



## **PROCEDIMIENTO DE DISEÑO**

### **SILOS DE ACERO**

**AICE-PRC-003-0**

**Revisión 0**

**VIGENCIA 23 DE ABRIL DEL 2015**



ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES  
COMITÉ TÉCNICO DE MINERÍA E INDUSTRIAS

## PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

### SILOS DE ACERO

<b>Rev.</b>	<b>Fecha</b>	<b>Emitido Para</b>	<b>Por</b>	<b>Revisor</b>	<b>CTMI</b>	<b>Presidente AICE</b>
A	21-08-2013	Revisión CTMI	P. Pineda	R. Montecinos	P. Pineda R. Montecinos	René Lagos
B	22-10-2014	Revisión Socios AICE	P. Pineda	R. Montecinos	P. Pineda R. Montecinos	René Lagos
0	23-04-2015	Difusión y Aplicación	P. Pineda	R. Montecinos	P. Pineda R. Montecinos	René Lagos

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 3 de 46</b>

## **PREFACIO**

El presente procedimiento de diseño – Silos de Acero – 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.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 4 de 46</b>

## ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
<b>1. ALCANCE Y CAMPO DE APLICACIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>2. DEFINICIONES.....</b>	<b>5</b>
<b>3. SIMBOLOGÍA.....</b>	<b>6</b>
<b>4. NORMAS Y DOCUMENTOS DE REFERENCIA.....</b>	<b>7</b>
<b>4.1 Normas Nacionales.....</b>	<b>7</b>
<b>4.2 Normas Internacionales.....</b>	<b>7</b>
<b>4.3 Libros.....</b>	<b>8</b>
<b>5. CONSIDERACIONES GENERALES.....</b>	<b>8</b>
<b>5.1 Clasificación.....</b>	<b>9</b>
<b>5.2 Información Requerida del Cliente.....</b>	<b>14</b>
<b>6. RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO SÍSMICO DE SILOS.....</b>	<b>19</b>
<b>6.1 Masa efectiva.....</b>	<b>19</b>
<b>6.2 Acción Sísmica.....</b>	<b>20</b>
<b>6.3 Determinación de Cargas Debido al Material Almacenado.....</b>	<b>23</b>
<b>6.4 Presiones Iniciales en Silos Llenados Excéntricamente.....</b>	<b>31</b>
<b>6.5 Presiones en Silos inducidas por el Flujo Simétrico de material durante la descarga..</b>	<b>34</b>
<b>6.6 Presiones debido al Flujo en Silos descargados Excéntricamente.....</b>	<b>38</b>
<b>7. DISEÑO ESTRUCTURAL.....</b>	<b>40</b>
<b>7.1 Programas Computacionales.....</b>	<b>40</b>
<b>7.2 Métodos de Diseño.....</b>	<b>41</b>
<b>7.3 Estado Límite Último (ULS).....</b>	<b>41</b>
<b>7.4 Estabilidad.....</b>	<b>41</b>
<b>7.5 Serviciabilidad (SLS).....</b>	<b>41</b>
<b>7.6 Fatiga.....</b>	<b>42</b>
<b>7.7 Cargas de Diseño.....</b>	<b>42</b>

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 5 de 46

## 1. ALCANCE Y CAMPO DE APLICACIÓN

Este procedimiento se aplica al diseño de silos de acero, estructuras ampliamente utilizadas en el proceso minero e industrial de proyectos de gran envergadura. Se incluye el diseño estructural de las planchas de acero que conforman el manto del silo, vigas o elementos atiesadores y soportes necesarios para su apoyo en las estructuras.

## 2. DEFINICIONES

**Ángulo de Reposo.** Corresponde al ángulo entre la superficie del material apilado y el plano horizontal. Notar que el ángulo de reposo no es un parámetro característico del comportamiento del material dentro del silo, y no debe confundirse con el ángulo de fricción interna, el cual sí es un parámetro relevante para determinar el comportamiento del material.

**Ángulo Efectivo de Fricción Interna.** Corresponde al ángulo entre la abscisa y la tangente a la curva que representa la relación entre la resistencia al corte y la tensión normal que actúa sobre el material. Dentro de sus atributos se encuentra el hecho de que controla las características del flujo y las presiones dentro del material.

**Coefficiente de Fricción.** Razón entre la tracción ejercida por la fricción y la presión ejercidas por el material sobre la pared del silo.

**Coefficiente de Empuje Lateral.** Razón entre la tensión horizontal en el sólido en la vecindad con la pared del silo (considerada constante a través del sólido en cada nivel) y la tensión vertical media (la tensión vertical varía a través del silo en un nivel dado), por lo tanto, este coeficiente es definido para el equilibrio global de una rebanada de material de espesor  $\Delta z$  a través de la sección transversal del silo.

**Transición.** Discontinuidad presente en la unión entre la pared vertical del cilindro y el chute del silo.

**Transición Efectiva.** Región en la cual el canal de flujo de material intercepta la pared del silo. Esta zona se caracteriza esencialmente por la presencia de un incremento significativo de la presión del material sobre la pared del silo.

**Zona de Flujo Primario.** Zona de flujo correspondiente al material que se moviliza inmediatamente una vez iniciada la descarga del silo.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 6 de 46</b>

**Zona de Flujo Secundario.** Zona de flujo correspondiente al material que se moviliza una vez realizada la descarga de la zona de flujo primario. En esta zona el material se encuentra estático durante la descarga de la zona primaria.

**Zona Muerta.** Corresponde a la zona de material que no puede ser descargada del silo mediante gravedad.

**Superficie Efectiva.** Nivel al cual el silo sería llenado si el mismo volumen de material contenido en éste tuviera una superficie superior plana (sin la inclinación dada por el ángulo de reposo).

### 3. SIMBOLOGÍA

- SW Peso propio del silo y su estructura de soporte estructura.
- DS Carga permanente estructural (e.g. grating, barandas, plancha diamantada, etc.)
- DM Carga permanente mecánica (e.g. chutes, motores, correas/alimentador, poleas, monorrieles, fluidizadores, etc.)
- LL Sobrecarga de uso en plataformas y pasillos (e.g. mantención)
- SL Cargas asociadas a servicios (e.g. luminarias, piping, escalerillas eléctricas, etc.)
- ML Carga de material en silos, correas/alimentador, alimentadores, etc.
- MS Carga de derrame de material.
- CL Carga de trabajo de monorrieles.
- BO Tensión de correas/alimentador/alimentador en operación.
- BS Tensión de correas/alimentador en la partida.
- BN Tensión de correas/alimentador vacías o no-operacional.
- BT Tensión de la correa asociada al torque máximo del motor.
- VL Cargas asociadas a la vibración inducidas por equipos o alimentadores vibratorios.
- BC Chute bloqueado.
- TL Cargas de temperatura.
- SL Cargas de nieve.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 7 de 46</b>

SS Cargas asociadas a asentamiento del suelo.

WL Carga de viento.

EL Carga sísmica.

#### **4. 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. Si existieran contradicciones entre estos documentos se aplicará el que resulte más restrictivo.

La lista de documentos que se presenta a continuación no cubre todos los aspectos del diseño. Estándares adicionales que formen parte de los documentos del Proyecto o especificaciones del Cliente, también deben ser considerados durante el proceso de diseño.

##### **4.1 Normas Nacionales**

A continuación se listan los códigos nacionales normalmente empleados en el diseño de estructuras industriales. Notar que el presente listado no constituye el total de normas aplicables a la práctica chilena.

- NCh203 Acero para uso estructural - Requisitos
- NCh432 Diseño Estructural - Cargas de Viento
- NCh1537 Diseño estructural de edificios - Cargas permanentes y sobrecargas de uso
- NCh2369 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales
- NCh3171 Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas

##### **4.2 Normas Internacionales**

Los códigos de diseño empleados como complemento a las normas nacionales son los siguientes:

- ACI 313 Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials
- AISC 303 Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges
- AISC 341 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings
- AISC 358 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 8 de 46</b>

- AISC 360            Specifications for Structural Steel Buildings
- AS 3774            Loads on bulk solids containers
- ASCE 7             Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures
- DIN 1055-6        Actions On Structures - Part 6: Design Loads For Buildings And Loads In Silo Bins
- EN 1991            Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 4: Actions in silos and tanks
- AISC                Base Plate and Anchor Rod Design (Second Edition)
- AISC                High Strength Bolts - A Primer for Structural Engineers
- AISC                Welded Connections - A Primer for Engineers
- AISC                Detailing for Steel Construction
- ASCE7             Design of Buildings for Wind
- CEMA                Belt Conveyors for Bulk Materials
- SPFA                Steel Plate Engineering Data

#### **4.3 Libros**

A continuación se indican libros de autores reconocidos en el diseño de silos, los cuales pueden ser empleados como referencia para el análisis y diseño.

- "Tubular Steel Structures - Theory and Design", by M.S. Troitsky, D. Sc., Chapter 7 bins and bunkers.
- ACI 313-97 Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials.
- Steel silos with different aspect ratios: II — behavior under eccentric discharge. A. J. Sadowski, J. M. Rotter.

#### **5. CONSIDERACIONES GENERALES**

El cálculo de los empujes del material sobre el silo se debe realizar en conformidad a los informes preparados por los especialistas mecánicos en comportamiento de flujos de mineral.

Para el análisis sísmico se debe utilizar la Norma Chilena NCh2369.Of2003, considerando la zona sísmica según tabla 5.2 y tipo de suelo obtenido de la tabla 5.4. Lo anterior aplica al diseño de los elementos de soporte/apoyo de los silos en el caso de estar ubicadas al interior

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 9 de 46

de edificios de proceso o para la estructura soportante en caso de ser parte de un modelo en donde solo participan los silos como estados de cargas.

Para el diseño de las planchas que forman el manto del silo no se considera el sismo, práctica que se sustituye con las siguientes consideraciones:

Las paredes de los silos se diseñan en condición llena hasta el borde, sin considerar el ángulo de reposo del material, es decir, suponiendo que la superficie del material permanece horizontal, lo que en la práctica no ocurre. Lo anterior además del hecho que normalmente se considera una fracción del peso del material como sísmico, que en general es de un 80%. En el caso de las cargas sísmicas se puede considerar un incremento en las tensiones admisibles de 33%.

## 5.1 Clasificación

Existe en la literatura una serie de criterios para clasificar los silos de acuerdo a su forma, uso, material contenido, funcionalidad, etc. La siguiente clasificación se basa en el trabajo de M. Rotter y los códigos europeo y australiano, cuya finalidad es establecer los parámetros más relevantes normalmente empleados para determinar la distribución y magnitud de la presión ejercida por el material sobre la pared del silo. Dado que la literatura y normativa internacional cubren en extenso la formulación para establecer las presiones que ejerce el material sobre silos metálicos, las siguientes secciones sólo se limitarán a describir aquellos aspectos más importantes asociados al comportamiento del material almacenado. En general, los silos pueden clasificarse según los siguientes criterios:

### 5.1.1 Geometría

Corresponde a la razón entre la altura efectiva del material almacenado y el diámetro del silo. En aquellos casos en que el contenedor no sea cilíndrico, corresponde a la razón entre la altura efectiva y el mayor diámetro inscrito al interior del Silo.

De acuerdo a este criterio los silos pueden clasificarse como:

Chatos:  $\frac{h_b}{d_c} < 1.0$

Medianos:  $1.0 \leq \frac{h_b}{d_c} < 3.0$

Esbeltos:  $\frac{h_b}{d_c} \geq 3.0$

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 10 de 46</b>

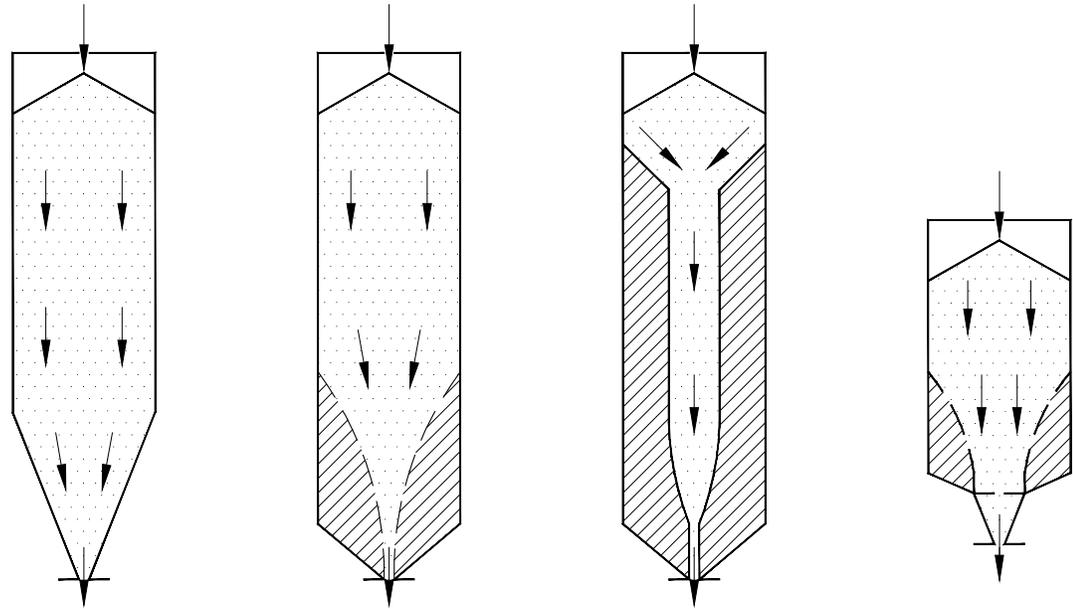
La clasificación anterior tiene efectos significativos sobre los siguientes aspectos:

- a.1 Presiones normales sobre la pared vertical del silo.
- a.2 Reducción de presiones sobre la pared del silo debido a su flexibilidad (esta situación es aplicable en el caso de silos bajos).
- a.3 Presión sobre fondo plano.
- a.4 Elección de valores característicos de la fricción interna del material y fricción del material contra la pared del silo. Estos parámetros deben ser escogidos de un rango de valores posibles en función de maximizar el efecto buscado. Por ejemplo, si se busca maximizar la presión normal, es posible que la elección de un valor característico para el ángulo de roce con la pared del silo no sea la misma para silos esbeltos y bajos.

### **5.1.2 Tipo de Flujo.**

Las presiones durante el llenado de un silo pueden ser anticipadas con razonable precisión por medio de la formulación de Janssen; sin embargo, cuando un silo es vaciado, es muy probable que las presiones sobre la pared en condición de flujo excedan considerablemente las presiones estáticas. Por esta razón, es muy importante poder clasificar los sistemas de acuerdo al tipo de flujo posible, los cuales se enumeran a continuación:

- b.1 Flujo Másico: patrón de flujo en el cual la zona primaria ocupa la totalidad del material almacenado por el silo; por lo tanto, al momento de la descarga, todo el material contenido es movilizadado.
- b.2 Flujo Tipo Canal: patrón de flujo en el cual la zona primaria se intercepta con la pared del silo sólo al nivel de la superficie libre.
- b.3 Flujo Tipo Embudo: patrón de flujo en el cual la zona primaria se intercepta con la pared del silo por debajo de la superficie libre.
- b.4 Flujo Expandido: patrón de flujo que combina flujo másico en el chute con flujo tipo embudo sobre la transición con el chute.
- b.5 Flujo Excéntrico: patrón de flujo en el cual el eje vertical del canal de flujo no coincide con el eje vertical del silo.
- b.6 Flujo Excéntrico: patrón de flujo en el cual el eje vertical del canal de flujo no coincide con el eje vertical del silo.



**Flujo Másico**

**Flujo Tipo Embudo**

**Flujo Canal**

**Flujo Expandido**

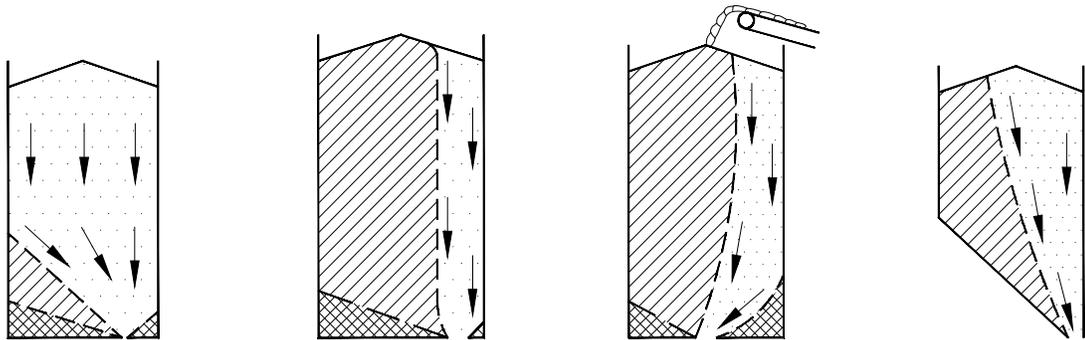


Zona de Flujo Primario



Zona de Flujo Secundario

Figura 6.1: Tipos de Flujo Simétrico



**Flujo Semi-Másico**

**Flujo Tipo Embudo**

**Flujo Canal**

**Flujo Expandido**



Zona de Flujo Primario



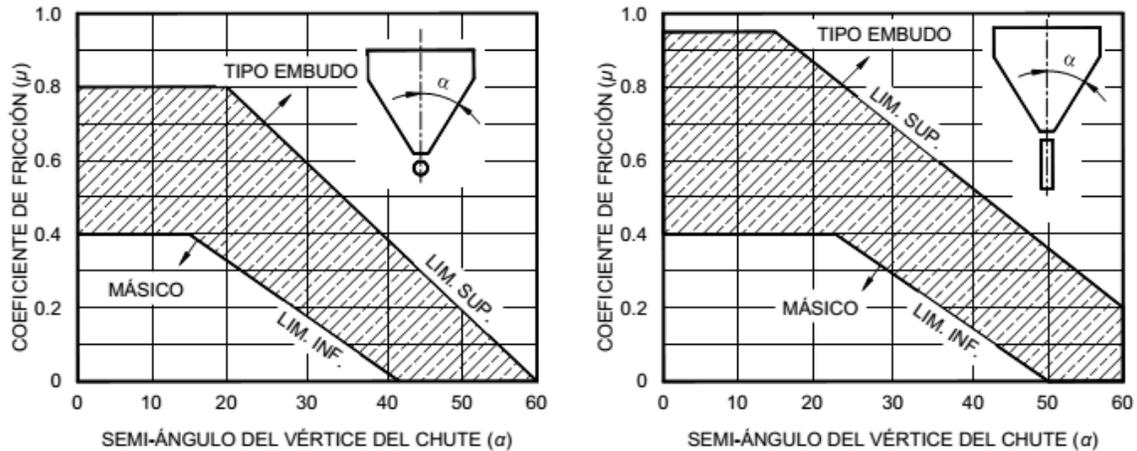
Zona de Flujo Secundario



Zona Muerta

**Figura 1. Tipos de Flujo Asimétrico.**

La posibilidad de cambios en el tipo de material y rugosidad de las paredes a lo largo de la vida útil del silo, que resulte en una variación del tipo de flujo, es un elemento que debe ser tomado en cuenta durante la etapa de diseño del silo. Los gráficos de la Figura 3.1 muestran, de manera aproximada, los límites entre los flujos másico y tipo embudo. La región comprendida entre ambos límites corresponde a una zona de flujo inestable.



**Figura 2. Límites aproximados entre flujo másico y tipo embudo para chute circular y rectangular.**

### 5.1.3 Geometría del Flujo.

- c.1 Simétrico: patrón de flujo caracterizado por una trayectoria de partículas durante la descarga, que es simétrico con respecto a al eje del silo o contenedor. Este tipo de flujo está presente en silos de sección circular con abertura de descarga concéntrica.
- c.2 Planar: patrón de flujo caracterizado por una trayectoria de partículas simétrica con respecto a un plano vertical a través del eje longitudinal de un chute rectangular.
- c.3 Excéntrico: patrón de flujo en que la trayectoria de partículas es asimétrica con respecto al eje longitudinal del silo, o con respecto a un plano vertical a través de éste.
- c.4 Superficie Excéntrica: superficie libre excéntrica debido a excentricidad en el llenado o vaciado del silo. Este es un caso típico en silos alimentados por correas/alimentador transportadoras.

### 5.1.4 Rugosidad de pared.

La rugosidad de la superficie interior del silo puede ser clasificada como pulida, suave, áspera o corrugada, dependiendo del valor de la rugosidad (en  $\mu\text{m}$ ) medido en la superficie. Silos metálicos debieran ser normalmente clasificados como suaves o ásperos.

La siguiente tabla muestra la clasificación de los silos de acuerdo a la rugosidad de sus paredes.

**Tabla 1. Designación de tipo de superficie de acuerdo a rugosidad.**

Valor característico		
Acabado superficial	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Materiales Típicos
Pulido	0.01 a 1	Acero inoxidable, aluminio, acero al carbono galvanizado.
Suave	1 a 10	Acero al carbono ligeramente corroído, acero pintado.
Áspera	10 a 1000	Planchas con costillas verticales, superficies de acero con pitting.
Corrugado	>1000	Superficies de acero o aluminio con costillas horizontales.

Tal como en el caso del flujo, la rugosidad de la pared del silo es variable en el tiempo, y puede verse considerablemente afectada por la corrosión o deterioro mecánico. Nuevamente en este caso, el diseñador debe evaluar la condición probable que genere el efecto más adverso para el diseño.

Como regla general en lo concerniente a planchas o elementos de desgaste, el diseñador debe considerar que estas pueden ser destruidas o removidas durante la vida útil del silo, y por lo tanto, el diseño debe asegurar la integridad estructural del silo sin estos elementos.

### **5.1.5 Flexibilidad de pared.**

La flexibilidad de la pared del silo en la dirección tangencial afecta la magnitud de las presiones de material, por lo que los silos pueden clasificarse como rígidos, semi-rígidos y flexibles.

En particular, uno de los efectos más severos sobre los silos durante la descarga de material, es el peak de presiones locales asimétricas sobre la pared en la zona de transición efectiva, que en el caso de silos rígidos y semi-rígidos no pueden ser disipadas.

En el contexto de la incertidumbre de las presiones generadas durante la descarga, códigos tales como el europeo y australiano, emplean “multiplicadores” de presión con el objeto de cuantificar las altas presiones de material creadas por la asimetría del flujo.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 14 de 46</b>

### **5.1.6 Configuración de la abertura de descarga.**

Los diferentes tipos de aberturas en chutes de descarga pueden clasificarse según su geometría y ubicación con respecto al eje longitudinal del silo. En general, los tipos de abertura son:

- f.1 Circulares o cuadrados concéntricos con respecto al eje del silo, diseñados para flujo uniforme a través de toda la sección de descarga.
- f.2 Abertura del tipo ranura o rectangular ubicada sobre el eje del silo y diseñada para descarga uniforme en todo el largo de la sección de descarga.
- f.3 Abertura circular o cuadrada excéntrica con respecto al eje del silo. Resulta en flujo excéntrico y cargas no-uniformes en el silo.
- f.4 Abertura situada en la pared del silo. Al igual que el caso anterior, resulta en flujo excéntrico y cargas no-uniformes.

### **5.1.7 Mecanismos de flujo.**

Existen una serie de mecanismos para iniciar y mantener el flujo, los cuales se pueden clasificar como:

- g.1 Gravedad.
- g.2 Vibradores mecánicos.
- g.3 Inyección de aire.
- g.4 Impulsión (por aire, golpes mecánicos, etc.)
- g.5 Combinación de lo anterior.

## **5.2 Información Requerida del Cliente**

El Cliente para el cual el silo es diseñado debe establecer claramente su uso en el proceso de la planta y cualquier otro factor relevante incluyendo posibles cambios de uso durante su vida útil.

Es necesario contar con el apoyo de un Especialista en almacenamiento de materiales.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 15 de 46</b>

En general, el Cliente deberá definir lo siguiente:

### **5.2.1 General**

- a) La naturaleza del material granular a ser almacenado.
- b) La masa del sólido a almacenar (definiendo su volumen de operación).
- c) Restricciones de geometría del silo.
- d) Requerimientos asociados a materiales de construcción o planchas de desgaste y protección.
- e) Requerimientos asociados a venteo en el techo, ya sea para llenado o disipación para posibles explosiones de polvo.
- f) Cualquier cambio posible en el sólido, procesos de llenado y vaciado que puedan ser introducidos con posterioridad.

### **5.2.2 Condiciones de Operación**

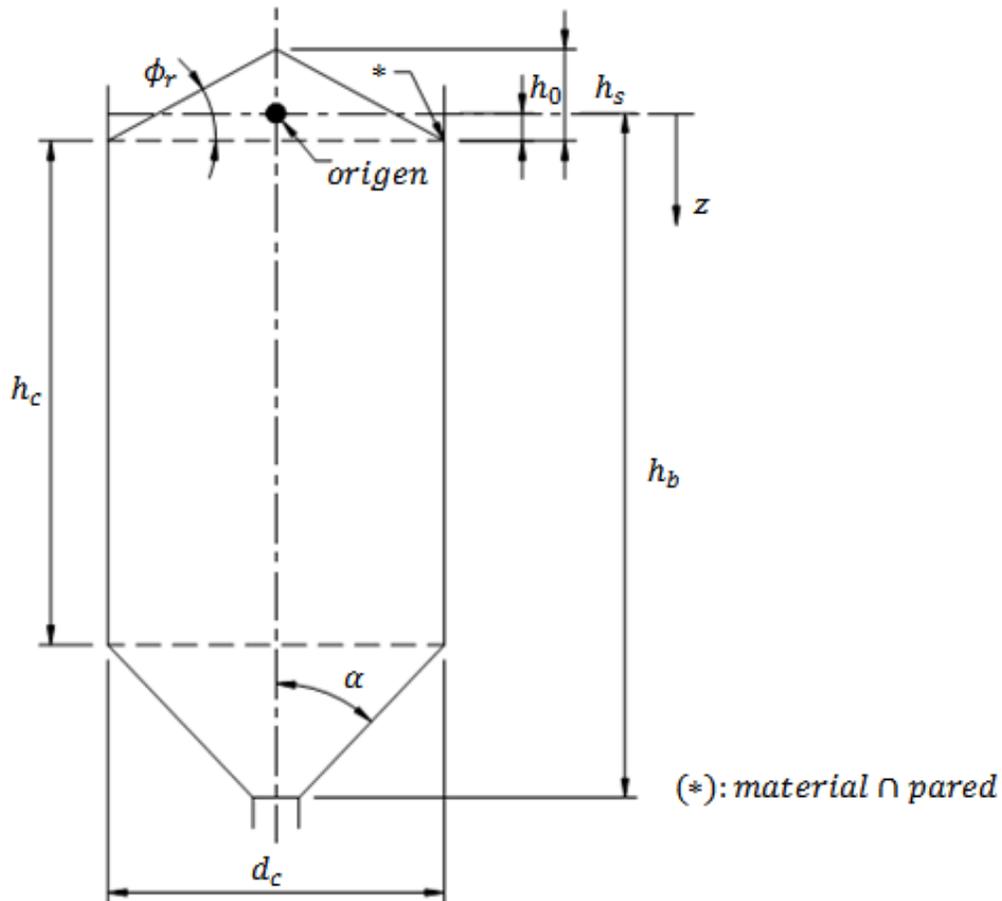
- a) Cualquier requerimiento diferente a almacenamiento (aireación, mezclado, enfriado, etc.)
- b) Requerimientos asociados a la ubicación y método de llenado del silo.
- c) Rango y variabilidad del sólido almacenado.
- d) El Cliente debe asistir al diseñador en la predicción de posibles cambios los materiales almacenados.
- e) Los valores extremos de la distribución granulométrica de las partículas.
- f) Las densidades máxima y mínima esperadas.
- g) Cualquier otra característica del sólido que pueda tener consecuencias relevantes en el diseño (abrasivo, corrosivo, fluidez, etc.).

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 16 de 46

### 5.3 Parámetros de Diseño

La Figura 7.1 muestra los parámetros geométricos más relevantes para el diseño de un silo. Tales parámetros se describen a continuación:

- a) Diámetro del mayor círculo inscrito dentro del silo ( $d_c$ )
  
- b) Altura de la sección cilíndrica en contacto con el material ( $h_c$ ).
  
- c) Altura efectiva del material medida desde la zona de descarga hasta la superficie efectiva del material que se encuentra sobre la región en que no hay contacto con la pared del silo ( $h_b$ ).
  
- d) Altura de la superficie efectiva del material medida desde la zona en que el material deja de estar en contacto con la pared del silo ( $h_o$ ).
  
- e) Semi-ángulo del vértice del chute ( $\alpha$ ).
  
- f) Altura de la superficie de llenado ( $h_s$ ).
  
- g) Coordenada vertical medida desde la superficie efectiva hacia el extremo inferior del silo ( $z$ ).



**Figura 4. Parámetros geométricos característicos del silo**

Para el cálculo de la superficie efectiva es necesario calcular el cociente entre volumen de material que no está en contacto con la pared del silo, y el área de la sección horizontal del silo.

Adicional a los parámetros geométricos del silo, se requiere de las siguientes propiedades del material:

- Peso unitario del material ( $\gamma$ ).
- Ángulo efectivo de fricción interna ( $\phi_i$ ).
- Ángulo de fricción de la pared del silo ( $\phi_w$ ).
- Ángulo de reposo del material ( $\phi_r$ ).

Para cada uno de las propiedades del material se debe emplear al menos dos valores representativos en la determinación de las cargas: el mayor y menor valor característico dentro del rango de valores que cualquiera de las propiedades del material pueda exhibir. La excepción a esta regla es el peso unitario del material, cuyo valor siempre debe ser el mayor dentro del rango de valores característicos.

Los valores característicos seleccionados para el diseño deben combinarse de modo de producir el efecto de carga más desfavorable sobre el silo. Al menos las siguientes combinaciones de propiedades deben considerarse en el diseño:

**Tabla 2. Efectos de carga v/s Propiedades para el diseño.**

Efecto de carga para el diseño		Valor característico		
		Ángulo de fricción de la pared del silo ( $\phi_w$ )	Ángulo efectivo de fricción interna ( $\phi_i$ )	Coefficiente de Empuje Lateral (k)
Cilindro	Máxima presión normal sobre la pared	Mínimo	Mínimo	Máximo
	Máxima tracción friccional sobre la pared	Máximo	Mínimo	Máximo
	Máxima fuerza vertical sobre el chute	Mínimo	Máximo	Mínimo
Chute	Máximas presiones durante llenado	Máximo valor para chute	Mínimo	Mínimo
	Máximas presiones durante vaciado	Mínimo valor para chute	Máximo	Máximo

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 19 de 46</b>

## 6. RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO SÍSMICO DE SILOS.

Los Silos que contienen material granular pueden comportarse muy diferente a estanques que contengan alguna clase de líquido. Materiales finos, tales como cemento, ceniza, grano, etc., pueden experimentar una respuesta convectiva – tal como en estanques – muy limitada. Sin embargo, materiales más gruesos, tales como carbón, hierro, etc., posiblemente respondan significativamente en un modo inercial.

Para abordar la gran cantidad de incógnitas relativas al diseño y comportamiento de dispositivos destinados al almacenamiento de materiales granulares frente a cargas sísmicas, es que se han elaborado las siguientes recomendaciones basadas en los códigos de diseño usados con mayor frecuencia en la práctica.

### 6.1 Masa efectiva.

La masa efectiva asociada a silos llenos de material granular puede ser considerada como sigue:

- a) En el caso de silos apoyados en el suelo, y destinados a almacenar sólidos: 80-90% de la masa almacenada actuando en el centro volumétrico de la masa total. Se recomienda usar 80% para propósitos generales y 90% cuando se trate de minerales (ref. C15.7.9.3.3, NEHRP Recommended Seismic Provisions, 2009).
- b) En el caso de silos elevados montados sobre estructura: 100% del material almacenado actuando como masa rígida sobre su centroide volumétrico.

No obstante lo anterior, y dado que no existe información experimental suficiente para establecer una definición precisa de la masa efectiva que debe ser empleada en el diseño de recipientes de material granular, a continuación se presentan tres estrategias muy similares, cuyos alcances difieren levemente.

#### 6.1.1 Criterio basado en NZSEE.

Tal como se indica al inicio de esta sección, los recipientes de material granular presentan una respuesta convectiva limitada o nula, y posiblemente su respuesta frente a aceleraciones basales sea muy similar a aquella asociada al modo impulsivo en un estanque de líquido.

De acuerdo al texto “Recommendations of a NZSEE Study Group on Seismic Design of Storage Tanks”, los recipientes de material granular poseen típicamente razones de aspecto comparativamente altas en relación a sus pares que almacenan líquidos ( $h_c/d_c \geq 2.0$ ). Por tal motivo, el comportamiento de un recipiente de material granular puede ser aproximado al de un estanque de similares características que contenga un fluido de la misma densidad que el material almacenado, ya que la respuesta del fluido será principalmente impulsiva.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 20 de 46</b>

En definitiva, si se asume que la respuesta al modo convectivo es despreciable, la masa total del material almacenado debe ser considerada actuando en conjunto con el recipiente en el modo impulsivo rígidamente conectada a sus paredes.

### **6.1.2 Criterio basado en ASCE7.**

Por su parte, ASCE 7 “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” en su cláusula 15.7.9.3.2 establece que, para silos apoyados sobre el suelo, una porción de la masa asociada al material almacenado actuará en forma efectiva junto con el recipiente. El porcentaje de masa efectiva se relaciona con las características físicas del material contenido, la razón de aspecto del recipiente y la intensidad del sismo. Asimismo, se establece en la cláusula 15.7.9.3.2 el uso de un factor de densidad efectiva (i.e. la fracción de masa del material almacenado que es acelerado por un sismo) que debe ser determinado de acuerdo a ACI 313 (80% de la masa total).

En el caso de silos elevados montados sobre una estructura, la masa asociada al material almacenado debe considerarse como una masa rígida que actúa en su centroide volumétrico.

### **6.1.3 Criterio basado en ACI 313.**

La determinación de la masa efectiva del material contenido en silos apoyados directamente sobre el suelo, a la que se hace referencia en ASCE7, se basa en la cláusula 4.4.8 del código ACI 313. En esta cláusula se indica que la masa efectiva debe ser considerada como el 80% del material almacenado cuando el silo está lleno y que la ubicación de su centroide corresponde a su centroide volumétrico.

Según el comentario del código, la carga sísmica debida a la masa del material cuando el silo está lleno es menor de lo que sería si la masa correspondiese a un sólido. La reducción de la fuerza lateral es atribuida a la eventual pérdida de energía ocasionada por la fricción entre partículas.

La definición de masa efectiva establecida por el comité ACI 313 fue hecha en base a sólo un set de pruebas de laboratorio en el que se reportaron factores de masa efectiva dentro del rango 0.22-0.54 (Chandrasekaran, A. R., and Jain, P. C., “Effective Live Load of Storage Materials Under Dynamic Conditions”, Indian Concrete Journal, Bombay, India, Vol. 42, No. 9, September, 1968). Considerando el valor relativamente bajo de estos valores, el factor 0.80 fue acordado por el comité ACI 313. Una serie de ensayos posteriores a la aprobación del código ACI 313-77 reportaron factores dentro del rango 0.54-0.90, con lo que se determinó que un 80% del total de la masa almacenada es un valor razonable para estimar la masa efectiva del material (Harris, E. C., and von Nad, J. D., “Experimental Determination of Effective Weight of Stored Materials for Use in Seismic Design of Silos,” ACI Journal, Proceedings, Vol. 82, No. 6, November-December, 1985). Estos ensayos fueron realizados en base a pruebas sobre silos a escala, rellenos con arena o trigo, conectados a bases rígidas.

## **6.2 Acción Sísmica.**

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 21 de 46

### 6.2.1 Fuerza Sísmica Horizontal.

La fuerza sísmica horizontal debe ser determinada a partir de lo establecido en las cláusulas 5.3.2 y 5.3.3 de Nch2369, para aquellos casos en que los silos estén fundados directamente sobre el suelo; o bien, de acuerdo a los requisitos descritos en el Capítulo 7 del mismo código cuando, cuando los silos se encuentren montados sobre estructuras.

La razón de amortiguamiento crítico y el factor de reducción de respuesta que deben emplearse en la determinación de la fuerza sísmica horizontal son los siguientes:

- Para silos de hormigón armado fundados directamente sobre el suelo debe considerarse  $R = 3.0$  y  $\xi = 0.05$ .
- Para silos de acero soldados fundados directamente sobre el suelo debe considerarse  $R = 3.0$  y  $\xi = 0.02$ .
- Para silos de acero remachados o apernados fundados directamente sobre el suelo debe considerarse  $R = 3.0$  y  $\xi = 0.03$ .
- Para silos de acero montados sobre estructuras debe considerarse  $R_p = 3.0$  para el silo, y  $R = 3.0$  si la estructura está arriostrada en forma simétrica (no similar a edificio), o  $R = 2.0$  si la estructura está arriostrada en forma asimétrica (no similar a edificio). Para ambos casos la razón de amortiguamiento crítico es  $\xi = 0.03$ .
- Para silos de acero montados sobre estructuras asimilables a edificios, debe considerarse  $R_p = 3.0$  para el silo, y los valores de  $R$  y  $\xi$  definidos para el sistema estructural correspondiente, siempre y cuando el peso sísmico del silo más el material contenido, no excedan el 25% del peso sísmico de todo el sistema, de otro modo, los parámetros de respuesta deben escogerse de acuerdo a lo indicado en d).

### 6.2.2 Distribución de la Fuerza Sísmica Horizontal.

La fuerza  $F_p$  determinada de acuerdo a (1) y (2) puede ser distribuida sobre las paredes del silo de forma constante en la altura  $h_b$ , ignorando el ángulo de reposo del material.

En la edición de 1995 del EN1991-4 “Actions in Silos and Tanks” se establece una formulación similar a la siguiente silos circulares y rectangulares:

- Presiones normales debida a sismo en paredes circulares.

$$p_{s,max} = 0.5\gamma d_c C_p \quad (1)$$

$$p_{s,\theta} = p_{s,max} \cos \theta \quad (2)$$

Donde,

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 22 de 46

$p_{s,max}$  = presión máxima debida a la acción del sismo sobre el silo.

$C_p$  = coeficiente sísmico determinado de acuerdo a (1) y (2).

y donde el ángulo  $\theta$  tiene su origen sobre el eje del silo, y su dominio está definido por el intervalo  $[0,2\pi]$ .

b) Presiones normales debida a sismo en paredes rectangulares.

$$p_s = \pm 0.5\gamma b C_p, \text{ para sismo perpendicular al lado largo} \quad (3)$$

$$p_s = \pm 0.5\gamma l C_p, \text{ para sismo perpendicular al lado corto} \quad (4)$$

Notar que las presiones definidas en (3) y (4), son positivas en el costado del silo hacia donde actúa la dirección del sismo, y negativas en el costado opuesto. De este modo, las presiones de material debidas al sismo se suman o restan a las presiones debidas al material almacenado (llenado o descarga, dependiendo del uso del silo).

### 6.2.3 Fuerza Sísmica Vertical.

La fuerza sísmica vertical puede ser estimada considerando un coeficiente sísmico constante en todo el volumen de material, igual a  $2/3 A_0$ .

### 6.2.4 Conexiones, Anclajes y Fundaciones.

La fuerza sísmica sobre conexiones, anclajes o fundaciones, debe determinarse a partir de la aplicación de la fuerza sísmica de diseño actuando sobre el centroide volumétrico del material almacenado.

Para el cálculo de reacciones de silos montados sobre estructuras, se debe tener en cuenta la rigidez relativa del silo y la estructura soportante. En particular, para aquellos casos en que el silo se apoye sobre un sistema de vigas, se recomienda incrementar en al menos un 20% las reacciones producto del peso del silo y el momento volcane.

Los anclajes de silos en hormigón deben cumplir con los requisitos de ductilidad establecidos en D.3.3.4 en ACI 318, y 8.6 en NCh2369.

Sólo un tercio de los pernos de anclaje en hormigón, o conexión con estructura metálica, se considera efectivo para resistir la fuerza sísmica que actúa sobre el silo. Alternativamente, se puede hacer uso de llaves de corte o topes sísmicos, en cuyo caso anclajes o pernos de conexión pueden considerarse actuando sólo en tracción.

### 6.2.5 Silos de Hormigón.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 23 de 46</b>

Para el caso de silos de hormigón armado y pretensado, se deben emplear las disposiciones de diseño establecidas en ACI313.

### 6.2.6 Silos de Acero Soldados.

En el caso de silos de acero soldado, la resistencia de las paredes debe estimarse de acuerdo a lo dispuesto en AWWA D100, con la excepción de las tensiones admisibles tangenciales, las que deben estimarse de acuerdo a lo dispuesto en API650.

### 6.2.7 Silos de Acero Apernados.

En el caso de silos de acero apernados, la resistencia de las paredes debe estimarse de acuerdo a lo dispuesto en AWWA D103.

## 6.3 Determinación de Cargas Debido al Material Almacenado

Las presiones especificadas a continuación se basan en las disposiciones del Eurocódigo ENV 1991-4 1995 y Estándar Australiano AS3774-1996, así como en algunas recomendaciones extraídas de los trabajos de Jenike y Rotter.

### 6.3.1 Cargas Iniciales en Silos Llenados Simétricamente

#### a) Presiones Iniciales Normales Sobre Pared Vertical

Presiones Normales: la siguiente ecuación basada en la formulación de Janssen representa la presión inicial normal sobre las paredes del silo ejercida por el material almacenado en condiciones de llenado simétrico:

$$p_{ni} = \gamma r_c c_z / \mu \quad (5)$$

donde,

$p_{ni}$  = presión inicial normal.

$\gamma$  = peso unitario del material.

$c_z = 1 - e^{(-z/z_0)}$  función de profundidad de Janssen.

$\mu = \tan \phi_w$  coeficiente de fricción del muro.

$z$  = profundidad efectiva

$z_0 = r_c / (\mu k)$  profundidad característica

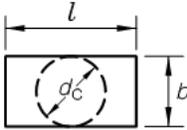
$r_c = 0.25d_c$  dimensión característica de silo

$k = 1.1(1 - \sin \phi_i) \geq 0.40$  coeficiente de empuje lateral casos 1,2 y 5 en Tabla 3

$k = \frac{1 - \sin \phi_i}{1 + \sin \phi_i}$  coeficiente de empuje lateral casos 3 y 4 en Tabla 3

El valor de la dimensión característica del silo es también aplicable a contenedores de sección cuadrada. En aquellos casos en que la sección del contenedor es rectangular, dos diferentes valores de  $r_c$  deben ser empleados para la determinación de las presiones de material, uno referido al lado corto y otro al lado más largo. La Tabla 3 muestra las expresiones para determinar la dimensión característica en función del diámetro  $d_c$  del círculo inscrito en la sección transversal del silo.

**Tabla 3. Dimensión característica**

Sección Transversal	Dimensión Característica ( $r_c$ )	Diagrama
Circular	$0.25d_c$	
Cuadrado	$0.25d_c$	
Rectangular		
Lado corto ( $b$ )		
$l/b = 1.5$	$0.27d_c$	
$l/b = 2.0$	$0.30d_c$	
$l/b = 4.0$	$0.33d_c$	
$l/b = 5.0$	$0.35d_c$	
Lado largo ( $l$ )		
$l/b = 1.5$	$0.30d_c$	
$l/b = 2.0$	$0.33d_c$	
$l/b = 4.0$	$0.40d_c$	
$l/b = 5.0$	$0.50d_c$	

Donde,

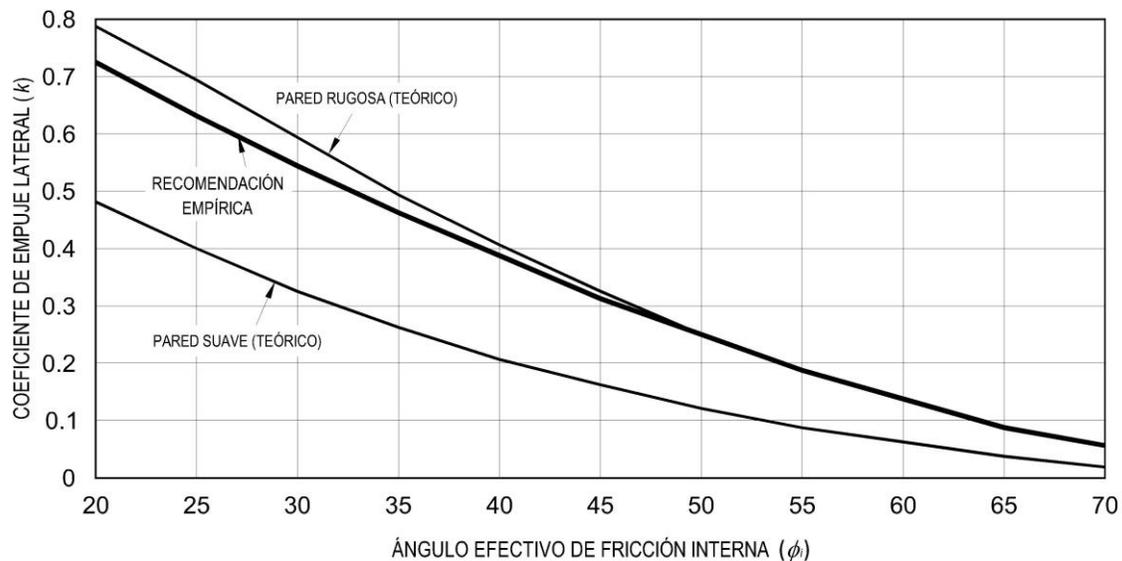
$k = 1.1(1 - \sin \phi_i)$  Coeficiente de empuje lateral

$\geq 0.40$

Para aquellos casos en que se requiera maximizar la presión normal y tracción friccional en la pared del cilindro

El valor del coeficiente de empuje lateral es diferente en cada estándar de diseño. En particular, el nuevo código Europeo contiene un procedimiento para determinar el coeficiente de empuje lateral medio, así como los factores de conversión para establecer los valores característicos máximo y mínimo. En caso no contar con información experimental que indique un valor más preciso de  $k$ , se sugiere adoptar la expresión de arriba y limitar su valor inferior a 0.4 para aquellos casos en que la magnitud de  $k$  contribuya a maximizar algún efecto de carga (ref. Tabla 3).

La siguiente figura, extraída del libro “Guide for Economic Design of Metal Silos” (M. Rotter) muestra algunas expresiones para determinar el valor del coeficiente de empuje lateral en función del ángulo de fricción interna.



**Figura 5. Estimación del coeficiente de empuje lateral en función del ángulo de fricción interna.**

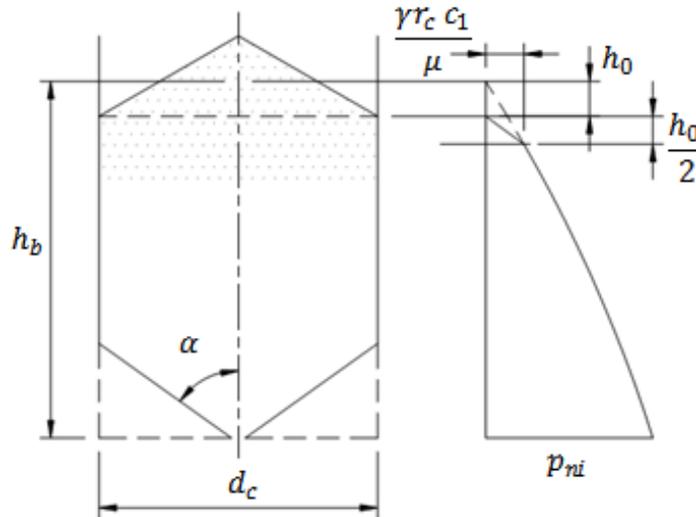
Presiones Normales en Silos Bajos: para casos en que  $\frac{h_b}{d_c} < 1.0$  las presión en la región más elevada del silo en contacto con el material puede considerarse nula. La transición a la ecuación 8.1.1 puede tomarse como una línea recta hasta una profundidad de  $z = 1.5h_0$ . Por lo tanto,

$$p_{ni} = 0 \quad (z < h_0)$$

$$p_{ni} = \left( \frac{z-h_0}{0.5h_0} \right) \left( \frac{\gamma r_c c_1}{\mu} \right) \quad (h_0 \leq z < 1.5h_0) \quad (6)$$

donde,

$$c_1 = 1 - e^{(-1.5h_0/z_0)}$$



**Figura 6. Distribución inicial de presiones en un silo bajo**

Notar que la elección de  $z = 1.5h_0$  es una simplificación de una ecuación cuya solución no puede ser escrita en forma explícita. Dicha ecuación se obtiene de igualar la ecuación 9.1.1(1) con  $p_{ni} = \gamma(z - h_0)$ .

La ecuación que resulta de igualar ambas expresiones es:

$$\frac{h_{LJ}}{kz_0} + e^{(-h_{LJ}/z_0)} = 1 + \frac{h_0}{kz_0}$$

donde,  $h_{LJ}$  corresponde a la profundidad medida desde la superficie efectiva en que la distribución hidrostática (libre de fricción) alcanza a la presión de Janssen (Linear-Janssen).

a) Presiones normales en techos: en aquellos casos en que la pendiente de techo exceda el mínimo ángulo de reposo del material, es posible que se generen que el material almacenado ejerza presión sobre el techo del silo. Esta presión se considera actuando normal al techo y magnitud puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$p_{nr} = 0.1\gamma z_c \tag{7}$$

donde,

$z_c$  = distancia vertical medida desde el punto más alto de contacto con el material

Notar que al tomar  $z_c$  medido desde el punto más alto del techo se obtienen valores conservadores para la presión de diseño sobre el techo.

Se recomienda analizar el techo por separado y no incorporar la presión sobre el techo en el modelo de análisis con el objeto de no generar fuerzas verticales de levante que contrarresten el efecto de las cargas gravitacionales y de fricción.

En ciertos casos las presiones iniciales normales pueden verse incrementadas debido al llenado rápido con sólidos poco permeables y mezcla neumática. Las presiones normales que resultan de estos casos se describen a través de (d) y (e).

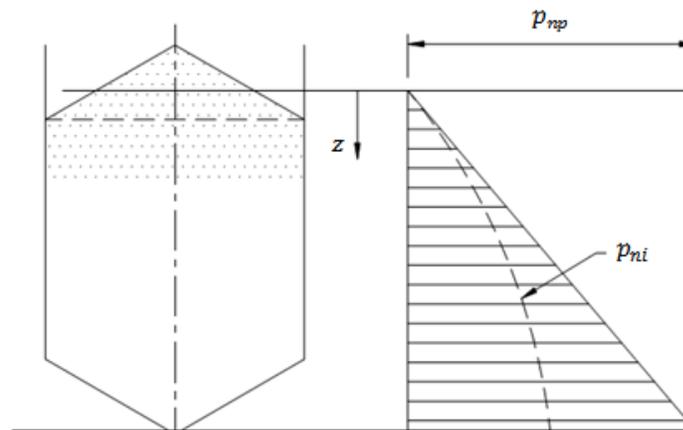
b) Presiones normales debido a llenado rápido: en aquellos casos en que el sólido almacenado es fino y poco permeable (más del 50% de las partículas bajo los 50 micrones), el llenado rápido puede producir una distribución de presiones similar a la hidrostática cerca de la superficie. En caso de que no se cuente con información experimental, se recomienda en hacer uso de las consideraciones que resulten más conservadoras entre el caso en que no hay llenado rápido, y el caso en que existe aireación o fluidización, tal como se describe en e).

c) Presiones normales debido a fluidización o aireación: en aquellos casos en que se emplee algún mecanismo de fluidización dentro del silo (e.g. homogenización de cemento), las presiones normales ejercidas por el material deberán ser:

$$p_{np} = 0.8\gamma z \quad (8)$$

donde,

$p_{np}$  = presión normal debida a fluidización o mezcla neumática.



**Figura 7. Distribución de presiones para mezcla neumática (fluidización).**

Para el caso en que se evalúa las presiones normales debida a fluidización durante la descarga, no debe aplicarse el multiplicador de presiones de descarga, tal como se señala más adelante.

**6.3.2 Fricción Inicial sobre Paredes Verticales.**

$$p_{qi} = \mu p_{ni} \quad (9)$$

En que  $p_{ni}$  se obtiene empleando las consideraciones definidas en la Tabla 3, Caso 2.

**6.3.3 Fuerzas Verticales en Silos Debido a Fricción sobre Paredes Verticales.**

En aquellos casos en que se realicen cálculos manuales, la fuerza vertical en la pared del silo debida a la fricción, deberá calcularse a partir de la siguiente expresión:

$$f_{vm}(z) = \int_0^z p_{qi} dz \quad (10)$$

**6.3.4 Presión Vertical en Material Almacenado.**

Las siguientes expresiones son útiles para calcular la presión vertical ejercida por el material en el fondo del silo o a nivel de la transición, tal como es el caso de la ecuación (11).

$$p_{vi} = \gamma r_c c_z / (\mu k); \text{ silos medianos y esbeltos} \quad (11)$$

$$p_{vi} = \gamma z; \text{ silos bajos} \quad (12)$$

Notar que para el cálculo de la ecuación (11) se debe hacer uso de los parámetros del Caso 3 en la Tabla 3.

**6.3.5 Presiones Normales sobre Paredes de Chutes.**

La presión normal sobre las paredes del chute a una profundidad  $z_h$  medida bajo transición es:

$$p_{nhi} = k_h (\gamma z_h + p_{vit}) \quad (13)$$

donde,

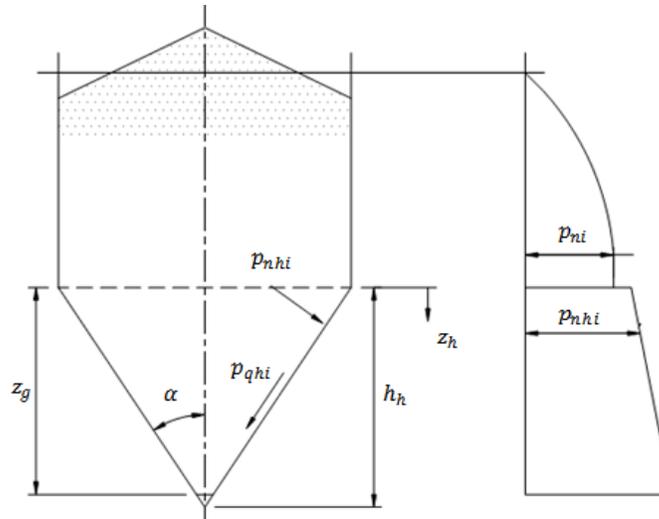
$$k_h = \tan \alpha / (\tan \alpha + \mu_h) \quad (14)$$

$\mu_h$  = coeficiente de fricción entre el material y la pared del chute.

$p_{vit}$  = presión vertical calculada en la transición.

Notar que el modelo de presiones presenta una discontinuidad en el valor de las presiones normales en la transición, es decir, cuando  $z = h_0 + h_c$  y  $z_h = 0$ .

En el cálculo de  $p_{nhi}$  se debe emplear el menor valor de  $\mu_h$ , y en que  $p_{vit}$  ha sido obtenido a partir de los parámetros característicos descritos en el Caso 4 en la Tabla 3.



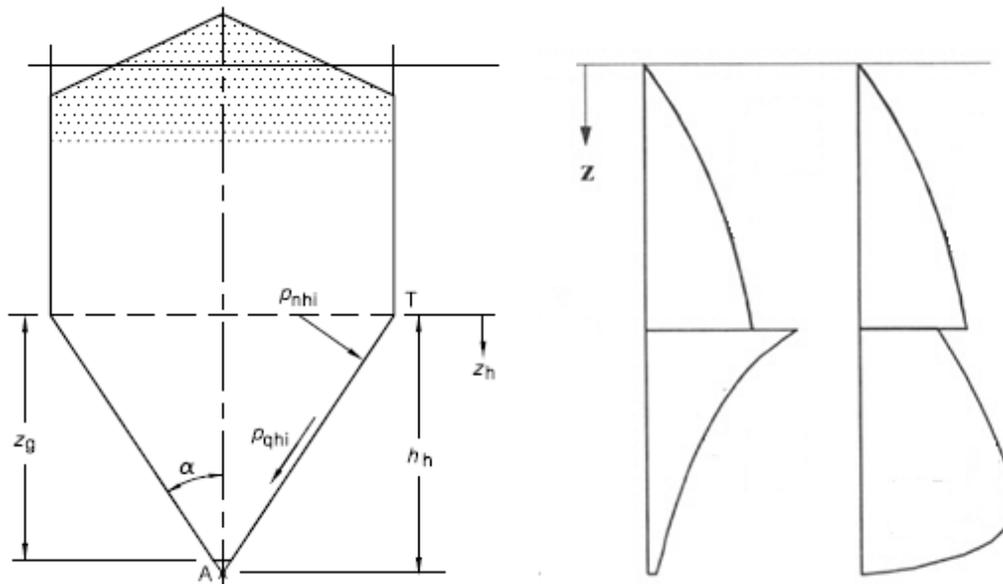
**Figura 8. Distribución de presiones en chute con sobrecarga dada por material contenido en cilindro.**

En la formulación anterior no existe diferenciación entre chutes de paredes con inclinación pronunciada y sin inclinación pronunciada. El primer caso se distingue debido a que las presiones son controladas por el roce entre el material y la pared del chute (ya sea por consolidación del material o durante el flujo de descarga). En el segundo caso, la poca inclinación del chute no permite que se desarrolle completamente la fricción entre las paredes de éste y el material almacenado.

La fórmula que describe de manera más adecuada las presiones verticales existentes dentro del chute en función de la inclinación de sus paredes está dada por la siguiente expresión:

$$p_{vi} = \frac{\gamma h_h}{n-1} \left[ \left( \frac{h_h - z_h}{h_h} \right) - \left( \frac{h_h - z_h}{h_h} \right)^n \right] + p_{vit} \left( \frac{h_h - z_h}{h_h} \right)^n \quad (15)$$

En la Figura 8.6 la curva de presiones verticales en el chute es convexa para el caso de un chute muy inclinado y cóncava para el caso de un chute más plano. El parámetro que controla la forma de la curva corresponde a "n", el que a su vez es función de la fricción efectiva del chute con el material, así como de la inclinación de las paredes de éste.



**Figura 9. Distribución de presiones en chute al considerar inclinación de las paredes.**

Si bien la formulación de presiones que toma en consideración la inclinación del chute es más completa y precisa, la sensibilidad de los resultados en función del valor de los parámetros tanto del material, como del silo, hacen que sea recomendable adoptar el primer método, de naturaleza más sencilla - verificación del equilibrio es muy simple - y resultados más conservadores.

### 6.3.6 Fricción Inicial sobre Paredes del Chute.

La fricción sobre la pared del chute está dada por la siguiente expresión:

$$p_{qhi} = \mu_h p_{nhi} \quad (16)$$

Las fuerzas de fricción obtenidas de la ecuación (16), en que  $\mu_h$  es máximo, deberán emplearse en el diseño de los elementos de desgaste y sus fijaciones al chute.

### 6.3.7 Presión Normal sobre Paredes Extremas en Chutes Ranurados.

La presión normal sobre las paredes extremas en un chute ranurado a una profundidad  $z_h$  medida bajo transición es:

$$p_{nhi} = 0.3(1 + k_m)(\gamma z_h + p_{vi}) \quad (17)$$

donde,

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 31 de 46</b>

$$k_m = \min[0.5(0.5/(1 + \mu \cot \alpha) + 0.4), 1.0] \quad (18)$$

$\alpha$  = semi-ángulo de las paredes laterales del chute.

$p_{vi}$  = presión vertical calculada en la transición.

#### 6.4 Presiones Iniciales en Silos Llenados Excéntricamente.

El proceso de llenado de un silo normalmente conduce a un arreglo de material asimétrico, cuyos efectos sobre las presiones ejercidas sobre las paredes deben ser estudiadas.

A continuación se describe la manera en que es posible estimar las presiones ejercidas por el material almacenado dentro del silo, así como determinar la geometría de una pila excéntrica en la parte superior del silo. Notar que la formulación señalada a continuación es adecuada para contenedores circulares, lo que no implica que no pueda ser adaptada a otro tipo de geometrías.

##### 6.4.1 Trayectoria de los Sólidos durante el Llenado.

La geometría de la trayectoria del sólido puede ser representada por el esquema de la Figura 10, donde la altura de referencia  $h_p$  es tomada como la posición del inlet y las coordenadas verticales son medidas a partir de este nivel. Las coordenadas horizontales son medidas desde el eje del silo y son todas positivas en una dirección.

En la medida que el material penetra en el silo, éste lo hace con velocidades horizontal y vertical  $u_o$  y  $v_o$  respectivamente. Estas velocidades debiesen ser calculadas para la peor condición esperable, en la que la excentricidad de llenado resultante es máxima.

Por otro lado, se asume que las partículas de material al momento de impactar la pila existente se acomodan de modo de mantener el ángulo de reposo del material, y que existe un detector ubicado en  $(x_d, y_d)$  que se al activarse detiene el proceso de llenado.

La coordenada  $x_p$  del tope de la pila de material cuando el silo está lleno, puede ser determinada por medio de la siguiente expresión:

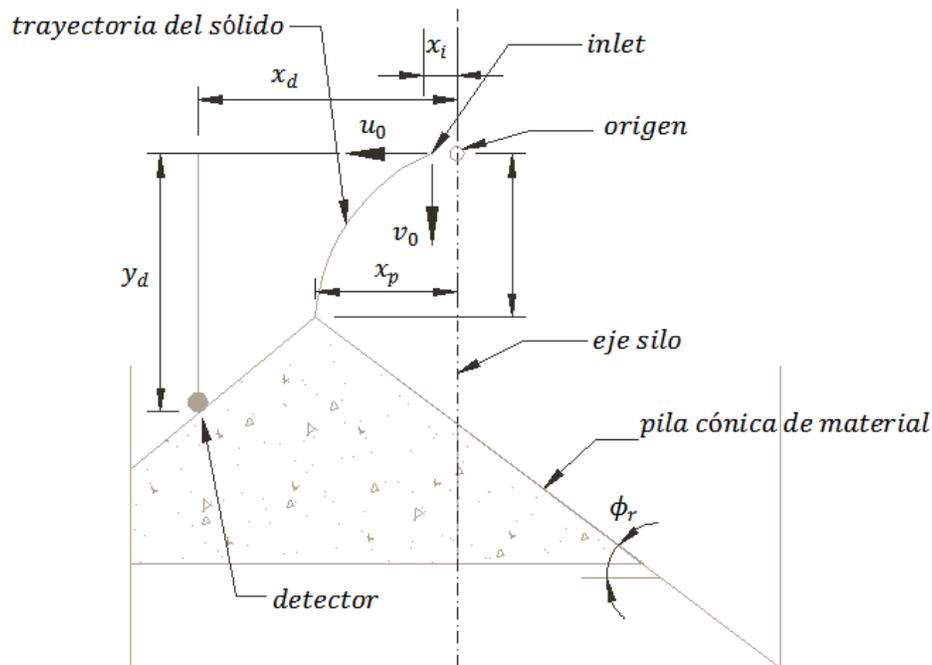
$$x_p = +x_i + \frac{u_o(nu_o \tan \phi_r + v_o)}{g} \left\{ n \sqrt{1 + 2g \frac{y_d + n(x_d - x_i) \tan \phi_r}{(nu_o \tan \phi_r + v_o)^2}} - 1 \right\} \quad (19)$$

en la cual  $n = +1$  si el detector se encuentra en el lado más cercano a la pila desde el inlet ( $x_p > x_d$ ), y  $n = -1$  en caso contrario ( $x_p < x_d$ ). La aceleración de gravedad se denota como  $g$ .

La excentricidad de la pila es finalmente:

$$e_i = |x_p| \quad (10)$$

En las ecuaciones anteriores,  $x_i$ ,  $x_d$  y  $x_p$  toman valores negativos cuando se encuentran al otro lado del eje del silo (ver Figura 10). Del mismo modo,  $u_o$  y  $v_o$  pueden tomar valores negativos de ser necesario.



**Figura 10. Trayectoria del material durante el llenado del silo**

En aquellos casos en que la velocidad horizontal sea nula, la excentricidad de llenado corresponde a la ubicación del inlet con respecto al eje del silo, es decir,  $e_i = |x_i|$ .

#### 6.4.2 Presiones Iniciales Normales sobre pared vertical.

La presión inicial normal sobre las paredes de silos chatos e intermedios, ejercida por el material almacenado en condiciones de llenado excéntrico está representada por la siguiente ecuación:

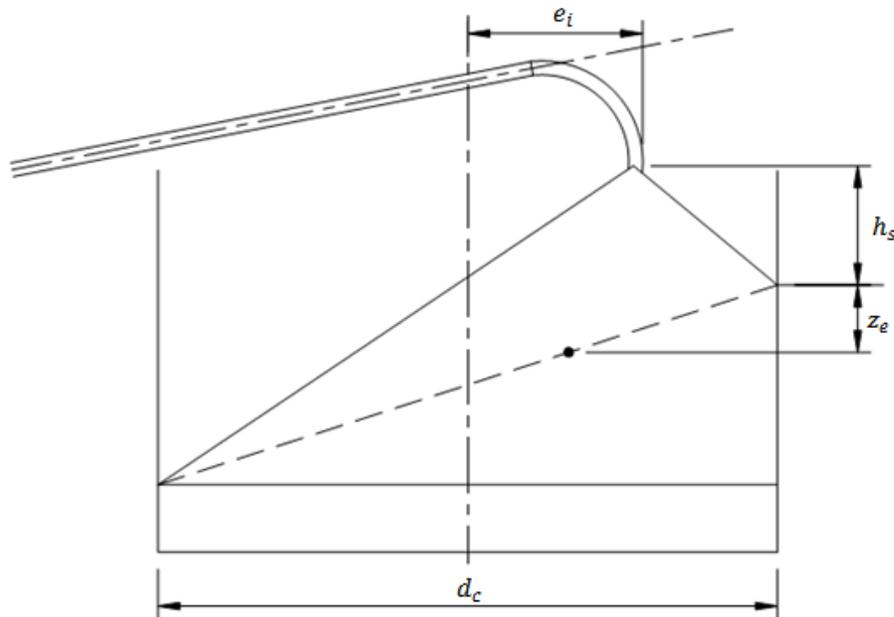
$$p_{ni} = \gamma r_c c_{ze} / \mu \quad (11)$$

donde,  $c_{ze} = 1 - e^{-(z-z_e)/z_0}$  (12)

función de profundidad de Janssen excéntrica.

os coeficientes de fricción  $\mu$  y empuje lateral  $k$  corresponden al mínimo y máximo valor característico asociado al material (ver caso 1 en Tabla 3).

El valor del parámetro  $z_e$  que modifica la coordenada vertical para representar la excentricidad del llenado, depende de la posición alrededor de la circunferencia, tal como lo muestra la Figura 9.8, y se calcula como la distancia vertical entre el punto de contacto silo-material más elevado.



**Figura 11. Silo “chato” llenado en forma excéntrica.**

La superficie efectiva del material para efectos de encontrar el origen de la coordenada  $z$  deberá calcularse en base a la altura  $h_0$  sobre el punto más alto en que el material está en contacto con la pared del silo. El valor de  $h_0$  se obtiene de la siguiente ecuación:

$$h_0 = 0.25h_s(1 - e_i/2r_c)(1 - r_c/d_c) \quad (13)$$

Notar que cuando la excentricidad es máxima, es decir  $e_i = 0.5d_c$ , el valor de  $h_0$  es 0 (la dimensión característica de un silo circular es  $r_c = 0.25d_c$ ).

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 34 de 46

En el caso de contenedores circulares, el origen de la coordenada circular  $\theta$  será fijado bajo el punto más alto en que exista contacto entre el material y las paredes del silo, de modo que la coordenada  $z_e$  se puede expresar de la siguiente forma:

$$z_e = e_i \tan \phi_r (1 - \cos \theta) \quad (14)$$

#### 6.4.3 Fricción sobre Paredes Verticales en Silos Llenados Excéntricamente.

Las fuerzas de asociadas a la fricción entre el material almacenado y las paredes verticales de un silo llenado en forma excéntrica pueden ser estimadas por medio de la siguiente expresión:

$$p_{qi} = \gamma r_c c_{ze} \quad (15)$$

en que  $c_{ze}$  corresponde a la función de profundidad de Janssen, cuyo valor se obtiene de la fórmula (12), y el empuje lateral  $k$  es calculado por medio de considerar el caso 2 de la Tabla 3.

#### 6.5 Presiones en Silos inducidas por el Flujo Simétrico de material durante la descarga.

##### 6.5.1 Método del Multiplicador de Flujo para la determinación de las Presiones.

La comprensión del fenómeno que gobierna las presiones durante la descarga de un silo aún no es del todo resuelta, de modo que su conocimiento representa un desafío sustancial.

Lo que sí es conocido, es que las presiones normales a la pared aumentan considerablemente si el flujo es másico, y posiblemente el incremento sea aún mayor cuando el flujo es mixto, en especial cerca de la zona de transición efectiva. En silos con presencia de flujo del tipo canal, este incremento de presiones internas parece ser significativamente menor.

Este aumento de presiones internas en flujos másicos y mixtos es, en la mayoría de los casos, altamente asimétrico, incluso en aquellas configuraciones en que la simetría debiera controlar. Estas presiones asimétricas demandan resistencia a la flexión en paredes gruesas tales como las de silos de hormigón armado; no obstante, en silos de paredes flexibles - tal como ocurre en el caso de silos de acero - la estrategia de diseño es menos clara. Esto se debe al hecho de que se desconoce que presiones asimétricas locales son disipadas por el movimiento de una pared flexible y cuáles no lo son. Dentro de este contexto, existen buenas razones para creer que bajo condiciones de llenado y descarga simétricas, la condición de diseño más severa está dada por flujo de descarga mixto. Bajo esta condición, la transición efectiva concentra altas presiones locales muy difíciles de disipar, así como también una leve asimetría en el canal de flujo, el que a su vez provoca una asimetría en las presiones sobre la pared del silo.

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 35 de 46</b>

Debido a esta incertidumbre, los procedimientos actuales en la literatura y códigos de diseño han adoptado una estrategia de diseño basada en el uso de "factores de sobrepresión" - o "multiplicadores de flujo" - y "parches" asimétricos de presiones adicionales aplicadas en cualquier punto del silo, con el propósito de forzar el diseño a tomar en consideración la flexión en las paredes.

A diferencia de lo presentado en las secciones siguientes, el código ACI 313-97 presenta una metodología muy sencilla para el cálculo de silos de hormigón armado. Esta metodología consiste en estimar todas las presiones asociadas al flujo por un factor de 1.5, o valores más bajos en aquellos casos en que pueda demostrarse que tal factor es satisfactorio, pero en ningún caso menor que 1.35.

En caso de que se decida adoptar el método de diseño descrito en ACI 313-97 para silos de acero, se sugiere tener cuidado de que los peak de presiones o los efectos de la asimetría de las cargas no sean inferiores a los que se obtendrían al emplear las fórmulas presentadas a continuación.

### **6.5.2 Presiones Normales en Paredes Verticales.**

Las presiones normales que actúan sobre las paredes verticales de un silo pueden determinarse a partir de las siguientes ecuaciones:

$$p_{nf} = c_{nf} p_{ni} \quad (16)$$

en que,

$$c_{nf} = \max\{[7.6(h_b/d_c)^{0.06} - 6.4]c_c, 1.2c_c\}$$

y donde,

$p_{nf}$  = presión normal durante el flujo.

$c_{nf}$  = multiplicador de presiones normales.

$c_c$  = coeficiente asociado a la geometría del flujo.

= 1.0 para flujo simétrico

= 1.2 para flujo planar

Notar que en ciertos casos, los silos pueden estar sometidos a vibraciones significativas debido a la existencia de alimentadores, chancadores, harneros, etc. Esto tiene como consecuencia una reducción considerable de la fricción durante el flujo. Por este motivo, y en ausencia de datos experimentales, se sugiere adoptar un coeficiente de fricción de  $0.6\mu$ , en que  $\mu$  es el mínimo valor característico de acuerdo a lo indicado en la Tabla 3.

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 36 de 46

### 6.5.3 Fricción sobre las Paredes Verticales.

La fricción desarrollada entre el material y las paredes del silo puede ser evaluada a partir de las fórmulas:

$$p_{qf} = c_{qf} p_{qi} \quad (17)$$

en que,

$c_{qf}$  =multiplicador de fricción.

= 1.2 para flujo simétrico

= 1.4 para flujo planar

### 6.5.4 Fuerzas sobre Paredes Verticales de Silos debido a la Fricción.

La fuerza vertical en la pared del silo debida a la fricción durante el flujo, puede calcularse por medio de la expresión (10), teniendo cuidado de considerar el coeficiente  $c_{qf}$  en el cálculo de las tensiones asociadas a la fricción  $p_{qf}$ .

### 6.5.5 Presión Vertical en Material Almacenado.

El valores máximos de presiones verticales sobre elementos estructurales en silos de fondo plano durante el flujo, puede ser estimada a partir de la siguiente fórmula:

$$p_{vbf} = c_{vf} p_{vi} \leq \gamma z \quad (18)$$

Cuando no exista información experimental para determinar el valor  $c_{vf}$ , éste puede ser estimado como  $1.0 + \beta \tan \phi_i$ , en que  $\beta = 1.0$  para granos y harinas, y  $\beta = 0.4$  para otros casos (e.g. hierro, cobre, clinker, cemento, carbón, ceniza, etc.)

### 6.5.6 Presiones Normales sobre Paredes de Chutes.

La presión normal sobre las paredes del chute a una profundidad  $z_h$  medida bajo transición durante el flujo puede estimarse como:

$$p_{nhf} = k_{hf} p_{vhf} \quad (19)$$

donde,

$$k_{hf} = [1 + \sin \phi_i \cos \varepsilon] / [1 - \sin \phi_i \cos(2\alpha + \varepsilon)] \quad (20)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \mu_h + \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{\sin \phi_i} \sqrt{\frac{\mu_h^2}{1 + \mu_h^2}} \right\} \quad \text{ó,} \quad \varepsilon = \phi_w + \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin \phi_w}{\sin \phi_i} \right\} \quad (21)$$

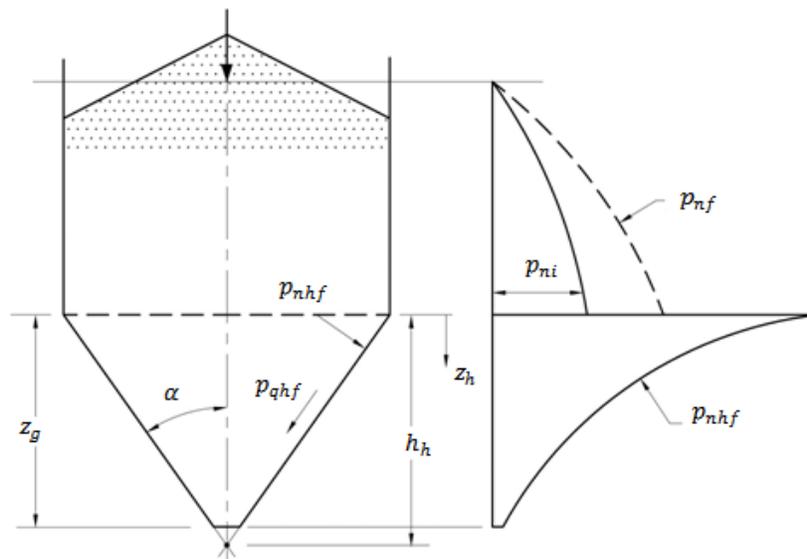
$$p_{vhf} = \frac{\gamma h_h}{n-1} \left[ \left( \frac{h_h - z_h}{h_h} \right) - \left( \frac{h_h - z_h}{h_h} \right)^n \right] + p_{vit} \left( \frac{h_h - z_h}{h_h} \right)^n \quad (22)$$

$$n = 2[k_{hf}(\mu_h \cot \alpha + 1) - 1] \quad \text{chutes cónicos o piramidales} \quad (23)$$

$$= k_{hf}(\mu_h \cot \alpha + 1) - 1 \quad \text{chutes ranurados}$$

$\mu_h$  = coeficiente de fricción entre el material y la pared del chute, calculado sobre la base del mínimo valor característico de  $\phi_w$ .

$p_{vit}$  = presión vertical calculada en la transición.



**Figura 12. Distribución de presiones en chute en condiciones de flujo.**

Las ecuaciones (20), (21), (22) y (23) están basadas en el modelo de Walker para representar las presiones en chutes (ref. Walker, D. M., "Approximate Theory for Pressure and Arching in Hoppers," Chemical Engineering Science, V. 21, 1966, pp. 975-997).

### 6.5.7 Fricción Inicial sobre Paredes del Chute durante el Flujo.

La fricción sobre la pared del chute durante el flujo está dada por la siguiente expresión:

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 38 de 46

$$p_{qhf} = \mu_h p_{nhf} \quad (24)$$

en que  $\mu_h$  es máximo y se obtiene de considerar el máximo valor característico de  $\phi_w$ .

### 6.5.8 Presión Normal sobre Paredes Extremas en Chutes Ranurados durante el Flujo.

La presión normal sobre las paredes extremas en un chute ranurado a una profundidad  $z_h$  medida bajo transición es:

$$p_{nhi} = 0.3(1 + k_{hf})p_{vhf} \quad (25)$$

donde  $k_{hf}$  y  $p_{vhf}$  se obtienen de las ecuaciones (20) y (25) respectivamente.

## 6.6 Presiones debido al Flujo en Silos descargados Excéntricamente.

La descarga excéntrica en silos puede deberse a diversos factores, entre los cuales se encuentran la presencia de una abertura de descarga excéntrica con respecto al eje del silo, alimentadores, componentes internos que restringen el flujo uniforme, o excentricidad durante el proceso de llenado, la que deriva en densidad no uniforme del material contenido en el silo. No obstante, cualquiera sea la naturaleza del flujo excéntrico, el resultado es siempre una distribución de presiones asimétrica. Las fórmulas presentadas a continuación fueron obtenidas de los documentos “Guidelines for the Assesment of Load son Bulk Solids Containers” y “AS3774: Loads on bulk solids containers”. Estas se basan en el uso de sobrepresiones, tal como en el resto de las fórmulas descritas en la sección 9.3. Su principal ventaja consiste en la simpleza de su formulación; sin embargo, dado que la predicción de las presiones asociadas al flujo al interior de un silo sigue siendo un problema complejo y difícil de generalizar, se recomienda analizar esta condición de carga con cautela, y en lo posible, comparar resultados con el método descrito en EN 1991-4 (EN 2006) y en “Steel silos with different aspect ratios: II - behaviour under eccentric discharge” (M. Rotter, A.J. Sadowski). En el caso de silos de hormigón, su capacidad para resistir cargas excéntricas posiblemente ha significado que la consideración de este fenómeno sea brevemente mencionada en una de sus cláusulas y en el comentario (ref. ACI 313-97, 4.4.2.3).

### 6.6.1 Presiones Normales en Paredes Verticales debido al Flujo Excéntrico.

Los incrementos y reducciones en las presiones normales calculados a continuación, deben agregarse a las presiones normales definidas en 9.3. En ciertos casos en que la excentricidad es pequeña, reducir las presiones en uno de los lados del silo puede conducir a resultados menos conservadores que aquellos que se obtendrían bajo el supuesto de flujo concéntrico. Esto de algún modo contradice la premisa de que una distribución de presiones asimétrica

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 39 de 46

debida a la excentricidad de la descarga es la condición más desfavorable para un silo. Por tal motivo se recomienda siempre analizar ambos casos – flujo concéntrico y excéntrico – con el objeto de capturar el efecto más desfavorable sobre las paredes del silo de acuerdo a la definición de presiones establecida.

a) Incremento de presiones normales: en ausencia de resultados experimentales, el incremento de presiones puede ser estimado a partir de la siguiente fórmula:

$$\Delta p_{nf,max} = p_{nf}(e_0/d_c - 0.1) \geq 0 \quad (26)$$

$$\Delta p_{nf,\theta} = -\Delta p_{nf,max} \cos \theta \quad (27)$$

en que,

$e_0$  = excentricidad de la descarga.

$p_{nf}$  = presión normal durante el flujo.

y el ángulo  $\theta$  tiene su origen sobre el eje del chute de descarga, hacia el lado cercano (ver Figura 9.10), de modo que:  $90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$

El incremento de presiones se debe distribuir a lo largo de una longitud equivalente a  $d_c$  sobre la pared del silo, y centrada a una altura  $(0.5d_c + e_0) \tan \phi_i$ , tal como se muestra en la Figura 9.10. En el caso de contenedores rectangulares, el incremento de presiones debe ser constante e igual a  $\Delta p_{nf,max}$  en todo el lado alejado de la descarga.

b) Reducción de presiones normales: la siguiente reducción de presiones debidas al flujo debe aplicarse a las paredes cercanas a la descarga (ver Figura 9.10). Tal reducción de presiones puede ser estimada a partir de la siguiente fórmula:

$$\Delta p_{nf,max} = 1.5p_{nf}(e_0/d_c - 0.1) \geq 0 \quad (28)$$

$$\Delta p_{nf,\theta} = \Delta p_{nf,max} \cos \theta \quad (29)$$

en que,

$e_0$  = excentricidad de la descarga.

$p_{nf}$  = presión normal durante el flujo.

y el ángulo  $\theta$  tiene su origen sobre el eje del chute de descarga, y su dominio está definido por el intervalo  $[-\theta_e, \theta_e]$ , en que,

$$\theta_e = 105 - 150e_0/d_c$$

La reducción de presiones se debe distribuir a lo largo de una longitud equivalente a  $d_c$  sobre la pared del silo, a partir de la altura en que se encuentra la descarga, tal como se muestra en la Figura 9.10.

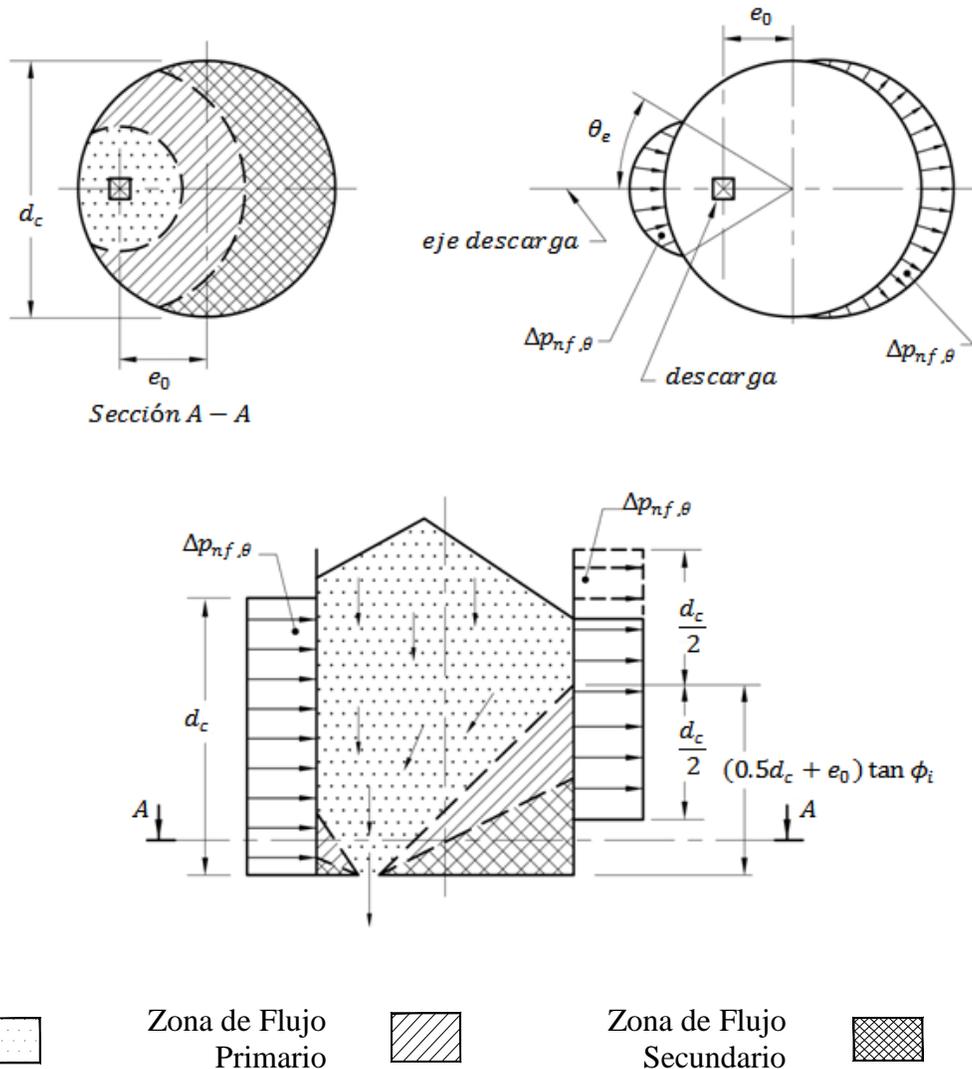


Figura 13. Distribución de presiones en chute en condiciones de flujo excéntrico.

## 7. DISEÑO ESTRUCTURAL

### 7.1 Programas Computacionales

En aquellos casos en que se requiera realizar cálculos que no estén incluidos en los módulos de análisis o diseño de los softwares de elementos finitos empleados tradicionalmente, se deberá privilegiar el uso de cálculos manuales. En caso que los cálculos manuales sean

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 41 de 46</b>

repetitivos y resulte más eficiente programar alguna planilla o código para el diseño, se deberá incluir una descripción completa de todos los cálculos implementados en la planilla o código, los supuestos realizados y toda aquella información que sea necesaria para llevar a cabo el chequeo de los cálculos.

Una misma planilla o código, no deberá ser usada para elaboración y chequeo.

## 7.2 Métodos de Diseño

Todos los diseños estructurales deberán realizarse empleando los métodos descritos en la versión vigente de los códigos listados en NCh2369. También se podrá hacer uso del código ASCE7 como consulta, y en aquellos casos que no estén cubiertos en NCh2369. En caso de discrepancia entre ambos códigos, se debe asegurar que los diseños cumplan al menos con NCh2369, independiente de que se haya hecho uso de lo dispuesto en ASCE7.

En general, los estados límite que deben considerarse en el diseño son: resistencia última (o admisible), estabilidad, serviciabilidad y fatiga. Otros estados límite tales como resistencia al fuego, colapso progresivo, corrosión, etc. deberán ser evaluados cuando sea aplicable.

Las combinaciones y factores de carga que deben emplearse en el diseño, se encuentran en los códigos NCh2369 y NCh3171. El código ASCE7 puede emplearse como consulta o referencia para casos que no se encuentren cubiertos en los códigos mencionados.

Notar que los factores de carga empleados en los códigos NCh2369 y NCh3171 están calibrados para definiciones de carga específicas. Por lo tanto, debe tenerse especial cuidado en aquellos casos en que la definición de las cargas no se ajuste a lo establecido en tales códigos (e.g. sismo de sobrevivencia).

## 7.3 Estado Límite Último (ULS).

Se refiere a la resistencia última de una estructura o elemento. Los estados límites de resistencia normalmente son: fluencia, rotura y pandeo. Los estados límite de resistencia asociados a modos de falla no frágil (e.g. fluencia, pandeo) tienen asociados factores de reducción de resistencia,  $\Phi$ , que van desde 0.9 a 1.0 (usualmente 0.9) en el caso de estructuras de acero; mientras que en caso de estados límite asociados a modos de falla frágil en el mismo tipo de estructura, el factor de resistencia se encuentra entre 0.65 y 0.75 (e.g. rotura área efectiva, bloque de corte, rotura de pernos).

## 7.4 Estabilidad.

Se refiere a estados límite de la estructura de soporte, o parte de ella, asociados a deslizamiento, volcamiento o levantamiento.

## 7.5 Serviciabilidad (SLS).

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 42 de 46

Los estados límite de servicio están asociados a deformación, vibración, movimiento inducido por viento, expansión y contracción debida a variaciones de temperatura, deslizamiento de conexiones y agrietamiento.

Las combinaciones de carga de servicio no llevan factor de carga.

### **7.6 Fatiga.**

El chequeo de fatiga debe realizarse cuando un silo es sometido a más de 10 000 ciclos de llenado y descarga.

La primera estrategia de diseño es evitar detalles estructurales que favorezcan la concentración de tensiones; no obstante, es poco probable que pueda evitarse la presencia de microfisuras en elementos estructurales al momento de su fabricación o construcción.

Las reglas de diseño para evaluar umbrales de fatiga o número de ciclos a los que puede ser sometida la estructura antes de fallar, se encuentran en el Apéndice 3 del código AISC 360. La teoría de fatiga en elementos estructurales se encuentra muy bien descrita en el libro “A Fatigue Primer for Structural Engineers” (National Steel Bridge Alliance).

### **7.7 Cargas de Diseño.**

En esta sección se describe los estados de carga básicos que deben considerarse en el diseño. La lista presentada a continuación no cubre todos los casos posibles, los que deben ser evaluados por el Ingeniero.

#### **7.7.1 Peso Propio (SW)**

Corresponde al peso propio del silo y su estructura de soporte que normalmente es calculado internamente por el software de análisis. Notar que la masa (o peso) específico del material debe multiplicarse por un factor que permita estimar el peso adicional proporcionado por elementos que no se incluyen en el modelo de análisis, tales como atiesadores, gussets, pernos, placas de continuidad, etc. Dependiendo del tipo de estructura, el incremento en peso debido a conexiones y atiesadores puede variar entre un 15% a un 30%. Para efectos de diseño, se recomienda emplear un 15% en silos y un 25% en estructuras de soporte.

#### **7.7.2 Carga Permanente Estructural (DS)**

Corresponde a la carga permanente creada por todos aquellos elementos estructurales no considerados en SW, tales como barandas, parrillas y planchas de piso, soportes, costaneras de techo y muro, cubiertas, fijaciones de elementos secundarios, etc.

La carga creada por las barandas debe ser ingresada al modelo de análisis como una carga uniformemente distribuida (no usar cargas puntuales). En cuando a las parrillas de piso,

también deben representarse por medio de cargas uniformemente distribuidas sobre las vigas que las soportan (perpendiculares a la dirección de las pletinas resistentes).

### 7.7.3 Carga Permanente Mecánica (DM)

Incluye las cargas creadas por equipos y componentes mecánicos que actúan en forma permanente sobre la estructura de soporte o el silo durante la operación, tales como monorrieles, planchas y elementos de desgaste, correas/alimentador y sus soportes, polines, guarderas, poleas y sus soportes, sistemas motrices, alimentadores, etc.

### 7.7.4 Sobrecarga de uso en Plataformas y Pasillos (LL)

Las sobrecargas de uso no deben ser inferiores a lo establecido en NCh1537 (ASCE7 para proyectos en el extranjero) o las especificaciones del Proyecto.

En caso de no contar con información, emplear los valores mostrados en la Tabla 3.

**Tabla 4. Sobrecargas de uso recomendadas.**

Área	Sobrecarga (kPa)
Plataformas de operación	5.0
Pasillos de correas/alimentador	2.5
Escaleras, descansos y pasillos en edificios de proceso	2.5
Áreas destinadas a apilar lanas, elementos de desgaste u otros componentes en general.	12kPa

Cargas de mantención se consideran sobrecargas de uso para efectos de diseño. Éstas incluyen cargas asociadas a acumulación de lanas, planchas de desgaste, piezas de equipos, etc.

### 7.7.5 Cargas de Servicio (SL)

Corresponden a cargas asociadas a servicios, tales como piping, luminarias, escalerillas eléctricas, etc. En caso de no contar con información detallada, se debe considerar una carga de 1.0kN/m (100kg/m) para piping y escalerillas eléctricas. Adicionalmente, se debe aplicar una carga de piso de 0.1kPa con el objeto de considerar luminarias y tuberías pequeñas.

	ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO <b>SILOS DE ACERO</b>	
		AICE-PRC-003-0	Página 44 de 46

### **7.7.6 Cargas de Material (ML)**

Corresponde a la carga de operación debida al material contenido en el silo.

### **7.7.7 Carga de Derrame (MS)**

Debe considerarse acumulación de material en todas aquellas áreas en la que pueda ocurrir derrame. En particular, se considera que todos los puntos de llenado de un silo son susceptibles de acumulación de material. En ausencia de información, el Ingeniero debe estimar el área de acumulación de material. La carga de diseño puede determinarse asumiendo una capa de material de 500mm de espesor o 5kPa, lo que resulte más desfavorable.

### **7.7.8 Tensión de Correas/alimentador en Operación (BO), Partida (BS), Vacía (BN) y Torque Máximo (BT)**

Las tensiones de diseño asociadas a una correa transportadora conectada al techo de un silo deben ser informadas por el Ingeniero Mecánico responsable.

Notar que el torque máximo puede ser considerablemente superior al torque de partida. Sus causas pueden deberse a que la correa está completamente llena o atorada.

### **7.7.9 Vibración de Equipos (VL)**

Las cargas dinámicas generadas por equipos o alimentadores vibratorios deberán ser determinadas en función de las características del equipo y su operación.

### **7.7.10 Chute Bloqueado, Silo Colmado (BC)**

Esta carga deberá ser calculada en función la máxima densidad de material y capacidad de almacenamiento esperadas del silo. La máxima densidad esperada del material corresponde a la del material consolidado, mientras que la máxima capacidad de almacenamiento del silo, deberá ser calculada empleando el menor ángulo de reposo posible del material.

### **7.7.11 Cargas de Temperatura (TL)**

Se debe considerar un diferencial de temperatura ( $\Delta T$ ) de acuerdo a las condiciones del sitio. Para la determinación de  $\Delta T$  se debe contar con una temperatura máxima, una mínima y una base (normalmente asociada a la temperatura de montaje o construcción).

### **7.7.12 Cargas de Nieve (SL)**

	<b>ASOCIACIÓN DE INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	
		<b>SILOS DE ACERO</b>	
		<b>AICE-PRC-003-0</b>	<b>Página 45 de 46</b>

La carga de nieve sobre el suelo debe determinarse de acuerdo a las condiciones del sitio. El procedimiento para la aplicación de cargas de nieve sobre las estructuras debe estar de acuerdo con lo dispuesto en el Capítulo 7 del código ASCE7.

#### **7.7.13 Cargas Asociadas a Asentamiento del Suelo (SS)**

Corresponden a las fuerzas internas generadas por asentamientos diferenciales de suelo. Deben ser aplicadas en todas aquellas combinaciones de carga sobre las que generen un efecto significativo.

La posibilidad de contar con asentamientos diferenciales debe ser consultada con el Mecánico de Suelos para cada caso particular. Particularmente, se debe evaluar la posibilidad de asentamientos diferenciales en fundaciones de edificios de longitud considerable, o construidos sobre rellenos o suelos irregulares.

#### **7.7.14 Cargas de Viento (WL)**

Las cargas de viento deberán ser determinadas en función de la velocidad básica del viento, y según lo dispuesto en el código NCh432. Alternativamente, se podrá hacer uso de los Capítulos 26 al 31 del código ASCE7.

Existen dos procedimientos básicos para la determinación de las cargas de viento: (1) procedimientos analíticos que hacen uso de datos aerodinámicos y/o gráficos (ASCE7, Capítulos 27 al 30), y (2) procedimientos de túnel de viento (ASCE7, Capítulo 31).

#### **7.7.15 Cargas Sísmicas (EL)**

**Tabla 5. Parámetros para el Diseño Sísmico (ASCE7)**

<b>Descripción</b>	<b>Referencia</b>
Occupancy Category	Table 1-1
Seismic Importance Factor	Table 11.5-1

**Tabla 5. Parámetros para el Diseño Sísmico (ASCE7)**

<b>Descripción</b>	<b>Referencia</b>
Mapped 0.2 Second Period Spectral Acceleration, $S_s$	Figure 22-1
Mapped 1.0 Second Period Spectral Acceleration, $S_1$	Figure 22-2
Site Class	Table 20.3-1
Acceleration-based Site Coefficient, $F_a$	Table 11.4-1
Velocity-based Site Coefficient, $F_v$	Table 11.4-2
Maximum Spectral Response Acceleration, SMS	Eqn. 11.4-1
Maximum Spectral Response Acceleration, $SM_1$	Eqn. 11.4-2
Design Spectral Response Acceleration, SDS	Eqn. 11.4-3
Design Spectral Response Acceleration, $SD_1$	Eqn. 11.4-4
Seismic Design Category Using SDS and Occupancy Category	Table 11.6-1
Seismic Design Category Using $SD_1$ and Occupancy Category	Table 11.6-2
Building Configuration	Section 12.3.2
Permitted Analytical Procedures	Table 12.6-1
Seismic Load Effects, $E$ and $E_m$	Section 12.4
Redundancy	Section 12.3.4
Deflection and Drift Limits	Section 12.12
Equivalent Lateral Force Procedure	Section 12.8
Seismic Force Resisting Systems	Section 12.2.1
Seismic Force Resisting System Coefficients and Factors	Table 12.2-1
Architectural, Mechanical, and Electrical Components	Section 13.0
Non-building Structures	Section 15.0