51 = 20.18 \text{ KW (27 hp)}$, el más próximo motor de tipo comercial sería de 30 hp.

Torque transmitido

$$T = (725.85 \cdot \text{hp}) / n$$
$$= (725.85 \cdot 30) / 3.53 = 6168.70 \text{ m-Kg.}$$

Fuerzas de tracción

$$F_1 = 3T / 2R \quad \{\text{el radio aproximado de la corona será 1 m}\}$$
$$= 3 (6,168.70) / (2 \cdot 1) =$$
$$= 9,253 \text{ Kg.}$$
$$F_3 = T / 2R = 6,168.70 / 2 = 3,084.35 \text{ Kg}$$

Verificación del espesor de placa

$$S_{smax} = 0.5 \cdot S_{yp}$$
$$0.5 \cdot S_{yp} = \frac{16 \sqrt{\left[\left(M_m + S_{yp} \frac{M_r}{S_e} \right)^2 + \left(T_m + S_{yp} \frac{T_r}{S_{se}} \right)^2 \right]}}{\pi \cdot (D_o)^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^4 \right]}$$

Para acero estructural ASTM A-36 el límite de fluencia (S_{yp}) se considera $25.31 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2$ ($36,000 \text{ lb/plg}^2$), luego

$$S_e = C_R C_S C_F C_W (1/K_f) S_n'$$

$$C_R = 1 - 0.08(\text{DMF})$$

con razón de supervivencia de 98%, DMF = 2.05 (tabla 3.2 "Diseño de máquinas", Aaron Deustchmann)

entonces,

$$C_R = 1 - 0.08(2.05) = 0.836$$

$$C_S = 0.70$$

$$C_F = 0.5$$

$$C_W = 0.833$$

$$K_f = 1.3$$

$$S_n' = 0.4 S_u \quad (S_u = 42.18 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2, 60,000 \text{ psi})$$
$$= 0.4 * 42.18 \times 10^6 = 16.87 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2$$

luego,

$$\begin{aligned} Se &= 0.836 * 0.70 * 0.5 * 0.833 * 1/1.3 * 16.87 * 10^6 = \\ &= 3.16 * 10^6 \text{ Kg/m}^2 \end{aligned}$$

al sustituir en la ecuación de corte máximo, y transponer términos,

$$1 - (D_i/1.95)^4 = \frac{16v [(19,344 + 25.31 * 10^6)^2 + (6,1668.70)^2]}{0.5 * 25.31 * 10^6 * \pi * (1.95)^3}$$

$$1 - (D_i/1.95)^4 = 1.102 * 10^{-3}$$

$$(D_i/1.95) = \sqrt[4]{1 - 1.102 * 10^{-3}} = 0.9997$$

$$D_i = 1.949 \text{ _____ OK}$$

REFERENCIAS

- ¹ "ESTUDIO TÉCNICO SOBRE LAS ARCILLAS Y EL CAOLÍN DE GUATEMALA", Dirección General de Minería, Ministerio de Energía y Minas, Guatemala 1,988 (ensayo inédito).
- ² DUDA, Walter. Manual tecnológico del cemento. Traducido por Antonio Sarabia González. España: Editores técnicos asociados. 1,977.
- ³ ALLIS CHALMERS CORP. Rotary Kilns. Estados Unidos. Allis Chalmers corp. folletos.
- ⁴ DUDA, Walter. Op. cit.
- ⁵ H. W. FLIR. "folleto de refractarios" , Harbison y Walker
- ⁶ H. W. FLIR. Op. cit
- ⁷ H. W. FLIR. Op. Cit
- ⁸ DUDA, WALTER "Manual Tecnológico del Cemento"
- ⁹ DUDA, WALTER Op. cit.
- ¹⁰ DEUTSCHMAN, AARON. "Diseño de máquinas, teoría y práctica". Editorial Cecsa. México. 1987.
- ¹¹ DEUSTCHMAN, AARON. Op. cit.
- ¹² NTN CORPORATION. "Rodamientos de bolas y de rodillos". cat. No. 2200/s. Japón. 1,991.
- ¹³ NTN CORPORATION. Op cit.
- ¹⁴ NTN CORPORATION. Op. cit.
- ¹⁵ DUDA, WALTER. Op. cit.
- ¹⁶ DUDA, WALTER. Op. cit.

¹⁷ DUDA, WALTER. Op. cit.

¹⁸ KENEDY VAN SAUN CORP. "Lime Burning Technology"

¹⁹ DUDA, WALTER. Op. cit.

²⁰ BAUMEISTER, et al. "Manual del ingeniero mecánico", octava edición. México, 1,990. Mc. Graw Hill.

BIBLIOGRAFIA

- 1 CIFUENTES MEDINA, EDELIBERTO. “La aventura de investigar, el plan y la tesis”. Guatemala: Magna Terra, 2003. 214 p.

CONCLUSIONES

- 1) Es posible diseñar y construir un horno rotatorio en Guatemala, reducir la importación de equipos provenientes del extranjero, y lograr un costo inicial bastante menor.
- 2) Es posible comprar localmente muchos de los materiales que se utilizarán durante la construcción del horno rotatorio.
- 3) Varios materiales localizados en el país, pueden ser objeto de calcinación en un horno rotatorio, para obtener un producto de mayor valor.
- 4) Los costos más bajos asociados a tecnologías propias o apropiadas, permiten a los inversionistas obtener perspectivas a mediano y largo plazo que pueden resultar interesantes para ellos, permitiendo penetrar en campos que hasta ahora podrían estar en manos extranjeras, esto a su vez puede generar empleos en las comunidades en las que se establezca tales proyectos.
- 5) El desarrollo económico de cualquier país, va ligado a su desarrollo tecnológico, esto lo muestran los países desarrollados; por lo tanto es imprescindible desarrollar equipos y técnicas que permitan el desenvolvimiento del sector industrial.

RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda que todo material que sea considerado para ser calcinado en un horno rotatorio, sea previamente probado en laboratorio, tanto para asegurar que el proceso que se le aplicará será efectivo, como para obtener los valores de los parámetros que servirán de punto de partida al diseño del horno rotatorio.
- 2) Es aconsejable no escatimar en la calidad de los materiales constructivos del horno rotatorio, especialmente cuando se involucre aspectos de seguridad.
- 3) En el momento de la realización de un proyecto de diseño, para un equipo cualquiera y en particular para un horno rotatorio y sus equipos de respaldo, debe tenerse cuidado de hacer una memoria de cálculo y realizar estos en forma organizada, tal como se propone en este trabajo.
- 4) Al ejecutar el proyecto de construcción de los equipos, debe valorarse la experiencia de quienes vayan a realizarlo; esto es, usar los servicios de personas capacitadas, más vale hacerlo bien desde la primera vez.
- 5) Durante la construcción y al final de ésta, verifíquese de manera concienzuda la alineación, nivelación y asegúrese que el horno no tenga ovalidades.

1. GENERALIDADES

1.1. Definición de arcilla

El término arcilla es verdaderamente ambiguo sin una definición específica, ya que se utiliza en tres sentidos. Primero como un grupo diverso de minerales de grano fino; segundo en términos de una roca; y finalmente en términos de tamaño de partícula.

En términos de una roca, el arcilla es difícil de definir por la amplia variedad de materiales que la componen, por tanto la definición debe ser general. La arcilla es un material terroso, de grano fino, compuesto principalmente de minerales cristalinos conocidos como minerales arcillosos. Estos minerales son silicatos hidratados compuestos principalmente de sílice, alúmina y agua. Algunos de estos minerales también contienen cantidades apreciables de hierro, álcalis y alcalinoterreos. Muchas definiciones establecen que el arcilla es plástica cuando está húmeda, muchos materiales arcillosos poseen esta propiedad, pero, algunas arcillas no son plásticas; por ejemplo, la *Haloisita*.

En términos del tamaño de partícula se usa la palabra arcilla para designar una categoría que incluye las partículas más pequeñas; que para unos es menor del tamaño de la partícula 2 μm y para otros menor de 4 μm .

Como minerales industriales, las arcillas son un complejo grupo de minerales que poseen diferente mineralogía, ocurrencia geológica, tecnología y usos. De esta manera se puede hablar de su clasificación como, Bentonita y Tierras de *Fuller*, y Caolín, *Ball Clay*, *Haloisita* y Arcillas Refractarias.

La ingeniera Ana E. Muñoz refiere en su "estudio sobre arcillas" que existe la siguiente clasificación de las arcillas por su uso en la industria,

- Usos cerámicos
 - productos estructurales
 - porcelanas
 - refractarios
 - alfarería
 - agregados de arcilla expandida
- Usos no cerámicos
 - arcillas decolorantes
 - arcillas adsorbentes
 - material de relleno
 - pigmentos
 - matrices de fundición
 - lodos o barros de perforación
 - cementos
 - usos varios

1.1.1. Caolín

El caolín tiene muy variados usos en la industria. Es un material excepcional por sus características es químicamente inerte en un rango muy amplio de PH. Su color es blanco, posee un gran poder cubriente cuando se usa como pigmento o dispersante en películas protectoras. Es suave y no abrasivo, posee una muy baja conductividad térmica y eléctrica. Se le ha utilizado ampliamente en la fabricación de papel, llena los intersticios de la hoja y cubre la superficie, favorece brillo, textura, opacidad, blancura, etc. En la industria del hule se usa como relleno o como dispersante tanto en hule natural como sintético. El caolín es usado como dispersante en pinturas porque es químicamente inerte y tiene un alto poder cubriente.

El caolín calcinado es un excelente dispersante para el Dióxido de Titanio (TiO_2), el pigmento más utilizado en pinturas, principalmente en las de tipo látex.

El caolín calcinado o parcialmente calcinado es utilizado como relleno de aislamiento PVC de cables de cobre, para incrementar su resistencia eléctrica. El caolín es usado en aislantes gracias a sus propiedades de baja conductividad, alta constante dieléctrica, plasticidad y resistencia al fuego.

1.1.2. *Ball clay*

Es un material arcilloso extremadamente plástico, se utiliza principalmente en la fabricación de loza sanitaria, porcelana eléctrica, azulejos; también, se utiliza en la fabricación de productos refractarios y esmaltes cerámicos.

1.1.3. *Haloisita*

Material arcilloso usado como relleno y dispersante en alimentos, también ha sido utilizado en alfarería, ladrillos, ladrillos refractarios, azulejos, como relleno en papel y hasta en la fabricación de cemento *Pórtland*.

1.1.4. *Arcillas refractarias*

Utilizadas principalmente en la fabricación de ladrillos refractarios y bloques de muchas formas, ladrillos aislantes, morteros y mezclas refractarias, etc. Un material relacionado llamado Mulita Refractaria se hace calcinando arcilla bauxítica. Restricciones en la arcilla bruta, comúnmente incluyen límites sobre plasticidad, impurezas, contenido de álcalis, tierras alcalinas y otros constituyentes que reducen el punto de fusión. Puede esperarse que el mercado de los productos y arcillas refractarias crezca consistentemente.

1.2. *Características del arcilla*

1.2.1. Color

De acuerdo al uso que se dará al arcilla el color puede resultar de mucha importancia, tal es el caso de los pigmentos o el del caolín usado en la industria del papel. Es necesario notar que puede existir una notable variación entre el color natural del arcilla y el color después de un proceso de cocción.

1.2.2. Potencial de hidrógeno (ph)

Como sucede con otros muchos materiales, las arcillas muestran un ph bastante característico, como puede ser un ph ligeramente ácido en los caolines y uno ligeramente alcalino en la bentonita.

1.2.3. Plasticidad

Es una característica que anteriormente era considerada esencial en la definición de arcilla, ahora se sabe que aunque la mayoría de las arcillas la presentan, algunas no lo hacen; esta propiedad consiste en la capacidad del material de dejarse moldear o transformar con relativo bajo esfuerzo y conservar luego la forma que se le dio; esto sucede cuando el material se humedece con agua. Esta propiedad es muy importante en los usos cerámicos del material.

1.2.4. Contenido de humedad y pérdidas por ignición

Los materiales arcillosos suelen contener agua, ésta se encuentra presente en dos formas, la primera es el agua que forma parte intrínseca de las moléculas del arcilla y según sea la cantidad de agua en la molécula el material puede presentar distintas apariencias y usos.

Por otro lado se encuentra el agua que humedece el material que se conoce como agua de hidratación, ésta se halla mezclada con el material pero no forma parte molecular de éste.

El agua presente en la molécula del material puede determinarse por un ensayo conocido como "pérdidas por ignición" y el agua de hidratación por el "contenido de humedad".

1.2.5. Tamaños de partícula

Se refiere al tamaño de los minúsculos granos que componen el arcilla, esta propiedad es muy importante en pigmentos y productos de pinturas donde es necesario un alto poder cubriente, que es logrado cuanto más pequeña es la partícula del material, esto debido a que está condicionado por la relación del área superficial de la partícula a su volumen, y esta relación crece cuando el tamaño de partícula disminuye.

1.2.6. Porosidad

Se refiere a la cantidad de espacios vacíos que existen entre una partícula y otra del material, esta propiedad puede resultar de interés para materiales aislantes o para arcillas adsorbentes.

1.3. Algunas arcillas típicas de Guatemala

Una arcilla resulta interesante para el proceso de calcinación, para obtener materia prima para la industria química, relleno de forros aislantes para conductores eléctricos, cementos y agregados refractarios, etc.

Si en primera instancia cuenta con un alto contenido de alúmina (Al_2O_3), luego, es también conveniente contar con un material con el menor contenido de contaminantes como hierro y otros. Estas características pueden obtenerse de materiales como caolines, *haloisita*, *ball clay* y arcillas refractarias. Estas arcillas pueden encontrarse en varios sitios de Guatemala, a continuación se menciona algunos de los depósitos de material en el territorio nacional¹.

1.3.1. Depósito de arcilla de Sulín

Este depósito predominantemente de tipo *haloisita*, situado a 2 ó 3 Km al Noroeste de Purulhá a una altitud de 1,578 msnm, en la confluencia del río Sulín y el arroyo Suquinay, presenta una buena variedad de materiales con colores que van del gris claro al gris-negro, y cuyo análisis químico muestra variaciones del 20 al 75 % de SiO_2 y de 6 a 27 % de Al_2O_3 .

1.3.2. Depósito de haloisita El Carpintero, Baja Verapaz

Este depósito está localizado a 2.4 Km al Este de Purulhá a una altitud de 1,570 msnm, en los márgenes del río Sulín, la calidad del material de este depósito se supone superior a la de Sulín.

1.3.3. Depósito de haloisita Panimaquito, Baja Verapaz

Está ubicado 1.5 Km al Sur de Purulhá, aguas abajo del río Panimá, presenta poca presencia de hierro y una mayor presencia de materia orgánica.

1.3.4. Depósito de caolín El Hato, San Antonio la Paz, El Progreso

Depósito localizado a 700 m al Sur de la aldea el Hato y a 2.5 Km al Suroeste de San Antonio La Paz, a una altura de 940 a 1,000 msnm.

El caolín de el Hato presenta impurezas de hierro y abundante sílice, pero, de buena calidad.

1.3.5. Depósito de caolín La Fumarola, Santa Rosa

Se ubica a 5.5 Km al Noreste de Moyuta y a 2 Km aproximadamente al Oeste de la aldea Azulco a una elevación de 600 a 660 msnm; el caolín en general tiende a ser de buena calidad y es de color blanco, excepto, en ciertas partes irregulares que están coloreadas de café amarillento.

1.3.6. Depósito de caolín El Volcán, Moyuta, Jutiapa

Situado a 6 Km al Suroeste del poblado de Moyuta, a una altura de 1,120 msnm, el caolín parece ser bueno excepto la parte central que presenta contaminación por hierro y azufre.

1.3.7. Afloramiento de caolín Obraje, Chiquimula

Se ubica a 1.5 Km al Suroeste de Obraje a una altura de 640 msnm.

1.3.8. Afloramiento de caolín Olinstepeque, Quetzaltenango

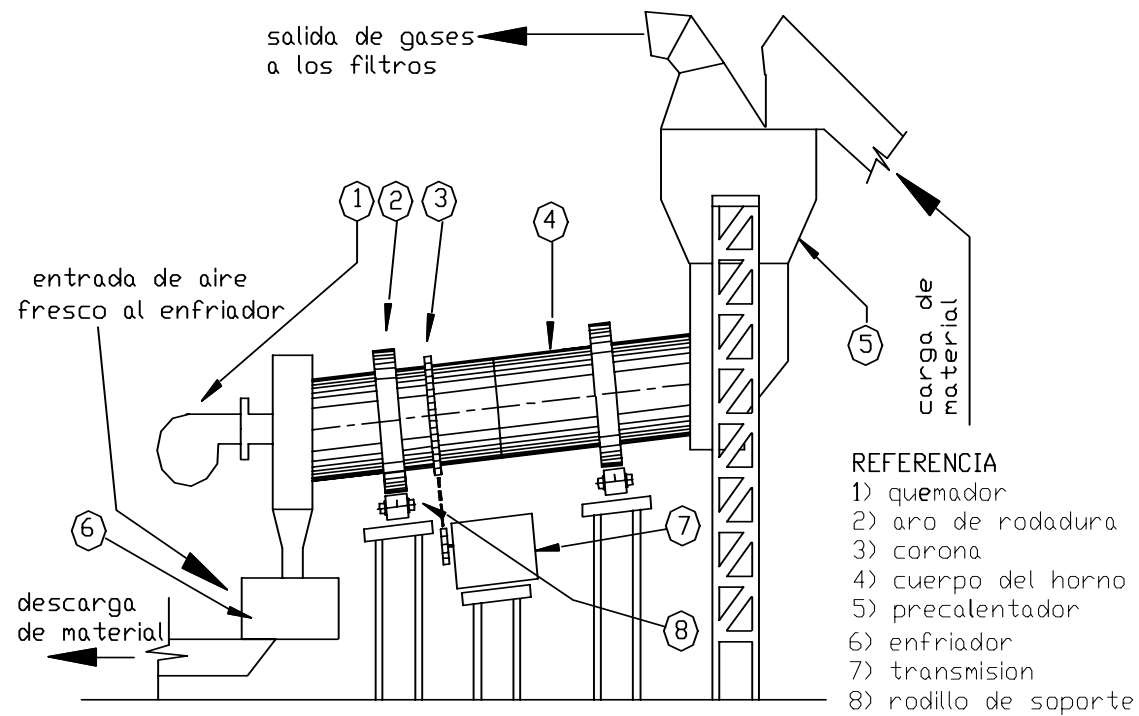
Se encuentra ubicado a 9 Km al Norte de Olinstepeque, sobre la quebrada Riachuelo Grande y muy cerca de la carretera, a una altura de 2630 a 2650 msnm. El análisis químico de este material revela un 38.25 % de Al_2O_3 , y 45.16 % de SiO_2 , un tanto manchado con óxido de hierro y mezclado con poco humus.

¹Información recabada del folleto "ESTUDIO TECNICO SOBRE LAS ARCILLAS Y EL CAOLIN DE GUATEMALA", Dirección General de Minería, Ministerio de Energía y Minas, Guatemala 1,988.

2. CAPACIDAD DEL 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 del mismo en paralelo o contracorriente con el flujo de gases calientes que desecan y calcinan el arcilla, descargándose ésta por el extremo inferior del horno.

FIGURA 1. Esquema de una planta de calcinación con horno rotatorio



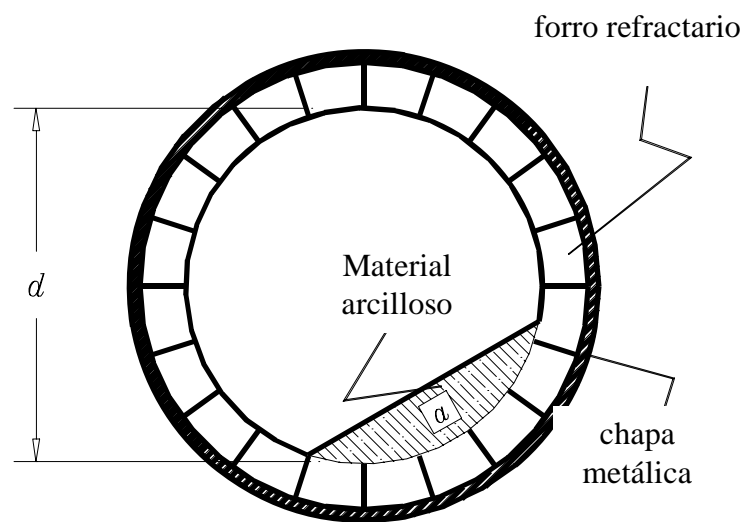
Se dice que la arcilla se alimenta por vía seca, cuando se deja trabajar sin que su contenido de agua la convierta en una pasta que se adhiere fuertemente a las paredes y por ello no corra libre por el interior del horno; en el caso contrario se conoce como vía húmeda, entonces es necesario proveer al horno de elementos internos que remuevan el arcilla de las paredes y les permita correr, este trabajo de tesis se concentrará en hornos por vía seca. La capacidad del horno rotatorio depende de variables tales como grado de llenado, pendiente y velocidad, y de las características del arcilla. En la figura 1, se muestra un esquema que representa una planta de calcinación por horno rotatorio.

2.1. Grado de llenado

El material en el interior del horno no ocupa toda el área transversal disponible, sino, solamente una pequeña fracción de ésta para permitir el transporte y el intercambio de calor. En este punto cabe resaltar que dentro del horno tienen lugar dos funciones básicas, la primera es el transporte del material a través del horno y la otra el intercambio de calor de los gases calientes y de las paredes del horno hacia el material. Se llama pues, grado de llenado al porcentaje de área transversal ocupada por el material, esto es, la relación entre el área ocupada y el área transversal interna del horno, esta relación se muestra en la figura 2.

Según Walter Duda² "Los grados de llenado fluctúan entre los límites del 5 al 17 %..", pero, Allis Chalmers³, 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 2. Grado de llenado del horno rotatorio



Fuente: "Manual tecnológico del cemento", Duda, Walter.

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 .

2.2. Pendiente del horno

El material dentro del horno se traslada gracias al movimiento rotatorio, pero se desplaza a través del mismo, desde un extremo hacia al otro por que 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. A continuación se presenta una tabla que muestra esta relación para valores de llenado en el rango de los considerados óptimos.

TABLA I. Grado de llenado en función del ángulo α

ÁNGULO α (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

Fuente: Walter Duda. "Manual tecnológico del cemento". p. 201.

2.3. Velocidad del horno

El término velocidad del horno se refiere a la rapidez con que el horno rota sobre su eje, ésta puede tomarse como las vueltas o revoluciones que el horno da sobre su eje en un período de un minuto; más recientemente se tiende a tomar como parámetro la velocidad tangencial (periférica) del casco del horno en pies/min o m/s, para efectos del diseño mecánico conviene contar con el dato de las rev/min (rpm) que afectará la selección de los elementos mecánicos de transmisión de potencia y soportes de carga.

TABLA II. 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

Fuente: Walter Duda. "Manual tecnológico del cemento". p. 201.

2.4. 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 el 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.

2.5. Cálculos correspondientes

Para el cálculo de las variables relacionadas con la capacidad del horno que determinan su dimensionamiento, se cuenta con las ecuaciones de la Oficina de minas de los Estados Unidos, las que se describen a continuación. El grado de llenado se relaciona con el caudal de material y el área transversal del horno de la siguiente manera.

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

Fuente: Allis Chalmers Corp. "Rotary kilns".

Q = Flujo de material en metros cúbicos por hora

V = Velocidad con que el material viaja a lo largo del horno en metros por minuto

= longitud del casco del horno en metros dividido por el tiempo de residencia en minutos

A = área de la sección transversal del forro interior (si se tiene) en metros cuadrados

Determinando la pendiente del horno y el tiempo de residencia y definiendo el largo y el diámetro del horno, puede calcularse la velocidad de rotación del horno usando la siguiente relación:

$$t = \frac{1.77 * \theta * L * F}{P * d * n}$$

Fuente: Allis Chalmers Corp. "Rotary kilns".

t = tiempo de residencia en minutos

L = longitud del horno en metros

p = pendiente del horno (grados)

d = diámetro del horno en metros

n = velocidad de rotación del horno en rpm

θ = talud natural del material seco (grados sexagesimales), el talud natural para caliza y arcilla es aproximadamente 36, entonces, $\sqrt{36} = 6$

F= factor de estrangulación, los dispositivos de elevación y los celulares duplican, aproximadamente, el tiempo de residencia, F = 2; si no se tiene elevadores ni obstrucciones en el interior del horno, entonces se toma F = 1.

Si se considera que el horno no tendrá elevadores internos, ni restricciones de flujo, y el talud natural del material es 36. La relación anterior se transforma a la siguiente:

$$t = \frac{1.77 * 6 * L}{p * d * n}$$

$$t = \frac{10.62 * L}{p * d * n}$$

² DUDA, Walter. Manual tecnológico del cemento. Traducido por Antonio Sarabia González. España: Editores técnicos asociados. 1,977.

³ ALLIS CHALMERS CORP. Rotary Kilns. Estados Unidos. Allis Chalmers corp. folletos.

3. REVESTIMIENTO INTERNO 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.

Considérese, por ejemplo, que la lámina de acero al carbón soporta una temperatura de hasta 300°C, pero, también es necesario tomar en cuenta que el casco está sometido a deformaciones tanto térmicas como de esfuerzos mecánicos, de tal manera que arriba de determinados valores, según sean las condiciones del horno particular, puede conducirse a deflexiones o deformaciones permanentes, con lo que se echaría a perder el casco, esto hace que el revestimiento cobre una gran importancia.

No se recomienda el uso de revestimiento externo en los hornos ya que puede ocasionar sobrecalentamiento del casco, por el contrario, éste puede ser enfriado para lograr una operación segura. Cuando la temperatura del casco sea mayor de los 300°C, podrá usarse acero inoxidable para su construcción.

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.

3.1. Revestimiento refractario

El revestimiento refractario es comúnmente un material duro, resistente al calor y al desgaste, debe de ser compatible con el material que se calcina, ya que si no se tiene previsto puede provocarse una reacción química entre el material y el refractario.

El material refractario no es siempre duro y resistente al desgaste, y esto depende del tipo de refractario y el tipo de aplicación.

3.1.1. Clasificación

Existe una muy amplia gama de productos refractarios, que pueden seleccionarse según la temperatura a que serán sometidos, las condiciones de trabajo, la compatibilidad química, la resistencia mecánica, condiciones de montaje, etc. Puede clasificárseles por su composición química y por su presentación.

3.1.1.1. Clasificación por composición química

En cuanto a composición química, los refractarios interesantes para la calcinación de arcillas en horno rotatorio se agrupan esencialmente en dos fuertes ramas, refractarios básicos y refractarios silico-aluminosos.

Los refractarios básicos son preferidos por su resistencia química, y por favorecer ciertas reacciones, tal es el caso de su uso en hornos de cemento, pero, hay que notar que son muy sensibles al choque térmico.

Los refractarios silico-aluminosos en cambio, son preferidos cuando es necesaria la resistencia al choque térmico, de esta manera son capaces de soportar paradas más frecuentes que los refractarios básicos, su resistencia química es reducida, pero, su costo es considerablemente más bajo, su capacidad de soportar temperaturas altas se incrementa con el contenido de alúmina, esto es, mientras mayor sea su contenido de alúmina (Al_2O_3) mayores temperaturas podrá soportar.

3.1.1.2. 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.

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.

Se utiliza con éxito en todo sitio donde se requiere protección a alta temperatura y no es necesaria una elevada resistencia mecánica, tiene la cualidad de tomar la forma del recipiente en el que se formula, conservando ésta después de fraguado; desafortunadamente, no se le puede comprimir y por ello su resistencia mecánica es considerablemente menor que la de casi cualquier ladrillo refractario. Es necesario hacer notar que por ser formado a conveniencia, el recubrimiento de concreto refractario puede tener un espesor particular, esto a diferencia de los ladrillos que se fabrican en serie y en donde el proyecto debe sujetarse a los espesores comerciales. Este punto es muy importante, ya que en aquellos lugares donde puede aplicarse el concreto refractario sin ocasionar problemas, puede generar considerables ahorros comparado con el uso de ladrillos, sin embargo, hace falta tener en cuenta que para la fijación del concreto refractario a la chapa metálica es necesario utilizar anclas de acero soldadas para darle soporte al concreto.

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, sin embargo, se les utiliza muy ampliamente en

la reparación de cuerpos de ladrillo refractario.

3.1.2. Ladrillo refractario

Es el más difundido gracias a su resistencia al desgaste, pero, en general su resistencia mecánica es muy elevada; es necesario notar que en el horno rotatorio se producen grandes deformaciones por los esfuerzos mecánicos y por efectos térmicos, particularmente en la zona cercana a los aros de rodadura, el área transversal del horno se ve seriamente deformada por un fenómeno de aplastamiento conocido como ovalidad, esto somete al ladrillo refractario a compresión y descompresión continuamente lo que hace que se exija de los ladrillos una resistencia mecánica elevada. Probablemente para la mayor parte de diseños de hornos para calcinación de arcilla resultará más práctico el uso de ladrillo refractario silico-aluminoso, por lo que se tomará como base en el desarrollo de este trabajo.

3.1.2.1. Calidades o tipos

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, aunque normalmente no en el mercado local, ladrillos refractarios de alta alúmina que tienen aplicación en los

rangos indicados a continuación.

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

3.1.2.2. Formas

Los ladrillos refractarios presentan varias formas comerciales, entre las que se puede contar ladrillo recto o estándar, arco, punta, llave y teja. En la figura 3 se presenta gráficamente algunas formas de ladrillo refractario en la serie de 9" X 4 ½".

Figura 3. Ladrillo refractario, formas

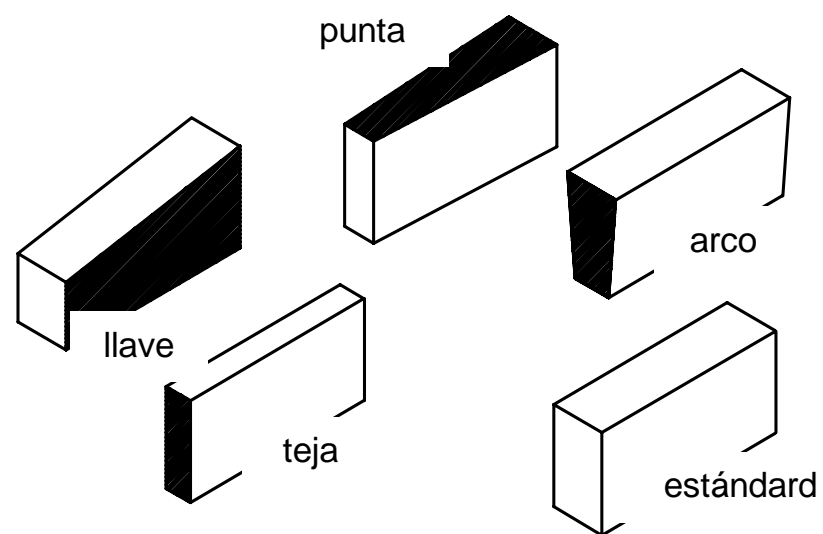


Tabla III. Temperaturas de puntos extremo de conos pirométricos americanos

No. de cono	Punto extremo °C
18	1,490
19	1,520
20	1,530
23	1,580
26	1,595
27	1,605
28	1,615
29	1,640
30	1,650

31	1,680
32	1,700
32 ½	1,725
33	1,745
34	1,760
35	1,785
36	1,810
37	1,820
38	1,835

Fuente: catálogo de Refractarios de A. P. Green

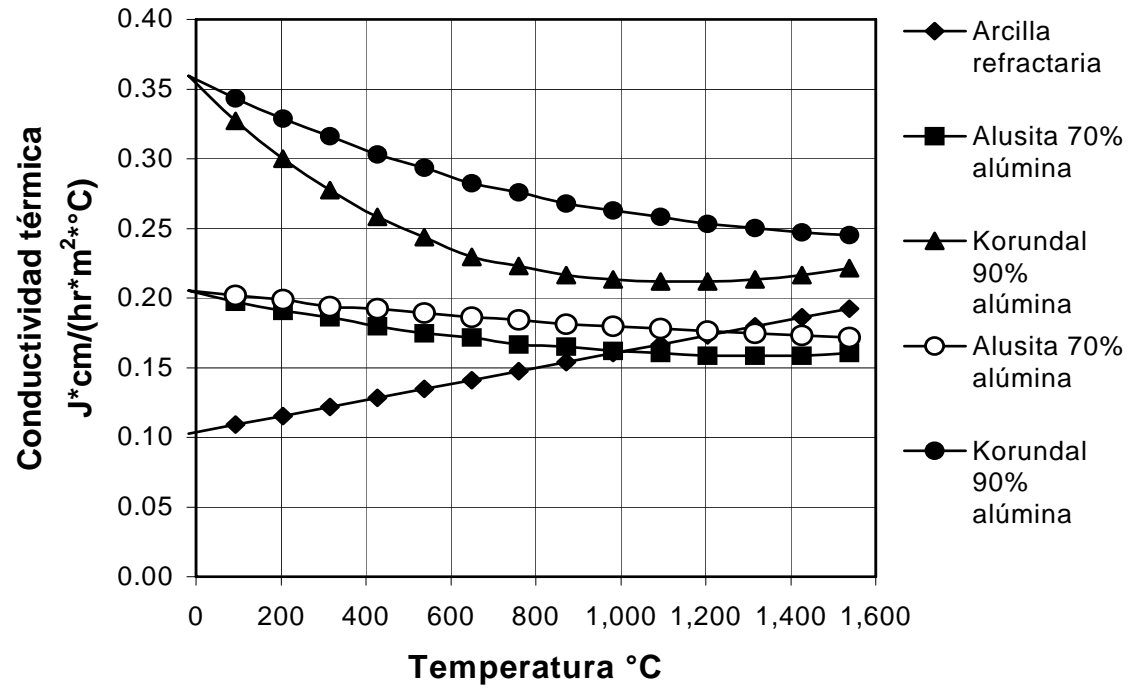
n

Durante el proceso de selección es necesario tener en cuenta la temperatura a la que será sometido el forro del horno y compararla con el cono pirométrico equivalente del ladrillo, que es el número obtenido de una prueba realizada de acuerdo al método estándar de prueba de cono pirométrico equivalente para materiales refractarios, designación C-24 de la ASTM (siglas en inglés de la sociedad americana de prueba de materiales). Este número indica qué temperatura es capaz de soportar un material refractario, la tabla III muestra la temperatura máxima que puede soportar un refractario de acuerdo a su cono pirométrico equivalente. Deberá contarse con un ladrillo refractario de buena calidad, para que sea capaz de soportar la abrasión causada por rozamiento del material al desplazarse sobre el forro del horno, con lo que se logrará que la vida del refractario sea larga, protegiendo el cuerpo metálico y reduciendo la posibilidad

de paros por reparaciones.

Para la especificación del espesor del forro refractario, debe tenerse en cuenta el flujo de calor a través de las paredes refractarias, el diferencial de temperatura y un factor típico del material refractario como la conductividad térmica, es necesario, no perder de vista que este factor en realidad varía con la temperatura a la que se somete el refractario, esta variación puede ser de dos tipos, el primero en forma lineal y el segundo cuando éste varía con una curva no lineal.

Figura 4. Gráfica de correlación entre temperatura de operación y conductividad térmica para varios materiales refractarios



Fuente: folleto de Refractarios H. W. Flir (Harbison & Walker)

A continuación se presentan algunas fórmulas y cálculos de ejemplo. Para la determinación de la conductividad térmica principal entre T_1 y T_2 .

Caso 1. La conductividad está representada por una línea recta. (véase Fig. 4)

$$(Fórmula 1)^4 \quad K_{1-2} = (K_1 + K_2)/2$$

nótese que en este caso esto equivale a la conductividad térmica K a la temperatura media $(T_1 + T_2)/2$

Tabla IV. Conductividad térmica aproximada para ladrillo refractario a t °C en J por hora / metro cuadrado / °C de diferencia de temperatura, por cada cm de espesor x 10⁶

Temperatura °C	Arcilla refractaria	Alusita 70% alúmina	Korundal 90% alúmina
-18	0.10	0.21	0.36
93	0.11	0.20	0.33
204	0.12	0.19	0.30
316	0.12	0.19	0.28
427	0.13	0.18	0.26
538	0.13	0.17	0.24
649	0.14	0.17	0.23
760	0.15	0.17	0.22
871	0.15	0.17	0.22
982	0.16	0.16	0.21
1,093	0.17	0.16	0.21
1,204	0.17	0.16	0.21
1,316	0.18	0.16	0.21
1,427	0.19	0.16	0.22
1,538	0.19	0.16	0.22

Fuente: folleto de Harbison & Walker

Caso 2. La conductividad está representada por una línea curva. (ver Fig. 4)

$$\text{(Formula 2)}^5 \quad K_{1-2} = (K_{0-2}T_2 - K_{0-1}T_1)/(T_2 - T_1)$$

Para la fórmula 1 use los valores mostrados en la tabla IV, y para la fórmula 2 aquellos en la tabla V.

Determinación del flujo de calor a través de la pared refractaria Q.

$$\text{(Fórmula 3)}^6 \quad Q = K_{1-2}(T_2 - T_1)At/d$$

en donde

Q = flujo calorífico a través de la pared refractaria (J)

T₁ = Temperatura de la cara fría de la pared (°C)

T₂ = Temperatura de la cara caliente de la pared (°C)

K = conductividad térmica (J cm/(hr m ° C))

K₁ = conductividad térmica a la temperatura de la cara fría T₁

K₂ = conductividad térmica a la temperatura de la cara caliente T₂

K₀₋₁ = conductividad térmica entre -17.78°C y T₁

K₀₋₂ = conductividad térmica entre -17.78°C y T₂

K₁₋₂ = conductividad térmica entre T₁ y T₂

A = área en metros cuadrados

t = tiempo en horas

d = espesor de pared en metros

Tabla V. Conductividad térmica aproximada para ladrillo refractario a t °C en J por hora / m² / ° C de diferencia de temperatura, por cada cm de espesor x 10⁶

Temperatura	Alusita 70% alúmina	Korundal 90% alúmina
-18	0.21	0.36
93	0.20	0.34
204	0.20	0.33
316	0.19	0.32
427	0.19	0.30
538	0.19	0.29
649	0.19	0.28
760	0.18	0.28
871	0.18	0.27
982	0.18	0.26
1,093	0.18	0.26
1,240	0.18	0.25
1,316	0.17	0.25
1,427	0.17	0.25
1,538	0.17	0.25

Fuente: folleto de Harbison & Walker

En muchos problemas de transferencia de calor, se conoce aproximadamente la temperatura de la cara caliente, este suele ser el caso del diseño del horno rotatorio, pero, tanto la temperatura de la cara fría y la cantidad de calor transmitido deben de ser estimadas.

Tales problemas son usualmente resueltos por un método de prueba y error, en el que se asume que la pared del horno se encuentra rodeada de aire tranquilo, y consecuentemente todo el calor que fluye a través de la pared se pierde en la superficie por radiación y convección.

Ejemplo: supóngase que se construirá un horno en el cual se espera una temperatura interna de 1,200 ° C (2,192 ° F), y que será recubierto con un forro de ladrillo de arcilla refractaria de 9" x 4 ½ " x 2", de tal manera que el forro refractario tendrá un espesor de 4 ½". Estimar el flujo calorífico a través de la pared y la temperatura de la cara fría.

Primera Corrida: Se asume que la temperatura de la cara fría $T_1 = 204$ °C (400 °F) usando la fórmula (1) y con datos de la tabla IV.

$$K_{1-2} = (K_1 + K_2) / 2$$

$$K_1 = 0.12 \times 10^6 \text{ J*cm/(hr*m}^2\text{*°C)}$$

$$K_2 = 0.17 \times 10^6 \text{ J*cm/(hr*m}^2\text{*°C)} \text{ para } T_2 = 1,200 \text{ °C}$$

Entonces

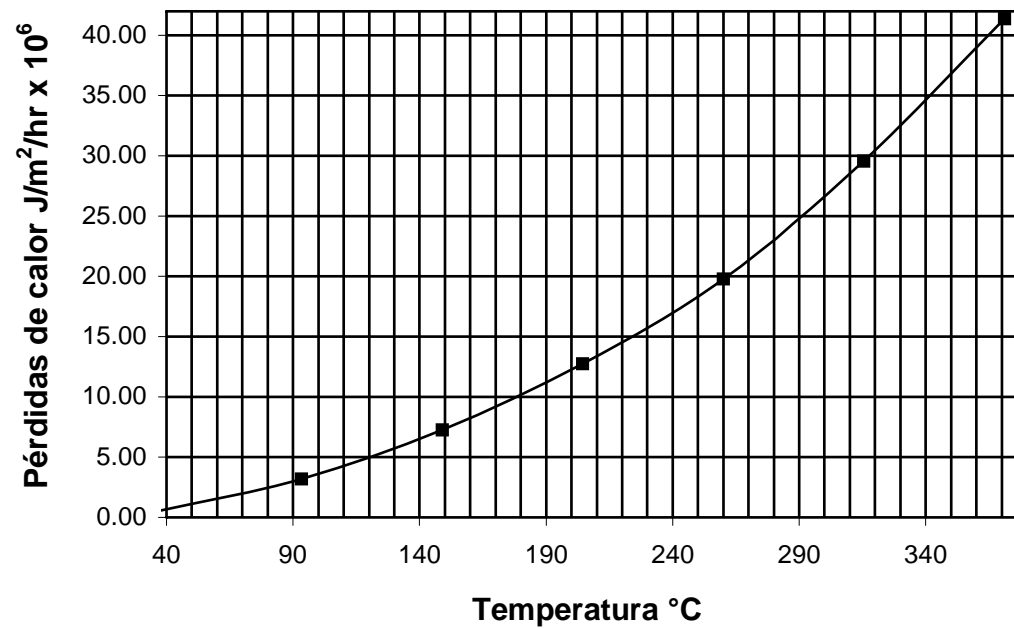
$$K_{1-2} = (0.12+0.17) \times 10^6 / 2 = 0.29 \times 10^6 / 2 = 0.14 \times 10^6 \text{ J*cm/(hr*m}^2\text{*°C)} \text{ al usar la fórmula 3.}$$

$$Q = K_{1-2} (T_2 - T_1) (At/d) = 0.14 \times 10^6 \text{ J*cm/(hr*m}^2\text{*°C)} * (1,200 - 204) \text{ °C/11 cm}$$

$$Q = 13.0 \times 10^6 \text{ J/(hr*m}^2\text{)}$$

De la carta de transmisión de calor de la figura 5, se ve que para la pérdida de $13.0 \times 10^6 \text{ J}/(\text{hr}\cdot\text{m}^2)$, la temperatura de la cara fría es de $210 \text{ }^\circ\text{C}$, como esta cantidad no difiere demasiado de la asumida, no se hace necesario calcular una nueva corrida; no obstante, si fuera de otra manera se haría tantas como sea necesario hasta alcanzar un valor adecuado. En cada nueva corrida se usará T_1 igual a la temperatura de cara fría obtenida de la corrida anterior, lo más importante aquí es notar que se tiene dos datos relevantes. En primer lugar el flujo calorífico, que puede indicar si vale la pena la colocación de material aislante. En segundo lugar la temperatura de la cara fría que indica si es conveniente un determinado espesor de pared refractaria.

Figura 5. Gráfico de transferencia de calor desde paredes verticales, se considera temperatura ambiente de 21.1°C



Fuente: folleto de Refractarios de H. W. Flir (Harbison & Walker).

Para la determinación de la cantidad de ladrillo de determinada forma, del revestimiento refractario, existen catálogos que pueden obtenerse de los fabricantes; por ejemplo, si se tuviera un horno rotatorio de 1.60 metros de diámetro interior (incluyendo el forro refractario) y de 25 metros de largo, ¿qué cantidad de ladrillos se necesita para cada forma?, si se usa un espesor de 11 cm (4 ½”), diámetro de 1.60 m (5’ 3”). De la tabla de forros refractarios para círculos completos 11 cm (4½”) espesor se necesita (véase el apéndice C).

32 Arcos No 2 de 9” x 4 ½” (3” x 2 ½”)

49 Arcos No 1 de 9” x 4 ½” (3” x 2 ¼”)

Esto es por cada anillo, para determinar el total, se calcula el número de anillos necesario para forrar el horno en toda su longitud, así:

$$N = 25 \text{ m (largo del horno)} / (9 \text{ plg (largo ladrillo)} * 0.0254 \text{ m/plg}) \\ = 110 \text{ anillos}$$

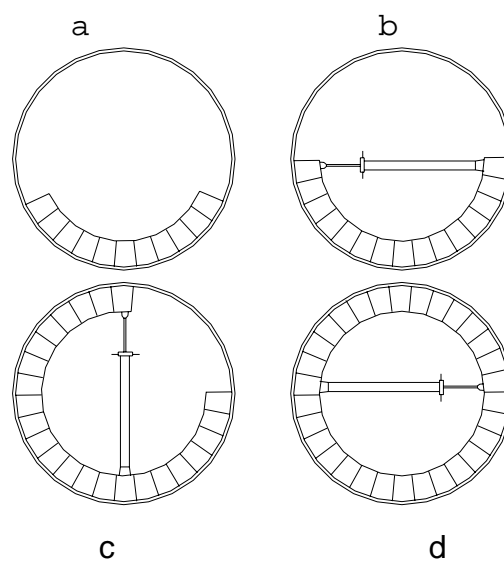
luego se requerirá 3,520 Arco No 2 y 5,390 Arco No 1, es conveniente comprar siempre un 10% más de los ladrillos calculados.

3.1.2.4. Indicaciones de montaje

Es posible encontrar otros métodos para el montaje de ladrillo refractario en el horno, pero, aquí se recomendará el siguiente para ser usado en el sistema de ladrillo refractario pegado con mortero.

Primero se colocan los ladrillos uno a uno, unidos por el mortero, hasta cubrir la mitad inferior del anillo de ladrillos, se sujetan entonces los ladrillos de los extremos a través de un apuntalamiento mecánico que los mantenga presionados contra el cuerpo metálico del horno. Acto seguido se rota el horno 90° dos veces, hasta que se logra colocar todos los ladrillos (seguir el orden sugerido a, b, c y d de un anillo en la figura 6); este procedimiento se repite tantas veces como anillos requiera el horno para recubrir toda su longitud. Cabe mencionar que los ladrillos solamente se pegan con mortero entre sí, y no así al cuerpo metálico, haciendo que los anillos queden por así decirlo "flotando" en el interior del horno, esto evita que las dilataciones y contracciones del refractario y el cuerpo metálico, generen fracturas del material refractario.

Figura 6. Esquema de montaje del ladrillo refractario en el horno rotatorio



Fuente: Walter Duda. "Manual tecnológico del cemento". p. 288.

3.2. Revestimiento aislante

La función del revestimiento aislante es el de oponerse al paso de calor a través suyo, esto debe conducir a un ahorro energético, y permitir a la vez que realmente sean alcanzadas las temperaturas de trabajo.

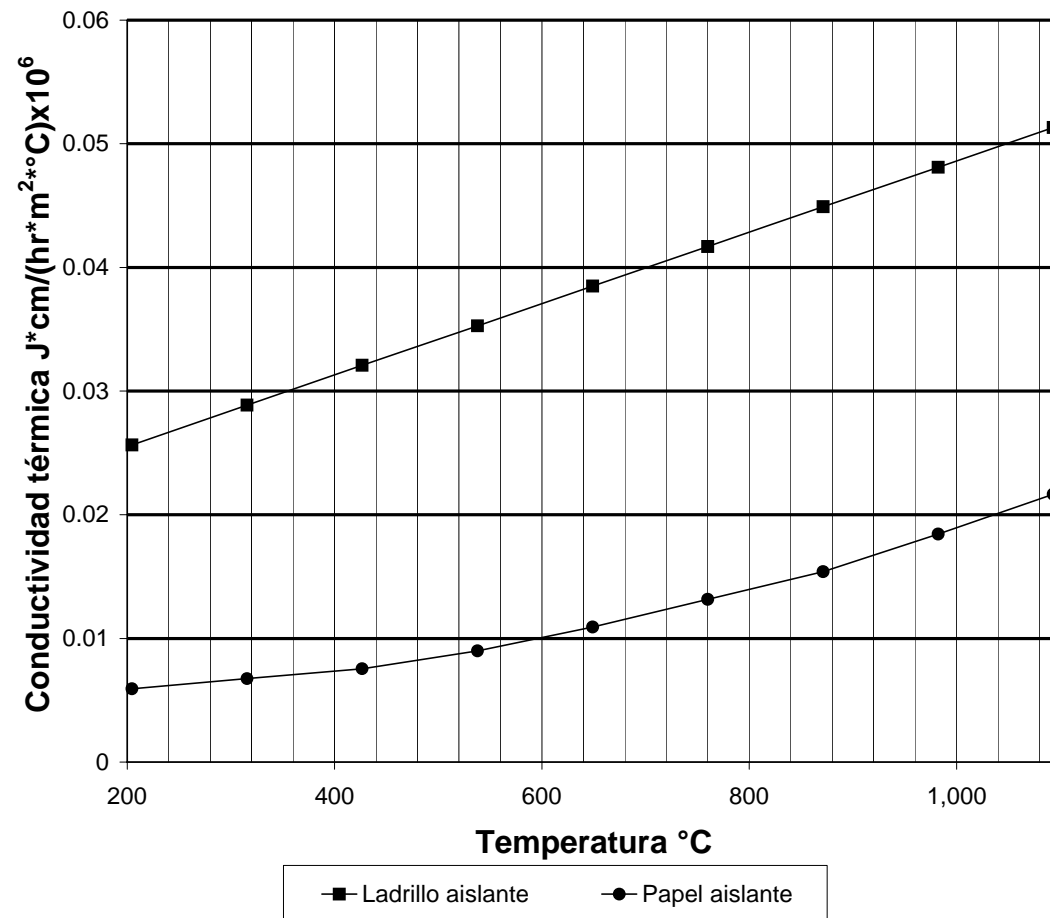
3.2.1. Tipos de revestimiento aislante

El material con cualidades aislantes puede ser de muy variados tipos, pero los materiales más adecuados para un proyecto de horno rotatorio pueden ser básicamente de dos tipos, el ladrillo aislante y el papel de fibra aislante.

3.2.2. Selección

Los ladrillos aislantes son muy similares en su forma a los ladrillos refractarios, pero, su densidad y su cono pirométrico equivalente son sensiblemente menores. El papel de fibra aislante tiene una muy baja conductividad térmica, de manera tal que puede, con una pequeña capa de este papel, tener un muy buen aislamiento. Es muy práctico de manejar, es muy ligero de peso y su montaje es muy fácil; puede obtenerse revestimientos desde 0.8 mm ($\frac{1}{32}$ ") hasta 25.4 mm (1") de espesor. La conductividad térmica de los ladrillos aislantes se halla en el orden de 0.02×10^6 a 0.06×10^6 J*cm/(hr*m²*°C), mientras que el de papel de fibra aislante se encuentra en el orden de 0.005×10^6 a 0.025×10^6 J*cm/(hr*m²*°C), en la figura 7 se muestra un gráfico comparativo del comportamiento de la conductividad térmica con relación a la temperatura de trabajo entre un ladrillo aislante y un papel de fibra aislante.

Figura 7. Gráfico comparativo de las curvas de conductividad térmica contra temperatura de operación para ladrillo aislante y papel de fibra aislante



Fuente; folleto de FiberFrac de la compañía Carborundum, México.

3.2.3. Indicaciones de montaje para el aislamiento

Para el montaje de ladrillos aislantes puede seguirse el método mencionado anteriormente con los ladrillos refractarios, colocándolos entre el refractario y el cuerpo metálico del horno. En el caso de escoger el uso de papel de fibra aislante, éste es pegado al cuerpo metálico con el uso de un compuesto especial, que lo adhiere firmemente, al momento de aplicar el compuesto la superficie debe permanecer libre de polvos, óxidos y grasa. El aislamiento ha de colocarse sobre el casco metálico y por debajo del refractario.

⁴ H. W. FLIR. "folleto de refractarios" , Harbison y Walker

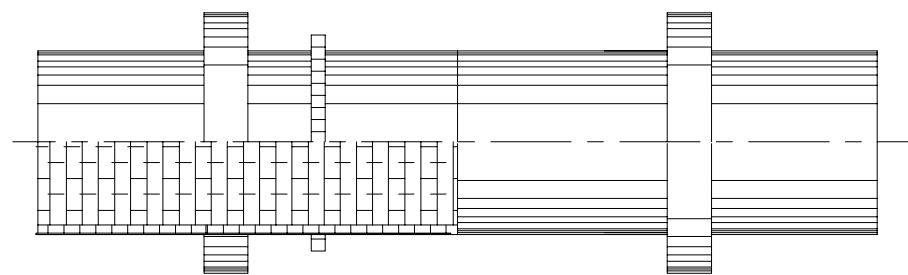
⁵ H. W. FLIR. Op. cit

⁶ H. W. FLIR. Op. cit

4. CUERPO DEL HORNO

El horno rotatorio posee un cuerpo que gira en torno a su eje longitudinal, y que está constituido por un tubo de construcción metálica, normalmente forrado en su interior con materiales refractarios y aislantes; en su parte externa acoplados en los dos extremos tiene elementos de sellado de gases; cuenta también con dos o más anillos de lámina de mayor diámetro sobre los que descansa su peso, a los que se conoce como aros de rodadura⁷. Estos, se hallan distribuidos a lo largo del cuerpo del horno y ubicados convenientemente para reducir los efectos de los esfuerzos en los materiales de su construcción; sobre el cuerpo del horno también se encuentra dispuesta una corona dentada, que es el elemento final de la transmisión de potencia, normalmente se aprovecha su tamaño para lograr una elevada relación de transmisión. El cuerpo metálico del horno se construye generalmente con lámina de acero, que es rolada según el diámetro requerido y posteriormente soldada, se utiliza tantos anillos de lámina (soldados a tope entre sí) como sea necesario según la longitud del horno.

Figura 8. Cuerpo del horno rotatorio



Durante el paso de los anillos por la máquina roladora, es necesario evitar su deformación (ovalidad), de la misma manera debe observarse durante el ensamble la correcta alineación de los anillos que formarán el cuerpo.

Para llevar a cabo la construcción del cuerpo metálico del horno se unen a tope uno a uno los anillos de lámina, debe tenerse cuidado que las soldaduras longitudinales de dos anillos consecutivos no queden alineadas entre sí, resulta conveniente rotarlas de manera tal que se permita entre ellas un desfase de 90 a 180° según sea necesario; esto reducirá la posibilidad de concentraciones de esfuerzos en las uniones soldadas. Las deformaciones constructivas del cuerpo repercutirán en la vida útil de los elementos de la transmisión, al causar vibraciones y hasta cargas extrañas sobre los rodamientos y los apoyos.

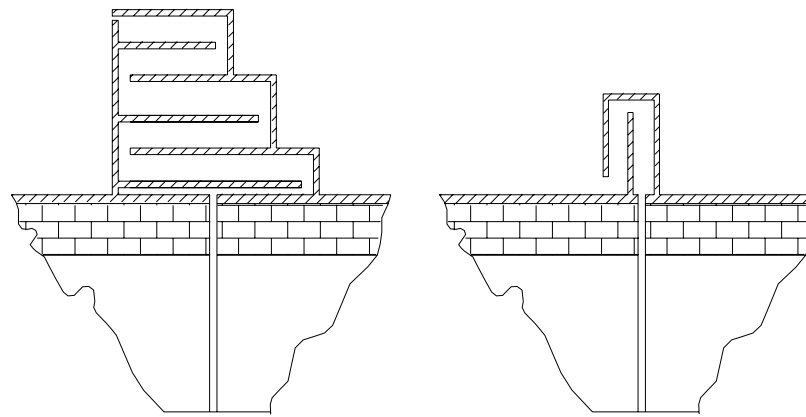
Por la naturaleza del proyecto se hace necesario que en el cuerpo metálico del horno se aplique soldadura tanto de penetración como de revestimiento, cuando se trabaja con acero al carbón puede usarse electrodos E6011 y E6013 respectivamente; resulta muy conveniente también observar cuidadosamente la preparación de las uniones a soldar, utilizando procedimientos adecuados, como por ejemplo el biselado.

4.1. Sellado del horno rotatorio

"Para evitar el acceso de aire del ambiente al horno rotatorio, se dispone en sus dos extremos dispositivos para cierre estanco en las uniones con otras secciones del proceso"⁸.

Los objetivos son evitar el aumento de gases de salida, que implica consumir mayor cantidad de energía en los ventiladores. Evitar condensación de gases por enfriamiento al contacto con aire frío. Evitar cuantiosas pérdidas de calor, por calentamiento de cantidades adicionales de aire frío, que producen una baja eficiencia térmica del horno.

Figura 9. Sellado de estanqueidad del horno



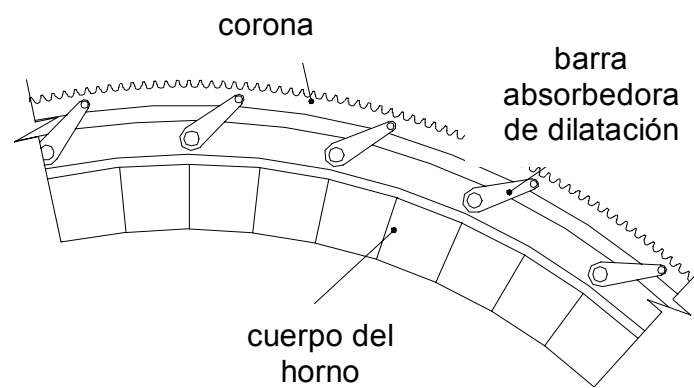
Sellos tipo laberinto

4.2. Dilatación térmica del horno

Debido a las temperaturas a las que son sometidos el revestimiento y la lámina del cuerpo, tanto su diámetro como su longitud difieren en operación y reposo debido a la dilatación térmica. Es en virtud de ello que se hace necesario que sea tenida en cuenta para evitar daños en los sellos, los aros de rodadura y en la corona de transmisión; para ello suele disponerse en los sellos dispositivos de apriete con fuerza de aplicación constante, como montajes sobre muelles, que permitan un alivio de las fuerzas aplicadas.

En el caso de la corona se recomienda el montaje sobre dispositivos que absorban la dilatación radial como el que se muestra en la figura 10.

Figura 10. Corona de transmisión con dispositivo contra dilatación



Cuando se produce una falla del sistema eléctrico principal, es necesario contar con un sistema de emergencia (generador eléctrico) que mantenga en movimiento al horno, como mínimo el tiempo necesario para descargarlo, y evitar deflexiones permanentes en el tubo. Si el horno presentara deflexiones permanentes se provocaría daño en el forro refractario y en la transmisión.

4.3. Diseño del casco

4.3.1. Determinación e integración de cargas

El cuerpo del horno está constituido por un tubo metálico, su forro refractario y su aislante, principalmente, de ahí que el peso o carga muerta aplicada a los apoyos, deba calcularse en función de ellos, esto es:

CARGA MUERTA

$$P = \pi \cdot D \cdot e \cdot l \cdot \gamma_{\text{metal}} + \pi(D-2e) \cdot s \cdot l_{\text{ais}} \cdot \gamma_{\text{ais}} + \pi(D-2(e+s)) \cdot t \cdot l_{\text{ref}} \cdot \gamma_{\text{ref}}$$

en donde:

- D: diámetro exterior del cuerpo del horno (m)
- e: espesor de la chapa metálica del horno (m)
- l: longitud del horno (m)
- γ_{ais} : peso específico del material aislante (Kg/m^3)
- l_{ais} : longitud del área cubierta con material aislante (m)
- s: espesor de la capa de material aislante (m)
- t: espesor de la capa de material refractario (m)
- l_{ref} : longitud del área cubierta con refractario (m)
- γ_{ref} : peso específico del material refractario (Kg/m^3)
- γ_{metal} : peso específico del casco metálico (Kg/m^3)

Si el material refractario como el aislante cubren el horno en toda su longitud y el material del casco metálico es chapa de acero, la expresión anterior resultaría,

$$P = \pi(7,840 \cdot D \cdot e + (D-2e) \cdot s \cdot \gamma_{\text{ais}} + (D-2(e+s)) \cdot t \cdot \gamma_{\text{ref}}) \cdot l$$

donde la simbología es la misma que en la expresión dada anteriormente.

Para lograr resultados más apegados a la realidad es necesario considerar el aporte a la carga muerta proporcionada por el peso de los aros de rodadura, la corona y cualquier otro dispositivo montado sobre el cuerpo del horno.

La carga viva en el horno rotatorio está constituida esencialmente por el peso del material que se halla transitoriamente desecándose en su interior y aquella aplicada por los elementos de transmisión de potencia.

Al considerar que el material se halla uniformemente repartido a lo largo del horno (supuesto que no es verdadero ya que el material varía su velocidad en el interior del horno, según la zona en que se desplaza) el peso del material sería:

$$Q_1 = (0.1 * \pi * d^2) / 4 * l * \rho_{mat} =$$
$$= 0.025 * \pi * d^2 * l * \rho_{mat}$$

en donde:

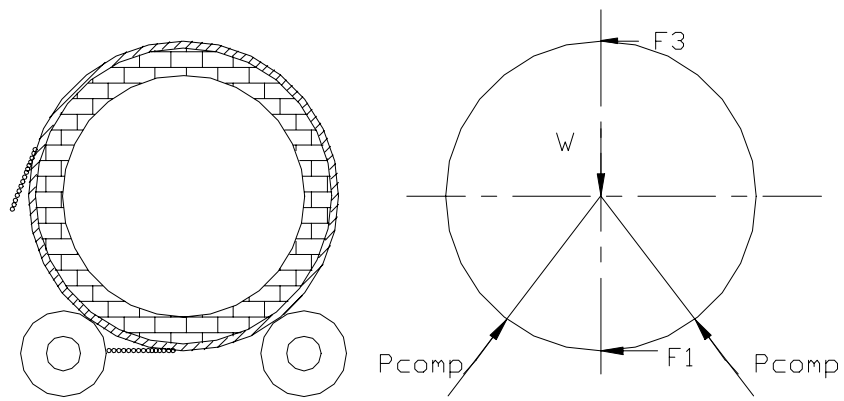
se ha tomado grado de llenado 10%

d: diámetro interior del horno.

ρ_{mat} : densidad del material (Kg/m^3)

l: longitud del horno (m)

Figura 11. Diagrama de cuerpo libre corte transversal



La carga equivalente, debida a los elementos de transmisión puede actuar normalmente en un plano distinto al plano de acción de las cargas debidas al peso del horno o del peso del material, considérese por ejemplo el diagrama de cuerpo libre figura 11 si $F = F_1 + F_3$.

Para la estimación del valor de la fuerza F , se parte del valor de la potencia transmitida.

$$T = (725.85 * hp) / n \text{ (m-Kg) } ^*$$

en donde,

T: es el torque aplicado al elemento de transmisión

hp: es la potencia aplicada en caballos de fuerza

n: es el número de revoluciones por minuto rpm.

Luego se asume para efectos de que se verifique la rotación, que⁹
 $F_1/F_3 = 3$, además,

$$F_1 - F_3 = T/R$$

y

$$2F_3 = T/R$$

entonces;

$$F_3 = T/(2R)$$

$$F_1 = 3T/2R$$

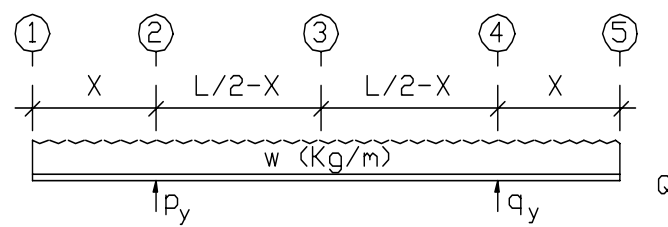
Es necesario tomar en cuenta que las componentes verticales de fuerza actúan en el mismo plano que las fuerzas asociadas a los diversos pesos, mientras que habrá componentes de F en un plano normal al plano mencionado antes.

Deberá tomarse muy en cuenta los valores de las componentes de F para evitar que el horno "salte" por encima de los rodillos de apoyo.

4.3.2. Localización y número de soportes

El horno rotatorio debe contar con tantos puntos de apoyo como sea necesario, por conveniencia económica puede resultar interesante que el número de apoyos sea el menor posible, esto se halla también fundamentado en la reducción de complejidad del trabajo constructivo. Se debe empezar por la opción más económica, es decir, 2 apoyos; en este punto debe recordarse que el horno rotatorio se comportará según el modelo de una viga simplemente apoyada sobre dos puntos, lo que se observa en el dibujo de la figura 12.

Figura 12. Localización y número de soportes



en donde:

Q: es la carga en el plano xy atribuido a la transmisión de potencia en Kg, en el sentido x.

*Fuente: Aaron Deutschmann, et al. Diseño de Máquinas, teoría y práctica.

- w: la carga en el plano xy vertical asociada a la integración de los pesos del horno (cuerpo metálico + revestimiento + dispositivos), y del material que corre en su interior, nótese que se ha asumido como una carga distribuida en forma lineal (Kg/m)
- p,q: reacciones en los apoyos (Kg)

Para determinar el número de apoyos debe considerarse el valor de las reacciones p y q, esto es, que los valores de p y q sean razonables, si esos valores son demasiado grandes puede convenir analizar el sistema aumentando el número de apoyos. Es preciso notar que el diagrama mostrado arriba es una simplificación del modelo del horno, ya que la posición inclinada del mismo obligará la aparición de reacciones de apoyo en el sentido del eje longitudinal de éste para evitar su desplazamiento en dicho sentido.

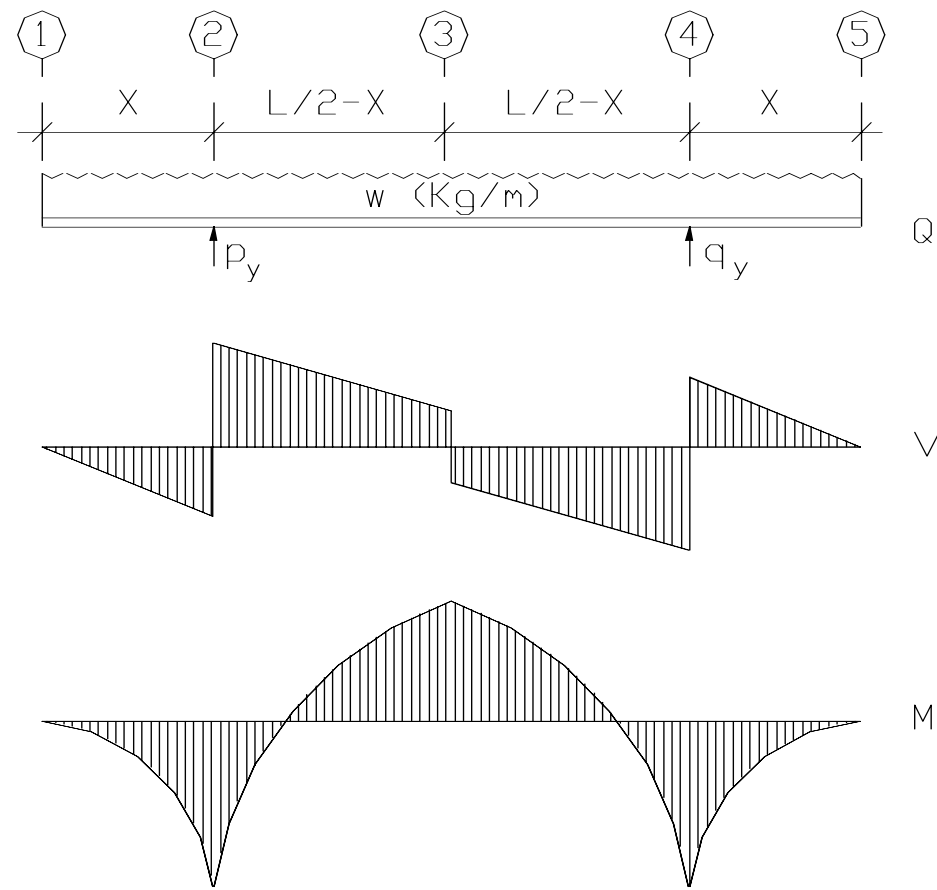
Para determinar la ubicación de los apoyos, al haber definido el número de estos, se procede a calcular sus posiciones con la premisa de balancear los esfuerzos; esto es, se pretende ubicar la posición de los apoyos de manera tal que se tenga por resultado que los esfuerzos máximos sean muy parecidos tanto en los voladizos como en los tramos entre apoyos. Este criterio persigue hacer que el material del cuerpo metálico trabaje en su punto óptimo y con ello lograr que su costo sea el menor posible.

4.3.3. Diagramas de corte y momento

El modelo físico que puede representar mejor al horno rotatorio es, seguramente, el de una flecha hueca, sometida tanto a esfuerzo de flexión como de corte por torsión.

Pero además, se debe tener en mente el esfuerzo normal de compresión al que se encuentra sometido el horno en virtud del apoyo en el sentido longitudinal del mismo.

Figura 13. Diagramas de corte y momento



Los diagramas de corte y momento serán las herramientas que permitan definir el estado de los esfuerzos, estos se construirán en base a las cargas que ya se ha visto en los numerales anteriores. Para efectos del diseño puede tomarse una primera corrida ignorando los efectos de las fuerzas asociadas a la posición relativa de los elementos de la transmisión y volver a calcular cuando ya se haya obtenido resultados del diseño de la transmisión y pueda con ellos determinarse F_z y F_x , esto sería como se muestra a continuación.

4.3.4. Determinación del espesor de placa

Con el uso de la información recabada con el diagrama de corte y de momento se procede al cálculo del espesor de placa requerido, para esto se utiliza de cualquiera de los métodos de diseño de flechas. En este trabajo se sugiere el uso de la teoría de corte máximo que aplica la ecuación¹⁰,

$$S_{s_{max}} = 0.5 \cdot S_{yp}$$

$$0.5 \cdot S_{yp} = \frac{16}{\pi \cdot (D_o)^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^4 \right]} \sqrt{\left[\left(M_m + S_{yp} \frac{M_r}{S_e} \right)^2 + \left(T_m + S_{syp} \frac{T_r}{S_{se}} \right)^2 \right]}$$

en donde,

$S_{s_{max}}$: es el esfuerzo cortante máximo (Kg/cm^2)

S_{yp} : es el esfuerzo de cedencia del acero de la chapa metálica (Kg/cm^2)

M_m : momento flexionante aplicado

M_r : momento flexionante variable aplicado

$$S_e = C_R C_S C_F C_W / K_f S_n^{**}$$

T_m : par de torsión medio aplicado

T_r : par de torsión variable aplicado

S_{syp} : esfuerzo de cedencia a corte del material

$$S_{se} = C_R C_S C_F C_W / K_{fs} S'_{sn}^{***}$$

Es muy importante hacer notar que esta ecuación puede arrojar valores muy pequeños del espesor de placa que no obstante cumpla con la ecuación anterior y se presenten problemas por la combinación de las deformaciones por esfuerzos y aquellas debidas a la acción de las altas temperaturas en el casco metálico del horno, por lo tanto, debe tomarse en cuenta las deformaciones en la determinación del espesor de placa, y tomar como guía la restricción de la deformación máxima permitida por el sello estanco en los extremos del horno.

4.4. Soportes

El horno rotatorio descansa a través de los aros de rodadura sobre unos rodillos que a su vez se hallan sobre bases fijas mediante rodamientos montados en cajas especiales.

4.4.1. Rodillos

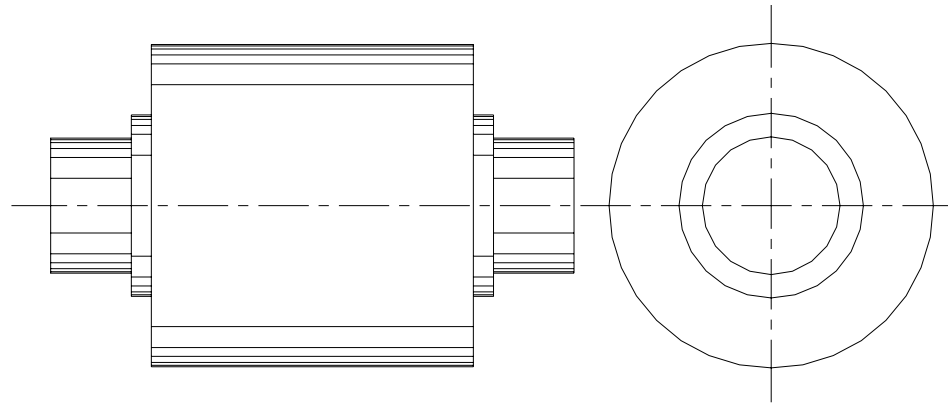
Por cada aro de rodadura el horno rotatorio cuenta con dos rodillos para soportarlo, estos se hallan dispuestos por debajo del horno formando cierto ángulo

** Fuente: ecuación 3.32a del libro Diseño de máquinas de Aaron Deutschman et al

*** Fuente: ecuación 3.32b "Diseño de máquinas" Aaron Deutschman, et al.

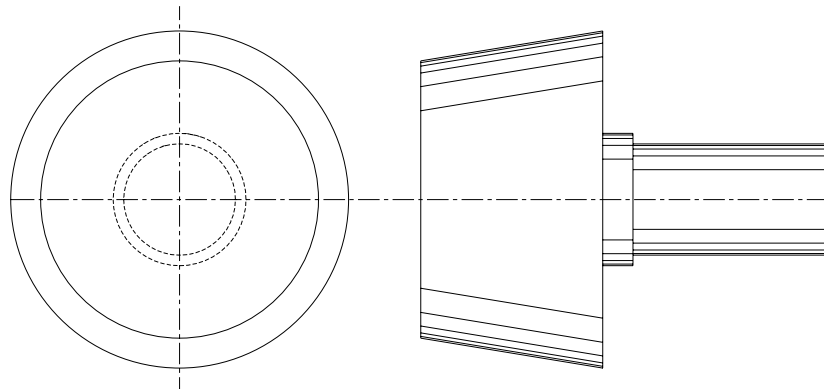
entre sí (en un corte transversal), cuando se les considera con respecto al centro geométrico del horno.

Figura 14. Rodillos de soporte (carga lateral)



Sobre estos rodillos descansa el peso del horno y evitan a su vez que éste se desplace linealmente en el sentido transversal, oponiéndose a la acción de las fuerzas transmitidas por la transmisión en este sentido, figura 14.

Figura 15. Rodillos de soporte (carga longitudinal)



Existe por aparte, un par único de rodillos de soporte cuya función es limitar el desplazamiento del horno en el sentido longitudinal (véase figura 15), por lo general se usa estos rodillos limitando a un sólo aro de rodadura, con el objeto de

restringir su desplazamiento, evitando confinar el desplazamiento por dilatación térmica.

La forma de estos rodillos varía un poco de los anteriores por su posición relativa al horno; suelen montarse casi verticales y por ello requieren del uso de baleros axiales, pero a la vez deben soportar cargas radiales considerables.

4.4.2. Rodamientos

Los rodillos de soporte y los rodillos que limitan la carrera longitudinal, requieren por su función y forma de baleros de distinto tipo. Para los rodillos de soporte en los que se tiene una elevadísima carga radial y muy poca o ninguna carga axial pueden resultar interesantes baleros como los de bolas, los de rodillos cilíndricos o los esféricos. Esto por el criterio económico, puede pensarse en usar baleros de bolas por su bajo costo o de rodillos cilíndricos por que requieren una caja de menor dimensión y por lo tanto de menor costo; o bien, bajo el criterio de funcionamiento por los baleros de rodillos esféricos por su facilidad de auto alineación y su alta capacidad de carga. Conviene en un momento dado seleccionar el tamaño de baleros en los distintos tipos mencionados y compararse la funcionalidad contra el costo para discriminar y definir el que se utilizará.

TABLA VI. Características de operación para baleros

Tipo de rodamiento	Capacidad radial	Cap. de empuje	Velocidad límite	Resistencia deformación elástica radial	Resistencia deformación elástica radial
Conrad radial de bolas	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Baja
De capacidad máxima	Moderada+	Moderada en una dirección	Alta	Moderada+	Baja+
De contacto angular	Moderada	Moderada en una dirección+	Alta-	Moderada	Moderada
De rodillos cilíndricos	Alta	Ningún	Moderada +	Alta	No se recomienda
De rodillos esféricos	Alta +	Moderada	Moderada	Alta -	Moderada
De rodillos cónicos	Alta -	Moderada en una dirección +	Moderada	Alta -	Moderada

Fuente: "Manual de mantenimiento industrial", Rosaler, Robert C., et al. ed. Mc Graw Hill, México, 1,989, pp. 7-25, tabla 2-1.

En el caso de los rodillos de eje longitudinal existe una carga radial mediana y una cierta carga axial, es necesario determinar el valor de dicha carga axial para saber si el balero deberá ser para carga axial, para carga radial y axial o simplemente radial. Para seleccionar los baleros de los rodillos de soporte, se considera las cargas radiales p y q , debe tomarse en cuenta las componentes p_z y q_z . Es necesario proteger los baleros contra la acción del calor que escapa por radiación del cuerpo del horno, puede resultar conveniente el uso de deflectores de calor sobre los rodamientos y la aplicación de lubricantes capaces de resistir alta temperatura. En la tabla 6 se muestra las características de varios tipos de baleros.

VIDA NOMINAL BÁSICA¹¹

$$L_{10} = (C/P)^p$$

en donde,

$p=3$ para rodamientos de bolas

$p=10/3$ para rodamientos de rodillos

L_{10} : vida nominal básica en millones de revoluciones

C : capacidad de carga dinámica (N)

P : carga dinámica equivalente (N)

VIDA ÚTIL EN HORAS¹²

$$L_{10H} = 10^6 / (60n) * (C/P)^p$$

L_{10H} : vida nominal básica en horas

n : revoluciones por minuto, rpm

A través de la fórmula anterior puede estimarse la vida nominal básica de los rodamientos, la capacidad de carga dinámica C obtenida de los datos proporcionados por el fabricante, depende del tipo particular y el tamaño del rodamiento que se esté usando; obviamente C deberá ser mayor que P, tanto por seguridad ya que de no serlo no soportaría la carga aplicada, como también para incrementar la vida útil del rodamiento. Si la relación C/P es muy pequeña, la vida útil del rodamiento será muy corta y se tendrá un alto costo de mantenimiento por frecuentes sustituciones.

Existe otro valor característico de los rodamientos que es la capacidad básica de carga estática C_0 , que representa la máxima carga que puede soportar un rodamiento en posición de reposo, sin que los elementos rodantes (bolas o rodillos) se deformen más allá de un valor normal o se incrusten en las pistas y terminen con la vida útil del rodamiento¹³.

$$S_0 = C_0 / P_{0 \max}$$

S_0 : factor de seguridad

C_0 : capacidad básica de carga estática (N)

$P_{0 \max}$: carga estática equivalente máxima (N)

TABLA VII. Valores mínimos de S_0 (factor de seguridad para rodamientos)

Condiciones de operación	Rodamientos de bolas	Rodamientos de rodillos
Precisión rotacional alta	2	3
Precisión rotacional normal (aplicación universal)	1	1.5
Permite deterioro por precisión rotacional ligera	0.5	1

Fuente: "Rodamientos de Bolas y rodillos", catálogo No.2,200/S, tabla 5.4, pp. A-44, NTN corporation, Japón, 1,991.

Nota: cuando se tenga choque o vibración es necesario afectar P_0 máx. por un factor.

- ⁷ DUDA, WALTER "Manual Tecnológico del Cemento"
- ⁸ DUDA, WALTER Op. cit.
- ⁹ DEUTSCHMAN, AARON. "Diseño de máquinas, teoría y práctica". Editorial Cecsá. México. 1987.
- ¹⁰ DEUSTCHMAN, AARON. Op. cit.
- ¹¹ NTN CORPORATION. "Rodamientos de bolas y de rodillos". cat. No. 2200/s. Japón. 1,991.
- ¹² NTN CORPORATION. Op cit.
- ¹³ NTN CORPORATION. Op. cit.

5. TRANSMISIÓN DE POTENCIA

5.1. Determinación de la potencia necesaria

La potencia requerida para accionar un horno rotatorio es calculada sobre el criterio de la energía consumida en vencer la fricción de los rodamientos y propiciar el movimiento de la carga¹⁴. Para calcular la potencia necesaria para vencer la fricción se utiliza la ecuación¹⁵

$$P_f = (W \cdot b_d \cdot t_d \cdot N \cdot F \cdot 5.9569 \times 10^{-4}) / r_d$$

P_f = potencia en KW necesaria para vencer la fricción

W = carga total sobre los rodamientos en Kg

B_d = diámetro de los ejes de los rodillos en metros

R_d = diámetro de los rodillos en metros

T_d = diámetro de los aros de rodadura en metros

N = revoluciones por minuto en que gira el horno

F = coeficiente de rozamiento de los rodamientos

= 0.018 para lubricación con aceite

= 0.06 para lubricación con grasa consistente

Para calcular la potencia necesaria para propiciar y conservar el movimiento de la carga se emplea la fórmula¹⁶

$$P_m = (D \cdot \sin\theta)^3 \cdot N \cdot L \cdot K$$

P_m = potencia requerida para el movimiento de la carga en KW

D = diámetro del horno entre paredes del revestimiento refractario en m

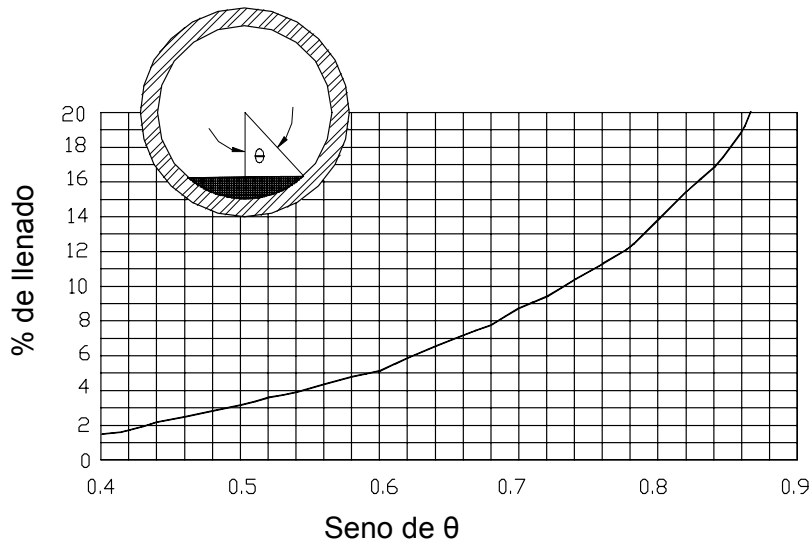
$\text{sen}\theta$ es leído del diagrama de la figura 5.1

N= revoluciones por minuto del horno

L= largo del horno en metros

K= constante característica del material, para un arcilla con talud natural de 36 grados puede tomarse como 0.0918 (valor calculado interpolando en los datos para talud de 35 y 40 grados, presentados en el "Manual tecnológico del cemento" y aplicando factores de conversión).

Figura 16. Seno del ángulo θ contra porcentaje de llenado



Cálculo del seno del ángulo para usar en la fórmula de la potencia requerida debida al movimiento. Tomada de "Rotary kilns", de Allis Chalmers, Estados Unidos, folleto. De esta manera la potencia total necesaria para accionar el horno rotatorio será

$$P = P_f + P_m$$

Es necesario hacer notar que esta potencia es la que se necesita que posea el motor que ha de hacer rotar al horno, cuando se vaya a considerar el costo energético de la planta de calcinación se deberá considerar otros motores, tales como alimentadores, ventiladores-extractores, ventiladores alimentadores de aire, etc.

5.2. Diseño de la transmisión

La potencia calculada de acuerdo con la sección anterior es obtenida generalmente de un motor que ha de ser de preferencia eléctrico, los motores eléctricos comunes trabajan con velocidades que se sitúan en el orden de las 1,750 rpm, mientras que, el horno requerirá de pocas rpm para realizar su función, aunque es posible encontrar motores eléctricos más lentos, siempre será necesario hacer una muy fuerte reducción de velocidad. Por esta razón es común observar en hornos rotatorios tres o cuatro etapas de reducción de velocidad.

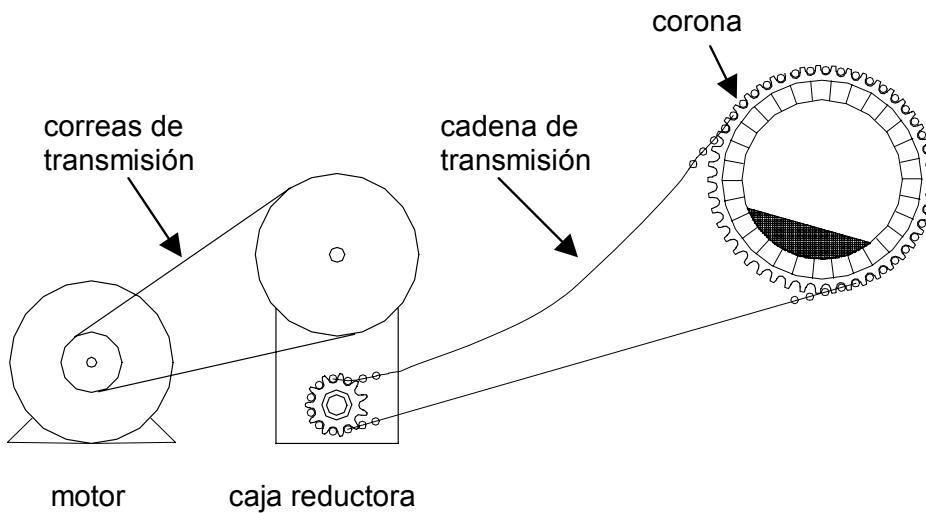
El primer inconveniente que se presenta cuando se realiza una reducción de velocidad tan fuerte, es que el par de torsión se incrementa enormemente, exigiendo que los elementos mecánicos sean muy robustos.

Una instalación típica de transmisión de potencia en un horno rotatorio puede estar constituida de la siguiente manera:

- El motor, que como se mencionó antes, puede ser eléctrico, de combustión interna u otro tipo según sea la conveniencia.
- Etapa de reducción por bandas o correas. La primera etapa de reducción puede ser realizada a través de bandas, ya que el torque aplicado en esta etapa es relativamente bajo.

- Caja reductora, es probable que en esta etapa sea necesario hacer una fuerte reducción, por lo tanto es recomendable observar muy bien si la implantación de una caja reductora de tipo comercial cumple con las especificaciones requeridas, debe ponerse especial atención a los torques de entrada y salida que tendría que soportar y comparar con los que el fabricante de la caja especifica. Cuando no es posible obtener una caja reductora de tipo comercial que satisfaga los requerimientos impuestos por la transmisión, debe hacerse un diseño específico, ya sea haciendo uso de engranes o de conjuntos corona - tornillo sin fin; estos últimos son especialmente convenientes cuando la reducción es muy grande, en este sentido se debe recordar que cuando el tornillo se construye de entradas múltiples es posible obtener una reducción más fuerte para los mismos diámetros de corona y tornillo.

Figura 17. Transmisión de potencia en el horno rotatorio



- Transmisión por cadena o por engranes. La última etapa de transmisión, utiliza el cuerpo metálico del horno como flecha de una rueda dentada, la que se denominará "corona principal", esta rueda dentada montada por partes y unida al cuerpo del horno a través de bridas atornilladas, permite que se verifique una reducción de velocidad muy grande entre el piñón y ella.

14. DUDA, WALTER. Op. cit.

15. DUDA, WALTER. Op. cit.

16. DUDA, WALTER. Op. cit.