



## **PROCEDIMIENTO DE DISEÑO**

# **FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL**

**AICE-PRC-010-0**

**Revisión 0**

**VIGENCIA 23 DE ABRIL DEL 2015**




**ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES**  
**COMITÉ TÉCNICO DE MINERÍA E INDUSTRIAS**

## **PROCEDIMIENTO DE DISEÑO**

### **FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL**

<b>Rev.</b>	<b>Fecha</b>	<b>Emitido Para</b>	<b>Por</b>	<b>Revisor</b>	<b>CTMI</b>	<b>Presidente AICE</b>
A	07-01-2015	Revisión CTMI	Javier Solar	José M. Cancino	P. Pineda R. Montecinos	René Lagos
B	29-01-2015	Revisión Socios AICE	Javier Solar	José M. Cancino	P. Pineda R. Montecinos	René Lagos
0	23-04-2015	Difusión y Aplicación	Javier Solar	José M. Cancino	P. Pineda R. Montecinos	René Lagos

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL</b>	
		<b>AICE-PRC-010-0</b>	<b>Página 3 de 19</b>


## **PREFACIO**

El presente procedimiento de diseño – Fundaciones de Secadores Rotatorios y Hornos de Cal – está orientado a proveer a los ingenieros civiles estructurales de procedimientos y prácticas para la ingeniería estructural en el área Minera e Industrial.

Este procedimiento tiene carácter general, por lo tanto, contiene estándares mínimos y en algunos casos no detallados, según las condiciones geotécnicas, sísmicas, estructurales, disposiciones de equipos, instalaciones y características de cada proyecto en particular.

Estos documentos no tienen carácter normativo, de criterios de diseño o especificaciones, por lo que su aplicación es un complemento a las disposiciones definidas en cada proyecto.

Este procedimiento de diseño ha sido elaborado por el Comité Técnico de Minería e Industrias de AICE y solo puede ser modificado por este.

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	
		<b>FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL</b>	
		AICE-PRC-010-0	Página 4 de 19

## ÍNDICE

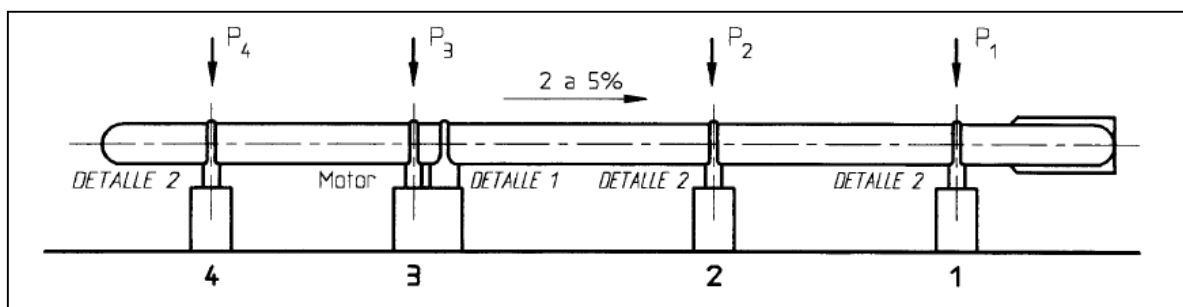
CONTENIDO	PÁGINA
1. ALCANCE Y CAMPO DE APLICACIÓN .....	5
2. DESCRIPCION .....	6
3. NORMAS Y DOCUMENTOS DE REFERENCIA.....	8
3.1 Normas .....	8
3.2 Documentos .....	8
4. CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO.....	9
5. ESTADOS Y COMBINACIONES DE CARGA .....	10
5.1 Peso Propio (PP) .....	10
5.2 Sobrecarga (L) .....	11
5.3 Operación Normal (OP).....	11
5.4 Cargas Sísmicas (Eh, Ev) .....	11
5.5 Viento (W) .....	14
5.6 Cargas por Temperatura (T).....	14
5.7 Combinaciones de Cargas.....	14
6. ANALISIS .....	15
6.1 Verificación Volcamiento Horno.....	15
6.2 Verificación Estabilidad Global .....	16
7. DISEÑO.....	17
7.1 Losa de Fundación.....	17
7.2 Muros, Cepas Columnas .....	17
7.3 Losa Plataforma de Operación.....	17
7.4 Anclaje .....	17
8. DISEÑO.....	18

## 1. ALCANCE Y CAMPO DE APLICACIÓN

Este procedimiento aplica al diseño de las cepas de hormigón armado y topes sísmicos para Hornos y Secadores Rotatorios los cuales son utilizados en proyectos industriales (proyectos de Cal, Celulosas, plantas de papel), expuestos a eventos sísmicos de gran magnitud. Este tema está cubierto parcialmente en la NCh2369.OF2003, el documento entrega recomendaciones generales (no normativas) con el solo objeto de entregar información complementaria al diseñador.

El horno rotatorio es un equipo que consiste en un cilindro de acero que rota sobre su propio eje a bajas velocidades (menor a 5 r.p.m. aproximadamente) impulsado por un motor y posee una leve pendiente en su eje longitudinal (menos de 10 grados) para facilitar el flujo del material. Se utiliza para quemar y secar residuos sólidos o líquidos viscosos, principalmente se utiliza para la fabricación de cemento Portland, como también para la fabricación de cal, aluminio, hierro, etc. La temperatura de proceso puede llegar entre 800 a 1000°C, lo cual hace que se generen deformaciones térmicas importantes que deben considerarse en el diseño, el diámetro del horno varía entre aproximadamente 1(m) hasta más de 4,5(m) y longitud entre aproximadamente menos de 10(m) hasta más de 12(m).

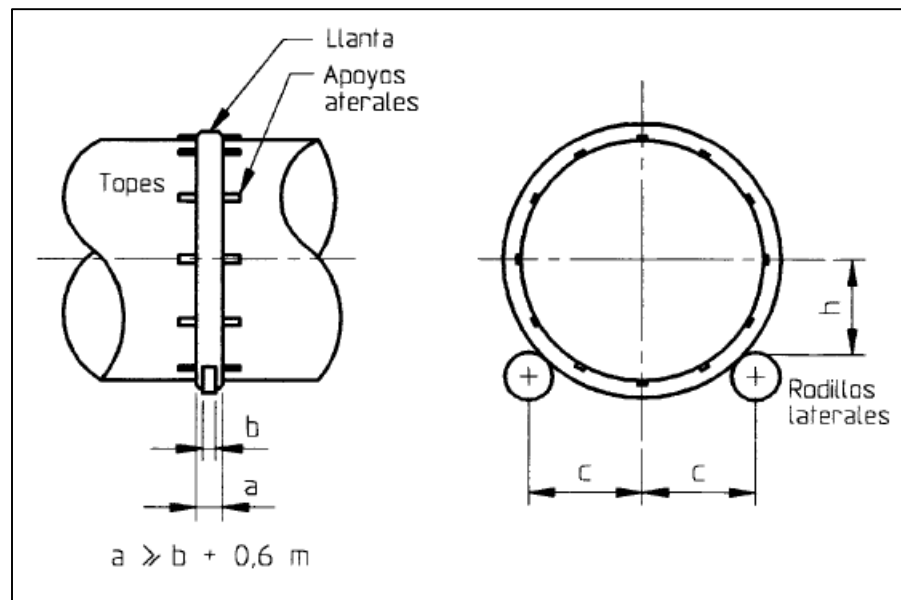
El horno rotatorio se apoya en cepas de hormigón armado que se encuentran a lo largo del horno, que se componen generalmente por muros, losas y vigas. Existe una cepa de mayor largo en donde generalmente se encuentra apoyado el sistema motriz, y que tiene la responsabilidad de tomar el sismo en el sentido axial.



**Figura N°1. Elevación longitudinal.**

## 2. DESCRIPCION

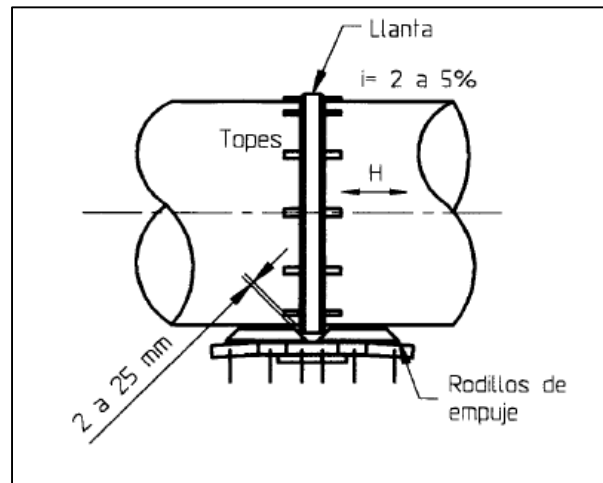
La rotación del horno es producida por un motor, para seguir la rotación el horno se apoya con rodillos que a su vez sirven de apoyos transversales y le entregan estabilidad en el sentido transversal al horno. En el cuerpo del horno existen llantas que se ubican en el eje de los apoyos transversales (rodillos laterales) y que se unen al manto del horno mediante topes soldados o apernados permitiendo la dilatación radial del horno; a su vez la llanta es la que está en contacto con los rodillos laterales permitiendo el giro del sistema.



**Figura N°2. Esquema de apoyo lateral.**


Para permitir la dilatación longitudinal, solo hay un apoyo fijo en este sentido, los cuales corresponden a un par de rodillos horizontales que también están en contacto con la llanta correspondiente. Debido a la inclinación del horno solo se deja uno de los rodillos horizontales en contacto con la llanta, y el otro se deja entre 2 a 25(mm) respecto a la llanta. Existen algunos hornos en lo que se encuentra solo un rodillo horizontal, y en tal caso se deben colocar topes fijos en remplazo del rodillo faltante.

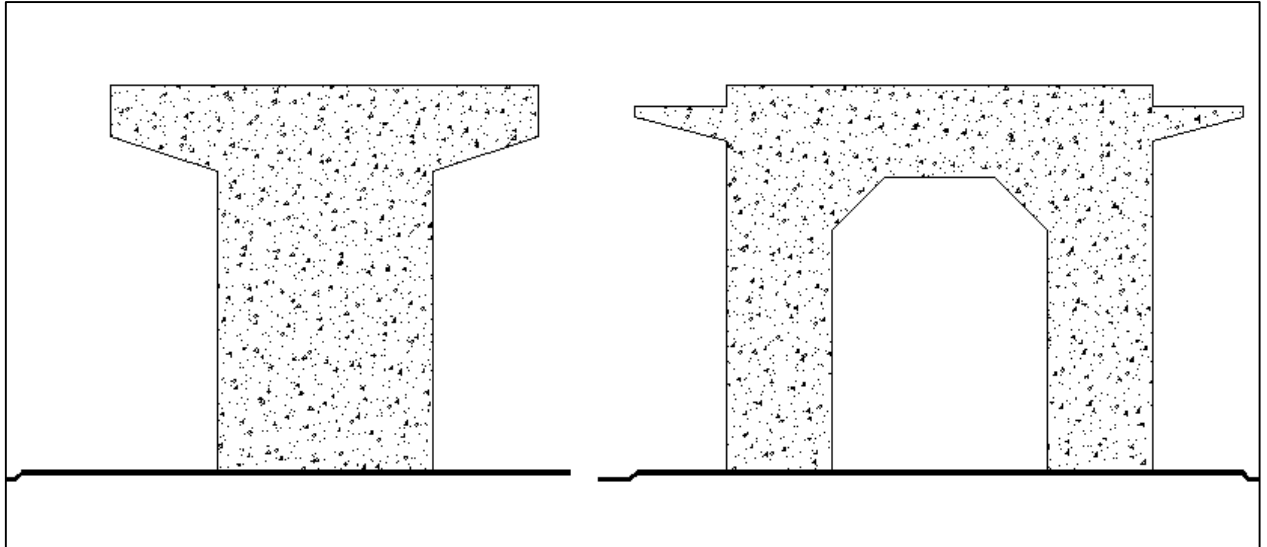
El eje de los rodillos transversales son paralelos al eje del horno; en el caso de hornos de menores dimensiones y que no cuentan con apoyos longitudinales se puede variar este ángulo (“calar”) de manera que tomen las fuerzas de inercia.



**Figura N°3. Esquema de apoyo longitudinal.**

Como se mencionó anteriormente el horno se apoya en cepas de hormigón armado, cepas que deben ser capaces de transmitir las cargas de operación producidas por el horno hacia las fundaciones. Las dimensiones depende de la elevación del horno y su tamaño, además existe más de un tipo de cepas que se muestran a continuación.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL</b>	
		<b>AICE-PRC-010-0</b>	<b>Página 8 de 19</b>



**Figura N°4. Esquema tipos de cepas.**

### **3. NORMAS Y DOCUMENTOS DE REFERENCIA**

Todos los diseños y detalles se deberán realizar con la última revisión de los documentos listados a continuación, los que forman parte de este Procedimiento de Diseño.


#### **3.1 Normas**

- NCh432 Of. 2010. Diseño Estructural – Cargas de viento
- NCh2369 Of. 2003. Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales
- NCh3171 Of. 2010. Diseño Estructural – Disposiciones generales y combinaciones de carga
- ACI 318-11. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary
- ACI 207.2R-95. Effect of Restrain, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete.

#### **3.2 Documentos**

- Ingeniería Sísmica, El caso del sismo del 3 de marzo de 1985. Dirigido por Rodrigo Flores A.



	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL</b>	
		<b>AICE-PRC-010-0</b>	<b>Página 9 de 19</b>

#### 4. CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO

Para el diseño del sistema de anclaje es necesario considerar lo siguiente:

- En los apoyos de rodillos laterales es necesario verificar el volcamiento considerando el sismo vertical. El caso limite es cuando el horno se apoya en un rodillo y en el opuesto la reacción se hace cero. Según NCh2369 puede aceptarse un coeficiente de seguridad igual o mayor a 1.2, este valor depende de la geometría y los coeficientes sísmicos
- Para diseñar el anclaje longitudinal puede descontarse de la fuerza sísmica total la fuerza de roce de los demás apoyos con un coeficiente de roce igual a 0.1 entre llanta y rodillo
- El espacio entre la llanta y el rodillo de empuje de arriba debe reducirse al mínimo posible de preferencia de 3mm para disminuir la carga de impacto. (De acuerdo a estudios teóricos este impacto puede duplicar la fuerza sísmica longitudinal).

Se debe solicitar al proveedor en forma preliminar y antes del proceso de compra del equipo, a lo menos la siguiente información:

1. Topes de la llanta: generalmente los rodillos tanto horizontales como transversales son a la vez utilizados para transmitir las cargas sísmicas a la cepa, y debe ser considerado por el proveedor en su diseño.
2. Rodamiento y Eje de los rodillos de apoyo: las mismas consideraciones anteriores.
3. Placa base: el skid (estructura de acero en donde se apoya el equipo rotatorio, que a su vez conecta el equipo con la cepa de apoyo) debe absorber las cargas de impacto producto de la aceleración sísmica.
4. Llave de corte o tope sísmico: generalmente estos equipos no tienen dispositivos para tomar el sismo; una buena alternativa es agregar un dispositivo como llaves de corte de manera que el skid se diseñe con este concepto.
5. Pernos de anclaje: Por lo ya señalado deben solo tomar cargas de tracción. Un problema adicional es la ubicación de estos en el skid, se deben dejar recesos en el hormigón para poder instalar e inspeccionar los pernos. La ubicación de los pernos no siempre es la más favorable y produce estrangulaciones en el hormigón.

Antiguamente no era posible diseñar rodillos con suficiente capacidad para resistir un sismo severo en la dirección longitudinal y se aceptaba que fueran partes que probablemente fallarían. Esto ya no es aceptable y debe el proveedor validar el sistema de anclaje.

También es necesario que el ancho de la llanta exceda en 60(cm) (De acuerdo con un análisis dinámico, si los rodillos fallan se pueden producir desplazamientos longitudinales del orden de 30cm), de esta manera se asegura que el horno siga apoyándose sobre los rodillos.

Si el horno deja de rotar durante un breve tiempo, del orden de 20 minutos, se producen distorsiones térmicas que lo pueden dañar severamente.

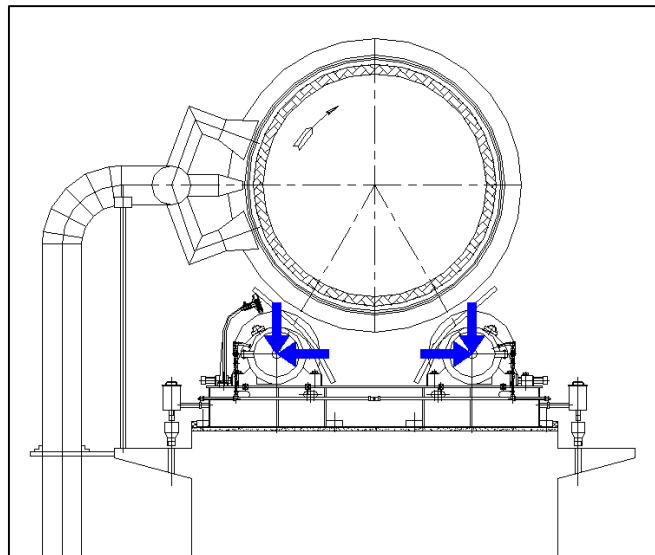
## 5. ESTADOS Y COMBINACIONES DE CARGA

### 5.1 Peso Propio (PP)

Esta consta de las cargas provenientes del peso de los elementos permanentes de la estructura como:

- Peso propio de la estructura tales como vigas, losas, muros, etc.
- Peso de los equipos
- Relleno sobre fundación.

Como ejemplo, la siguiente figura muestra un esquema de las cargas del horno.



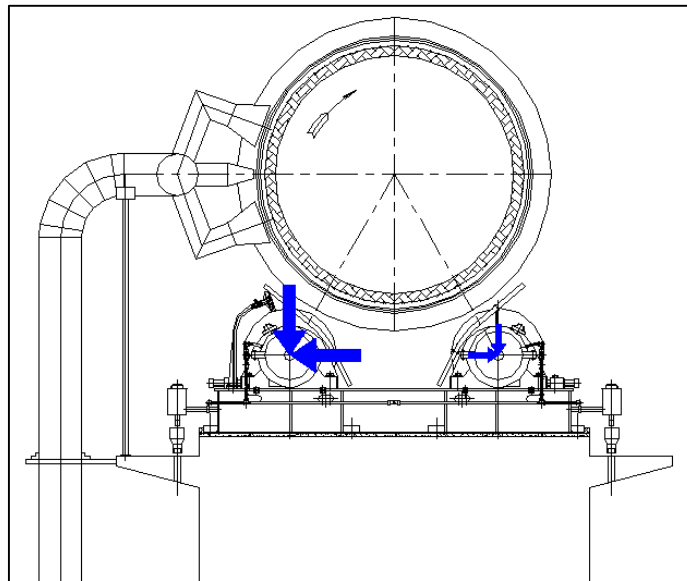
**Figura N°5. Esquema cargas de peso propio del horno.**

## 5.2 Sobrecarga (L)

Corresponde a la sobrecarga de uso en la plataforma, pasarelas y escaleras. Los valores se encuentran en los criterios de diseño del proyecto.

## 5.3 Operación Normal (OP)


Estas cargas provienen de la operación de motor y del material en el interior del horno. Cabe destacar que las fuerzas horizontales debido al peso de material al interior del horno debieran ser iguales en su magnitud, pero debido al giro del horno es posible que se genere un desbalance de las cargas con lo cual se carga un rodillo más que el otro, usualmente esa diferencia de carga es de un 10% del peso del material (este valor debe ser confirmado por el proveedor), lo cual se indica en el siguiente esquema:



**Figura N°6. Esquema cargas de operación del horno rotatorio.**

## 5.4 Cargas Sísmicas (Eh, Ev)

Generalmente se realiza un análisis estático con el valor máximo del coeficiente sísmico horizontal de diseño, pero para cepas de gran altura es posible utilizar un modelo de un grado de libertad con sus cargas tributarias para obtener el coeficiente sísmico.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL</b>	
		<b>AICE-PRC-010-0</b>	<b>Página 12 de 19</b>

Es importante destacar que los coeficientes sísmicos que prevalecen corresponden a los del proyecto.

El coeficiente horizontal  $C_h$  según norma NCh2369.Of2003 depende de los siguientes parámetros:

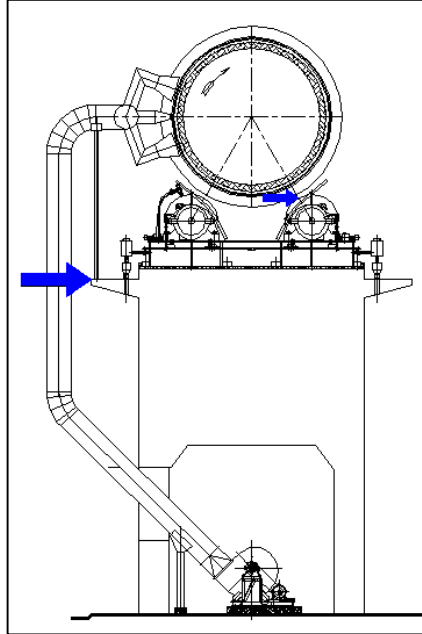
- Aceleración efectiva máxima del suelo ( $A_0$ , Zonificación Sísmica).
- Razón de Amortiguamiento ( $\varepsilon$ ).
- Factor de modificación de la respuesta ( $R$ ).
- Coeficiente de importancia ( $I$ ).
- Tipo de suelo.

Para el caso del sismo vertical, el coeficiente sísmico vertical ( $C_v$ ) corresponde según NCh2369 a:

$$C_v = \frac{2 A_0}{3 g} \times I$$

Es importante considerar que la carga sísmica del horno actúa sobre un único rodillo, dependiendo de la dirección del sismo. Esto se debe a que entre el horno y los rodillos no hay conexión rígida, por lo tanto, la transmisión de carga se realiza solo por el contacto entre ellos.

A continuación se muestra un esquema de cargas sísmicas sobre el horno rotatorio.




**Figura N°7. Esquema cargas sísmicas en el horno rotatorio.**

Se establece una tabla comparativa de los coeficientes sísmicos utilizados en algunos proyectos industriales.

**Tabla N°1. Tabla comparativa entre 3 hornos rotatorios realizados.**

		<b>Horno 1</b>	<b>Horno 2</b>	<b>Horno 3</b>
<b>Dimensiones</b>	Diámetro horno [m]	4.0	4.5	5.4
	Largo [m]	90	115	125
	Peso horno [Ton]	1370	1436	1822
<b>Parámetros sísmicos</b>	Factor de modificación de la respuesta (R )	3	3	-
	Amortiguamiento ( $\xi$ )	0.03	0.03	-
	Importancia (I)	1.2	1.2	-
<b>Coefficientes sísmicos</b>	Coefficiente horizontal (Ch)	0.34	0.36	0.42
	Coefficiente vertical (Cv)	0.32	0.27	0.28

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL</b>	
		<b>AICE-PRC-010-0</b>	<b>Página 14 de 19</b>

### 5.5 Viento (W)

De acuerdo a la norma o Criterios de Diseño aplicables al proyecto. En el caso de Chile, la norma correspondiente es la NCh432. En caso que el proyecto lo considere, es posible que se requieran estudios de viento.

Se deberá incluir esta carga en los elementos estructurales y horno expuestos al viento, en las direcciones de análisis.

### 5.6 Cargas por Temperatura (T)

Debido a que los equipos operan a altas temperaturas, las dilataciones o contracciones generan grandes cargas longitudinales en las cepas. La máxima carga sobre cepas de apoyo transversal depende del roce entre rodillo y llanta.

### 5.7 Combinaciones de Cargas

Las combinaciones de carga deberán estar estipuladas en los criterios de diseño del proyecto, y deberán incluir las requeridas por las distintas normas que estén involucradas en el diseño de la estructura (NCh2369, ACI-318, NCh3171, etc.) y de acuerdo al tipo de diseño (ASD, LRFD).

A continuación se muestran combinaciones según la norma NCh2369 tipos que se pueden utilizar en el diseño de los hornos rotatorios.

Combinaciones ASD:

- $PP + OP \pm Eh \pm Ev$
- $PP + OP + 0.25 \cdot SC \pm Eh \pm Ev$

Combinaciones LRFD:

- $1.2 \cdot (PP+OP) + 0.25 \cdot SC \pm 1.4 \cdot Eh \pm 1.4 \cdot Ev$
- $0.9 \cdot (PP+OP) \pm 1.4 \cdot Eh \pm 0.3 \cdot Ev$

Es importante destacar que las combinaciones deben considerar las cargas por temperatura, las combinaciones obtenidas de la norma NCh2369 (lo que es normativa) no consideran los esfuerzos internos, por el contrario las cargas obtenidas de la norma NCh3171 si los consideran.

## 6. ANALISIS

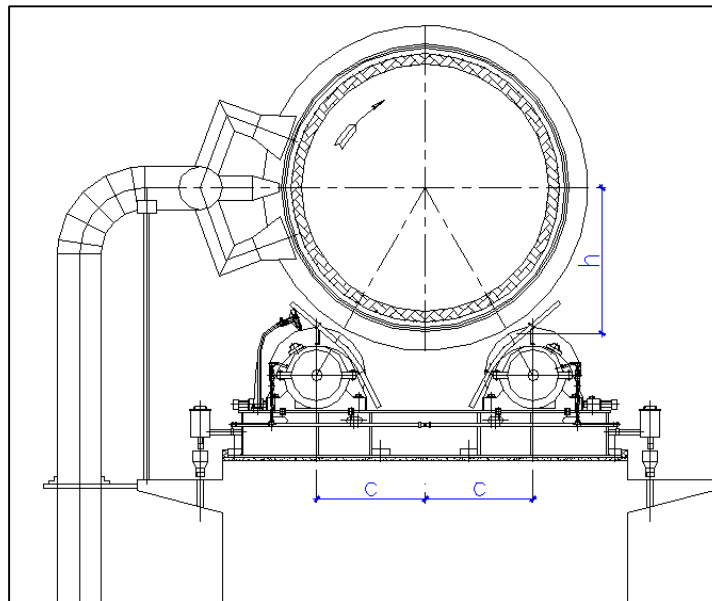
### 6.1 Verificación Volcamiento Horno

Esta hace referencia a evitar levantamientos y golpes alternativos en ambos lados, fenómeno conocido como zapateo. La verificación al volcamiento según la NCh2369 es:


$$S = \frac{(1 - C_v) \times c}{C_h \times h} \geq 1.2$$

Donde,

- c: corresponde a la distancia horizontal entre ejes horno y rodillo
- h: corresponde a la distancia vertical desde el eje del horno hasta tope superior de la circunferencia del rodillo
- Cv, Ch: corresponden a los coeficientes sísmicos vertical y horizontal respectivamente.



**Figura N°8. Esquema de distancias para obtener el volcamiento.**

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL</b>	
		<b>AICE-PRC-010-0</b>	<b>Página 16 de 19</b>

## 6.2 Verificación Estabilidad Global

Se debe asegurar que todas la cepas (el sistema cepa-horno rotatorio) sean globalmente estables tanto para cargas de operación como para cargas eventuales (sismo). Los factores de seguridad al deslizamiento, volcamiento y superficie de contacto de la fundación con el suelo, deben ser establecidos en los criterios de diseño del proyecto.


Los siguientes criterios de estabilidad solo deben ser utilizados para prediseños.

- Porcentaje mínimo de compresión estática: 100%
- Porcentaje mínimo de compresión sísmica: 80%
- Factor de seguridad mínimo al deslizamiento:  $FS = 1.5$
- Factor de seguridad mínimo al volcamiento:  $FS = 1.5$ .

Situaciones con valores menores a los establecidos en los criterio de diseño, deben ser validados por el ingeniero geotécnico y aceptados por el cliente.

Además se debe asegurar que la máxima presión estática y sísmica según corresponda obtenida con las combinaciones ASD sobre el suelo de fundación, no supere la presión de contacto admisible del suelo de acuerdo al estudio de mecánica de suelos preparado para el proyecto. En caso de no cumplir con lo anterior, se debe modificar la geometría de las fundaciones.



	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>FUNDACIONES DE SECADORES ROTATORIOS Y HORNOS DE CAL</b>	
		<b>AICE-PRC-010-0</b>	<b>Página 17 de 19</b>

## 7. DISEÑO

### 7.1 Losa de Fundación

- El diseño de fundaciones debe cumplir con los requerimientos del código ACI-318. Las combinaciones de carga utilizadas para el diseño en hormigón armado son LRFD.
- Se recomienda un espesor de tal manera que no requieran de refuerzo al corte, de lo contrario se debe reforzar según indicaciones del código ACI-318.
- La armadura por flexión deberá cubrir lo requerido en cada dirección, y ser mayor que el mínimo requerido por la sección. También se debe verificar disponer área mínima por efectos de retracción del hormigón dispuesto en el código ACI207-2R.

### 7.2 Muros, Cepas Columnas

- Las combinaciones de carga utilizadas para el diseño en hormigón armado son LRFD. El dimensionamiento de estos debe ser tal que cumpla con los desplazamientos máximos para cada dirección además soportar las cargas de servicio.
- La armadura por flexión deberá cubrir lo requerido en cada dirección, y ser mayor que el mínimo requerido por la sección.

### 7.3 Losa Plataforma de Operación

- La losa superior tiene recesos para introducir los pernos de anclaje, los cuales serán removibles.
- Se debe dejar embebido el inserto correspondiente que resistirá las cargas sísmicas horizontales.

### 7.4 Anclaje

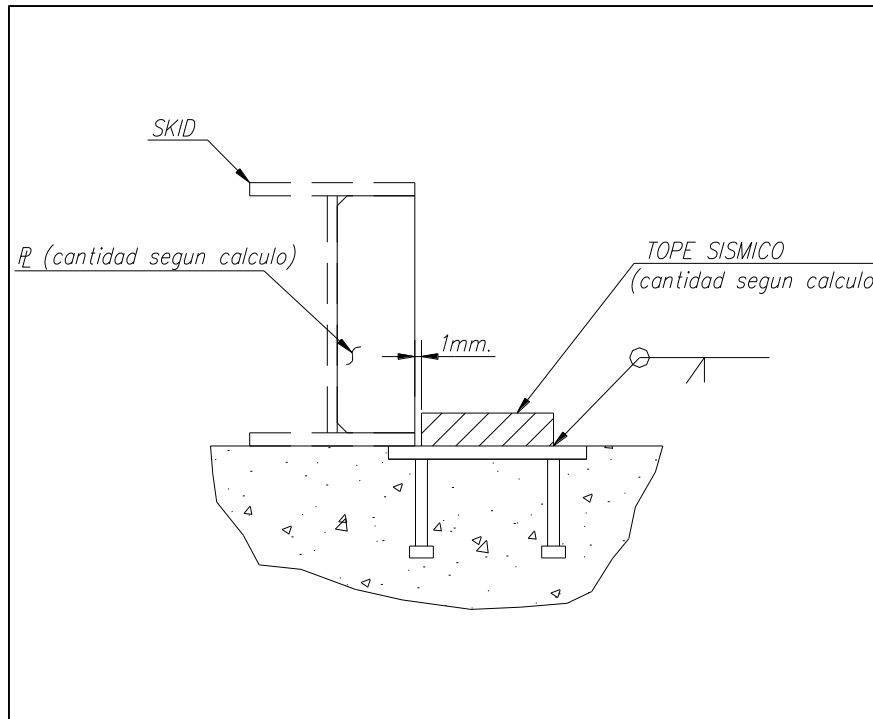
- La losa superior tiene pasadas (orificios) para colocar los pernos de anclaje, los cuales pueden ser removibles. Estos orificios generan estrechamientos en la losa los cuales dificultan el hormigonado. Una alternativa es dejar recesos para instalar los pernos y ser rellenados con mortero; en este caso el receso debe cumplir con el párrafo 8.6.7 de NCh2369.

**8. DISEÑO**

**Figura N°9:** Foto en apoyo, disposición equipo rotatorio.



**Figura N°10.** Foto disposición skid.



**Figura N°11. Esquema de posible tope sísmico, no exclusivo.**