



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **“DISEÑO DE UN SILO PARA ALMACENAMIENTO DE CEMENTO”**

**VISTÍN GUAMANTAQUI HÉCTOR SANTIAGO**

# **TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Previa a la obtención del Título de:**

## **INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2016**

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2015-10-02

Yo recomiendo que el trabajo de Titulación preparado por:

**VISTÍN GUAMANTAQUI HÉCTOR SANTIAGO**

Titulado:

**“DISEÑO DE UN SILO PARA ALMACENAMIENTO DE CEMENTO”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO FACULTAD DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Mariana Villa Orozco  
**DIRECTOR**

---

Ing. Javier Orna Chávez  
**ASESOR**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## **EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** VISTÍN GUAMANTAQUI HÉCTOR SANTIAGO

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** “DISEÑO DE UN SILO PARA ALMACENAMIENTO DE CEMENTO”

**Fecha de Examinación:** 2016-06-21

### **RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Edwin Viteri Núñez <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Mariana Villa Orozco <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Javier Orna Chávez <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Edwin Viteri Núñez  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El Trabajo de Titulación que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Vistín Guamantaqui Héctor Santiago**

## **DECLARACION DE AUTENTICIDAD**

Yo, Héctor Santiago Vistín Guamantaqui, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación.

---

**Vistín Guamantaqui Héctor Santiago**  
Cédula de Identidad: 060410372-1

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a toda mi familia por brindarme su apoyo y ánimo, pero de manera especial a mis abuelitos quienes tuvieron que partir, sin dejar de alentarme hasta su último aliento a seguir luchando para lograr mi objetivo.

**Héctor Santiago Vistín Guamantaqui**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar agradezco a Dios por haberme permitido llegar a estas instancias de mi vida, lleno de salud y en el seno de una familia a la que nunca ha desamparado en los momentos en los que más se ha necesitado de él.

Quedan pequeñas las palabras de agradecimiento a mi madre, quien fue siempre mi motor de lucha, la que a través de sus sabias palabras y amor siempre me incentivo a seguir adelante. A mi padre, quien forjó en mí un carácter fuerte para enfrentar las adversidades de la vida, y quien en medida de sus posibilidades siempre buscó la forma de brindarme lo mejor que pudo. A mi hermano Edi y a mis hermanas Natita y Dany, que forman parte de mi alma y mis ganas de ser mejor cada día. A mis abuelitos Rafael, Clementina y Rosita por su cariño y buenos deseos. A mis tíos y primos por su generosidad y porque me enseñaron a salir adelante con esfuerzo y trabajo.

A mis amigos con quienes compartí experiencias en las aulas y fuera de ellas, en especial a aquellos que me brindaron su ayuda en los momentos que más lo necesitaba.

Un agradecimiento especial para la ESPOCH y la Escuela de Ingeniería Mecánica por haber sido mi templo de formación profesional, y a mis profesores que transmitieron su sabiduría no solamente para formar buenos profesionales, sino también para formar buenas personas.

**Héctor Santiago Vistín Guamantaqui**

# CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>
1.1	Antecedentes ..... 1
1.2	Justificación..... 2
1.3	Objetivos ..... 3
1.3.1	<i>Objetivo general</i> ..... 3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i> ..... 3
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>
2.1	Silos ..... 4
2.1.1	<i>Silos para almacenamiento de cemento</i> ..... 5
2.1.2	<i>Tipos de silos para almacenamiento de cemento</i> ..... 6
2.1.3	<i>Silos Metálicos</i> ..... 7
2.2	Elementos constitutivos de un silo ..... 9
2.2.1	<i>Cabeza</i> ..... 9
2.2.2	<i>Cuerpo</i> ..... 10
2.2.3	<i>Fondo</i> ..... 10
2.2.4	<i>Silos mono y multi cámara</i> ..... 11
2.3	Presiones internas en las paredes del silo ..... 11
2.3.1	<i>Presiones de llenado</i> ..... 12
2.3.2	<i>Presiones de vaciado</i> ..... 12
2.4	Cemento ..... 13
2.4.1	<i>Cemento Portland</i> ..... 13
2.4.2	<i>Composición del cemento Portland</i> ..... 13
2.4.3	<i>Propiedades físicas y mecánicas del cemento</i> ..... 14
2.4.4	<i>Almacenamiento del cemento a granel en silos</i> ..... 15
2.4.5	<i>Causas de deterioro del cemento</i> ..... 16
2.5	Propiedades de flujo del material ..... 17
2.6	Patrones de Flujo ..... 17
2.6.1	<i>Flujo Másico</i> ..... 17
2.6.2	<i>Flujo Tubular</i> ..... 18
2.6.3	<i>Flujo Mixto</i> ..... 19
2.7	Problemas de flujo en silos..... 19
2.8	Modos de falla en silos ..... 20
2.8.1	<i>Pandeo de las paredes</i> ..... 20
2.8.2	<i>Flexión en paredes circulares</i> ..... 21
2.8.2.1	<i>Fallas por sobre presiones o presiones asimétricas</i> ..... 21
2.8.3	<i>Fallas por patrón de flujo y propiedades erradas</i> ..... 21
2.8.4	<i>Fallas por temperatura y humedad del material</i> ..... 22
2.9	Soldadura..... 23
2.9.1	<i>Eficiencia de soldadura</i> ..... 23
2.9.2	<i>Examinación radiográfica de soldadura</i> ..... 24
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA DE DISEÑO</b>
3.1	Formulación del diseño ..... 25



3.1.1	<i>Especificaciones</i> .....	25
3.1.1.1	<i>Locación del silo</i> .....	26
3.1.2	<i>Requerimientos</i> .....	26
3.1.3	<i>Estructura de funciones</i> .....	27
3.1.4	<i>Matriz morfológica</i> .....	27
3.1.5	<i>Concepto de solución</i> .....	28
3.1.6	<i>Concepto de solución óptimo</i> .....	29
3.1.6.1	<i>Evaluación gráfica de resultados</i> .....	30
3.1.6.2	<i>Descripción de la solución óptima N° 2</i> .....	31
3.2	<i>Diseño funcional</i> .....	32
3.2.1	<i>Propiedades de flujo del cemento</i> .....	32
3.2.1.1	<i>Obtención de las propiedades de flujo del cemento</i> .....	33
3.2.2	<i>Determinación del patrón de flujo necesario</i> .....	34
3.2.3	<i>Teorías de arco</i> .....	35
3.2.4	<i>Enfoque de la mecánica estructural</i> .....	36
3.2.4.1	<i>Teoría de Arnold &amp; McLean</i> .....	36
3.2.4.2	<i>Teoría de Jenike</i> .....	36
3.2.4.3	<i>Teoría de Mróz y Szymánski</i> .....	37
3.2.5	<i>Enfoque de la mecánica continua</i> .....	38
3.2.5.1	<i>Teoría de Enstad</i> .....	38
3.2.6	<i>Definición de la geometría de la tolva</i> .....	38
3.3	<i>Diseño estructural</i> .....	38
3.3.1	<i>Dimensionamiento del silo</i> .....	38
3.3.2	<i>Determinación de la superficie equivalente (<math>h_c</math>)</i> .....	39
3.3.3	<i>Evaluación de las cargas según la norma EN 1991-4:2006</i> .....	40
3.3.3.1	<i>Clasificación de los silos según la acción de evaluación</i> .....	40
3.3.3.2	<i>Determinación de la esbeltez del silo</i> .....	40
3.3.3.3	<i>Excentricidades en el silo</i> .....	41
3.3.3.4	<i>Definición del patrón de flujo</i> .....	41
3.3.4	<i>Presiones Internas</i> .....	41
3.3.5	<i>Desarrollo de cargas adicionales</i> .....	42
3.3.5.1	<i>Cargas por asimetrías</i> .....	42
3.3.5.2	<i>Presión en silos fluidizados</i> .....	42
3.3.5.3	<i>Presión por diferencial térmico</i> .....	42
3.3.6	<i>Uso de las presiones calculadas para el diseño del silo</i> .....	43
3.3.7	<i>Consideraciones para el cálculo de los espesores</i> .....	43
3.3.7.1	<i>Uniones soldadas</i> .....	43
3.3.7.2	<i>Margen o sobre espesor por abrasión</i> .....	44
3.3.7.3	<i>Margen o sobre espesor por corrosión</i> .....	44
3.3.7.4	<i>Esfuerzo admisible</i> .....	44
3.3.8	<i>Teoría simplificada para recipientes de pared delgada</i> .....	45
3.3.9	<i>Método basado en la norma ASME VIII div. 1</i> .....	46
3.3.9.1	<i>Expresiones para el espesor del cuerpo</i> .....	46
3.3.9.2	<i>Expresiones para el espesor de la tolva cónica</i> .....	46
3.3.10	<i>Evaluación de resistencia del diseño</i> .....	47
3.4	<i>Carga de viento</i> .....	47
3.4.1	<i>Velocidad fundamental del viento (<math>V_{b0}</math>)</i> .....	48
3.4.2	<i>Velocidad básica del viento (<math>V_b</math>)</i> .....	48
3.4.3	<i>Velocidad media del viento (<math>V_{m(z)}</math>)</i> .....	48

3.4.3.1	<i>Categoría del terreno</i> .....	49
3.4.3.2	<i>Coefficiente de aspereza (<math>C_{r(z)}</math>)</i> .....	49
3.4.4	<i>Intensidad de turbulencia del viento (<math>IV_{(z)}</math>)</i> .....	50
3.4.5	<i>Determinación de la presión de velocidad crítica (<math>q_{p(z)}</math>)</i> .....	50
3.4.6	<i>Determinación del coeficiente de fuerza (<math>c_f</math>)</i> .....	50
3.4.6.1	<i>Determinación del factor (<math>c_{f,0}</math>)</i> .....	51
3.4.6.2	<i>Determinación del factor de efecto final (<math>\psi_\lambda</math>)</i> .....	52
3.4.6.3	<i>Determinación del radio de solidez (<math>\phi</math>)</i> .....	53
3.4.6.4	<i>Determinación de la esbeltez efectiva (<math>\lambda</math>)</i> .....	53
3.4.7	<i>Cálculo de la fuerza del viento sobre la estructura (<math>F_w</math>)</i> .....	54
3.5	<i>Carga de sismo</i> .....	54
3.5.1	<i>Caracterización del peligro sísmico</i> .....	55
3.5.1.1	<i>Tipos de perfiles de suelo para diseño sísmico</i> .....	55
3.5.1.2	<i>Coefficientes de perfil de suelo (<math>F_a</math>), (<math>F_d</math>) y (<math>F_s</math>)</i> .....	55
3.5.2	<i>Factor de importancia por sismo (<math>I</math>)</i> .....	56
3.5.3	<i>Factor de reducción de fuerzas sísmicas (<math>R</math>)</i> .....	57
3.5.4	<i>Regularidad y configuración estructural</i> .....	58
3.5.5	<i>Período límite de vibración (<math>T_c</math>)</i> .....	58
3.5.6	<i>Periodo de vibración (<math>T_a</math>)</i> .....	58
3.5.7	<i>Espectro elástico de diseño en aceleraciones (<math>S_a</math>)</i> .....	59
3.5.8	<i>Cortante basal de diseño (<math>V</math>)</i> .....	59
3.6	<i>Diseño de la estructura de soporte del silo</i> .....	59
3.6.1	<i>Consideraciones de cálculo para las columnas</i> .....	60
3.6.2	<i>Consideraciones de cálculo para el skid lateral y de fondo</i> .....	60
<b>4</b>	<b>DISEÑO DEL SILO PARA ALMACENAMIENTO DE CEMENTO</b>	
4.1	<i>Cálculo del diámetro de salida de la tolva</i> .....	61
4.2	<i>Dimensionamiento del silo</i> .....	63
4.3	<i>Cálculo de presiones según EN 1991-4:2006</i> .....	67
4.3.1	<i>Cálculo de la presión sobre el cuerpo</i> .....	68
4.3.1.1	<i>Cálculo de la presión horizontal de llenado</i> .....	69
4.3.1.2	<i>Cálculo de presión de tracción friccional de llenado</i> .....	71
4.3.1.3	<i>Cálculo de presión vertical de llenado (<math>P_{vf}</math>)</i> .....	72
4.3.2	<i>Cálculo de presión de llenado sobre la tolva</i> .....	75
4.3.3	<i>Cálculo de la presión friccional en la tolva (<math>P_t</math>)</i> .....	78
4.3.4	<i>Cálculo de presión de descarga en la tolva (<math>P_s</math>)</i> .....	78
4.3.5	<i>Cálculo de cargas adicionales</i> .....	78
4.3.5.1	<i>Cálculo de carga en silos fluidizados (<math>P_{(h-f)}</math>)</i> .....	79
4.3.5.2	<i>Cálculo de presiones por diferencial térmico</i> .....	79
4.4	<i>Cálculo del espesor de las paredes del silo</i> .....	79
4.4.1	<i>Cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico</i> .....	80
4.4.1.1	<i>Cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico</i> .....	80
4.4.2	<i>Cálculo del espesor de la tolva cónica</i> .....	81
4.4.3	<i>Cálculo del espesor del techo cónico</i> .....	82
4.4.4	<i>Cálculo de la resistencia al pandeo por efecto de la fuerzas de rozamiento e influencia de la presión horizontal</i> .....	84
4.4.5	<i>Cálculo de resistencia al pandeo del cuerpo según el Eurocódigo</i> .....	86
4.4.6	<i>Cálculo del factor de seguridad en la tolva</i> .....	90
4.5	<i>Cálculo de la carga de viento</i> .....	93

4.5.1	<i>Determinación del valor básico de la velocidad del viento (<math>V_{bo}</math>)</i> .....	93
4.5.2	<i>Cálculo de la velocidad básica del viento (<math>V_b</math>)</i> .....	93
4.5.2.1	<i>Determinación de categoría del terreno</i> .....	94
4.5.2.2	<i>Cálculo del factor de aspereza <math>C_{r(z)}</math></i> .....	94
4.5.3	<i>Cálculo de la velocidad media del viento <math>V_{m(z)}</math></i> .....	95
4.5.3.1	<i>Cálculo de la intensidad de turbulencia del viento (<math>IV_{(z)}</math>)</i> .....	95
4.5.4	<i>Cálculo de la presión de velocidad crítica (<math>q_{p(z)}</math>)</i> .....	96
4.5.4.1	<i>Cálculo del coeficiente de fuerza (<math>c_{(f)}</math>)</i> .....	96
4.5.5	<i>Cálculo de la fuerza del viento sobre la estructura (<math>F_w</math>)</i> .....	99
4.6	<i>Cálculo de la carga de sismo</i> .....	99
4.6.1	<i>Determinación del tipo de perfil de suelo para diseño sísmico</i> .....	99
4.6.2	<i>Determinación de los coeficientes del perfil de suelo</i> .....	99
4.6.3	<i>Determinación del factor de importancia por sismo (<math>I</math>)</i> .....	100
4.6.4	<i>Determinación de factor de reducción de fuerzas sísmicas (<math>R</math>)</i> .....	100
4.6.5	<i>Determinación de la regularidad y configuración estructural</i> .....	100
4.6.6	<i>Cálculo del período límite de vibración elástico (<math>T_c</math>)</i> .....	100
4.6.7	<i>Cálculo del período de vibración (<math>T_a</math>)</i> .....	101
4.6.8	<i>Cálculo del espectro elástico de diseño en aceleraciones (<math>S_a</math>)</i> .....	101
4.6.9	<i>Cálculo de la cortante basal de diseño</i> .....	101
4.7	<i>Cálculo de la estructura soporte</i> .....	102
4.7.1	<i>Cálculo de las columnas</i> .....	102
4.7.1.1	<i>Selección de la columna</i> .....	107
4.7.2	<i>Cálculo del Skid de fondo</i> .....	113
4.7.3	<i>Resistencia de las paredes del silo</i> .....	120
4.8	<i>Preparación y aplicación de recubrimiento</i> .....	123
4.8.1	<i>Preparación de superficie</i> .....	123
4.8.2	<i>Perfil de anclaje</i> .....	124
4.8.3	<i>Aplicación del recubrimiento</i> .....	125
4.9	<i>Costos</i> .....	126
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1	<i>Conclusiones</i> .....	128
5.2	<i>Recomendaciones</i> .....	129

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## **PLANOS**

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1	Componentes del cemento Portland ..... 14
2	Efecto del almacenamiento en la resistencia del cemento..... 16
3	Clasificación de explosiones más importantes ocurridas en silos ..... 22
4	Condiciones meteorológicas - Provincia de Sucumbíos..... 26
5	Evaluación de conceptos de solución - Valor técnico ..... 29
6	Evaluación de conceptos de solución - Valor económico ..... 30
7	Propiedades de flujo y parámetros para las teorías de arco ..... 33
8	Propiedades de flujo del cemento ..... 34
9	Clasificación recomendada de silos por acción de evaluación..... 40
10	Procedimiento de cálculo para la determinación de la acción del viento ..... 47
11	Categoría y parámetros del terreno ..... 49
12	Rugosidad equivalente de la superficie ..... 52
13	Procedimiento para el cálculo de la carga de sismo ..... 54
14	Valores del factor z en función de la zona sísmica adoptada ..... 55
15	Tipo de suelo y factor ( $F_a$ ) ..... 55
16	Tipo de suelo y factores ( $F_d$ )..... 56
17	Tipo de suelo y factor de comportamiento inelástico del subsuelo ( $F_s$ )..... 56
18	Tipo de uso, destino e importancia de la estructura ..... 57
19	Factor de reducción de respuesta para estructuras diferentes a edificaciones .. 57
20	Valores característicos de las propiedades de flujo del cemento..... 68
21	Valores característicos de propiedades de propiedades de flujo ..... 69
22	Variación de la presión ( $P_{hf}$ ) con la profundidad Z ..... 71
23	Variación de la presión ( $P_{wf}$ ), con la profundidad Z..... 72
24	Variación de la presión ( $P_{vf}$ ) con la profundidad Z. .... 73
25	Resistencia al pandeo, e influencia de la presión horizontal. .... 86
26	Variación de la fuerza vertical compresiva con la profundidad Z..... 88
27	Cargas de compresión y flexión sobre las columnas ..... 107
28	Propiedades de la sección tubular circular para la columna ..... 108
29	Propiedades del perfil HEB220B - Skid de fondo..... 115
30	Resumen de pesos del silo ..... 119
31	Iteraciones para encontrar el momento flector. .... 119
32	Resumen de presiones del silo..... 122
33	Resumen de espesores del silo..... 122
34	Perfil de anclaje de superficies metálicas ..... 124
35	Procedimiento de pintura..... 126
36	Costo de construcción..... 126
37	Costo de montaje y pruebas..... 126
38	Costo total del silo para almacenamiento de cemento..... 126

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1	Primeras formas de uso de silos ..... 4
2	Silo vertical para almacenamiento de cemento ..... 5
3	Clasificación de silos para almacenamiento de cemento..... 6
4	Silos contiguos para almacenamiento de cemento. .... 7
5	Silos metálicos verticales..... 8
6	Silos horizontales para transporte de cemento. .... 8
7	Silos desmontables. .... 9
8	Parte superior de silo – chimenea filtrante. .... 10
9	Efecto de la presión ejercida. a) material granular y b) líquido. .... 11
10	Lecturas de presión de llenado y vaciado en un silo cilíndrico vertical. .... 12
11	Flujo másico - movimiento del material dentro del silo. .... 17
12	Flujo tubular - movimiento del material dentro del silo ..... 18
13	Perfil característico de flujo mixto. .... 19
14	Obstrucciones de flujo en silos. .... 19
15	Falla en la pared lateral de un silo ..... 20
16	Soldadura de recipientes ..... 23
17	Examinación radiográfica en campo. .... 24
18	Alternativas de elementos constituyentes del silo ..... 27
19	Prototipos número 1 - 2 y 3 ..... 28
20	Diagrama de evaluación técnico - económica ..... 30
21	Diagrama para la selección del patrón de flujo. .... 35
22	Medidas necesarias para el cálculo de las presiones. .... 39
23	Excentricidad en la columna de material y boca de salida de la tolva. .... 41
24	Presiones internas sobre las paredes del silo ..... 41
25	Soldaduras a tope..... 43
26	Eficiencias máximas permisibles de juntas soldadas con gas y arco. .... 44
27	Coefficiente de fuerza $c_{(f,0)}$ para cilindros con flujo sin extremo libre. .... 51
28	Valores del factor $\psi\lambda$ como función del radio de solidez $\phi$ vs. la esbeltez $\lambda$ ... 52
29	Valores recomendados de esbeltez efectiva $\lambda$ ..... 53
30	Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y factor de zona z. .... 54
31	Skid Lateral y de fondo del silo. .... 60
32	Pila de cemento formada en el nivel superior del material..... 64
33	Dimensionamiento preliminar del silo para el cálculo de carga..... 66
34	Variación de la presión horizontal de llenado con la profundidad ..... 71
35	Variación de la presión de tracción friccional con la profundidad..... 72
36	Variación de la presión vertical de llenado con la profundidad. .... 74
37	Presiones generadas sobre la tolva, método alternativo anexo G..... 75
38	Equilibrio global en la tolva. .... 91

39	Perfil de presión horizontal linealizado (cuerpo del silo).....	102
40	Presión horizontal en el cuerpo cilíndrico del silo. ....	103
41	a) Carga ( $N_{SZK}$ ), b) Carga normal, c) Carga normal más golpe repentino. ....	103
42	Presión del viento. ....	104
43	Carga de sismo usando “Cortante Basal V” (Método N° 1). ....	104
44	Carga de sismo mediante el “Espectro de Respuesta” (Método N°2). ....	105
45	Carga de sismo sobre el silo. ....	105
46	Valores de longitud efectiva .....	109
47	Simulación de la resistencia de las columnas .....	112
48	Resultado de resistencia de columnas - SAP2000.....	113
49	Orientación de las columnas y skid de fondo. ....	114
50	Área tributaria de la viga apoyada sobre el suelo. ....	114
51	Ingreso de los valores de K a los resortes en la viga. ....	115
52	Diagrama de momentos del skid lateral .....	116
53	Ubicación del peso puntual en el centroide de la cabeza y tolva.....	119
54	Silo modelado en SAP2000. ....	120
55	Esfuerzo de Von Mises en la tolva .....	121
56	Esfuerzos de Von Mises en el cuerpo.....	122

## LISTA DE ABREVIACIONES

AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
ASAE	American Society of Agricultural Engineers
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards Institution
CAD	Computer Aided Design
FIFO	First in, First out
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
LRFD	Load and Resistance Factor Design
NACE	National Association of Corrosion Engineers
SAP	Structural Analysis Program
SIS	Swedish Standards Institution
SSPC	Steel Structures Painting Council

## **LISTA DE ANEXOS**

- A** Requisitos físicos normalizados del cemento Portland
- B** Diagrama de Weingarten, Morgan y Seide
- C** Ilustraciones y coeficientes para la carga de viento
- D** Ilustraciones y coeficientes para la carga de sismo
- E** Ilustraciones y coeficientes para el cálculo de columnas y skid
- F** Tipos de juntas soldadas
- G** Lista de materiales



## SIMBOLOGÍA

A	Área de los miembros estructurales expuestos al viento	m <sup>2</sup>
A <sub>c</sub>	Área total proyectada por la estructura al viento	m <sup>2</sup>
A <sub>g</sub>	Área bruta de la sección	m <sup>2</sup>
B	Ángulo de inclinación de la pared con la vertical	( )°
b	Diámetro externo del silo	m
c	Grado de cohesión de las partículas	
c'	Grado de cohesión independiente de la consolidación	
C <sub>0(z)</sub>	Factor orográfico	
CA	Margen o sobre espesor por corrosión	mm
C <sub>dir</sub>	Factor direccional del viento	
C <sub>op</sub>	Factor de corrección para descarga asimétrica	
Cr(z)	Coefficiente de aspereza	
C <sub>s</sub> C <sub>d</sub>	Factor estructural	
C <sub>t</sub>	Coefficiente según el tipo de edificación para cálculo de (Ta)	
C <sub>temp</sub>	Factor estacional del viento	
D	Diámetro crítico de salida de la tolva (teorías de arco)	m
D	Carga muerta	kips
D/C	Radio demanda capacidad	
D1	Diámetro mayor de la tolva	m
D2	Diámetro menor de la tolva	m
d <sub>c</sub>	Diámetro interno del cilindro	m
E	Constante (teorías de arco)	
E	Eficiencia de soldadura	
e <sub>i</sub>	Excentricidad en el silo	m
F	Constante (teorías de arco)	
F <sub>a</sub>	Coefficiente de perfil del suelo	
F <sub>cr</sub>	Tensión crítica	kpsi
F <sub>d</sub>	Coefficiente de perfil del suelo	
F <sub>e</sub>	Tensión de pandeo elástica	
ff	Factor de flujo	
F <sub>s</sub>	Coefficiente de perfil del suelo	
F <sub>w</sub>	Fuerza del viento	Kgf
g( )	Función (teorías de arco)	
h( )	Función (teorías de arco)	
h <sub>c</sub>	Superficie equivalente	m
H <sub>m</sub>	Altura de material en la parte cilíndrica del silo	m
h <sub>n</sub>	Altura máxima de la estructura	m
h <sub>o</sub>	Distancia del centroide de la pila a la base de la misma	m

$H_{tolva}$	Altura de la tolva	m
I	Factor de importancia de riesgo sísmico	
$I_x$	Inercia respecto al eje x	$in^4$
$I_y$	Inercia respecto al eje y	$in^4$
$IV_{(z)}$	Intensidad de turbulencia del viento	
K	Constante de cálculo (teorías de arco)	
k	Rugosidad equivalente de la superficie	mm
K	Radio de presión lateral (Eurocódigo)	
K	Factor de longitud efectiva	
$k()$	Función (teorías de arco)	
$K_I$	Factor de turbulencia	
$K_r$	Factor del terreno en función de la Z0	
L	Constante de cálculo (teorías de arco)	
l	Longitud total del silo, incluida la estructura de soporte	m
L	Longitud no arriostrada lateralmente del perfil estructural	mm
L	Carga viva	kips
m	Masa del cemento	kg
M	Constante de cálculo (teorías de arco)	
m	Coefficiente de forma de la tolva (teorías de arco)	
$M_n$	Resistencia nominal a flexión	kips.in
$M_{ux}$	Solicitud de carga en el eje "x"	kips.in
$M_{uy}$	Solicitud de carga en el eje "y"	kips.in
n	Exponente (teorías de arco)	
N	Constante de cálculo (teorías de arco)	
P	Presión normal a la superficie	$kN/m^2$
$P_c$	Carga por el contenido de cemento en el silo	kips
$P_h$	Presión horizontal	$kN/m^2$
$P_{h-f}$	Presión en silos fluidizados	$kN/m^2$
$P_n$	Presión normal en la tolva	$kN/m^2$
$P_n$	Resistencia de compresión nominal	kips
$P_r$	Solicitud de carga de compresión	kips
$P_u$	Carga de compresión requerida	kips
$P_v$	Presión vertical	$kN/m^2$
$P_w$	Presión friccional	$kN/m^2$
q	Exponente (teorías de arco)	
Q	Carga de sismo	
$q_{p(z)}$	Presión crítica de la velocidad pico	$Kg/m^2$
r	Radio interno del silo	m
R	Factor de reducción de fuerza sísmica	
Re	Número de Reynolds	

$r_x, r_y$	Radio de giro	in
S	Esfuerzo máximo admisible	Mpa
S	Constante de cálculo (teorías de arco)	
$S_a$	Espectro elástico de diseño	
$S_y$	Límite elástico del acero	Mpa
t	Espesor de la pared	mm
T	Constante de cálculo (teorías de arco)	
$T_a$	Período de vibración	s
$T_c$	Período límite de vibración	s
U	Constante de cálculo (teorías de arco)	
V	Cortante basal de diseño	
$V_{(z_e)}$	Velocidad pico del viento	m/s
$V_b$	Velocidad básica del viento	m/s
$V_{b0}$	Velocidad fundamental del viento	m/s
$V_{m(z)}$	Velocidad media del viento	m/s
$V_{tolva}$	Volumen de la tolva	m <sup>3</sup>
W	Carga sísmica reactiva	
W	Carga de viento	kgf
Z	Profundidad medida desde la superficie equivalente	m
Z	Altura sobre el nivel del suelo de la estructura	m
z	Factor de aceleración sísmica	
$Z_0$	Longitud de aspereza	m
$Z_g$	Distancia desde el suelo a la base del contenedor	m
$Z_{máx}, Z_{0II}$	Máxima altura de aspereza	m
$Z_{mín}$	Mínima altura de aspereza	m
$Z_x$	Módulo plástico de la sección alrededor del eje "x"	in <sup>3</sup>
$\gamma$	Peso unitario a granel	kN/m <sup>3</sup>
$\mu$	Coefficiente de fricción de la pared	
$\delta$	Ángulo efectivo de fricción interna	( )°
$\phi_w$	Ángulo de fricción de la pared (teorías de arco)	( )°
$\sigma_{1a}$	Esfuerzo principal mayor de arco (teorías de arco)	
$\beta$	Ángulo equivalente de descarga (teorías de arco)	
$\phi_n$	Esfuerzo normal	kN/m <sup>2</sup>
$\delta'$	Ángulo efectivo de fricción asociado a c'	( )°
$\phi_r$	Ángulo de reposo	( )°
$\phi_i$	Ángulo de fricción interna	( )°
$\theta_w$	Ángulo de inclinación de la tolva	( )°
$\rho_p$	Peso unitario a granel confinado	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_l$	Peso unitario a granel fluidizado	kN/m <sup>3</sup>
$\Delta t$	Margen o sobre espesor por abrasión	mm

$\sigma_{adm}$	Esfuerzo admisible del acero	Mpa
$\sigma_m$	Esfuerzo meridional	kN/m <sup>2</sup>
$\sigma_t$	Esfuerzo tangencial	kN/m <sup>2</sup>
$\sigma_{eq}$	Esfuerzo equivalente	kN/m <sup>2</sup>
$\sigma_v$	Desviación estándar de la turbulencia	
$\rho$	Densidad del aire	Kg/m <sup>3</sup>
$c(f,0)$	Coeficiente de fuerza de cilindros con flujo sin extremo libre	
$\psi\lambda$	Factor de efecto final	
$\nu$	Viscosidad cinemática del aire	m <sup>2</sup> /s
$\phi$	Radio de solidez	
$\lambda$	Esbeltez	
$\alpha$	Coeficiente según el tipo de edificación para cálculo de (Ta)	
$\eta$	Razón entre la aceleración espectral y el período	
$\varphi_e$	Factor de regularidad en elevación	
$\varphi_p$	Factor de regularidad en planta	
$\varphi_c$	Coeficiente de resistencia a compresión método LRFD	
$\varphi_b$	Coeficiente de resistencia de diseño a flexión método LRFD	
$\lambda_r$	Parámetro limitante de esbeltez de elementos no compactos	
$\lambda_p$	Parámetro limitante de esbeltez para elementos compactos	

## **RESUMEN**

El presente trabajo fue realizado con el propósito de presentar una metodología sobre el diseño de silos para almacenamiento de cemento, el cual integra información que fue considerada útil adicionar a ciertos trabajos similares anteriormente realizados en nuestro país, con el fin de complementar y diversificar las fuentes de información requeridas para este fin.

En el diseño del concepto se propone un método de selección de la alternativa más adecuada en función de los requerimientos y recomendaciones sobre la preservación del cemento. Mediante las teorías de arco se presentan varias alternativas de cálculo para proceder con el diseño funcional y el dimensionamiento de una tolva cónica que admita la descarga por flujo gravitacional.

En el diseño estructural se dimensiona el silo y la estructura de soporte en función de las cargas internas, externas y la combinación de ellas, posteriormente se verifica la resistencia del diseño mediante cálculo teórico y se apoyan los resultados obtenidos mediante la simulación y análisis del modelo, a través del software SAP2000-V17.

Como parte complementaria del presente trabajo se presenta la ingeniería de detalle que consta de planos de construcción, procedimiento de preparación del material, procedimiento de pintura, lista de materiales, y el costo que comprende el diseño y construcción del silo.

## **ABSTRACT**

The present work was carried out to show a methodology on the silo design for the cement storage which involves information which was considered to be useful to add to certain similar works previously conducted in our country to complement and diversify the information sources required for this purpose.

In the concept design the most adequate silo prototype selection method is proposed in function of the requirements and recommendations on the cement preservation. The proposed methodology is applied to the silo design for the cement storage of 1200 cubic feet of capacity in which the theories and criteria enunciated in the present work are applied. Through the arc theories various calculus alternatives are presented, useful to continue with the functional design and the dimensioning of a conic hopper which admit the discharge through gravitational flow.

In the structural design the silo casing, the support columns, the lateral and background skid in function of the internal and external charges and their combination are dimensioned; later, the design resistance is verified through a theoretical calculus and the results are supported through the model simulation and analysis by means of the software SAP2000 V.17.

As a complementary part of the present work the detail engineering is presented which consists of construction maps, material preparation procedure, painting procedure, material list and the cost which involves the silo design and construction.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La dinámica de la industria del cemento está estrechamente relacionada con la evolución del sector de la construcción. Según el banco central, la industria del cemento en el año 2010 llegó a ser la cuarta más importante del país al llegar a representar el 10% del PIB, además de ser una de las más intensivas en la generación de empleo. Del año 2012 al año 2015 se ha proyectado un crecimiento en el consumo, por los proyectos de gran envergadura que maneja el gobierno (INP, 2013).

El cemento se expende en varias formas, las cuales están en función del requerimiento del cliente, las formas de presentación más común son: cemento ensacado y a granel. El almacenamiento de éste producto es clave para la conservación de sus propiedades físicas y mecánicas, y de su correcto manejo depende la calidad de los morteros y hormigones para el uso en la construcción.

En obra, es ineficiente el abastecimiento de cemento en sacos, pues existen pérdidas considerables de tiempo, desperdicio de material y manipulación excesiva, por lo que generalmente se usan silos de almacenamiento. En obra, los tipos de silos más utilizados son los fabricados en metal, pues los fabricados de hormigón armado se usan generalmente en grandes industrias como la cementera.

Un silo metálico para almacenamiento de cemento, brinda varios beneficios a la conservación, manejo, recepción y distribución del material mencionado, además, admite el aprovechamiento del sistema FIFO (*First in, First out*) que significa, lo primero en entrar, será lo primero en salir, ventaja fundamental para el cemento.

La fabricación de silos es una actividad que a lo largo de los años, ha presentado uno de los mayores desafíos para un proyectista por la particularidad técnica de diseño que exige cada producto. Existen en el Ecuador trabajos de diseño de silos para almacenamiento de productos a granel, principalmente a través de proyectos de tesis.

## **1.2 Justificación**

El diseño de silos para almacenamiento de cemento presenta dificultades por la escasa información disponible. El alto costo de los análisis y estudios experimentales para conocer el comportamiento y las propiedades de flujo del cemento, limita dicho conocimiento solamente a ciertos sectores empresariales.

Por tal motivo, se plantea el siguiente trabajo con el objeto de establecer un procedimiento para el diseño de silos metálicos para almacenamiento de cemento, basado en recomendaciones y normativa internacional referente al tema, con el fin de mermar el problema antes mencionado.

Si bien en el Ecuador se han desarrollado trabajos similares, el presente trabajo aspira mediante su contenido, colaborar con la diversificación de la información concerniente al diseño de silos para almacenamiento de cemento, para que un proyectista que se inicie en el campo de la construcción de estos contenedores, tenga la posibilidad de analizar y seleccionar la información más adecuada a sus necesidades.

Como parte complementaria, cabe mencionar que actualmente las políticas comerciales del país dificultan las importaciones de maquinaria y equipos, como ejemplo particular los silos de almacenamiento, presionando a que el producto nacional sea la primera opción de consumo, para ello el cambio de matriz productiva impulsa al proyectista ecuatoriano a desarrollar productos de necesidad de la población, y con esto lo obliga a buscar el mejoramiento de sus técnicas y procedimientos de diseño y construcción. Por lo tanto, expuestas tales necesidades se justifica la realización del presente documento propuesto por medio del trabajo de titulación.

El alcance del presente trabajo es para la aplicación al diseño de silos metálicos verticales dentro de la clasificación ACC1, según la norma (EN 1991-4, 2006). La metodología planteada es específica para el manejo de cemento a granel. Si esta es utilizada para almacenar otro tipo de material granular, se deben tomar las precauciones necesarias, y recurrir al apoyo de fuentes de información especializada. El diseño se aplicará a un caso particular propuesto en base a requerimientos teóricos, el cual servirá para ilustrar la correcta aplicación de los criterios enunciados.



## **1.3      Objetivos**

**1.3.1      Objetivo general.** Diseñar un silo para almacenamiento de cemento siguiendo un procedimiento metodológico y sistémico, basado en las recomendaciones de estándares nacionales e internacionales que permitan obtener un diseño confiable y funcional.

**1.3.2      Objetivos específicos:**

- Recopilar y analizar información sobre el manejo, control, almacenamiento y preservación de cemento a granel, proveniente de literatura especializada en el tema, para aplicarlo al diseño de silos para almacenamiento de cemento.
- Efectuar el diseño del concepto para seleccionar un modelo de silo con las características más adecuadas para el ensilaje de cemento.
- Elaborar un proceso metodológico ordenado basado en los fundamentos propuestos en textos de diseño, para aplicarlo al proyecto objeto del presente trabajo.
- Efectuar la ingeniería de detalle a través de planos de construcción, lista de materiales y procedimiento de pintura como resultado del diseño y cálculo efectuado, con el fin de especificar los procesos técnicos complementarios al diseño del silo para almacenamiento de cemento.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Silos

Un silo es una estructura cerrada utilizada para el almacenamiento de productos en grandes cantidades, las paredes forman una barrera de protección contra el ambiente y su uso es ventajoso porque permite un manejo rápido y eficaz en la recepción, tratamiento, almacenamiento, control y descarga del producto.

El término “silo” tiene orígenes en la antigua Grecia, antes de la era cristiana y significa hoyo para almacenamiento de granos, los cuales surgieron por la necesidad de los agricultores de preservar sus cosechas por períodos prolongados de tiempo.

Figura 1. Primeras formas de uso de silos

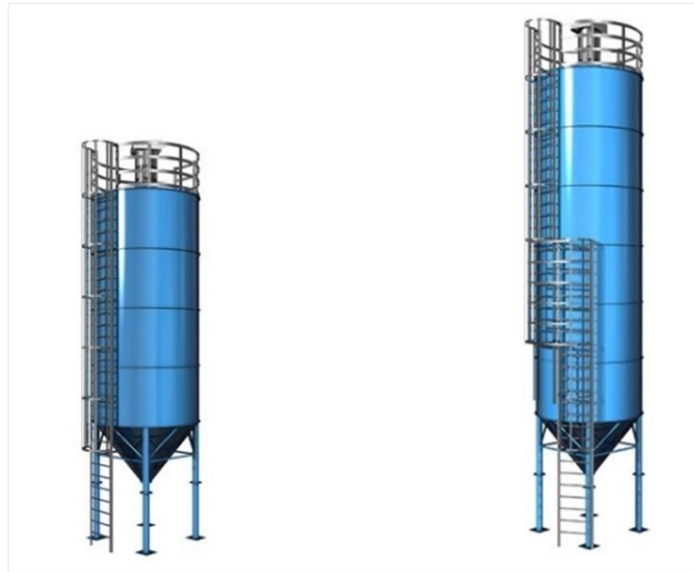


Fuente: <http://bit.ly/29bpd4E>

En el año 1855 en Francia, Mr. Doyère profesor agrónomo del Liceo Bonaparte de París, propone la construcción de silos con láminas alineadas de metal, y queda pues esa fecha marcada como el punto en el que se planteó la primera propuesta de mejora en el almacenamiento de productos, a partir de la cual, se abrió paso al desarrollo de investigaciones para el diseño de aquellos contenedores, los que posteriormente expandirían su campo de aplicación al almacenamiento de otros tipos de productos sólidos y pulverulentos a granel tales como granos, cereales, harinas e incluso a minerales que requerían de una exigente protección como cal, cemento, Clinker, etc.

**2.1.1** *Silos para almacenamiento de cemento.* Un silo de cemento es un contenedor que puede ser construido en hormigón, polímero o metal, aunque comúnmente de construcción metálica, como el tipo de silo que es objeto del presente trabajo. Su función principal es almacenar grandes cantidades de cemento a granel, protegiendo en éste sus características físicas y químicas ante la agresión del medio circundante, con la finalidad de preservar sus propiedades mecánicas en su uso final como aglomerante hidráulico en morteros y hormigones (*Kurt E., 1979*).

Figura 2. Silo vertical para almacenamiento de cemento



Fuente: <http://bit.ly/28Vfbbi>

**2.1.1.1** *Principios de funcionamiento.* La función principal de un silo de cemento es formar una barrera de protección contra las condiciones ambientales como la humedad, gases, polvos y otros contaminantes que pudieren alterar la calidad del material, además permite minimizar la manipulación excesiva durante la ejecución de los diferentes procesos derivados del almacenamiento.

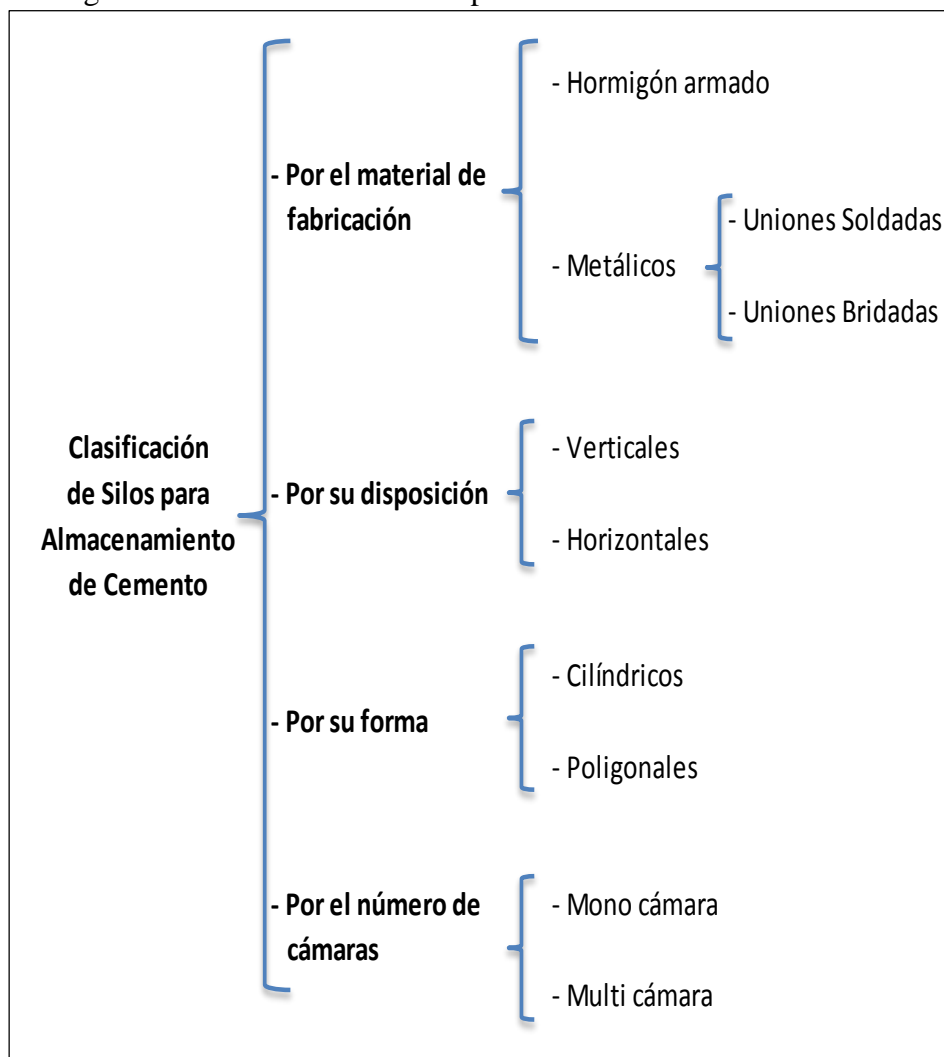
El cemento es recibido y almacenado dentro del silo, éste debe ser evacuado del mismo para los procesos posteriores en la secuencia cronológica en la que fue ensilado para evitar que pierda propiedades por el tiempo de almacenamiento dentro del contenedor.

La operación de carga del silo puede ser mediante un sistema neumático, elevación de cangilones, aerodeslizadores, tornillos helicoidales, tornillo sin fin, etc. Los cuales conducen el cemento a través de una boca de entrada hacia el interior del silo.

En la operación de descarga del cemento se puede utilizar varios métodos, uno de los más convenientes es el desalojo por flujo gravitacional, sin embargo, es posible utilizar dispositivos mecánicos, utilizados cuando se prevé problemas de flujo en la descarga del material. En fin, cualquier método escogido debe asegurar el desalojo del cemento sin obstrucciones de flujo y con un eficiente control de caudal.

**2.1.2** *Tipos de silos para almacenamiento de cemento.* Tanto en las plantas productoras de cemento como en las empresas dedicadas a la construcción civil, las instalaciones de almacenamiento representan uno de los rasgos distintivos de las mismas, y es en sus propios requerimientos en donde surge la iniciativa para desarrollar la variedad de diseños hoy existentes. En el siguiente esquema se muestra una clasificación sintetizada del tipo de silos que son comúnmente utilizados en la industria.

Figura 3. Clasificación de silos para almacenamiento de cemento.

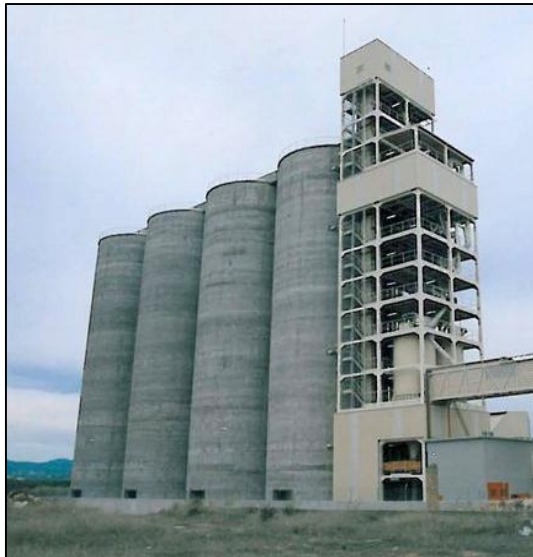


Fuente: Autor

Del esquema mostrado, a excepción de los silos construidos de hormigón armado, los otros tipos pueden ser transportables dentro del sitio de instalación o hacia otras locaciones del proyecto, siempre que las condiciones y su diseño lo permitan.

**2.1.2.1** *Silos de hormigón armado.* Los silos de hormigón armado o silos tipo torre, están contruidos con materiales como ladrillo, estructura de acero, bloques de cemento, hormigón armado y un revestimiento interno de láminas de acero que favorecen el deslizamiento del producto dentro de las paredes. Son utilizados, tanto en plantas productoras de cemento como en industrias de construcción, pero éstos se aconsejan preferentemente para instalaciones fijas muy grandes de altas exigencias de almacenamiento.

Figura 4. Silos contiguos para almacenamiento de cemento.



Fuente: [www.stolza.com](http://www.stolza.com)

**2.1.3** *Silos Metálicos.* Los silos metálicos tienen la ventaja de admitir diversas configuraciones, formas y diseños que dependen de las necesidades y requerimientos.

**2.1.3.1** *Silos Verticales.* Los silos verticales pueden ser contruidos para almacenar capacidades de 10 hasta 70 toneladas. El llenado se lo hace por la parte superior y la descarga por la parte inferior del silo. Esto permite que el cemento sea desalojado hacia camiones, bandas transportadoras y/o recipientes para los procesos posteriores al almacenamiento en el orden cronológico en que fue ensilado.

La construcción en acero de silos admite diversos cambios en función del requerimiento

Figura 5. Silos metálicos verticales.



Fuente: [www.plantashormigon.com](http://www.plantashormigon.com)

Cuando estos silos tienen una capacidad de almacenamiento menor de 1400 pies cúbicos (Kemex), su tamaño admite adaptaciones en su diseño, adicionando skids laterales y/o ruedas en la parte inferior del silo para hacerlo transportable.

**2.1.3.2 Silos Horizontales.** Este tipo de silos son de pequeña y mediana capacidad típicamente utilizados para retención temporal, esto mientras se efectúa el transporte del cemento a granel generalmente desde la fábrica del producto al consumidor final.

Figura 6. Silos horizontales para transporte de cemento.

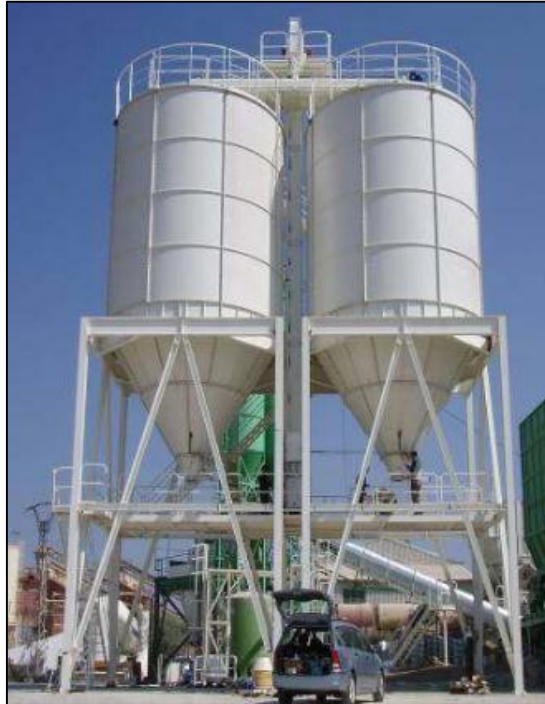


Fuente: [www.carmextrailers.com](http://www.carmextrailers.com)

Dentro de esta clasificación podemos incluir los *silos poligonales*, que son contenedores de pequeña capacidad y de geometrías variadas de construcción y adaptaciones en cada diseño que favorecen la movilidad de los mismos.

**2.1.3.3 Silos desmontables.** Estos silos pueden ser trasladados en piezas, en el ensamble no interviene soldadura alguna, están formados por una serie de paneles metálicos empernados entre sí mediante bridas con sellos de neopreno, sus partes son intercambiables y por lo tanto se puede incrementar su capacidad de almacenamiento.

Figura 7. Silos desmontables.



Fuente: <http://bit.ly/290SIua>

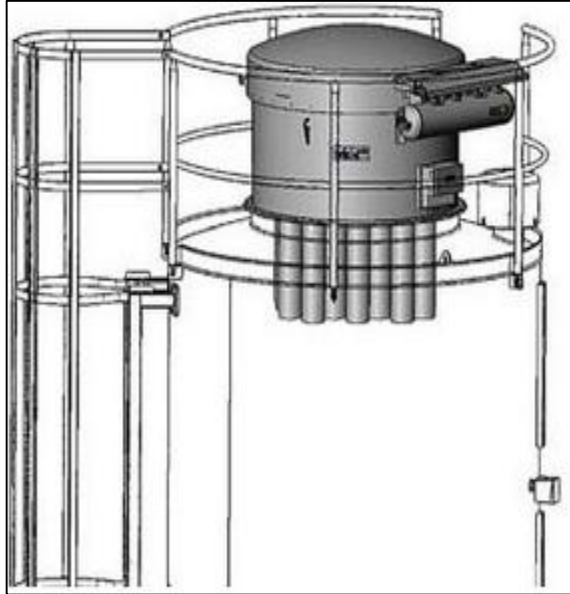
## 2.2 Elementos constitutivos de un silo

Los silos cilíndricos de construcción metálica, como el que es objeto del presente trabajo, constan de los siguientes elementos constitutivos.

**2.2.1 Cabeza.** Generalmente soldada, se ubica sobre la parte superior del cuerpo y tiene una determinada pendiente para evitar el estancamiento del agua lluvia. Esta parte del silo puede contener elementos básicos como los que a continuación se describen.

La función de la *Chimenea o respiradero* es permitir la circulación de aire desde afuera hacia adentro del silo, éste contiene filtros que impiden el paso de impurezas y humedad. La cantidad de aire que ingresa al silo reemplaza la cantidad de cemento desalojado, y el proceso inverso se da para el llenado, principalmente beneficioso para el sistema de transportación neumática del cemento.

Figura 8. Parte superior de silo – chimenea filtrante.



Fuente: [www.setimep.pt](http://www.setimep.pt)

El *manhole* en el silo de cemento es un punto de acceso a la cámara contenedora del producto, (no necesariamente se encuentra en el techo del silo, también puede estar ubicado en el cuerpo o el fondo) sus dimensiones son estandarizadas para que una persona promedio pase a través de él sin excesiva dificultad, permitiendo que se puedan realizar inspecciones, mantenimiento y reparaciones dentro del silo.

El *filtro de mangas*, es un elemento filtrante cuyo principio de separación es el tamizado. El aire cargado de partículas de cemento entra en el filtro haciendo pasar esta corriente a través de las mangas del filtro que actúan como tamiz, como el espacio entre las fibras del filtro es menor que el tamaño de las partículas, estas no pueden pasar y quedan retenidas en la superficie del tejido.

**2.2.2** *Cuerpo*. Es el elemento más grande que constituye el silo, puede estar formado por virolas empernadas o soldadas que forman una pared cilíndrica cuya función es contener el cemento con la debida hermeticidad que asegure la correcta preservación del mismo, y a la vez soportar las sollicitaciones de carga como el peso propio, accesorios, el material, presiones de llenado y vaciado, viento, entre otras.

**2.2.3** *Fondo*. Es un elemento trascendental, su forma se define en función de la capacidad de almacenamiento del silo y el método de descarga seleccionado que asegure la fluidez del cemento hacia la salida.



**2.2.3.1 Fondo Cónico o tolva.** Este tipo de fondo es utilizado en silos de pequeña y mediana capacidad, máximo de 10 metros de diámetro (Kemex). Está diseñado en base a una geometría cónica que permite que por acción de la gravedad el cemento se deslice hacia la boca de salida guiado por la inclinación de la pared.

**2.2.3.2 Fondo Plano.** Es un tipo de fondo utilizado en silos de gran tamaño, de 10 a 30 metros de diámetro (Kemex). Por su gran capacidad de almacenamiento requieren de dispositivos que faciliten la extracción del cemento como: Aireadores, trituradores de terrones, controladores de caudal. etc. Los tipos más comunes de fondo plano son:

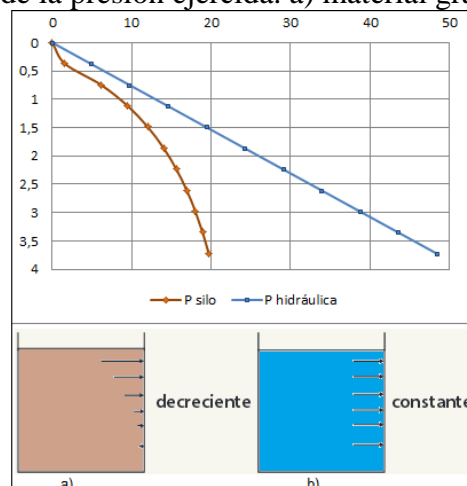
- Fondo plano con cono central abierto,
- Fondo con cámara colectora,
- Fondo con cámara de descarga realizada (LABAHN, y otros, 1983).

**2.2.4 Silos mono y multi cámara.** Los silos mono cámara, son aquellos que son diseñados para contener un solo tipo de producto en un mismo espacio, como los mencionados en las clasificaciones interiores.

Los silos multi cámara, son diseñados con el objetivo de poder almacenar dentro de una misma estructura física varios tipos de material o calidades del mismo. Esto se logra seccionando cámaras concéntricas que separan a un producto del otro.

## 2.3 Presiones internas en las paredes del silo

Figura 9. Efecto de la presión ejercida. a) material granular y b) líquido.



Fuente: Autor

El peso del cemento cuando está en reposo y cuando está movimiento produce presiones internas sobre la superficie interna de las paredes del silo. Resulta equivoco establecer una analogía con tanques de almacenamiento de líquidos y recipientes a presión, puesto que el perfil de presiones generado es diferente, como indica la figura (9).

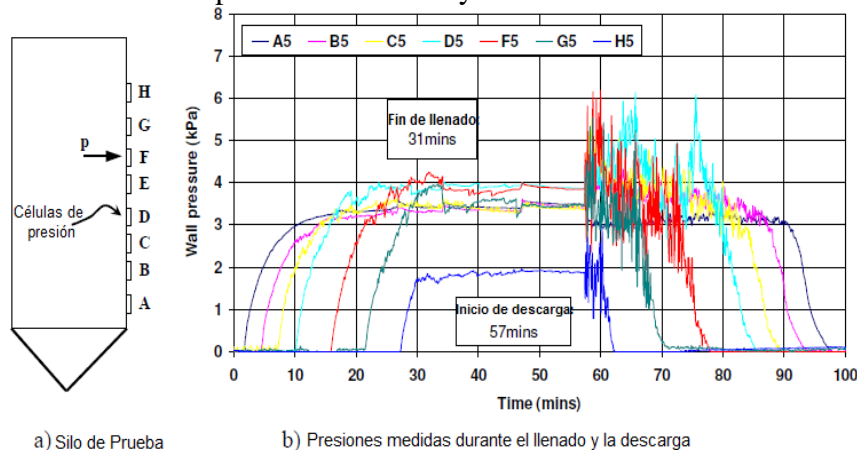
Las presiones internas en las paredes del silo se distinguen entre:

**2.3.1** *Presiones de llenado.* Son las presiones que el peso del material ejerce sobre la superficie interna de las paredes del silo durante el proceso de llenado.

**2.3.2** *Presiones de vaciado.* Son las presiones que se generan durante el proceso de descarga del material debido al movimiento, el peso y la fricción contra la superficie interna de las paredes del silo.

Las mediciones experimentales realizadas por investigadores tal como el Prof. Michael Rotter, muestran una relativa estabilidad para el conjunto de presiones de llenado, no así para las presiones de descarga para las que diversos análisis cuasi-estáticos han sido desarrollados para tratar de cuantificar la magnitud de las presiones pico que se generan, como muestra la figura (10), sin embargo, el análisis computacional y teórico, actualmente no predice el comportamiento dinámico real. Por tal razón, las presiones de vaciado definidas en los estándares y teorías corresponden a extremas simplificaciones de mediciones experimentales, por lo que, las expresiones teóricas referidas a su cálculo usan coeficientes de corrección para considerar dicha incertidumbre.

Figura 10. Lecturas de presión de llenado y vaciado en un silo cilíndrico vertical.



Fuente: J. Michael Rotter. Silos and tanks in research and practice: State of art and current challenges. 2009 Valencia – España.

## 2.4 Cemento

El cemento es un conglomerante que une o da cohesión, su componente principal es el Clinker, que es el producto de la mezcla y la calcinación de piedra caliza y arcilla a temperaturas entre 1350 y 1450 grados centígrados, que al molerse y mezclarse con yeso y adiciones se produce el cemento. El cemento al ser mezclado con agua tiene la peculiaridad de endurecerse y producir compuestos mecánicamente resistentes, incluso si es sumergido en agua.

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos como los aluminatos.

**2.4.1** *Cemento Portland.* Es un alúmino silicato de calcio patentado por Joseph Aspdin en 1824, cuyo color gris característico semejante al de la piedra de las canteras de las islas inglesas de Portland, le dieron el nombre a este material con la propiedad de fraguar y endurecer al reaccionar químicamente con el agua.

La norma ecuatoriana (NTE INEN 2380, 2011), detalla los siguientes tipos de cemento hidráulico, bajo la designación mostrada a continuación:

- Tipo GU (Para construcción en general)
- Tipo HE (Alta resistencia inicial)
- Tipo MS (Moderada resistencia a los sulfatos)
- Tipo HS (Alta resistencia a los sulfatos)
- Tipo MH (Moderado calor de hidratación)
- Tipo LH (Bajo calor de hidratación)
- Opción R (Baja reactividad con áridos reactivos álcali-sílice).

Esta norma no establece restricción en la composición del cemento o sus componentes.

**2.4.2** *Composición del cemento Portland.* Los componentes indicados en la tabla 1, brindan propiedades específicas, y el porcentaje presente de cada uno de ellos en la composición depende de cada tipo de cemento.

Tabla 1. Componentes del cemento Portland

<b>Componentes del cemento Portland</b>	
<b>Denominación</b>	<b>Designación</b>
Clinker	K
Escoria de horno alto	S
Humo de sílice	D
Puzolana natural	P
Puzolana natural calcinada	Q
Ceniza volante silíceo	V
Ceniza volante calcárea	W
Esquisto calcinado	T
Caliza	L
Caliza	LL
Sulfato de calcio	-
Aditivos	-

Fuente: <http://bit.ly/28ZmYUc>

**2.4.3** *Propiedades físicas y mecánicas del cemento.* Para analizar el comportamiento del cemento a granel en condiciones de confinamiento y su capacidad, para fluir es necesario conocer las siguientes propiedades:

- *Densidad*, es la relación entre el peso y el volumen, un cemento con adiciones tiene una densidad menor porque el contenido de Clinker es menor.
- *Finura de molido*, propiedad relacionada con la hidratación de las partículas. Cuando el cemento es muy fino endurece más rápido y se obtiene alta resistencia en menor tiempo; pero lo hace más susceptible a la hidratación con la humedad ambiental, haciendo que su vida útil en el almacenamiento sea más corta.
- *Firmeza*, es la capacidad que tiene el cemento para conservar su volumen después del fraguado, ésta puede ser afectada por la presencia excesiva de cal libre.
- *Fraguado*, es un proceso exotérmico en el que la mezcla pierde plasticidad y gana moderada resistencia mecánica.
- *Endurecimiento*, es la ganancia progresiva de resistencia mecánica de una mezcla, éste es un proceso que se inicia inmediatamente después del fraguado.

- La velocidad de fraguado y el endurecimiento dependen de varios factores como: composición química, cantidad de agua, temperatura y finura del cemento.
- Requisitos físicos normalizados del cemento, la norma ecuatoriana INEN 2380, clasifica a los cementos en base a los requisitos de desempeño, en ésta se exponen los requerimientos físicos normalizados y opcionales del cemento, como se indica en el anexo A (NTE INEN 2380, 2011).

**2.4.4** *Almacenamiento del cemento a granel en silos.* El cemento Portland a granel es transportado por vehículos acondicionados con tanques o cisternas especiales que permiten su descarga a través de compresores de aire que arrastran el cemento hacia el interior de los silos. Para el manejo apropiado del cemento en el mencionado contenedor, se debe tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El silo debe estar completamente cerrado e impermeabilizado, sin perforaciones, fisuras, goteras o filtraciones que puedan comprometer la calidad del cemento.
- Conservar una distancia de al menos 80 centímetros entre el piso y la pared inferior del silo o la válvula de salida del cemento.
- En lo posible, controlar que la distancia entre la ubicación de los silos y el lugar de estacionamiento de los vehículos graneleros no sea mayor de cinco metros.
- Cuidar que los espacios para los vehículos graneleros sean suficientes para no entorpecer las maniobras de ingreso, estacionamiento y descarga.
- Revisar que los accesos tengan poca pendiente y una base firme capaz de soportar el peso de los vehículos graneleros.
- La cimentación y/o estructura de soporte de los silos debe garantizar la estabilidad del silo tanto lleno como vacío, y durante el proceso de descarga del cemento.
- Cerciorarse que el silo no esté en contacto con estructuras, equipos o muros que puedan afectarse con la vibración generada durante la descarga de cemento.

- Mantener despejados los ductos de desfogue y los dispositivos de ventilación para prevenir daños por la presurización del cemento durante la descarga.
- El consumo de cemento debe ser rápido y continuo, en lo posible que no se superen las seis semanas de almacenamiento (en ambientes muy húmedos el consumo no debe superar las cuatro semanas). Si se requiere un mayor tiempo se recomienda sellar los dispositivos de ventilación y destaparlos cada vez que se vaya a extraer cemento. Si el consumo se detiene por completo se prevén largos períodos de almacenamiento, se debe desocupar el silo.
- Desocupar los silos y limpiarlos en su interior al menos cada tres meses para evitar encostramientos de cemento en las paredes.
- Inspeccionar el estado de los sellos de seguridad que se encuentran en compuertas y válvulas del vehículo granelero, y revisar los documentos de remisión al momento de recibir el cemento a granel (OSORIO, 2010).

**2.4.5** *Causas de deterioro del cemento.* El cemento es un material sensible a la humedad, si en su almacenamiento es propenso al contacto con aire húmedo, fraguará más lentamente y su resistencia se verá disminuida.

Esta alteración se produce primeramente por la hidratación y luego la carbonatación de los silicatos, aluminatos y álcalis libres, las partículas hidratadas de cemento se endurece y forma grumos que alteran la granulometría. Es aceptable para el cemento absorber hasta el 1% de humedad, pero si absorbe más del 5% de humedad, el cemento se destruye a todos los efectos prácticos (MORENO, 2008). El tiempo de almacenamiento también produce disminución en las propiedades mecánicas del cemento como se indica en la tabla (2).

Tabla 2. Efecto del almacenamiento en la resistencia del cemento

<b>Tiempo de almacenamiento</b>	<b>% Reducción de la resistencia</b>
3 Meses	20-30
6 Meses	30-40
12 Meses	40-50

Fuente: (MORENO, 2008) pág. 4

## 2.5 Propiedades de flujo del material

Las propiedades de flujo de un material son necesarias para predecir y controlar su comportamiento dentro del contenedor. Estas propiedades pueden ser medidas en un laboratorio utilizando dispositivos como la célula de corte de Jenike (Storage and flow of silos, 1964), o recurrir a una base confiable de datos del material específico. Estas propiedades pueden ser distintas para un mismo material, con tan solo la alteración de una de las variables de las que dependen dichas propiedades, que son:

- Contenido de humedad,
- Grado de cohesión,
- Tamaño de las partículas, forma y dureza,
- Dureza,
- Temperatura,
- Presión y tiempo de almacenamiento.

## 2.6 Patrones de Flujo

Durante la descarga del silo se puede producir tres tipos de flujo, cuyo desarrollo depende de la naturaleza del material pulverulento y del recipiente que lo contiene.

**2.6.1 Flujo Másico.** En este tipo de flujo, a partir de la apertura de salida de la tolva todo el material dentro del silo se mueve al mismo tiempo, es decir, lo mismo se mueven las partículas que están junto a las paredes, que las que están en el centro.

Figura 11. Flujo másico - movimiento del material dentro del silo.



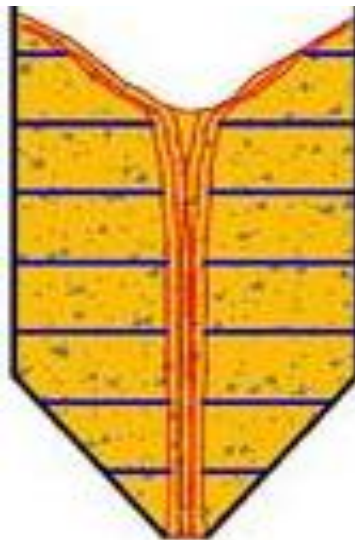
Fuente: <http://eng.tel-tek.no/Powder-Technology>

El flujo másico garantiza la evacuación completa del material permitiendo aprovechar al máximo la capacidad del silo y evitando que se produzcan zonas muertas de material en la periferia del mismo. Este además promueve un proceso de mezcla entre las partículas del material ensilado, lo que favorece a la homogeneidad en el tamaño de las partículas que pudieron haber sufrido un problema de segregación durante el llenado.

Es objetivo ideal en el diseño de silos para almacenamiento de cemento lograr flujo másico para la descarga del material por las ventajas antes mencionadas, y adicionalmente porque admite el principio “*first in-first out*”, que permite el consumo del cemento siguiendo un ciclo cronológico y ordenado.

**2.6.2** *Flujo Tubular.* Este tipo de flujo resulta cuando las partículas fluyen por el centro del cuerpo de material, a través de un espacio de tamaño aproximado al diámetro de salida de la tolva, quedando material estancado en el espacio circundante al flujo, por tal motivo se lo conoce también como “flujo de chimenea o de conducto”.

Figura 12. Flujo tubular - movimiento del material dentro del silo



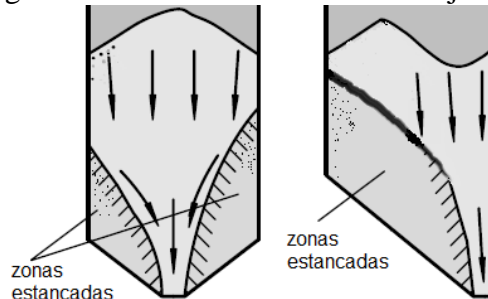
Fuente: <http://eng.tel-tek.no/Powder-Technology>

La segregación particular durante el llenado puede favorecer al origen de flujo tubular, pues las partículas finas que se acopian en el centro fluyen con mayor facilidad entre ellas. El flujo tubular puede resultar beneficioso en silos en los que no importe el orden cronológico de descarga, y que además disponga de un mecanismo auxiliar de descarga.



**2.6.3 Flujo Mixto.** Este tipo de flujo no se reconoce ante el criterio de varios autores, pues es un estado de combinación entre el flujo másico y tubular.

Figura 13. Perfil característico de flujo mixto.



Fuente: <http://eng.tel-tek.no/Powder-Technology>

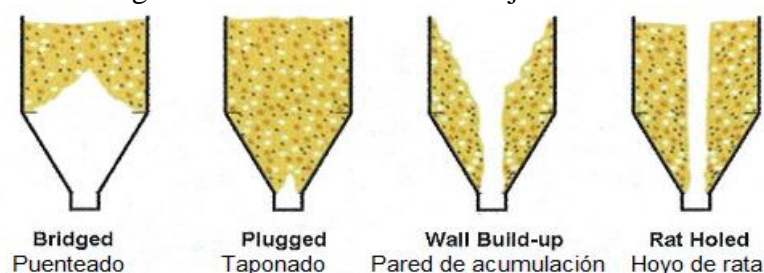
Este tipo de flujo aún no ha sido estudiado con detalle, por lo que solamente tienes ideas se conjeturan sobre los efectos que éste genera sobre la estructura interna del silo.

## 2.7 Problemas de flujo en silos

Un diseño funcional deficiente (es decir, un inadecuado ángulo de inclinación de la tolva y la boca de salida) puede generar obstrucciones de flujo que impiden total o parcialmente la salida del material pulverulento. Los más comunes son:

- *Formación de arcos o puenteo:* es una condición de obstrucción de flujo, en el cual, arcos estables se forman en la parte baja del silo o en la tolva.
- *Ratholing:* es una condición de obstrucción de flujo, en la cual se forma un canal estable de flujo concéntrico a la boca de salida de la tolva, resultando en flujo errático de material hacia el exterior. Aunque el silo fuese diseñado para flujo másico, podría presentarse éste tipo de obstrucción característico del flujo tubular.

Figura 14. Obstrucciones de flujo en silos.



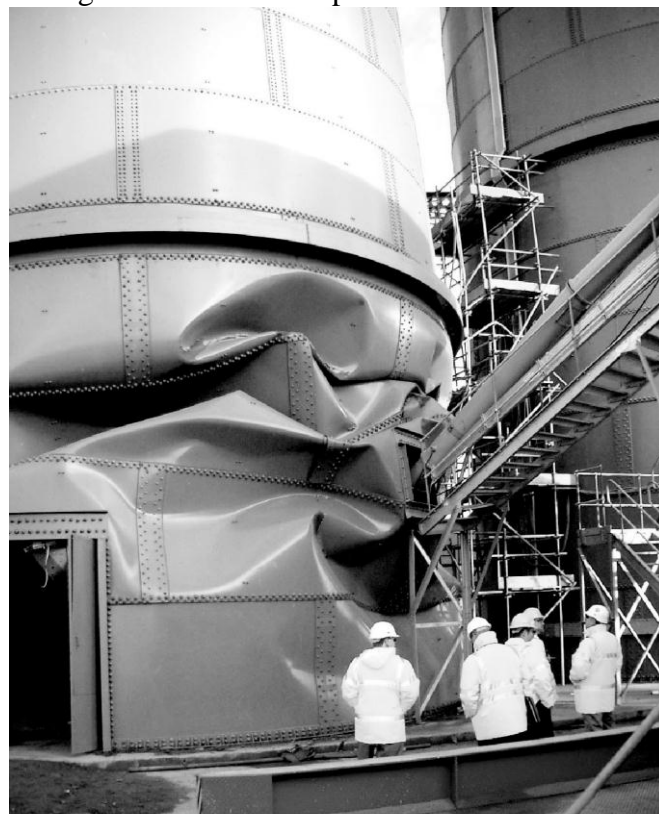
Fuente: <http://bit.ly/28ZCgtB>

Las propiedades del material como la humedad, el grado de cohesión, y un prolongado tiempo de almacenamiento favorecen a la formación de estas estructuras estables de material. El perjuicio se produce cuando dichas estructuras colapsan, provocando esfuerzos sobre las paredes que difícilmente pueden ser previstos en el diseño.

## 2.8 Modos de falla en silos

Las fallas en silos se deben principalmente a la imprecisión de las teorías disponibles para prever el comportamiento real de las cargas, especialmente por efectos dinámicos. Adicionalmente, existen problemas estructurales que los diseñadores suelen pasar por alto, los más comunes, son los que a continuación se mencionan (Silo Failures: Case Histories and Lessons Learned, 2000).

Figura 15. Falla en la pared lateral de un silo



Fuente: <http://bit.ly/28W3753>

**2.8.1** *Pandeo de las paredes.* Este tipo de falla se debe a la presión de rozamiento del cemento contra las paredes, las que inducen fuerzas de compresión, que a su vez provocan pandeo en las paredes del silo. Aunque dicho efecto podría ser contrarrestado por la presión horizontal del material en las paredes (RAVENET, 1992).

**2.8.2** *Flexión en paredes circulares.* Este problema estructural se produce cuando el flujo del silo no es concéntrico al eje vertical del cuerpo, esta excentricidad en la descarga provoca cargas no uniformes en la circunferencia del silo originando momentos flectores en el cuerpo y haciendo necesaria la implementación de rigidizadores. Para evitarlo, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Siempre que sea posible se debe diseñar el silo para carga y descarga concéntrica,
- Si se preve carga y descarga excéntrica, chequear el silo por cargas no uniformes,
- Si se utiliza un método auxiliar de descarga, preveer la posibilidad de ratholing.

**2.8.2.1** *Fallas por sobre presiones o presiones asimétricas.* Se produce por la presencia de insertos (elementos estructurales que facilitan la descarga) como: conos invertidos, vigas, tubos doblados y otros elementos que pueden generar sobre presiones o presiones asimétricas en el cuerpo del silo o tolva. Por lo tanto, dichos insertos deben ser tomados en cuenta para evitar sobre presiones y la posibilidad de que estos produzcan un patrón de flujo asimétrico.

**2.8.3** *Fallas por patrón de flujo y propiedades erradas.* Un silo diseñado para desarrollar flujo másico puede terminar desarrollando flujo tubular y provocar presiones no previstas en el diseño, cuyo efecto puede ser devastador. En ciertas circunstancias, el desconocimiento de la variabilidad de las propiedades del material, temperatura, humedad, tamaño de las partículas y cohesión, puede ser peor que el desconocimiento del patrón de flujo (Silo Failures: Case Histories and Lessons Learned, 2000). Entonces:

- Si se considera que las propiedades del material van a variar, debe asegurarse que el silo soporte este tipo de cambios.
- Si el silo está diseñado para un estricto patrón de flujo, debe considerarse la posibilidad de que este pueda sufrir ligeros cambios.
- Tomar la debida precaución, si las propiedades del material son tomadas de tablas.
- Tomar en cuenta que un silo diseñado para almacenar un tipo de material, puede ser obsoleto para el almacenamiento de otro.

**2.8.4** *Fallas por temperatura y humedad del material.* La diferencia térmica entre las paredes del silo y el material granular contenido, los rápidos cambios de temperatura ambiental y la diferencia térmica entre las capas de material granular dentro del silo, pueden provocar un incremento de presiones en las paredes del silo, que de no ser consideradas en su diseño pueden provocar su falla.

Otra condición inusual se produce cuando la humedad del material se muda a la parte inferior del silo, que se expande, creando un taponamiento e induciendo presión en las paredes del silo o la tolva. Para evitar estos problemas se debe considerar:

- Tomar en cuenta la presión por efectos térmicos, y/o incluir factores de seguridad para silos que van a funcionar en la intemperie.
- Evaluar la probabilidad de migración de humedad en silos con material que puede permanecer en estado estacionario.

**2.8.5** *Peligros de explosión.* El desprendimiento de gases de ciertos materiales pulverulentos, así como el polvo suspendido en el aire forman un compuesto altamente explosivo. Una chispa hace falta para desencadenar la flama ocasionando la explosión del silo. La tabla 3 muestra una clasificación de diferentes materiales propensos a explosión que se han documentado a lo largo de la historia (RAVENET, 1992).

Tabla 3. Clasificación de explosiones más importantes ocurridas en silos

<b>Tipo de materiales</b>	<b>Número de explosiones</b>
Silos para cereales	14
Silos para algodón	9
Silos para harinas	6
Silos para plásticos	5
Silos para madera	5
Silos para soja	4
Silos para maíz	3
Silos para piensos compuestos	3
Silos para harina de madera	3
Silos para algodón y almidón	2
Silos para productos metálicos	1

Fuente: (RAVENET, 1992)

## 2.9 Soldadura

Figura 16. Soldadura de recipientes



Fuente: <http://geisamexico.com/>

El procedimiento más utilizado para la unión de los elementos de recipientes metálicos que soportan cargas estáticas y dinámicas es la soldadura. La aplicación de la soldadura puede ser mediante un proceso manual o automático. El material de aporte de la soldadura debe ser compatible con el material base a soldar (ASTA, 2007). Los procesos de soldadura que pueden ser aplicados son:

- Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW),
- Soldadura por arco sumergido (SAW),
- Soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa (semiautomática alambre macizo), excepto modo de transferencia por cortocircuito (GMAW),
- Soldadura por arco con alambre tubular (semiautomática alambre tubular), con o sin protección gaseosa (FCAW).

**2.9.1 Eficiencia de soldadura.** La unión entre láminas de acero por medio de soldadura representa un factor de discontinuidad en el elemento. Además, debido a la posibilidad de que se produzcan defectos por cambios rápidos de temperatura de la zona próxima a la soldadura, permiten definirla como una zona debilitada.

La eficiencia de soldadura ( $E$ ) representa un coeficiente que es utilizado para aplicar una reducción al esfuerzo máximo admisible en el cálculo de recipientes en los que sus láminas se unen por medio de soldadura.

**2.9.2** *Examinación radiográfica de soldadura.* El método de radiografiado y gammagrafías de la norma ASME, es un ensayo no destructivo que permite determinar la eficiencia de juntas soldadas, dependiendo de su tipo y grado de examen, estos son:

- Radiografía en forma total (radiografía full)
- Radiografía por puntos (radiografía spot),
- Sin examinación.

Figura 17. Examinación radiográfica en campo.



Fuente: <http://bit.ly/28Yvd3F>

Para el procedimiento de evaluación radiográfica se puede hacer uso de la norma (ASTM, 1968). Para escoger un tipo de soldadura de las numerosas alternativas, se debe tomar en cuenta que esa decisión depende de:

- Las circunstancias de soldadura: La accesibilidad a la junta y el equipamiento disponible para la ejecución del trabajo.
- Requerimientos del código: Respecto al tipo de junta, el código puede establecer requerimientos basados en: el servicio, el material y la locación de la soldadura.
- El aspecto económico: Si los dos factores precedentes permiten escoger libremente, el aspecto económico decidirá sobre el tipo de soldadura, ya que cada proceso de preparación del sustrato, el tamaño del recipiente, el equipo de soldadura, etc., juegan un papel importante en la decisión (MEGYESY, 2008).

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

El presente capítulo tiene como objetivo establecer una metodología para el diseño de silos metálicos para almacenamiento de cemento, presentado de manera organizada y sistematizada la información necesaria que permita plantear posibles soluciones para alcanzar el objetivo propuesto. Estudiando las obras de diseño conviene que la metodología para el diseño del silo, se plantee en cuatro etapas que son: diseño del concepto, diseño funcional, estructural y de detalle, como se verá a continuación.

#### 3.1 Formulación del diseño

En esta etapa de diseño, se aplicará un procedimiento sistemático basado en la guía de la norma (VDI 2221, 1993-05), de la cual se toman las etapas generales, para adaptarlas al diseño de un silo para almacenamiento de cemento, estas son:

- Especificaciones – Clarificar y definir la tarea
- Estructura de funciones – Definir las funciones
- Búsqueda de soluciones – Buscar alternativas y combinaciones
- Estructura modelo – Definir la solución aplicable.

**3.1.1** *Especificaciones.* En esta etapa se definirán las especificaciones técnicas del silo para almacenamiento de cemento.

- Capacidad. Se fabricará el silo para una capacidad de 600 barriles, equivalente a 1200 pies cúbicos, siendo un silo de capacidad intermedia que brinda la posibilidad de ser un modelo transportable (Concrete Plant Standards, 2007). Un silo de esta capacidad es utilizado en la construcción de viviendas, edificios e infraestructura, para proyectos de largo plazo y alta producción (ODISA, 2014).
- Disposición. Para conseguir el cumplimiento del sistema FIFO, y lograr un consumo de cemento en orden cronológico, el silo debe tener disposición vertical.

- Geometría. El silo tendrá sección cilíndrica, por su buena capacidad para resistir los esfuerzos circunferenciales a diferencia de otras configuraciones geométricas como las poligonales, mismas que requieren de rigidización estructural.
- Material. El silo será fabricado a partir de láminas de acero.
- Fabricación. Si el modelo de silo admite su transportación, por facilidad en el proceso de construcción, conviene que sea fabricado en el taller.
- Transporte. Se debe adecuar el diseño para facilitar la transportación del silo.
- Montaje. El diseño debe admitir facilidad para el montaje.

**3.1.1.1** *Locación del silo.* El silo para almacenamiento de cemento, se diseñará para un entorno ambiental que proponga las condiciones más agresivas a las que puede estar expuesto una construcción estructural de este tipo en nuestro país. De las regiones: Costa, Sierra, Oriente e Insular, se evaluarán las siguientes variables: Tipo de suelo, temperatura ambiente, humedad relativa, zona sísmica.

La región amazónica presenta condiciones ambientales en que puede basarse el diseño, pues su suelo blando, altas temperaturas, humedad relativa y precipitación, suponen un reto al diseño del silo, tal como lo indican los datos obtenidos del anuario meteorológico del INAMHI 2011, de la referencia M1203 de la provincia de Sucumbíos.

Tabla 4. Condiciones meteorológicas - Provincia de Sucumbíos

<b>M1203 - INAMHI</b>	
Temperatura máx.	30,2 °C
Temperatura mín.	17,5 °C
Humedad relativa	90%
Punto de rocío	22 °C
Precipitación	176,9 mm/día
Velocidad media aire	1,4 km/h

Fuente: Anuario meteorológico INAMHI N°51 2011 – Quito 2014. P 149

**3.1.2** *Requerimientos.* Serán tomadas las recomendaciones dadas en el capítulo anterior, que puntualizan las causas del deterioro y las precauciones en el almacenamiento de cemento a granel. Como se indicó, la captación de anhídrido



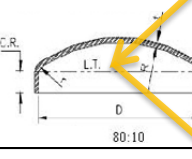
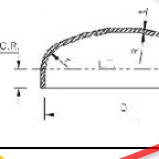
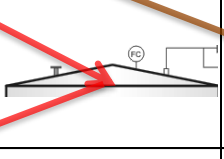
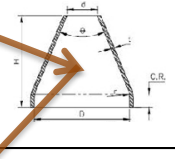
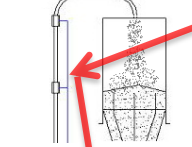
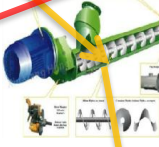
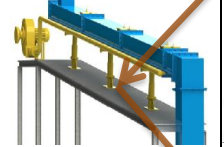
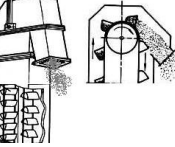
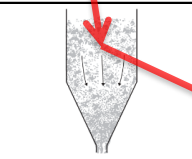
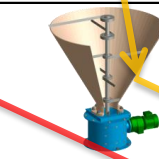
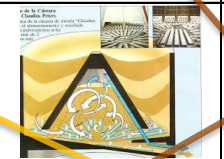




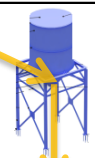


carbónico del aire por el cemento, es relativamente más importante que la del agua, pues para producir carbonatación sobre las partículas de cal, el CO<sub>2</sub> requiere cantidades ínfimas de agua, cuya mezcla permite la formación de grumos (MORENO, 2008). En razón de lo expuesto, a manera de conclusión se puede definir como requerimiento trascendental, la estanqueidad y hermeticidad del silo.

**3.1.3 Estructura de funciones.** La función de un silo se resume en la preservación de cemento, teniendo como parámetro fundamental de análisis el método de descarga que determina en gran medida la conceptualización del diseño funcional y estructural.

**3.1.4 Matriz morfológica.** En ésta se presentan 4 alternativas de diseño, mediante la combinación de los elementos principales que conformarán el silo, buscando obtener las características más adecuadas para el almacenamiento de cemento.

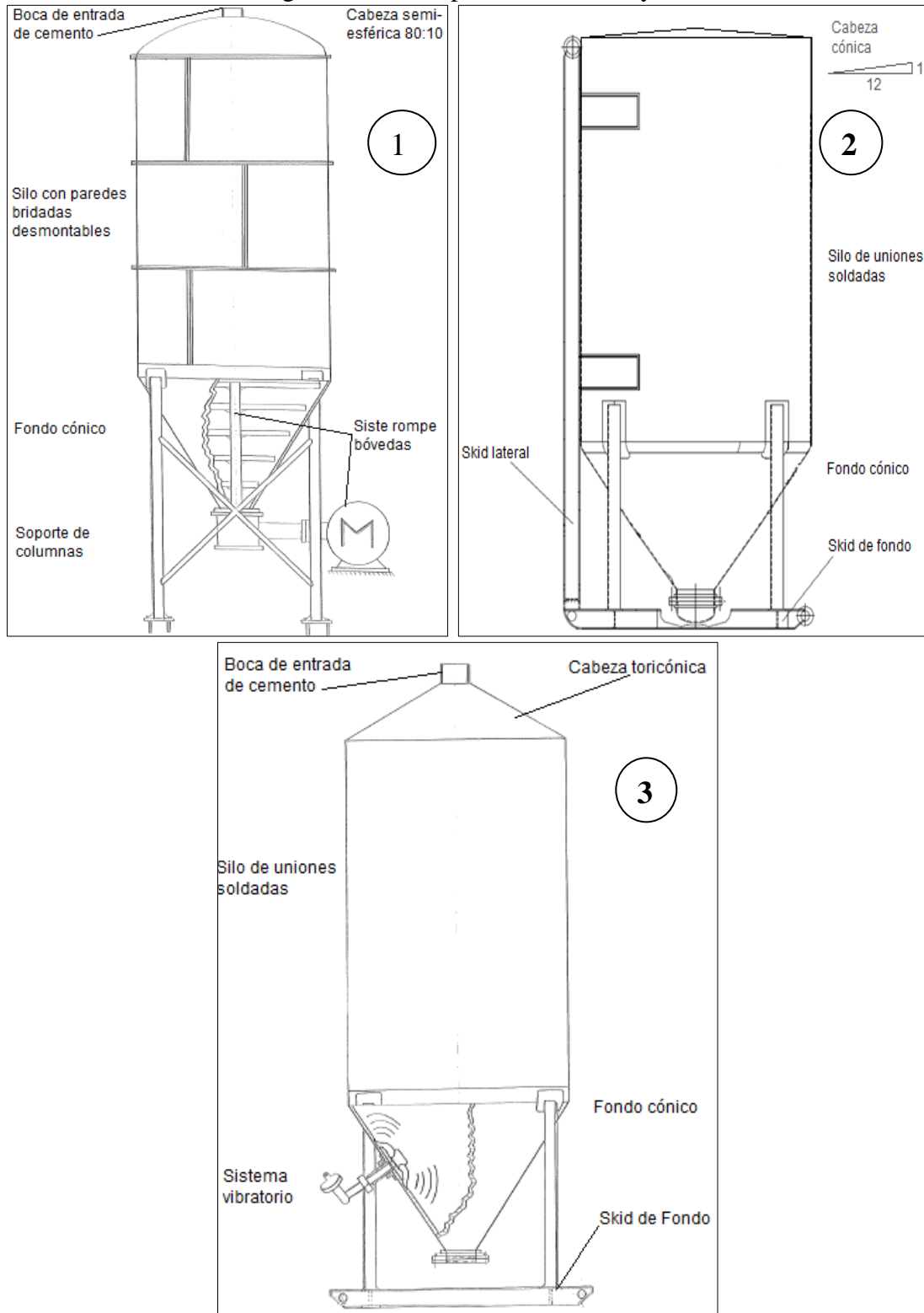
Figura 18. Alternativas de elementos constituyentes del silo

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Construcción	Soldado 	Desmontable 		
Cabeza	Semi-esférica 	Semi-elíptica 	Cónica 	Toricónica 
Llenado	Neumático 	Tornillo sin fin 	Aerodeslizador 	Elevador de cangilones 
Vaciado	Flujo gravitacional 	Sistema rompe bóvedas 	Fondo fluidizado 	Vibración mecánica 
Soporte	Auto-soportado 	Skid de fondo 	Skid lateral y/o fondo 	Columnas 

Fuente: Autor.

**3.1.5** *Concepto de solución.* Las 3 combinaciones planteadas para el diseño brindan la oportunidad para seleccionar el diseño más adecuado que presente las mayores ventajas en el cumplimiento de su función.

Figura 19. Prototipos número 1 - 2 y 3



Fuente: Autor

**3.1.6 Concepto de solución óptimo.** A través de la evaluación del diseño, como indica la tabla (5), se analizan los conceptos de solución de valor técnico en base a los criterios de evaluación de las variantes de concepto, planteados para las 3 alternativas de solución obtenidas de la matriz morfológica.

Tabla 5. Evaluación de conceptos de solución - Valor técnico

Evaluación del diseño		Área: diseño mecánico									
Valor técnico (xi)											
Proyecto: Diseño de un silo para almacenamiento de cemento											
p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)											
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal)											
g: peso ponderado en función de la importancia de los criterios de evaluación (0 mín. a 10máx.)											
Criterios de evaluación para diseños en la fase de concepto o proyectos											
Variantes de Concepto/Proyecto		Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución Ideal			
		S1		S2		S3		S ideal			
Nº	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	
1	Geometría	6	2	12	2	12	2	12	4	24	
2	Disposición	8	3	24	3	24	3	24	4	32	
3	Facilidad Fabricación	8	3	24	3	24	2	16	4	32	
4	Excentricidad de llenado	8	2	16	3	24	2	16	4	32	
5	Estanqueidad	10	3	30	3	30	3	30	4	40	
6	Eficiencia de descarga	10	4	40	4	40	4	40	4	40	
7	Facilidad de operación	8	3	24	3	24	4	32	4	32	
8	Independencia de Automatización	6	2	12	3	18	2	12	4	24	
9	Transportabilidad	9	0	0	4	36	2	18	4	36	
10	Montaje	8	2	16	2	16	2	16	4	32	
11	Seguridad	8	2	16	2	16	3	24	4	32	
Puntaje máximo Σgp:				214	264		240		356		
Valor técnico (Xi)				0,60	0,74		0,67		1,00		
$X_i = \frac{g_1 \cdot p_1 + g_2 \cdot p_2 + \dots + g_n \cdot p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) * p_{máx}} \leq 1$											

Fuente: Autor

Para complementar el análisis, como se ve en la tabla (6), se evalúan los conceptos de solución del valor económico, analizando los costos para las alternativas planteadas.

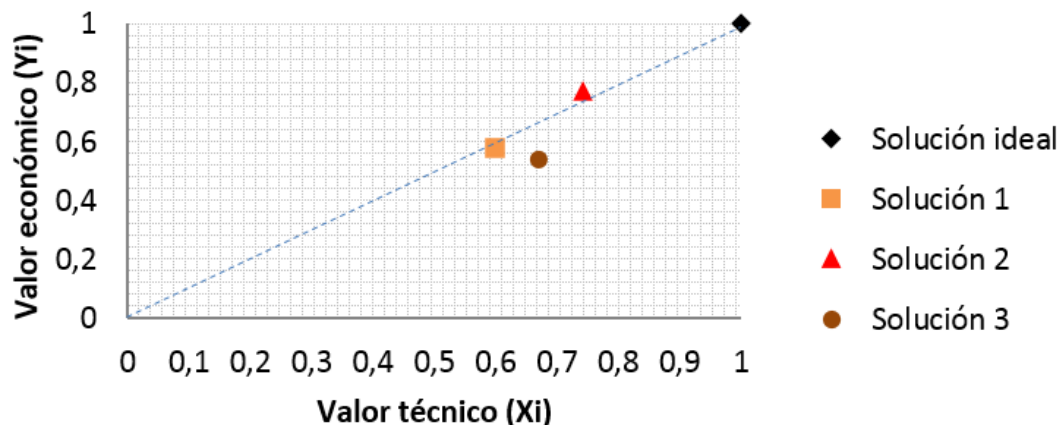
Tabla 6. Evaluación de conceptos de solución - Valor económico

Evaluación del diseño		Área: diseño mecánico									
Valor económico (yi)											
<b>Proyecto:</b> diseño de un silo para almacenamiento de cemento											
p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)											
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal)											
g: es el peso ponderado en función de la importancia de los criterios de evaluación (0 mín. a 10 máx.)											
Criterios de evaluación para diseños en la fase de concepto o proyectos											
Variantes de Concepto/Proyecto				Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución Ideal	
				S1		S2		S3		S ideal	
Nº	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	
1	Costo de Sistema Llenado	7	3	21	3	21	3	21	4	28	
2	Costo de Sistema Descarga	9	2	18	4	36	2	18	4	36	
3	Costos de Instalación Sist. Descarga	7	2	14	3	21	2	14	4	28	
4	Costos de fabricación	7	2	14	3	21	2	14	4	28	
5	Costos de montaje	6	2	12	2	12	2	12	4	24	
6	Costos de mantenimiento	6	3	18	3	18	2	12	4	24	
Puntaje máximo Σgp:				97		129		91		168	
Valor técnico (Yi):				0,58		0,77		0,54		1,00	
$Y_i = \frac{g_1 \cdot p_1 + g_2 \cdot p_2 + \dots + g_n \cdot p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) \cdot p_{máx}} \leq 1$											

Fuente: Autor

### 3.1.6.1 Evaluación gráfica de resultados.

Figura 20. Diagrama de evaluación técnico - económica



Fuente: Autor

Representados los puntos en la gráfica del valor técnico – económico, se deduce que la solución óptima es la número 2 del punto  $X_2 = 0,74$ ;  $Y_2 = 0,77$  representando la alternativa que más se aproxima a la solución ideal de la recta y el punto (1,1).

**3.1.6.2** *Descripción de la solución óptima N° 2.* El silo para almacenamiento de cemento se construirá de acero al carbono, cuya selección estará en función de las condiciones de trabajo a que esté sometido. Su orientación vertical permitirá la aplicación del principio “FIFO”, evitando que el cemento quede retenido dentro del silo por un tiempo mayor al previsto. Respecto a la geometría, un silo de sección cuadrada almacena un 27% más que un cilíndrico de diámetro igual al lado anterior (CCARITA, 2011), pero un silo de sección cuadrada supone un coste superior, pues debido a los esfuerzos circunferenciales actuando sobre el cuerpo, éste requiere de reforzamiento estructural en sus paredes, lo que se evita con una sección cilíndrica cuya geometría es apta para soportar dichos esfuerzos. El silo tendrá uniones soldadas que garanticen la hermeticidad y estanqueidad para proteger al cemento de las condiciones ambientales, su cabeza o tapa será de tipo cónica, la inclinación de su geometría ayudará a que el agua lluvia no se estanque, y pueda descender por el cuerpo.

El seleccionado método de llenado neumático, servirá para establecer la ubicación de la boca de entrada de cemento, ésta se ubicará de forma concéntrica a la salida de la tolva en la parte superior del silo, lo que permitirá que el material se distribuya uniformemente, evitando excentricidades durante el proceso de llenado del silo.

El fondo consistirá de una tolva cónica, cuyo geometría hace viable la descarga por flujo másico, este tipo de fondo presenta una ventaja adicional, pues a más de un adecuado diseño funcional no requiere de dispositivos mecánicos auxiliares, y no demanda de análisis adicionales en uniones y soldaduras, como los que exige un método de descarga mecánico, a causa de las vibraciones inducidas en el silo para romper las estructuras de material que se forman en el interior del silo y que obstruyen la descarga del cemento por gravedad.

De acuerdo a su tamaño, el cual está en función de la capacidad, se plantea una estructura de soporte que estará conformada por un skid lateral y de fondo, característica que permitirá que el silo sea transportable.

## 3.2 Diseño funcional

El diseño funcional básicamente busca definir un patrón de flujo de descarga que deberá desarrollarse durante toda la vida útil del silo de almacenamiento de cemento.

El patrón de flujo de descarga está en función de la capacidad que cada material tiene para fluir, y aunque las propiedades internas (es decir, el ángulo de rozamiento interno o la tensión de no confinamiento) son importantes para el diseño de silos y tolvas, la clave del diseño funcional está en el correcto dimensionamiento del ángulo de inclinación de la tolva y el diámetro de salida (SCHULZE, 2008). Para conseguir dicho objetivo, se debe tener definido cada elemento de esta etapa, como se muestra a continuación.

**3.2.1 Propiedades de flujo del cemento.** Las propiedades de flujo definen la capacidad que tiene el cemento para fluir cuando se encuentra bajo la presión de su propio peso, dentro de un contenedor. Estas afectan significativamente el comportamiento durante el almacenaje, manejo y procesamiento de los materiales a granel (RHODES, 1990). Estas se describen a continuación.

- *Peso unitario a granel ( $\gamma$ ).* Es una propiedad de los materiales particulados, y es la relación entre el peso y el volumen, el cual se obtiene a un nivel de compactación que simula el correspondiente estado de compresión al que estaría sometido el sólido pulverulento confinado en un silo. Este se diferencia de la densidad de material libre, cuyo valor es mucho menor, porque no está sometido a presiones de compactación como el anteriormente mencionado.
- *Coefficiente de fricción de la pared ( $\mu$ ).* Este representa la fricción entre el material de la pared del silo y el sólido pulverulento confinado dentro del silo.
- *Ángulo de fricción interna ( $\delta$ ).* Es un valor que representa la fricción entre las partículas, y está en función de la granulometría del sólido pulverulento.
- *Cohesión ( $c$ ).* Representa la fuerza de unión entre partículas, la cual puede variar con el grado de humedad y la consolidación del cemento dentro del silo. Esta propiedad puede ser determinante para definir la capacidad de fluir del cemento.

- Ángulo de reposo ( $\phi_r$ ). Es el ángulo que forma el montículo de sólido a granel con la horizontal, cuando se estabiliza.

**3.2.1.1** *Obtención de las propiedades de flujo del cemento.* Dependiendo de la importancia del proyecto, las propiedades de flujo del cemento pueden ser obtenidas experimentalmente, tomando en cuenta que estas pruebas son muy costosas, se debe hacer un análisis económico para justificar la obtención de las propiedades por este método (EN 1991-4, 2006). Existe la opción adicional de obtenerlas de fuentes fiables como normas y publicaciones científicas que ofrecen tablas con los valores de las propiedades de flujo de ciertos materiales más populares en el ensilaje y diseño de silos, como se muestra en las tablas (7) y (8).

Para obtenerlos experimentalmente se puede recurrir a dispositivos como:

- *Jenike Shear Tester*, o Célula de corte de Jenike por su traducción al español, cuyo nombre fue dado por su creador Andrew Jenike.
- *Ring Shear Tester*, o Anillo de corte anular por su traducción al español que fue desarrollado por Havorslev en 1930 (SCHULZE, 2008).

El proceso para la medición de las propiedades de flujo utilizando el *Jenike Shear Tester*, se puede encontrar en el estándar (ASTM, 2006). Y básicamente, se trata de ensayar el material a granel a un nivel de compactación que simule el correspondiente estado de compactación al que estaría sometido en el confinamiento de un contenedor.

En las siguientes tablas se indican los valores de las propiedades de flujo del cemento, y otros factores necesarios que se utilizarán bajo el respectivo criterio de las teorías de diseño que se expondrán más adelante.

Tabla 7. Propiedades de flujo y parámetros para las teorías de arco

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi_w$ (°)	$\delta$ (°)	E (kpa)	F (kpa)	q	K	L (kpa)	$\delta'$ (°)	$c'$ (kpa)
Cemento	14,45	35	51,8	0,50	0,10	1,90	0,18	3,72	43,1	0,98

Fuente: (Archiving in hoppers: II. Archiving theories and critical outlet size, 1995)

Donde:

$\gamma$  = peso unitario a granel,

$\delta$  = ángulo efectivo de fricción interna,

$\phi_w$  = ángulo de rozamiento de la pared del silo con el cemento,

E, F, K = constantes de las ecuaciones,

$c'$  = cohesión, independiente de la consolidación,

$\delta'$  = ángulo efectivo de fricción interna asociado a  $c'$ .

Tabla 8. Propiedades de flujo del cemento

Tipo de material	Peso a granel		Ángulo de reposo	Ángulo de fricción int.		Radio de presión lateral		Coeficiente de fricción de la pared ( $\mu = \tan\phi_w$ )			
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		$\phi_r$ (°)	$\phi_i$ (°)		K		Tipo de pared			
	$\gamma_l$	$\gamma_u$		$\phi_{im}$	$a_{\phi_i}$	$K_m$	$a_K$	D1	D2	D3	$a_u$
	Bajo	Alto		Prom.	Factor	Prom.	Factor	Prom.	Prom.	Prom.	factor
Cemento	13	16	36	30	1,22	0,54	1,2	0,41	0,46	0,51	1,07

Fuente: (EN 1991-4, 2006) (E)

Donde:

$D_i$  = tipo de pared categorizado según la norma EN 1991-4, 2006

$C_{op}$  = factor que toma en cuenta los fenómenos de descarga asimétrica del material,

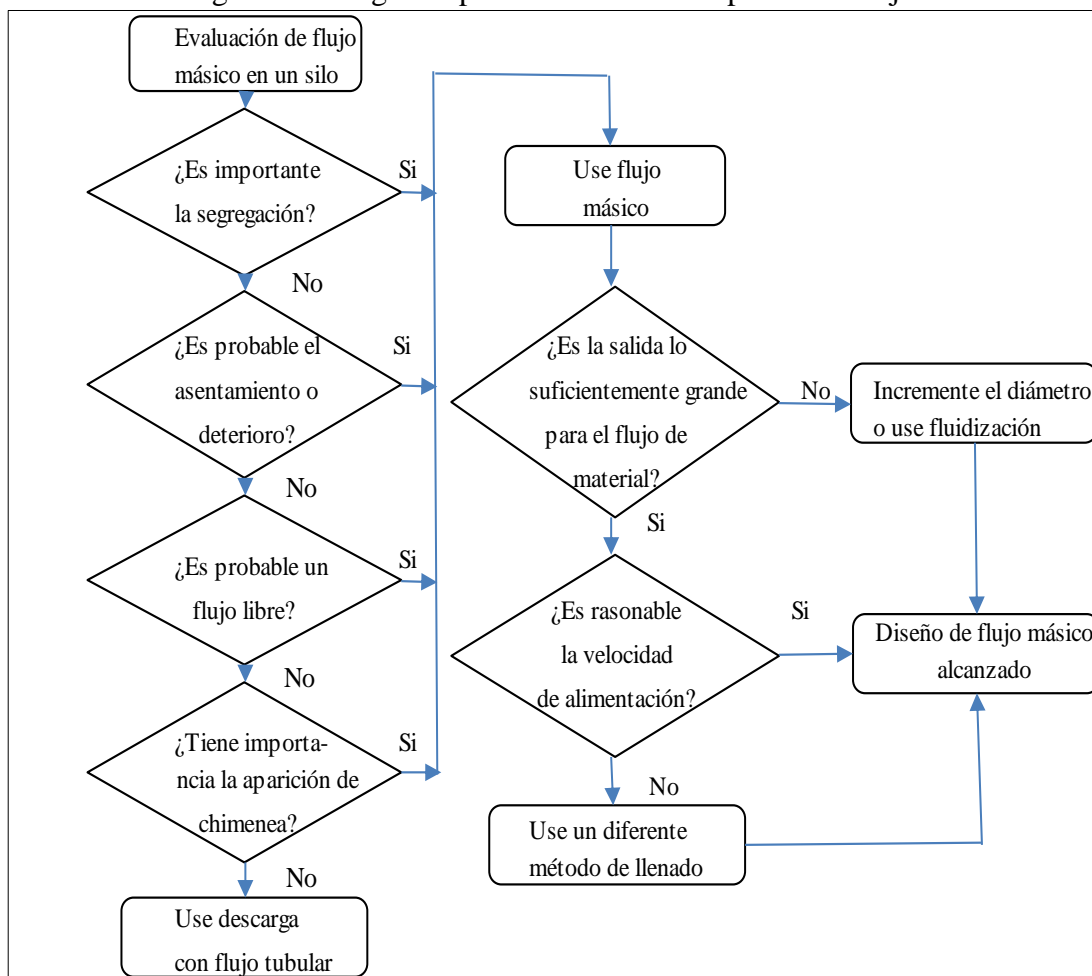
K = coeficiente que relaciona la presión horizontal con la presión vertical.

La tabla (8) que proporciona el Eurocódigo, muestra valores promedio de las propiedades de flujo del cemento, así como factores de corrección que permiten obtener valores característicos, más altos cuando el valor promedio se multiplica, y más bajo cuando se divide para dicho factor. Los valores característicos se usan para tomar en cuenta la variabilidad a las que son susceptibles las propiedades de flujo de un material.

**3.2.2 Determinación del patrón de flujo necesario.** Es necesario analizar la factibilidad del uso de un determinado patrón de flujo, de la misma manera se debe considerar que no siempre es necesario obtener flujo másico y no siempre es posible conseguirlo. Con la ayuda del diagrama de decisión de la figura (21), podemos definir el patrón de flujo adecuado para el silo de cemento (Jenike y Johanson, 2013).



Figura 21. Diagrama para la selección del patrón de flujo.



Fuente: [https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20131125\\_1.pdf](https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20131125_1.pdf)

**3.2.3 Teorías de arco.** Las teorías de arco permiten predecir el diámetro de salida (D) de la tolva, para un ángulo de inclinación ( $\theta_w$ ) con el fin de evitar la formación estructuras estables de material que interrumpan el flujo durante un proceso de descarga gravitacional. Para utilizar las ecuaciones de estas teorías se debe hacer uso de los datos presentados en la tabla 7. El diámetro se determina con la ecuación 1, y los datos adicionales requeridos se obtienen de las ecuaciones que presenta cada autor, según corresponda (Archiving in hoppers: II. Archiving theories and critical outlet size, 1995).

$$D = \frac{2 \sigma_{1a} \sin \theta_w}{\gamma g(\theta_w, \phi_w)} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\sigma_{1a} + E}{E}\right)^q - \frac{\sigma_{1a} f f}{F} - 1 = 0 \quad (2)$$

Donde:

D: diámetro de salida de la tolva, [m]

$\theta_w$  = ángulo de inclinación de la tolva con respecto al eje vertical, [rad]

$\sigma_{1a}$  = mayor esfuerzo principal de arco, [N/m<sup>2</sup>]

ff = factor de flujo.

**3.2.4** *Enfoque de la mecánica estructural.* Esta teoría considera que los esfuerzos del material a granel se consolidan e incrementan su tensión dentro de la tolva. Dentro de esta clasificación se encuentran las teorías de los siguientes autores.

**3.2.4.1** *Teoría de Arnold & McLean.* Las expresiones de cálculo para determinar el diámetro de salida de la tolva. Propuestas por Arnold & McLean son las siguientes:

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \theta_w + \arcsin \frac{\sin \varphi_w}{\sin \delta} \right) \quad (3)$$

$$ff = \frac{S(1+\sin\delta)}{T(U-1) \sin\theta_w} \left( \frac{1,13}{2,26+\theta_w} \right)^{1-m} \left( \frac{3,48}{3,48+\theta_w} \right)^{m-2} \quad (4)$$

$$g = 2 \sin\theta_w \left( \frac{1,13}{2,26+\theta_w} \right)^{m-1} \left( \frac{3,48}{3,48+\theta_w} \right)^{2-m} \quad (5)$$

Donde:

$$S = [2 - 2\cos(\beta + \theta_w)]^{m-1} (\beta + \theta_w)^{2-m} \sin \theta_w + \sin \beta \sin^m(\beta + \theta_w) \quad (6)$$

$$T = 2(1 - \sin \delta) \sin^{m+1} (\beta + \theta_w) \quad (7)$$

$$U = \frac{2^{m-1} \sin \delta}{1 - \sin \delta} \left[ \frac{\sin (2\beta + \theta_w)}{\sin \theta_w} + 1 \right] \quad (8)$$

**3.2.4.2** *Teoría de Jenike.* Las expresiones de cálculo para el diámetro de salida de la tolva propuesto por Andrew Jenike, son las siguientes:

Caso 1:

$$\theta_w + \varphi_w \geq 45^\circ$$

$$ff = \frac{m(1+\sin \delta)}{2 \tan \theta_w [\sin \delta \cos 2(\beta+\theta_w)-1] (mH+1)} \quad (9)$$

$$g() = \frac{2 \sin \theta_w}{m} \quad (10)$$

Caso 2:

$$\theta_w + \varphi_w < 45^\circ$$

$$ff = \frac{m \sin 2(\theta_w + \varphi_w) (1 + \sin \delta)}{2 \tan \theta_w [\sin \delta \cos 2(\beta + \theta_w) - 1] (mH + 1)} \quad (11)$$

$$g() = \frac{2 \sin \theta_w}{m \sin 2(\theta_w + \varphi_w)} \quad (12)$$

Donde:

$$H = 1 - \frac{\sin \delta \sin 2\beta (\cot \theta_w + \cot \varphi_w)}{1 - \sin \delta \cos 2(\beta + \theta_w)} \quad (13)$$

**3.2.4.3** *Teoría de Mróz y Szymánski.* Las expresiones de cálculo para determinar el diámetro de salida de la tolva, propuesto por Mróz y Szymánski son:

caso 1:

$$\theta_w \geq (2 - m)67^\circ + (m - 1)60^\circ - \varphi_w$$

$$ff = \frac{M(1+\sin \delta)[(2-m)0,72 + (m-1)1,30]}{\sin \theta_w (\sin \delta \cos 2\beta - 1) (mN+1)} \quad (14)$$

$$g() = 2 \sin \theta_w [(2 - m)0,69 + (m - 1)0,38] \quad (15)$$

caso 2:

$$\theta_w < (2 - m)67^\circ + (m - 1)60^\circ - \varphi_w$$

$$ff = \frac{\{M(1+\sin \delta) \sin^2(\theta_w + \varphi_w) [(2-m) + (m-1) \sin(\theta_w + \varphi_w)]\}}{\{\sin \theta_w (\sin \delta \cos 2\beta - 1) (mN+1) \{ (2-m)(\theta_w + \varphi_w) + (m-1)[1 - \cos(\theta_w + \varphi_w)] \}}}} \quad (16)$$

Donde:

$$M = (2 - m) \frac{\theta_w}{\sin \theta_w} + (m - 1) \frac{2}{1 + \cos \theta_w} \quad (17)$$

$$N = 1 - \frac{\sin \delta \sin 2\beta (\cot \theta_w + \cot \varphi_w)}{1 - \sin \delta \cos 2\beta} \quad (18)$$

**3.2.5** *Enfoque de la mecánica continua.* Para el análisis de los esfuerzos actuantes, en este análisis se considera al arco o domo formado por el material a granel como un miembro estructural. En esta clasificación se encuentra la nueva teoría de Enstad.

**3.2.5.1** *Teoría de Enstad. Las expresiones de cálculo de Enstad son:*

$$k(\cdot) = c' \left\{ 2^{m-1} \sin \delta' \left[ 1 + \frac{\sin(\beta + \theta_w)}{\sin \theta_w} \right] - 1 \right\} \quad (19)$$

$$h = \frac{\{\sin \beta \sin^m(\beta + \theta_w) + [2 - 2 \cos(\beta + \theta_w)]^{m-1} (\beta + \theta_w)^{2-m} \sin \theta_w\}}{[2 \tan \delta' \sin^{m+1}(\beta + \theta_w)]} \quad (20)$$

**3.2.6** *Definición de la geometría de la tolva.* Una vez determinado el diámetro de salida y el ángulo de inclinación de la tolva, se procede con el dimensionamiento de la misma para calcular el volumen de cemento que es capaz de contener. Esto se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

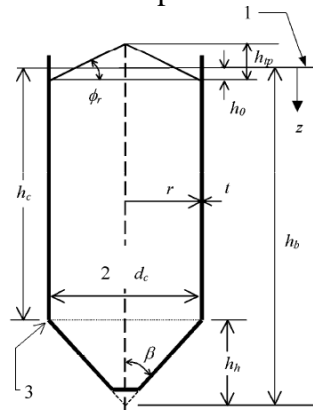
$$V_{tolva} = \frac{\pi}{12} H_{tolva} (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \cdot D_2) \quad (21)$$

### 3.3 Diseño estructural

En el diseño estructural se procede con el dimensionamiento general del silo, la aplicación de teorías para el cálculo de presiones, cargas actuantes y la determinación del espesor de las paredes, tanto del cuerpo como de la tolva.

**3.3.1** *Dimensionamiento del silo.* Como parte precedente al cálculo estructural, se deben definir las medidas principales del silo, las cuales son necesarias para precisar la altura de la columna de cemento y delimitar los puntos de evaluación de las presiones internas. Las medidas necesarias para iniciar el cálculo son las que indica la figura (22).

Figura 22. Medidas necesarias para el cálculo de las presiones.



Fuente: (EN 1991-4, 2006)

El cálculo aproximado de la altura de material dentro de un cilindro (excluido la tolva) se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$H_m = \frac{m}{\rho_p * A} \quad (22)$$

Donde:

$m$  = Es la masa del producto, [kg]

$\rho_p$  = Es el peso unitario a granel del producto confinado (no en condición libre),

$A$  = Es el área de la sección circular del cilindro, [cm<sup>2</sup>].

Para obtener la altura definitiva del silo puede ser necesario realizar iteraciones.

**3.3.2** *Determinación de la superficie equivalente ( $h_c$ ).* Este es un nivel de referencia que sirve para medir la profundidad de material, a partir del centroide de la pila formada en la parte superior por causa del ángulo de reposo.

$$h_c = H_m + h_0 \quad (23)$$

$$h_0 = \frac{r}{3} * tg \phi_r \quad (24)$$

Donde:

$h_0$  = Es la distancia del centroide de la pila, al punto más bajo de la misma, [cm]

**3.3.3 Evaluación de las cargas según la norma EN 1991-4:2006.** Esta norma permite el uso de diferentes niveles de rigor para el diseño de silos dependiendo de la confiabilidad del arreglo estructural y la susceptibilidad a los modos de falla. Por lo que, es necesario clasificar al silo como indica la norma y prever las condiciones de operación previo al cálculo de las cargas.

**3.3.3.1 Clasificación de los silos según la acción de evaluación.** El diseño del silo debe ser llevado a cabo conforme a los requerimientos de ésta clasificación la cual produce diseños esencialmente bajo el mismo nivel de riesgo, lo cual permite evaluar el diseño y costos de los procedimientos necesarios para reducir el riesgo de falla. Los silos según la acción de evaluación pueden ser clasificados como:

- Acción de evaluación clase 1 (AAC1),
- Acción de evaluación clase 2 (AAC2),
- Acción de evaluación clase 3 (AAC3).

Tabla 9. Clasificación recomendada de silos por acción de evaluación

Clase	Descripción
Acción de evaluación clase 3	Silos que excedan la capacidad de 1000 Ton Silos que excedan la capacidad de 1000 Ton, en cualquiera de las siguientes situaciones de diseño: a) Descarga excéntrica con $e_0/d_c > 0,25$ b) Silos rechonchos con la superficie excéntrica $e_t/d_c > 0,25$
Acción de evaluación clase 2	Todos los silos cubiertos por la norma y no ubicados en otra clase
Acción de evaluación clase 1	Silos con capacidades menores a 100 Toneladas.

Fuente: Traducción de la norma (EN 1991-4, 2006)

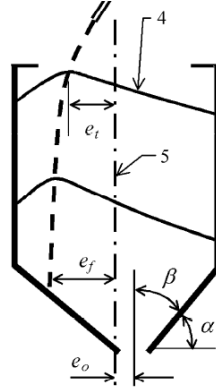
**3.3.3.2 Determinación de la esbeltez del silo.** Las cargas sobre las paredes verticales del silo deben ser evaluadas de acuerdo a la esbeltez del silo, estos pueden ser:

- Silos esbeltos, si:  $2 \leq h_c/d_c$
- Silos de esbeltez intermedia, si:  $1 < h_c/d_c < 2$
- Silos rechonchos, si:  $0,4 < h_c/d_c < 0,1$

Silos de contención, para silos de fondo plano si:  $h_c/d_c \leq 0,4$

**3.3.3.3** *Excentricidades en el silo.* Se debe considerar la posibilidad de ocurrencia de excentricidades en la columna de material a granel debido al método de llenado, así como en la boca de salida de la tolva respecto al eje del cuerpo, pues esto puede generar un incremento de presiones internas.

Figura 23. Excentricidad en la columna de material y boca de salida de la tolva.



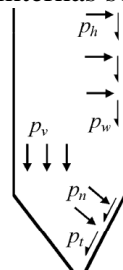
Fuente: (EN 1991-4, 2006)

**3.3.3.4** *Definición del patrón de flujo.* Se debe definir el patrón de flujo que se usará en la descarga del silo, pues se requiere diferenciar entre flujo másico o tubular, para propósitos de diseño (EN 1991-4, 2006).

**3.3.4** *Presiones Internas.* Las presiones internas sobre las paredes del silo son:

- Presiones horizontales  $P_h$ ,
- Presiones verticales  $P_v$ , y
- Presiones de tracción, o friccionales  $P_w$ .

Figura 24. Presiones internas sobre las paredes del silo



Fuente: (EN 1991-4, 2006)

La norma EN 1991-4:2006 provee expresiones para el cálculo de presiones internas en las paredes verticales y de fondo de forma específica para cada clasificación y condiciones de funcionamiento previstas en el diseño del silo.

**3.3.5** *Desarrollo de cargas adicionales.* Las cargas adicionales pueden surgir debido a las condiciones de operación, funcionamiento del silo y por las condiciones ambientales, como se indica a continuación.

**3.3.5.1** *Cargas por asimetrías.* La norma EN 1991-4:2006 toma en cuenta presiones adicionales causadas por asimetrías previstas o accidentales en la carga y descarga del silo, denominadas *Patch Load*.

**3.3.5.2** *Presión en silos fluidizados.* En silos donde es posible para el material almacenado ser completo o parcialmente fluidizado, o que aire sea arrastrado por consecuencia del llenado, éste será diseñado para soportar posibles presiones adicionales debido a la presión del aire (EN 1991-4, 2006).

$$P_{h-f} = \gamma_1 * Z \quad (25)$$

$$\gamma_1 = 0,8 \gamma \quad (26)$$

Donde:

$\gamma$  = Peso unitario a granel,

$\gamma_1$  = Peso unitario de material a granel fluidizado,

$Z$  = Profundidad del silo.

**3.3.5.3** *Presión por diferencial térmico.* Existen tres posibilidades mediante las cuales se puede generar sobre presión por diferencial térmico, y son:

- Las paredes de un silo expuesto a la intemperie pueden expandirse durante el día y contraerse con la caída de la temperatura durante la noche, si no toma lugar la descarga del silo, el sólido pulverulento se asienta tanto como las paredes se expanden. Cuando las paredes se contraen el sólido pulverulento no es capaz de



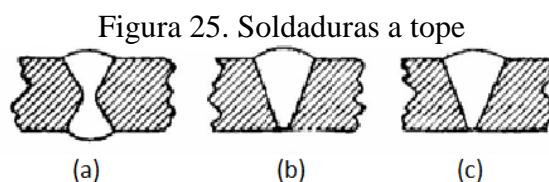
retraerse, y esta resistencia produce un incremento de tensión en las paredes (Silo Failures: Case Histories and Lessons Learned, 2000).

- En este caso, el sólido pulverulento almacenado ingresa con altas temperaturas al silo, y calienta las paredes del silo por transferencia térmica. Si la temperatura ambiental puede caer drásticamente. El enfriamiento de las paredes respecto al material almacenado, puede generar sobre presiones. En este caso, el diseño considerará una presión adicional en las paredes del silo (EN 1991-4, 2006).
- Se considera el caso que, material a granel ingrese al silo con altas temperaturas y tenga diferencia térmica con el material relativamente frío ya contenido en el silo. Esto puede provocar un incremento de presiones a diferentes niveles de altura, según el punto donde ocurra dicha diferencia térmica (EN 1991-4, 2006).

**3.3.6** *Uso de las presiones calculadas para el diseño del silo.* Las presiones verticales, se usan para el cálculo de esfuerzos en la transición. Las presiones horizontales, diferencial térmico, asimetrías y de silos fluidizados se usan para el cálculo del espesor de la envolvente. Las presiones de tracción friccional, se utilizan para la evaluación de carga compresiva que produce pandeo sobre las paredes del silo.

**3.3.7** *Consideraciones para el cálculo de los espesores.* En el cálculo de espesores se deben considerar las distintas variables que pueden definir el espesor final de las láminas que conformarán el silo, ya sea por el material de construcción, la calidad de la soldadura o las condiciones de operación del silo.

**3.3.7.1** *Uniones soldadas.* Los tipos de soldadura utilizados en juntas perimetrales y longitudinales en recipientes y contenedores son las que se muestran en la figura (25).



Tipos de soldadura: a) Junta por ensamble de soldadura doble, biselada antes de soldar el segundo lado, b) Junta por ensamble de soldadura simple, con banda de respaldo que puede o no retirarse. (c) Junta por ensamble de soldadura simple, sin banda de respaldo (que sólo se permite para algunas soldaduras perimetrales)

Fuente: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/>

La eficiencia de soldadura es la relación entre el esfuerzo permisible en la soldadura y el esfuerzo permisible para la placa adyacente. Depende no solo del tipo de soldadura, sino también del grado de examen radiográfico. En la siguiente figura se muestran las eficiencias máximas permisibles de juntas soldadas con gas y con arco.

Figura 26. Eficiencias máximas permisibles de juntas soldadas con gas y arco.

Fig. 21	Descripción de la junta	Grado de examen		
		Radiografía completa	Ex. por puntos	No examinada
a,b	Juntas por ensamble con soldadura doble o con medios que permitan obtener la misma calidad de metal soldado a ambos lados de la junta.	1	0.85	0.70
b	Junta por ensamble de soldadura simple, con banda de respaldo en su lugar	0.90	0.80	0.65
c	Junta por ensamble de soldadura simple, sin banda de respaldo; Sólo se permite en ciertas juntas perimetrales.			0.60

Fuente: Código UW-12

**3.3.7.2 Margen o sobre espesor por abrasión.** La Norma (EN 1993-4-1, 2007) conviene que, de no existir información específica disponible se supondrá un valor de pérdida de espesor debido a la abrasión en los puntos de contacto con el material en movimiento, con valor igual a:

$$\Delta_t = 2 \text{ mm}$$

**3.3.7.3 Margen o sobre espesor por corrosión.** Cuando la tasa de corrosión es predecible, o está en función de la economía de la estructura, la determinación del incremento de espesor por corrosión debe ser un acuerdo explícito definido por las partes interesadas en el proyecto. Si no se dispone de información específica, la norma ASME sección VIII div. 1, indica el siguiente valor:

$$CA = 1/16" = 1,58 \text{ mm}$$

**3.3.7.4 Esfuerzo admisible.** Para el acero SA 516 Gr.70, la norma ASME VIII div. 1 recomienda el uso de:  $\sigma_{adm} = 138 \text{ Mpa} = 20 \text{ KSI}$ , mientras que en ASME VIII div. 2 se recomienda el uso de  $\sigma_{adm} = 174 \text{ Mpa} = 25,3 \text{ KSI}$ . Entonces, se obtendrán espesores más pequeños con la recomendación de la div.2, sin embargo, eso obliga a realizar un análisis y cálculo más riguroso además, además de considerar lo siguiente:

- Requiere revisión por radiografiado y ultrasonido en las juntas,

- Se debe proveer un manual de operación, y se debe aplicar para un sello U-2,
- Un ingeniero experimentado debe firmar y aprobar los cálculos.

**3.3.8** *Teoría simplificada para recipientes de pared delgada.* Esta teoría aplica a recipientes sometidos a presión interna que cumplen con lo siguiente:

- Envolturas cuya relación entre su radio de curvatura y espesor sea mayor que 10,
- Superficies de revolución como cilindro, cono, esfera, etc.
- Se encuentren cargadas simétricamente respecto al eje de simetría (Jaén, 2012).

Esfuerzo meridional y longitudinal:

$$\sigma_m = \frac{P \cdot r}{2 \cdot t} \quad (28)$$

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r}{t} \quad (29)$$

Si se aplica el criterio de plasticidad de Von Mises para el esfuerzo equivalente.

$$\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_m^2 + \sigma_t * \sigma_m} < \sigma_{eq} \quad (30)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_{adm}}{n} \quad (31)$$

Resolviendo la ecuación (29) y remplazándola en (30), se tiene:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{n P r}{t} \quad (32)$$

Despejando la ecuación (29), tenemos:

$$t = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{n P r}{\sigma_{adm}} \quad (33)$$

Donde:

P = Presión normal máxima, [N/m<sup>2</sup>]

$r$  = radio interior del recipiente, [m]

$\sigma_{\max}$  = Esfuerzo máximo admisible del acero, [N/m<sup>2</sup>]

$\sigma_m$  y  $\sigma_t$  = esfuerzo meridional y tangencial, respectivamente, [N/m<sup>2</sup>]

$n = 1,5$  factor de seguridad (CCARITA, 2011).

**3.3.9** *Método basado en la norma ASME VIII div. 1.* La norma ASME Sección VIII div. 1 determina un valor de espesor de pared del recipiente evaluando la tensión general de membrana limitada al esfuerzo permisible de tensión del material de la pared.

**3.3.9.1** *Expresiones para el espesor del cuerpo.* Por su característica geométrica, el espesor de la pared del cuerpo está gobernado por los esfuerzos en las costuras longitudinales, y es la ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$t_{\min} = \frac{P.R}{SE - 0,6P} \quad (34)$$

Donde:

$P$  = presión horizontal máxima, [N/m<sup>2</sup>]

$r$  = radio interior del recipiente, [m]

$S$  = esfuerzo máximo admisible del acero, [N/m<sup>2</sup>]

$E$  = eficiencia de la soldadura.

**3.3.9.2** *Expresiones para el espesor de la tolva cónica.* El cálculo del espesor de la tolva se debe realizar con la presión normal máxima que actúa sobre la tolva, la ecuación indicada por la norma ASME sección VIII div.1 es:

$$t_{\min} = \frac{P*D}{2\cos\beta(SE - 0,6P)} \quad (35)$$

Donde:

$P$  = presión normal máxima, [N/m<sup>2</sup>]

$D$  = diámetro de la transición, [m]

$S$  = esfuerzo máximo admisible de la pared de la tolva, [N/m<sup>2</sup>]

$\beta$  = ángulo formado por la pared de la tolva con la vertical, [°]

**3.3.9.3** *Expresiones para el espesor de la cabeza.* Se debe tomar en cuenta que la cabeza de un silo no soportará presiones internas por el material contenido. Pero según sea el caso, se debe considerar las presiones adicionales como: presión en silos fluidizados y por diferencial térmico.

$$t_{mín-c} = \frac{PD}{2\cos\beta(SE-0,6P)} \quad (36)$$

Donde:

P = presión normal máxima, [N/m<sup>2</sup>]

D = diámetro del cuerpo, [m]

S = esfuerzo máximo admisible de la pared de la tolva, [N/m<sup>2</sup>]

β = ángulo formado por la pared de la tolva con la vertical, [°]

E = eficiencia de la soldadura.

**3.3.10** *Evaluación de resistencia del diseño.* Se evaluará la resistencia a los esfuerzos principales y la resistencia al pandeo de las paredes, conforme a lo dispuesto por (ENV.1993-1-6, 2006), y (RAVENET, 1992).

### 3.4 Carga de viento

Tabla 10. Procedimiento de cálculo para la determinación de la acción del viento

Parámetros	Referencia
<b>Presión de velocidad pico</b>	
Velocidad fundamental del viento ( $V_{b0}$ )	3.4.1
Velocidad básica del viento ( $V_b$ )	3.4.2
Velocidad media del viento ( $V_{m(z)}$ )	3.4.3
Categoría del terreno	3.4.3.1
Coefficiente de aspereza ( $C_{r(z)}$ )	3.4.3.2
Intensidad de la turbulencia ( $I_{v(z)}$ )	3.4.4
Presión crítica de la velocidad pico ( $q_p(z)$ )	3.4.5
<b>Fuerza del viento sobre estructuras</b>	
Coefficiente de fuerza	3.4.6
Fuerza del viento a partir de coeficientes de fuerza	3.4.7

Fuente: (EN 1991-1-4, 2005)

La acción del viento sobre una superficie estructural es representada por un conjunto simplificado de presiones o fuerzas que representan los efectos equivalentes a los efectos extremos de la turbulencia del viento al impactar contra superficies que impiden su flujo libre. Para el cálculo de dicha carga se tomarán recomendaciones de la norma (NEC-SE-CG, 2015), y las expresiones de cálculo de la norma (EN 1991-1-4, 2005). En el Ecuador, las cargas generadas por el viento sobre estructuras de baja altura no son tan críticas como en el caso de estructuras como torres de transmisión y eléctricas.

**3.4.1** *Velocidad fundamental del viento ( $V_{b0}$ )*. Es el valor fundamental de la velocidad del viento, independiente de su dirección y en el tiempo de un año, a 10 metros sobre el nivel del suelo y en un terreno abierto con baja vegetación. En el caso del Ecuador, este valor se puede tomar de las tablas del INAMHI.

**3.4.2** *Velocidad básica del viento ( $V_b$ )*. Es la velocidad corregida del viento, y corresponde al valor característico de la velocidad media del viento corregida en función de la dirección del viento y la temporada estacional.

$$V_b = C_{dir} * C_{temp} * V_{b0} \quad (37)$$

Donde:

$V_b$  = velocidad básica del viento,

$C_{dir}$  = factor direccional,

$C_{temp}$  = factor temporada estacional.

**3.4.3** *Velocidad media del viento ( $V_m(z)$ )*.

$$V_m(z) = C_r(z) * C_o(z) * V_b \quad (38)$$

Donde:

$C_r(z)$  = factor de aspereza,

$C_o(z)$  = factor orográfico (A menos que especifique lo contrario,  $C_o(z)=1$ ),

$V_b$  = Velocidad básica del viento.

**3.4.3.1** *Categoría del terreno.* Esta sirve para identificar el nivel de exposición de la estructura a la acción del viento, el objetivo es determinar la variable ( $Z$ ), que indica la aspereza del terreno. La categoría del terreno se puede encontrar con la ayuda de las ilustraciones del anexo C, y los valores de la aspereza  $Z$  de la tabla (11).

Tabla 11. Categoría y parámetros del terreno

<b>Categoría del terreno</b>	<b>Z<sub>0</sub></b> m	<b>Z<sub>mín</sub></b> m
0 Mar o área costera expuesta a mar abierto	0,003	1
I Lagos o área horizontal y plana con vegetación mínima o sin obstáculos.	0,01	1,0
II Área con baja vegetación tal como césped y obstáculos aislados (árboles, construcciones) con separación de al menos 20 veces la altura del obstáculo	0,05	2,0
III Área cubierta regularmente por vegetación o construcciones o con obstáculos aislados con separación de al menos 20 veces la altura del obstáculo (Villas, terrenos sub urbanos, bosques)	0,3	5,0
IV Área in la cual por lo menos el 15% de la superficie está cubierto con construcciones y su altura promedio excede los 15 m	1,0	10,0

Fuente: Traducción del original (EN 1991-1-4, 2005) pág. 20

Donde:

$Z$  = altura sobre el nivel del suelo;

$Z_0$  = longitud de la aspereza;

$Z_{mín}$  = es la mínima altura de aspereza;

$Z_{máx}$  = esta altura toma el valor de 200m, dispuesto por la norma (EN 1991-1-4, 2005).

**3.4.3.2** *Coficiente de aspereza ( $C_r(Z)$ ).* Este factor se puede determinar mediante una de las siguientes expresiones según cumpla las condiciones:

$$C_r(Z) = K_r * \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right); \quad \text{si: } Z_{mín} \leq Z \leq Z_{máx} \quad (39)$$

$$C_r(Z) = C_r * Z_{mín}; \quad \text{si: } Z \leq Z_{mín} \quad (40)$$

Donde:

$K_r$  = es el factor del terreno en función de la longitud  $Z_0$ .

$$K_r = 0,19 * \left( \frac{Z_0}{Z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (41)$$

**3.4.4** *Intensidad de turbulencia del viento ( $I_{V(Z)}$ ).* Las reglas recomendadas para el cálculo del factor de turbulencia son las siguientes:

$$I_V(Z) = \frac{\sigma_V}{V_m(Z)} = \frac{K_I}{c_0(Z) * \ln(Z/Z_0)}; \quad \text{si: } Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max} \quad (42)$$

$$I_V(Z) = I_V(Z_{\min}); \quad \text{si: } Z \leq Z_{\min} \quad (43)$$

Donde:

$K_I$  = Es el factor de turbulencia, igual a 1 por recomendación de (EN 1991-1-4, 2005).

$\sigma_V$  = Es la desviación estándar de la turbulencia, evaluada mediante la ec. (43).

$$\sigma_V = K_r * V_b * K_I \quad (44)$$

**3.4.5** *Determinación de la presión de velocidad crítica ( $q_{p(Z)}$ ).*

$$q_p(Z) = [1 + 7 * I_V(Z)] * \frac{1}{2} * \rho * V_m^2(Z) \quad (45)$$

Donde:

$\rho$  = densidad del aire, [kg/m<sup>3</sup>]

$I_{V(Z)}$  = valor de la intensidad de turbulencia.

**3.4.6** *Determinación del coeficiente de fuerza ( $c_f$ ).* El coeficiente de fuerza para una sección cilíndrica finita se determina así:

$$c_f = c_{f,0} * \psi_\lambda \quad (46)$$

Donde:

$c_{(f,0)}$  = coeficiente de fuerza de cilindros con flujo sin extremo libre.



$\psi_\lambda$  = factor de efecto final.

Para calcular el coeficiente de fuerza, es necesario determinar la velocidad pico del viento  $V_{(ze)}$  y el número de Reynolds  $Re$ , como indica la ecuación (46) y (47).

$$V_{(ze)} = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(Z)}{\rho}} \quad (47)$$

$$Re = \frac{b \cdot V_{(ze)}}{\nu} \quad (48)$$

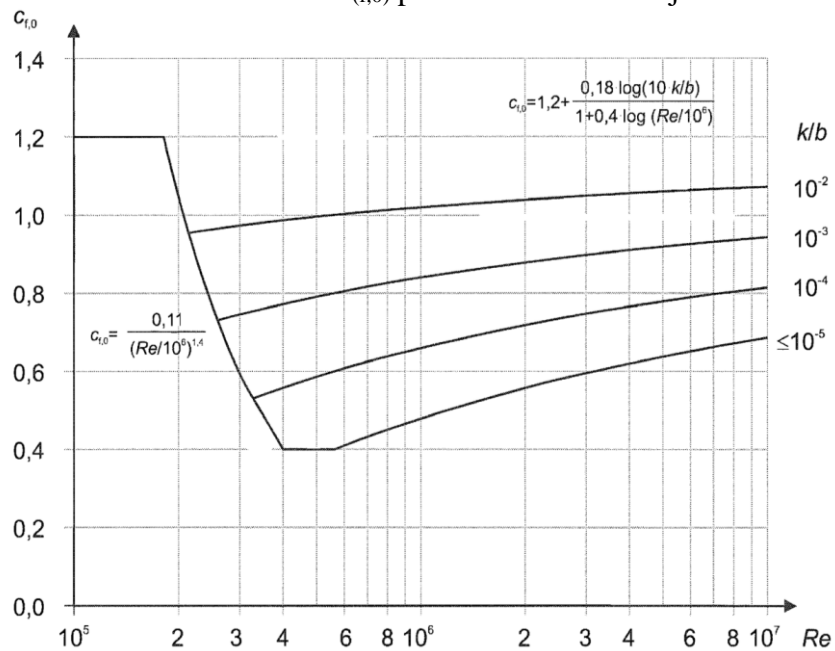
Donde:

$b$  = diámetro externo del silo,

$\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (viscosidad cinemática del aire).

**3.4.6.1 Determinación del factor ( $c_{f,0}$ ).** El valor de este factor se obtiene de la figura (27), para ello es necesario determinar el coeficiente que relaciona la rugosidad equivalente de la superficie y el diámetro exterior del cilindro  $k/b$ , e intersecar con la línea vertical correspondiente al número de Reynolds correspondiente. Si el punto no está dentro de las delimitaciones, se usan las expresiones correspondientes a cada zona.

Figura 27. Coeficiente de fuerza  $c_{f,0}$  para cilindros con flujo sin extremo libre.



Fuente: (EN 1991-1-4, 2005)

Donde:

Re = Número de Reynolds

b = diámetro exterior del cilindro,

K = rugosidad equivalente de la superficie del silo, tomada de la siguiente tabla:

Tabla 12. Rugosidad equivalente de la superficie

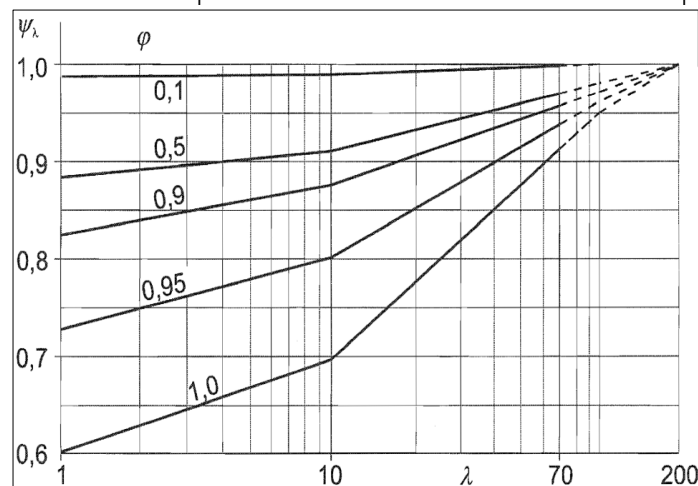
Tipo de superficie	Rugosidad equivalente k (mm)	Tipo de superficie	Rugosidad equivalente k (mm)
Vidrio	0,0015	Concreto liso	0,2
Metal pulido	0,002	Madera lisa	0,5
Pintura acabado muy liso	0,006	Concreto rugoso	1,0
Pintado pulverizado	0,02	Madera aserrada en bruto	2,0
Acero brillante	0,05	Oxidado, corroído	2,0
Hierro fundido	0,2	Ladrillo, bloque	3,0
Acero galvanizado	0,2		

Fuente: (EN 1991-1-4, 2005)

**3.4.6.2** *Determinación del factor de efecto final ( $\psi_\lambda$ ).* El factor de efecto final se obtiene del diagrama mostrado en la figura (28).

$$\psi_\lambda = f(\varphi; \lambda) \quad (49)$$

Figura 28. Valores del factor  $\psi_\lambda$  como función del radio de solidez  $\varphi$  vs. la esbeltez  $\lambda$



Fuente: (EN 1991-1-4, 2005)

**3.4.6.3 Determinación del radio de solidez ( $\varphi$ ).** El radio de solidez  $\varphi$ , se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (50)$$

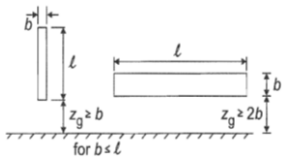
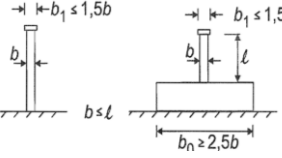
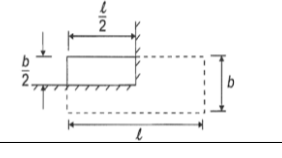
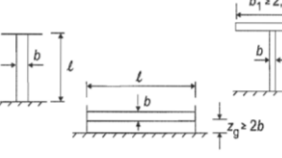
Donde:

$A_c$  = área total que proyecta la estructura a la acción del viento,

$A$  = es la suma del área de los miembros estructurales (área tributaria).

**3.4.6.4 Determinación de la esbeltez efectiva ( $\lambda$ ).** La esbeltez efectiva se obtiene de la figura (29), misma que ilustra valores para varias configuraciones estructurales.

Figura 29. Valores recomendados de esbeltez efectiva  $\lambda$  para secciones cilíndricas, poligonales, rectangulares, acunadas y rejadas.

Nº	Posición de la Estructura Viento normal al plano de la superficie	Esbeltez Efectiva $\lambda$
1		Para secciones estructurales poligonales, rectangulares, acunadas y en celosía: Para $l \geq 50$ m, $\lambda = 1,4 l/b$ o $\lambda=70$ , Cualquiera que sea menor  Para $l < 15$ m, $\lambda = 2 l/b$ o $\lambda=70$ , Cualquiera que sea menor
2		Para cilindros circulares:  Para $l \geq 50$ m, $\lambda = 0,7 l/b$ o $\lambda=70$ , Cualquiera que sea menor  Para $l < 15$ m, $\lambda = 2 l/b$ o $\lambda=70$ , Cualquiera que sea menor
3		Para valores intermedios de 1, se debe hacer una interpolación lineal.
4		Para $l \geq 50$ m, $\lambda = 0,7 l/b$ o $\lambda=70$ , Cualquiera que sea mayor  Para $l < 15$ m, $\lambda = l/b$ o $\lambda=70$ , Cualquiera que sea mayor  Para valores intermedios de 1, se debe hacer una interpolación lineal.

Fuente: (EN 1991-1-4, 2005)

Donde:

$l$  = longitud total del silo, incluido la estructura de soporte,

$b$  = diámetro del cilindro.

$Z_g$  = distancia de la superficie del suelo a la base del contenedor

**3.4.7** *Cálculo de la fuerza del viento sobre la estructura ( $F_w$ ).* La fuerza del viento se determina mediante la ec. (51), la cual requiere el factor estructural ( $C_s C_d$ ), que para estructuras de altura menor a 15 m, dicho factor es 1 (EN 1991-1-4, 2005).

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z) * A_{trib} \quad (51)$$

### 3.5 Carga de sismo

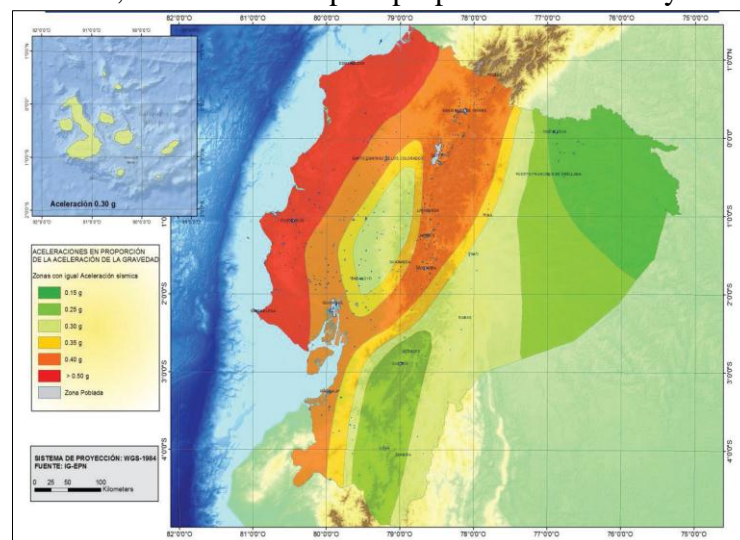
Determinar la carga sísmica permite mitigar el riesgo de fallo estructural por efectos sísmicos, aplicado al contexto ecuatoriano. El sitio donde se fundará la estructura definirá a cuál de las zonas sísmicas pertenece, dichas zonas están caracterizadas por el factor de sismo  $z$ , el cual se puede obtener de la figura (30).

Tabla 13. Procedimiento para el cálculo de la carga de sismo

Parámetros	Referencia del
Caracterización del peligro sísmico	3.5.1
Factor de importancia $I$	3.5.2
Factor de reducción $R$	3.5.3
Regularidad y configuración estructural	3.5.4
Período límite de vibración $T_c$	3.5.5
Período de vibración $T_a$	3.5.6
Espectro elástico de diseño $S_a$	3.5.7
Cortante basal de diseño $V$	3.5.8

Fuente: (NEC-SE-CG, 2015) / (EN 1991-1-4, 2005)

Figura 30. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y factor de zona  $z$ .



Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

**3.5.1** *Caracterización del peligro sísmico.* El mapa de zonificación sísmica para diseño proviene de un estudio de peligro sísmico, el cual categoriza al Ecuador en 6 zonas, las que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 14. Valores del factor z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	$\geq 0,5$
Característica del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

El coeficiente de amplificación de suelo ( $F_s$ ) considera el comportamiento no lineal de los suelos, y se obtiene de la tabla (17).

**3.5.1.1** *Tipos de perfiles de suelo para diseño sísmico.* Para el Ecuador se definen 6 tipos de suelos como se indica en el anexo C. Esta clasificación debe realizarse luego de un estudio de suelo del sitio donde se ubicará la estructura considerando la estratigrafía del suelo hasta donde se halla la roca.

**3.5.1.2** *Coefficientes de perfil de suelo ( $F_a$ ), ( $F_d$ ) y ( $F_s$ ).* El coeficiente ( $F_a$ ) amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca.

Tabla 15. Tipo de suelo y factor ( $F_a$ )

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	$\geq 0,5$
A	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
B	1	1	1	1	1	1
C	1,4	1,3	1,25	1,2	1,2	1,18
D	1,6	1,4	1,3	1,2	1,2	1,12
E	1,8	1,4	1,25	1	1	0,85
F	Ver clasificación de los perfiles del suelo en la sección 10.6.4 de la norma.					

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

El coeficiente ( $F_d$ ) amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, y su valor se toma de la tabla (16).

Tabla 16. Tipo de suelo y factores ( $F_d$ )

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	$\geq 0,5$
A	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
B	1	1	1	1	1	1
C	1,36	1,28	1,19	1,15	1,11	1,06
D	1,62	1,45	1,36	1,28	1,19	1,11
E	2,1	1,75	1,7	1,65	1,6	1,5
F	Ver clasificación de los perfiles del suelo en la sección 10.6.4 de la norma.					

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

El coeficiente de amplificación de suelo ( $F_s$ ) considera el comportamiento no lineal de los suelos, y se obtiene de la tabla (17).

Tabla 17. Tipo de suelo y factor de comportamiento inelástico del subsuelo ( $F_s$ )

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5
A	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
B	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
C	0,85	0,94	1,02	1,06	1,11	1,23
D	1,02	1,06	1,11	1,19	1,28	1,4
E	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
F	Ver clasificación de los perfiles del suelo en la sección 10.6.4 de la norma.					

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

**3.5.2** *Factor de importancia por sismo (I).* El propósito del factor de importancia (I) es incrementar la demanda sísmica de diseño para estructuras, que por sus características de utilización o importancia deben permanecer operativas o sufrir daños más leves ante la pre y pos ocurrencia del sismo de diseño.

No necesariamente se debe tomar el valor dado por la norma, pues puede quedar a criterio del diseñador, escoger un valor de importancia de acuerdo a la ubicación y el peligro que representa para instalaciones contiguas y sobre todo para salvaguardar la integridad de la vida. Éste valor adimensional se presenta en la tabla (18), en la cual se puede observar los factores de importancia de sismo para diferentes edificaciones.

Tabla 18. Tipo de uso, destino e importancia de la estructura

<b>Categoría</b>	<b>Tipo de uso, destino e importancia</b>	<b>Coefficiente I</b>
Edificaciones	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atiendan emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1,5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente.	1,3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no se clasifican dentro de las categorías anteriores.	1,0

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

**3.5.3** *Factor de reducción de fuerzas sísmicas (R).* Se permite la reducción de fuerzas sísmicas mediante el factor (R), como indica la siguiente tabla.

Tabla 19. Factor de reducción de respuesta R para estructuras diferentes a edificaciones

<b>Valores del coeficiente de reducción de respuesta estructural R</b>	
Reservorios y depósitos, incluidos tanques y esferas presurizadas, soportadas mediante columnas o soportes arriostrados o no arriostrados.	2
Silos de hormigón fundido en sitio y chimeneas que poseen paredes continuas desde la cimentación.	3,5
Estructuras tipo cantiléver tales como chimeneas, silos y depósitos apoyados en sus bordes.	3
Naves industriales con perfiles de acero	3
Torres en armadura (auto-portantes o atirantadas)	3
Estructuras en forma de péndulo invertido	2
Torres de enfriamiento	3,5
Depósitos elevados soportados por una pila o por apoyos no arriostrados	3
Letreros y carteleras	3,5
Estructuras para vallas publicitarias y monumentos	2
Otras estructuras no descritas en esta documento	2

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

**3.5.4** *Regularidad y configuración estructural.* Mediante esta sección se analiza la distribución equilibrada de los elementos estructurales, así como su simetría.

Cuando una estructura no contemple ninguno de los tipos de irregularidad en sus pisos, que se detallan en las (51), (52) del anexo C. El coeficiente ( $\phi_p$ ) tomará el valor de 1 y se le considerará como regular en planta, entonces.

$$\phi_p = 1$$

Cuando una estructura no contempla ningún tipo de irregularidad que se detalla en la ilustración del anexo C, el coeficiente de irregularidad  $\phi_E$  tomará el valor de 1 y se le considerará como regular en elevación, entonces:

$$\phi_E = 1$$

Por lo tanto, una estructura se considera como regular en planta y elevación, cuando no presenta ninguna de las condiciones de irregularidad (NEC-SE-DS, 2015). En este caso se puede aplicar el DBF: Diseño Basado en Fuerzas (método 1 estático descrito en la sección 6 de la norma NEC), mismo que requiere de la determinación de las siguientes variables que se describen a continuación.

**3.5.5** *Período límite de vibración ( $T_c$ ).* Es el período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño, que se obtiene a través de la siguiente ecuación.

$$T_c = 0,55F_s * \frac{F_d}{F_a} \quad (54)$$

**3.5.6** *Periodo de vibración ( $T_a$ ).* Es el período de vibración aproximado de la estructura para cada dirección principal.

$$T_a = Ct * h_n^\alpha \quad (55)$$

Donde:

$h_n$  = Altura máxima de la estructura, medida desde la base, [m]



$C_t$  y  $\alpha$  = Coeficientes que dependen del tipo de edificación (ver anexo C).

### 3.5.7 Espectro elástico de diseño en aceleraciones ( $S_a$ ).

$$S_a = \eta * z * F_a; \quad \text{si:} \quad 0 \leq T \leq T_c \quad (56)$$

$$S_a = \eta * z * F_a * \left(\frac{T_c}{T}\right)^r \quad \text{si:} \quad T > T_c \quad (57)$$

Donde:

$r = 1$  (para todos los tipos de piso, excepto para E, de valor  $r = 1,5$ ).

$z$  = factor de zona sísmica.

$\eta = 2,48$ ; Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos,

$\eta = 2,60$ : Provincias del Oriente.

**3.5.8 Cortante basal de diseño ( $V$ ).** Es la carga que se aplica al silo para obtener la respuesta de la estructura a la acción de sismo, la carga de la cortante basal de diseño se obtiene de ecuación para estructuras diferentes a edificaciones, así:

$$V = \frac{\eta * z * F_a * I}{R} W \quad (58)$$

Donde:

$F_a$  = Espectro de respuesta elástico de aceleraciones,

$z$  = factor de zona sísmica,

$I$  = Factor de importancia por sismo,

$R$  = Factor de reducción de fuerzas sísmicas,

$\eta = 2,60$  (Provincias del Oriente),

$W$  = Carga sísmica reactiva.

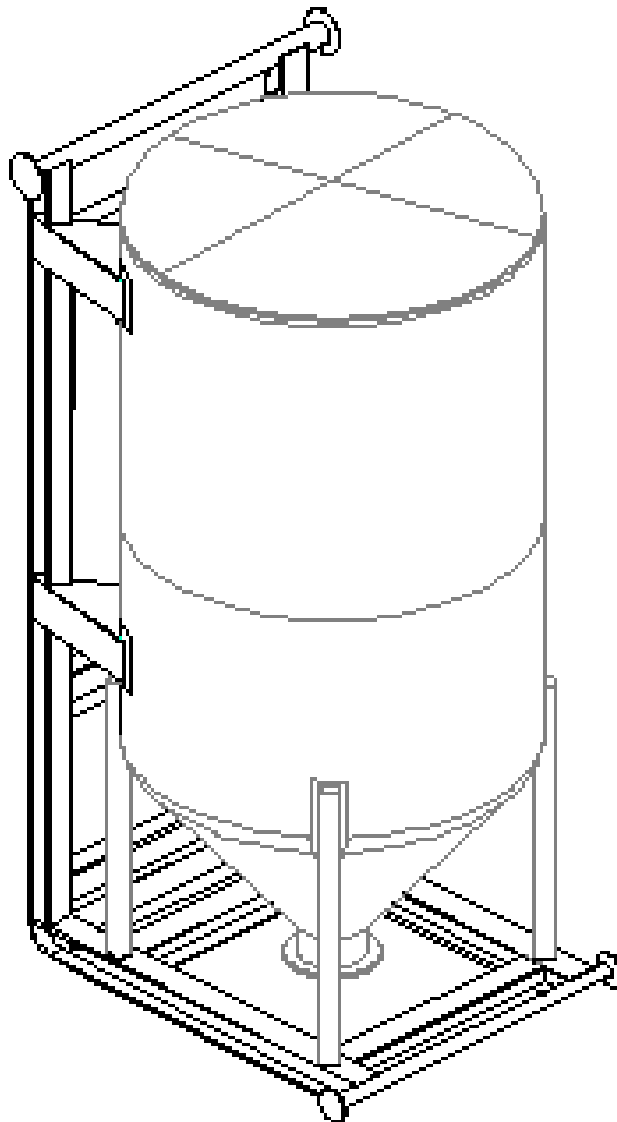
### 3.6 Diseño de la estructura de soporte del silo

La estructura de soporte del silo estará conformada por columnas unidas a la base del silo, montadas sobre un skid de fondo adjunto a un skid lateral para transportación.

**3.6.1** *Consideraciones de cálculo para las columnas.* En esta etapa se debe definir las características de la estructura de soporte como: El número de columnas y su orientación, la longitud de las columnas y la longitud no arriostrada. Luego se seleccionará el perfil de la columna, realizando el cálculo por resistencia de esfuerzos para el estado de última carga para la columna más cargada.

**3.6.2** *Consideraciones de cálculo para el skid lateral y de fondo.* El Skid de fondo es el elemento estructural que soporta los estados de carga última transmitidos por las columnas. El Skid lateral es el elemento estructural que soportará el peso del silo (descargado), cuando se encuentre en posición horizontal para su transporte.

Figura 31. Skid Lateral y de fondo del silo.



Fuente: Autor

## CAPÍTULO IV

### 4. DISEÑO DEL SILO PARA ALMACENAMIENTO DE CEMENTO

En este capítulo se procede con el cálculo y diseño del silo para almacenamiento de cemento de 1200 pies cúbicos de capacidad, siguiendo de forma ordenada la metodología presentada en el capítulo 3 del presente trabajo.

#### 4.1 Cálculo del diámetro de salida de la tolva

De las teorías de arco presentadas en el capítulo anterior para la determinación del diámetro de salida de la tolva, se toma la teoría de Arnold & Mclean, pues, de las conclusiones en el artículo (Archiving in hoppers: II. Archiving theories and critical outlet size, 1995). La teoría antes mencionada junto con la de Jenike, proyectan valores cercanos a los obtenidos experimentalmente, con márgenes de seguridad de 2 a 4.

Se debe prever que un ángulo de inclinación muy pronunciado, genera una gran altura de la tolva. Tomando en cuenta lo mencionado, para un ángulo de inclinación de la tolva:  $\theta_w = 30^\circ$ , se procede con el cálculo del diámetro de salida, entonces de la ec. (3):

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \varphi_w + \text{arc sin} \frac{\sin \varphi_w}{\sin \delta} \right)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left( 35^\circ + \text{arc sin} \frac{\sin 30^\circ}{\sin 51,8^\circ} \right) = 40,938^\circ$$

Con la ec. (6) se obtiene:

$$S = [2 - 2\cos(\beta + \theta_w)]^{m-1} (\beta + \theta_w)^{2-m} \sin \theta_w + \sin \beta \sin^m(\beta + \theta_w)$$

$$S = [2 - 2\cos(40,938^\circ + 30^\circ)]^{2-1} \cdot (\text{rad}(40,938^\circ) + \text{rad}(30^\circ))^{2-2} \cdot \sin 30^\circ \\ + \sin 40,938^\circ \cdot \sin^2(40,938^\circ + 30^\circ)$$

$$S = 1,258$$

Con la ec. (7):

$$T = 2(1 - \sin \delta) \sin^{m+1} (\beta + \theta_w)$$

$$T = 2(1 - \sin 51,8^\circ) \sin^{2+1} (40,938^\circ + 30^\circ)$$

$$T = 0,361$$

Con la ec. (8):

$$U = \frac{2^{m-1} \sin \delta}{1 - \sin \delta} \left[ \frac{\sin (2\beta + \theta_w)}{\sin \theta_w} + 1 \right]$$

$$U = \frac{2^{2-1} \sin 51,8^\circ}{1 - \sin 51,8^\circ} \left[ \frac{\sin (2(40,938^\circ) + 30^\circ)}{\sin 30^\circ} + 1 \right]$$

$$U = 20,961$$

Reemplazando los resultados de las ec. (6), (7) y (8) en la ec. (4).

$$ff = \frac{S(1 + \sin \delta)}{T(U - 1) \sin \theta_w} \left( \frac{1,13}{2,26 + \theta_w} \right)^{1-m} \left( \frac{3,48}{3,48 + \theta_w} \right)^{m-2}$$

$$ff = \frac{1,48 (1 + \sin 51,8)}{0,39 (18,57 - 1) \sin 30^\circ} \left( \frac{1,13}{2,26 + \text{rad}(30^\circ)} \right)^{1-2} \left( \frac{3,48}{3,48 + \text{rad}(30^\circ)} \right)^{2-2}$$

$$ff = 16,579$$

Con la ec. (5):

$$g() = 2 \sin \theta_w \left( \frac{1,13}{2,26 + \theta_w} \right)^{m-1} \left( \frac{3,48}{3,48 + \theta_w} \right)^{2-m}$$

$$g() = 2 \sin 30^\circ \left( \frac{1,13}{2,26 + \text{rad}(30^\circ)} \right)^{2-1} \left( \frac{3,48}{3,48 + \text{rad}(30^\circ)} \right)^{2-2} = 0,41$$

Tomando los datos de la tabla (7), para resolver la ec. (2).

$$\left(\frac{\sigma_{1a} + E}{E}\right)^q - \frac{\sigma_{1a} ff}{F} - 1 = 0$$

$$\left(\frac{\sigma_{1a} + 0,5}{0,5}\right)^{1,9} - \frac{\sigma_{1a} \cdot 16,579}{0,1} - 1 = 0$$

$$\sigma_{1a} = 3,73$$

Reemplazando el resultado de las ec. (2) y (5), en (1), tenemos:

$$D = \frac{2 \sigma_{1a} \sin \theta_w}{\gamma g(\theta_w, \varphi_w)}$$

$$D = \frac{2 * (3,73) * \sin 30^\circ}{(14,45) N/m^3 * (0,41)} = 0,629 \text{ m}$$

El diámetro de salida de la tolva será:  $D_{\text{tolva}} = 0,62 \text{ m}$ . Como se mencionó en el capítulo anterior, este valor tiene un factor de seguridad para la desarrollo del flujo másico.

## 4.2 Dimensionamiento del silo

Para determinar la altura del cuerpo cilíndrico se debe definir el diámetro del mismo, además, se requiere conocer la cantidad de cemento que es capaz de contener la tolva y la pila de cemento que se forma en el nivel superior de la columna de dicho material.

- Diámetro del cuerpo del silo

Según el reglamento ecuatoriano, a través del ministerio de transporte y obras públicas, acuerdo No. 036-Art. 2 de la tabla nacional de pesos y dimensiones, indica que el ancho permitido para un vehículo de transporte pesado tipo cama baja es de 3,20 m. Al ser un silo transportable, se dimensionará para cumplir con lo reglamentado, por lo tanto:

$$D_{\text{cuerpo}} = 3 \text{ m}$$

- *Cálculo del volumen de la tolva*

El volumen de la tolva se calcula mediante la siguiente ec. (21).

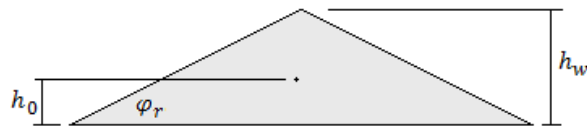
$$V_{tolva} = \frac{\pi}{12} H_{tolva} (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \cdot D_2)$$

$$V_{tolva} = \frac{\pi}{12} (2,06m) (3^2 + 0,62^2 + 3 * 0,62)m^2 = 6,06 m^3$$

- *Cálculo del volumen de la pila de cemento*

Para determinar el volumen de la tolva, se calcula la altura de la pila con la ec. (59).

Figura 32. Pila de cemento formada en el nivel superior del material



Fuente: Autor

$$tg \varphi_r = \frac{h_w}{r} \quad (59)$$

$$h_w = tg \varphi_r * r$$

Donde:

$h_w$  = Es la altura de la pila formada en el nivel superior del cemento, [m]

$r$  = es el radio del cuerpo cilíndrico, [m]

$\varphi_r$  = es el ángulo de reposo del cemento, [rad]

$$h_w = tg 28^\circ \cdot 1,5 m = 0,79 m$$

- *Cálculo del volumen de la pila de cemento ( $V_{pc}$ ).*

El volumen de la pila de cemento se calcula mediante la ec. (60).

$$V_{pc} = \frac{\pi}{3} * r^2 * h_w \quad (60)$$

$$V_{pc} = \frac{\pi}{3} * (1,5m)^2 * (0,79m) = 1,88 m^3$$

- *Cálculo de la altura del cilindro*

Conocido el volumen de la tolva y de la pila de cemento, se resta dicho volúmenes de la capacidad total del silo como indica la ec. (61).

La capacidad total del silo es  $V = 1200 \text{ pies}^3 = 34 m^3$ , entonces:

$$V_c = V - V_{tolva} - V_{pila} \quad (61)$$

$$V_c = (34,00 - 6,06 - 1,88)m^3 = 26,06 m^3$$

Mediante la ec. (62), obtenemos la masa de cemento en el cilindro ( $\delta_{\text{libre}} = 1410 \text{ kg/m}^3$ ).

$$m_c = \delta * V_c \quad (62)$$

$$m_c = 1410 \text{ kg/m}^3 * 26,06 m^3 = 36744,60 \text{ kg}$$

La ec. (63), permite determinar la altura de un material granular confinado en un silo cilíndrico (Jenike y Johanson, 2013).

$$H_m = \frac{m_c}{\rho_c * A} \quad (63)$$

Donde:

$M_c$  = es la masa de cemento contenida en el cilindro, [kg]

$\rho_c$  = es la densidad del cemento consolidado, [ $\rho_c=1506 \text{ kg/m}^3$ ] (Kurt E., 1979).

$A$  = es el área de la sección circular del cuerpo.

Mediante la ec. (64) se obtiene el área:

$$A = \frac{\pi}{4} * d_c^2 \quad (64)$$

$$A = \frac{\pi}{4} * (3m)^2 = 7,07 m^2$$

Por lo tanto, con la ec. (63).

$$H_m = \frac{m_c}{\rho_c * A}$$

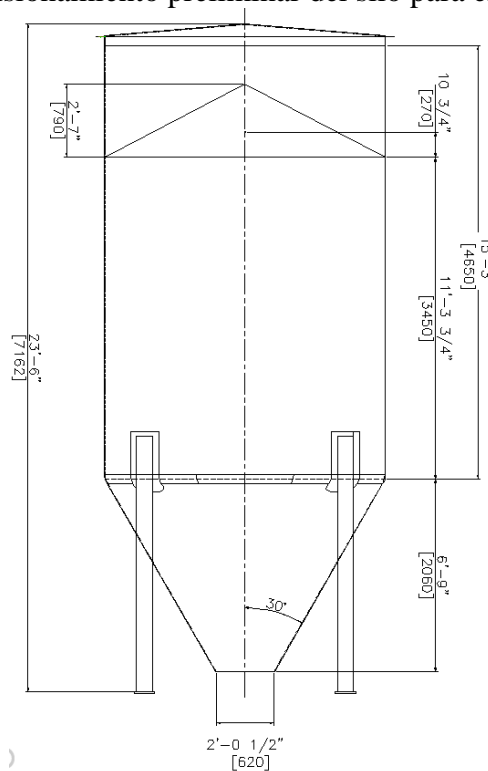
$$H_m = \frac{36744,60 kg}{(1506 kg/m^3 * (7,07)m^2)} = 3,45 m$$

La altura total del cilindro es la suma de la altura de material H, más la altura de la pila  $h_w$ , y un 10% adicional por recomendación empírica de (Jenike y Johanson, 2013).

$$H_T = (3,45 + 0,8)m + (10\% * (3,45 + 0,8))m \approx 4,67 m$$

La altura total del cuerpo cilíndrico será:  $H_T = 4,65 m$ .

Figura 33 Dimensionamiento preliminar del silo para el cálculo de carga.



Fuente: Autor



### 4.3 Cálculo de presiones según EN 1991-4:2006

Para utilizar las expresiones de cálculo de la norma EN 1991-4:2006, se procede a identificar al silo dentro de las clasificaciones que propone la norma, así como definir las condiciones de funcionamiento.

- Clasificación según la acción de evaluación. De la tabla 9 se puede observar que el silo que se diseña, se ubica dentro de la clasificación (AAC1) “Acción de evaluación clase 1” para silos con capacidad menor a 100 Ton.
- Determinación de la esbeltez del silo. La esbeltez del silo se determina evaluando la razón ( $h_c/d_c$ ). Con la ec. (23) se obtiene  $h_c$ , como se indica a continuación:

$$h_c = h_m * h_0$$

$$h_c = (3,45 + 0,27)m = 3,72 m$$

Por lo tanto:

$$\frac{h_c}{d_c} = \frac{(3,72)m}{(3)m} = 1,24$$

La razón obtenida:  $2 \leq h_c/d_c$ , cumple con la condición (a) de la sección 3.3.3.2 del presente trabajo, la cual indica que es un “Silo esbelto”.

- *Excentricidades en el silo.* El método de llenado que sugiere la teoría es el método neumático, el cual resulta en una superficie aproximadamente simétrica del material. Además, la boca de salida es concéntrica al eje vertical del cuerpo, por lo tanto no se considerará la posibilidad de excentricidades en la descarga del silo.
- *Definición del patrón de flujo.* La descarga del cemento se efectuará por medio de un patrón de flujo másico.

Las expresiones que van a utilizarse para el cálculo de las presiones internas del silo de cemento son explícitas para las clasificación y condiciones antes definidas.

**4.3.1** *Cálculo de la presión sobre el cuerpo.* Debido a que la norma provee datos tabulados promedio de las propiedades del cemento, se recomienda el uso de valores característicos (más altos y más bajos) para tomar en cuenta la variabilidad de los valores reales de dichas propiedades (EN 1991-4, 2006). Los valores característicos se obtienen utilizando las siguientes ecuaciones.

$$X_u = a_x * X_m \quad (65)$$

$$X_l = \frac{a_x}{X_m} \quad (66)$$

Donde:

$X_u$  = es el valor característico más alto (subíndice u, *upper* por su traducción al inglés),

$X_l$  = el valor característico más bajo (subíndice l, *lower* por su traducción al inglés),

$X_m$  = es el valor promedio de la propiedad del cemento,

$a_x$  = es el coeficiente característico.

Utilizando las ec. (65) y (66) se presenta la tabla (20), de valores característicos de las propiedades de flujo del cemento, proveniente de la tabla (8).

Tabla 20. Valores característicos de las propiedades de flujo del cemento

Valor característico	$\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$\phi_i$ (°)	$K$ -	$\mu$ -
Más alto (upper)	16	36,60	0,648	0,492
Más bajo (lower)	13	24,59	0,450	0,430

Fuente: (EN 1991-4, 2006)

El coeficiente de fricción de la pared K, corresponde al tipo de pared tipo D2 para acero al carbón liso de construcción soldada o empernada (EN 1991-4, 2006).

Se deben utilizar los valores característicos de las propiedades de flujo del cemento, de acuerdo al tipo de evaluación de carga, y zona correspondiente a dicho análisis. En la tabla (21) se muestran los coeficientes que se deben utilizar para obtener los valores más adecuados de los cálculos de las cargas.

Tabla 21. Valores característicos de propiedades para diferentes evaluaciones de carga sobre las paredes

Evaluación de carga	Coef. de fricción lateral	Coef. de presión lateral	Ángulo de fricción interna
<b>Para la pared vertical</b>	$\mu$	k	$\phi_i$
Presión normal máxima sobre pared vertical	Más bajo	Más alto	Más bajo
Tracción friccional sobre la pared vertical	Más alto	Más alto	Más bajo
Carga vertical sobre la tolva o fondo	Más bajo	Más bajo	Más alto
<b>Para la pared de la tolva</b>	$\mu$	F	$\phi_i$
Presión máxima de llenado sobre la tolva	Más bajo para tolva	Más bajo	Más bajo
Presión máxima de descarga sobre la tolva	Más bajo para tolva	Más alto	Más alto
Para todos los cálculos, el peso unitario $\gamma$ , debe tomarse el valor característico más alto para todas las acciones, el valor característico más bajo solo debe usarse para asistir en la estimación de la capacidad.			

Fuente: (EN 1991-4, 2006) (E)

**4.3.1.1** *Cálculo de la presión horizontal de llenado ( $P_{hf}$ ).* La presión horizontal sobre las paredes verticales de un silo de esbeltez intermedia, se calcula a través de las siguientes ecuaciones.

$$P_{hf} = P_{h0} \cdot Y_R \quad (67)$$

$$P_{h0} = \gamma \cdot K_u \cdot Z_0 \quad (68)$$

$$Y_R = 1 - \left\{ \left( \frac{Z - h_0}{Z_0 - h_0} \right) + 1 \right\}^n \quad (69)$$

$$Z_0 = \frac{1}{K_u \cdot \mu_l} * \frac{A}{U} \quad (70)$$

$$n = -(1 + tg \phi_r) * \left( 1 - \frac{h_0}{Z_0} \right) \quad (71)$$

Donde:

$P_{h0}$  = es la presión horizontal asintótica a gran profundidad,

$\gamma$  = es la densidad a granel en  $[\text{kN/m}^3]$ ,

$K_u$  = el valor característico del radio de presiones (más alto),

$h_0$  = es la distancia del centroide de la pila al punto más bajo de la misma

$\mu_1$  = es el coeficiente de rozamiento de la pared del silo (más bajo),

$Z$  = es la profundida, medida desde la superficie equivalente del silo,

$A$  = es el área de la sección circular del cuerpo,

$U$  = es el perímetro de la sección circular del cuerpo,

La presión horizontal de llenado se calculará en el punto más profundo del cuerpo cilíndrico, donde  $Z = 3,72$  m. Entonces, de las expresiones presentadas se obtiene:

Con la ecuación (71):

$$n = -(1 + \text{tg } 28^\circ) * \left(1 - \frac{0,266 \text{ m}}{2,692 \text{ m}}\right) = -1,38$$

Con la ecuación (70):

$$Z_0 = \frac{1}{K_u * \mu_1} * \frac{A}{U}$$

$$Z_0 = \frac{1}{0,648 * 0,43} * \frac{7,069 \text{ m}^2}{9,425 \text{ m}} = 2,692 \text{ m}$$

Con la ecuación (69):

$$Y_R = 1 - \left\{ \left( \frac{Z - h_0}{Z_0 - h_0} \right) + 1 \right\}^n$$

$$Y_R = 1 - \left\{ \left( \frac{3,72 \text{ m} - 0,266 \text{ m}}{2,692 \text{ m} - 0,266 \text{ m}} \right) + 1 \right\}^{-1,38} = 0,705$$

Con la ecuación (68):

$$P_{h0} = \gamma \cdot K_u \cdot Z_0$$

$$P_{h0} = 16 \frac{kN}{m^3} * \frac{7,069 m^2}{(0,43) * (9,425m)}$$

$$P_{h0} = 27,913 \frac{kN}{m^2}$$

Por lo tanto, con la ec. (67) se obtiene la presión horizontal de llenado:

$$P_{hf} = 27,913 \frac{kN}{m^2} * 0,705 = 19,68 \frac{kN}{m^2}$$

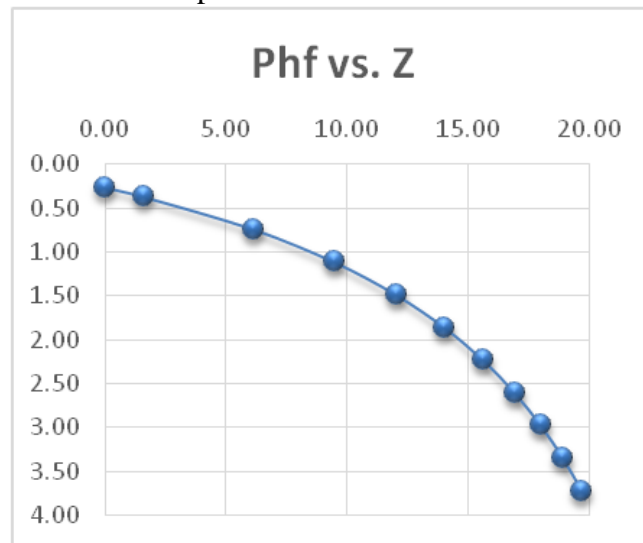
En la tabla (22) y figura (34) se muestra la variación de  $P_{hf}$ , con la profundidad Z.

Tabla 22. Variación de la presión ( $P_{hf}$ ) con la profundidad Z

<b>Z(m)</b>	0,27	0,37	0,74	1,12	1,49	1,86	2,23	2,60	2,98	3,35	3,72
<b>Phf</b>	0,00	1,60	6,14	9,47	12,02	14,01	15,61	16,92	18,00	18,91	19,68

Fuente: Autor

Figura 34. Variación de la presión horizontal de llenado con la profundidad



Fuente: Autor

**4.3.1.2** *Cálculo de presión de tracción friccional de llenado ( $P_{wf}$ ).* La presión de tracción friccional en las paredes verticales del cuerpo, se calcula por medio de las siguientes expresiones.

$$P_{wf} = P_{hf} * \mu_u \tag{72}$$

Donde:

$P_{hf}$  = es la presión horizontal de llenado a una profundidad  $Z$ ,

$U_u$  = es el coeficiente de fricción de la pared del silo.

Por lo tanto, con los datos del cálculo de  $P_{hf}$ , para  $Z = 3,72$  m, se tiene:

$$P_{wff} = 19,68 \frac{KN}{m^2} * 0,49$$

$$P_{wff} = 9,68 \frac{KN}{m^2}$$

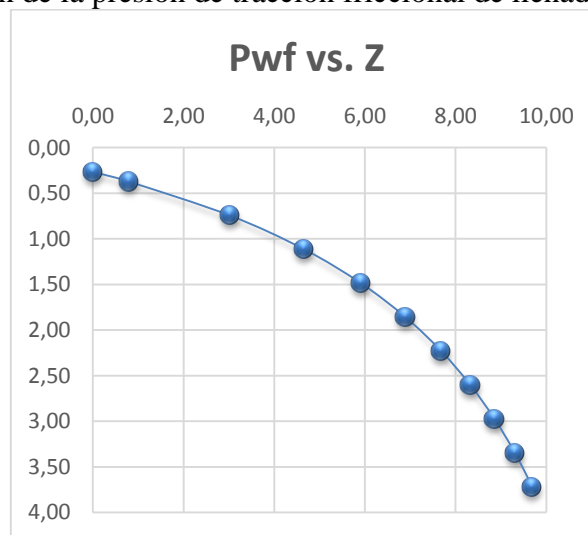
En la tabla (23) y figura (35) se muestra la variación de  $P_{wf}$ , con la profundidad  $Z$ .

Tabla 23. Variación de la presión ( $P_{wf}$ ), con la profundidad  $Z$ .

<b>Z (m)</b>	0,27	0,37	0,74	1,12	1,49	1,86	2,23	2,60	2,98	3,35	3,72
<b>Pwf</b>	0,00	0,79	3,02	4,66	5,92	6,90	7,68	8,33	8,86	9,31	9,69

Fuente: Autor

Figura 35. Variación de la presión de tracción friccional de llenado con la profundidad.



Fuente: Autor

**4.3.1.3** *Cálculo de presión vertical de llenado ( $P_{vf}$ ).* La presión vertical de llenado en el cuerpo del silo se obtiene de las siguientes ecuaciones.

$$P_{vf} = \gamma * Z_V \tag{73}$$

$$Z_0 = \frac{1}{K_t * \mu_u} * \frac{A}{U} \quad (74)$$

$$n = -(1 + tg \varphi_r) * \left(1 - \frac{h_0}{Z_0}\right) \quad (75)$$

$$Z_V = h_0 - \frac{1}{n+1} * \left(Z_0 - h_0 - \frac{(Z+Z_0-2h_0)^{n+1}}{(Z_0-h_0)^n}\right) \quad (76)$$

Con la ec. (73):

$$Z_0 = \frac{1}{0,45 * 0,492} * \frac{7,069 \text{ m}^2}{9,425 \text{ m}} = 3,877 \text{ m}$$

Con la ec. (74):

$$n = -(1 + tg 28^\circ) * \left(1 - \frac{0,266 \text{ m}}{3,877 \text{ m}}\right) = -1,427$$

Con la ec. (75):

$$Z_V = 0,266 \text{ m} - \frac{1}{-1,427 + 1} * \left(3,877 \text{ m} - 0,266 \text{ m} - \frac{(3,72 \text{ m} + 3,877 \text{ m} - 2(0,266 \text{ m})^{-1,427+1})}{(3,877 \text{ m} - 0,266 \text{ m})^{-1,427}}\right)$$

$$Z_V = 2,373 \text{ m}$$

Por lo tanto, con la ec. (73) se obtiene la presión vertical de llenado, este valor corresponde a la presión en la base del cuerpo cilíndrico.

$$P_{vf} = 16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 2,373 \text{ m} = 37,97 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

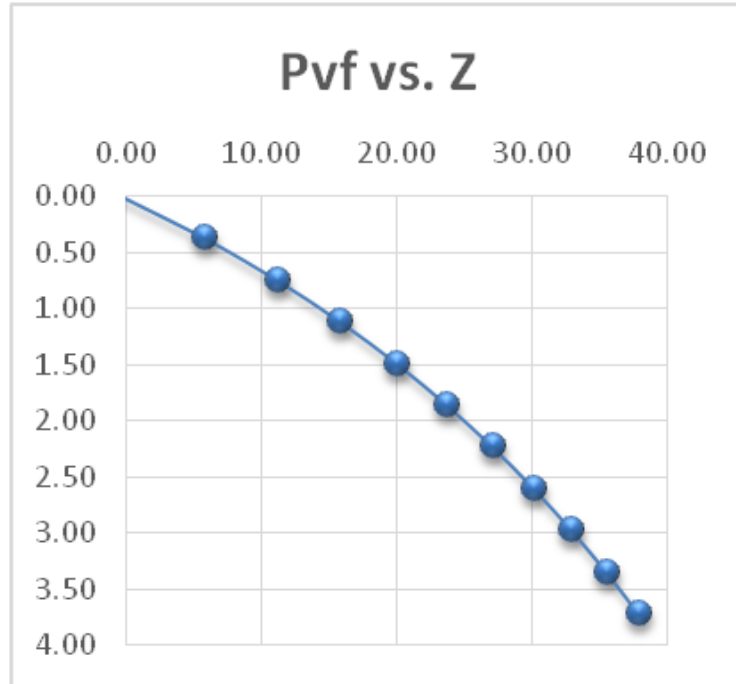
En la tabla (24) y figura (36) se muestra la variación de ( $P_{vf}$ ), con la profundidad  $Z$ .

Tabla 24. Variación de la presión ( $P_{vf}$ ) con la profundidad  $Z$ .

<b>Z</b>	0,27	0,37	0,74	1,12	1,49	1,86	2,23	2,60	2,98	3,35	3,72
<b>Pvf</b>	4,31	5,92	11,25	15,93	20,09	23,81	27,18	30,23	33,03	35,60	37,97

Fuente: Autor

Figura 36. Variación de la presión vertical de llenado con la profundidad.



Fuente: Autor

**4.3.1.4** *Cálculo de la presión horizontal de descarga ( $P_{he}$ ).* En la descarga surgen los efectos dinámicos de las cargas sobre las paredes del silo, para ello se usan coeficientes de mayoración, que se determinan con las siguientes ecuaciones.

$$C_h = 1,0 + 0,15C_s \quad (77)$$

$$C_w = 1,0 + 0,10C_s \quad (78)$$

$$C_s = h_c/d_c - 1 \quad (79)$$

Donde:

$C_h$  = es el coeficiente de mayoración para la presión horizontal,

$C_w$  = es el coeficiente de mayoración para la presión de tracción friccional,

$C_s$  = es el factor de ajuste por esbeltez.

Con la ecuación (79):

$$C_s = \frac{3,72 \text{ m}}{3 \text{ m}} - 1 = 0,24$$



Por lo tanto, con las ec. (77) y (78), se obtienen los valores de los coeficientes:

$$C_h = 1,0 + 0,15(0,24) = 1,036$$

$$C_w = 1,0 + 0,10(0,24) = 1,024$$

Aplicado el coeficiente  $C_h$  a la presión  $P_{hf}$ , se obtiene la presión horizontal de vaciado.

$$P_{he} = C_h * P_{hf} \quad (80)$$

$$P_{he} = 1,036 * 19,68 \frac{kN}{m^2} = 20,39 \frac{kN}{m^2}$$

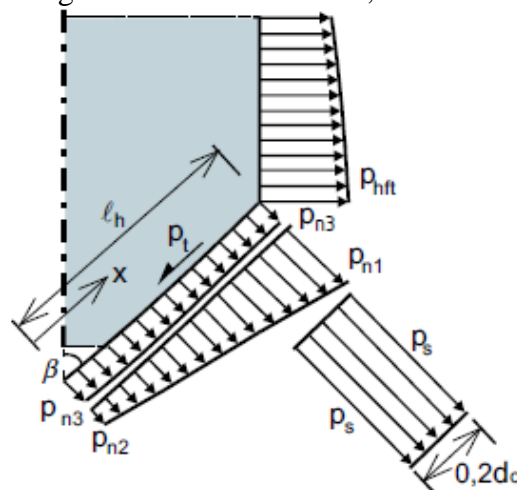
**4.3.1.5** *Cálculo de la presión de tracción friccional ( $P_{we}$ ).* Utilizando el coeficiente  $C_w$  y la presión  $P_{wf}$ , se obtiene la presión de tracción friccional.

$$P_{we} = C_w * P_{wf} \quad (81)$$

$$P_{we} = 1,024 * (9,69) \frac{kN}{m^2} = 9,92 \frac{kN}{m^2}$$

**4.3.2** *Cálculo de presión de llenado sobre la tolva.* El anexo G de la norma EN 1991-4-2006, presenta expresiones de cálculo basado en métodos experimentales, con las presiones distribuidas que se indican en la figura (37).

Figura 37. Presiones generadas sobre la tolva, método alternativo anexo G



Fuente: Norma EN-1991-4-2006, Anexo G

$$P_n = P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) * \frac{x}{l_h} \quad (82)$$

$$P_{n1} = P_{vft} * (C_b \text{sen}^2\beta + \text{cos}^2\beta) \quad (83)$$

$$P_{n2} = C_b * P_{vft} * \text{sen}^2\beta \quad (84)$$

$$P_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} * \frac{\gamma K}{(\mu)^{1/2}} * \text{cos}^2\beta \quad (85)$$

Donde:

$P_n$  = es la presión normal a la pared inclinada de la tolva;

$P_{ni}$  = son las componentes de la presión normal a la pared de la tolva ( $i = 1,2,3$ );

$l_h$  = es la distancia inclinada desde el ápice de la tolva a la transición;

$\beta$  = es la inclinación de la tolva respecto al eje vertical;

$x$  = es una longitud entre: 0 y  $l_h$ ;

$P_{n1}$  y  $P_{n2}$  = definen en la transición, las presiones en la tolva debido a la presión vertical,

$P_{n3}$  = Es la presión debido al material dentro de la tolva,

$C_b$  = Es un magnificador de carga del fondo,

$P_{vft}$  = Es el valor de la presión vertical  $P_{vf}$ , actuando a nivel de la transición,

$\mu_h$  = Es el valor característico (más bajo) del coeficiente de fricción en la tolva,

$K$  = es el valor característico del coeficiente de presión lateral de las paredes verticales,

$A$  = es el área de la sección transversal plana del segmento vertical (cuerpo),

$U$  = es el perímetro de la sección transversal plana del segmento vertical (cuerpo),

Nota: El valor característico  $K_l$  produce un valor más alto de  $P_{vft}$ , pero el valor característico ( $K_u$ ) genera un valor más alto de  $P_{n3}$ , por lo que, es imposible hacer una declaración tajante, sobre cual valor característico induce el peor estado de carga en la tolva, por lo que ambos valores característicos deben ser examinados.

Cuando:  $K_{lower} = 0,45$ ;  $P'_{vf} = 37,97 \frac{kN}{m^2}$

$$P'_{vft} = 1,3 * (37,97) \frac{kN}{m^2} = 49,36 \frac{kN}{m^2}$$

$$P'_{n1} = 49,36 \frac{kN}{m^2} * (1,3 * \text{sen}^2 30^\circ + \text{cos}^2 30^\circ) = 53,06 \frac{kN}{m^2}$$

$$P'_{n2} = 1,3 * 49,36 \frac{kN}{m^2} * \text{sen}^2 30^\circ = 16,04 \frac{kN}{m^2}$$

$$P'_{n3} = 3,0 \frac{(7,07)m^2}{(9,42)m} * \frac{(16) \frac{kN}{m^3} (0,45)}{(0,43)^{1/2}} * \text{cos}^2 30^\circ = 18,54 \frac{kN}{m^2}$$

$$P'_n = 18,54 \frac{kN}{m^2} + 16,04 \frac{kN}{m^2} + (53,06 \frac{kN}{m^2} - 16,04 \frac{kN}{m^2}) * \frac{3m}{3m}$$

$$P'_n = 71,60 \frac{kN}{m^2}$$

Cuando:  $K_{upper} = 0,648$ ;  $P''_{vf} = 33,43 \frac{kN}{m^2}$

$$P''_{vft} = 1,3 * (33,43) \frac{kN}{m^2} = 43,46 \frac{kN}{m^2}$$

$$P''_{n1} = 43,46 \frac{kN}{m^2} * (1,3 * \text{sen}^2 30^\circ + \text{cos}^2 30^\circ) = 46,72 \frac{kN}{m^2}$$

$$P''_{n2} = 1,3 * 43,46 \frac{kN}{m^2} * \text{sen}^2 30^\circ = 14,12 \frac{kN}{m^2}$$

$$P''_{n3} = 3,0 \frac{(7,07)m^2}{(9,42)m} * \frac{(16) \frac{kN}{m^2} (0,648)}{(0,43)^{1/2}} * \text{cos}^2 30^\circ = 26,70 \frac{kN}{m^3}$$

$$P''_n = 26,70 \frac{kN}{m^3} + 14,12 \frac{kN}{m^2} + (46,72 \frac{kN}{m^2} - 14,12 \frac{kN}{m^2}) * \frac{3m}{3m}$$

$$P''_n = 73,42 \frac{kN}{m^2}$$

De los resultados obtenidos de la presión normal de la tolva, se toma el valor máximo del análisis anteriormente realizado, entonces:

$$P_n = 73,42 \frac{kN}{m^2}$$

**4.3.3** *Cálculo de la presión friccional en la tolva ( $P_t$ ).* El valor de la presión friccional en la tolva  $P_t$ , está dado por la siguiente ecuación:

$$P_t = P_n * \mu_h \quad (86)$$

$$P_t = (73,42) \frac{kN}{m^2} * 0,43 = 31,57 \frac{kN}{m^2}$$

**4.3.4** *Cálculo de presión de descarga en la tolva ( $P_s$ ).* Para silos que trabajan con patrón de flujo másico se define una presión fija, denominada Kick Load =  $P_s$  (Carga de golpe repentino), la cual se aplica en la tolva, alrededor de todo su perímetro.

La distancia a la que actúa es igual a:  $0,2d_c = 0,6$  m desde la transición hacia abajo, siguiendo la inclinación de la pared de la tolva.

$$P_s = 2 K * P_{vft} \quad (87)$$

$$P_s = 2 * 0,45 * (49,36) \frac{kN}{m^2} = 44,42 \frac{kN}{m^2}$$

**4.3.5** *Cálculo de cargas adicionales.* Para aplicar los casos de carga adicional, se realiza una revisión sobre las condiciones de funcionamiento del silo, que pueden provocar cargas adicionales, entonces:

- *Excentricidades.* El llenado neumático y boca de salida concéntrica, favorecen a un estado de carga y descarga concéntrica. Además, para silos de clasificación ACC1, las cargas por excentricidad pueden ser omitidas (EN 1991-4, 2006).
- *Presión por diferencial térmico.* Al ser un silo transportable, es innegable que en ciertas ocasiones el silo trabajará totalmente expuesto a la intemperie. Esto lo ubica en el caso (a) de la sección 3.3.5.3 mencionado en el capítulo anterior.
- *Presión de aire entrante.* El aire arrastrado con el cemento debido al método de llenado neumático puede generar presiones adicionales. Se debe contar con ésta posibilidad, a menos que el diseñador garantice la no ocurrencia de ello.

Habiendo analizado estos 3 factores que incitan sobrepresiones, se procede al cálculo de las presiones que tienen tendencia a surgir durante la vida útil del silo.

**4.3.5.1** *Cálculo de carga en silos fluidizados ( $P_{(h-f)}$ ).* Para determinar esta presión, se debe calcular el peso a granel fluidizado con la ec. (26).

$$\gamma_1 = 0,8 \gamma$$

$$\gamma_1 = 0,8 \left( 16 \frac{kN}{m^2} \right) = 12,8 \frac{kN}{m^2}$$

Por lo tanto, con la ec. (25) se obtiene la carga de silos con presión de aire o fluidizados.

$$P_{h-f} = \gamma_1 * Z$$

$$P_{h-f} = 12,8 \frac{kN}{m^2} * 3,72 m = 47,617 \frac{kN}{m^2}$$

**4.3.5.2** *Cálculo de presiones por diferencial térmico.* Para caídas de temperatura ambiental de 10 °C, se considera un incremento de 10% de la presión estática (ASAE, 1998). Esto se tomará en cuenta para el cálculo de espesores.

#### **4.4 Cálculo del espesor de las paredes del silo**

Se utiliza la norma ASME Sección VIII div. 1 para el cálculo de los espesores, pues se obtienen valores más conservadores que el método simplificado. En base a la calidad de la soldadura, se establece un valor de eficiencia de soldadura de: E=0,85 para examinación por puntos, como indica el anexo E.

El criterio antes mencionado, considera además que: según la tabla (3), el cemento es un sólido pulverulento que no es propenso de explosión en estado de confinamiento. El silo es una estructura que en situación de falla no representa alto riesgo para la integridad de los operarios e instalaciones adyacentes, y además que un valor de eficiencia mayor requiere de mayor rigurosidad de examinación en los cordones de soldadura, que elevan el costo de construcción del silo para almacenamiento de cemento.

**4.4.1** *Cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico.* El espesor de la pared del silo se calcula con la magnitud de la presión horizontal máxima, entre la de llenado y vaciado. A esta se suma las cargas adicionales calculadas.

$$P_{h\text{ máx}} = \text{máx}(P_{hf}; P_{he})$$

$$P_{h\text{ máx}} = 20390 \text{ N/m}^2$$

Presión por diferencial térmico  $P_{dt}$ .

$$P_{dt} = P_{h\text{ máx}} * 10\% = 2039 \text{ N/m}^2$$

Entonces, La presión  $P$  para el cálculo del espesor de silos no fluidizados es:

$$P = (20390 + 2390) \text{ N/m}^2 = 22780 \text{ N/m}^2$$

**4.4.1.1** *Cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico.* Si existe arrastre de aire, la norma recomienda el análisis de los espesores para:

- Silos fluidizados,
- Silos no fluidizados.

Por lo tanto, de la ecuación (33):

$$t_{\text{mín}} = \frac{P * R}{SE - 0,6P}$$

Donde:

$P$  = es la presión de cálculo, [N/m<sup>2</sup>]

$E$  = 0,85 (eficiencia de soldadura)

$R$  = es el radio interno del cuerpo cilíndrico, [m]

$S$  = 138x10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup> (esfuerzo admisible).

El espesor mínimo para silo no fluidizado es:

$$t_{\text{mín-nf}} = \frac{(22780) N/m^2 \cdot (1,5)m}{(138 \times 10^6) N/m^2 (0,85) - 0,6 \cdot (22780) N/m^2}$$

$$t_{\text{mín-nf}} = 2,91 \times 10^{-4} m = 0,29 mm$$

El espesor mínimo para silo fluidizado es:

$$t_{\text{mín-f}} = \frac{(47617) N/m^2 \cdot (1,5)m}{(138 \times 10^6) N/m^2 (0,85) - 0,6 \cdot (47617) N/m^2}$$

$$t_{\text{mín-f}} = 6,11 \times 10^{-4} m = 0,61 mm$$

El espesor efectivo del cuerpo será la suma de: el espesor mínimo admisible, y el sobre espesor por abrasión y por corrosión.

$$t_c = t_{\text{mín}} + \Delta_t + CA \quad (88)$$

Entonces:

$$t_c = (0,61 + 2 * 1,58)mm = 4,33 mm$$

La norma API 650 (5.6.1.1) recomienda que el espesor del cuerpo de un contenedor de  $D < 15m$ , debe tener un espesor mínimo de 5 mm. Tomando esta consideración como referencia y, ya que de hecho el espesor calculado proviene únicamente de la presión interna, es decir, no considera el peso propio, accesorios y otros elementos del silo, seleccionamos el espesor comercial inmediato, entonces.

$$t_c = 6,35 mm$$

**4.4.2** *Cálculo del espesor de la tolva cónica.* El cálculo del espesor de la tolva se realiza con la presión resultante que actúa en dirección perpendicular a la pared de la tolva. En la zona de transición se ubica la zona crítica de la misma, la presión resultante es la suma de: La presión normal, la carga de golpe repentino y la presión por diferencial de temperatura, así:

$$P = P_n + P_s + P_{dt} \quad (89)$$

$$P = 73,42 \frac{kN}{m^3} + 44,42 \frac{kN}{m^2} + 2,809 \frac{kN}{m^2} = 120,649 \frac{kN}{m^2}$$

Con la ec. (34):

$$t_{\min} = \frac{P * D}{2 \cos \beta (SE - 0,6P)}$$

Donde:

P = presión de cálculo en [N/m<sup>2</sup>],

D = diámetro interno del cuerpo [D=3 m],

B = el ángulo de inclinación de la pared de la tolva, respecto a la vertical ( $\beta=30^\circ$ ),

E = eficiencia de soldadura [E=0,85],

S = esfuerzo admisible.

$$t_{\min} = \frac{(120649) \frac{N}{m^2} * (3) m}{2 \cos 30^\circ ((138 \times 10^6) \frac{N}{m^2} * (0,85) - 0,6(120649) \frac{N}{m^2})}$$

$$t_{\min} = 1,80 \times 10^{-3} m = 1,80 mm$$

El espesor de la tolva será la suma de: el espesor mínimo admisible, el espesor por abrasión y el espesor por corrosión, como indica la ec. (88).

$$t_t = (1,80 + 2 + 1,58) mm = 5,38 mm$$

Se toma el valor comercial inmediato más aproximado al espesor calculado, por lo tanto se selecciona una lámina de espesor:

$$t = 6,35 mm$$

**4.4.3** *Cálculo del espesor del techo cónico.* La presión para el cálculo del techo es la correspondiente a la suma de la presión de silos fluidizados, pues la única presión interna que actúa es la del aire arrastrado con el cemento, entonces:



$$P = P_{h-f} + P_{dt} \quad (90)$$

$$P = 47617 \text{ N/m}^2$$

Con la ecuación (35):

$$t_{\min} = \frac{P * D}{2 \cos \beta (SE - 0,6P)}$$

Donde:

P = presión de cálculo en [N/m<sup>2</sup>],

D = diámetro interno del cuerpo [D=3 m],

$\beta$  = ángulo de inclinación de la pared de la tolva, respecto a la vertical ( $\beta=30^\circ$ ),

E = eficiencia de soldadura [E=0,85],

S = esfuerzo admisible [S=138 x 10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup>].

Por lo tanto, el espesor de la cabeza cónica es:

$$t_{\min} = \frac{(47617) \frac{N}{m^2} * (3) m}{2 \cos(4,76^\circ) * ((138 \times 10^6) \frac{N}{m^2} * (0,85) - 0,6(49656) \frac{N}{m^2})}$$

$$t_{\min-c} = 6,37 \times 10^{-4} m = 0,61 mm$$

El espesor efectivo de la cabeza cónica será la suma de: el espesor mínimo admisible, el espesor por abrasión y el espesor por corrosión.

$$t_c = t_{\min-c} + \Delta_t + CA$$

$$t_e = (0,61 + 1,58 + 2) mm = 4,33 mm$$

La norma API 650, recomienda que el espesor nominal del techo no debe ser menor de 5mm. Tomando dicho valor como referencia, seleccionamos un espesor de lámina comercial inmediatamente próxima al valor calculado, entonces:

$$t_c = 6,35 \text{ mm}$$

**4.4.4** *Cálculo de la resistencia al pandeo por efecto de la fuerzas de rozamiento e influencia de la presión horizontal.* Existen periodos infinitesimales de tiempo en los que toda la masa de material almacenado se encuentra apoyado sobre la pared del silo, o a su vez, el peso del material deslizándose hacia abajo ejerce presiones que generan fuerzas de rozamiento sobre la pared del silo, estas fuerzas inducen pandeo, fenómeno que al igual que una presión de vacío trata de deformar la pared del silo hacía adentro, en tanto que las presiones horizontales tienden a contrarrestar dicho efecto. La resistencia al pandeo de las paredes verticales debido a la acción de la presión de rozamiento y su contra efecto por la presión horizontal, se calcula por medio de las siguientes ecuaciones (RAVENET, 1992).

La resistencia al pandeo se evalúa con el espesor de lámina en condiciones límite, es decir: el espesor ( $t = 6,35 \text{ mm}$ ), menos el sobre espesor por corrosión y abrasión.

$$t = (6,35 - 2 - 1,58) \text{ mm} = 2,77 \text{ mm}$$

La fuerza de rozamiento total  $F_{rt}$ , sobre las paredes verticales se calcula con la ec. (91).

$$F_{rt} = \frac{\pi * d_c^2 * \gamma * Z}{4} \quad (91)$$

La carga crítica o presión crítica de pandeo  $P_{cr}$ , se determina mediante la ec. (90), y el El valor de  $S_{cr} = f(r/t; \bar{P})$ , se obtiene del diagrama del anexo B.

$$P_{cr} = 2\pi * E * t^2 * S_{cr} \quad (92)$$

La variable de la ec. (91) relaciona la carga, geometría y el módulo de elasticidad.

$$\bar{P} = \frac{P_h \left(\frac{r}{t}\right)^2}{E_w} \quad (93)$$

El factor de seguridad de la resistencia de las paredes verticales al pandeo por efecto de las fuerzas de rozamiento e influencia de la presión horizontal actuando como un elemento estructural rigidizante, se calcula con la ecuación. (94).

$$C = \frac{P_{cr}}{F_{rt}} \quad (94)$$

Donde:

$P_h$  = presión horizontal mínima,

$E_w$  = módulo elástico del acero,

$r$  = radio del silo en metros

$t$  = espesor de la lámina en condiciones límite,

$Z$  = profundidad a la que se evalúa,

$\gamma$  = peso unitario del cemento a granel

$d_c$  = diámetro del silo.

La razón  $r/t$  es el coeficiente que relaciona el radio del silo con el espesor a una profundidad  $Z$ , (éste valor es el mismo para cuerpos de espesor de pared constante y varía para cuerpos formados por virolas o anillos de distinto espesor).

$$\frac{r}{t} = \frac{1,5}{0,00277} = 541,51 \approx 540$$

Por lo tanto, para una profundidad de  $Z = 3,72$  m, utilizando la ec. (91):

$$F_{rt} = \frac{\pi * (3m)^2 * (16) \frac{kN}{m^3} * (3,72)m}{4} = 420,72 \text{ kN}$$

Mediante la ec. (93)

$$\bar{P} = \frac{19,69 \frac{kN}{m^2} \left( \frac{1,5}{0,00277} \right)^2}{(210 \times 10^6) \frac{kN}{m^2}} = 0,027$$

Del anexo B, se tiene que:

$$S_{cr} = f\left(\frac{r}{t}; \bar{P}\right) = f(540; 0,027) = 0,30$$

Mediante la ec. (92) se obtiene la presión crítica de pandeo

$$P_{crít} = 2\pi * (210 \times 10^6) \frac{kN}{m^2} * (0,00277)^2 m^2 * 0,30 = 3037,25 \frac{kN}{m^2}$$

El coeficiente de seguridad, utilizando la ec. (92) es:

$$C = \frac{3037,25 \frac{kN}{m^2}}{420,72 \frac{kN}{m^2}} = 7,22$$

Con el mismo procedimiento, se obtiene el coeficiente de seguridad de la resistencia al pandeo de las paredes verticales a diferente profundidad, como muestra la tabla (25).

Tabla 25. Resistencia al pandeo, e influencia de la presión horizontal.

t (m)	Z (m)	Ph mín(KN/m2)	Fr <sub>t</sub> (KN)	r/t	P̄	Scr	Pcr	C
0,00277	0,72	5,89	81,430	541,52	0,008	0,26	2632,28	<b>32,33</b>
0,00277	1,72	13,32	194,527	541,52	0,019	0,27	2733,52	<b>14,05</b>
0,00277	2,72	17,23	307,625	541,52	0,024	0,28	2834,76	<b>9,22</b>
0,00277	3,72	19,69	420,722	541,52	0,027	0,30	3037,25	<b>7,22</b>

Fuente: Autor

**4.4.5** *Cálculo de la resistencia al pandeo del cuerpo cilíndrico según el Eurocódigo.* El cálculo de la carga crítica de pandeo meridional se puede realizar utilizando la norma ENV 1993-1-6 Anexo D, o ENV 1993-4-1 Anexo A 3.2.2, el primero muestra un proceso en el que se toma en cuenta variables como la imperfección del material y la calidad de la construcción del silo para el cálculo de la resistencia al pandeo, en tanto que el segundo que se ha mencionado, indica reglas simplificadas para el cálculo de silos circulares que se encuentran dentro de la categoría ACC1.

**4.4.5.1** *Cálculo del esfuerzo crítico meridional (Compresión axial).* Se utilizará la norma ENV 1993-4-1 Anexo A, como un método de análisis simplificado que permite la norma para silos dentro de la clasificación ACC1. El esfuerzo crítico de pandeo elástico meridional de diseño se obtiene de la ec. (93).

$$\sigma_{\chi_{Rcr}} = 0,605 * E * \frac{t}{r} \quad (95)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad del acero,

t = espesor de la lámina del cuerpo cilíndrico,

r = radio del cuerpo cilíndrico.

El Eurocódigo permite corregir el esfuerzo crítico de pandeo elástico meridional, por medio del cálculo del factor de corrección de imperfección elástica  $\alpha$ , con la ec. (96).

$$\alpha = \frac{0,062}{1+0,035*\left(\frac{r}{t}\right)^{0,72}} \quad (96)$$

Por lo tanto, la resistencia de pandeo meridional característica del acero es:

$$\sigma_{x,Rk} = X_x * f_y \quad (97)$$

Donde:

$X_x$  = factor de de reducción del pandeo meridional,

$f_y = 262000 \text{ kN/m}^2$  (límite elástico).

En donde el factor de esbeltez relativa meridional ( $X_x$ ) está en función de la esbeltez relativa meridional de la membrana, la cual se calcula mediante la ec. (96).

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} \quad (98)$$

El valor de  $X_x$  puede tomar valores, de acuerdo a las siguientes posibilidades:

$$X_x = 1; \quad \text{cuando: } \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0 \quad (99)$$

$$X_x = 1 - 0,6 \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right); \quad \text{cuando: } \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_p \quad (100)$$

$$X_x = \frac{\alpha}{(\bar{\lambda}_x)^2}; \quad \text{cuando: } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x \quad (101)$$

Donde:

$$\bar{\lambda}_0 = 0,2 \quad (102)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{2,5 \alpha} \quad (103)$$

La resistencia de pandeo meridional de diseño, se calcula mediante la ec. (102):

$$\sigma_{X_{Rd}} = \frac{\sigma_{X_{Rk}}}{\gamma_{M1}} \quad (104)$$

El valor del factor parcial de resistencia a estabilidad  $\gamma_{M1} = 1,1$  (EN 1993-4-1, 2007).

Por lo tanto, en cada punto de análisis de la estructura del cuerpo cilíndrico debe cumplirse la siguiente condición.

$$\sigma_{X_{calc}} = \frac{N_{z_{sk}}}{t} \leq \sigma_{X_{Rd}} \quad (105)$$

La fuerza vertical compresiva por unidad de perímetro ( $N_{z_{sk}}$ ) se obtiene de la ec. (106) utilizando los resultados de la sección 4.3.3.1. Cuyos resultados de la variación de esta carga con la altura, se resume en la tabla (26).

$$N_{z_{sk}} = C_w * \mu * P_{ho} * (Z - Z_V) \quad (106)$$

Tabla 26. Variación de la fuerza vertical compresiva con la profundidad Z

<b>Z (m)</b>	0,27	0,37	0,74	1,12	1,49	1,72	2,23	2,60	2,72	3,35	3,72
<b>Nzsk (kN/m)</b>	4E-0,5	0,03	0,56	1,70	3,28	4,45	7,49	10,02	10,89	15,81	18,94

Fuente: Autor

El análisis no debe realizarse en puntos adyacentes a los límites del cuerpo, sino a partir de la zona límite  $l_R = 0,1L$  (ENV.1993-1-6, 2006).

Por lo tanto, el esfuerzo crítico de pandeo elástico meridional es:

$$\sigma_{X_{RCR}} = 0,605 * (210 \times 10^6) \frac{kN}{m^2} * (1) * \frac{(0,002770)m}{(1,5)m} = 234619 \frac{kN}{m^2}$$

Mediante la ec. (96) se calcula el factor de corrección de imperfección elástica  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{0,062}{1 + 0,035 * \left(\frac{1,5}{0,00277}\right)^{0,72}} = 0,145$$

Con la ec. (98) se calcula la esbeltez relativa meridional de la membrana.

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{(262\,000) \text{ kN/m}^2}{(234\,619) \text{ kN/m}^2}} = 1,056$$

Mediante la ec. (103)

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{2,5 * 0,145} = 0,602$$

Mediante la comparación de los resultados, se aplica la ecuación (101).

$$\bar{\lambda}_p < \bar{\lambda}_x; \quad \text{entonces:} \quad X_x = \frac{0,145}{(1,056)^2}$$

$$X_x = 0,13$$

Mediante la ec. (97) se obtiene la resistencia de pandeo meridional.

$$\sigma_{X,Rk} = 0,13 * (262\,000) \text{ kN/m}^2 = 34\,060,00 \text{ kN/m}^2$$

La resistencia de pandeo meridional de diseño, mediante la ec. (102) es:

$$\sigma_{X,Rd} = \frac{(34\,060,00) \text{ kN/m}^2}{1,1} = 30\,963,64 \text{ kN/m}^2$$

A una profundidad:  $Z = (3,72) \text{ m} - 0,1 * (4,65) \text{ m} = 3,35 \text{ m}$ ;  $N_{Z_{sk}} = 15,81 \text{ kN/m}$ :

$$C = \frac{t * \sigma_{X,Rd}}{N_{Z_{sk}}} = \frac{(0,002\,770) \text{ m} (30\,963,64) \text{ kN/m}^2}{15,81 \text{ kN/m}} = 5,42$$

Con el fin de realizar una comparación con el método anterior, utilizado para la determinación de la resistencia al pandeo, se analiza para:  $Z = 2,72 \text{ m}$  y  $Z = 1,72 \text{ m}$ .

Para:  $Z = 2,72$  m;  $N_{Z_{sk}} = 10,89$  kN/m

$$C = \frac{t * \sigma_{X_{Rd}}}{N_{Z_{sk}}}$$

$$C = \frac{t * \sigma_{X_{Rd}}}{N_{Z_{sk}}} = \frac{(0,002\ 770)m (30\ 963,64) \text{ kN/m}^2}{10,89 \text{ kN/m}}$$

$$C = 7,87$$

Para:  $Z = 1,72$  m;  $N_{Z_{sk}} = 4,45$  kN/m

$$C = \frac{t * \sigma_{X_{Rd}}}{N_{Z_{sk}}} = \frac{(0,00\ 277)m (30\ 963,64) \text{ kN/m}^2}{4,45 \text{ kN/m}} = 19,27$$

Como se puede notar, el factor de seguridad de la resistencia al pandeo es mucho mayor cuando se toma en cuenta el efecto de la presión horizontal actuando como rigidizador de la pared vertical (RAVENET, 1992). En tanto que, según el método del Eurocódigo el coeficiente es menor, porque no toma en cuenta el efecto de la presión horizontal presente en el silo.

Debe notarse, que los altos valores de seguridad obtenidos, solamente corresponden a un análisis de presiones internas en estado estático, y lo que se busca es en primera instancia es un análisis preliminar para determinar la ocurrencia de falla por pandeo.

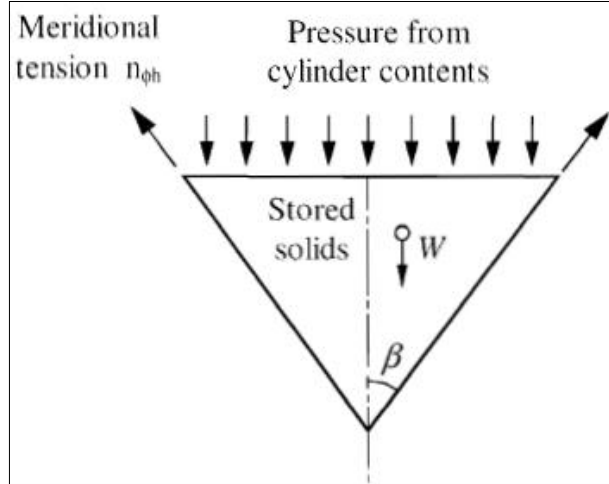
**4.4.6** *Cálculo del factor de seguridad en la tolva.* El Eurocódigo (EN 1993-4-1, 2007) Anexo A.3.3 presenta reglas simplificadas para la evaluación de tolvas de silos dentro de la clasificación ACC1, adicionalmente, en el Anexo B se presentan expresiones para el cálculo de los esfuerzos de membrana.

Como se verá a continuación, el esfuerzo meridional ( $\sigma_\phi$ ) será relevante en la evaluación de la resistencia del diseño de la tolva, según lo dispone la sección mencionada del Eurocódigo. La zona crítica a evaluar, está en la transición tolva - cuerpo cilíndrico.

En la figura (38) se observa el equilibrio global de la tolva en un cuerpo cilíndrico.



Figura 38. Equilibrio global en la tolva.



Fuente: Eurocódigo ENV 1993-1-6-2007

El esfuerzo meridional y circunferencial se obtiene de la ec. (107) y (108) respectivamente.

$$\sigma_{\varphi} = \left\{ 3p_1 + \frac{2z}{h} (p_2 - p_1) \right\} \frac{z}{6t} \left( \frac{tg\beta + \mu}{\cos\beta} \right) + \frac{p_s * r}{2t} \quad (107)$$

$$\sigma_{\theta} = \left\{ p_1 + \frac{z}{h} (p_2 - p_1) \right\} \frac{z}{t} \left( \frac{tg\beta}{\cos\beta} \right) + \frac{p_s * r}{t} \quad (108)$$

Donde:

$P_1, P_2$  = son las presiones calculadas sobre la tolva [sección 4.3.2],

$P_s$  = carga de golpe repentino [sección 4.3.4],

$Z$  = eje coordenado que parte del ápice de la tolva y sigue la dirección inclinada de la misma (el punto de análisis se ubica en la parte superior de la tolva [ $z=3m$ ],

$h$  = altura vertical de la tolva, desde el ápice hasta la transición [ $h=2.6 m$ ],

$\beta$  = ángulo medio al ápice del cono [ángulo de inclinación de la tolva  $\beta=30^\circ$ ].

Por lo tanto, mediante la ec. (107) el esfuerzo meridional es:

$$\sigma_{\varphi} = \left\{ 3(40,82) \frac{kN}{m^2} + \frac{2(3)m}{(2,6)m} (73,42 - 40,82) \frac{kN}{m^2} \right\} \frac{(3)m}{6(0,00191)m} \left( \frac{tg30 + 0,43}{\cos30} \right) + \frac{(44,42) \frac{kN}{m^2} (1,5)m}{2(0,00191)m}$$

$$\sigma_{\varphi} = 77\,639,14 \frac{kN}{m^2}$$

Mediante la ec. (108) el esfuerzo circunferencial es:

$$\sigma_{\theta} = \left\{ (40,82) \frac{kN}{m^2} + \frac{(3)m}{(2,6)m} (73,42 - 40,82) \frac{kN}{m^2} \right\} \frac{(3)m}{(0,00191)m} \left( \frac{tg30}{\cos30} \right) + \frac{(40,82) \frac{kN}{m^2} (1,5)m}{(0,00191)m}$$

$$\sigma_{\theta} = 117\,016,11 \frac{kN}{m^2}$$

El valor del esfuerzo meridional de diseño  $\sigma_{\phi h,Ed}$  se calcula mediante la ec. (109).

$$\sigma_{\phi h,Ed} = g_{asim} * \sigma_{\phi} \quad (109)$$

Donde:

$g_{asim} = 1,2$  factor de incremento de esfuerzo por asimetrías, (EN 1993-4-1, 2007).

Por lo tanto, mediante la ec. (109):

$$\sigma_{\phi h,Ed} = 1,2 * (77\,639,14) \frac{kN}{m^2} = 93\,166,97 \frac{kN}{m^2}$$

El valor del esfuerzo meridional de diseño en la parte superior de la tolva ( $\sigma_{\phi h,Ed}$ ) debe satisfacer la siguiente condición:

$$\sigma_{\phi h,Ed} \leq \frac{k_r * S_u}{\gamma_{M2}} \quad (110)$$

Donde:

$K_r = 0,9$  factor recomendado por el Eurocódigo;

$\gamma_{M2} = 1,25$  es el factor de resistencia de falla a la ruptura (EN 1993-4-1, 2007).

Por lo tanto, se determina la resistencia de la lámina de la tolva mediante la ec. (110).

$$93166,97 \frac{kN}{m^2} \leq \frac{0,9 * (482000) \frac{kN}{m^2}}{1,25}$$

$$93166,97 \frac{kN}{m^2} \leq 347040 \frac{kN}{m^2}$$

$$C = 3,72$$

El coeficiente de seguridad de la tolva en la zona crítica para modo de falla a ruptura, que es en la transición de la geometría cónica a cilíndrica es de  $C = 3,72$ .

#### 4.5 Cálculo de la carga de viento

La fuerza del viento actuando sobre la estructura del silo, se calculará siguiendo el procedimiento indicado en la sección 3.4 de la metodología de diseño.

**4.5.1** *Determinación del valor básico de la velocidad del viento ( $V_{b0}$ ).* La norma NEC 2015, dispone que la velocidad de diseño para viento de estructuras de hasta 10 metros de altura no debe ser menor de: 21 m/s, o 75 km/h. Por lo tanto, se tomará la recomendación mencionada, puesto que la velocidad detallada en la tabla (4) no supera lo dispuesto por la norma, por lo tanto:

$$V_{b0} = 21 \text{ m/s}$$

**4.5.2** *Cálculo de la velocidad básica del viento ( $V_b$ ).* La velocidad básica del viento que propone el Eurocódigo, está en función de coeficientes basados en las estaciones del año y el factor direccional del viento, factores propios de países del continente europeo, así mismo, sin embargo, señala que mientras especificación alguna indique lo contrario, dichos coeficientes deben tomar el valor de 1.

$C_{dir}$  = Es el factor direccional (La norma recomienda el valor de 1);

$C_{temp}$  = Es el factor temporada (La norma recomienda el valor de 1).

Por lo tanto, mediante la ec. (36) se tiene:

$$V_b = 1 * 1 * V_{b0}$$

$$V_b = V_{b0} = 21 \text{ m/s}$$

**4.5.2.1** *Determinación de categoría del terreno.* Según la ilustración del anexo C, el terreno se clasifica dentro de la categoría II, y los valores correspondientes de (Z) que se obtienen de la tabla (11) son:

$$Z_0 = 0,05 \text{ m}; \quad \text{y} \quad Z_{\text{mín}} = 2 \text{ m}$$

Donde:

Z = 7,612 m, altura total del silo sobre el nivel del suelo,

Z<sub>0</sub> = es la longitud de la aspereza,

Z<sub>mín</sub> = es la mínima altura de aspereza,

Z<sub>max</sub> = 200 m (EN 1991-1-4, 2005).

**4.5.2.2** *Cálculo del factor de aspereza Cr(Z).* Para determinar el coeficiente de aspereza Cr, se debe comparar las longitudes de la aspereza determinadas anteriormente (Z<sub>0</sub> = 0,05 m; Z<sub>mín</sub> = 2 m; Z = 7,162 m) por lo tanto:

$$Z_0 < Z_{\text{mín}} < Z$$

Se cumple la condición: Z<sub>mín</sub> < Z, entonces se aplica la ec. (38)

$$C_r(Z) = K_r * \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$$

Previamente se calcula el factor K<sub>r</sub>, mediante la ec. (40).

$$K_r = 0,19 * \left(\frac{Z_0}{Z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

$$K_r = 0,19 * \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} = 0,19$$

Por lo tanto:

$$C_r(Z) = 0,19 * \ln\left(\frac{7,162}{0,05}\right) = 0,94$$

**4.5.3** *Cálculo de la velocidad media del viento  $V_m(Z)$ .* La velocidad media del viento se obtiene mediante la ec. (37).

$$V_m(Z) = C_r(Z) * C_o(Z) * V_b$$

Donde:

$C_o(Z)$ : es el factor orográfico igual a 1 (EN 1991-1-4, 2005), por lo tanto:

$$V_m(Z) = (0,94) * (1) * (21 \text{ m/s}) = 19,74 \text{ m/s}$$

**4.5.3.1** *Cálculo de la intensidad de turbulencia del viento ( $I_V(Z)$ ).* De los cálculos previos, se tiene que: ( $Z_{\text{mín}} < Z < Z_{\text{máx}}$ ), que cumple la condición de la ec. (41) para obtener la intensidad de turbulencia del viento.

$$I_V(Z) = \frac{\sigma_V}{V_m(Z)}$$

$$\text{si: } Z_{\text{mín}} \leq Z \leq Z_{\text{máx}}$$

Para determinar la desviación estándar  $\sigma_V$ , se utiliza la ec. (43), por lo tanto:

$$\sigma_V = K_r * V_b * K_I$$

Donde:

$K_I$ : Es el factor de turbulencia, igual a 1 por recomendación de (EN 1991-1-4, 2005).

$$\sigma_V = (0,19) * (21 \text{ m/s}) * (1) = 3,99 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, la intensidad de turbulencia del viento  $I_V(Z)$  es:

$$I_V(Z) = \frac{\sigma_V}{V_m(Z)}$$

$$I_V(Z) = \frac{3,99 \text{ m/s}}{19,74 \text{ m/s}} = 0,2$$

**4.5.4** *Cálculo de la presión de velocidad crítica ( $q_{p(z)}$ ).* Para determinar la presión de velocidad crítica se utiliza la ec. (44), con un valor de la densidad del aire, [ $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ] (NEC-SE-CG, 2015), por lo tanto:

$$q_p(Z) = [1 + 7 * I_V(Z)] * \frac{1}{2} * \rho * V_m^2(Z)$$

$$q_p(Z) = [1 + (7 * 0,2)] * \frac{1}{2} * (1,25 \text{ Kg/m}^3) * (19,74 \text{ m/s})^2$$

$$q_p(Z) = 584,50 \frac{N}{m^2}$$

**4.5.4.1** *Cálculo del coeficiente de fuerza ( $c_f$ ).* El coeficiente de fuerza para un cilindro circular finito se determina mediante la ec. (45).

$$c_f = c_{f,0} * \psi_\lambda$$

Para calcular el coeficiente de fuerza, primero es necesario determinar la velocidad pico del viento ( $V_{(ze)}$ ) mediante la ec. (48), entonces:

$$V_{(ze)} = \sqrt{\frac{2 * q_p(Z)}{\rho}}$$

$$V_{(ze)} = \sqrt{\frac{2 * (584,50) \frac{N}{m^2}}{(1,25) \text{ kg/m}^3}} = 30,58 \frac{m}{s}$$

El número de Reynolds, se determina a través de la ec. (49).

$$R_e = \frac{b * V_{(ze)}}{v}$$

Donde:

$b = 3,0127 \text{ m}$  (diámetro externo del silo),

$\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (viscosidad cinemática del aire).

Por lo tanto:

$$R_e = \frac{(3,0127) \text{ m} * (30,58) \text{ m/s}}{(15 \times 10^{-6}) \text{ m}^2/\text{s}} = 6,14 \times 10^6$$

Para ubicar el valor del factor ( $c_{f,0}$ ) de la figura (27), se determina el coeficiente ( $k/b$ ):

$$\frac{k}{b} = \frac{0,2 \text{ mm}}{3012,7 \text{ mm}} = 6 \times 10^{-5}$$

El factor ( $k$ ) de la rugosidad equivalente de la superficie del silo se obtiene de la tabla (12), cuyo valor seleccionado corresponde a la rugosidad equivalente del acero galvanizado, por ser el material que más se asemeja al acero de construcción del silo, según dicha tabla.

Del diagrama de la figura (27), se obtiene el valor mínimo para ( $k/b$ ), por lo tanto:

$$c_{f,0} = 0,4$$

**4.5.4.2** *Cálculo del factor del efecto final ( $\psi_s$ ).* Este valor se determina en función del radio de esbeltez, previo al cálculo del radio de solidez ( $\varphi$ ), mediante la ec. (51).

$$\varphi = \frac{A}{A_c}$$

Donde:

$A_c$  = Es toda la proyección de área de la estructura al viento, según la ec. (111).

$A$  = Es la suma del área los miembros estructurales (área tributaria), según la ec. (112).

$$A_c = b * l \tag{111}$$

$$A = l * b + \frac{h_t}{2} * (D_s + b) \tag{112}$$

Donde:

$b$  = diámetro externo del cilindro [ $b = 3,0127$  m],

$l$  = altura total de la estructura, de la base de la columna a la cabeza [ $l = 7,162$  m],

$H_T$  = longitud del cilindro [ $H_T = 4,65$  m],

$h_t$  = altura de la tolva desde la boca de salida hasta la transición [ $h_t = 2,06$  m],

$D_s$  = diámetro de salida de la tolva [ $D_s = 0,62$  m].

Mediante la ec. (111) se tiene:

$$A_c = (3,0127)m * (7,162)m = 21,58 m^2$$

Mediante la ec. (112) el área tributaria es:

$$A = (4,65) m * (3,0127) m + \frac{(2,06) m}{2} * (0,62 m + 3,0127 m) = 17,75 m^2$$

Por lo tanto, el factor del efecto final  $\varphi$  es:

$$\varphi = \frac{17,75}{21,58} = 0,82$$

**4.5.4.3** *Cálculo de la esbeltez efectiva ( $\lambda$ )*. Este valor se obtiene de la figura (29), para cilindros circulares bajo la condición de estructuras menores a 15 m, entonces:

$$\lambda = l/b; \quad o \quad \lambda = 70 \quad (\text{Cualquiera que sea menor})$$

Donde:

$l$  = longitud medida desde la base de la columna hasta la cabeza del silo, entonces:

$$\lambda = (7,162) m / (3,0127) m = 2,37$$

Para determinar el valor de  $\psi_{\lambda=f}(\varphi; \lambda)$ , se interseca las variables encontradas en el diagrama de la figura (28) y se obtiene:



$$\psi_\lambda = 0,86$$

Por lo tanto, el coeficiente de fuerza ( $c_f$ ) es:

$$c_f = 0,4 * 0,87 = 0,348$$

**4.5.5** *Cálculo de la fuerza del viento sobre la estructura ( $F_w$ ).* La fuerza del viento actuando sobre la estructura se calcula mediante la ec. (52).

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z) * A_{trib}$$

Por lo tanto:

$$F_w = 1 * (0,348) * (584,50) N/m^2 * (17,75)m^2$$

$$F_w = 3610,46 N$$

## **4.6 Cálculo de la carga de sismo**

La aceleración en proporción de la aceleración de la gravedad para la locación del silo en la provincia de Sucumbíos es de  $z = 0,30 g$ ; valor tomado de la figura (30).

**4.6.1** *Determinación del tipo de perfil de suelo para diseño sísmico.* La información del tipo del suelo debe ser proporcionada por el contratante de la fabricación, o a su vez, debe realizarse un estudio del suelo en el lugar donde se fundará la estructura. En este caso, dicho estudio está fuera del alcance del presente trabajo. Por lo que se toma como referencia una locación de la provincia de Sucumbíos del cantón Lago agrío, en los bloques administrativos de Petroproducción que presenta un perfil de suelo tipo C, de los estudios de suelo realizados en la zona (Quituisaca, A, 2009).

**4.6.2** *Determinación de los coeficientes del perfil de suelo.* Conocido el tipo de suelo y el factor ( $z$ ), de las tablas correspondientes se obtienen los siguientes valores:

$$F_a = 1,25 \quad \text{Tabla (15)}$$

$$F_d = 1,19 \quad \text{Tabla (16)}$$

$$F_s = 1,02 \quad \text{Tabla (17)}$$

**4.6.3** *Determinación del factor de importancia por sismo (I).* De la tabla (18), se da al silo la categoría de “*Otras construcciones*”, bajo el criterio que, el cemento es un material no susceptible a explosiones, y la ocurrencia de un fallo en su estructura no es capaz de comprometer en gran medida la integridad humana, por lo tanto:

El factor de importancia es:  $I = 1,0$

**4.6.4** *Determinación de factor de reducción de fuerzas sísmicas (R).* De la tabla (19), se ubica al silo dentro de la primera categoría, correspondiente a: Reservorios y tanques elevados soportados mediante columnas, por lo tanto:

$$R = 2$$

**4.6.5** *Determinación de la regularidad y configuración estructural.* Las especificaciones de irregularidad y configuración estructural están dadas principalmente para edificaciones que cumplan con alguna de las condiciones mostradas en las ilustraciones mostradas en el anexo D, por lo que se considera que: Cuando una estructura no contempla ninguna de las irregularidades que se han mencionado, se debe tomar a la estructura como: *Regular en planta y elevación* (NEC-SE-DS, 2015).

$$\phi_P = \phi_E = 1$$

Nota: En este caso se puede usar el “*Diseño Basado en Fuerzas*”, método 1 estático descrito en la sección 6 de la norma (NEC-SE-DS, 2015).

**4.6.6** *Cálculo del período límite de vibración elástico ( $T_c$ ).* El período límite de vibración en el espectro sísmico elástico se obtiene de la ec. (53).

$$T_c = 0,55F_s * \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_c = 0,55(1,02) * \frac{(1,19)}{(1,25)} = 0,53$$

**4.6.7** *Cálculo del período de vibración ( $T_a$ ).* Para el caso de columnas no arriostradas que muestra la tabla del anexo D, se obtiene el valor de los factores:  $C_t = 0,072$  y  $\alpha = 0,80$ . Ingresando estos en la ec. (56) se obtiene el período de vibración.

$$T_a = C_t * h_n^\alpha$$

$$T_a = (0,072) * (7,162)^{0,8} = 0,35 \text{ s}$$

Donde:

$h_n$  = altura máxima de la estructura, medida desde la base [ $h_n = 7,162 \text{ m}$ ];

**4.6.8** *Cálculo del espectro elástico de diseño en aceleraciones ( $S_a$ ).* De los resultados obtenidos: ( $0 \leq 0,35 \leq 0,53$ ), se cumple con la condición:  $0 \leq T_a \leq T_c$ , de la ec. (57), por lo tanto, el espectro elástico de diseño en aceleraciones es:

$$S_a = \eta * Z * F_a$$

$$S_a = 2,6 * 0,3 * 1,25 = 0,975$$

Donde:

$\eta = 2,6$  (para la región amazónica),

$z$  = factor de zona sísmica.

**4.6.9** *Cálculo de la cortante basal de diseño.* La carga de la cortante basal para estructuras diferentes a edificaciones, se obtiene de la ec. (57), por lo tanto:

$$V = \frac{\eta * z * F_a * I}{R} W$$

$$V = \frac{(2,6)(0,3)(1,25)(1)}{2} W = 0,4875W$$

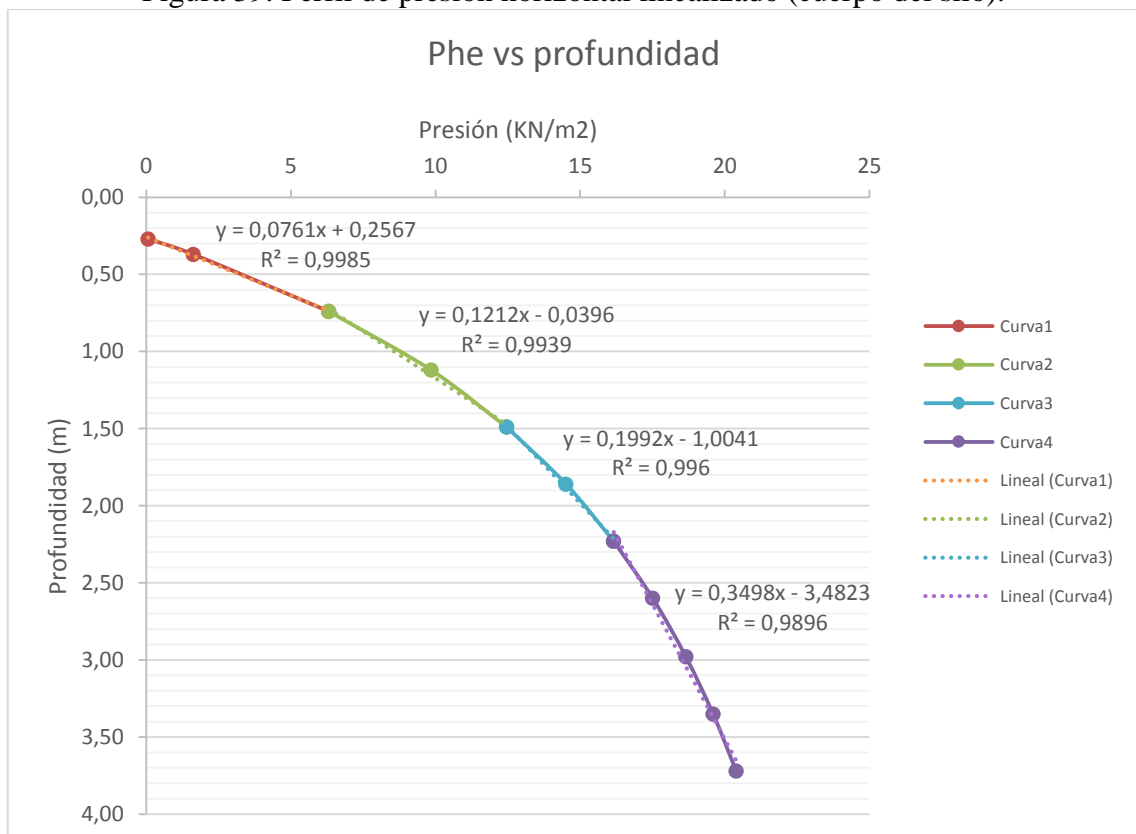
## 4.7 Cálculo de la estructura soporte

El cálculo de la estructura de soporte del silo, se realiza con ayuda del software SAP2000, en el que se ingresan las cargas de presión interna, carga muerta, carga viva, cargas de viento y de sismo previamente calculadas, con el objeto de obtener el estado de máximo de carga al que estará sometida, mediante un análisis bajo el método LRFD.

El silo estará soportado por cuatro columnas no arriostradas, angularmente equidistantes, como se puede observar en la figura (49).

**4.7.1 Cálculo de las columnas.** Para ingresar los datos de la presión horizontal en SAP2000, se procede a linealizar la curva del perfil de presiones por el método de regresión lineal simple, pues el software solo admite perfiles de carga lineal, entonces se fraccionó en 4 partes, obteniendo la tendencia lineal mostrada en la figura (39).

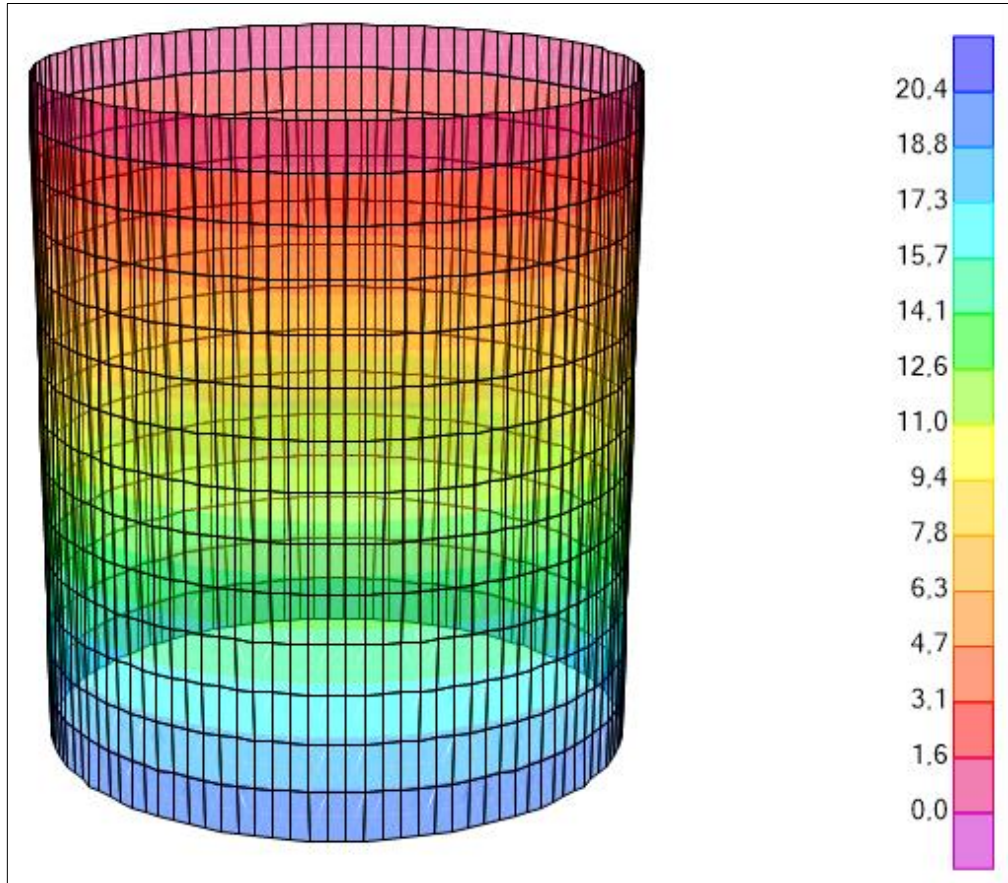
Figura 39. Perfil de presión horizontal linealizado (cuerpo del silo).



Fuente: Autor

El perfil de presiones horizontales aplicado al cuerpo cilíndrico, que se ingresa al software SAP2000, se muestra en la figura (40).

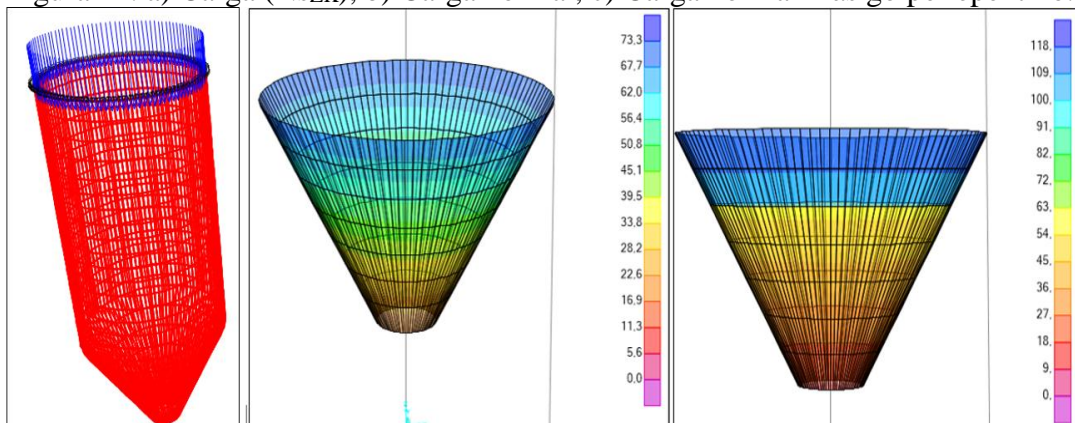
Figura 40. Presión horizontal en el cuerpo cilíndrico del silo.



Fuente: Autor

De la misma manera, se aplica la carga compresiva por unidad de perímetro ( $N_{SZK}$ ), normal y de golpe repentino actuando en la tolva, como se muestra en la figura (37).

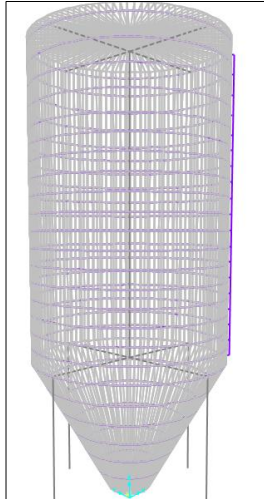
Figura 41. a) Carga ( $N_{SZK}$ ), b) Carga normal, c) Carga normal más golpe repentino.



Fuente: Autor

Ensamblada la geometría del silo, se procede a introducir la carga de viento. Al tener una forma simétrica, se puede hacer análisis en una sola dirección.

Figura 42. Presión del viento.

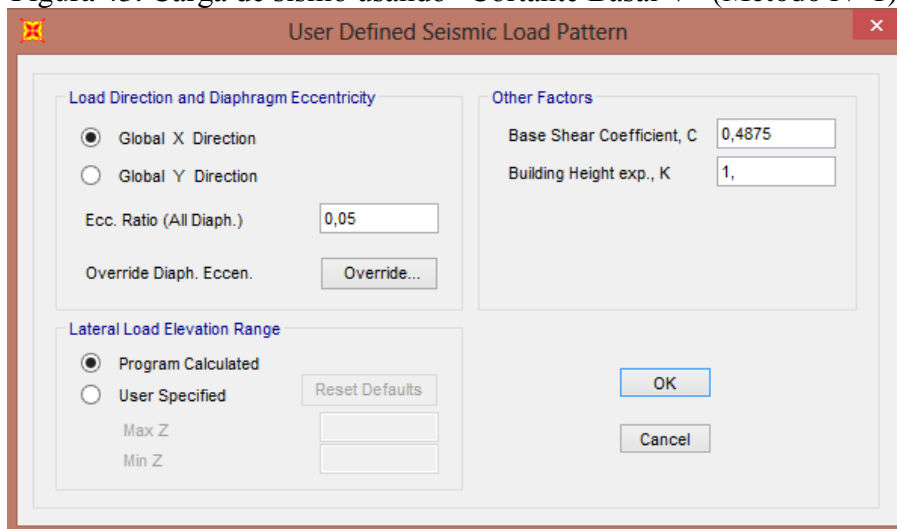


Fuente: Autor

La carga de viento calculada se ingresa, por medio de un elemento estructural auxiliar como se ve en la figura anterior, se aplica en un nodo ubicado en el centro de gravedad del silo. Específicamente el programa no admite el cálculo directo con la norma europea EN 1991 4-2005 puesto que se presenta un error que puede deberse a la necesidad de la actualización del software.

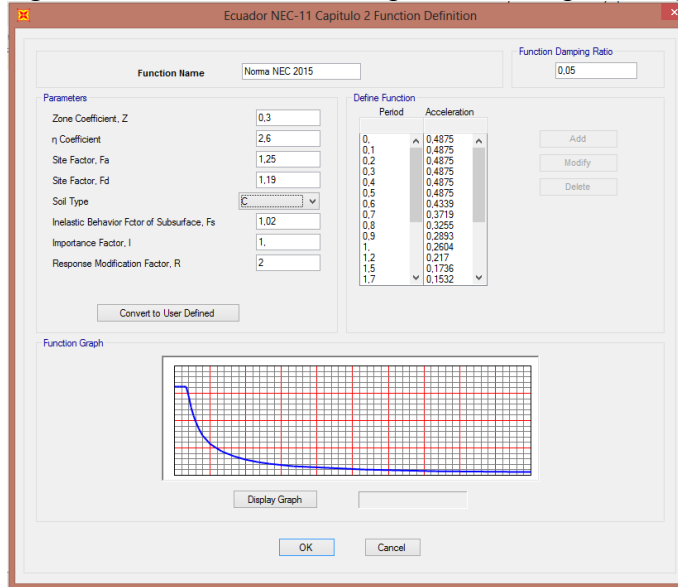
El análisis de la carga sísmica se puede realizar por medio de la cortante basal calculada, o a través de un segundo método denominado espectro de respuesta sísmica el cuál hace uso de los coeficientes de diseño sísmico que provee la norma NEC, tal como se indica en la siguiente figura.

Figura 43. Carga de sismo usando “Cortante Basal V” (Método N° 1).



Fuente: Autor

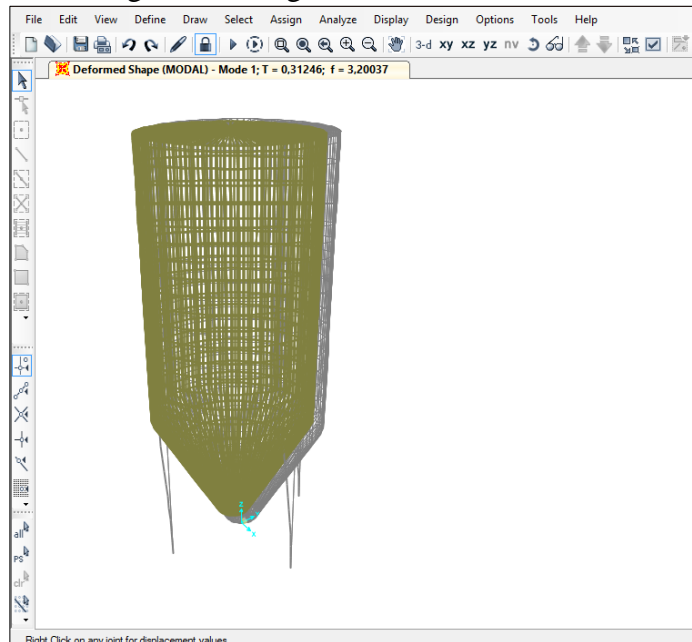
Figura 44. Carga de sismo mediante el “Espectro de Respuesta” (Método N°2).



Fuente: Autor

El segundo método mencionado permite realizar una comparación entre el cálculo obtenido mediante la cortante basal de diseño y el espectro de respuesta ante la sollicitación sísmica de la estructura, además permite confirmar que los resultados obtenidos mediante el cálculo teórico guarda relación con el método de cálculo desarrollado por el software SAP2000.

Figura 45. Carga de sismo sobre el silo.



Fuente: Autor

La magnitud de la carga viva y muerta que se aplica sobre el modelo es:

**Carga viva.** Se aplicará la carga viva distribuida en el techo del silo: Todas las superficies de techo sujetas a trabajos de mantenimiento =  $20 \text{ kN/m}^2$  (ASCE 7, 2010).

Carga muerta:

- Peso del filtro de mangas: 130 kg
- Tubo:  $2,86 \times 4,05 \text{ kg/m} = 102,06 \text{ kg}$  (handrail)
- Platina:  $840 \times 4 \times 6,5 = 2,18 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \times 9 = 1,97 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times 7417 \text{ Kg/m}^3 = 14,61 \text{ kg}$
- Handrail (tubo + platina):  $116,67 \text{ kg} + \text{accesorios} = 170 \text{ kg}$
- Peso manhole = 13,2 kg
- Bocas de cabeza, cuerpo y accesorios = 100 kg.

Las combinaciones de carga ingresadas, por el método LRFD según (ASCE 7, 2002):

Combo1: 1,4D

Combo2: 1,2D + 1,6Pc + 0,5 L

Combo3: 1,2D + 1,6L + 0,8W

Combo4: 1,2D + 1,6W + 0,5L

Combo5: 1,2D + Q

Combo6: 0,9D + 1,6W + 1,6Pc

Combo7: 0,9D + Q + 1,6Pc

Como resultado del análisis se obtienen las reacciones en los apoyos de las columnas que corresponden a la combinación de carga más crítica que es el “Combo 7”.

Figura 1. Reacciones en los apoyos de las columnas (Sistema Inglés)

Joint Object	Joint Element			
	1	2	3	
30	Force	-0,561	-2,226E-04	49,107
	Moment	6,297E-03	-45,346	1,360E-03
1635	Force	-0,597	-6,193E-05	41,526
	Moment	-4,515E-03	-53,464	-1,973E-03
1634	Force	-0,888	1,492E-02	45,289
	Moment	-3,862	-58,979	-3,709
1636	Force	-0,888	-1,464E-02	45,637
	Moment	3,860	-58,971	3,711

Fuente: Autor



En la siguiente tabla se resumen los valores requeridos para proceder con la selección del perfil estructural de la columna. Se toma las cargas de la columna 1, pues muestra el mayor estado de carga comprendido entre la flexión y compresión.

Tabla 27. Cargas de compresión y flexión sobre las columnas

Elemento	Cargas		
	Pu (Kips)	Mux (Kips.in)	Muy (Kips.in)
Columna 1	49,107	-45,346	0,006
Columna 2	41,526	-53,464	-0,004
Columna 3	45,289	-58,979	-3,862
Columna 4	45,673	-58,971	3,860

Fuente: Autor

**4.7.1.1 Selección de la columna.** Para la selección del perfil estructural de la columna se utilizará el método de cálculo LRFD (mismo que fue usado en las combinaciones de carga). En lo posible, el perfil seleccionado será un perfil europeo, pues son más fáciles de adquirir en el mercado nacional, el material del perfil será de acero A36. Este será de sección tubular circular pues, en su uso como columnas, se considera el perfil más idóneo para soportar las cargas de flexo compresión.

En la preselección del perfil, se plantea la ecuación de carga de compresión para estimar la sección transversal necesaria para soportar la carga, como se indica a continuación:

$$P_u = \phi_c * P_n \quad (113)$$

$$P_n = \phi_c * F_y * A_g \quad (114)$$

Donde:

$P_u$  = carga de compresión requerida,

$\phi_c$  = coeficiente resistencia de diseño a compresión, [ $\phi_c=0,9$  método LRFD],

$P_n$  = resistencia de compresión nominal,

$F_y$  = 36 ksi, es el límite de fluencia del acero A36,

$A_g$  = es el área bruta de la sección.

Por lo tanto, mediante la ec. (114):

$$(45,673) \text{ kips} = 0,9 * (36) \text{ Kpsi} * A_g$$

$$A_g = 1,41 \text{ in}^2$$

Como se mencionó anteriormente, éste valor sirve para estimar la sección transversal necesaria para soportar la carga de compresión, pero se debe tomar en cuenta que la columna estará sometida también a cargas de flexión y se requerirá de una sección mayor a la estimada. El proceso de selección puede ser iterativo hasta obtener un valor de diseño óptimo. Para este caso, seleccionamos un perfil europeo tubular de 5" SCH 40 del que se requiere conocer los datos mostrados en la tabla (28).

Tabla 28. Propiedades de la sección tubular circular para la columna

<b>Tubo 5" SCH 40</b>						
<b>Diám. ext</b>	<b>Espesor</b>	<b>Área</b>	<b>I<sub>x</sub>=I<sub>y</sub></b>	<b>S<sub>x</sub>=S<sub>y</sub></b>	<b>r<sub>x</sub>=r<sub>y</sub></b>	<b>Z<sub>x</sub>=Z<sub>y</sub></b>
(in)	(in)	(in <sup>2</sup> )	(in <sup>4</sup> )	(in <sup>3</sup> )	(in)	in <sup>3</sup>
5,56	0,258	4,298	15,156	5,449	1,878	7,26

Fuente: SAP2000 V17.3 – Propiedades de la sección

Para el cálculo de la resistencia de la columna de sección circular sometida a flexo-compresión, se usará el procedimiento de cálculo de la norma (ANSI/AISC 360, 2010).

- *Resistencia a la compresión.* De la figura correspondiente a compresión del anexo D caso 9, la sección circular es un elemento atiesado. Para saber si es un elemento esbelto, se realiza la comparación entre los siguientes valores:

$$* D/t \quad y \quad *\lambda_r$$

Donde:

D = diámetro externo del tubo,

t = espesor del tubo,

$\lambda_r$  = razón límite ancho-espesor [ $\lambda_r = 0,11 E/F_y$ ],

Si la relación ( $D/t > \lambda_r$ ); el perfil es “no esbelto”, caso contrario será “esbelto” entonces:

$$D/t = 5,56/0,258 = 21,55$$

$$\lambda_r = 0,11 \frac{29000 \text{ kpsi}}{36 \text{ kpsi}} = 88,61$$

El perfil es “No esbelto”, de la figura mostrada en el anexo D, se determina los posibles casos de falla del perfil a compresión, el cual es “FB = Pandeo por flexión”.

La resistencia a la compresión nominal ( $P_n$ ), en base al estado límite “FB” es:

$$P_n = F_{crit} * A_g \quad (115)$$

Para obtener la fuerza crítica, se compara la siguiente inecuación:

$$\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}; \quad \text{entonces:} \quad F_{crit} = \left[0,658 \frac{F_y}{F_e}\right] * F_y \quad (116)$$

$$\frac{KL}{r} < 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}; \quad \text{entonces:} \quad F_{crit} = 0,877 * F_e \quad (117)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (118)$$

Figura 46. Valores de longitud efectiva

La forma de pandeo se indica en línea de puntos	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados de proyecto para condiciones reales	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
Condiciones de vínculo						

Fuente: Traducción de la norma (ANSI/AISC 360, 2010) pág. 567

La longitud no arriostrada de la columna es:  $L = 89,764$  in, y está en la condición de empotrado en sus 2 extremos, entonces  $K=0,65$ .

Mediante la ec. (118).

$$F_e = \frac{\pi^2 * (29000)kpsi}{(31,07)^2} = 296,49 \text{ kpsi}$$

Procediendo con la comparación de la inecuación se tiene que:

$$\frac{KL}{r} = \frac{0,65 * (89,764)in}{(1,878)in} = 31,07$$

$$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4,71 \sqrt{\frac{(29000)kpsi}{(36) \text{ kpsi}}} = 133,68$$

Como:  $K*L/r < 4,71*(E/F_y)^{0,5}$  cumple con la condición dada por la ec. (116), se procede a calcular la fuerza crítica, entonces:

$$F_{crit} = \left[ (0,658)^{\frac{36}{296,49}} \right] * 36kpsi = 34,22 \text{ kpsi}$$

Por lo tanto, mediante la ec. (114), se determina la resistencia a la compresión nominal  $P_n$ , en el estado límite de pandeo por flexión "FB" es:

$$P_n = (34,22) \text{ kpsi} * (4,289) \text{ in}^2 = 146,77 \text{ kips}$$

- *Resistencia a la flexión.* De la ilustración mostrada en el anexo D, caso 20 el tubo circular es una sección atiesada. Para calcular la resistencia a flexión se requiere conocer si este perfil estructural es:

$$a) \frac{D}{t} < \lambda_p; \quad \text{entonces es:} \quad \text{"Compacto"}$$

$$b) \lambda_p < D < \lambda_r; \quad \text{entonces es:} \quad \text{"No compacto"}$$

c)  $\lambda_r < D$ ;                    entonces es:                    "Esbelto"

Donde:

$$\lambda_p = 0,07 \frac{E}{F_y} \quad (119)$$

$$\lambda_r = 0,31 \frac{E}{F_y} \quad (120)$$

Mediante las ec. (119) y (120), se tiene:

$$\lambda_p = 0,07 \frac{29000 \text{ kpsi}}{36 \text{ kpsi}} = 56,38$$

$$\lambda_r = 0,31 \frac{29000 \text{ kpsi}}{36 \text{ kpsi}} = 249,72$$

$$D/t = 5,56/0,258 = 21,55$$

Como:  $D/t < \lambda_p$  el perfil es "Compacto". Por lo tanto, del anexo D se determina el estado límite de falla a flexión del perfil, que es "Y" fluencia, y "LB" pandeo local. La resistencia a la fluencia nominal  $M_n$ , será la menor entre dichos límites.

La resistencia a la fluencia nominal para el estado límite de fluencia "Y" es:

$$M_n = M_p = F_y * Z_x \quad (121)$$

Donde:

$F_y$  = límite de fluencia del material,

$Z_x$  = módulo plástico de la sección alrededor del eje "x".

Como el perfil tubular es una sección simétrica respecto al eje "x" e "y". La capacidad del límite de fluencia es igual para ambos ejes, cuyo valor es:

$$M_n = (36)\text{kpsi} * (7,26)\text{in}^3 = 261,36 \text{ kips.in}$$

El estado límite “LB” no aplica para perfiles “Compactos” (ANSI/AISC 360, 2010). Entonces, para determinar la acción de las cargas combinadas se usa la ec. (122).

$$\frac{D}{C} = \frac{P_r}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{u_x}}{\phi_b M_{n_x}} + \frac{M_{u_y}}{\phi_b M_{n_y}} \right) \leq 1,0 \quad (122)$$

Donde:

$P_r$  = sollicitación o demanda de carga a compresión,

$P_n$  = capacidad de carga a compresión

$\phi_c$  = coeficiente resistencia de diseño a compresión, [ $\phi_c = 0,9$  método LRFD],

$M_{u_x}$  y  $M_{u_y}$  = son las sollicitaciones de carga de flexión en el eje “x” e “y”, provenientes de un análisis de segundo orden.

$\phi_b$  = coeficiente resistencia de diseño a flexión, [ $\phi_b = 0,9$  método LRFD],

$D/C$  = radio teórico demanda - capacidad.

Entonces, aplicando la ec. (122):

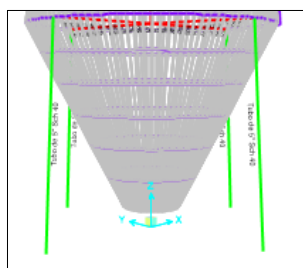
$$\frac{45,637 \text{ kips}}{0,9 * (146,77) \text{ kips}} + \frac{8}{9} \left( \frac{(58,971) \text{ kips.in}}{0,9 * (261,36) \text{ kips.in}} + \frac{(3,860) \text{ kips.in}}{0,9 * (261,36) \text{ kips.in}} \right) \leq 1,0$$

$$0,34 + 0,23 \leq 1,0$$

$$0,57 < 1,0$$

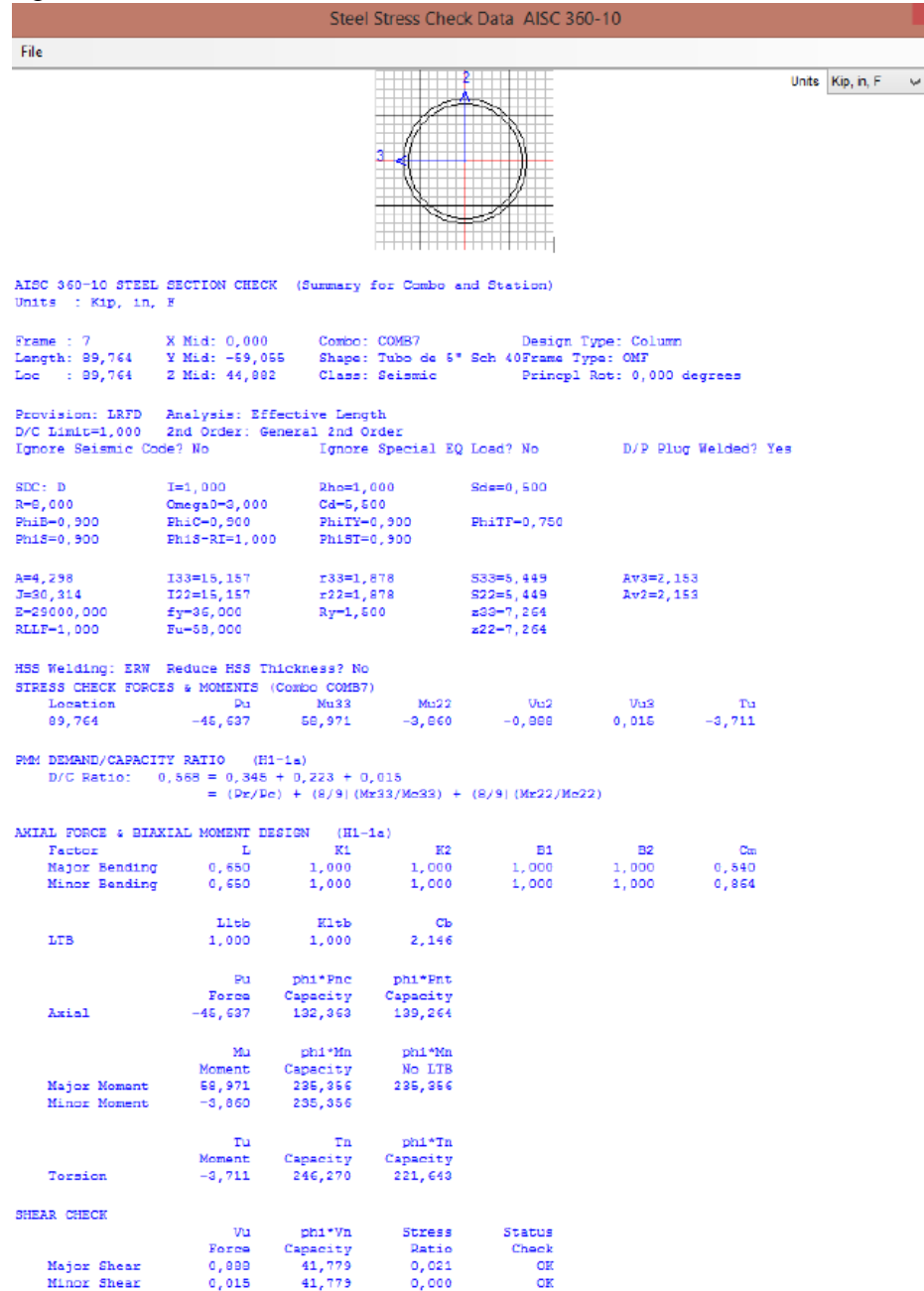
El radio teórico  $D/C = 0,57$  obtenido de la ec. (122), indica que el perfil de la columna es capaz de resistir satisfactoriamente las cargas de flexo-compresión, esto lo ratifica el resultado obtenido con el software SAP2000 de  $D/C = 0,568$  como se ve en la fig. (48).

Figura 47. Simulación de la resistencia de las columnas



Fuente: Autor

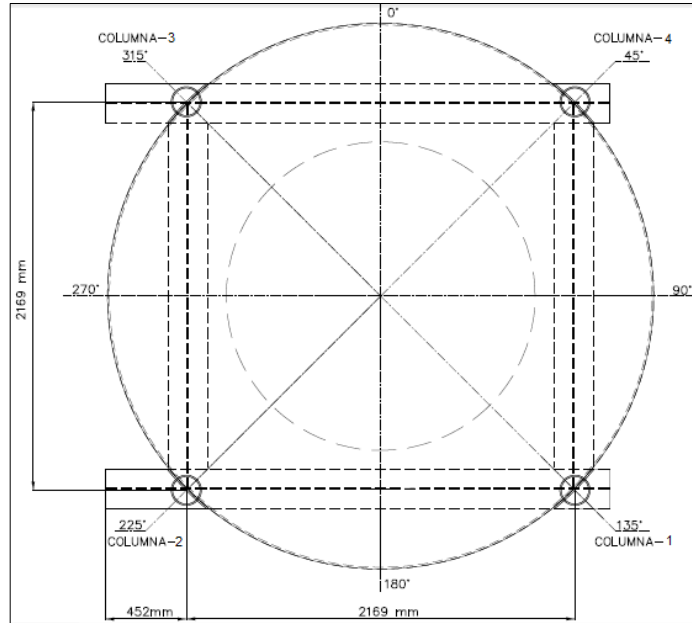
Figura 48. Resultado de resistencia de columnas - SAP2000



Fuente: Autor.

**4.7.2 Cálculo del Skid de fondo.** Las cargas de reacción sobre las columnas, se transmiten al Skid de fondo, el cual actúa como una viga con apoyo continuo. Para analizar la viga del skid se debe considerar relación entre la presión y la deformación del suelo a través del coeficiente de balasto  $K_s$ , la cual se utiliza para el análisis estructural de cimentaciones y vigas sobre un apoyo continuo.

Figura 49. Orientación de las columnas y skid de fondo.



Fuente: Autor

Para el análisis, se recurre al software SAP2000 en el cual se dibujará y representará la acción del suelo sobre la viga a través de resortes que simulan la acción del coeficiente de balasto ( $K_s$ ), para ello se requiere conocer el tipo de perfil de la viga para determinar la constante del resorte usando la siguiente ecuación.

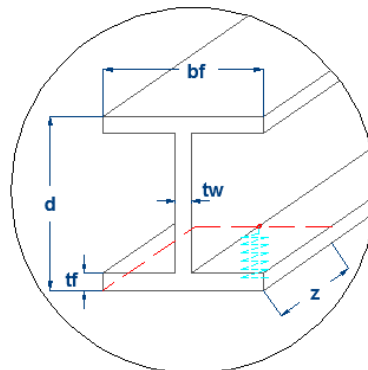
$$K = K_s * A_t \tag{123}$$

Donde:

$K_s$  = coeficiente de balastro:  $K_s = 39200 \text{ kN/m}^3$  (Quituisaca, A, 2009).

$A_t$  = área tributaria ( $A_t = bf \times z$ ), (ver la fig. 50).

Figura 50. Área tributaria de la viga apoyada sobre el suelo.



Fuente: Autor



Conocido el diámetro del perfil tubular de la columna, el perfil de la viga debe tener un ancho mayor a éste, para que exista el espacio suficiente para el cordón de soldadura, entonces, se selecciona un perfil de ala ancha HE220B, descrito en la siguiente tabla:

Tabla 29. Propiedades del perfil HEB220B - Skid de fondo

Perfil HE220B					
Altura. Ext (d)	Ancho del ala (bf)	Esp. del ala (tf)	Esp. del alma (tw)	Zx	Zy
(in)	(in)	(in)	(in)	(in <sup>3</sup> )	(in <sup>3</sup> )
8,661	8,661	0,629	0,374	50,467	24,043

Fuente: SAP2000 V17.3 – Propiedades de la sección

De la ec. (21) se calcula la constante K1 y K2, el valor de K1 se ingresa a todos los resortes excepto a los dos de los extremos, puesto que el área tributaria es solo la mitad. El largo de la viga ( $L_{viga} = 2835 \text{ mm} = 111,614 \text{ in}$ ) se divide en partes iguales para insertar los resortes en cada división (lo ideal es el ingreso de un número infinito de resortes), para este análisis se dividirá la viga en 50 partes.

$$z = \frac{L_{viga}}{50} = \frac{111,614 \text{ in}}{50} = 2,232 \text{ in}$$

$$A_t = (8,661)in * (2,232)in = 19,33 \text{ in}^2$$

Mediante la ec. (21) se calcula el coeficiente de los resortes.

$$K1 = (144,49 \times 10^{-3}) \text{ kips/in}^3 * (19,33)in^2 = 2,792 \text{ kips/in}$$

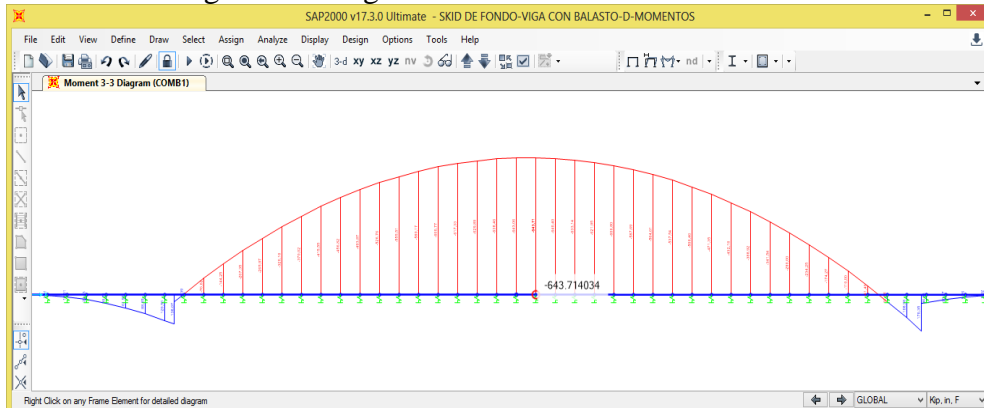
$$K2 = (144,49 \times 10^{-3}) \text{ kips/in}^3 * \left(\frac{19,33}{2}\right)in^2 = 1,396 \text{ kips/in}$$

Figura 51. Ingreso de los valores de K a los resortes en la viga.



Fuente: Autor

Figura 52. Diagrama de momentos del skid lateral



Fuente: Autor

A continuación, se ingresa el valor de las cargas de transmitidas por las columnas 1 y 2, sobre la viga, para obtener el diagrama de momentos flectores M33.

El momento flector máximo es: ( $M_{f\text{m}\acute{a}\text{x}} = 643,71 \text{ Kips.in}$ ), y está ubicado a ( $L = 58,04 \text{ in}$ ) de distancia desde el vértice izquierdo de la viga. Con este valor obtenido, se procede al cálculo de la resistencia de la viga a flexión mediante el cálculo teórico y la comprobación mediante el software SAP2000.

- *Resistencia de la viga a flexión.*

Mediante la tabla para elementos sometidos a flexión del anexo D, se analiza si los elementos que constituyen el perfil I son atiesados o no atiesados, y consecuentemente para determinar si estos son: Compactos, no compactos o esbeltos, mediante la comparación de los siguientes valores:

$$a) \left( \frac{bf}{2t}, o \frac{h}{tw} \right) < \lambda_p; \quad \text{entonces es:} \quad \text{"Compacto"}$$

$$b) \lambda_p < \left( \frac{bf}{2t}, o \frac{h}{tw} \right) < \lambda_r; \quad \text{entonces es:} \quad \text{"No compacto"}$$

$$c) \lambda_r < \left( \frac{bf}{2t}, o \frac{h}{tw} \right); \quad \text{entonces es:} \quad \text{"Esbelto"}$$

Del caso 10 de la figura del anexo D: El patín del perfil I, es un elemento no atiesado:

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (124)$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (125)$$

Por lo tanto, de las ec. (124) y (125):

$$\frac{bf}{2t} = \frac{(8,661) \text{ in}}{2 * (0,629) \text{ in}} = 6,88$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{(29000) \text{ ksi}}{(36) \text{ ksi}}} = 10,79$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{(29000) \text{ ksi}}{(36) \text{ ksi}}} = 23,83$$

Para el patín del perfil:  $bf/2t < \lambda_p$ ; entonces el patín es “Compacto”

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (126)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (127)$$

Por lo tanto, de las ec. (126) y (127):

$$\frac{h}{tw} = \frac{(7,4016) \text{ in}}{(0,374) \text{ in}} = 19,79$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{(29000) \text{ ksi}}{(36) \text{ ksi}}} = 106,71$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{(29000) \text{ ksi}}{(36) \text{ ksi}}} = 161,78$$

Para el alma del perfil:  $h/t_w < \lambda_p$ ; entonces el alma es “Compacta”, y el perfil es “Compacto”; por lo tanto, se establecen los casos límite de falla a flexión, a través de la figura del anexo D, las que son: “Y” fluencia, y “LTB” pandeo lateral torsional.

- Resistencia a la fluencia “Y”.

La capacidad a flexión nominal del perfil se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_n = F_y * Z_x \quad (128)$$

Donde:

$F_y$  = es el límite de fluencia del material,

$Z_x$  = es el módulo plástico de la sección alrededor del eje “x”.

Mediante la ec. (128):

$$M_n = (36)kpsi * (50,46)in^3 = 1\,816,56 \text{ kips. in}$$

El valor de la resistencia a fluencia nominal, es el menor valor entre “Y” y “LTB”, sin embargo, el límite de falla “LTB”, no aplica para secciones continuamente apoyadas donde:  $L_b = 0$  (ANSI/AISC 360, 2010). Por lo tanto, el radio demanda/capacidad es:

$$\frac{D}{C} = \frac{643,71 \text{ kips. in}}{0,9 * (1\,816,56) \text{ kips. in}} = 0,4$$

El perfil HE220B resiste satisfactoriamente la carga de flexión, transmitida por las columnas del silo. Si bien el coeficiente de diseño es pequeño por ser de un análisis estático, con ese margen de seguridad se permite considerar los efectos dinámicos.

Para el skid lateral se usará el mismo perfil del skid de fondo, los apoyos se ubican analizando la posición que genere el menor momento flector, si se analiza al cuerpo del silo como si fuera un viga apoyada en un sus extremos con empotramiento y articulación. El silo se transportará vacío, por lo que las cargas serán la del Shell (láminas) y accesorios, como se muestra en la siguiente tabla.

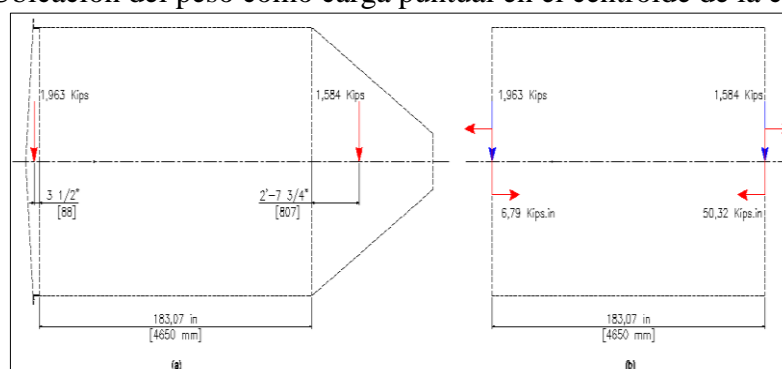
Tabla 30. Resumen de pesos del silo

	Shell (Lámina)	Accesorios	Shell + accesorios
<b>Cilindro</b>	5,177 kips	0,110 kips	5,287 kips
<b>Cabeza</b>	1,251 kips	0,712 kips	1,963 kips
<b>Tolva</b>	1,474 kips	0,110 kips	1,584 kips

Fuente: Autor

Ubicando el peso como carga puntual en el centroide de la cabeza y tolva, se traslada la fuerza hacía el cuerpo, como muestra la figura (53).

Figura 53. Ubicación del peso como carga puntual en el centroide de la cabeza y tolva



Fuente: Autor

En el programa SAP2000 se grafica el cuerpo cilíndrico representado por una viga, el primer apoyo se ubicara a 570 mm, por la separación respecto a la placa de refuerzo del apoyo de la columna, este apoyo será fijo y se irá variando la distancia del apoyo del lado izquierdo para evaluar la posición que genere el menor momento flector.

Tabla 31. Iteraciones para encontrar el momento flector.

Iteración	Apoyo	Distancia	Cortante	Mmáx.	Mmáx. zona no apoyada
N°		(in)	(kips)	(kips.in)	(kips.in)
1	A	20,45 (570 mm)	2,3	-31,99	1,81
	B	20,45 (570 mm)	-2,62	-117	
2	A	23,62 (600 mm)	2,65	-61,22	52,28
	B	20,45 (570 mm)	-2,52	-117	
3	A	15,75 (400 mm)	2,42	-41,28	8,63
	B	20,45 (570 mm)	-2,51	-117	
4	A	11,81 (300 mm)	2,9	-85,79	68,15
	B	20,45 (570 mm)	2,52	-117	
5	A	7,87 (200 mm)	2,19	-23,14	-10,59
	B	20,45 (570 mm)	2,72	-117	

Fuente: Autor

Como se ve en la tabla anterior, en la iteración 1 se genera el momento flector más bajo en la zona no apoyada. Por lo tanto, los apoyos del skid se ubicarán a esas distancias.

**4.7.3 Resistencia de las paredes del silo.** La modelación a través del software SAP2000, permite obtener los esfuerzos en el cuerpo y tolva del silo, debido a las cargas internas y combinaciones de carga aplicadas.

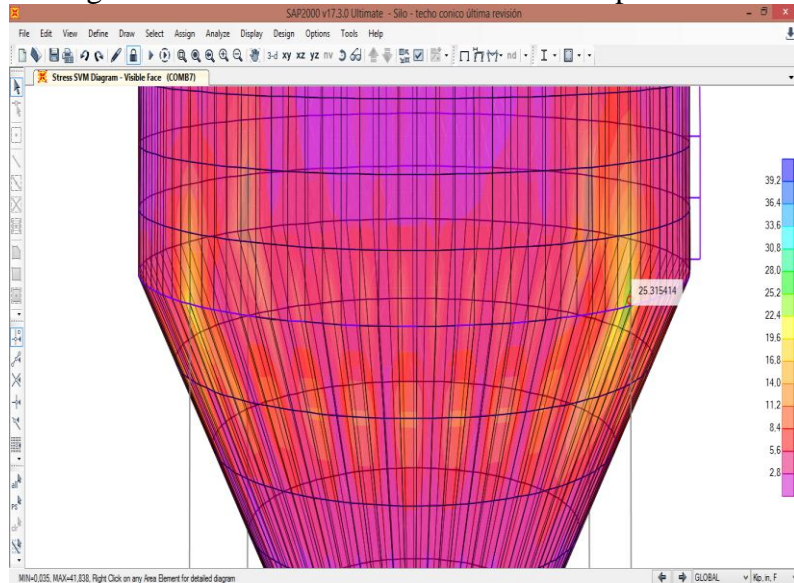
Figura 54. Silo modelado en SAP2000.



Fuente: Autor

De la simulación, se obtienen los esfuerzos de Von Mises en las láminas que conforman el silo, esfuerzo que será comparado con el límite de fluencia ( $S_y$ ) del material.

Figura 2. Esfuerzo de Von Mises en el cuerpo del silo



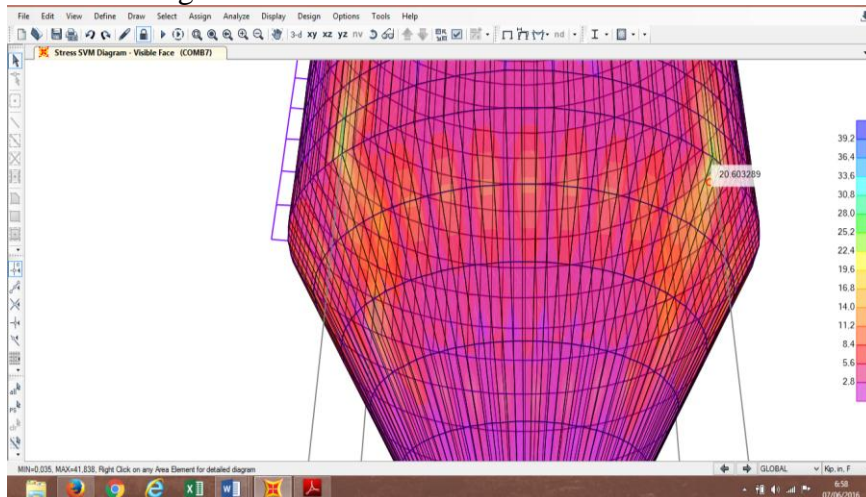
Fuente: Autor

Claramente se puede ver en la figura anterior, que el esfuerzo de Von Mises se concentra en la unión de las columnas con el cuerpo, dicha concentración de esfuerzos se puede mitigar con placas de refuerzo o pads en la unión.

Los esfuerzos en las láminas reflejan el perfil de presiones generado por un sólido pulverulento a granel, además se puede ver el efecto de la carga de golpe repentino  $P_s$ . Los esfuerzos en el cuerpo alcanzan un máximo de (25,31 ksi), por lo tanto:

$$C = \frac{(38) \text{ ksi}}{(25,31) \text{ ksi}} = 1,5$$

Figura 55. Esfuerzo de Von Mises en la tolva

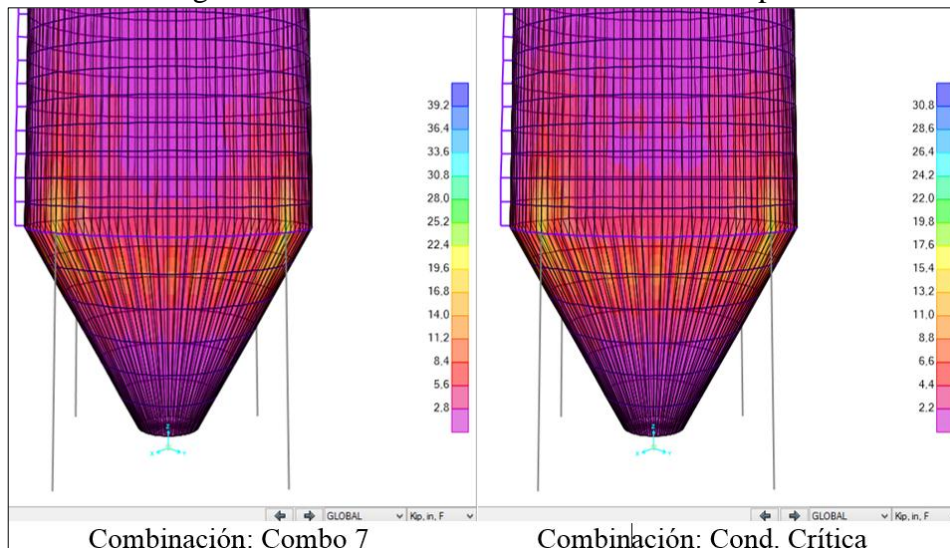


Fuente: Autor

En general, los esfuerzos en la parte inferior del cuerpo van entre: (7,56 a 20,60 ksi), entonces, el coeficiente de seguridad (C) para el cuerpo es:

$$C = \frac{(38) \text{ ksi}}{(20,60) \text{ ksi}} = 1,84$$

Figura 56. Esfuerzos de Von Mises en el cuerpo.



Fuente: Autor

La presión de diseño del silo es:  $P_d = 536,247 \text{ kN/m}^2$ , las presiones y espesores son:

Tabla 32. Resumen de presiones del silo

Elemento	Presión
	(kN/m <sup>2</sup> )
Cabeza	47,617
Cuerpo	87,617
Transición	110,264
Tolva	120,649
Boca de la tolva	98,745

Fuente: Autor

Tabla 33. Resumen de espesores del silo

Elemento	Espesor (mm)				
	t mín. calculado	$\Delta$ corrosión	$\Delta$ abrasión	nominal	diseño
Cabeza	0,61	1,58	2	6,35	7,94
Cuerpo	0,61	1,58	2	6,35	7,94
Tolva	1,8	1,58	2	6,35	7,94

Fuente: Autor



## 4.8 Preparación y aplicación de recubrimiento

Las condiciones ambientales del oriente ecuatoriano, lugar en donde se planteó la ubicación del silo para almacenamiento de cemento lo hace altamente susceptible a la corrosión, fenómeno electroquímico que puede ser controlado mediante varias herramientas como: Su diseño, uso de inhibidores, correcta selección de materiales, protección catódica, recubrimientos y alteración del medio ambiente. Tomando en consideración que la estructura está conformada por materiales similares para minimizar los efectos de la corrosión galvánica, el método complementario para controlar la corrosión será la aplicación de recubrimientos a la superficie metálica.

En esta parte se indicará el tipo de preparación de superficie y recubrimiento que se aplicará tanto a las paredes internas como a las externas y accesorios del silo metálico. El término recubrimiento es toda pintura o producto que aísla al metal del medio circundante para prevenir la corrosión del metal. Para que un recubrimiento pueda cumplir su función es indispensable una correcta preparación de la superficie a cubrir.

**4.8.1** *Preparación de superficie.* El acero como material de construcción requiere de una adecuada preparación de la superficie para retirar contaminantes producto de su fabricación, transporte y almacenamiento, con el fin de obtener un determinado grado de limpieza y/o terminación. Los procesos para la preparación de superficie están normalizados por los siguientes organismos internacionales:

- SSPC: Steel Structures Painting Council,
- NACE, National Association of Corrosion Engineers,
- SIS 055900: Swedish Standards Institution,
- BS 4232: British Standards Institution.

De las anteriormente mencionadas, es usualmente usado en Latinoamérica el código SSPC, el cual considera los siguientes grados de preparación de superficie:

- SSPC SP-1 Limpieza con solventes,

- SSPC SP-2 Limpieza con herramienta manual,
- SSPC SP-3 Limpieza con herramienta de fuerza mecánica/eléctrica/neumática,
- SSPC SP-5 Limpieza con chorro a metal blanco,
- SSPC SP-6 Limpieza con chorro grado comercial,
- SSPC SP-7 Limpieza ráfaga/ chorro abrasivo,
- SSPC SP-8 Limpieza por decapado,
- SSPC SP-10 Limpieza cercana a metal blanco.

La preparación de superficie se realiza de acuerdo al porcentaje de imperfecciones del material y al tipo de acabado deseado. Para el caso de las paredes internas y externas del silo se aplicará un grado de limpieza SSPC SP-10, el que permite obtener lo siguiente:

El chorro abrasivo impulsado a través de una tobera, limpiará el metal a un grado casi blanco, en la que todo aceite, grasa, suciedad, cascarilla de laminado, herrumbre, productos de corrosión, pintura y otras materias han sido totalmente removidas de la superficie, con esto el 95% de cada pie cuadrado de superficie está libre de residuos visibles, el resto son decoloraciones por la herrumbre, rayones y laminado (Sara, 2013).

**4.8.2 Perfil de anclaje.** Se denomina así a la rugosidad superficial lograda sobre el sustrato (metal), debido al impacto del chorro de arena o gravilla abrasiva contra la superficie del sustrato. En la siguiente tabla se puede observar el perfil de anclaje alcanzado a partir del uso de diferentes abrasivos bajo designación SSPC y NACE.

Tabla 34. Perfil de anclaje de superficies metálicas

<b>Perfil de Anclaje (SSPC/NACE)</b>		
<b>Mils</b>	<b>Micrones</b>	<b>Limpieza abrasiva a presión o centrífuga</b>
0,5	12,5	Arena sílice 80/120 mesh; Granate 100 mesh; Granalla angular de hierro o acero G-200.
1	25	Arena sílice 30/50 mesh; Granate 80 mesh; Granalla angular de hierro o acero G-80.
1,5	37,5	Arena sílice 20/50 mesh; Granate 36 mesh; Granalla angular de hierro o acero G-50.
2	50	Arena sílice 16/40 mesh; Granate 30 mesh.
2,5	62,5	Arena sílice 12/30 mesh; Granate 20 mesh.
3	75	Arena sílice 8/20 mesh; Granate 16 mesh.

Fuente: [http://semariostecnicos/prep\\_superf/](http://semariostecnicos/prep_superf/)

El perfil de anclaje permite obtener una adecuada adherencia del recubrimiento al sustrato. Una inadecuada selección de éste puede significar un incremento en la cantidad de los recubrimientos y sus respectivas repercusiones.

**4.8.3 Aplicación del recubrimiento.** Los recubrimientos anticorrosivos comúnmente denominados: Enlaces, acabados, selladores, primarios (primer), etc., deben aplicarse siguiendo un procedimiento que garantice su correcta aplicación sobre el sustrato, para que pueda desempeñar correctamente su función. En las paredes externas del silo se aplicará una capa de primer que será la capa preparatoria a las siguientes dos capas de recubrimiento. Para ello se seguirá el procedimiento para aplicación de recubrimiento como se indica a continuación:

- Preparar las superficies limpias y secas mediante limpieza abrasiva usando Star Blast #6 de acuerdo a la norma SSPC-SPC10 “Limpieza a metal casi blanco”.
- La limpieza abrasiva deberá lograr un perfil de anclaje de 1,5 a 3,0 mils (38 a 75  $\mu\text{m}$ ) determinado mediante la norma NACE RP0287 para la medición en taller del perfil de anclaje usando la cinta de réplica.
- Después de la preparación de la superficie del sustrato, se deberá eliminar el abrasivo, polvo, etc. Y aplicar una capa de imprimante (fondo) antes que se presente cualquier corrosión perjudicial o re contaminación de la superficie.
- No deberá hacerse una limpieza abrasiva de la superficie cuando la temperatura del acero sea menor a 3°C (5°F) sobre el punto de rocío, o cuando la humedad relativa sea igual o mayor al 85%.
- Deberán desecharse las boquillas tipo Venturi cuando se hayan desgastado a tal punto que el diámetro interior sea 20% o mayor del original o cuando la boquilla se ha desgastado un tamaño igual al diámetro original.

Las especificaciones técnicas de la preparación y aplicación del recubrimiento del silo para almacenamiento de cemento se detallan en la tabla (33).

Tabla 35. Procedimiento de pintura

PROCEDIMIENTO DE PINTURA								
<b>Proyecto:</b>		SILO PARA ALMACENAMIENTO DE CEMENTO						
<b>Capacidad:</b>		1200 ft <sup>3</sup>						
<b>Elaborado por:</b>		Héctor Vistín						
<b>Área:</b>		98 m <sup>2</sup>						
<b>Sistema de limpieza:</b>		SSPC-SP10						
<b>Espesor película seca:</b>		1,6 - 2,8 mils						
RECUBRIMIENTO EXTERNO								
Nº	Nombre genérico	Marca de referencia	Cantidad pintura (l)	Tiñer	Cantidad de tiñer (l)	DFT (mils)		Color
Primer	Inorgánico de zinc	CARBONZINC 11	8	Tiñer #33	3	2,75	3,25	Gris
1ero	Epoxi amina cicloalifática	CARBOGUARD 890	7	Tiñer #2	3	4,75	5,25	Blanco
2do	Poliuretano acrílico alifático	CARBOTHANE 134 HG	4	Tiñer #25	3	1,75	2,25	Blanco

Fuente: Autor

#### 4.9 Costos

Se analiza el costo de la fabricación del silo para almacenamiento de cemento de 1200 pies cúbicos de capacidad tomando en cuenta el costo de construcción, costo de montaje, pruebas y transporte como indican las siguientes tablas.

Tabla 36. Costo de construcción

Descripción	Valor (\$)
Materiales	12457,77
Equipo y accesorios	4355,72
Corte	690,47
Rolado	425,40
Preparación superficial	2743,54
Total:	20672,90

Fuente: Autor

Tabla 37. Costo de montaje y pruebas

Descripción	Valor (\$)
Consumibles	5093,29
Ensayos y pruebas	1260,00
Calificación de soldadores	800,00
Obreros	8690,00
Equipos	5980,00
Total:	21823,29

Fuente: Autor

Tabla 38. Costo total del silo para almacenamiento de cemento

<b>Descripción</b>	<b>Valor (\$)</b>
Costo de construcción	20672,90
Costo de montaje y pruebas	21823,29
Costo de transporte	1200,00
Total:	43696,19

Fuente: Autor

El costo de la fabricación del silo para almacenamiento de cemento presentado tendría un valor referencial pues los valores definitivos solo se podrían plantear de acuerdo a un estudio económico de presupuestos reales de materiales y equipos, costo de pruebas, porcentaje de utilidad, etc.

La lista de materiales se presenta en los anexos, cuyo análisis es muy aproximado al requerimiento real, pues está soportado por el desarrollo de las láminas y materiales detallados en los planos de construcción.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Se logró sintetizar la información obtenida a través de medios físicos y electrónicos especializados en el funcionamiento, diseño, análisis y construcción de silos para almacenamiento de cemento, para poder describir los temas más trascendentales, necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

Se logró seleccionar un modelo de silo para almacenamiento de cemento, basado en el proceso de diseño del concepto, mediante el cual, se definieron los pasos para identificar las mejores alternativas de solución en base a los requerimientos planteados.

Se logró realizar un proceso metodológico para el diseño de silos metálicos de almacenamiento de cemento, identificando los modos de fallo a los que puede estar expuesto un silo debido a las condiciones de funcionamiento, para luego plantear un procedimiento de cálculo para el diseño funcional y estructural del silo de cemento.

Se consiguió realizar la comprobación de los espesores de las paredes del silo, mediante el uso de teorías de varios autores y normas especializadas en el diseño de silos, además, se ratificó la resistencia de las mismas, mediante el software SAP2000.

Se logró diseñar la estructura de soporte del silo, evaluando las cargas de almacenamiento, condiciones ambientales, sísmicas y de viento, mediante el uso de criterios y estándares internacionales en conjunto con las normativas propias del Ecuador.

Se logró efectuar la ingeniería de detalle, a través de planos (CAD-2D) de construcción que describen gráficamente la constitución final del silo.

## **5.2 Recomendaciones**

Establecer los requerimientos de diseño bajo las necesidades del usuario final del silo para almacenamiento del sólido pulverulento, con el objeto de plantear el diseño más adecuado, conforme a lo solicitado.

Adquirir la mayor información sobre la forma de funcionamiento, ubicación, condiciones ambientales, características del suelo, etc. donde se fundará el silo para prever posibles fallos estructurales, los cuales, en la mayoría de los casos suelen ser resultado del desconocimiento claro de los factores antes mencionados.

Tomar precaución, si las propiedades de los materiales pulverulentos a granel son tomados de tablas, pues estas son extensamente susceptibles de variación. Ciertas normas sugieren el uso de coeficientes para tomar en cuenta dicha variación, si no se cuenta con información confiable, se recomienda solicitar la ayuda de un especialista en el diseño de silos, para que pueda prevenirlos sobre problemas con el manejo del material.

Adquirir mayor información sobre teorías destacadas en el análisis, diseño y construcción de silos, para entender, analizar y profundizar el conocimiento sobre el tema, y lograr fortalecer el criterio técnico para la toma de decisiones.

Investigar literatura redactada en el idioma inglés, ya que, en este idioma se encuentran las mayores y más recientes investigaciones sobre silos para almacenamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

**ANSI/AISC 360. 2010.** *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago : American Institute of Steel Construction, 2010. ISBN: 978-956-8181-12-3.

**DRESCHER, A. WATERS, A.J. and RHOADES C.A. 1995.** *Arching in hoppers: II. Arching theories and critical outlet size*. Minnesota : Elsevier Science S.A., 1995, Vol. 84. ISSN: 0032-5910(95)02982-8.

**ASAE. 1998.** *Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins*. St. Joseph, MI : ASAE/ANSI EP433, 1998. p. 4.

**ASCE 7. 2002.** *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Washington, D.C. : American Society of Civil Engineers, 2002. ISBN: 0-7844-0624-3.

**ASTA, Eduardo. 2007.** Instituto Nacional de Tecnología Industrial. [Online] Noviembre 14, 2007. [Cited: Enero 25, 2016.] <http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/304/Cap3.pdf>.

**ASTM, D-6128. 2006.** *Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using Jenike Shear Cell*. West Conshohocken : ASTM, 2006.

**ASTM, E-142. 1968.** *Controlling Quality of Radiographic Testing*. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1968.

**CCARITA, Fredy. 2011.** slideshare. *slideshare.net*. [Online] 04 11, 2011. [Cited: Noviembre 10, 2015.] <http://es.slideshare.net/alanmecanica/diseo-de-un-silo-estructura-metalica>.

**CPMB. 2007.** *Concrete Plant Standards*. 15, Silver Spring, MD : Concrete Plant Manufacturers Bureau, 2007. ISSN: 301-587-1400.

**EN 1991-1-4. 2005.** *General Actions - Wind Actions*. Bruselas : European Committee for Standardization, 2005. ICS: 91.010.30.

**EN 1991-4. 2006.** *Action on Structures - Part: 4 Silos and Tanks*. Bruselas : European Committee For Standardization, 2006. ICS 91.010.30.

**EN 1993-4-1. 2007.** *Design of steel structures - silos*. Bruselas : European Committee For Standardization, 2007. ICS: 65.040.20.

**ENV.1993-1-6. 2006.** *Design of steel - Part 1-6: Strength and stability of shell*. Bruselas : European Committee For Standardization, 2006. ICS: 91.010.30.



**INP. 2013.** *Estudio Básico de la Industria Cementera en el Ecuador.* s.l. : Instituto Nacional de Preinversión, 2013.

**Jaén, Universidad 2012.** <http://blogs.ujaen.es/biblio/>. <http://blogs.ujaen.es/biblio/>. [Online] Julio 2012. [Cited: Noviembre 26, 2015.] <http://blogs.ujaen.es/jsampedr/wp-content/uploads/2012/07/Presentaci%C3%B3n-Tema-06.pdf>.

**Jenike y Johanson, Inc. 2013.** Jenike & Johanson. <http://jenike.com/>. [Online] Noviembre 2013. [Cited: Diciembre 20, 2015.] [https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20131125\\_1.pdf](https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20131125_1.pdf).

**Kemex.** [www.kemex.es](http://www.kemex.es). [Online] [Cited: Diciembre 18, 2015.] <http://www.schulke.cl/catalogos/kemex/Catalogo%20Tecnolog%C3%ADa%20Kemex.pdf>.

**KURT, E. PERAY. 1979.** *Cement Manufacturer's Handbook.* New York : California Historical Society, 1979. ISBN-10: 0820603686.

**LABAHN, O. KHOLAS, B. 1983.** *Cement Engineer's Handbook.* Wiesbaden; Berlin : Bauverlag, 1983. ISBN: 3-7625-0975-1.

**MEGYESY, Eugene. 2008.** *Pressure Vessel Handbook.* Oklahoma : PV Publishing, Inc., 2008. ISBN: 978-0-914458-24-1.

**MORENO, Humberto. 2008.** *Almacenamiento de cemento Portland.* <http://es.scribd.com>. [Online] 2008. [Cited: Octubre 10, 2015.] <http://es.scribd.com/doc/96454299/Almacenamiento-de-Cemento-Portland#scribd>.

**NEC-SE-CG. 2015.** *Cargas no sísmicas.* Quito : Dirección de coordinación social, MIDUVI, 2015.

**NEC-SE-DS. 2015.** *Peligro Sísmico - Diseño Sismo Resistente.* Quito : Dirección de Comunicación Social, MIDUVI, 2015.

**NTE INEN 2380. 2011.** *Cementos hidráulicos - Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos.* Quito : Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011. ICS: 91.100.10 .

**ODISA. 2014.** [odisa@odisa.com](mailto:odisa@odisa.com). [Online] Agosto 14, 2014. [Cited: Noviembre 13, 2015.] [https://issuu.com/plantas-concreto/docs/catalogo2014\\_esp\\_lr\\_ago14](https://issuu.com/plantas-concreto/docs/catalogo2014_esp_lr_ago14).

**OSORIO, Jesús. 2010.** <http://blog.360gradosenconcreto.com>. [Online] 360 Grados - Blog en Concreto, Agosto 31, 2010. [Cited: Enero 10, 2016.] <http://blog.360gradosenconcreto.com/almacenamiento-de-cemento-a-granel/>.

**Quituisaca, A. 2009.** <http://repositorio.espe.edu.ec>. [www.espe.edu.ec](http://www.espe.edu.ec). [Online] 2009. [Cited: Enero 10, 2016.] <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1690/1/T-ESPE-026021.pdf>.

**RAVENET, Juan. 1992.** *Silos*. Barcelona : Reverte, 1992. ISBN: 84-604-1288-1.

**RHODES, M. 1990.** *Principles of powder technology*. New York : Jhon Wiley, 1990. ISBN: 978-0-471-92422-7.

**Sara, Edgar. 2013.** SlideShare. [Online] Marzo 21, 2013. [Cited: Enero 4, 2016.] <http://es.slideshare.net/edgarjuliosaratairo/preparacion-de-superficies-metalicas>.

**SCHULZE, Dietmar. 2008.** *Powders and Bulk Solids*. Wolfsburg : Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-73767-4.

**CARSON, Jhon W. 2000.** *Silo Failures: Case Histories and Lessons Learned*. Westford, MA : Jenike & Johanson Incorporated, Mayo 2000, Vol. 153. ISSN: 01886-3189.

**JENIKE, Andrew. 1964.** *Storage and flow of silos*. 123, Salt Lake City : Universidad de Utah, 1964, Vol. 1.

