



## **UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

### **LOS EFECTOS DE OVALIDAD Y MOVIMIENTO RELATIVO EN LOS ESFUERZOS INTERNOS DE LOS REFRACTARIOS EN HORNOS ROTATIVOS DE CEMENTO**

**Autor:** Sebastián Báez  
C.I: V-26.337.849

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
CARRERA INGENIERIA MECANICA**

**LOS EFECTOS DE OVALIDAD Y MOVIMIENTO RELATIVO EN LOS  
ESFUERZOS INTERNOS DE LOS REFRACTARIOS EN HORNOS  
ROTATIVOS DE CEMENTO**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al Título de  
**INGENIERO MECÁNICO**

**Autor:** Sebastián Báez  
C.I: V-26.337.849  
**Tutora:** Alicia de Pizella  
C.I.-4.598.880

**San Diego Octubre 2020**



FI-M-002-2020-2CR (TG)

Valencia, 09 de octubre de 2020

Ciudadano:  
Báez F., Alejandro S.  
26.337.849  
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2020 de fecha 27-07-2020 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **LOS EFECTOS DE LA OVALIDAD Y MOVIMIENTO RELATIVO EN LOS ESFUERZOS INTERNOS DE LOS REFRACTARIOS EN HORNOS ROTATIVOS DE CEMENTO** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación de la Ing. Alicia Yáñez de Pizzella C.I: 4.598.880 como Tutora Académica que lo asesorara en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

**Dra. Zaida Osto**

**Decana (E) de la Facultad de Ingeniería**



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ACEPTACIÓN DEL TUTOR**

Quien suscribe, Ingeniero Alicia De Pizzella, portador de la cédula de identidad N° V-4.598.880, en nuestro carácter de tutor del Trabajo de Grado presentado por el ciudadano Sebastián Báez, portador de la cédula de identidad N° V-26.337.849, **titulada LOS EFECTOS DE OVALIDAD Y MOVIMIENTO RELATIVO EN LOS ESFUERZOS INTERNOS DE LOS REFRACTARIOS EN HORNOS ROTATIVOS DE CEMENTO** Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, acepto la tutoría del mencionado proyecto durante su etapa de desarrollo hasta su elaboración y evaluación según las condiciones de la coordinación de pasantías y trabajo de grado de la facultad de ingeniería de la universidad José Antonio Páez

En San Diego, a los 2 días del mes de Octubre del año dos mil veinte.

Ing. Alicia De Pizzella

V-4.598.880

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente le agradezco a DIOS por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por haberme dado la inteligencia y el entendimiento, por ser mi fortaleza en momentos de debilidad, por haberme brindado una vida llena de aprendizajes.

Les agradezco también a mis padres, por ser los principales promotores de mis sueños, por haberme apoyado y motivado en cada decisión que eh tomado, por los valores que me han inculcado, por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida, les agradezco por siempre confiar y creer en mí, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

Quiero agradecerle de manera especial y sincera a la profesora Alicia por haber creído en mí a lo largo de este tiempo, por el apoyo incondicional, por cada detalle cada momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda que me surgiera, por la caridad y exactitud con la que explicaba cada clase.

Agradezco también a mi Universidad, por haberme abierto las puertas en la institución, por haberme permitido formarme en ella como un profesional.

## ÍNDICE GENERAL

<b>LISTA DE CUADRO.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xii</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>

### CAPÍTULO

#### **I EL PROBLEMA**

1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación.....	5
1.3 Objetivos de la Investigación.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Justificación.....	6
1.5 Alcance.....	9

#### **II MARCO TEÓRICO**

2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Bases teóricas.....	13
2.2.1 Hornos.....	14
2.2.2 Tipos de hornos.....	14
2.2.3 Horno rotativo.....	16
2.2.4 Funcionamiento.....	17
2.2.5 Inclinación.....	19
2.2.6 Métodos adoptados por mantenimiento y su estrategia	25
2.2.7 Mediciones topográficas y distribución de cargas en los soportes.....	27
2.2.8 Medición del eje de giro del horno rotativo horizontal en plena producción y régimen.....	29
2.2.9 Verificación de ejes y radios de los rodillos.....	34
2.2.10 Distribución de las cargas en los soportes del Horno	35
2.2.11 Medición.....	42
2.3 Definición de términos.....	47

#### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1 Tipo de investigación.....	49
3.2 Tipo de estudio.....	50

3.3	Diseño de la investigación.....	50
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	50
3.4.1	Técnicas.....	51
3.4.2	Instrumentos.....	52
3.5	Técnicas de análisis de datos.....	53
3.6	Fases metodológicas.....	53
<b>IV</b>	<b>RESULTADOS</b>	
4.1	Determinar el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios de los hornos de cemento.....	55
4.1.1	Proceso de obtención del cemento.....	56
4.1.2	Horno.....	58
4.1.3	La llama.....	62
4.2	Definir los valores de esfuerzos internos en los refractarios de hornos de cemento.....	65
4.3	Señalar la vida útil de los refractarios.....	67
4.3.1	Factores que afectan la vida útil de los refractarios.....	67
4.3.2	Variables que afectan la vida útil del refractario.....	70
4.3.3	Tipos de materiales refractarios para horno rotativos.....	72
4.3.4	Los refractarios como causa de paradas en los hornos.....	73
4.4	Describir el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento.....	75
4.4.1	Localización de las medidas.....	75
4.4.2	Medida de ovalidad.....	77
4.4.3	Medida de desplazamiento y holgura.....	78
4.4.4	Movimiento relativo.....	80
4.4.5	Esfuerzo de torsión.....	82
4.4.6	Sobre carga de roles y holgura.....	83
4.4.7	Coraza y llanta.....	85
4.4.8	Distorsión de coraza.....	87
4.4.9	Simulación dinámica.....	102
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	111
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	112
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	113
	<b>ANEXOS</b>	
A	Cementos Argos Honduras.....	114
B	RHI Magnesita.....	116
C	Five Pillard.....	117

D	Fisura de coraza de horno.....	119
E	Descabezado irregular zona de llanta.....	120
F	Ovalidad permitida.....	121

## ÍNDICE DE CUADRO

CUADRO	Pág	
1	Localización de las mediciones.....	77
2	Toma de mediciones.....	77
3	Medida de ovalidad.....	79
4	Medición del desplazamiento.....	80
5	Movimiento relativo.....	81
6	Esfuerzo de torsión.....	83
7	Interpretación gráficas lineales.....	84
8	Roles sobre cargados.....	85
9	Desalineación de roles.....	85
10	Holgura excesiva.....	86
11	Coraza deformada.....	87
12	Grieta en coraza.....	87
13	Llanta con poca carga.....	88
14	Distorsión de coraza sección 1 al 4.....	89
15	Distorsión de coraza sección 5 al 8.....	90
16	Distorsión de coraza sección 9 al 12.....	91
17	Distorsión de coraza sección 13 al 16.....	92
18	Distorsión de coraza sección 17 al 20.....	93
19	Distorsión de coraza sección 21 al 24.....	94
20	Distorsión de coraza sección 25 al 28.....	95
21	Distorsión de coraza sección 29 al 32.....	96
22	Distorsión de coraza sección 33 al 36.....	97
23	Distorsión de coraza sección 37 al 40.....	98
24	Distorsión de coraza sección 41 al 44.....	99
25	Distorsión de coraza sección 45 al 48.....	100
26	Distorsión de coraza sección 49 al 52.....	101
27	Distorsión de coraza sección 53 al 56.....	102
28	Comportamiento de la coraza.....	103
29	Simulación dinámica.....	104
30	Desgaste mecánico por desplazamiento.....	105
31	Desgaste mecánico por aflojamiento del refractario.....	106

## ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA		pp.
1	Elementos Técnicos del Horno Rotativo.....	17
2	Acondicionamiento del horno Rotativo-Piñón y Corona.....	18
3	Rodillo Empujador.....	19
4	Revestimiento Interno de ladrillos refractarios.....	21
5	Aros de Rodadura.....	22
6	Estrangulamiento del horno.....	22
7	Distribución de Cargas.....	23
8	Aros de Rodadura.....	24
9	Tubos Cilíndricos.....	25
10	La materia prima, se desplaza un cierto trecho horizontal.....	28
11	Representación del eje de giro desalineado.....	29
12	Estación Total Electrónica.....	32
13	Medición de puntos con rayo láser.....	32
14	Deformación de carcasa.....	39
15	Ladrillos del revestimiento del horno.....	40
16	Aparato de medición de deformaciones de hornos "Shelltest".....	42
17	Diagrama "Shelltest" carcasa.....	43
18	Diagrama "Shelltest" anillo de rodadura.....	44
19	Tabla de Resultados.....	45
20	Mediciones de deformaciones.....	45
21	Curva de distorsión.....	46
22	Conjunto de accionamiento de un horno rotatorio.....	55
23	Piñón de accionamiento de un horno y su montaje.....	56
24	Proceso de fabricación del cemento.....	57
25	Diagrama del proceso paso a paso.....	57
26	Proceso químico obtención del cemento.....	58
27	Área del Clinker.....	58
28	Horno rotativo.....	59
29	Rodillos de soporte.....	59
30	Zonas del horno.....	60
31	Propiedades del acero A-36.....	61
32	Módulo de elasticidad Acero A-36.....	61
33	Coefficiente de expansión Acero A-36.....	62
34	Ficha técnica del acero A-36.....	62
35	Mechero industrial.....	63
36	Aires de la combustión.....	64
37	Ovalidad en la carcasa del horno.....	64
38	Distribución térmica y tipo de refractario.....	71

39	Espesor y densidad de refractarios.....	72
40	Zonas de afectación de refractarios.....	75
41	Zona del horno de ataque térmico.....	75
42	Zona del horno de máxima distorsión.....	76



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

LOS EFECTOS DE OVALIDAD Y MOVIMIENTO RELATIVO EN LOS  
ESFUERZOS INTERNOS DE LOS REFRACTARIOS EN HORNOS  
ROTATIVOS DE CEMENTO

**Autor:** Sebastián Báez  
**Tutor:** Alicia de Pizella  
**Fecha:** Octubre, 2020

**RESUMEN**

El revestimiento refractario del horno rotativo, tiene como función evitar que la llama a alta temperatura, o el flujo de aire, dañen directamente el cuerpo del horno, protege el cilindro del horno; evita que sustancias nocivas (CO, SO<sub>2</sub>) erosionen el horno; reduce su temperatura. Es de gran importancia la función del revestimiento, en procesos que involucran fenómenos termodinámicos. De su capacidad de restringir el flujo de calor hacia el exterior del horno depende la eficiencia térmica del equipo durante el proceso de calcinación. Pero su estructura depende, entre otros factores, del principio de arco continuo para permanecer en su lugar. Sin embargo, la ovalidad produce resquebrajamiento del refractario, deformaciones en la carcasa del horno, provocando esfuerzos que desbalancean las bases de apoyo. Esto ocasiona una disminución drástica de su vida útil. Es por ello que la presente investigación tuvo como objetivo, analizar los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento. Se realizaron las medidas correspondientes a la ovalidad presentada por el horno, con todos los datos se hizo la simulación dinámica y se evaluó en función a los valores máximos permisibles de ovalidad, los puntos más críticos del horno y así revisar la manera más factible de corregir estas deformaciones para preservar las funciones del refractario. La metodología se corresponde a una investigación documental, como técnica de recolección de datos, se empleó la observación documental, el análisis bibliográfico, la paráfrasis el fichaje, y las técnicas de análisis de datos fueron el resumen simple y el análisis de contenido. Así mismo se sustentó en un nivel descriptivo

**Palabras Claves:** Ovalidad, movimiento relativo, refractarios, hornos rotativos

## INTRODUCCIÓN

El cemento es el producto final de un proceso tecnológico complejo que involucra calor el cual es producido por hornos rotatorios que alcanzan una temperatura hasta de 1.400°C. . Con el paso del tiempo la tecnología para la producción de cemento ha sufrido varios cambios, principalmente en el uso de estos hornos, encargados de la fabricación del cemento, su operatividad se produce de acuerdo a las condiciones en que estos se encuentren, por lo tanto si el horno sufre de severas condiciones de operación aunado a las condiciones relacionado con el revestimiento refractario cuya función es preservar el calor, el horno rotario sufrirá los efectos de ovalidad y movimiento relativo que incidirán directamente en la vida útil de los refractarios, lo cual puede ocasionar paradas espontáneas e involuntarias del horno, hecho que produce pérdidas extraordinarias en la producción, constituyendo esto pérdidas económicas y materiales donde las empresas normalmente no están en condiciones de recuperar e incluso pagar.

En virtud de esto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo Analizar los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento. En este sentido, la estructura de la investigación está compuesta por tres capítulos: Capítulo I, denominado El Problema, donde se señala el planteamiento del problema, ,objetivo general y específicos que servirán de guía a la investigación; justificación e importancia de la investigación así como también el alcance. Capítulo II, llamado Marco Teórico, en la cual se presentan los antecedentes de la investigación que sirven de referencia al estudio, las bases teóricas que sustentan la investigación, y la definición de términos básicos.

En el Capítulo III, denominado Marco Metodológico, se presenta la metodología utilizada y destaca los siguientes aspectos: tipo, nivel, diseño de la investigación, así como también las técnicas e instrumentos de recolección de datos y las técnicas de análisis de datos. Además las fases del diseño que se cumplieron y/o se realizaron en el desarrollo del estudio y por último el Capítulo IV, Los resultados Para finalizar,

se muestran las referencias bibliográficas consultadas que avalan en proceso investigativo en cuanto al contenido del presente estudio.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

Desde el origen del ser humano, este ha tenido la necesidad de transformar los elementos de la naturaleza para aprovecharse de ellos en función de su beneficio. En el siglo XIII hasta el siglo XVIII, la economía existente estaba basada en el mundo agrario y artesanal y tres cuartas partes de la población subsistían con trabajos agropecuarios. (Finanzas para todos (s/f)) pero es a finales del siglo XVIII, y durante el siglo XIX, cuando el proceso de transformación de los recursos de la naturaleza sufre un cambio radical, conocido como la revolución industrial, creando de esta manera un nuevo modelo de vida. (Daniel A., (2016))

El desarrollo industrial, el aumento de la productividad, el crecimiento de las ciudades y la mejora del comercio nacional e internacional contribuyeron a un gran incremento demográfico debido al ascenso de la natalidad y de la esperanza de vida. Así pues, Finanzas para Todos (s/f) señala que:

Se produce un cambio rápido y en profundidad que afecta a todas las estructuras de la sociedad. Los cambios fueron tecnológicos, socioeconómicos y culturales. Los tecnológicos irán desde el uso de nuevos materiales como el acero a fuentes energéticas como el carbón y máquinas motrices como la máquina de vapor, considerada como el motor inicial de la Revolución Industrial. Aparecen las máquinas de hilar y tejer, que consiguen aumentar rápidamente la producción con poco personal. Surgen técnicas para el desarrollo del trabajo y la especialización de la mano de obra. El transporte se desarrolla tanto por trenes como por barcos, lo que junto con otros inventos harán crecer el papel de la industria y el comercio. (En línea)

Por lo tanto, la industrialización se basó en la aplicación temprana de las innovaciones tecnológicas y una fuerte concentración empresarial, es por ello que la industria representa la actividad cuyo propósito es transformar las materias primas en productos elaborados o semielaborados, utilizando una fuente de energía. Por otro lado, la industria necesita además de materiales para su desarrollo, maquinaria y recursos humanos organizados habitualmente en empresas, de acuerdo a su especialización laboral.

Bajo este mismo escenario, cabe señalar que la industria del cemento además de contar con una serie de maquinarias e instrumentaciones para su fabricación, también incluye las instalaciones de hornos en sus casos mayormente rotativos, el cual consiste en un tubo cilíndrico de 3,5 a 7 m de diámetro, apoyado sobre estaciones de rodadura (2, 3 y hasta 8), tienen una inclinación depresiva, en dirección hacia la salida del material, de 2,5% al 4,5 % con respecto a la horizontal y gira a velocidades de rotación comprendidas entre 1,5 y 3,5 revoluciones/minuto (rpm) que emplean el proceso húmedo o seco para producir cemento de piedra caliza, y las que emplean agregado liviano para producirlo a partir de esquisto o pizarra. Se utilizan hornos rotativos que elevan los materiales a temperaturas hasta los 1400 °C. Por lo tanto, el horno rotativo es la máquina central o el alma, en una planta de calcinación, dado que el mismo provee una de las materias primas necesarias para el proceso, en las industrias de: cemento, cal, coque, celulosa, siderurgia, entre otras. Dentro de estos hornos se encuentran los refractarios cuya función es preservar el calor dentro del horno por lo tanto es considerado un aislante térmico, además, este término se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse.

Sin embargo, es oportuno señalar que las paradas espontáneas e involuntarias del horno, provocan pérdidas extraordinarias en la producción, además representan erogaciones en la reparación de los hornos, no pudiendo la organización lograr una recuperación del capital, constituyendo esto pérdidas económicas y materiales donde las empresas normalmente no están en condiciones de recuperar e incluso pagar. De hecho, pueden producirse situaciones catastróficas, como consecuencia de averías en

grandes piezas de fundición y que no se encuentran en el almacén, es decir en el depósito de repuestos de la planta. Muchas veces el plazo de entrega del proveedor asciende a días y meses, lo cual ocasiona fuertes perjuicios empresariales.

Por consiguiente, un horno desalineado, con deformaciones de carcaza o con una distribución de esfuerzos no balanceada sobre las bases de apoyos, produce una drástica disminución de la vida del revestimiento refractario, siendo este el elemento que mayor incidencia tiene en el costo de la reparación de los hornos. Debido a que el procedimiento de cambio de los refractarios dañados implica parar la producción total de una empresa, es imprescindible velar y monitorear la ovalidad y movimiento relativo, ya que estas variables influyen directamente en las deformaciones del casco donde estas deformaciones son transmitidas al revestimiento del horno e influyen por tanto de manera esencial sobre su duración. Además producto a la variación constante del radio de curvatura de la coraza, durante el giro del horno, se produce un proceso de deformación. Que por esta razón, los ladrillos del revestimiento del horno son fuertemente solicitados en los flancos, pudiendo ser la consecuencia de ello un desgaste elevado (limadura) o bien la caída de los ladrillos.

Con base a lo antes mencionado, si en los hornos ocurre una falla grave inesperada y que es descubierta antes o durante una parada, pueden dar como resultado una desviación de los costos y posiblemente atrasos en el arranque o hasta llevar al punto de reducir la nómina por falta de ingresos o un posible cierre de la empresa debido a la alta pérdida que este genera.

## **1.2 Formulación**

Al analizar los parámetros más influyentes de esta problemática y que se pueden presentar en situaciones inesperadas surge la siguiente interrogante ¿Que tan importante es realizar un análisis de los efectos la ovalidad y el movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento? ¿Estos efectos disminuyen la vida útil de los refractarios del horno?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Determinar el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios de los hornos rotativos de cemento.

Definir los valores de esfuerzos internos de los refractarios de los hornos rotativos de cemento.

Señalar la vida útil de los refractarios del horno rotativo de cemento.

Describir el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento.

### **1.4 Justificación**

En la actualidad el abastecer a una alta demanda por el consumidor y estar ubicado entre las principales empresas cementeras que generan este producto es un gran reto, debido a que se necesita contar con la suficiente capacidad de producción y entregar un producto final que cumpla con todos los estándares de calidad. No obstante, es importante tener una planificación en la cual se cumpla una condición de cero errores puesto que estos generan pérdidas a la empresa.

El cemento es un producto básico en la construcción, que se obtiene a base de procesar los minerales adecuados que extraídos de cantera, se preparan, muelen y se introducen en unos hornos donde se producen las reacciones químicas necesarias para su transformación en un producto intermedio denominado clinker. En la operación del Horno Rotativo únicamente puede anteponerse al rendimiento y la calidad del clinker producido, la seguridad de maquinaria y equipos; por tal razón, al existir condiciones de peligro de sobrecalentamiento de la chapa metálica, por problemas en el refractario o la costra que lo protege, se deben realizar maniobras operativas

orientadas a superar la situación de peligro, pero que pueden afectar gravemente los récords de producción e, incluso, la calidad del clinker almacenado.

Por consiguiente, es oportuno mencionar que desde la puesta en marcha del sistema se debe efectuar un control periódico, o permanente según lo requerido, en la temperatura exterior de todas las zonas revestidas de refractario; ello servirá como importante contribución al control del proceso para prevenir daños, en el refractario interior, que cause deterioros de mayor gravedad en la chapa del Horno. En atención a lo mencionado realizar un análisis de los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento es fundamental ya que permitirá asegurar que se cumpla la vida útil del refractario. Por último este estudio se justifica ya que a través de él, se lograra una mayor y mejor comprensión de los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento.

Por otro lado, este trabajo se encuentra adscrito la Unidad de Investigación referida a Materiales y Transferencia de Calor en concordancia a los lineamientos requeridos por la Universidad José Antonio Páez.

Igualmente este trabajo posee relevancia teórica, ya que estará sustentado por autores que le darán confiabilidad a este estudio por ser considerados especialistas en la materia. Los mismos proporcionarán a la investigación la orientación adecuada para la realización del presente estudio. De manera que la investigación se justifica por ser un trabajo que garantice un proceso investigativo en cuanto a la realización de un análisis basado en los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento. Al respecto Bernal (2010) expresa: “Que el propósito del estudio es generar reflexión y debate académico sobre el conocimiento existente, confrontar una teoría, contrastar resultados o hacer epistemología del conocimiento existente” (p.106).

En cuanto a la justificación metodológica, está basado en un trabajo documental con un diseño bibliográfico, con el propósito de analizar los efectos de ovalidad y

movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento En este sentido, la investigación servirá de referencia para la generación de nuevos enfoques investigativos a propósito de la temática planteada y permitirá la aplicación de conocimientos adquiridos, específicamente en el área de Ingeniería Mecánica como carrera de punta en la actualidad. La metodología según Behar (2008) contiene “la descripción y argumentación de las principales decisiones metodológicas adoptadas según el tema de investigación y las posibilidades del investigador. La claridad en el enfoque y estructura metodológica es condición obligada para asegurar la validez del estudio”.(s.n/p)

Desde la perspectiva social Hernández, Fernández y Baptista (2006) señalan que una justificación social debe responder estas preguntas: “¿Cuál es su trascendencia para la sociedad?, ¿quiénes se beneficiarán con los resultados de la investigación?, ¿de qué modo? En resumen, ¿que alcance o proyección social tiene?” (p.51). Por ello, la presente investigación tiene gran importancia social, por cuanto suministra información para la selección y ejecución de adecuados procesos, fundamentalmente basado en los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento.

Desde el punto de vista práctico, el trabajo se justifica, porque el análisis y conclusiones del estudio, orientan los esfuerzos y acciones hacia el mejoramiento continuo de las actividades realizadas en los hornos rotativos de cemento, donde se hace hincapié en los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios, lo que traería consigo una argumentación basada en un análisis que permitirá conocer las debilidades que representa estos efectos para su posterior transformación en fortalezas. Al respecto Galán M. (2010) señala que:

La justificación práctica del problema expone las razones acerca de la utilidad y aplicabilidad de los resultados del estudio y de la importancia objetiva de analizar los hechos que los constituyen y de la posibilidad de llegar a conclusiones lógicas de su solución y cuando su desarrollo ayuda a resolver un problema. (p 145)

## **1.5 Alcance**

El alcance de realizar un análisis basado en los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento, se traduce en el hecho que hoy en día los hornos rotativos representan una herramienta fundamental para la fabricación del cemento, por lo tanto su funcionamiento debe ser óptimo para el flujo de la producción maximizando los volúmenes al tener un menor desgaste mecánico controlando así los efectos de ovalidad y movimiento en los esfuerzos internos de los refractarios. El análisis se basó en una revisión documental y bibliográfica a un trabajo realizado por la empresa RHI ubicada en Honduras. Dicha empresa facilitó la información de la simulación que aquí se presenta.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

En todo proyecto de investigación, es preciso desarrollar conceptos que aborden las temáticas expuestas desde el planteamiento de problema hasta la justificación, las cuales se encuentran en correspondencia dentro de las mismas variables y darles un sustento teórico permite agregar valor a dicho estudio. Es por esto que, de acuerdo a Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2010) se describe el marco teórico como “...exponer y analizar las teorías, las conceptualizaciones, las perspectivas teóricas, las investigaciones y los antecedentes en general, que se consideren válidos para el correcto encuadre del estudio.” (p.64) Es decir, es el análisis explícito de todas aquellas investigaciones y conceptos que puedan corresponder al desarrollo acertado de la investigación.

#### **2.1 Antecedentes**

Resulta importante y necesario desarrollar aquellas investigaciones que poseen variables similares al proyecto que se desea investigar y que pueden servir de guía al investigador permitiéndole hacer comparaciones sobre cómo se desarrollaron esos proyectos. De esta forma, Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (ob.cit.) describen los antecedentes de la investigación de la siguiente manera:

Conocer lo que se ha hecho con respecto a un tema ayuda a: investigar sobre algún tema que ya se haya estudiado a fondo, a estructurar más formalmente la idea de investigación y a seleccionar la perspectiva principal desde la cual se abordará la idea de investigación. (p.28)

Es decir que, los antecedentes permiten a los investigadores conocer los diferentes enfoques que puede alcanzar el tema de estudio, al cual se desea dar ejecución, además los previos estudios dan el acceso a captar la perspectiva o

punto vista que le da cada autor a la investigación y a los resultados que estos estudios arrojaron.

Hernández L. (2015) en su Trabajo Especial de Grado denominado **Diseño de un Programa de Mantenimiento Preventivo para transportadores de ruedas de aluminio en horno de tratamiento térmico**, tuvo como objetivo diseñar un programa de mantenimiento preventivo para transportadores de ruedas de aluminio en el horno de tratamiento térmico de la Empresa Manufactura de Aluminio Venezuela, Madeal Venezuela, C.A. y la problemática evidenciada fue que el horno de tratamiento térmico específicamente en su sistema de transportación no cuenta con un plan de mantenimiento preventivo adecuado y esto genera una serie de situaciones que retrasan y complican el proceso de producción, lo que trae como consecuencia pérdidas económicas y de producción, además las reparaciones solo se llevan a cabo luego de ocurrir la falla generándose retrasos en la producción y paradas no planificadas.

En cuanto a la metodología el trabajo se realizó en cuatro fases: la primera de ellas fue la diagnóstica, la segunda: determinar los factores que inciden en la falla del sistema, la tercera, estudio de las causas que ocasionan las horas de parada no programadas en el sistema de transportación y por ultimo diseñar un programa de mantenimiento preventivo basado en la Norma ISO 9000:2008 para lograr un funcionamiento óptimo. La conclusión a la cual llego el autor fue que la empresa debe realizar un plan de mantenimiento preventivo por ser el más idóneo a las circunstancias del sistema transportador ubicado en el horno de tratamiento térmico. Por último recomienda aplicar el servicio de mantenimiento preventivo a todas las maquinas o equipos críticos dentro de la planta de manera efectiva y constante que permita preservar su vida útil, disminuir los costos y fallas frecuentes.

La relación de este antecedente con el trabajo de investigación es la importancia de mantener los hornos en óptimas condiciones, ya que una parada no planificada genera pérdidas económicas directas e indirectas a la empresa y dichas pérdidas son difíciles de reponer a nivel empresarial.

Así mismo, Cárdenas A. (2014) en el trabajo denominado: **Diseño y Simulación de un Horno Rotatorio para materiales celulósicos**, para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, tuvo como objetivo diseñar y simular un horno rotatorio para materiales celulósicos y la problemática encontrada fue que la industria ecuatoriana requiere carbón ya sea para usarlo directamente o para producir carbón activado y aprovecharlo en diferentes áreas debido a sus ventajas. Sin embargo, no se habían realizado estudios de carbonización que permitan establecer que materia prima (desecho) produce el mejor carbón y por otro lado las organizaciones del país no poseen equipos específicos que desarrollen esa función a través de los hornos rotatorios.

En cuanto al diseño, simulación y selección de materiales se utilizaron los criterios del Manual de Diseño Mecánico de Shigley, por lo cual se procedió a realizar simulaciones, donde se determinaron las condiciones operacionales óptimas para la construcción de un prototipo. La conclusión a la cual llegó el autor fue que el diseño de un horno rotatorio para el calentamiento y carbonización de materiales celulósicos es ventajoso, ya que esta tecnología puede permitir, con dispositivos adicionales una producción continua. Por lo tanto recomienda la construcción de un prototipo y realizar pruebas con distintos tipos de materiales celulósicos, así como realizar simulaciones para establecer sus dimensiones y condiciones operativas para la carbonización de un material y de esta forma demostrar sus ventajas.

La relación de este antecedente con el trabajo de investigación es la necesidad de simular los diseños del horno rotativo para hacer una correcta selección de materiales en función a los requerimientos del diseño.

Por último, Fernández F. (2008) en su Trabajo de Grado titulado **Conductividad Térmica en sólidos a muy altas temperaturas**, tesis presentada para optar al título de Magister Scientiarum en Física de la Materia Condensada en la Universidad de los Andes, tuvo como propósito estudiar la física de la conductividad térmica y sus aspectos más importantes en una variedad de materiales, además de revisar las teorías existentes para explicar la Conductividad Térmica en sólidos e identificar aspectos o

procesos físicos relevantes en el régimen de muy altas temperaturas y antes de la temperatura de fusión. En resumen, el autor busca articular las conclusiones en un referencial que sirva de guía para la especificación y preparación de materiales que puedan ser usados en la nueva generación de barreras térmicas, así como también sugiere el uso de materiales amorfos considerando que los sólidos amorfos muestran estabilidad a temperaturas elevadas.

La relación de este estudio con la presente investigación es que puede servir como guía para la especificación y preparación de materiales refractarios que no sean tan propensos al daño ocasionado, producto de los esfuerzos generados por la ovalidad y movimiento relativo del horno.

## **2.2 Bases teóricas**

El fundamento teórico es necesario en todo trabajo de investigación, por esta razón se tomaron los aportes de teóricos y estudiosos especialistas en el tema, las cuales sustentan con sus conocimientos el presente estudio. Cerda (2007) señala que las bases teóricas son la “recopilación de conceptos y contenidos que conforman la teoría de una investigación que tiene relación con el objetivos y problemas” (p.209). Es decir, son los enfoques y características de los aspectos teóricos que soportan la investigación, los cuales deben relacionarse a la situación objeto de estudio.

Es por ello que, el desarrollo de la teoría y estudios que a continuación se presenta, proporciona conceptos que permiten interpretar el marco en que se desenvuelve el trabajo actual, por lo que se hace necesario mencionar los autores como base para realizar el estudio propuesto, por ser pertinente y acorde con el trabajo de investigación.

### **2.2.1 Hornos**

Un horno (del latín «furnum»)<sup>1</sup> es un dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimiento cerrado. Se utiliza tanto en la cocina para preparar, calentar o secar alimentos, como en la industria. La energía

calorífica utilizada para alimentar un horno puede obtenerse directamente, por combustión (leña, gas u otro combustible), radiación (luz solar), o indirectamente, por medio de electricidad (horno eléctrico).

### 2.2.2 Tipos de horno

- **Horno de leña u horno de barro.** Funciona a partir de materiales forestales. Desde el punto de vista del consumo energético, es el menos eficiente y el que más emisiones de dióxido de carbono tiene, pero desde el punto de vista gastronómico, en ciertos casos da un sabor especial a ciertos platos. Se utiliza ampliamente en la cocina tradicional castellana: por ejemplo, para el cordero asado o el cochinillo asado.
- **Horno de gas.** Los avances en la utilización del gas natural como combustible han permitido conceder a los hornos de gas una opción viable en las alternativas que brinda su uso, y se muestran muy eficaces tanto por la reducción de los tiempos de cocción de las materias primas como la reducción de las emisiones al ambiente. La regulación de la atmósfera en el interior del horno se puede controlar variando la inyección de la mezcla de gas y aire, por lo que resultan muy útiles para hacer reducciones. Otra ventaja digna de mención es que se alcanzan altas temperaturas en un menor tiempo.
- **Horno eléctrico.** Son hornos alimentados con energía eléctrica de un uso muy extendido, por su comodidad y fácil manejo. Con los sistemas de programación que se incorporan, son muy útiles y fiables. En las cámaras de estos hornos se alojan, en unas zanjias o vías de las paredes, unas espirales de hilo conductor de energía eléctrica, que actúan como resistencia formadas por aleaciones de cromo-níquel y otros metales cuya característica es la buena conductividad, según las temperaturas que se desee alcanzar.
- **Cocina solar.** Su principal ventaja radica en el óptimo aprovechamiento del recurso solar para obtener energía calorífica.
- **Horno de crisol.** Es un depósito en forma de tronco cónica en el cual el metal está completamente aislado del combustible, y es su principal característica la

de que presenta un envase con la parte superior descubierta, lo cual permite la eliminación de los gases y la obtención del metal líquido. Una de las ventajas de fundir metales no ferrosos con crisol es que se tiene una aleación más limpia, los tiempos de mantenimiento son más rápidos y el control de energía es más preciso. Se cuenta con diferentes formas, como tipo barril, jofaina y con pico, entre otros.

- **Horno de microondas.** Funciona mediante la generación de ondas electromagnéticas que interaccionan con las moléculas de agua contenidas en los alimentos. La interacción consiste en aprovechar las propiedades resonantes de las moléculas de agua que absorben la energía de las ondas electromagnéticas, con lo que se eleva su temperatura.
- **Horno de cubilote.** Este es un tipo de horno cilíndrico vertical de aproximadamente 6 metros de alto que lleva los metales en él colocados hasta el estado líquido, y permite su colado. Puede utilizarse para la fabricación de casi todas las aleaciones de hierro, y tiene ventilación forzada por toberas, ubicadas en la parte inferior.
- **Horno de inducción.** No es posible clasificar de manera rígida, por la frecuencia de la corriente usada, las muchas variantes existentes de hornos de inducción. Los hornos que trabajan con frecuencias superiores a los 500 ciclos por segundo tienen un baño en forma de crisol cilíndrico y no llevan un núcleo de hierro. Habitualmente, estos hornos se llaman hornos de inducción sin núcleo. En los últimos años se han construido muchos hornos de este tipo que trabajan a 50 ciclos por segundo, es decir, la frecuencia normal de las redes de suministro. Los primitivos hornos de inducción tenían un canal de fusión que formaba el secundario en cortocircuito de un transformador; estos se pueden denominar hornos de inducción de canal.
- **Horno de resistencia.** Hay 2 clases fundamentales de hornos de resistencia. Los de la primera se calientan mediante resistencias de aleaciones tales como la S níquel-cromo 80/20, en forma de cintas o varillas; generalmente un crisol

o recipiente para el metal líquido y sirven para aleaciones de bajo punto de fusión, como las de soldadura, las de tipos de imprenta, los metales antifricción para cojinetes y algunas veces las de aluminio. Los elementos de caldeo se disponen alrededor del exterior del crisol y todo el horno queda dentro de una carcasa rellena con un material refractario y aislante térmico. Los elementos de caldeo suelen estar soportados por el revestimiento refractario.

### **2.2.3 Horno Rotativo**

Un horno rotativo es una cámara cilíndrica en rotación sobre su propio eje y levemente inclinada. Se concibe para gasificar residuos sólidos, lodos o líquidos viscosos. Tiene una llama en la parte superior y está revestido con refractario.

Los residuos se introducen en la parte superior del horno y se someten a oxidación térmica en rotación dentro del horno. Los aislamientos y el sistema mecánico permiten temperaturas de funcionamiento comparables al horno estático y puede funcionar con temperaturas superiores a 1000°C. El tiempo de permanencia puede ajustarse en función de la aplicación, modificando la velocidad de rotación.

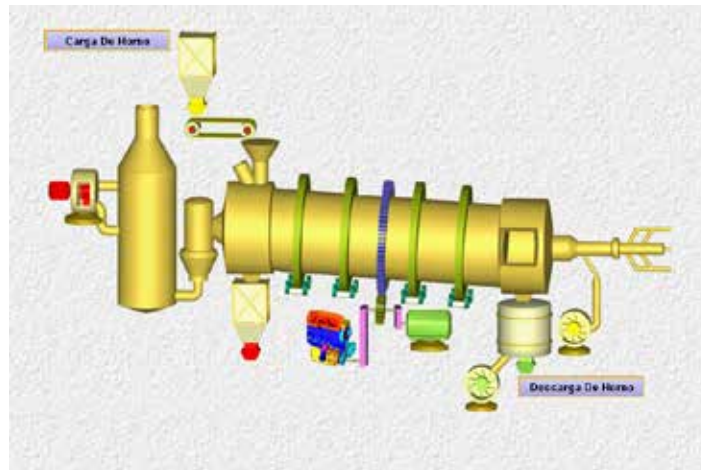
- **Tipos de horno rotativo**

Los tipos de horno rotatorio que se utilizan en la industria del cemento, varían sus modelos en los cuales el diámetro no es uniforme. El ensanchamiento de las zonas tiene por objeto, que disminuya la velocidad de los gases calientes y así mejoran en intercambio térmico entre ellos y el material. Sin embargo, en los hornos de sección no uniforme la velocidad con que avanza el material es diferente según la zona, siendo mayor en las zonas ensanchadas. Las consideraciones técnicas, teóricas y la experiencia práctica de los fabricantes han llevado a la conclusión de que la forma más conveniente es la que tiene la sección uniforme en toda su longitud.

- **Elementos técnicos del Horno Rotativo Horizontal. Datos de fabricantes**

El horno consiste en un tubo cilíndrico de 3,5 a 7 m de diámetro, apoyado sobre estaciones de rodadura (2, 3 y hasta 8), tienen una inclinación depresiva, en dirección

hacia la salida del material, de 2,5% al 4,5 % con respecto a la horizontal y gira a velocidades de rotación comprendidas entre 1,5 y 3,5 revoluciones/minuto (rpm). (Ver figura 1)

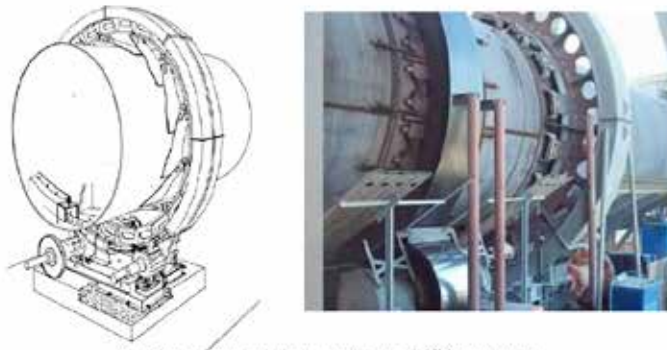


**Figura 1.** Elementos Técnicos del Horno Rotativo  
Fuente: Cárdenas (2014)

Antiguamente los grandes hornos, de proceso vía húmeda (pasta con un contenido de agua de 30 a 45 %), p.ej. con capacidad de 3000 tn/día, diámetro  $D=6,3$  m. y longitud  $L=227$ m, reposaban sobre 7 y 8 apoyos y han dejado paso, en los años 80, a los hornos de vía seca (o polvo crudo), de 3 apoyos equipados con precalcinador, que para una misma producción, tienen dimensiones p.ej  $D= 4.2$  m y  $L= 60$  m. Más recientemente, se ha propuesto una reducción de la longitud del horno de modo que repose solamente sobre dos apoyos, en lugar de tres, con lo que la relación  $L/D$  pasa de tomar valores entre 14 y 18 a tomarlos entre 10 y 13. Para una capacidad de producción igual, las dimensiones serían:  $D= 4.4$  m y  $L= 48$  m. Simultáneamente se ha propuesto un aumento de la capacidad de producción, así por ejemplo un horno de 7500 tn/día podría tener las siguientes dimensiones:  $D = 5.6$  m y  $L = 82$  m.

#### 2.2.4 Funcionamiento

La rotación del horno es por medio de uno o dos grupos de accionamiento en los que un piñón acciona una corona dentada fijada sobre la virola (tubo cilíndrico). El sistema de accionamiento comprende un engranaje, en dos piezas, que rodea la virola (corona dentada) y los piñones (uno para los hornos pequeños, dos para los hornos grandes), ambos engranajes con acoplamientos, embragues, trenes de engranajes como reductores de velocidad y sus motores. El accionamiento del horno debe ser capaz de afrontar todas las situaciones de trabajo, incluyendo los casos extremos. La corona dentada y piñón van envueltos por una caja de plancha de acero, con estanca para el aceite (lubricación) y el polvo. (Ver figura 2)



**Figura 2.** Acondicionamiento del horno Rotativo-Piñón y Corona

Fuente: Cárdenas (2014)

Con el fin de evitar los movimientos de deslizamientos de “sube y baja”, de los aros de rodadura, sobre los rodillos, el guiado axial del horno está asegurado por uno o dos topes hidráulicos con rodillos empujadores, las cuales imprimen al horno un movimiento axial limitado, con el fin de repartir de manera uniforme el desgaste sobre toda la superficie de los rodillos soporte. (Ver figura 3)



**Figura 3.** Rodillo Empujador  
Fuente: Cárdenas (2014)

### 2.2.5 Inclinación

Si el horno estuviera horizontal, los ejes de los rodillos de apoyo, del aro de rodadura y del horno podría estar paralelos y el horno estaría en posición estable. Sin embargo, para que el material a calcinar, avance en el horno, tienen una inclinación de unos grados, de tal modo que es preciso compensar la componente que tiende a hacer descender el horno por un esfuerzo de sentido opuesto aportado sobre los aros de rodadura. Este esfuerzo esta suministrado mediante el no paralelismo entre los ejes de los rodillos de apoyo y el eje del horno y el rodillo empujador. Debe permitir que el desplazamiento entre el aro de rodadura y los rodillos soportes sea de 40 a 60 mm, con una duración de subida del horno del orden de 8 a 24 horas, mientras que la del descenso será de 4 a 8 horas.

Según que el horno rotatorio este equipado o no, de rodillos empujadores este principio será diferente. Sin rodillos empujadores, los ejes de los rodillos soporte están orientados (cruce de rodillos), con respecto al eje del horno de manera de hacerlo subir. Cuando se llega a la posición más alta, la puesta en acción de un engrasador es suficiente para hacer descender el horno. En el interior del horno la temperatura de los gases evoluciona de 2000 o 2350 °C (llama) a 1050 °C, mientras que el material (harina) pasa de 850 o 900 °C a 1420 o 1450 °C. Es por ello que el **revestimiento interno es de ladrillos refractarios** y protegen a la virola y reduce las

pérdidas de calor. El tiempo de permanencia del material en el horno puede ser 40 o 60 minutos a 3 o 5 horas.

Los óxidos de aluminio (alúmina), de silicio (sílice) y magnesio (óxido de magnesio) son los materiales refractarios más importantes. Otro óxido que se encuentra generalmente en materiales refractarios es el óxido de calcio (cal). Las arcillas refractarias también se utilizan ampliamente en la fabricación de materiales refractarios, como puede ser la chamota. El dióxido de circonio (circonita) se utiliza cuando hay que soportar temperaturas extremadamente elevadas. El carburo de silicio y el carbono son materiales refractarios de gran resistencia a altas temperaturas pero arden en presencia de oxígeno si desaparece su protección de dióxido de silicio.

Compuestos binarios, tales como el carburo de wolframio o el nitruro de boro pueden ser muy refractarios. El carburo de hafnio es el compuesto binario más refractario conocido, con un punto de fusión de 3890 °C. El compuesto ternario carburo de tántalo hafnio tiene uno de los más altos puntos de fusión conocidos (4215 °C).

Los materiales utilizados se deben elegir en función de las condiciones de utilización; por ejemplo, el carbono no puede usarse si debe estar en contacto con el oxígeno porque ardería. Los materiales refractarios ácidos no se pueden utilizar en presencia de una base química y viceversa dado que se produciría corrosión. El circonio, la chamota y el dióxido de silicio son ácidos, la dolomita y la magnesita son básicas, mientras que el óxido de aluminio, la cromita, el carburo de silicio o el carbono son neutros. También son utilizados metales refractarios como el wolframio, el molibdeno o el tántalo. (Ver figura 4)



**Figura 4.** Revestimiento Interno de ladrillos refractarios

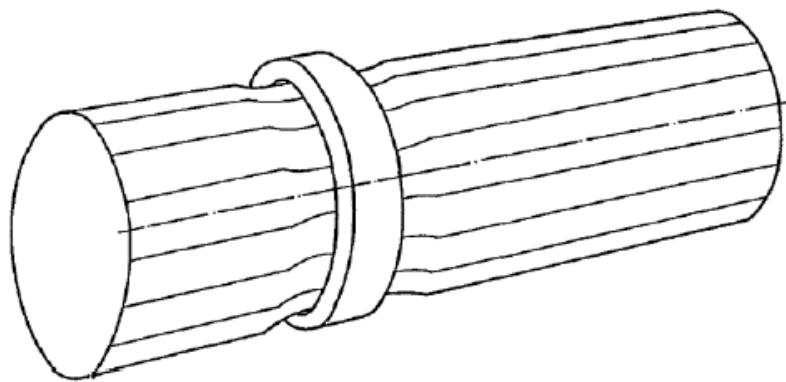
Fuente: Cárdenas (2014)

Los aros de rodadura o anillos giratorios son los soportes del horno, montados sobre rodillos de soporte. Según la longitud del horno soporta sobre dos o más aros. La relación entre el diámetro de los rodillos y los aros, varía entre 1:2,2 y 1:4,4. Depende del diámetro del horno, número de aros y juegos de rodillos que soportan al horno, obedeciendo al criterio determinante del tamaño de los rodillos con respecto a la presión de contacto que permitan los cojinetes. Las cargas radiales de la virola se transmiten a las fundaciones por medio de los aros de rodadura, los rodillos soporte y los palieres.

Constituyen las piezas de soporte, por medio de las cuales se transmite, la carga del horno y su contenido, a los rodillos de rodadura. Esta función debe realizarse con seguridad sin que influyan los movimientos longitudinales y la dilatación térmica de la virola del horno. El diámetro interno del aro debe ser suficientemente holgado, para que permita una separación adecuada de la virola, cuando el horno alcance la temperatura de trabajo en su plenitud. Una separación insuficiente tiende a causar estrangulamiento y encogimientos. La ovalización de esta última (deformación elíptica) debe estar debajo del 0,2 % (según fabricantes). (Ver figuras 5 y 6)

**Figura 5.** Aros de Rodadura

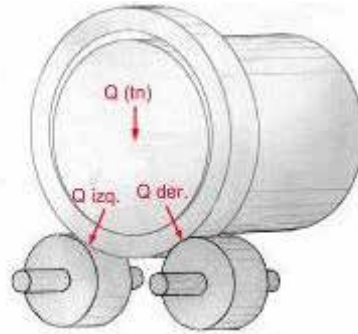
Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)



**Figura 6.** Estrangulamiento del horno

Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

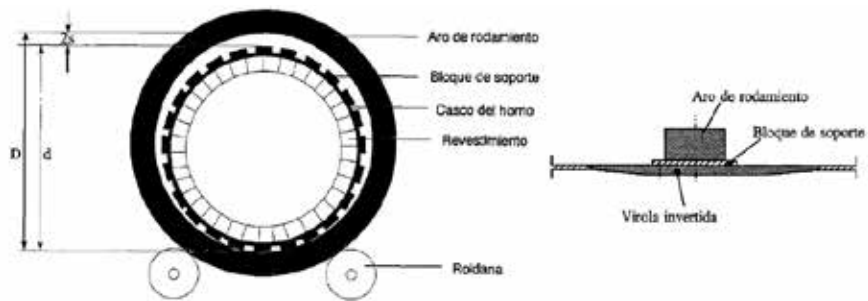
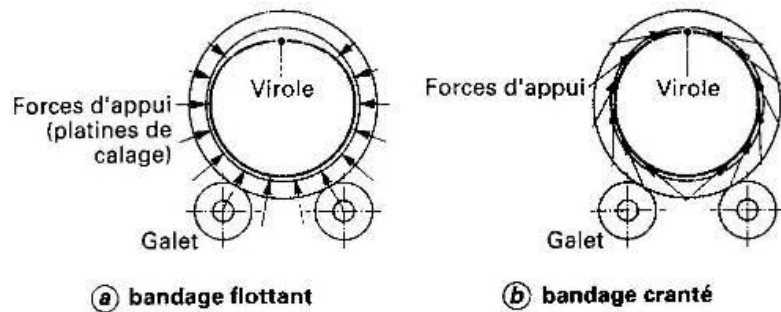
La carga radial del horno ( $Q_r$ ), se reparte uniformemente sobre los dos rodillos, con una carga por rodillo igual a:



**Figura 7.** Distribución de Cargas  
Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

Las dimensiones de los aros de rodadura (longitud y espesor) son proporcionales a la masa a soportar. Hay dos tipos de aros de rodadura. El tipo de aros de rodadura flotantes, son aquellos que deben tener un movimiento relativo muy pequeño con la virola, para que la ovalización se mantenga dentro de valores aceptables, para ello deben ser suficientemente rígidos. En el tipo cerrados (crànte) o “fijos”, la virola del horno está posicionada casi concéntricamente con respecto al diámetro interior del aro de rodadura.

Las fuerzas de apoyo son aplicadas tangencialmente por medio de muescas o dientes repartidos sobre el diámetro interior del aro de rodadura y permiten limitar la ovalización a un valor ligeramente más elevado que el del aro de rodadura flotante. Los dientes pueden formar parte del cuerpo del aro de rodadura en el interior de este (sistema fabric.Polysius), o bien ser añadidos y fijados lateralmente al aro de rodadura por bulones (sistema fabric. FLS, suspensión tangencial). El posicionamiento axial de los aros de rodadura están asegurado, bien sea por dos cercos continuos de una y otra parte del aro de rodadura apoyándose sobre topes de “parada” soldados a la virola o bien por bloques guiados lateralmente posicionados alternativamente de una y otra parte del aro de rodadura y soldados a la virola. (Ver figura 8)



**Figura 8.** Aros de Rodadura

Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

En condiciones normales de trabajo, la luz entre la virola y el aro, llamado componentes. Con aros flotantes, se podrá mantener una ovalización aceptable, si la chapa de la virola es suficientemente rígida, en conjunción con el aro construido con el menor huelgo posible, y con el riesgo de que la virola sea estrangulada por dicho aro.

virola deben ser vigilados continuamente. Si el distanciamiento es demasiado grande, podrá reducirse por inserción de suplementos o cambios de bloques soportes -o tacos

de rodadura o zapatas o empaques-

ser entre 1,5 y 2,5. El tubo cilíndrico metálico exterior del horno rotatorio está constituido por un conjunto de elementos soldados llamadas virolas, fabricadas a partir de chapas de acero de un ancho de aproximadamente 2,20 m, con las cuales se forman tubos del diámetro interior del horno. (Ver figura 9)



**Figura 9.** Tubos Cilíndricos

Fuente: Cárdenas (2014)

### **2.2.6 Métodos adoptados por mantenimiento y su estrategia.**

Está demostrado que un horno desalineado, con deformaciones de coraza o con una distribución de esfuerzos no balanceada sobre las bases de apoyo, produce una **drástica disminución de la vida del revestimiento refractario**, siendo este el elemento que mayor incidencia tiene en el costo de la reparación de los hornos.

En el mismo se describen aplicaciones de **técnicas de medición y control con los hornos en funcionamiento**, tales como:

- Mediciones topográficas (c/Estación Total Electrónica) y distribución de cargas en los soportes.

- Medición del desplazamiento relativo de llantas vs. Coraza y holgura. (c/Oburg)
- Medición de deformación de coraza -ovalidad- (c/Shell test).
- Medición de siluetas periféricas de secciones y centros de rotación del casco del horno (efecto cigüeñal y movimiento planetario)
- Aplicación de técnicas de análisis, que permiten diagnosticar y corregir anomalías antes de que se produzcan daños irreparables.

Los **beneficios que se obtienen** con esta estrategia de mantenimiento son:

- Reducción de costos de refractarios
- Aumento de la vida útil del horno rotativo
- Reducción de costos de mantenimiento.
- Aumento de disponibilidad del equipamiento.

La **estrategia** consiste fundamentalmente en un mantenimiento correctivo. Basado fuertemente en inspecciones visuales y mediciones de la “pisada” de los aros de rodadura del horno en los rodillos, con hilos de plomo y la “laminación” por exceso de presión. También se controla el consumo eléctrico del motor de giro (amp), la temperatura en las bases de apoyo del horno en los cojinetes, temperaturas del casco y anillos, etc.

Otro parámetro muy importante que se observa es el comportamiento natural del horno en cuanto a su desplazamiento longitudinal entre los topes superior e inferior. Es de hacer notar que hay hornos que no poseen empujadores hidráulicos, por lo que para poder “subir” hacia el tope superior y/o mantenerse “centrados”, los rodillos de algunas bases deben contar con un “cruce”. Dicho “cruce” genera fuerzas coaxiales en el sentido ascendente del horno.

El **equilibrio axial del horno**, es decir, el equilibrio entre la fuerza axial de gravitación del horno y las reacciones correspondientes al sistema de roldanas de guía y de los rodillos de soporte, pueden ser alterados la manifestación de las averías originadas, por ejemplo, empujadores tronchados, cojinetes recalentados, y perfiles desgastados en los aros o anillos de rapamiento y rodillos de soportes. El origen de de

las grandes fuerzas de fricción son las inclinaciones de los rodillos de soporte en relación al eje del horno. Aunque dichas inclinaciones sean pequeñas, pueden producir fuerzas de fricción muy grandes. Por lo general para remediar estos problemas se lubrican las superficies de los anillos de rodamiento y anillos de soporte, con aceite, grasa o grafito, reduciendo así el coeficiente de fricción y consecuentemente las cargas axiales.

El mantenimiento predictivo se basa fundamentalmente en la medición de ciertos parámetros, tales como: alineación del eje de giro, ovalidad, holgura, cruce de rodillos, etc. Estas mediciones y controles se ejecutan con el horno en marcha y a plena producción. Los datos relevados son luego procesados en computadora por medio de programas específicos. Una vez procesada la información surgen las medidas correctivas a implantar para lograr que el horno trabaje correctamente.

La implantación de estos controles y correcciones permite evitar detenciones imprevistas del horno por roturas de diversos componentes del sistema de giro. Estas detenciones provocan cuantiosas pérdidas de producción y elevados costos de reparación. Además está internacionalmente comprobado que un horno desalineado y/óovalizado provoca el desgaste prematuro del revestimiento refractario, siendo este el insumo más costoso de este tipo de instalación.

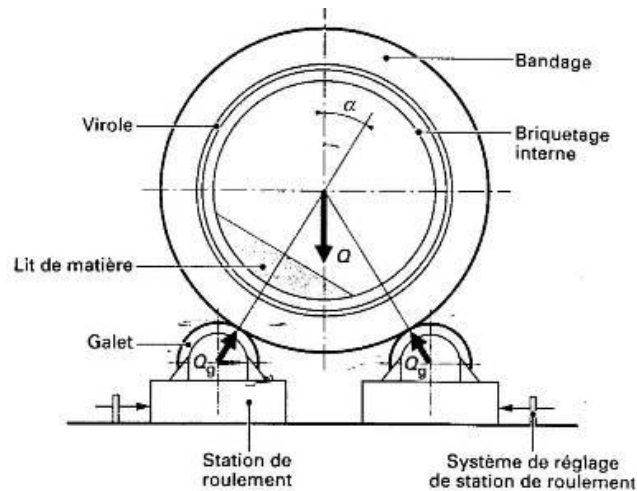
#### **2.2.7 Mediciones topográficas y distribución de cargas en los soportes**

En el transcurso de los últimos años, la metodología de mediciones se ha desarrollado basándose en la utilización de métodos, con equipos modernos electrónicos y de alta tecnología. Esta evolución ha tenido por efecto **la medición de la alineación del horno rotativo en plena producción y en equilibrio térmico global.**

#### **Tolerancias y vacilaciones**

Para evaluar la aptitud del método, es necesario definir previamente las tolerancias que los resultados deben satisfacer. El esfuerzo vertical en cada soporte, es igual a la suma de las cargas estáticas primarias, del revestimiento, de la costra, de la materia prima y de la fuerza elástica de la inclinación vertical del eje del horno.

Durante la producción la posición de la materia prima, se desplaza un cierto trecho horizontal, desde el plano de simetría vertical a través del centro de rotación. Por lo tanto la fuerza vertical forma un momento de torsión. Pero, este momento se equilibra con el momento de propulsión al girar. (Ver figura 10)



**Figura 10.** La materia prima, se desplaza un cierto trecho horizontal  
Fuente: Cárdenas (2014)

Las fuerzas verticales y horizontales forman las reacciones radiales en los rodillos y mantienen el equilibrio con la fuerza vertical del horno. Si ésta fuerza ( $F$ ), se incrementa verticalmente ( $F$ ), este incremento es absorbido con igual incremento de las dos reacciones antedichas, es decir con  $0,58 \cdot F$ , recordando que  $\text{tg } 30^\circ = 0,577$ . Si en contrario el incremento ( $F$ ) es horizontal, la situación no es la misma; en este caso el incremento ( $F$ ) se suma directamente de una de la reacción horizontal y se sustrae directamente de la otra. Por lo tanto el peligro de una deformación horizontal, del eje del horno es de  $1,0/0,58$ , o sea igual a 1,7 veces el peligro de la misma deformación vertical.

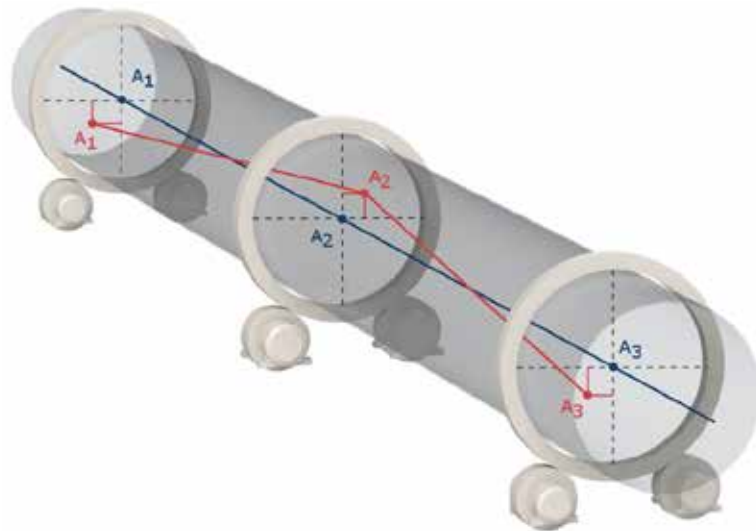
Este método de medición puede demostrar una exactitud en el plano horizontal, que es 1,7 más que la exactitud en el plano vertical. Por consiguiente las

deformaciones horizontales del eje del horno, representan aproximadamente el doble del peligro que las deformaciones verticales.

Los resultados de las mediciones verticales y horizontales del eje del Horno, deben satisfacer las vacilaciones de  $v=\pm 2,5$  mm y  $h=\pm 1,5$  mm respectivamente, es decir por debajo de la relación 1,7 entre las desviaciones verticales y horizontales, obteniéndose igual tolerancia en ambas.

### 2.2.8 Medición del eje de giro del horno rotativo horizontal en plena producción y régimen

Con la aplicación de este método técnico topográfico específico y los instrumentales electro-ópticos -con rayos infrarrojos y láser incorporados-, se determinan los centros geométricos tridimensionales del eje de giro del Horno Rotativo. Es decir se resuelven las coordenadas en el espacio (3D) del eje de giro en cada apoyo, o sea de las secciones transversales del horno en cada soporte, siendo éstas no visibles y no pudiendo determinarlas en forma directa. Posteriormente por cálculo se deducen las **desviaciones horizontales y verticales**. (Ver figura 11)



**Figura 11.** Representación del eje de giro desalineado  
Fuente: Cárdenas (2014)

Las determinaciones topográficas se llevan a cabo sin interrumpir la producción, ni se excede las reglamentaciones de seguridad. Previamente se buscan y “descubren o liberan” de la suciedad o costra, los ejes que se hayan utilizado en el montaje del horno, es decir marcas, rayas o puntos grabados en los bastidores o bases de las estaciones, ya sean longitudinal (eje horno) y transversal (de cada par de rodillos). Se busca algún punto fijo altimétrico que se haya utilizado antiguamente en el montaje del horno o que se vinculen actualmente en fábrica, a veces monumentados.

Se materializan marcas o señales de referencias -cruces con trazos finos horizontales y verticales-, o reflectantes, en lugares estratégicos, que perduren y sean estables en el tiempo. Los mismos deben estar ubicados a cortas distancias ( $< 35\text{m}$ ) entre sí y del horno. Además en la trayectoria de las visuales que se dirijan a ellos, no deben existir obstáculos, vibraciones y diferencias térmicas importantes -por radiación del horno-, que alteren la trayectoria de los rayos. Otra condición es que en cada estación, donde se utiliza un taquímetro electrónico, al ser medidos, deben formar triángulos aproximadamente equiláteros evitando así los ángulos agudos.

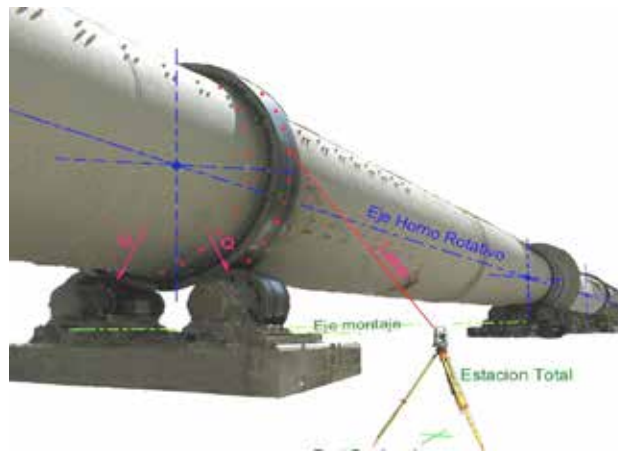
El taquímetro electrónico a utilizar, comprende una Estación Total, con rayo infrarrojo y láser 1/I y 2/II, con una precisión de  $\pm 2\text{ mm} \pm 2\text{mm/km}$  y apreciación de  $3''$ , aumento 30x, con alcance de distancia sin prisma de 500m. Se complementa con un miniprisma, con altura de bastón de 10 cm, para medición de los ejes de montaje. La experiencia con una Leica TCR403 Ultra es muy positiva.

Se realiza una nivelación geométrica compuesta, de los puntos de referencia con un nivel óptico. En lo posible de 32x aumentos y precisión en nivelación compuesta  $p/\text{km} \pm 0,7\text{mm}$ . Se utiliza para ello un mira parlante milimetrada -lo ideal sería un mira invar-, perfectamente verticalizada. Se lee al milímetro, aunque la altimetría requerida es de una vacilación de  $\pm 2,5\text{ mm}$ . La experiencia con un Wild-Leica NAK2 es positiva.

Los puntos de referencias pasan a materializar una “red básica de apoyo planialtimétrica ad-hoc”, tal que con el Estación Total Electrónica, en cada estación, se aplicará el método de estación libre, es decir se le asigna coordenadas x, y, z,

referidas al eje de montaje y altimetría de fábrica. De este modo no se materializan los puntos en cada estación, dado que con posiciones estratégicas, se elegirán las más convenientes para medir el horno. Las observaciones de cada referencia se reiteran al menos tres veces, desde distintas posiciones, se le van asignando coordenadas x e y promediadas, eliminando aquellas que tengan una dispersión de  $> \pm 2\text{mm}$ . El eje Y coincide con el eje de montaje con asignación de un valor tal que no resulten progresivas negativas, o sea el origen puede ser arbitrario o coincidir con el eje de la torre de precalentamiento. El eje X, perpendicular al anterior con su dirección positiva hacia el sentido de giro del horno.

La medición del horno consiste en la observación y medición de varios puntos materializados con el con el rayo Láser de la Estación Total Electrónica (bombardeo), en la superficie exterior del horno, en la llanta de cada aro de rodadura y en dos secciones del casco a ambos lados del mismo, estando éste en rotación. Reiterándose las mismas en el lado opuesto de cada anillo a los efectos de obtener una mayor cantidad de puntos, almacenando las determinaciones en memorias internas para calcular los diámetros y controlar los datos. La estrategia de cada estación libre es: acceder al menos a 3 puntos de referencia en forma radial -con ángulos a  $60^\circ$  preferentemente- y visualizar la mayoría de las partes del horno (aros de rodadura, casco, rodillos) de la mayor cantidad de apoyos. (Ver figuras 12 y 13)



**Figura 12.** Estación Total Electrónica  
 Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)



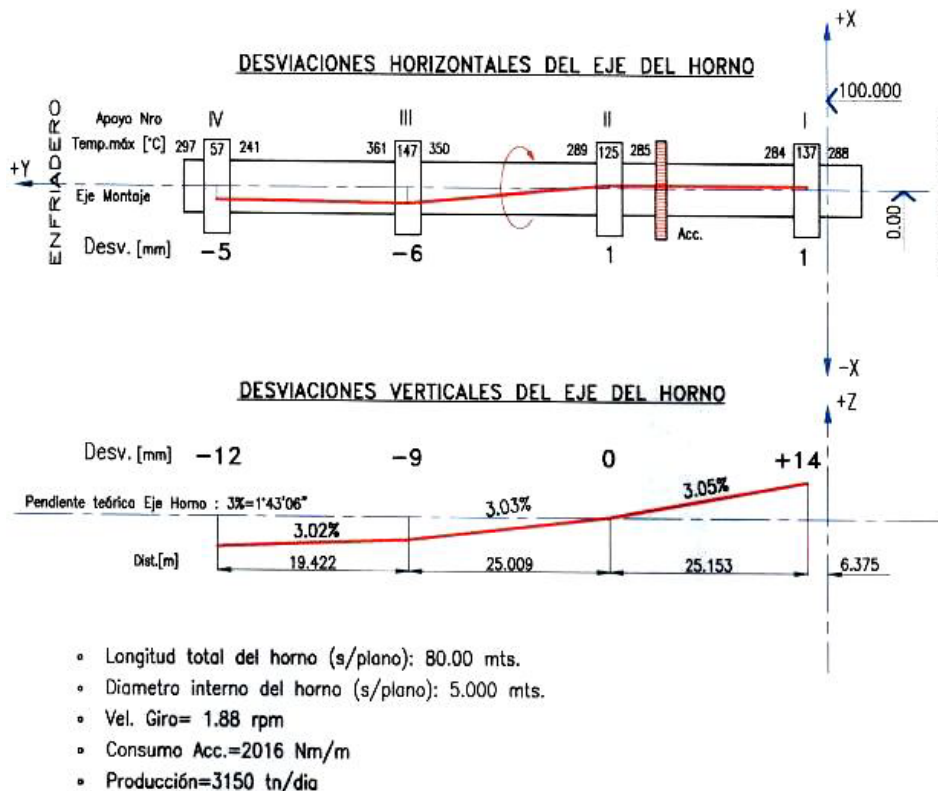
**Figura 13.** Medición de puntos con rayo láser.  
 Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

### **La forma del eje giro del horno**

Con la utilización de un ordenador personal y el software de cálculo específico; las circunferencias se resuelven en un plano abatido, dado que pertenecen a un plano inclinado de cada aro de rodadura. Se toman puntos diametralmente opuestos de a tres y sus circunferencias se promedian. Calculan los centros de circunferencias ( $X_h, Y_h$ ) del casco del horno respecto al plano vertical que contiene al eje de rotación del Horno, las altimetrías ( $Z_h$ ) de los mismos -referidos a un plano horizontal- y sus respectivos radios. Del promedio o media aritmética de éstos resultados, surgen

entonces las coordenadas de los centros ( $X_a, Y_a, Z_a$ ) de los aros de rodadura y los centros ( $X_c, Y_c, Z_c$ ) de las dos secciones del casco. Comparando, los valores  $X_h$  con la coordenada  $X$  del plano vertical  $YZ$  -que contiene al eje teórico de rotación del horno- resultan entonces las **desviaciones horizontales  $X_h$  del centro del horno en cada anillo respecto a su eje.**

A cada valor de  $Z_h$  (altimetría del centro del horno en cada anillo en el lugar geométrico  $Y_h$ ) se le suma la mitad de la luz ( $\phi$ ) entre el anillo y las placas de rodadura -fijas a la carcasa del horno- es decir, el medio huelgo, si lo tuviere. Se logra el valor de  $Z_a$ , o sea, la altimetría o cota del centro del anillo en la coordenada  $Y_a$ . Previamente, con la inclinación o pendiente, del eje de rotación, se calculan las altimetrías o cotas teóricas en cada coordenada  $Y_h$ ; por lo que comparando con los  $Z_h$  y se obtienen las **desviaciones verticales  $z$  solicitada.** (Ver gráfico 1)



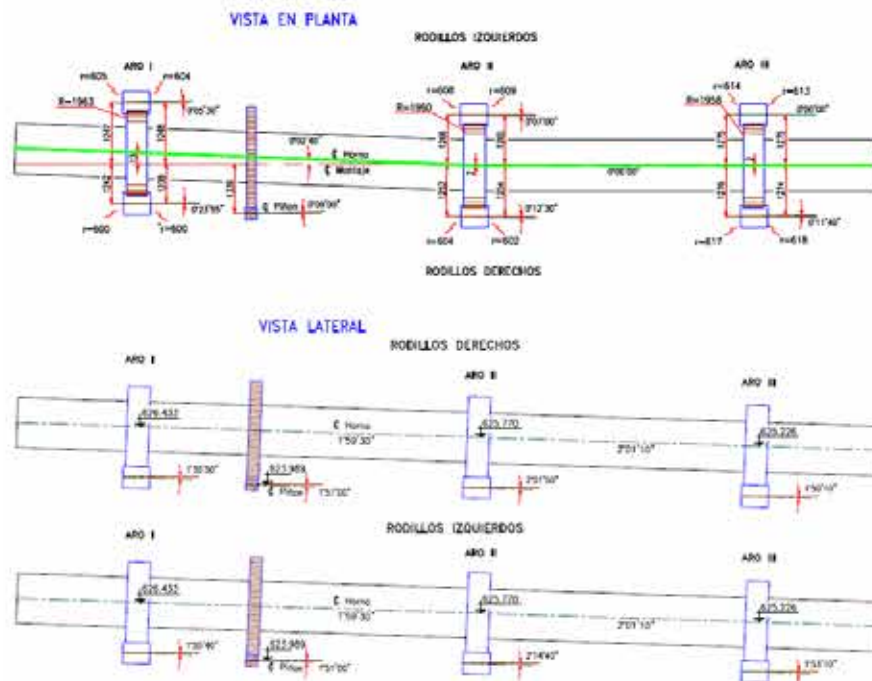
**Gráfico 1.** Planilla y gráficos con las desviaciones en planta y vista

Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

Las vacilaciones en la determinación de las coordenadas de los puntos, son de  $\pm 2,5$  mm y para las coordenadas de los centros de los anillos, promediados es de  $\pm 1,5$  mm en horizontal y  $\pm 2,5$  mm en vertical cumpliendo las expectativas de medición. Para las desviaciones verticales, se hace coincidir el plano de comparación con el apoyo más cercano al accionamiento, dado que se supone ante una eventual corrección de los rodillos, no debe alterar la posición entre el piñón y la corona. El gráfico del eje del horno, en vista, para una mejor ilustración de las desviaciones verticales, se lo representa horizontal, pero en la realidad tiene su inclinación.

#### **2.2.9 Verificación de ejes y radios de los rodillos**

Se trata del mismo método técnico topográfico anterior, asistido por tecnología láser con Estación Total electrónica, que determinan los ejes de giro de los rodillos y radios, durante el proceso producción. Las mediciones se ejecutan en la franja donde apoya la llanta de los anillos, se determinan sus radios y la ubicación de los ejes de giro respecto al eje de montaje del horno como se grafica en las figuras siguientes. Además, de ser accesible, se miden el eje de accionamiento del piñón, a los efectos de sugerir los movimientos horizontales teóricos de los rodillos, para un ajuste horizontal y vertical del eje de giro del horno, de ser necesario. (Ver gráfico 2)



**Gráfico 2.** Ubicación de los ejes de giro y radios de los rodillos respecto al eje de montaje del horno.

Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

### 2.2.10. Distribución de las cargas en los soportes del Horno

Físicamente, el horno rotativo está considerado como una viga continua, elástica y simplemente soportada. Al tener más de dos soportes, se torna estáticamente indeterminada. Esto significa que las reacciones de los soportes (rodillos) dependen, no solo del propio peso y de las cargas, sino también de la rigidez del horno. La característica de rigidez del horno, puede tener consecuencias graves con respecto a la situación mecánica del horno rotatorio.

En la práctica, el eje de giro y óptimo del horno raramente es rectilíneo. Pero, normalmente, **el componente horizontal tiene que ser rectilíneo**. Esto supone el conocimiento de la característica de la rigidez del horno específico y también conocimiento de las condiciones actuales del revestimiento, de la costra, la harina, los componentes y de los accesorios interiores del horno.

La característica de rigidez de un horno se formula en términos matemáticos en: cómo varía en cada rodillo el cambio porcentual de carga, por milímetro de cambio

del eje del horno. O sea, da una idea de la sensibilidad del horno por variaciones en la configuración de su eje.

Debe conocerse la carga real total del tubo en condición de proceso a pleno régimen. Las características de rigidez, determinan la carga teórica para cada base y con las determinaciones de las coordenadas del eje real del horno, se obtiene la carga real soportada por cada rodillo. Con la utilización de un ordenador personal y el software de cálculo específico; se procesan las desviaciones verticales y horizontales del eje de rotación del horno y los estados de carga.

Con el conocimiento espacial del eje de giro del horno, la rigidez del mismo y las diferentes cargas en el horno, se concluye las cargas presentes en cada soporte (rodillo). Estas cargas individuales en cada rodillo deben ser comparadas con las capacidades nominales de los mismos.

Realizado el control de alineación del eje de giro del horno en caliente con sus conclusiones, en el plano de planta y elevación, donde se pueden observar los desplazamientos con su formas de “banana”, “joroba” o “arcos”, es necesario realizar a priori los ajustes de los rodillos de soportes a los fines de disminuir la desalineación.

Para una **simulación de corrección**, se ensayan distintas alternativas de los desplazamientos de los centros geométricos del horno, en los apoyos afectados, tal que resulte geoméricamente una recta, fundamentalmente en el sentido horizontal y sin quiebres verticales. Para los movimientos verticales se desplazan los rodillos horizontalmente tal que se “cierran” o “abren”, según corresponda. Para los movimientos horizontales se desplazan ambos rodillos la misma magnitud. O también se combinan los mismos -verticales y horizontales- de acuerdo a la corrección planteada. Repitiendo los cálculos resultará una distribución de cargas más equilibrada en todos los rodillos del Horno.

Según las necesidades del momento, con el horno rotativo en plena producción y en equilibrio térmico global, se realizan los corrimientos horizontales de los rodillos, pero en largos períodos de marcha y verificando la reacción y estabilidad del mismo.

En el caso que se deba corregir verticalmente hacia arriba, o sea “cerrar” ambos rodillos, se deberá realizar una parada del horno y con el auxilio de criques hidráulicos (gatos), se levanta el anillo de rodadura y corrigen los rodillos.

Por lo general las plantas industriales requieren que se logre una óptima alineación geométrica del eje de giro, tal que los centros estén contenidos en un cilindro longitudinal, con una sección de 3 mm de diámetro y sus generatrices contengan a los centros de los apoyos. Las cargas de las estaciones serán prácticamente distribuidas uniformemente sobre los rodillos de rodadura y las flexiones no sean importantes en cada anillo de rodadura en la zona de los rodillos.

### **Medición del desplazamiento relativo de llantas vs. Coraza y holgura. (Oburg)**

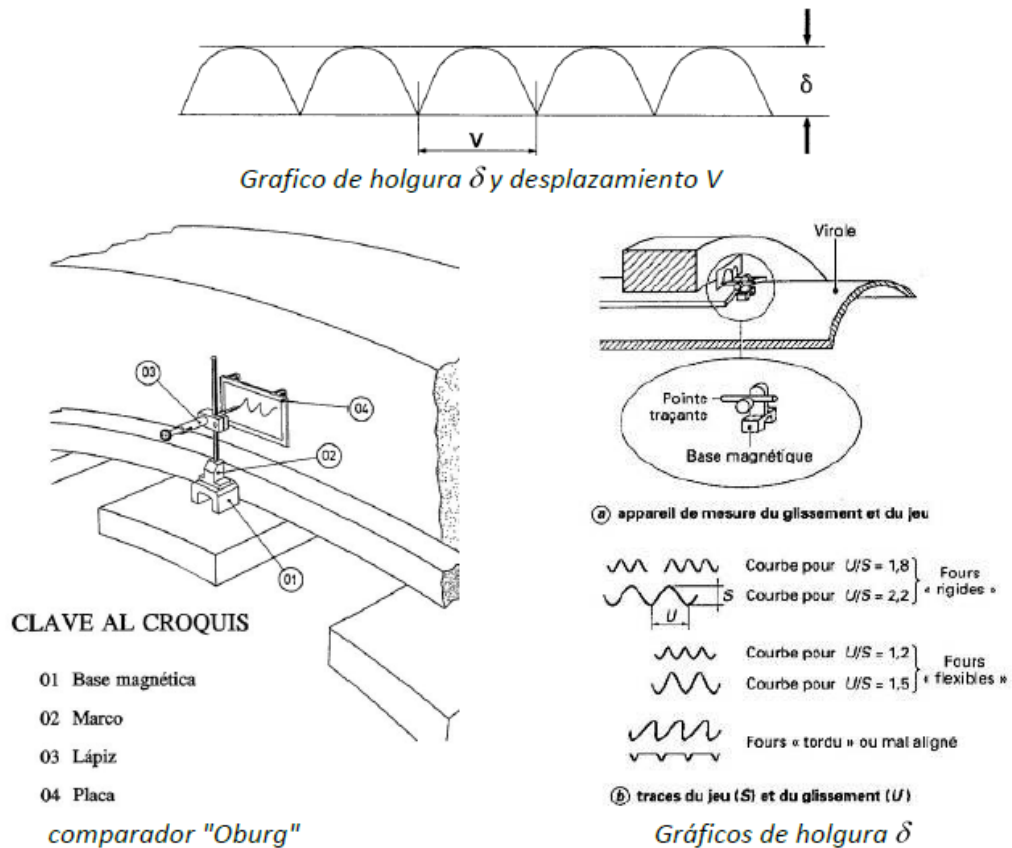
rodadura, genera un movimiento relativo:  $V$

Como regla general los fabricantes toman \_\_\_\_\_ es decir:

Debido a que la ovalidad es una función del espacio entre la llanta y las placas de rodadura fijas a la carcasa, siendo muy difícil de medirlo en funcionamiento, se utiliza la determinación del desplazamiento "V" de la llanta sobre las placas de la carcasa. Para ello hay dos maneras:

a) Utilizando un registrador del desplazamiento “V” y del espacio libre “ ” (huelgo u holgura) en la posición superior, con un \_\_\_\_\_ como se observa en la figura.

b) Registrando la diferencia de desplazamiento de un punto del anillo respecto a las placas de rodadura, después de n revoluciones, se mide la distancia de avance  $d = nV$  (Ver gráfico 3)



**Gráfico 3.** Gráfico de holgura y desplazamiento

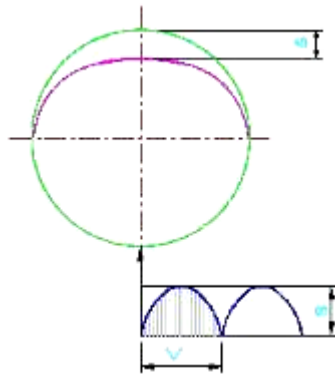
Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

En los anillos de rodadura flojos, el diámetro interior de los mismos es siempre algo mayor que el diámetro exterior de la carcasa del horno (por encima de las zapatas de los anillos de rodadura). Este juego de anillo de rodadura constituye un factor importante, ya que es un **indicador de la deformación de la carcasa, cuanto mayor sea el juego, mayor será también el aplastamiento de la carcasa.**

El juego real del anillo de rodadura (holgura u huelgo), según se observa en la figura representa el intersticio realmente existente entre la carcasa del horno y el anillo de rodadura, siendo por regla general mayor que el juego teórico del anillo de rodadura.

$$\delta \cong \frac{V}{(1,5 \text{ a } 2,5)} > Sth$$

Los valores son reales y se los obtiene con el Oburg. **Sth** es una dimensión puramente ficticia, ya que para definirla se ha tomado como base la sección transversal del horno sin deformación. Al medir las tres secciones (del aro de rodadura y del casco a ambos lados de cada aro de rodadura), y calcular las coordenadas de cada centro, se comparan los resultados de cada apoyo, es decir la diferencia de altura del centro del aro de rodadura con el centro del horno y el medio medido. (Ver figura 14)



**Figura 14.** Deformación de carcasa  
Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

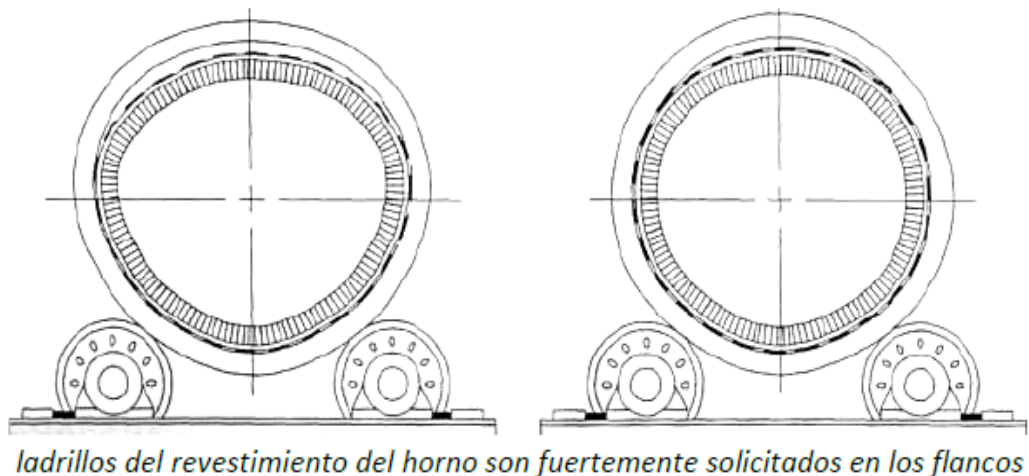
### 3 Medición de deformación de coraza -ovalidad

El objetivo es medir las deformaciones radiales, especialmente en la zona de los anillos de rodadura, que se producen durante la producción. El horno giratorio presenta ciertas deformaciones, es decir, que la carcasa del horno va adoptando diversos radios de curvatura durante una vuelta completa. Las deformaciones pueden ser subdivididas en:

a) Deformaciones de los anillos de rodadura en la zona de los rodillos de soporte, procedentes de las dos fuerzas de reacción.

b) Deformaciones de la carcasa del horno, o aplastamiento en el punto más alto, a causa del juego entre la carcasa y el anillo de rodadura.

Estas deformaciones son transmitidas al revestimiento del horno e influyen por tanto de manera esencial sobre su duración. Debido a la variación constante del radio de curvatura de la coraza, durante el giro del horno, se produce un proceso de deformación. Por esta razón, los ladrillos del revestimiento del horno son fuertemente solicitados en los flancos, pudiendo ser la consecuencia de ello un desgaste elevado (limadura) o bien la caída de los ladrillos. (Ver figura 15)



**Figura 15.** Ladrillos del revestimiento del horno

Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

Con el fin de impedir estas dificultades, es imprescindible conocer la **magnitud de estas deformaciones**, registrándolas con el objeto de poder adoptar a tiempo las medidas necesarias.

La **ovalidad** del horno giratorio se entiende que es la dimensión o el grado de la deformación elástica. Si se tiene en cuenta que la carcasa circular del horno adopta la forma de una elipse al deformarse, la

- expresión Rosenblad-, es decir la diferencia de los

diámetros horizontal y vertical

DEFINICIÓN DE OVALIDAD SEGÚN  
ROSENBLAD:

$$\omega = 2(a - b)$$

La ovalidad relativa se expresa en por ciento

$$wr = 100 (\text{diám. Vertical} - \text{diám. Horizontal}) / \text{diam. Nominal} \%$$

Se origina en el juego entre el anillo de rodadura muy rígido y el tubo del horno muy flexible. Solamente la rigidez del anillo asegura la forma casi circular del horno. A título de ejemplo los hornos de marca F.L. Smidth son diseñados con una  $r=0,3\%$ , aproximadamente, lo que corresponde un desplazamiento  $V=10\text{mm}$ .

Con el objeto de tener en cuenta las dilataciones térmicas variables de la carcasa del horno y del anillo de rodadura durante el período de calentamiento, los suministradores de los hornos calculan ambos diámetros de manera que el juego entre el anillo de rodadura y el horno, a la temperatura de servicio, adopte un valor mínimo. Resultaría ideal que el horno, en estado caliente, ejerza cierta presión sobre el anillo de rodadura, pero sin quedar sujeto a una contracción. Existe siempre un peligro para el horno cuando la carcasa del horno se dilata con una rapidez que no puede ser seguida por el anillo de rodadura.

Naturalmente una medición de ovalidad del horno permite controlar consecuencias en el casco y su revestimiento. En las paradas planificadas es posible reemplazar las placas (o tacos o zapatas) de rodadura, controlar y/o reparar posibles grietas o fisuras causadas por la excesiva flexión y sobrecarga del casco.

Con el fin de impedir un desgaste excesivo de revestimiento de horno o bien la caída de los ladrillos de revestimiento, la ovalidad no debe sobrepasar ciertos límites en estado de producción. En base a la experiencia que existe, se fija una relación entre la ovalidad admisible y el diámetro de horno, bajo buenas condiciones de revestimiento. Por ej.: un horno de 4,35 m, el límite es de 0,37 %.

Cuando no se sobrepase el valor límite de la ovalidad, que corresponda al diámetro del horno, será insignificante la sollicitación del revestimiento como consecuencia de la deformación de la carcasa del horno.

### 2.2.11 Medición

Las deformaciones radiales de la carcasa del horno se las registran mediante el **aparato de medición de deformaciones de hornos "Shelltest"**. (Ver figura 16)



**Figura 16.** Aparato de medición de deformaciones de hornos "Shelltest"  
Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

El aparato "Shelltest" consta de una estructura rectangular con dos porta imanes, el impresor, un disco pendular donde se dibuja del diagrama y una punta palpadora. Los movimientos de la punta palpadora, se transmiten a través de una cremallera y una rueda dentada al portamina inscriptor, el cual dibuja las desviaciones sobre el diagrama a escala 1:15.

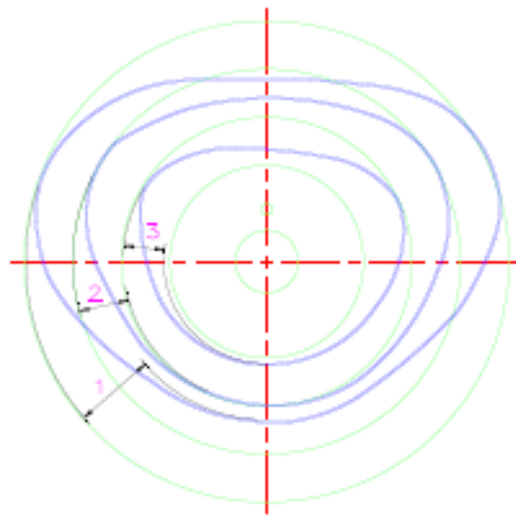
A los fines de tener una clara idea sobre las dimensiones de las deformaciones, las mediciones de cada plano de medida, se realizan en tres puntos, en líneas de la carcasa desplazadas en  $120^\circ$  obteniendo tres diagramas por plano. Las deformaciones del horno giratorio se reducen a medida que aumenta la distancia del anillo de

rodadura. El diagrama Shelltest, como representación polar de las variaciones de altura de los segmentos h, representa una imagen geoméricamente semejante a la de la sección transversal deformada del horno (línea elástica), con la única diferencia de que las variaciones radiales son registradas con un aumento de 15 veces, como se observa en la figura. La evaluación por cálculo, es decir el cálculo de la ovalidad a partir del diagrama Shelltest, se la efectúa sobre la base de las siguientes relaciones:

$$\text{Ovalidad absoluta } \omega_a = 4 \cdot d^2 \cdot \frac{\delta}{3} \text{ [mm]}$$

$$\text{Ovalidad relativa } \omega_r = 4 \cdot d^2 \cdot \frac{\delta}{3 \cdot dN} \cdot 100 \text{ [%]}$$

$\delta = \Delta h / 15$  (mm) medida en el diagrama Shelltest.  
 $\Delta h$  es 1, 2 y 3



**Figura 17.** Diagrama "Shelltest"

Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

Diagrama Shelltest

d = Diámetro exterior de la carcasa del horno (m).

dN = Diámetro interior de la carcasa del horno (mm)

(RR): Número de anillo o Apoyo o Base.

(MP): Número de plano de medida.

dn: Diámetro nominal del horno (mm)

XE: Distancia desde el anillo a la línea de centro lado entrada

XA: Distancia desde el anillo a la línea de centro lado salida.

t: Espesor de la carcasa en el plano de medición (mm)

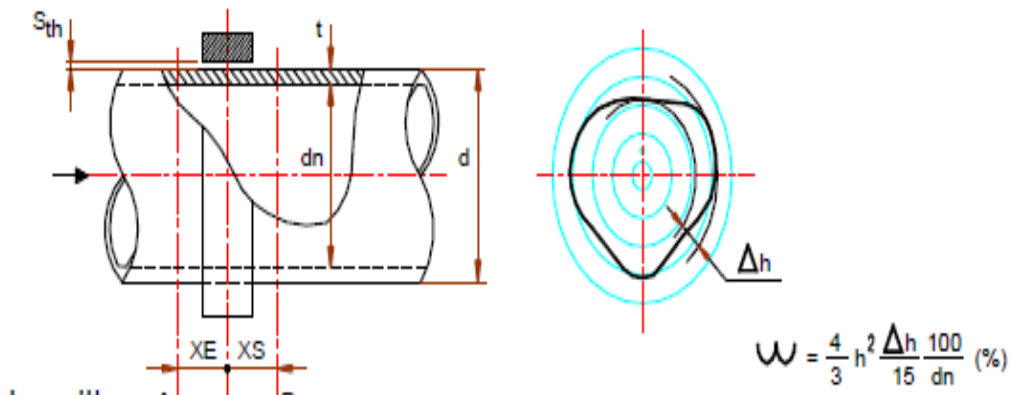
d: Diámetro exterior (m) ( $dn + 2.t$ ).

SL: posición del registrador SHELLTEST (colocado radialmente cada 120°).

□r: ovalidad relativa (%)

□m: ovalidad promedio (%)

ST: Temperatura del casco, en los tres puntos de la medición (°C)



**Figura 18.** Diagrama "Shelltest"  
Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

Las mediciones de las deformaciones se las representa en una figura 19 de resultados y gráficamente en forma resumida:

TABLA DE RESULTADOS														
RR	MP	dn [mm]	XE [m]	XS [m]	t [mm]	d [m]	SL	Δh [mm]	δ [mm]	ωr [%]	ωm [%]	ST [°C]	Δu [mm]	Sth [mm]
1	A	4000	1,00		50	4,100	1	12	0,8	0,43	0,35	229	12,8	4,1
							2	10	0,6	0,35		211		
							3	7	0,5	0,26		227		
	B	4000		2,00	37	4,074	1	5	0,3	0,18	0,19	269		
							2	5	0,3	0,18		253		
							3	6	0,4	0,21		275		
2	C	4000	1,50		37	4,074	1	18	1,2	0,66	0,66	306	34,5	11,0
							2	19	1,3	0,70		217		
							3	17	1,1	0,63		283		
	D	4000		1,50	37	4,074	1	12	0,8	0,44	0,54	205		
							2	16	1,1	0,59		204		
							3	16	1,1	0,59		230		
3	E	4000	1,50		37	4,074	1	9	0,6	0,31	0,31	321	28,6	9,1
							2	9	0,6	0,33		326		
							3	8	0,5	0,30		334		
	F	4000		1,50	37	4,074	1	9	0,6	0,31	0,31	215		
							2	9	0,6	0,33		204		
							3	8	0,5	0,28		207		

BASE	DIAGRAMA	% DE OVALIDAD (ωr)			OVALIDAD PROM. (ωm)	LIMITE OVALIDAD
		1	2	3		
B1	A	0,43	0,35	0,26	0,35	0,34
	B	0,18	0,18	0,21	0,19	
B2	C	0,66	0,70	0,63	0,66	
	D	0,44	0,59	0,59	0,54	
B3	E	0,31	0,33	0,30	0,31	
	F	0,31	0,33	0,28	0,31	

Figura 19 Tabla de Resultados  
Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

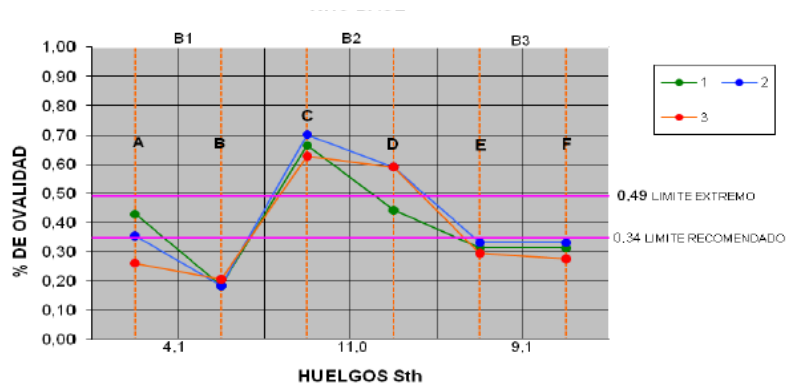
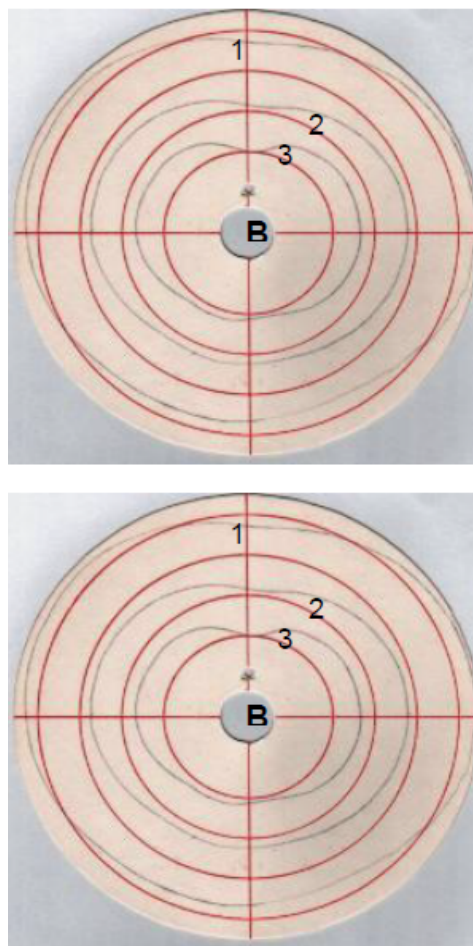


Figura 20. Mediciones de deformaciones  
Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

Si las líneas de unión se cruzan entre sí indican que se ha torcido el eje del horno. En un horno que se comporte de manera ideal, se encontrarían superpuestos los tres valores de la ovalidad medidos en un plano. Sin embargo, estos valores se desvían más o menos entre sí en la práctica, ya que en la cubierta del horno se encuentran puntos más o menos débiles. Ejemplo de diagramas. Misma base lado alimentación y lado salida. (ver figura 21 5)



**Figura 21.** Curva de distorsión

Fuente: Google Chrome, internet-imágenes (2020)

El gráfico indica que la curva de distorsión es elíptica, con ovalidad y aplanamiento de la carcasa del horno en el punto superior, debido el juego entre la

carcasa y el anillo de rodadura. Existe una muy leve deformación del anillo de rodadura en el área del rodillo portador.

Para finalizar, las teorías, estudios y los conceptos antes descritos respaldan la investigación, puesto que afirman que: con toda la información y contenido inherente al tema en cuestión, se podrá conocer con claridad lo ocurrido en los refractarios debido a los efectos de ovalidad y movimiento relativo en los hornos rotativos de cemento, lo cual permitirá el cumplimiento de la vida útil del refractario.

### **2.3 Definición de términos básicos**

Según Arias, F. (2012) esta parte de la investigación “consiste en dar el significado preciso y según el contexto a los conceptos principales, expresiones o variables involucrados en el problema y en los objetivos formulados” (p. 108). Esto de acuerdo a Tamayo y Tamayo M. (2012) con la finalidad de que “...las personas que lleguen a una investigación determinada conozcan perfectamente el significado con el cual se va a utilizar el término o concepto a través de toda la investigación”. (p. 150)

**Calcinación:** proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. El proceso, que suele llevarse a cabo en largos hornos cilíndricos, tiene a menudo el efecto de volver frágiles las sustancias. Diccionario Enciclopédico Vox 1 (2009)

**Medición topográfica:** acción de determinar la proporción entre la dimensión o suceso de un objeto y una determinada unidad de medida. La dimensión del objeto y la unidad deben ser de la misma magnitud. Una parte importante de la medición es la estimación de error o análisis de errores. Almagro Gorbea A. y López Hernández G. (s/f)

**Movimiento relativo:** es el que se asume en un cuerpo que se desplaza dentro de un sistema de referencia. Ortega, Manuel R. (2006).

**Ovalidad:** defecto de redondez de la sección de un tubo. Es la relación entre la diferencia entre el diámetro mayor y el menor y el diámetro nominal. Resnick, R. & Halliday, D. (2004)

**Oxidación térmica:** reacción química en la que en determinadas condiciones de temperatura y tiempo de residencia, determinados compuestos hidrocarbonados reaccionan con el oxígeno para producir CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (v) y una cantidad de calor (Q) que dependerá de la concentración de los compuestos, así como de su naturaleza y poder calorífico específico. Fernández E. (2007)

**Refractario:** propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse. No hay una frontera clara entre los materiales refractarios y los que no lo son, pero una de las características habituales que se pide a un material para considerarlo como tal, es que pueda soportar temperaturas de más de 1600 °C sin ablandarse. Pérez Porto J. y Gardey A. (2014).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

La metodología representa los métodos y procedimientos empleados para llevar a cabo la investigación, Según Balestrini M. (2011), es “la forma cómo se realizará el estudio para responder al problema planteado” (p. 31). En este capítulo se estructura la metodología para desarrollar el tema seleccionado a objeto de ser sometido al análisis investigativo, además constituye el tipo de investigación, las técnicas y procedimientos que fueron utilizados para llevar a cabo la presente investigación.

#### **3.1 Tipo de investigación**

El tipo de investigación es documental, la cual es definida en el Manual de Trabajos de Grado, Especialización, Maestría y Tesis Doctorales de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL 2016), como el “...estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo principalmente en trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónico” (p. 20).

Básicamente, este tipo de investigación se fundamenta en el estudio que se realiza a partir de la revisión de diferentes fuentes bibliográficas documentales (literatura sobre el tema de investigación) tales como: libros, revistas, informes, entre otros, que contenga resultados de estudios previos por lo cual se destaca, que esta investigación debe reflejar la originalidad del estudio, sus enfoques, criterios, conceptos, reflexiones, conclusiones y recomendaciones, por ello, la contribución de los investigadores radica en los análisis la y selección de la información más relevante para la investigación.

### **3.2 Tipo de estudio**

De acuerdo al objetivo general planteado: analizar el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios de los hornos rotativos de cemento, el presente estudio es descriptivo. Según Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2010), “se caracteriza por la delimitación de los hechos que conforman el problema de la investigación para observar, describir, identificar e interpretar, y especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis” (p. 28).

### **3.3 Diseño de investigación**

El diseño de la presente investigación es de carácter bibliográfico. En tal sentido, Arias (2012), define el diseño bibliográfico como:

El fundamento de la revisión sistemática, rigurosa y profunda del material documental de cualquier clase. Se procura el análisis de los fenómenos o el establecimiento de la relación entre dos o más variables. Cuando se opta por este tipo de estudio, el investigador utiliza documentos, los recolecta, analiza y presenta resultados coherentes (p. 87).

En relación a lo expresado por el autor, se infiere que el diseño bibliográfico no es más que la recopilación por parte del investigador de material documental de distintas clases, para el fortalecimiento profundo de la bibliografía que sustenta el objeto de estudio.

### **3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas de recolección de datos, según Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2010), “son las distintas formas o maneras de obtener la información” (p. 145). Son ejemplos de técnicas documentales la observación documental, análisis documental, las cuales permiten indagar, interpretar, presentar datos e informaciones sobre un tema determinado de cualquier ciencia, utilizando para ello, una metódica de análisis, teniendo como finalidad obtener resultados que pudiesen ser base para el desarrollo de la creación científica.

### 3.4.1 Técnicas

Las técnicas a utilizar en la presente investigación son:

**Observación documental:** para Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (ob.cit.), “es una técnica que permite la recopilación de información para enunciar las teorías que sustentan el estudio de los fenómenos y procesos” (p. 246), incluye el uso de instrumentos definidos según la fuente documental a que hace referencia.

**Análisis documental:** de acuerdo con Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (ob.cit.), se basa en la “realización de un arqueo de documentos para acopiar la información que, según criterio inicial establecido pudiera servir para el desarrollo de la investigación y en consecuencia para el logro de los objetivos planteados” (p. 247).

**Paráfrasis:** según Arias F. (2012), “consiste en reproducir la idea de un autor expresándola con otras palabras” (p. 54). En este trabajo la paráfrasis se utilizó para contrastar y comparar las ideas del autor citado con respecto a las opiniones interpretativas del investigador.

Otra técnica utilizada fue el **fichaje:** según Arias F. (ob. cit), “es una técnica empleada por el investigador, para recolectar y almacenar información” (p. 56), es decir, para tomar nota de libros o medios impresos y digitales sobre aspectos importantes relacionados con el análisis del efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios de los hornos rotativos de cemento.

Igualmente se utilizó la técnica del **Subrayado:** para Arias F. (2012) “es identificar las ideas fundamentales de un texto, es el primer paso para poder crear resúmenes y esquemas que más adelante permiten entender y memorizar el tema en cuestión” (p. 56). Para este trabajo de investigación se tomó en consideración los siguientes pasos para aplicar el subrayado:

- Subrayar los libros adquiridos por el investigador..
- Subrayar ideas, hechos y conceptos planteados por autores para tener una mayor comprensión de las ideas primarias y secundarias

### 3.4.2 Instrumentos

Los instrumentos son los medios materiales que permiten recabar información sobre el tema de investigación y almacenarlos. Destacando, que Sabino, C. (2011), expone que “un instrumento de recolección de datos es en principio cualquier recurso de que pueda valerse el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información” (p. 79). Enfatizando que se encuentra como instrumento de recolección de datos en este trabajo documental la revisión bibliográfica así como la citas y ficha, debido a que forman parte integral de toda investigación.

Por otro lado, los instrumentos de recolección de información para una investigación documental, según Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2010), “son los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información” (p.249).Ejemplo: citas o fuentes de información, fichas.

**Citas:** conformado por libros, artículos, revistas, tesis, blogs, publicaciones periódicas, entre otros de interés para registrar la información en torno al análisis sobre el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios de los hornos rotativos de cemento.

**Fichas:** una parte muy importante de la investigación documental lo constituyen los diferentes tipos de fichas, las variantes están en función del tipo de material y de la fuente de la que se extrae la información. Es de ahí donde se toma su información. Entre las fichas más comunes se encuentran: ficha bibliográfica (libros), ficha hemerográficas (artículo de revista, periódico), ficha de información electrónica (información extraída de los medios electrónicos).

No obstante, es importante señalar que a medida que se vayan consultando los libros o cualquier otra fuente para dar fundamento a la investigación, Arias (2012), recomienda “ir haciendo el registro de los datos correspondientes de la teorías consultadas” (p. 59).

### 3.5 Técnicas de análisis de datos

Las técnicas de análisis de datos son herramientas útiles para organizar, describir y analizar los datos recogidos con los instrumentos de investigación. El análisis de datos encierra dos procedimientos: La organización de los datos y la descripción y análisis de los datos. En atención a ello, Arias (ob.cit) indica que “En este punto se describen las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos que se obtengan: clasificación, registro, tabulación y codificación si fuere el caso.” (p. 111). En este punto se describen las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos que se obtengan: sistematización de información, es decir, mediante el resumen simple y el resumen analítico.

**Resumen simple:** para Arias (ob.cit), es una “técnica de expresión modificativa mediante la cual presenta en forma articulada y condensada el orden de ideas esenciales expresadas en un escrito” (p. 61).

**Análisis de contenido:** que según Arias (ob. cit), es “tendiente a captar el orden lógico-ideológico de los conceptos emitidos en un escrito” (p. 63).

### 3.6. Fases metodológicas.

**Fase I: Diagnóstica.** En esta fase se realizó la descripción del problema, relacionado al análisis sobre el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios de los hornos rotativos de cemento. Esta fase incluye la formulación del problema de la cual se redactan los objetivos específicos, además contiene la justificación de la investigación.

**Fase II. Documental.** Representó el desarrollo teórico de cada objetivo específico reflejado dentro de las bases teóricas, toda la fundamentación teórica apoyada en la consulta de documentos (libros, revistas, periódicos, memorias, anuarios, registros, códigos, etc.).

**Fase III. Metodológica.** Aquí se expuso el tipo de investigación, diseño y técnicas e instrumentos de recolección de datos, en otras palabras, los métodos,

técnicas y procedimientos que se aplicaron para el logro de los objetivos que orientan la realización del estudio.

**Fase IV.** Se elaboran las conclusiones y recomendaciones propias de la investigación.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Determinar el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios de los hornos de cemento

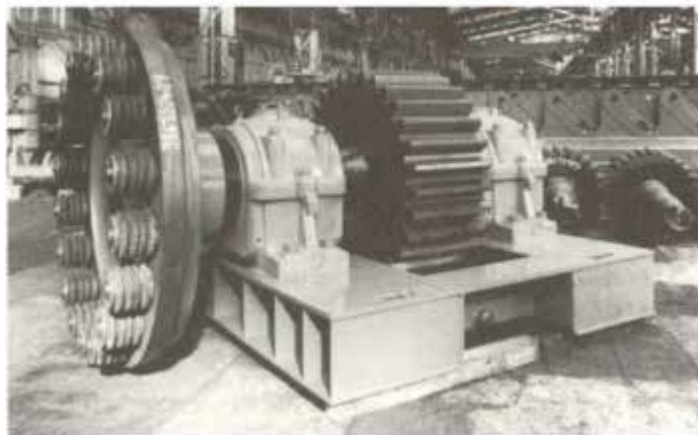
En primer lugar se hará una breve descripción de lo que es un horno rotatorio, el cual consiste en un tubo cilíndrico apoyado sobre estaciones de rodadura (2, 3, ,8), que tiene una pendiente del orden del 3.5 % con respecto a la horizontal y que gira a velocidades de rotación comprendidas entre 1.8 y 3.5 rev/minuto (rpm). La puesta en rotación del horno puede asegurarse de dos maneras:

Horno de tres apoyos y más: por medio de uno o dos grupos de accionamiento en los que un piñón ataca una corona dentada fijada sobre la virola.

Horno de dos apoyos: bien por medio de un grupo de accionamiento en los que un piñón ataca una corona dentada fijada sobre la virola o bien directamente por medio de uno o dos rodillos de una estación de rodadura, ellos mismos accionados por dos o cuatro motores electrohidráulicos o electromecánicos. (ver figura 22 y 23)



**Figura 22** Conjunto de accionamiento de un horno rotatorio  
Fuente Nicolini(2014)



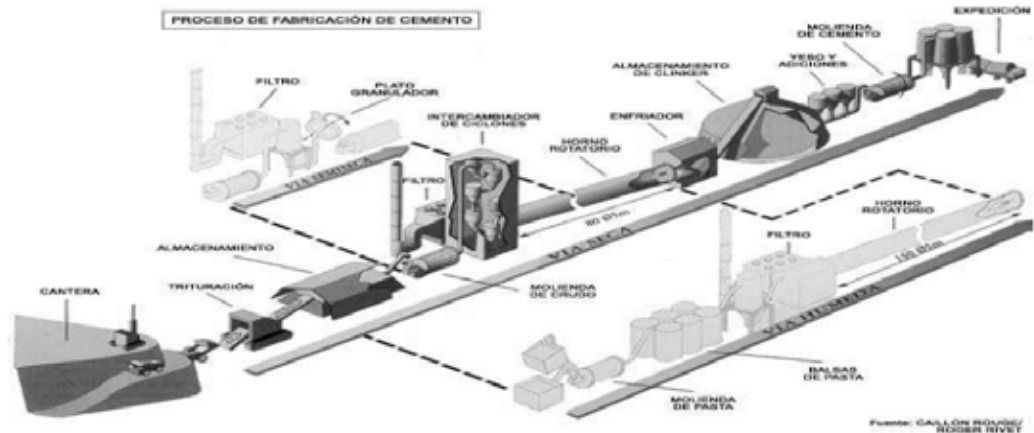
**Figura 23** Piñón de accionamiento de un horno y su montaje  
Fuente Nicolini(2014)

#### **4.1.1 Proceso de obtención del cemento**

La presente investigación tomó como base la empresa CEMENTOS ARGOS, (ver anexo A) la cual es líder del mercado de cemento y concreto en Colombia, tiene presencia en EU, Centroamérica y el Caribe. La cede en estudio está ubicada en Comayagua, Honduras.

Para la fabricación de cemento se comienza con la obtención y mezcla de las materias prima necesarias, que son calizas, arcillas y otros materiales que se obtienen fundamentalmente de las canteras. Estas materias primas se mezclan y muelen en proporciones controladas hasta lograr un polvo fino denominado crudo, la cual se seca aprovechando el aire caliente que sale de los hornos. Luego esta masa se homogeneiza y almacena en silos, para posteriormente atravesar una batería de ciclones (torre de intercambio), en donde la corriente de aire procedente del horno hace que se caliente. Cuando entra al horno lo hace casi a 1000°C, alcanzando 1500°C en la entrada del mismo, encontrando una llama de 2000°C en el quemador principal. Esta temperatura hace que la mezcla se transforme en un material artificial llamado Clinker. Este se deposita en una parrilla y se enfría mediante una corriente de aire frío. Parte del aire que sobra se vuelve a usar en el proceso, y el que no se puede

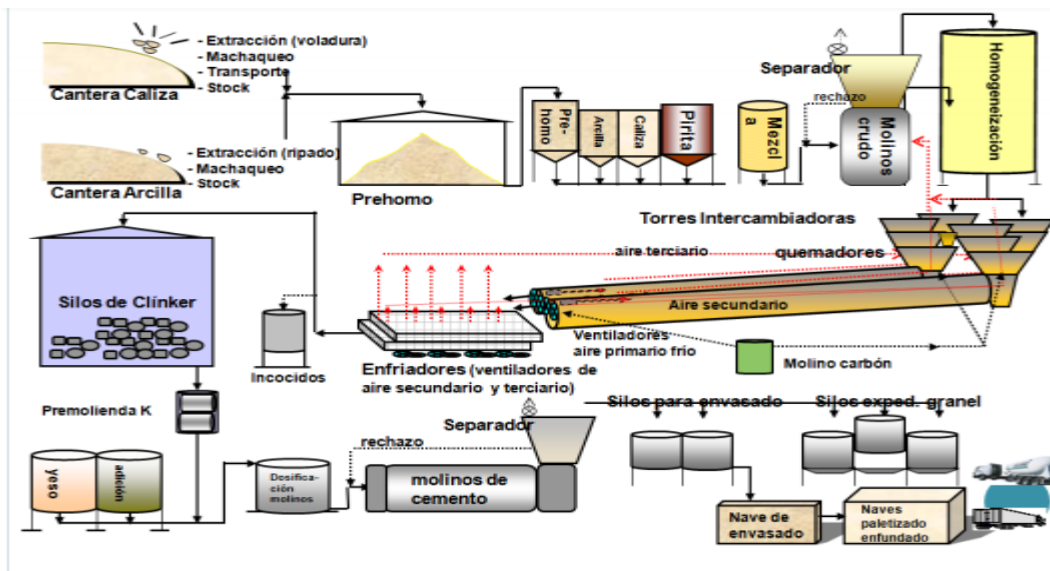
aprovechar se filtra antes de ser expulsado a la atmósfera. En las figuras 24 a la 27 se muestran los procesos.



**Figura 24** Proceso de fabricación del cemento

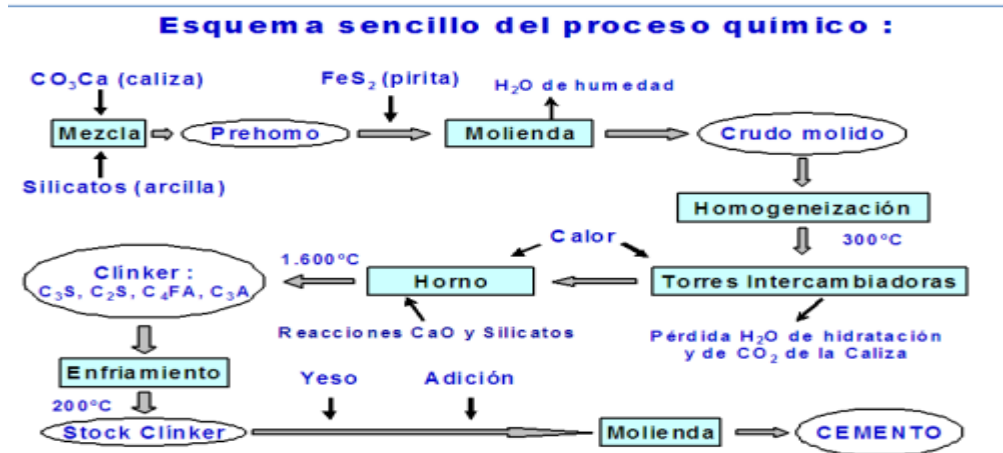
Fuente López (2015)

La figura 24 muestra el área del Clinker la cual se establece entre la salida del silo de almacenamiento y la salida del enfriador. En la figura se observa una torre de cuatro ciclones, un precalentador, el horno rotativo y el enfriador.



**Figura 25** Diagrama del proceso paso a paso

Fuente López (2015)



**Figura 26. Proceso químico obtención del cemento**  
Fuente López Lola(2015)



**Figura 27 Área del Clinker**  
Fuente López (2015)

### 4.1.2 El Horno

La longitud de los hornos depende de la capacidad de la planta para obtener materia prima, normalmente miden entre 60 a 80m, y se mueven a velocidades de ente 3 a 4 rpm, tienen una inclinación entre 3° y 4°, lo cual favorece el avance del material.(ver figura 28)



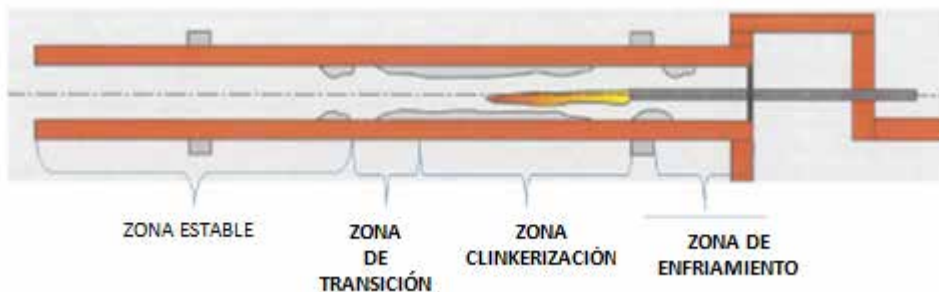
Figura 28 Horno rotativo  
Fuente Nicolini (2015)

La transmisión entre el accionamiento y el tubo del horno se realiza mediante el engranaje entre los piñones de ataque y la corona. El tubo cilíndrico se llama virola. Se puede observar en la figura que reposa sobre unos apoyos formado por aros y rodillos, separados de manera de repartir el peso del horno (ver figura 29)



Figura 29 Rodillos de soporte

El interior del horno está recubierto por material refractario que supone un buen aislamiento para reducir las pérdidas del calor y una buena protección para evitar deformaciones o perforaciones. Se encuentra dividido en cuatro zonas, las cuales se muestran en la figura 30, como son, zona estable, desde la boca del horno, también llamada culata, aquí termina de descarboxarse el crudo y comienza la fase líquida; la zona de transición, o de seguridad se alcanzan temperaturas de 1300 a 1500 °C, comienzan las reacciones de transformación que dan lugar al Clinker. Como se puede observar todas estas zonas están cubiertas de refractarios, los cuales están sometidos a varios esfuerzos térmicos y químicos. Luego está la zona clinkerización, donde se pueden alcanzar temperaturas hasta de 2000°C, finalmente el material empieza a caer a la zona de enfriamiento.



**Figura 30** Zonas del horno

Fuente Curitiba (2019)

El horno de cemento está sometido a diversas cargas que tienen su origen en:

**Cargas mecánicas puestas en obra o aplicadas.**

- Uniformemente repartida: peso propio de la virola, peso del material refractario y peso del material.
- Concentradas: peso de la corona, peso sobre los extremos horno (junto, satélite) y fuerza y par de accionamiento.
- Evolutivas: encostramiento, anillos

**Cargas térmicas.**

- Variación de la temperatura a lo largo de la longitud del horno.
- Distribución de temperatura no homogénea en las secciones transversales del horno

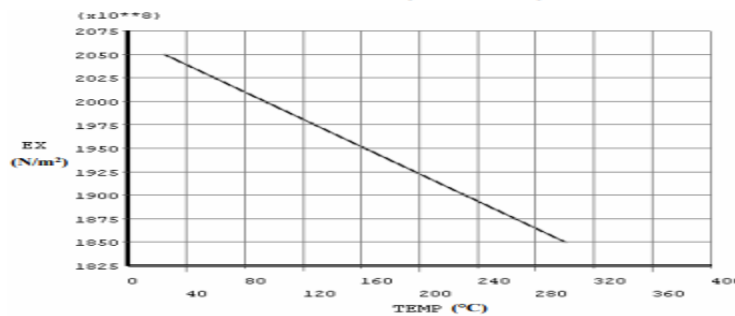
Para construir el horno y escoger los refractarios se deben tener en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales del horno. Para la carcasa se utiliza un acero estructural A-36. A continuación las figuras de la 31 a la 34 muestran sus propiedades y como varían con la temperatura.

**Algunas propiedades del acero A-36**

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7800
Relación de Poisson	0.3

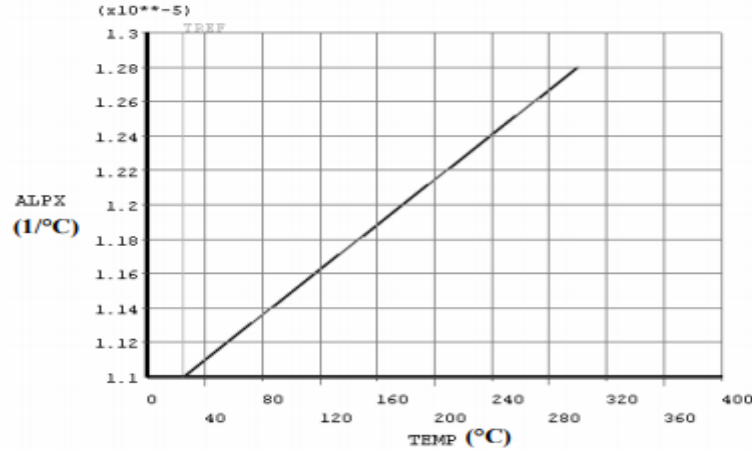
**Figura 31 Propiedades del acero A-36**

**. Módulo de elasticidad versus temperatura para el acero A-36**



**Figura 32 Módulo de elasticidad Acero A-36**

**Coefficiente de expansión térmica versus temperatura para el acero A-36.**



**Figura 33 Coeficiente de expansión Acero A-36**

Composición química (% ≤), para placas de acero, ancho > 380 mm (15 pulg.)							
Acero	C	Si	Mn	P	S	Cu	Espesor (d), mm (pulg.)
ASTM A36	0.25	0.40	Sin requisitos	0.03	0.03	0.20	d ≤ 20 (0.75)
	0.25	0.40	0.80-1.20	0.03	0.03	0.20	20 < d ≤ 40 (0.75 < d ≤ 1.5)
	0.26	0.15-0.40	0.80-1.20	0.03	0.03	0.20	40 < d ≤ 65 (1.5 < d ≤ 2.5)
	0.27	0.15-0.40	0.85-1.20	0.03	0.03	0.20	65 < d ≤ 100 (2.5 < d ≤ 4)
	0.29	0.15-0.40	0.85-1.20	0.03	0.03	0.20	> 100 (4)

**Figura 34 Ficha técnica del acero A-36**

**Análisis térmico dentro del horno**

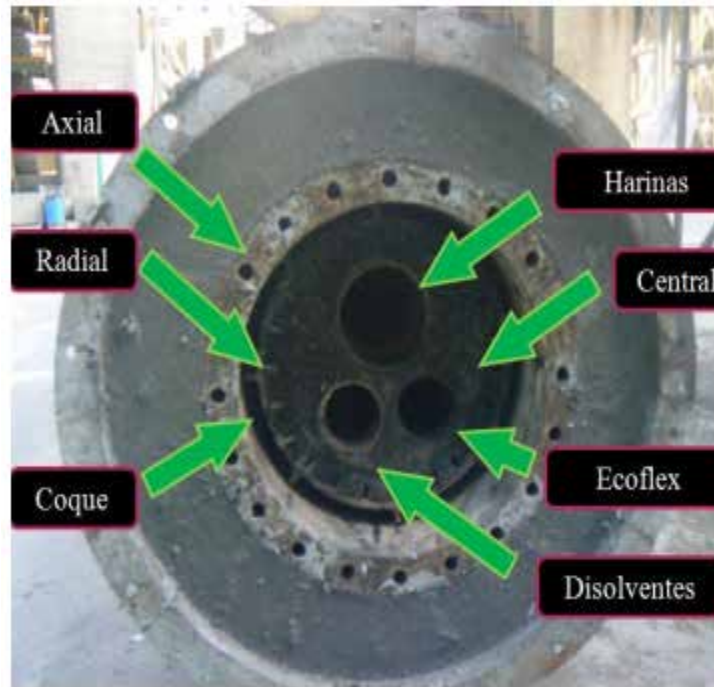
El proceso para fabricar el cemento requiere una cantidad determinada de energía para alcanzar la temperatura y presión de disociación de la materia prima. Las reacciones químicas y físicas que se dan en el interior del horno rotatorio son

endotérmicas, su funcionamiento requiere un importante aporte calórico. Dicho aporte es suministrado generalmente por un proceso de combustión. La energía térmica total que entra al sistema producto del flujo másico y el poder calorífico del combustible, está expuesta a tres fenómenos de transferencia de calor:

- **Conducción.** Se transfiere energía calórica entre el equipo y el material en proceso a través de las paredes del ladrillo refractario.
- **Convección.** Se transfiere calor entre los gases de combustión y la caliza.
- **Radiación.** Se presenta un intercambio energético entre: los gases y la caliza, entre los gases y las paredes del refractario, y entre el material y la superficie refractaria. La chapa metálica del horno transfiere calor al medio ambiente por convección y radiación

#### **4.1.3 La llama**

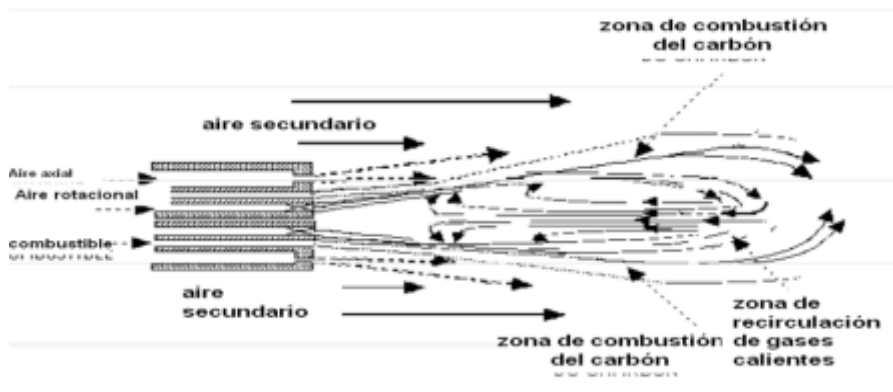
Es importante resaltar que **al** final del horno se encuentra un mechero industrial que genera una llama. Los combustibles utilizados son el coque, harinas , disolventes y ecoflex. Este último es una combinación muy compleja de compuestos orgánicos de elevado peso molecular que contiene una proporción alta de hidrocarburos con un alto número de carbonos, y una elevada relación entre carbono e hidrógeno. La figura 35 muestra la disposición de las tuberías de los diferentes combustibles y aires encargados de la combustión en el mechero.



**Figura 35** Mechero industrial

Fuente Curitiba, 2019

El oxígeno necesario para una correcta combustión lo aportan tres aires: El aire primario que se divide en axial y radial. El aire de transporte que se encarga del envío de combustible y el aire secundario que es el aire proveniente del enfriador. (ver figura 36)



**Figura 36** Aires de la combustión

Fuente Curitiba, 2019

### **Medición de la ovalidad en un horno de cemento**

La ovalidad es una medición de que tan bien una coraza de horno puede soportar el refractario. El recubrimiento de tabique refractario en un horno rotativo depende del principio del arco continuo para permanecer en su lugar. No es raro entonces que el refractario se caiga literalmente en un corto tiempo después de la instalación, si existe una excesiva flexión de la coraza del horno. También se puede decir que la ovalidad mide la deformación elástica del horno. La figura 37 muestra algunas deformaciones tanto en la carcasa como en los rodillos debido al roce por la ovalidad



**Figura 37 Ovalidad en la carcasa del horno**

Fuente Curitiba, 2019

### **4.2 Definir los valores de esfuerzos internos en los refractarios de hornos de cemento**

Se define como material refractario a toda materia (cerámica o no) capaz de resistir elevadas temperaturas, erosión, abrasión, impacto, ataque químico y acción de gases corrosivos durante un periodo determinado, sin presentar deterioro de sus propiedades físicas o químicas.(Nicolini 2014).

Los aspectos fundamentales de utilización y la relación con la carga son;  
**Para cargas térmica;** refractariedad, dilatación, variación, lineal permanente y resistencia a cambios de temperatura

**Para cargas mecánicas;** resistencia a la compresión, resistencias a la flexión, resistencia al desgaste, porosidad y densidad

**Para carga química:** permeabilidad al gas, resistencia a escorias

**Para cargas térmica y mecánicas:** refractariedad bajo carga en caliente, y resistencias a la flexión en caliente

Conocer las principales características y esfuerzos de los materiales refractarios, a utilizar en los hornos rotativos de cemento, resulta imprescindible para lograr un buen trabajo de la misma; planificar, prever el comportamiento del refractario proporciona un factor de control de grandes posibilidades para asegurar y mejorar rendimientos. Así mismo, la dilatación del horno se tiene que tomar en cuenta al momento de construir el revestimiento refractario, también afecta la disposición de los aros de rodadura. Entre las características más importantes se tienen:

**Resistencia mecánica en frío.**

Aunque este valor normalmente expresado como resistencia a la compresión en  $\text{kg/cm}^2$ , no puede asumirse para prever su exacto comportamiento en condiciones de operación, resulta de gran utilidad, como un punto de partida para asumir en forma aproximada el mismo y además como factor de control de calidad que podría resultar indicativo de variaciones en las condiciones de fabricación, que provocarían cambios en su trabajo.

Se exige  $350 - 500 \text{ Kg/cm}^2$  para ladrillos de alta alúmina (ácidos)

$500 - 700 \text{ Kg/cm}^2$  para ladrillos de dolomita o magnesita (básicos)

**Poder refractario.**

En la zona de clinkerización se emplea el cono seger N° 36. La estabilidad frente a la carga térmica bajo presión, se mide por la temperatura a la que el material refractario comience a reblandecerse bajo una presión de  $2 \text{ Kg/cm}^2$ . El refractario debe adoptar unos  $150^\circ\text{C}$  por encima de la temperatura de clinkerización.

**Dilatación térmica**

La alta temperatura que soporta la cara interior del ladrillo, en la zona crítica produce esfuerzos que provocan el “spalling” o desconchamiento de la cara superior; la resistencia del ladrillo al “spalling” se controla e incluso se halla normalizada (ASTM C-122). Durante el diseño del colocado debe preverse la dilatación radial y longitudinal del ladrillo

#### **Resistencia química.**

La agresividad del material, los gases o cenizas del combustible que se presentan en condiciones muy variadas, es por ello que el refractario en cada zona debe presentar la suficiente inercia química, o resistencia a ser atacado por las condiciones existentes. La presencia de fase líquida favorece la acción agresiva de carácter químico, por lo cual este aspecto requiere especial atención en las zonas calientes del horno.

#### **Conductividad térmica.**

silicoaluminosos a 20°C, es 1Kcal/(m h °C) y a 1000oC 1,3Kcal/(m h °C). En este caso de los ladrillos de magnesita y dolomita sucede, al contrario. La chapa del horno  
l/(m h °C).

#### **Resistencia a la abrasión.**

Considerando los ladrillos silicoaluminosos, la resistencia a la abrasión disminuirá con el incremento del porcentaje de alúmina y aumentará su resistencia a mayores temperaturas.

#### **Porosidad y permeabilidad.**

El tamaño, forma y cantidad de poros en los materiales refractarios revisten gran importancia en sus características; con menor porosidad o mayor compacidad, se logra mayor resistencia al ataque químico y a la abrasión, así como más altas resistencias a compresión.

### **4.3 Señalar la vida útil de los refractarios**

Entre la función del revestimiento refractario del horno rotativo, está la de evitar que la llama a alta temperatura o el flujo de aire dañen directamente el cuerpo del horno, proteja el cilindro del horno; evitar que sustancias nocivas (CO, SO<sub>2</sub>) erosionen el horno; evitar que el material y el flujo de aire erosionen el horno; reduce la temperatura del horno y evitar que el horno sea erosión oxidativa; además tiene la función de almacenamiento de calor y preservación del calor; Puede mejorar el rendimiento de la piel del horno colgante

#### **4.3.1 Factores que afectan la vida útil de los refractarios**

Es importante señalar la composición de los materiales refractarios, los cuales están basados en seis óxidos, los cuales son: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mg O, ZrO<sub>2</sub> y Ca O. También están constituidos por metales como Molibdeno (Mo) y Wolframio (W) todos estos se pueden combinar con carbono y carburo de boro, silicio y nitruros.

Después de una gran cantidad de estudios experimentales sobre los materiales refractarios las principales causas de daños son: la tensión mecánica representa el 37%, debido a la deformación del cilindro y la expansión térmica del ladrillo; la erosión química representó el 36%, debido a la erosión del silicato de clínker y la sal alcalina; El estrés térmico representó el 27% debido al sobrecalentamiento y el choque térmico

Sin embargo a continuación se presentan otras causas mezcladas con las anteriores que afectan la vida útil de los refractarios. Los efectos combinados de la tensión mecánica, la fricción del material, la tensión térmica, el flujo de aire y la erosión química del revestimiento refractario del horno rotatorio bajo rotación a largo plazo, a menudo conducen a los siguientes problemas:

El bloque de elevación está sujeto al efecto de excentricidad de la gravedad de rotación mecánica para mucho tiempo. El efecto de alta temperatura y la fricción de impacto de la piedra hacen que el bloque prefabricado se retuerza, el material refractario se separa, el grosor se reduce y el ladrillo refractario relleno entre los bloques de elevación se deforma y se cae;

La pérdida de fusión de la capa sinterizada calcinada a alta temperatura;

La gran diferencia de temperatura en el cuerpo del horno. El flujo de aire hace que el polvo se sinterice a alta temperatura para unirse a la superficie del material refractario. Cuando el cuerpo del horno gira, la separación de la gravedad hace que el material refractario se despegue parcialmente, el revestimiento de ladrillo se adelgaza, la temperatura **del cuerpo del horno** aumenta, y la estructura de acero cambia en diversos grados, y el horno se baja.

#### **Expansión térmica exprimiendo ladrillos refractarios**

Cuando la temperatura del horno aumenta en cierta medida, la expansión térmica generará presión en la dirección axial del horno, haciendo que los ladrillos refractarios adyacentes se aprieten entre sí. Cuando la presión es mayor que la resistencia del ladrillo refractario, la superficie del ladrillo refractario se despegará.

#### **Estrés de la placa de hierro**

En el extremo caliente del ladrillo refractario, el óxido de magnesio en la placa de chapa de hierro y el ladrillo de magnesia reacciona a alta temperatura para formar un compuesto de hierro y magnesio, que aumenta el volumen y extruye el ladrillo refractario, causando una fractura horizontal. En respuesta a esta situación, la chapa de ladrillo refractaria se debe reemplazar o reemplazar con barro de fuego.

#### **Dislocación sesgada de área grande de ladrillo refractario**

Debido a que la mampostería está demasiado floja, el horno se abre y se cierra con frecuencia, lo que da como resultado la deformación del cilindro del horno, de modo que el cuerpo del cilindro del horno y la superficie fría del ladrillo de revestimiento se mueven relativamente, haciendo que el ladrillo de revestimiento se tuerza y se desalinee, y la superficie del ladrillo puede estallar y caerse

#### **Extrusión de tensión elíptica**

Debido al aumento del espacio libre de la bocina de la rueda del horno rotatorio, el cuerpo del cilindro tiene una gran elipticidad, lo que hace que se apriete el ladrillo refractario. La elipticidad del cilindro debe verificarse regularmente. Si el valor de

elipse excede 1/10 del diámetro del horno, se debe reemplazar la almohadilla o se debe agregar la bocina para ajustar el espacio de la rueda.

#### **Extrusión de tensión de hierro de bloqueo**

Cuando el ladrillo está bloqueado, el hierro en la cerradura está demasiado apretado, lo que dará como resultado la formación de una ranura de ladrillo en la cerradura. Se tomarán las siguientes medidas: en la misma cerradura, el número de planchas en la cerradura no debe exceder 3; la separación del hierro en la cerradura debe ser lo más dispersa posible.

#### **Sobrecalentamiento**

El sobrecalentamiento local de la temperatura del horno hace que el ladrillo refractario se derrita y forme un hoyo. Para evitar esto, el quemador debe ajustarse adecuadamente y debe seleccionarse un material refractario razonable en diferentes lugares.

#### **Fenómeno de choque térmico**

El estrés térmico causado por los cambios bruscos de temperatura causa astillamiento y grietas en la superficie del ladrillo, principalmente debido a la frecuente apertura y cierre de temperaturas extremadamente frías y extremadamente calientes. Se deben establecer operaciones de producción estables y se debe establecer un sistema razonable de horno de calefacción y refrigeración.

#### **Erosión alcalina**

El compuesto de sal alcalina en fase gaseosa penetra en los vacíos del cuerpo de ladrillo para condensarse y solidificarse, y forma una capa de permeación horizontal de la sal alcalina en el cuerpo de ladrillo, y el contenido de sal alcalina en el horno debe reducirse en la producción.

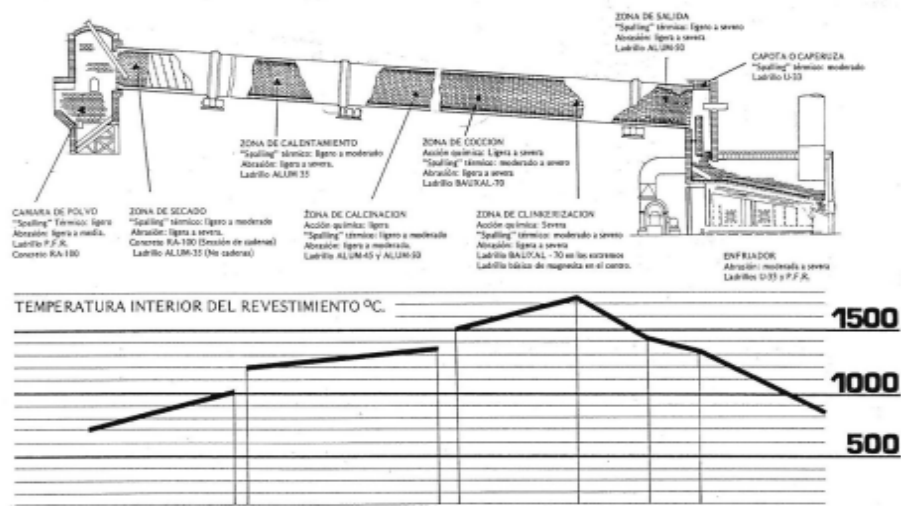
#### **Hidratación**

El Mg O reacciona con el agua para formar Mg (OH) 2, que aumenta de volumen y destruye la estructura general del ladrillo refractario. Dado que los ladrillos refractarios que contienen Mg O y Ca O tienen reacciones de hidratación, es

necesario asegurarse de evitar la humedad, el agua y la lluvia durante el almacenamiento, el transporte y la mampostería de los ladrillos refractarios.

### 4.3.2 Variables que afectan la vida útil del refractario

En la Figura 38 se muestra el tipo de ladrillos refractario sugerido por cada zona térmica de un horno rotatorio horizontal para producción de cemento.



**Figura 38** Distribución térmica y tipo de refractario  
Fuente López (2017)

Se recomienda para la instalación del revestimiento refractario ladrillo de longitud estándar (9 in) en las siguientes referencias

**Referencia: ALUM50**

Zona de precalentamiento y enfriamiento.

Clasificación: NTC-773, ASTM C-27

Composición: Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – 50%

Cono paramétrico equivalente (PCE) =

35 Densidad: 2.16 – 2.26 g/cm<sup>3</sup>

**Referencia: BAUXAL70**

Zona de calcinación

Clasificación: NTC-773, ASTM C-27

Composición: Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – 70%

Cono paramétrico equivalente (PCE) >

37

Densidad: 2.46 – 2.56 g/cm<sup>3</sup>

Algunas de las variables a mencionar son el espesor a usar de refractario a lo largo del horno, así mismo la densidad del mismo (ver figura 39)

Esesor del refractario a lo largo del horno.

Longitud		Espesor	
ft	m	in	m
263	80,1624	9	0,2286
87	26,5176	6	0,1524
100	30,48	4	0,1016

Densidad del refractario a lo largo del horno.

Longitud			Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
ft	in	m	
126	1512	38,4048	2600
112,5	1350	34,29	3000
63	756	19,2024	3300
148,5	1782	45,2628	3000

**Figura 39 Espesor y densidad de refractarios**  
Fuente López (2017)

El calor generado dentro del horno, las velocidades de flujo de los gases son elementos causantes de estrés en los refractarios, sin embargo a continuación se muestran otras variables a tomar en cuenta.

**-Tiempo de permanencia del material:**

Es el tiempo que el material utiliza para pasar por el horno rotatorio, se calcula de la siguiente formula

$$t = \frac{23L}{Di * n * v}$$

siendo:

t = Tiempo de permanencia, minutos.

L= Longitud del horno, metros.

Di = Diámetro interior del horno, metros.

n = Velocidad de rotación del horno por minuto, r.p.m.

%v = Porcentaje de inclinación del horno, %.

- **Calor entregado al horno por las materias primas.**

$$Q = C_p \times m \times T$$

-**Pérdidas de calor por las ventanas de trabajo**

$$Q_{ven} = C_o * \Phi * \left( \left( \frac{T_h}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right) F$$

Donde:

$$C_o = 5,7W/m^2K^4$$

$\Phi$  coeficiente de diafragmentación

-**Calor que se llevan los gases por la chimenea**

$$Q_{gases} = C_p \text{ gases} \times V_g \times T$$

Aplicando un balance de masa en la entrada y salida del horno se tiene una carga de:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7$$

Donde:

Q1 calor entregado al horno utilizando combustible

Q2 calor entregado al horno por las materias primas

Q3 calor que se llevan los gases por la chimenea

Q4 pérdidas a través del refractario

Q5 pérdidas por evacuación del material

Q6 pérdidas indeterminadas

Q7 pérdidas por los orificios de trabajo)

### **4.3.3 Tipos de materiales refractarios para horno rotativos**

**Ladrillos refractarios para hornos:** Se utilizan para revestir hornos industriales, hornos rotatorios para cementeras, estufas, calderas, cámaras de combustión entre otros equipos. También se usan en recipientes de materiales refractarios para fundir

metales. No solo son de uso industrial, muchas personas colocan estufas con ladrillos refractarios o placas refractarias en chimeneas. Entre los tipos se tienen:

**Ladrillos de sílice:** su compuesto es dióxido de silicio  $\text{SiO}_2$ , el cuarzo es el material más usado para la fabricación de estos ladrillos. La temperatura de aguante es de  $1700^\circ\text{C}$

**Ladrillos de chamota:** contiene dióxido de aluminio y de sílice, es el material refractario para horno más utilizado.

**Ladrillos de andalucita:** contienen una gran cantidad de alúmina, por ello se adaptan excelentemente a las variaciones de calor y frío, es una de las mejores opciones para hornos industriales.

**Ladrillos de mullita:** además de mullita contiene un 80% de alúmina, la mullita refractaria se emplea en los hornos para vidrio y de silicato.

**Ladrillos de corindón:** es el ladrillo que tiene más alúmina, es el ladrillo refractario más costoso, ideales para hornos de gran potencia.

**Piedra y manta refractaria para horno industrial:** Las piedras refractarias son comunes en la industria de la comida, principalmente para hornos industriales de hostelería o en los hornos para pan y pizza. Existen piedras refractarias lisas, estriadas, perforadas y de carga. Están hechas de cordierita y mullita, el ancho, largo y sobretodo espesor determinan la máxima temperatura que alcanzan. Las piedras pueden soportar entre los  $1150^\circ\text{C}$  hasta  $1320^\circ\text{C}$ .

En cuanto a las mantas refractarias, las fibras están entrelazadas, el producto final es ligero pero duradero. El calor que soporta es de  $538^\circ\text{C}$  hasta  $1250^\circ\text{C}$ . Una de las ventajas de esta manta es que es capaz de soportar temperaturas continuas de  $1050^\circ\text{C}$ . Además no almacenan calor, son de fácil instalación, resiste el choque térmico y la tensión.

#### **4.3.4 Los refractarios como causa de paradas en los hornos**

Son muchas las causas de parada de los hornos, pero la más frecuentes es por el material refractario, ya que se afecta su vida útil, debido a :

Aspectos químicos: composición de la materia prima y composición del combustible

Aspectos térmicos: choque térmico y carga térmica específica

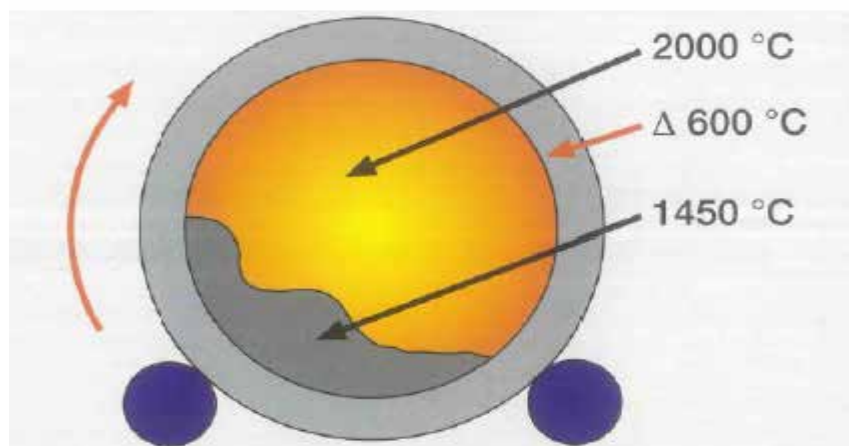
Aspectos mecánicos: Ovalidad y alineación del horno

A continuación se hará una descripción de las partes del horno, y los problemas presentados por los refractarios. (Ver figura 40)



**Figura 40** Zonas de afectación de refractarios  
Fuente Orduz (2012)

En la zona de transición superior, se encuentran costras inestables y un mayor ataque de álcalis, cloruros y sulfuros. Además el material refractario está sometido a un intenso ataque térmico. La diferencia de temperatura puede alcanzar hasta los 600° ya que el material puede estar a unos 1400° y los gases a 2000°c (ver figura 41)



**Figura 41** Zona del horno de ataque térmico  
Fuente Orduz (2012)

En la zona del anillo aparecerá ovalidad, por tanto habrá problemas mecánicos. También en la zona de sinterización, donde están las zonas de seguridad y clinkerización se presentan costras estables e infiltración de la fase líquida dentro de los refractarios. Finalmente, en zona de transición inferior, o zona de enfriamiento, la costra es inestable, pero el choque térmico es grande. Además la abrasión por Clinker es grande,. Todo esto afecta la vida útil de los refractarios.

La virola puede deformarse por el peso de los ladrillos refractarios, la carga del material y por su propio peso. Así la sección transversal se vuelve elíptica y se generan fuerzas de compresión en el refractario.(ver figura 42)

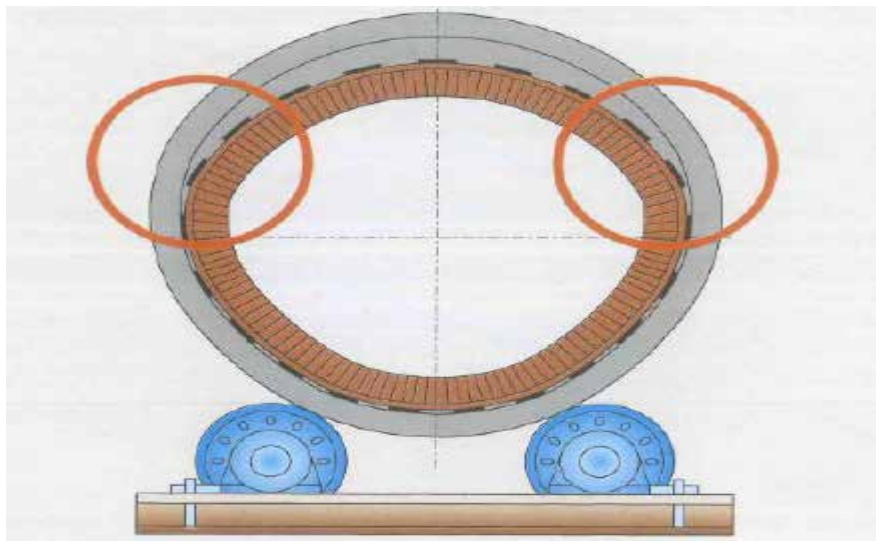


Figura 42 Zona del horno de máxima distorsión  
Fuente Orduz (2012)

#### **4.4 Describir el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento.**

##### **4.4.1 Localización de las medidas**

Para todo los procesos desarrollados en esta objetivo específico se contó con la información suministrada por el grupo RHI Magnesita, que es una compañía austriaca, proveedora de servicios a nivel global para procesos industriales dentro de

los sectores productores de acero, cemento, cal, metales no ferrosos, vidrio, energía y químicos. Sus productos incluyen ladrillos, mezclas de revestimiento e infraestructura de control de flujo. Esta empresa provee a la cementera de los refractarios que utilizan, a su vez Argos contrata a la empresa Fives Pillard para hacer todas las mediciones de la ovalidad a los hornos rotativo. Todos los datos y simulaciones fueron hechos por Fives a través de sus software para simulación, como son Fluent, (CFD Computational Flow Dynamics) y Mathcad.

Para tomar las medidas se utilizó el registrador de posición Shell Test como se indica en los cuadro 1 y 2

**Cuadro 1** Localización de las mediciones



Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

### Cuadro 2 Toma de mediciones

#### TOMAS DURANTE LA MEDICIÓN



El equipo de ovalidad va lo más cercano a la zona de la llanta para determinar el esfuerzo mecánico que se genera durante la rotación y bajo un perfil de temperatura entre virola y llanta.

Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

De acuerdo a la información obtenida, en el cuadro 1, el equipo de medición se coloca lo más aproximado a la llanta, para determinar el esfuerzo mecánico real y poder entregar un diagnóstico mecánico que ayude a mejorar y/o a mantener la condición mecánica del horno dentro del rango permisible de ovalidad, para que el horno rotatorio trabaje dentro de lo normal y con ello alcanzar el máximo porcentaje de utilización o disposición del equipo.

En referencia al cuadro 2, se revisaron dos condiciones que ayuden a estar dentro o fuera del rango permisible, los cuales son: el desplazamiento y el diferencial de temperatura; el equipo de ovalidad va lo más cercano a la zona de la llanta para determinar el esfuerzo mecánico que se genera durante la rotación y bajo un perfil de temperatura entre virola y llanta. De manera que, estos dos parámetros son importantes para tener una buena condición mecánica y para determinar las acciones de mantenimiento mecánico al horno.

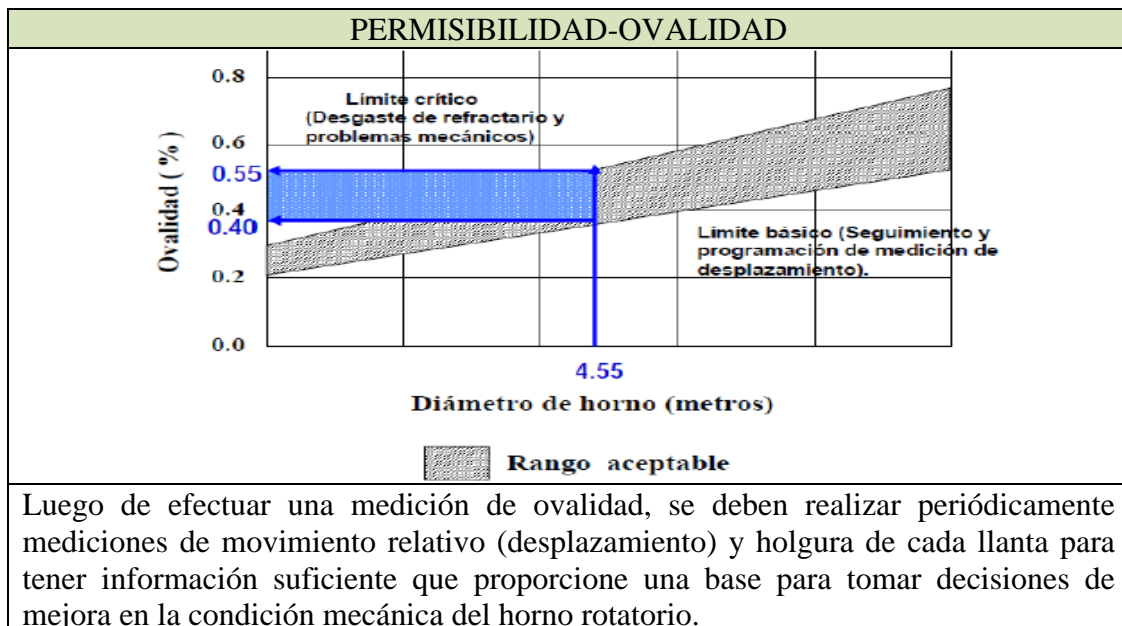
Asimismo, la duración del revestimiento refractario se encuentra influenciada sustancialmente por la condición mecánica del horno, es decir por la distorsión

producida. Por lo tanto, se encontró una correlación directa entre la ovalidad y la vida del refractario.

#### 4.4.2 Medida de ovalidad

En atención a la información registrada, cuadro 3, se pone de manifiesto que los desplazamientos proporcionan información rápida para monitorear la condición mecánica y operativa del horno rotatorio con lo cual se toman decisiones para mejorar y mantener una condición normal de operación de la unidad de calcinación. También que existe una relación directamente proporcional que dice que a mayor desplazamiento, la ovalidad será mayor y por lo tanto los esfuerzos mecánicos que se generen en la llanta también serán mayores. De ahí, la importancia de tener información de este parámetro para determinar la condición mecánica del horno(ver cuadro 3)

**Cuadro 3** Medida de ovalidad



Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

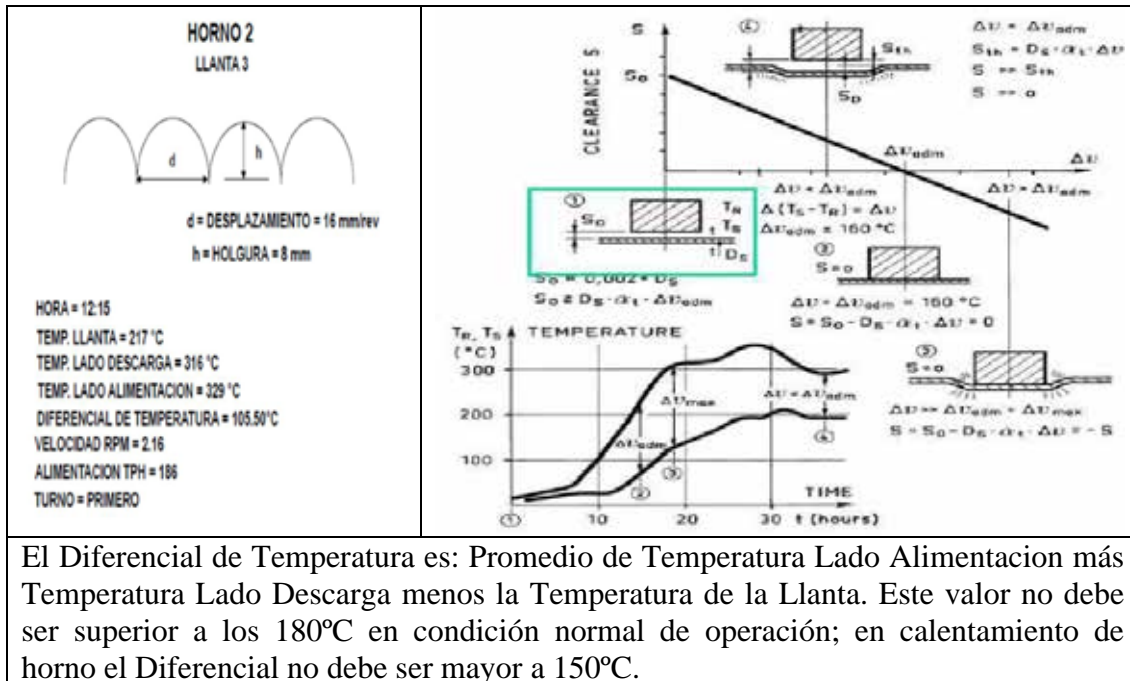
Es por ello que, Phillips Kiln Service (PKS- especialistas en servicios de reparación y mantenimiento mecánico para todas las marcas y modelos de hornos rotativos, secadores, molinos, calcinadores, enfriadores y equipos similares), recomienda un rango permisible de desplazamiento con lo cual se establece que mecánicamente la llanta no forzaré al motor principal del horno, cuando estos valores se localizan fuera del rango, el motor principal demandará mayor consumo de energía para girar el horno. Por lo tanto, el amperaje del motor aumentará. En este sentido los rangos permisibles son los siguientes: Límite máximo: 25 mm/revolución y Limite mínima: 10 mm/revolución.

#### 4.4.3 Medida de desplazamiento y holgura

En base a las informaciones recogidas sobre el Claro mínimo (holgura), es importante calcular el Delta admisible de temperatura  $S_{to}$ , desde temperatura ambiente hasta condiciones normales de operación. La condición de temperatura ambiente  $S_{to}$  (ver cuadro 4)

**Cuadro 4** Medición del desplazamiento





Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

Además mientras se mantenga un diferencial de temperatura por debajo de los 160°C se asegurará un desplazamiento entre 10 y 25 mm/rev y un perfil de temperatura optimo en la zona de la llanta. De manera que, la virola recibe temperatura por transferencia de calor del ladrillo refractario y a su vez cede este calor a la llanta este diferencial de temperatura entre virola y llanta determina el desplazamiento, pero se requiere tiempo y transferencia de temperatura.

#### 4.4.4 Movimiento relativo

De acuerdo a lo registrado, a medida que el desplazamiento aumenta, la holgura entre silletas y llanta también se incrementa y mecánicamente la parte de los 180° del horno comienza a perder su redondez, mecánicamente el ladrillo comienza a trabajar bajo tensiones y compresiones que llegan a superar su propiedad elástica y el ladrillo se desgasta por desprendimiento de un sector de su espesor original (descabezamiento).(ver cuadro 5)

### Cuadro 5 Movimiento relativo

DEMASIADA HOLGURA-MAYOR OVAVIDAD	CORRECCIÓN CON LAINAS
	
<p>El movimiento relativo determina el desplazamiento en milímetros que tiene la llanta y la coraza; la holgura establece la separación o distancia que existe entre la llanta y las silletas. Entre mayor sea el desplazamiento mayor será la holgura y por lo tanto, los valores de ovalidad aumentarán así como los esfuerzos mecánicos en la zona de la llanta.</p>	

Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

De manera que, el ladrillo del sector de los 180° se abre entre piezas por la falta de redondez y en los costados de los 90° y 270° así como en los 0° el ladrillo refractario se comprime provocando la fractura parcial del ladrillo. En este sentido, el desgaste es únicamente por la conformación que sufre la virola por un aumento considerable en el desplazamiento y holgura.

También es importante destacar que, generalmente cuando la holgura excede los límites permisibles es necesario corregir con láminas de ajuste para modificar la conformación de la virola y para evitar que el ladrillo se abra en la parte superior y se comprima en sus costados generando descabezamiento o craqueo en su cara caliente. Por lo tanto entre mayor sea la holgura la sección de los 180° del horno perderá su redondez.

Ahora bien, para la reducción de la holgura del anillo de rodadura se debe una vez por día, registrar el movimiento relativo (U) durante el periodo de una semana(ver figura 40)

$$U = \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \hline 32 & 27 & 32 & 30 & 27 & 28 & 27 \end{array}$$

**Figura 40**

De manera que el movimiento más pequeño que se produzca dentro de ese periodo de tiempo se deberá usar para determinar el juego medio (Sth) del anillo de rodadura:  $U = \text{Desplazamiento mínimo/rev.}$  **27.00 mm**

Además, e, espesor de las placas se determina por este juego teórico del anillo de rodadura:  $Sth = U/3.1416 = \text{Espesor de placa teórico}$  **8.59 mm**

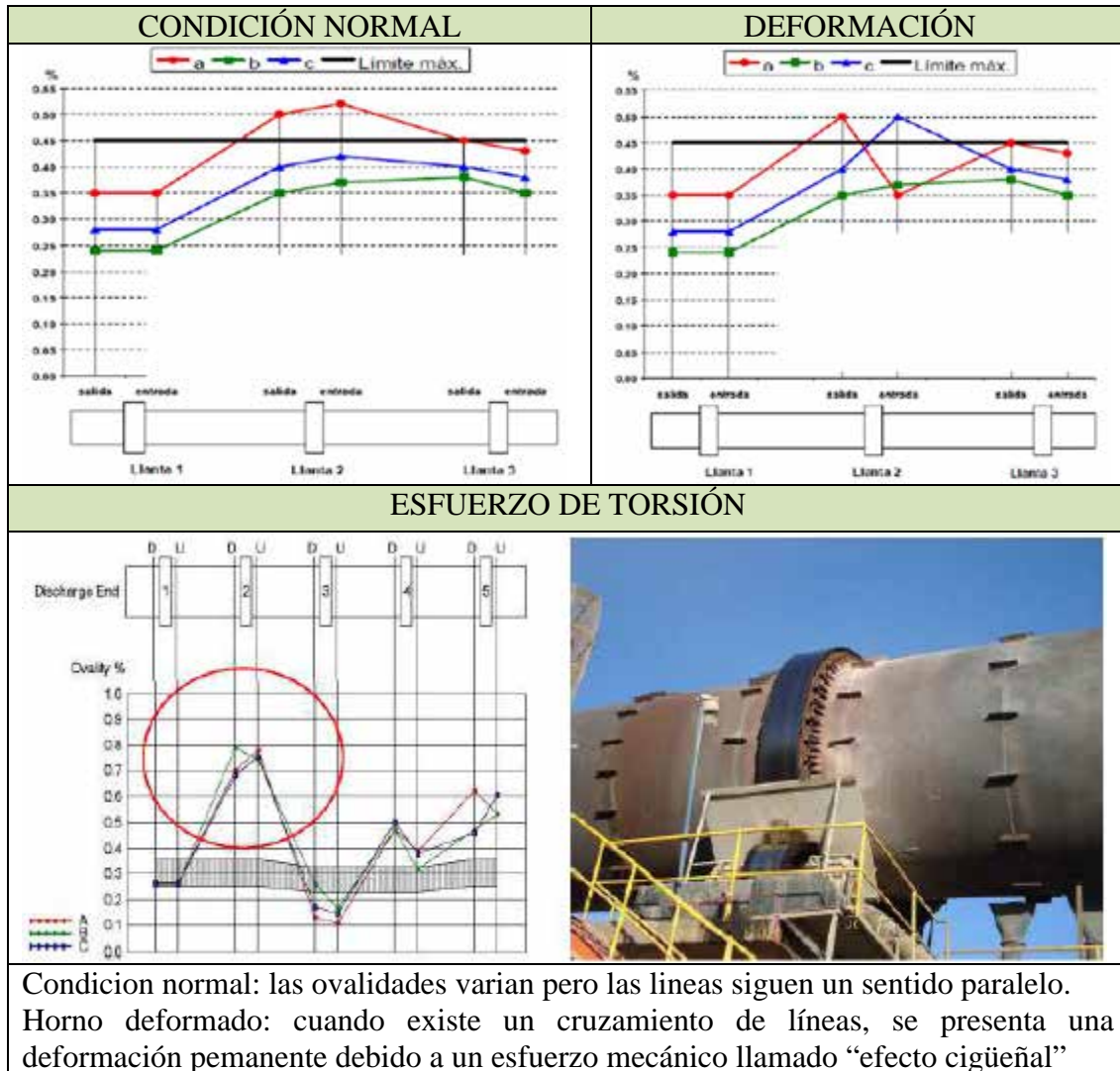
Para finalizar, para impedir que se produzca un esfuerzo térmico excesivo se debe diseñar el espesor de placa para una holgura de funcionamiento de 3mm:

$$t = (Sth - 3)/2 = \text{espesor óptimo}$$
 **2.80 mm**

#### **4.4.5 Esfuerzo de torsión**

En atención a lo mostrado en el cuadro 6, se genera un esfuerzo de torsión cuando en el sumario de resultados, existe en una base valores bajos de validez y en la base siguiente se tiene valores de ovalidad totalmente fuera del rango permisible.

**Cuadro 6** Esfuerzo de torsión

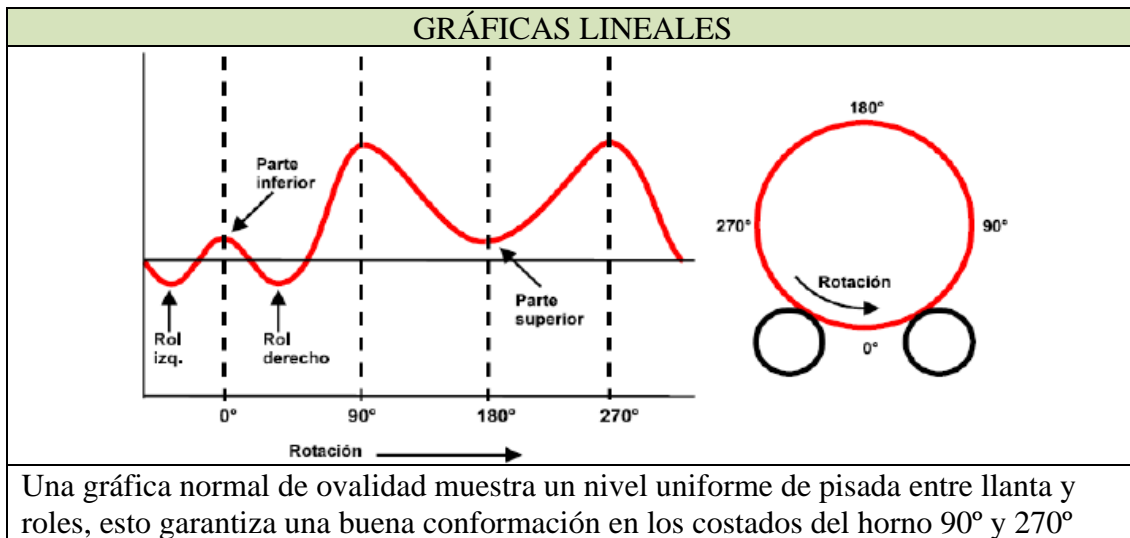


Fuente Five Pillard (2019)  
 Elaborado Baez (2020)

Además se presenta un cruzamiento de puntos, este esfuerzo es más drástico que el esfuerzo mecánico llamado efecto cigüeñal, debido a que propicia fisuras radiales en los cordones de soldadura, fisuras axiales en virola por debajo de la llanta, fisuras y deformación en zona de silletas, fracturas en la fecha del rol, vibración, calentamiento de aceite en chumaceras y deformación alta de virola en zona de llanta.

En el cuadro 7 se evidencia que, se cumplen las dos condiciones que se requieren para que la ovalidad relativa esté dentro del rango permisible (desplazamiento y diferencial de temperatura), la sección de los 180° mantendrá su redondez y con ello eliminará esfuerzos mecánicos hacia el refractario y así alcanzar los rendimientos superiores a 12 meses.

**Cuadro 7** Interpretación gráficas lineales

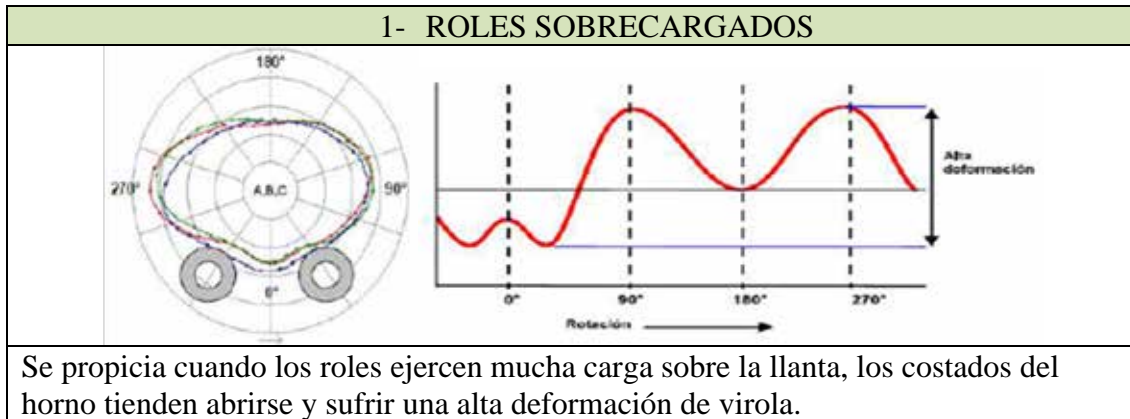


Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

#### 4.4.6 Sobre carga de roles y holgura

En el cuadro 8 se observa que, los costados se deforman en mayor proporción debido a la sobrecarga de la llanta sobre los roles, por esta situación en la gráfica el nivel de los apoyos se va más hacia los valores negativos

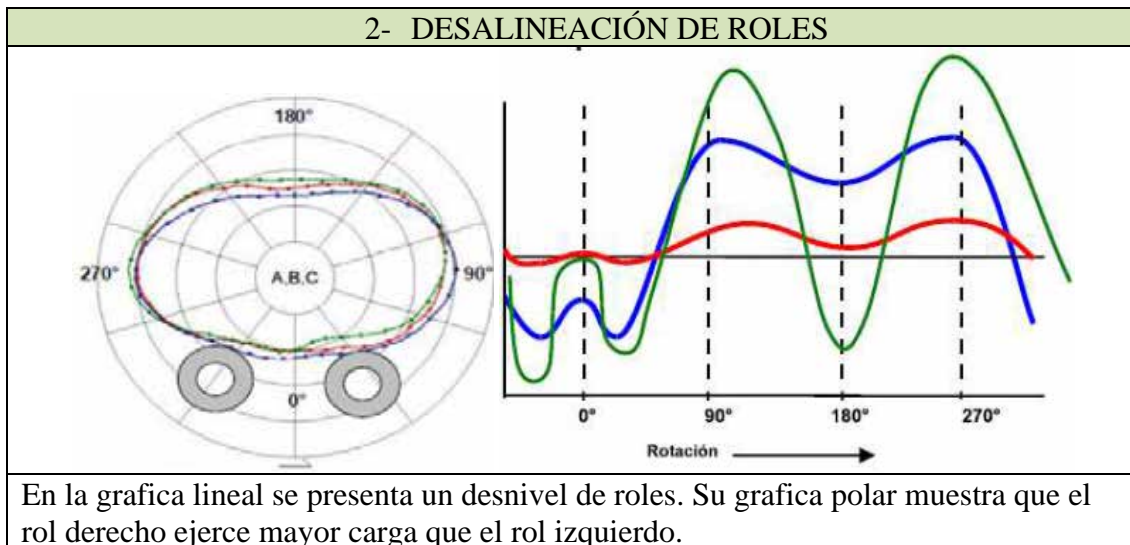
### Cuadro 8 Roles sobre cargados



Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

De acuerdo a lo destacado en el cuadro 9, debido al desnivel en los roles uno de ellos ejerce mayor carga y por lo tanto los costados se deforman de manera irregular por esta desalineación. Por lo tanto y de acuerdo a la interpretación de la gráfica lineal, el rol derecho realiza una mayor carga que el rol izquierdo, deformando en mayor proporción el costado de los 90°.

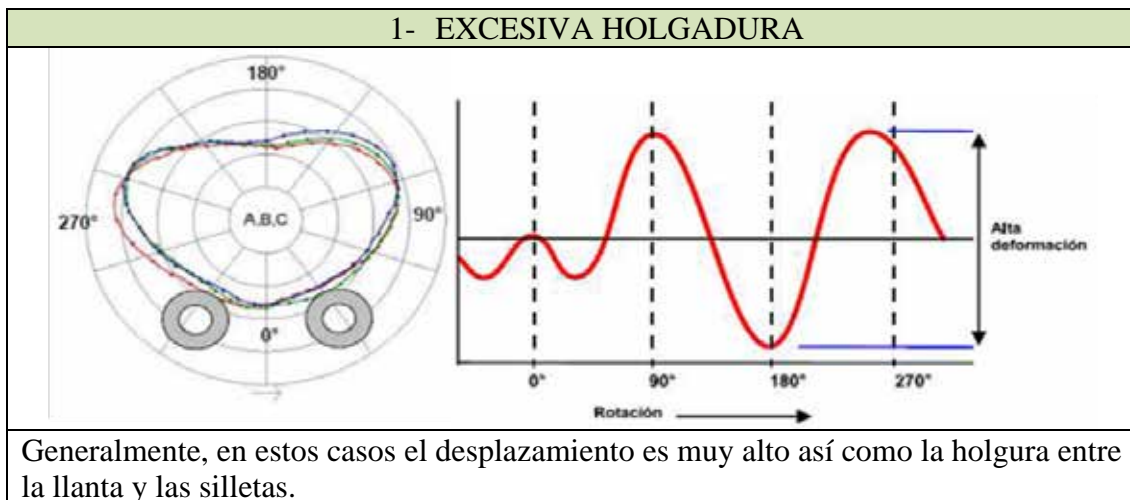
### Cuadro 9 Desalineación de roles



Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

Así mismo, en el cuadro 10 se muestra que, la curva en los 180° sobrepasa la línea del cero y cae hacia los valores negativos, esto indica que la parte superior del horno está perdiendo su redondez y que su conformación de virola se vuelve plana. Bajo esta condición mecánica, el refractario en la parte superior se abre y en los costados se comprime generando un descabezamiento severo en el ladrillo en toda la zona de la llanta. Esto quiere decir que lo que se presenta como solución es un reenlaine en la zona de las siletas

**Cuadro 10 Holgura excesiva**

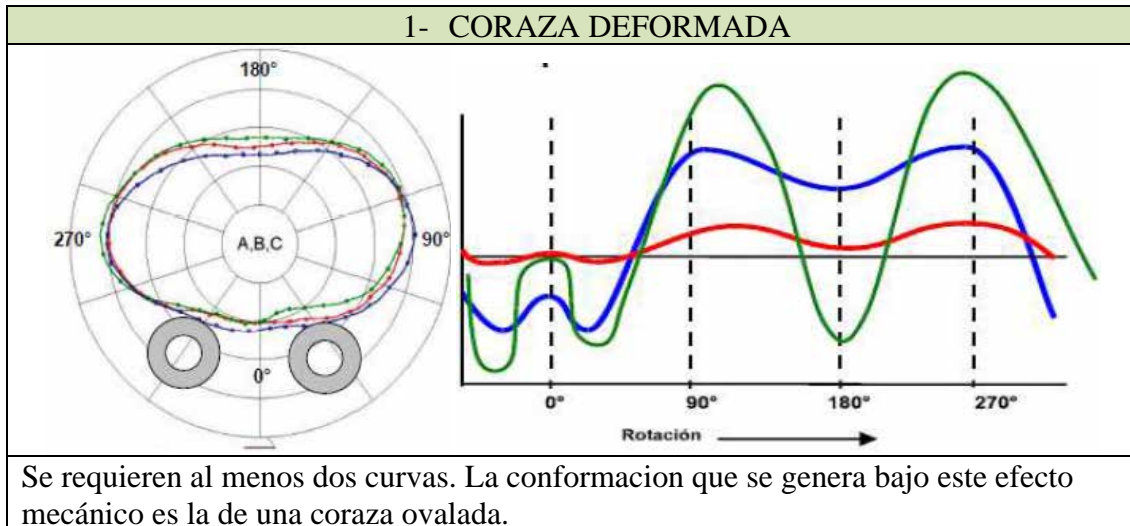


Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

#### **4.4.7 Coraza y llanta**

De acuerdo a lo presentado en el cuadro 11, en un punto el paso por los roles es muy suave, en la sección más plana y en otro punto su gráfica lineal muestra una excesiva sobrecarga, esto quiere decir que la deformación generada en la virola es irreversible y que a futuro será necesario programar un cambio de sección de coraza (ver anexo A)

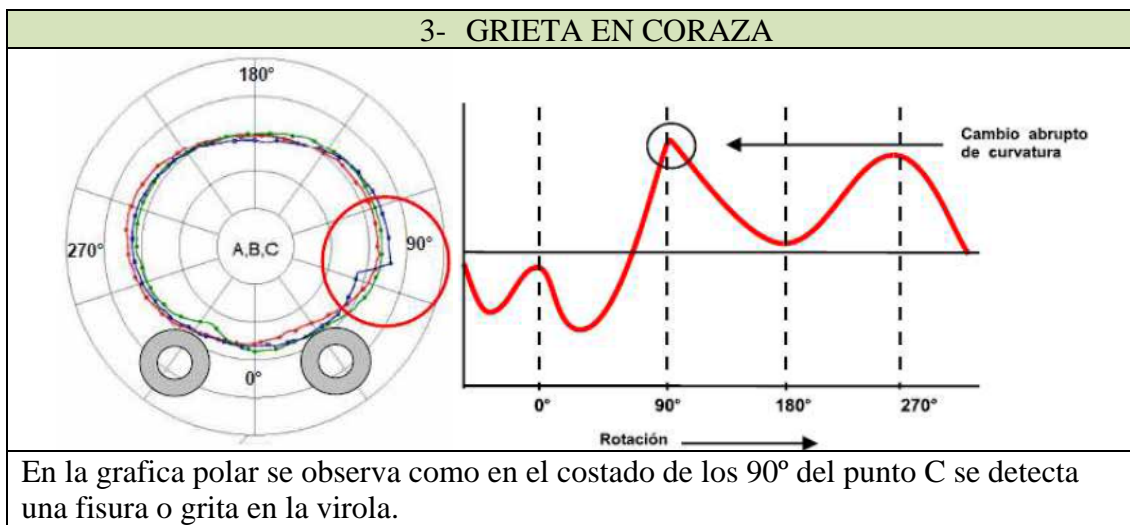
**Cuadro 11** Coraza deformada



Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

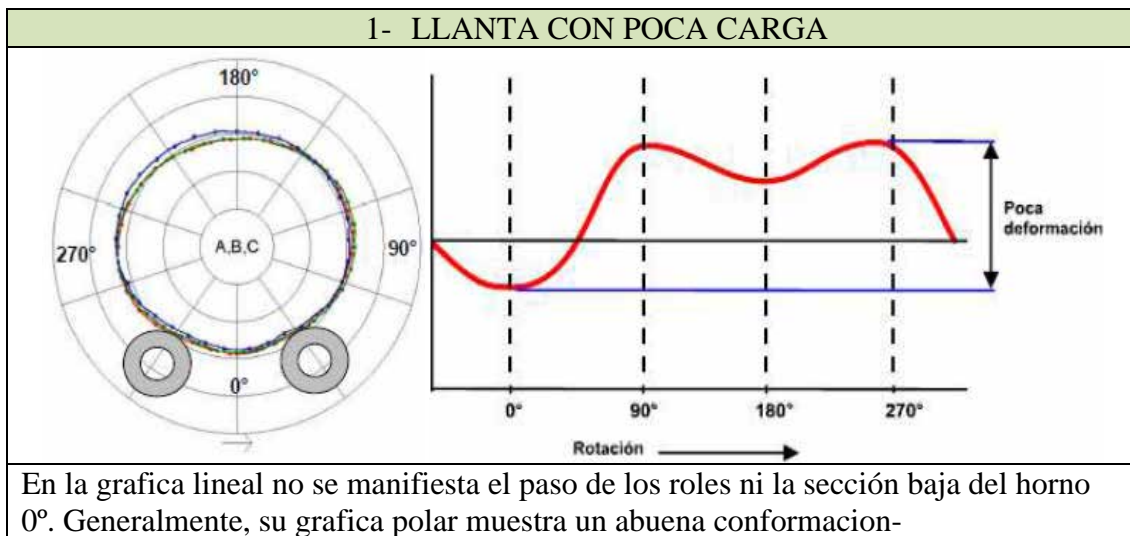
Conforme a la información obtenida y mostrada en cuadro 12, se detecta cuando la curva de la gráfica lineal sufre un cambio brusco en su curvatura (pico). Para esto se debe checar en un paro por mantenimiento con la prueba de los líquidos penetrantes para descartar esta posibilidad de una grieta o fisura en algún codón de soldadura.

**Cuadro 12** Grieta en coraza



En atención en el cuadro 13, se observa una sola curva por lo tanto la deformación es muy baja en la zona de la virola, bajo esta condición los esfuerzos mecánicos en la zona de la llanta serán muy bajos, además tendrá un desplazamiento dentro del rango permisible y una ovalidad baja (ver anexo B y C)

**Cuadro 13 Llanta con poca carga**

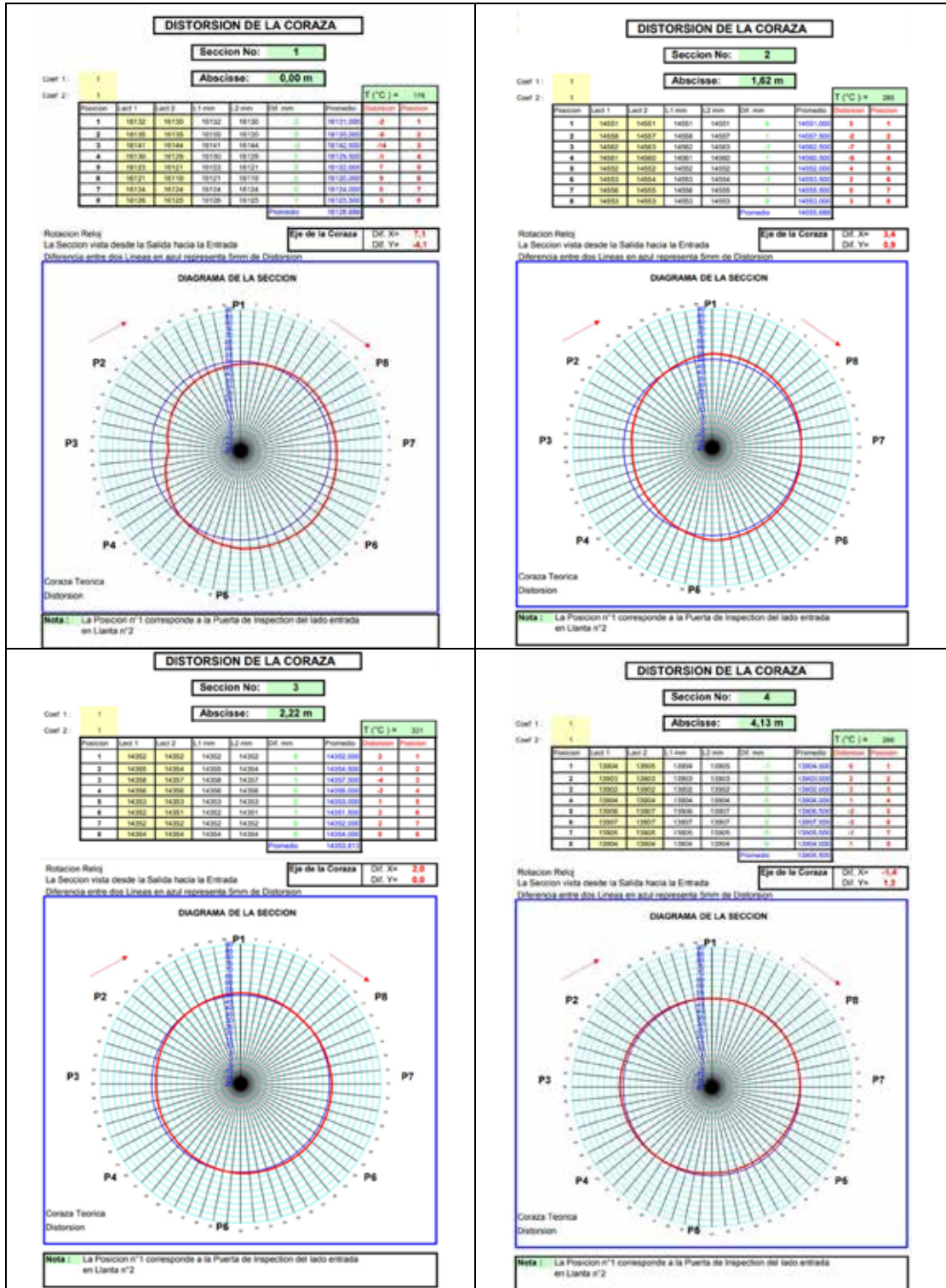


Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

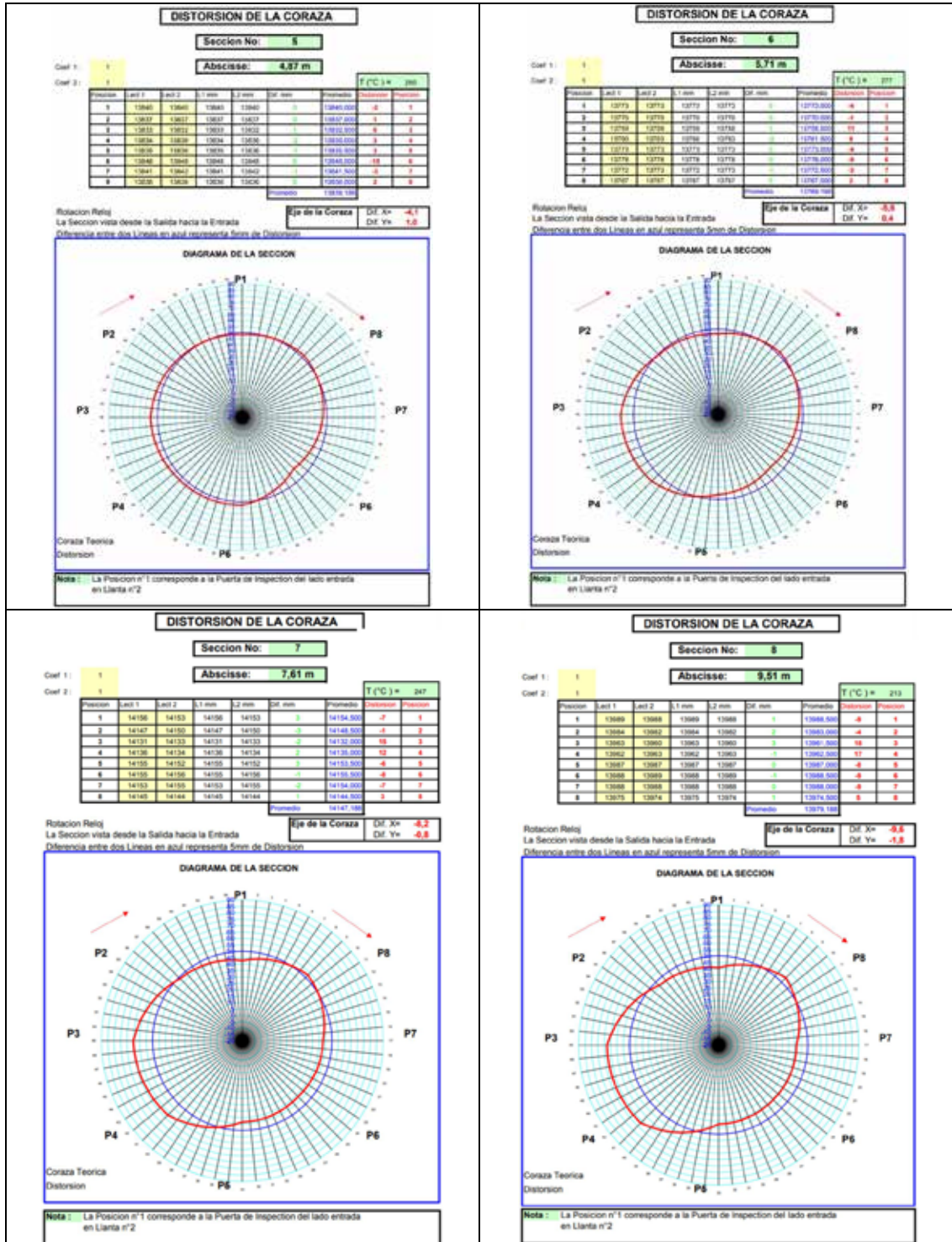
#### 4.4.8 Distorsión de coraza

De acuerdo a la información descrita, se presentan las gráficas de la medición por la distorsión de la coraza, donde se muestra en forma secuencial cada uno de los procesos antes descritos. En atención a lo señalado se tiene los siguientes cuadros del 14 al 27, suministrados por Fives Pillard

Cuadro 14 Distorsión de coraza sección 1 al 4

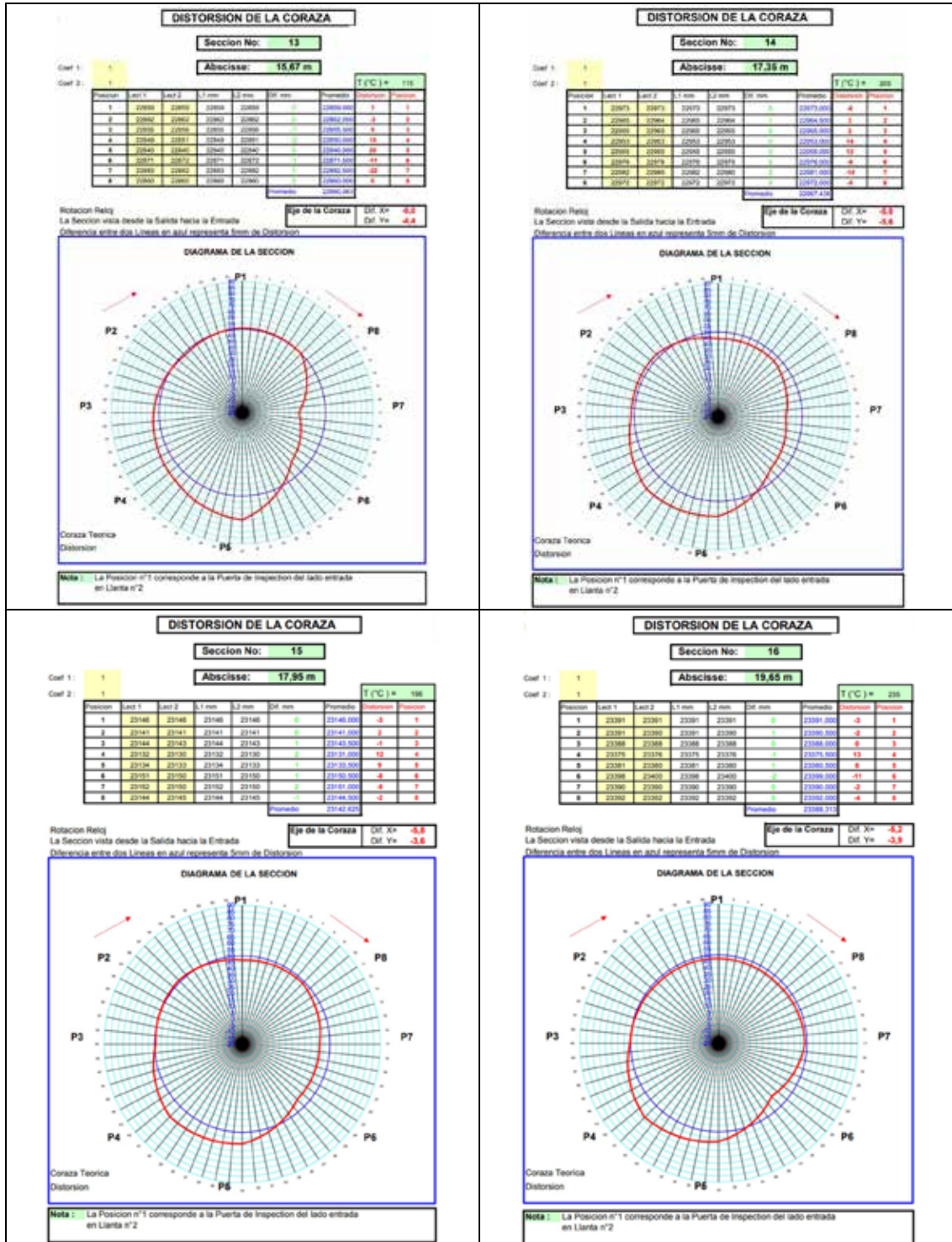


Cuadro 15 Distorsión de coraza sección 5 al 8

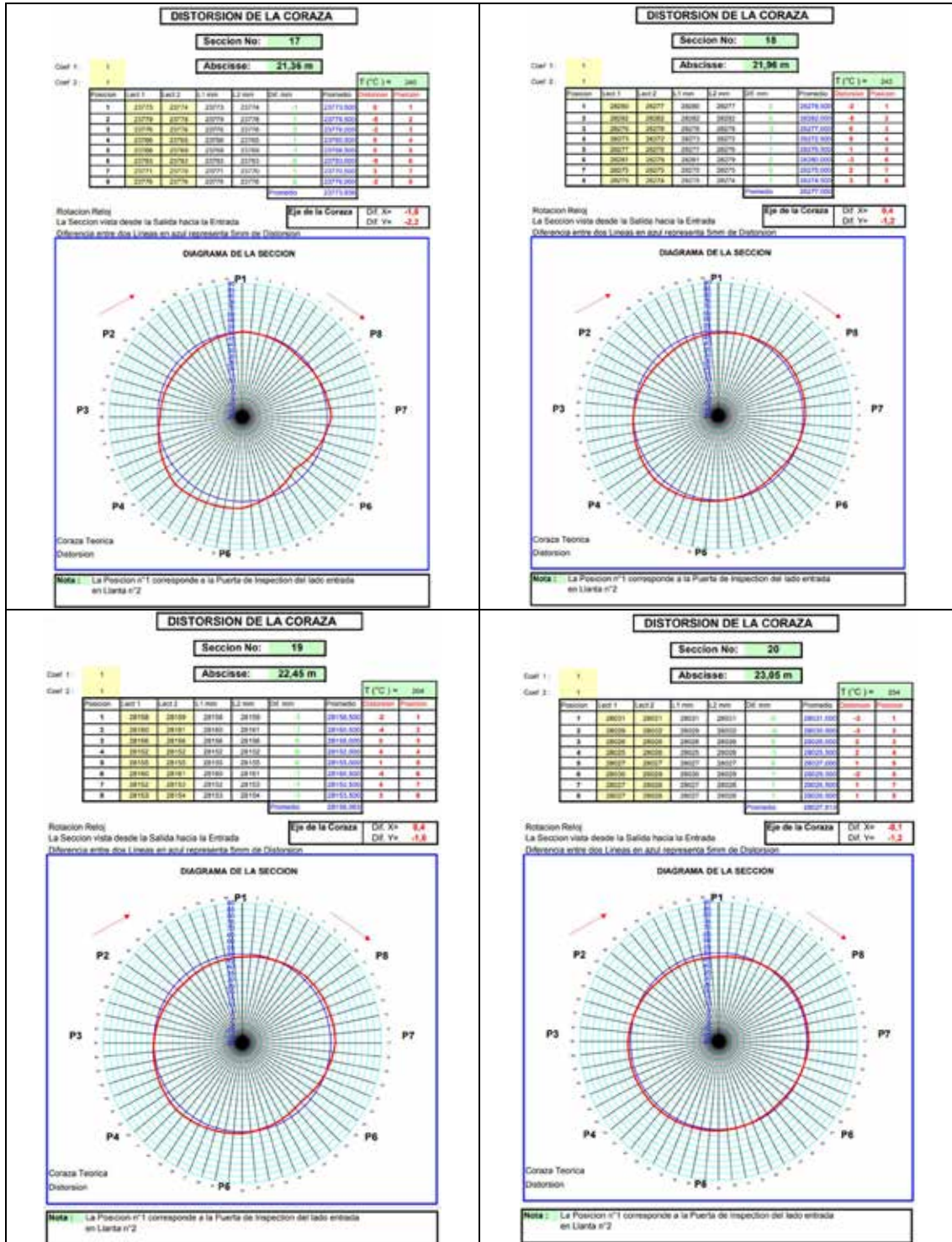




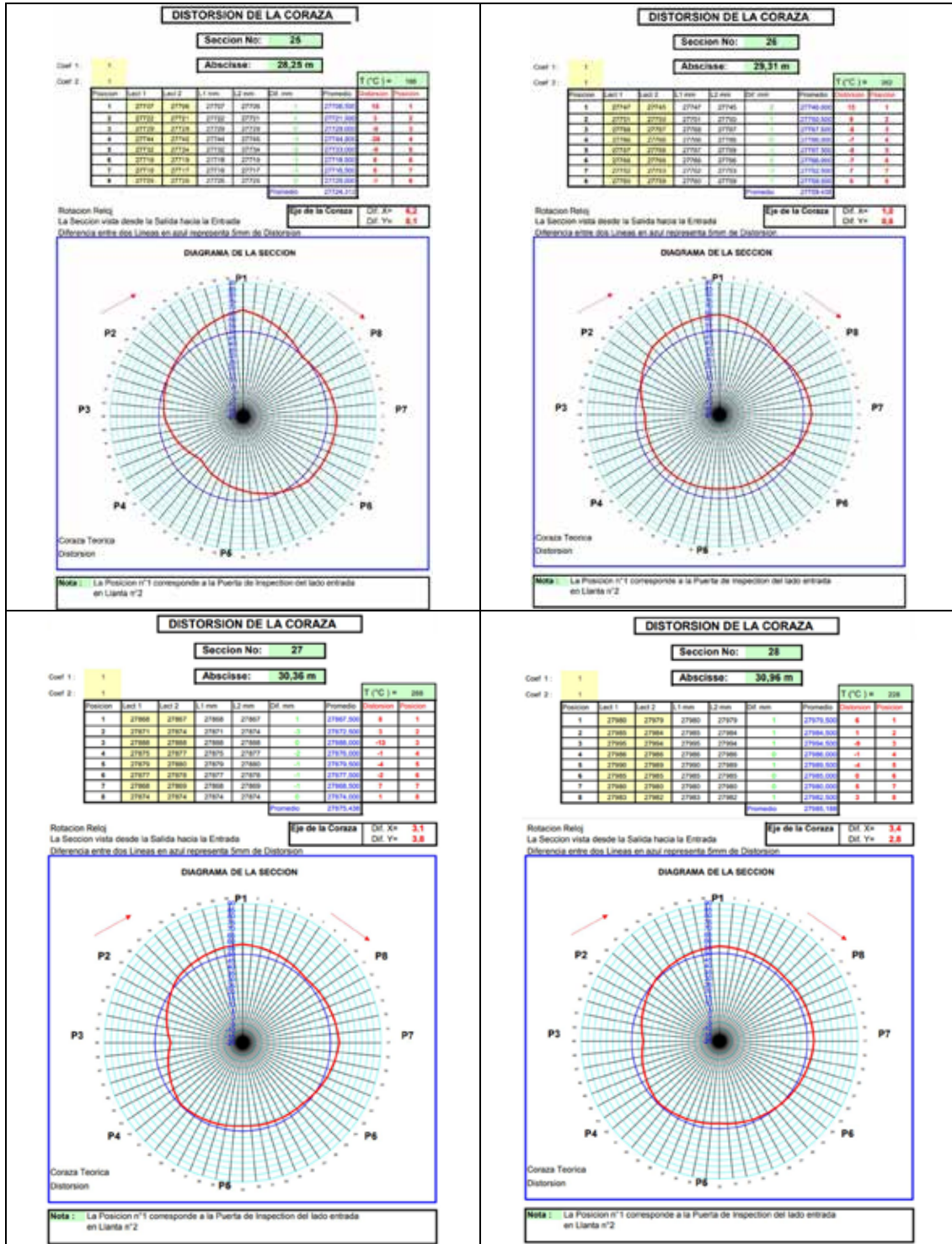
Cuadro 17 Distorsión de coraza sección 13 a la 16



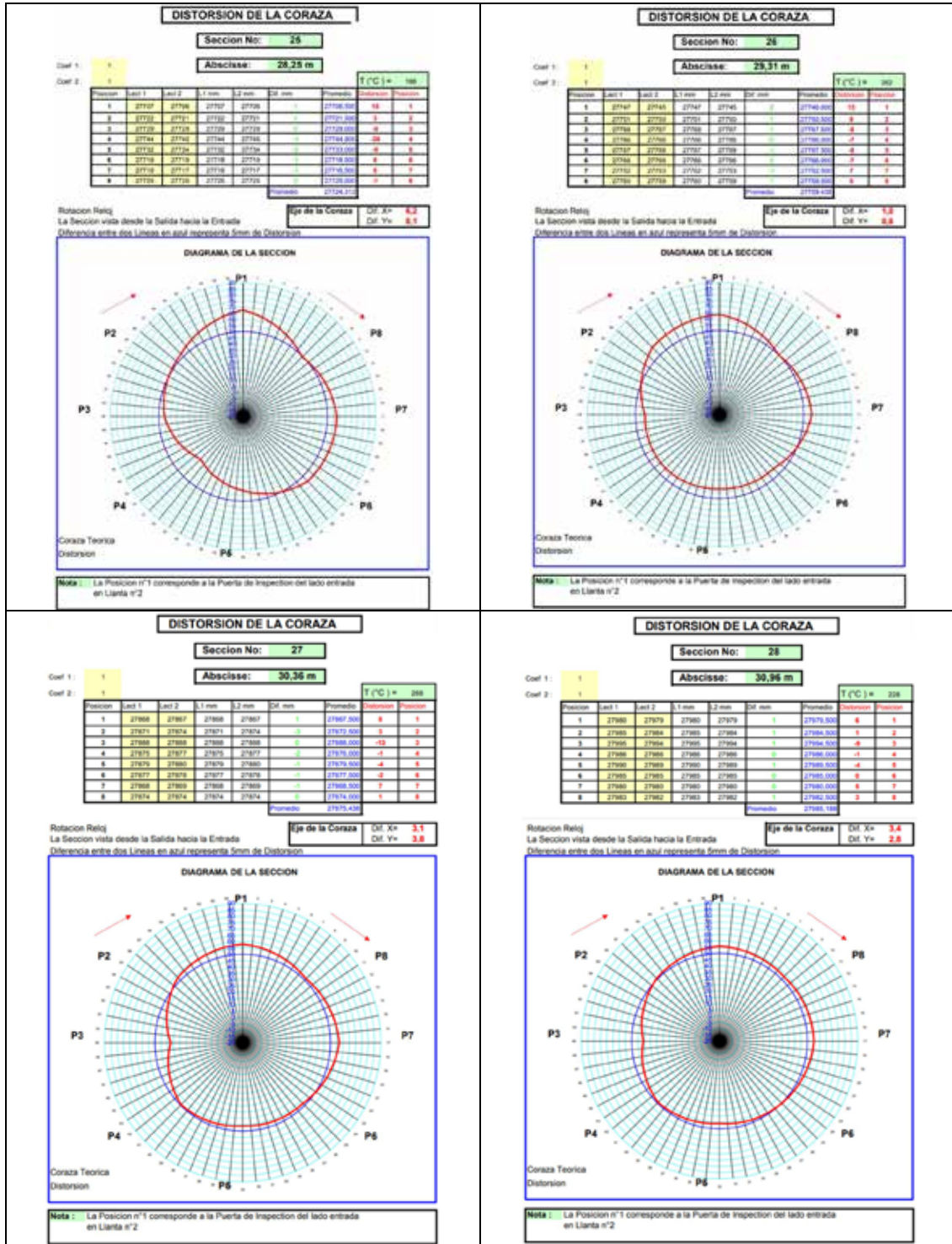
Cuadro 18 Distorsión de coraza sección 17 a la 20



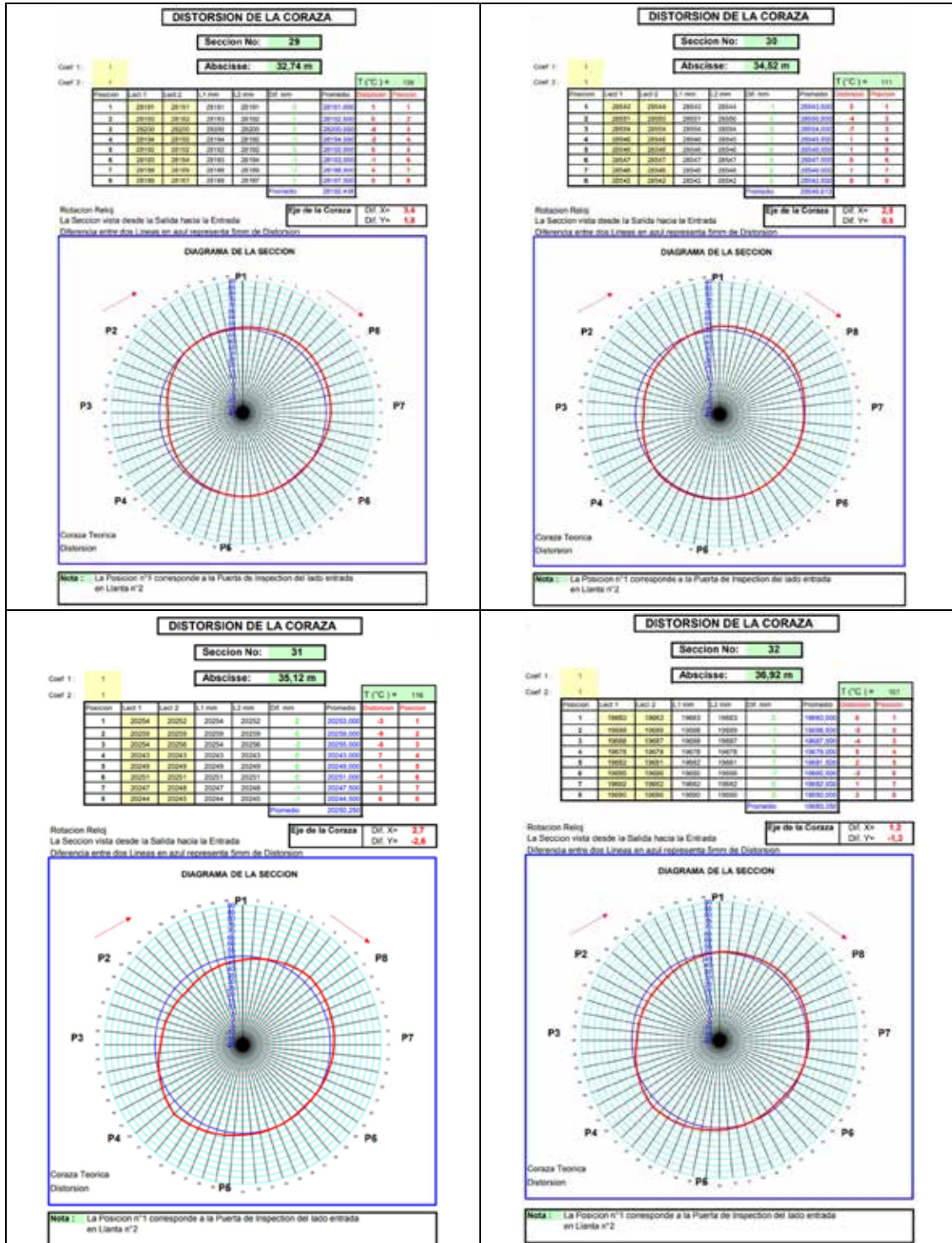
Cuadro 19 Distorsión de coraza sección 21 a la 24



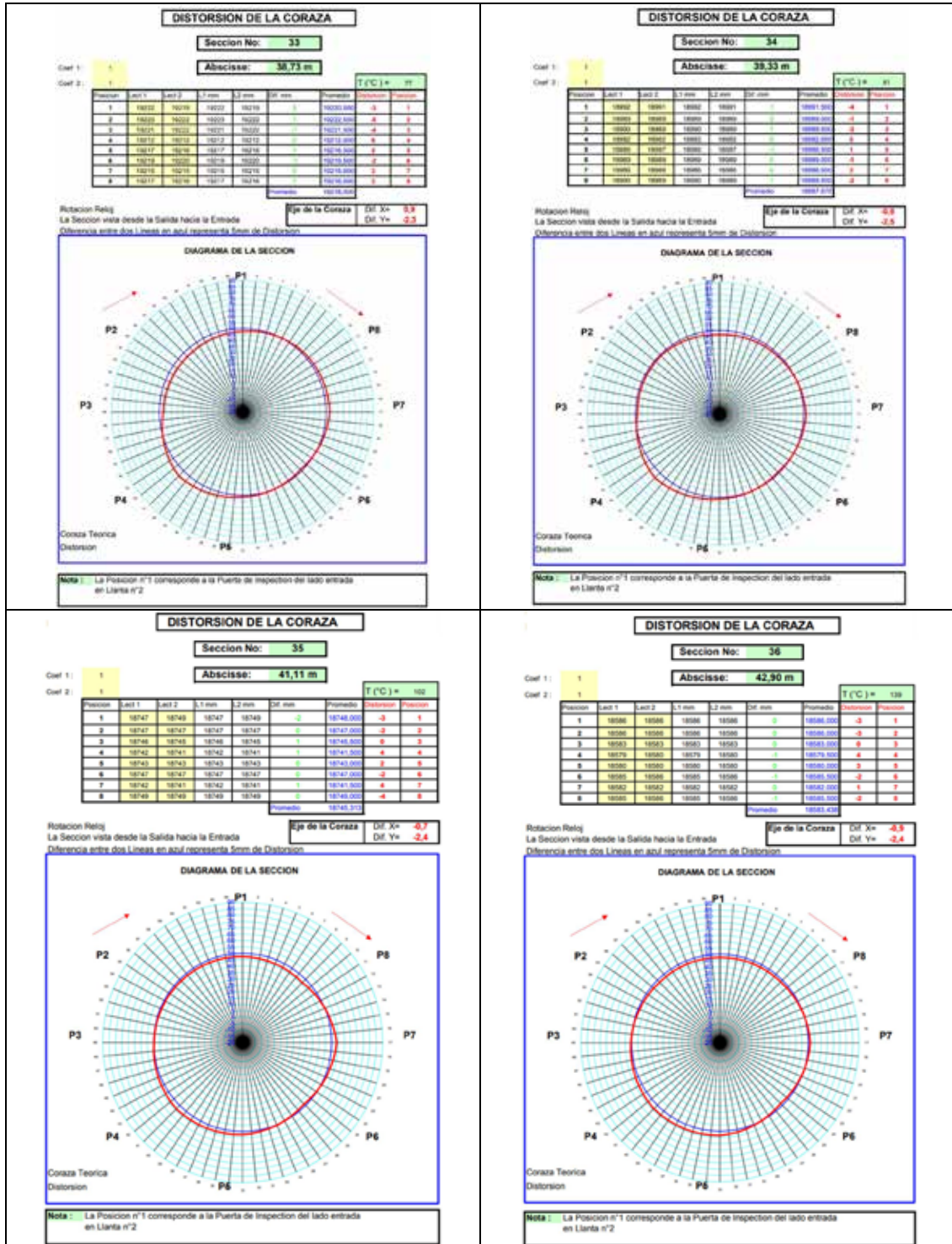
Cuadro 20 Distorsión sección 25 a la 28



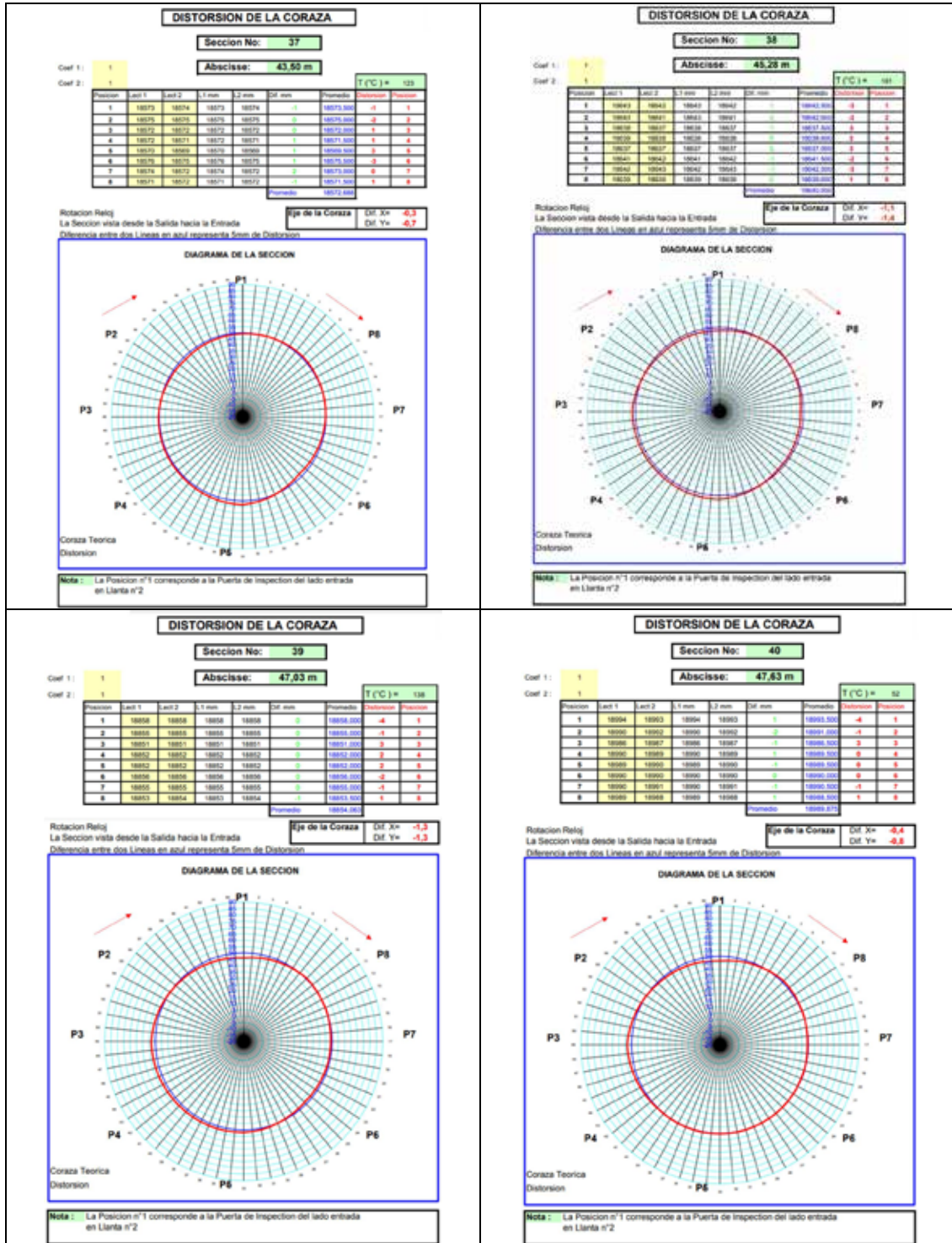
Cuadro 21 Distorsión sección 29 a la 32



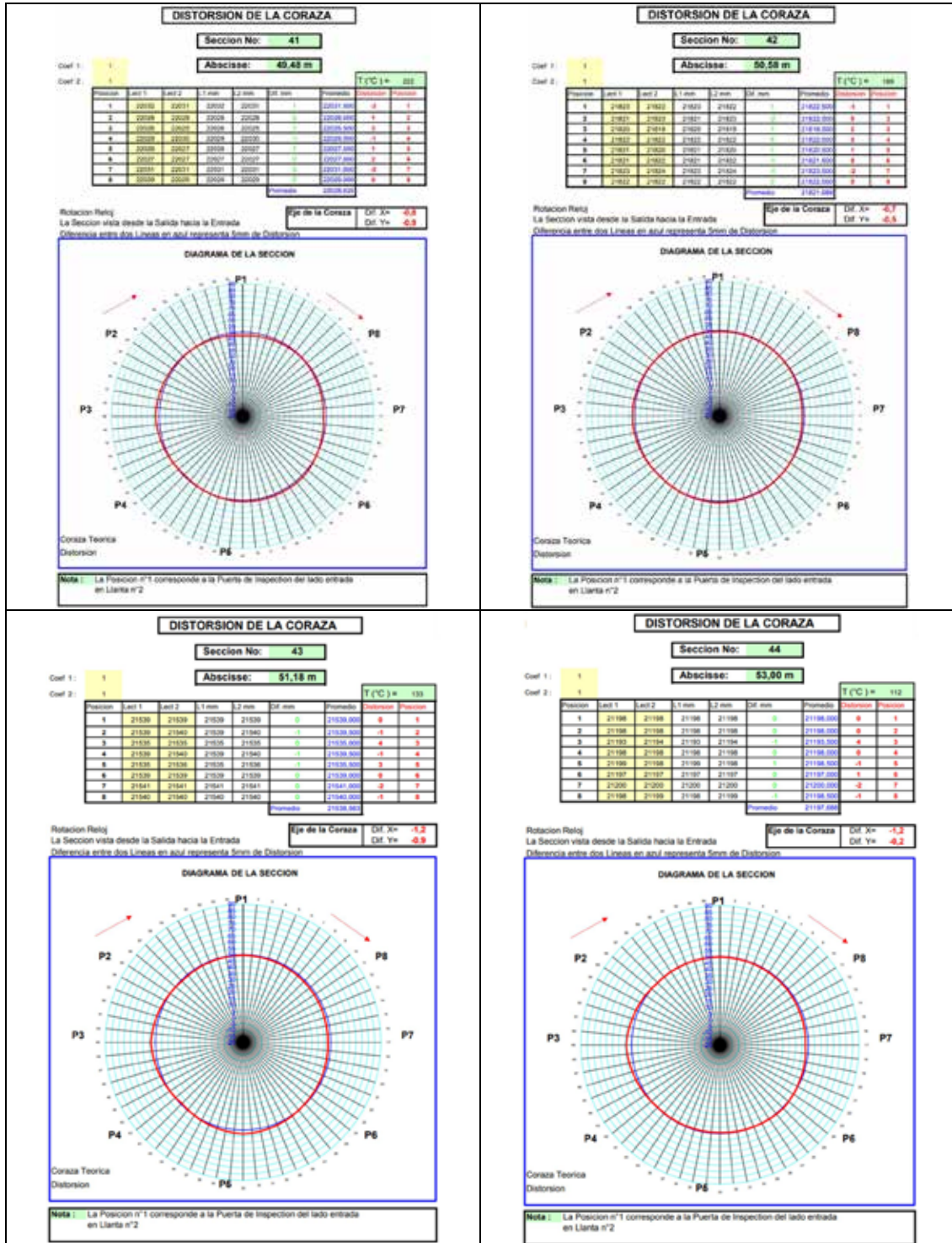
Cuadro 22 Distorsión sección 33 a la 36



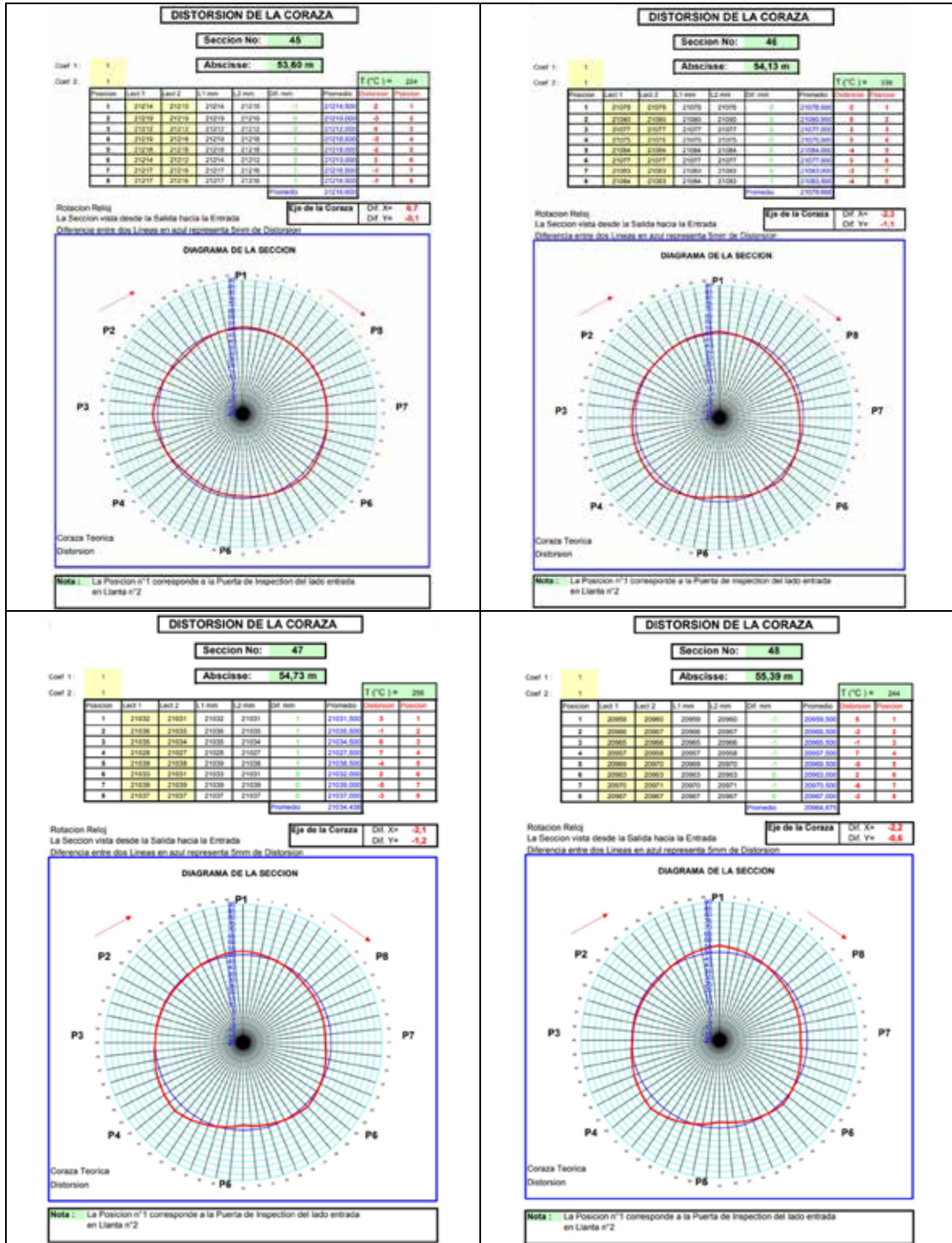
Cuadro 23 Distorsión sección 37 a la 40



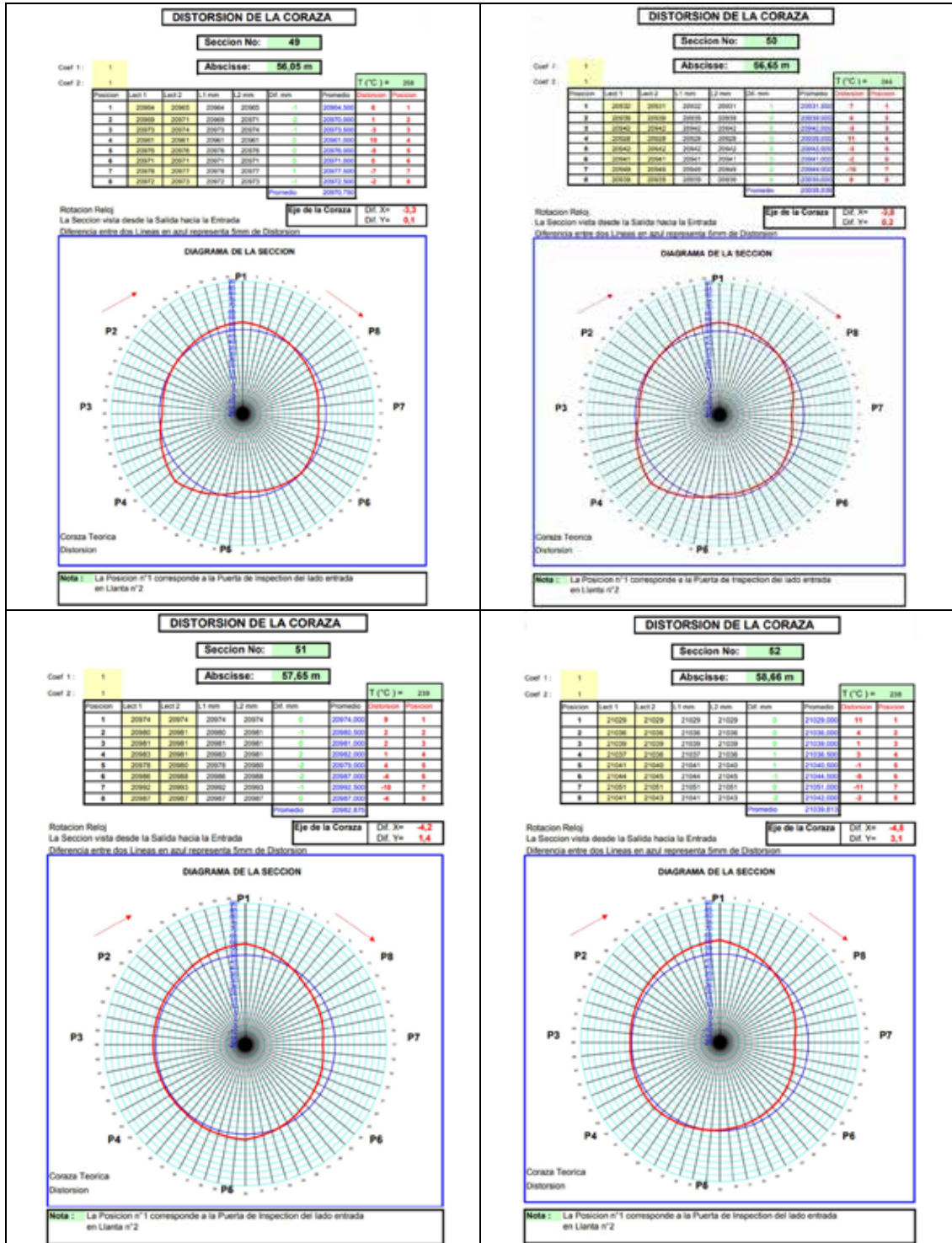
Cuadro 24 Distorsión sección de la 41 a la 44



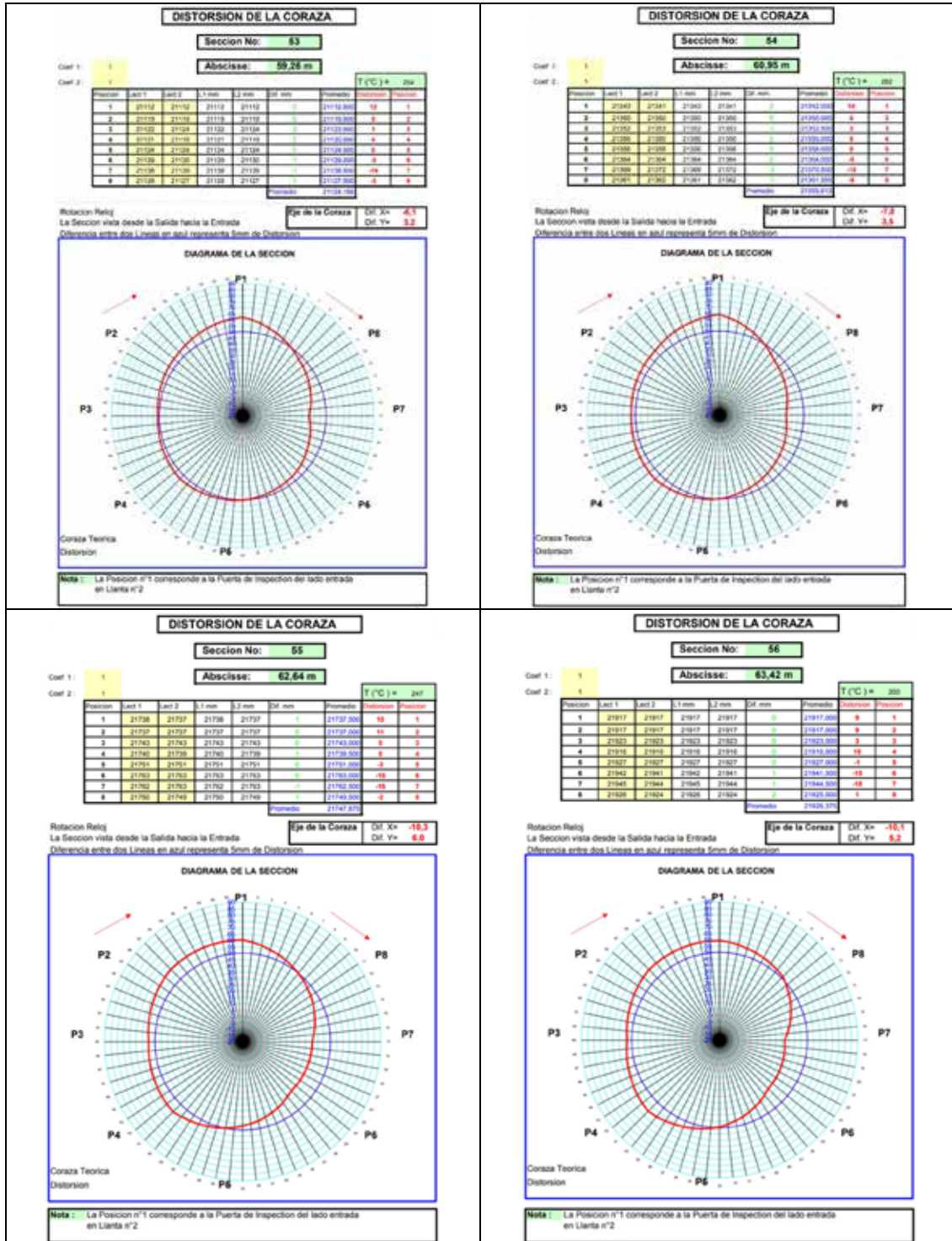
Cuadro 25 Distorsión sección 45 a la 48



Cuadro 26 Distorsión sección 49 a la 52

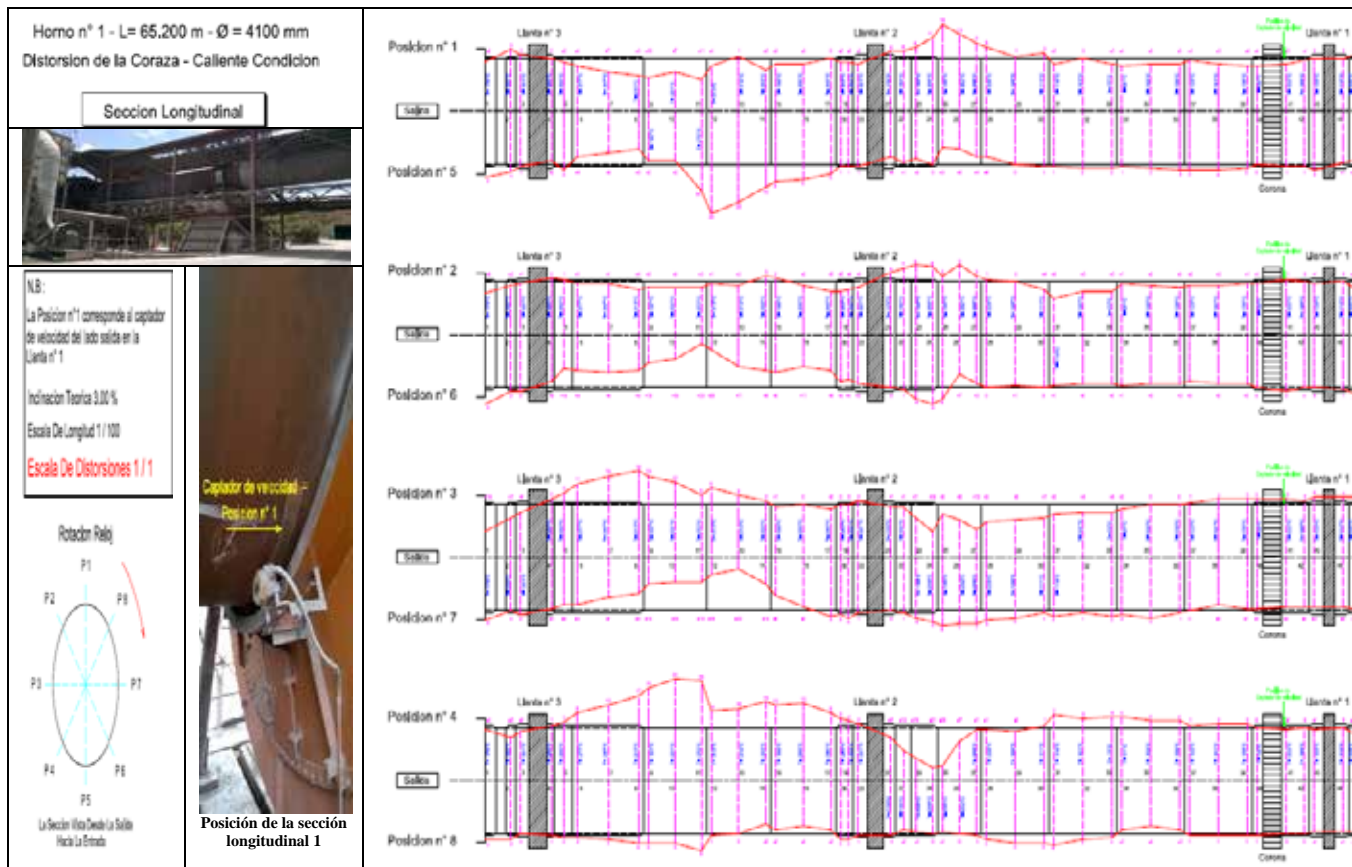


Cuadro 27 Distorsión sección 53 a la 56



Ahora bien, el cuadro 28 representa las 56 secciones juntas del horno, lo cual permite visualizar el comportamiento de la coraza en todas sus secciones:

**Cuadro 28 Distorsión completa de la coraza**

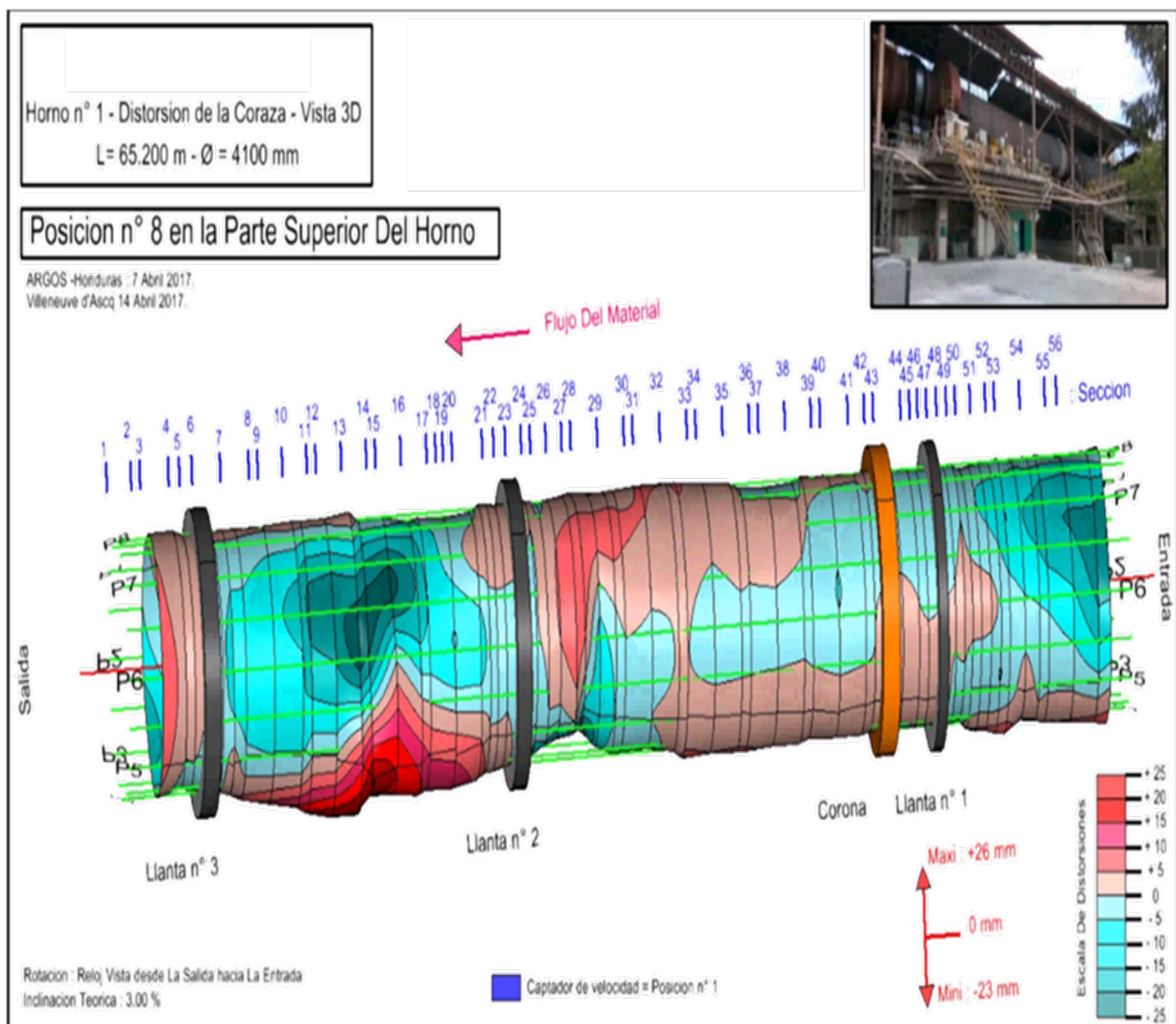


#### 4.4.9 Simulación dinámica

Después de haber tomado las mediciones de todas las secciones del horno, éstas se cargan al software para simulación, Fluent, (CFD Computational Flow Dynamics) y Mathcad, para posteriormente efectuar una simulación dinámica y evaluar en función a los valores máximos permisibles de ovalidad, los puntos más críticos del horno para luego evaluar la manera más factible de corregir estas deformaciones y así preservar la vida útil del refractario.

A través del simulador, (ver anexo D) se pudo determinar el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios de los hornos rotativos de cemento, a su vez definir los valores de esfuerzos internos de los refractarios de los hornos rotativos de cemento y además describir el efecto de ovalidad y movimiento relativo en los esfuerzos internos de los refractarios en hornos rotativos de cemento.

**Cuadro 29 Simulación dinámica**



Fuente Five Pillard(2019)

Por último, es necesario mencionar que la vida útil es el tiempo de operatividad de un bien y en relación al tercer objetivo específico que corresponde a señalar la vida útil de los refractarios del horno rotativo de cemento, se obtuvo que la extensión de este tiempo dependerá si se producen estos dos tipos de desgastes: por desplazamiento y por aflojamiento en el refractario, tal y como se aprecian en los cuadros 29 y 30 respectivamente y donde se muestran los siguientes resultados

**Cuadro 30 Desgaste mecánico por desplazamiento**



Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

Con relación a la información mostrada en el cuadro 30, se pone de manifiesto que el desgaste mecánico de este tipo, se detecta por los desplazamientos en forma de espiral y las inclinaciones transversales en algunos anillos. Todo esto se origina por diferentes causas entre las que se destacan el mal montaje del refractario, las dilataciones y contracciones por interrupciones del funcionamiento, la elevada ovalidad en la virola y por la formación irregular de la costra. Esto quiere decir que, las acciones correctivas que deben emplearse corresponden a un montaje y arranque del horno adecuado según curva de calentamiento y por mantener la uniformidad en el funcionamiento del horno.

**Cuadro 31 Desgaste mecánico por aflojamiento del refractario**



Fuente Five Pillard (2019)  
Elaborado Baez (2020)

## CONCLUSIONES

Se puede concluir que la gran cantidad de variables involucradas en el diseño de un horno rotatorio horizontal requieren de un amplio análisis de las condiciones operativas que se definan como referencia.

Después de hacer el análisis de las causas de la ovalidad, se constató que las condiciones climáticas y atmosféricas del sitio de ubicación, entre otras, son variables ajenas a las condiciones de referencia que se definen en este tipo de diseños

Para tener control sobre los recursos requeridos por el equipo en operación se debe definir la tasa de alimentación realizando un pesaje del material que ingresa al horno y medir el caudal de combustible consumido por el quemador.

Otro aspecto a resaltar fue que si no guarda el rango permitido de desplazamiento, la llanta en algún momento forza al motor principal del horno, hay mayor demanda de energía para girar el horno y el amperaje aumenta. Las normas establecen que los rangos permitidos son Límite superior de 25 mm/revolución y Límite inferior 10 mm/revolución

Con respecto a los quemadores industriales se pudo constatar que operan con un exceso de aire del 15% con el fin de minimizar riesgos ante posibles gases inquemados. Utilizar mayores excesos sería desfavorable energéticamente y emplear excesos muy bajos conllevaría a tener mezclas poco íntimas de aire y combustible con la consecuente generación de inquemados y de riesgos asociados a los inquemados combustibles”.

## RECOMENDACIONES

Debido a que el desgaste mecánico, se detecta por los indicios de fricción en el lado de la virola, causado por los movimientos relativos de los ladrillos en referencia a la virola, el mal montaje del refractario y la elevada ovalidad en la virola. Se recomienda tomar las siguientes acciones correctivas: montaje adecuado y en las zonas que se encuentran deformadas realizar la instalación con morteros.

Para evitar posibles desplazamientos del cilindro rotatorio por efecto del componente axial de carga resultante del ángulo de inclinación de la estructura, respecto al eje horizontal ,y buscando mantener distribuido el peso total del equipo operando sobre los 4 apoyos (8 rodillos) , se recomienda usar elementos de retención sobre las pistas de rodadura

Se plantea la opción de utilizar como elementos de retención, rodillos de leva con eje, producto disponible en el catalogo en línea de , y que consiste básicamente en rodamientos de rodillos o agujas con pista externa dimensionada para tolerar elevadas cargas radiales.

En lo que se refiere a los aspectos químicos, que afectan a los refractarios, se recomienda revisar los álcalis, los cloruros y los óxidos de azufre. También hay que inspeccionar los combustibles alternativos que se usan, ya que las harinas de origen animal incrementan la cantidad de elementos agresivos

## BIBLIOGRAFÍA

- Almagro Gorbea A. y López Hernández G. (s/f) Sistemas Topográficos para Medición en Arquitectura. Disponible: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-andina-del-cusco/topografia-i/practica/instrumentos-topograficos/6471402/view>. [Consulta: Junio, 20, 2020]
- Ángel, Daniel (2016). **Los Tiempos Modernos de la Productividad. Revista Acuerdos**. Disponible: <http://acuerdosrevista.mincit.gov.co/index.php/component/k2/item/369-tiempos-modernos> [Consulta: Junio, 15, 2020].
- Arias, F. (2012). El proyecto de investigación. Introducción a la Metodología científica Sexta Edición. Caracas, Venezuela. Editorial Episteme, C.A.
- Balestrini, M. (2011). **Cómo se Elabora el Proyecto de Investigación**. BL Consultores Asociados, Caracas, Venezuela. Servicio Editorial.
- Bernal, C. (2010). **Metodología de la Investigación para Administración, Economía, Humanidades y Ciencias Sociales**. Tercera Edición, Colombia. Editorial Pearson Educación.
- Beer f., Johnston e., Dewolf J. **Mecánica de Materiales**. 4 Ed. McGraw-Hill. 2007
- Cárdenas Andrés (2014) **Diseño y Simulación de un horno rotatorio paramateriales celulósicos**, Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador
- Cerda, H. (2005). Metodología de la Investigación, para Administración. México. Editorial Pearson Educación.
- Diccionario Enciclopédico Vox (2019) Calcificación. Larousse Editorial, S.L.
- Fernández Eduardo (2007) Tecnologías de Oxidación Térmica. Disponible: [http://www.cma.gva.es/comunes\\_asp/documentos/agenda/val/06.%20ponencia\\_EDUARD%20FERNANDEZ\\_blanco%20y%20negro.pdf](http://www.cma.gva.es/comunes_asp/documentos/agenda/val/06.%20ponencia_EDUARD%20FERNANDEZ_blanco%20y%20negro.pdf). [Consulta: Junio, 20, 2020]
- Fernández F. (2008) Conductividad Térmica en sólidos a muy altas Temperaturas. Universidad de los Andes, Venezuela.
- Finanzas para Todos (s/f) La Revolución Industrial (1760-1840). Disponible: <http://www.finanzasparatodos.es/gepeese/es/inicio/laEconomiaEn/la>

Historia/revolucion\_industrial.html#:~:text=Antecedentes%3A%20La%20econo m% C3% ADa% 20existente% 20antes,poblaci% C3% B3n% 20subsist% C3% ADan % 20con% 20trabajos% 20agropecuarios.&text=Origen% 20y% 20nacimiento% 20d e% 20la,a% 20mediados% 20del% 20siglo% 20XVIII. [Consulta: Junio 15,2020]

Flórez Carlos (2006) **Análisis estructural mediante el método de elementos finitos de un horno para producción de cemento.** Tesis de grado .Universidad del Norte. Barranquilla.

Galán, Manue (2010) Justificación y Limitaciones de la Investigación Disponible: <http://manuelgalan.blogspot.com/2010/02/justificacion-y-limitaciones-en-la.html>. [Consulta: Junio 15,2020].

Google Chrome (2020). Internet- imágenes. Sitio Web. [Consulta: Junio 19,2020].

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2010). Metodología de la Investigación. Quinta Edición. México. Editorial McGraw-Hill/ Interamericana de Editores S. A de C.V.

Hernández L. (2015) **Diseño de un Programa de Mantenimiento Preventivo para transportadores de ruedas de aluminio en horno de tratamiento térmico.** Universidad José Antonio Páez, San Diego, Estado Carabobo Venezuela.

López Lola (2017) **Registro de actuaciones de mantenimiento del refractario en una planta de fabricación de cemento.** Tesis de grado. Universidad politécnica de Madrid

Orduz Santiago (2012) **Diseño mecánico de horno rotativo de funcionamiento horizontal.** Tesis de grado. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Mecánica. Santiago de Cali.

Ortega, Manuel R. (1989-2006). **Lecciones de Física.** Cuatro Volúmenes. Monytex

Pérez Porto J. y Gardey G.. (2015) **Definición de refractario.** Disponible: <https://definicion.de/refractario/>. [Consulta: Junio, 20,2020]

Perry r., Maloney j. y Green D. **Manual del Ingeniero Químico.** 4 Ed. McGraw-Hill. 2001.

Resnick, Robert &Halliday, David (2004) **Física.**Volumen 1 Quinta Edición.GrupoEditorial Patria

Sabino, C. (2011). **Proyecto de Investigación**. BL Consultores Asociados, Caracas, Venezuela. Servicio Editorial.

Seminario Técnico (2019) Curitiba . Brasil

Universidad Pedagógica Experimental Libertador –UPEL (2016). **Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales**. Quinta Edición). Editorial FEDUPEL. [Documento en Línea]. Disponible: <https://es.slideshare.net/mirnalitaguirrez/manual-upel-2016-1pdf> [Consulta: Junio 19, 2020].

# ANEXOS

**ANEXO A**  
**CEMENTOS ARGOS HONDURAS**



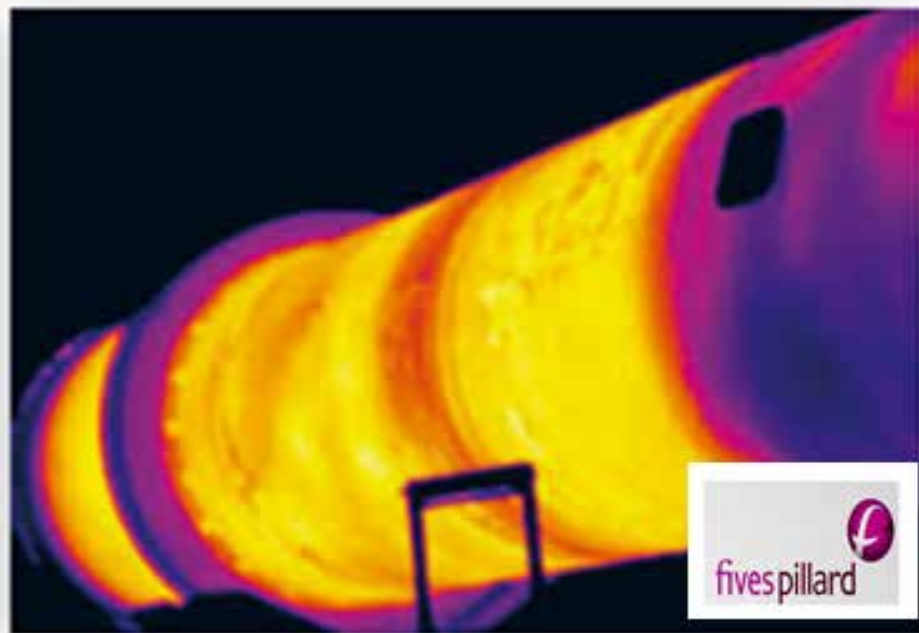


## ANEXO B



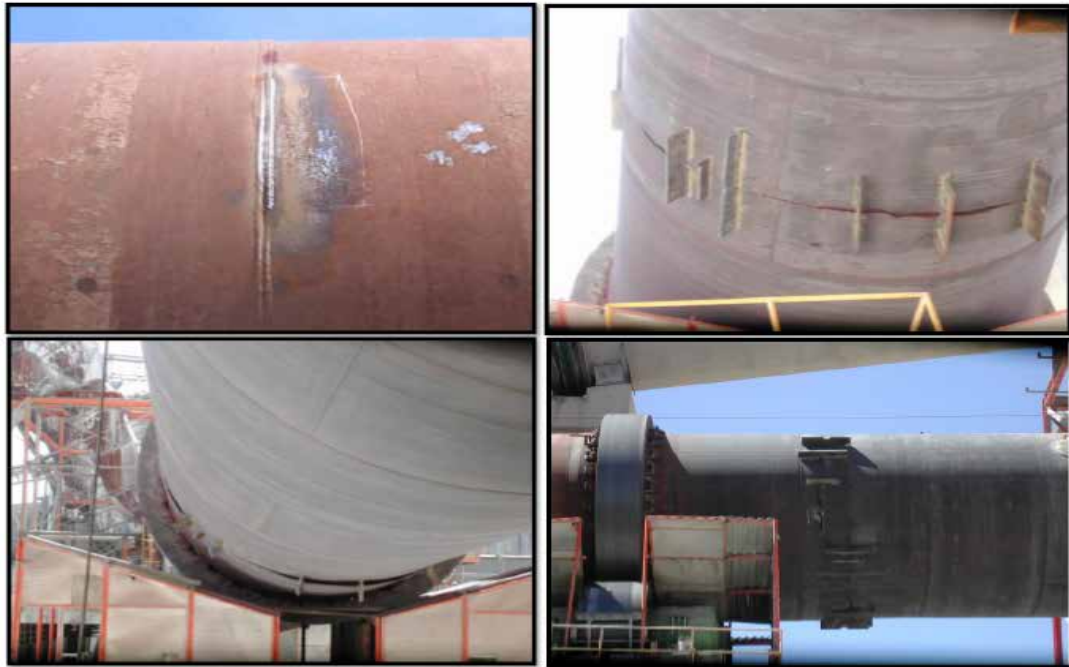
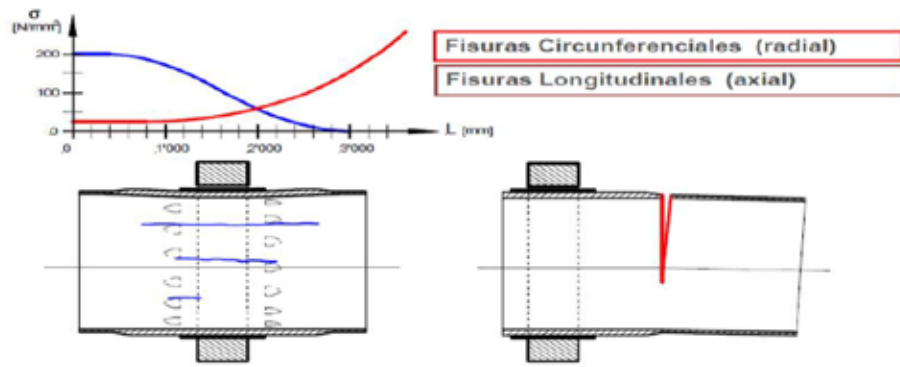
## ANEXO C





# ANEXO D

## FISURAS EN CORAZA DE HORNO



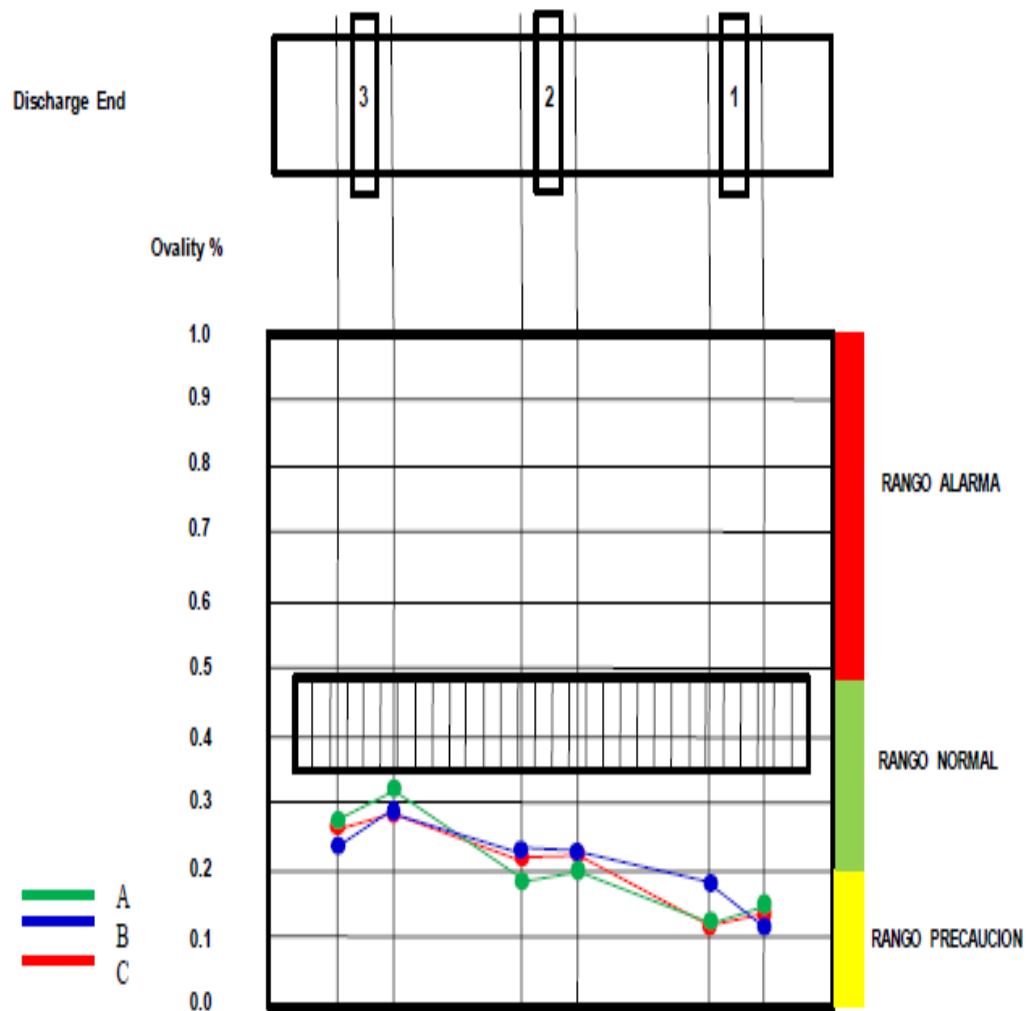
## ANEXO E

### DESCABEZADO IRREGULAR EN LA ZONA CERCANA A LA LLANTA



## ANEXO F

### OVALIDAD PERMITIDA



El rango permisible para un horno de 4.00 m de diámetro es de 0.36% como límite inferior y 0.49% como límite superior.