

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERA MECÁNICA

**DISEÑO DE UN SILO CILÍNDRICO DE FONDO PLANO
PARA ALMACENAMIENTO DE MAÍZ CON CAPACIDAD DE
50 TONELADAS**

AUTORA: ANDREA CASTILLO

DIRECTOR: ING. FERNANDO LARCO

QUITO, FEBRERO 2013

Certifico que el presente trabajo, previo a la obtención del Título de Ingeniera Mecánica ha sido realizado en su totalidad por la Srta. Andrea Elizabeth Castillo Román.

Los conceptos desarrollados, análisis, cálculos realizados, conclusiones y recomendaciones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de la autora.

Quito, Febrero 2013

Atentamente,

Ing. Fernando Larco
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por este logro importante en mi vida, a mi hijo por ser el motivo y la razón que me ha llevado a superarme, a mi director de tesis Ing. Fernando Larco por su valiosa colaboración, a mi esposo, padres y hermanos por su afectuoso e incondicional amor y apoyo en este tiempo.

Andrea Castillo

RESUMEN

El presente proyecto está orientado al diseño estructural de un silo cilíndrico metálico de fondo plano para almacenamiento de maíz con capacidad de 50 toneladas.

El proyecto se divide en cinco capítulos detallados a continuación.

En el capítulo 1 ANTECEDENTES, se encuentra el planteamiento del problema, los objetivos y alcance de éste proyecto.

En el capítulo 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS, se recopila información necesaria para el diseño del silo desde la estructura del grano de maíz y sus propiedades hasta consideraciones de diseño de la estructura (presiones sobre el cuerpo y fondo del silo) y accesorios como boquillas y escaleras.

En el capítulo 3 CÁLCULOS, se presenta los respectivos cálculos de las presiones que actúan sobre las paredes del silo y en base a estas se calcula los espesores de las placas que conforman el cuerpo, techo y fondo del silo. Además la selección de boquillas de entrada y salida del producto, boquilla de venteo y registro hombre.

También se realiza los cálculos de estabilidad por sismo y viento, con los que se determinarán si el silo es estable o no.

En el capítulo 4 COSTOS, se determina los costos del proyecto.

En el capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, se presenta las conclusiones sobre los objetivos planteados al inicio del proyecto, y al igual que algunas recomendaciones importantes.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación del problema	2
1.4 Objetivos	3
1.5 Alcance del proyecto.....	4
CAPÍTULO 2	5
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 El grano de maíz	5
2.2 Características	6
2.2.1 Estructura física	6
2.2.2 Composición química	7
2.2.3 Propiedades físicas.....	8
2.2.3.1 Forma y tamaño	8
2.2.3.2 Densidad	9
2.2.3.3 Porosidad.....	10
2.3 Factores que deterioran el grano	10
2.3.1 Respiración: Manifestación de la actividad metabólica de los granos	10
2.3.2 Temperatura	12

2.3.3	Humedad	13
2.4	Silos.....	15
2.4.1	Clasificación de los silos.....	15
2.4.2	Silos para almacenamiento de productos granulares	15
2.4.2.1	Flujo de vaciado de los productos granulares	17
2.5	Consideraciones de diseño.....	22
2.5.1	Silos poco esbeltos.....	22
2.5.1.1	Cargas de llenado sobre las paredes verticales	22
2.5.1.2	Carga concentrada de llenado	25
2.5.1.3	Cargas de descarga sobre las paredes verticales	26
2.5.1.4	Carga concentrada de descarga.....	26
2.5.1.5	Cargas sobre el fondo del silo.....	26
2.5.1.6	Presiones verticales sobre el fondo del silo	27
2.5.2	Diseño del cuerpo	28
2.5.3	Diseño del techo.....	30
2.5.3.1	Diseño y cálculo de techos cónicos autosoportados	31
2.5.4	Estabilidad por sismo.....	32
2.5.4.1	Factor de zona sísmica Z.....	33
2.5.4.2	Perfil de suelo	34
2.5.4.3	Coefficientes de amplificación o deamplificación dinámica de perfiles de suelo F_a , F_d y F_s	36
2.5.4.4	Factor de importancia	38
2.5.4.5	Momento de volteo sísmico	39
2.5.4.6	Coefficientes de aceleración espectral	42
2.5.5	Estabilidad por viento	46
2.5.5.1	Presión del viento.....	46
2.5.6	Accesorios.....	49

2.5.6.1	Boquillas	49
2.5.6.2	Escaleras	52
CAPÍTULO 3.....		53
3.	CÁLCULOS	53
3.1	Datos generales:.....	53
3.1.1	Valor de z en el punto de contacto más elevado entre el sólido y la pared, h_o	54
3.1.2	Altura total del cono superior, h_{tp}	54
3.1.3	Altura total del grano contenido en el silo, h_c	54
3.1.4	Relación de esbeltez.....	55
3.1.5	Cálculo de cargas vivas y las cargas muertas	55
3.1.5.1	Cargas muertas.....	55
3.1.5.2	Sobrecargas de uso (carga viva)	57
3.2	Cálculo de las cargas en el silo	57
3.2.1	Presión horizontal después del llenado Ph_f	58
3.2.2	Presión de tracción por rozamiento en la pared después del llenado Pw_f	59
3.2.3	Presión vertical Pv_f a cualquier profundidad después del llenado	59
3.2.4	Tensión vertical resultante $nzSk$ (compresión) en la pared por unidad de longitud del perímetro a cualquier profundidad z	60
3.2.5	Carga concentrada de llenado	61
3.2.6	Cargas de descarga sobre las paredes verticales	61
3.2.7	Carga concentrada de descarga.....	61
3.2.8	Presión vertical $Pvsq$ que actúa sobre el fondo plano del silo	62
3.3	Diseño del cuerpo	63
3.3.1	Espesor de las paredes verticales del silo	64
3.5	Diseño del techo.....	67

3.5.1	Cálculo del espesor de las placas del techo	67
3.6	Estabilidad por sismo	68
3.6.1	Momento de volteo sísmico	68
3.6.2	Cálculo del sistema de anclaje	74
3.7	Estabilidad por viento	76
3.8	Selección de accesorios.....	78
3.8.1	Boquilla de entrada y salida del producto.....	78
3.8.2	Manhole lateral	78
3.8.3	Manhole en el techo.....	78
3.8.4	Boquilla de venteo	78
3.8.5	Escaleras	78
CAPÍTULO 4.....		79
4.	COSTOS	79
CAPÍTULO 5.....		82
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
5.2	Recomendaciones	83
BIBLIOGRAFÍA.....		84
ANEXOS		85
PLANOS.....		97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del grano de maíz	7
Figura 2. Diagrama de almacenamiento de grano (Burgess y Burrell)	14
Figura 3. Silo poco esbelto con excentricidad en la superficie superior	16
Figura 4. Forma del flujo durante el vaciado, de acuerdo con Chwetzoff	19
Figura 5. Forma del flujo durante el vaciado, según Deutsch y Clyde	20
Figura 6. Forma del flujo durante el vaciado, según Mc Cabe	21
Figura 7. Formas del flujo durante el vaciado, de acuerdo con Tingate	22
Figura 8. Formas de silo con notación de las dimensiones.	24
Figura 9. Presiones en el fondo de un silo poco esbelto	28
Figura 10. Ecuador, zonas sísmicas para propósito de diseño	33
Figura 11. Centroides de pesos que pueden producir volteo cuando existan movimientos telúricos.	42
Figura 12. Momento de volteo para tanques no anclados	49
Figura 13. Silo fondo plano con notación de las dimensiones	53
Figura 14. Representación esquemática del techo del silo	55
Figura 15. Representación esquemática del cuerpo del silo	56
Figura 16. Presiones sobre las paredes verticales y fondo del silo	57
Figura 17. Centros de gravedad	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición química del grano de maíz	8
Tabla 2.	Dimensiones de algunos granos y semillas	9
Tabla 3.	Valores de densidad aparente, densidad real y porosidad de algunos granos	11
Tabla 4.	Tiempo seguro de almacenamiento en función de las diferentes temperaturas y el contenido de humedad de los granos	12
Tabla 5.	Contenido de humedad para el almacenamiento adecuado de algunos productos	13
Tabla 6.	Clasificación recomendada para las clases de evaluación de silos	15
Tabla 7.	Clasificación de esbeltez del silo	16
Tabla 8.	Clasificación del silo según el espesor de la pared	17
Tabla 9.	Clasificación del silo según el tipo de superficie de la pared.....	18
Tabla 10.	Espesor mínimo de placas del cuerpo según el diámetro del tanque	29
Tabla 11.	Valores del factor de zona Z en función de la zona sísmica adoptada.....	34
Tabla 12.	Poblaciones ecuatorianas y el valor del factor Z.....	34
Tabla 13.	Tipos de perfiles de suelo.....	35
Tabla 14.	Clasificación del suelo seco	36
Tabla 15.	Tipo de suelo y factores de sitio Fa.....	37
Tabla 16.	Tipo de suelo y Factores de sitio Fd.....	37
Tabla 17.	Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo Fs ..	38
Tabla 18.	Tipo de uso, destino e importancia de la estructura	39

Tabla 19. Factores de modificación	44
Tabla 20. Sistema de anclaje dependiendo del valor del radio de anclaje (J)	44
Tabla 21. Coeficiente de entorno/altura	47
Tabla 22. Coeficiente de forma, Cf	48
Tabla 23. Dimensiones para cuellos de boquillas	51
Tabla 24. Costos de materiales y accesorios mecánicos	79
Tabla 25. Costo por maquinaria y equipos utilizado.....	80
Tabla 26. Costos por mano de obra.....	80
Tabla 27. Costo por transporte	81

TÉRMINOS Y DEFINICIONES

- 1. Altura equivalente h_c :** Altura del segmento de pared vertical del silo desde la transición hasta la superficie equivalente.
- 2. Boquilla:** Orificio practicado en el silo para la entrada o salida de un producto pueden ser bridadas o soldadas.
- 3. Brida:** Accesorio para acoplamiento de tuberías.
- 4. Carga concentrada:** Carga local que actúa en un área delimitada, en cualquier parte de la pared vertical del silo.
- 5. Carga muerta:** La fuerza debida al peso propio de los elementos a considerar.
- 6. Carga viva:** Fuerza debida a cuerpos externos pueden ser lluvia, personas, granizo u objetos transitorios.
- 7. Dimensión interior de la sección transversal del silo:** La dimensión d_c es el diámetro del mayor círculo inscrito dentro de la sección transversal del silo. Ver la figura 8.
- 8. Esbeltez:** Relación h_c/d_c de la sección vertical del silo.
- 9. Fondo plano:** Base interior de un silo cuando su ángulo de inclinación respecto a la horizontal es menor de 5° .
- 10. Presión:** Fuerza por unidad de superficie normal a una pared del silo.
- 11. Presión de tracción:** Fuerza por unidad de superficie paralela a la pared del silo (vertical o inclinada).
- 12. Segmento de pared vertical:** Parte de un silo con paredes verticales.

- 13. Silo:** Estructura de contención usada para almacenar sólidos disgregados.
- 14. Silo circular:** Un silo cuya sección transversal horizontal es circular.
- 15. Silo circular de pared delgada:** Silo circular con una relación entre el diámetro y el espesor de pared mayor que $dc/t = 200$.
- 16. Silo de pared gruesa:** Silo en el que la relación existente entre la dimensión del silo y el espesor de pared es menor que $dc/t = 200$.
- 17. Silo poco esbelto:** Silo en el que $0,4 < hc/dc \leq 1,0$. Cuando $hc/dc \leq 0,4$ el silo es poco esbelto si tiene tolva y silo granero si el fondo es plano.
- 18. Sólido disgregado:** Un sólido formado por muchas partículas separadas e independientes.
- 19. Sólido granular:** Sólido disgregado en el que todas las partículas tienen un tamaño tan grande que el aire intersticial tiene poca influencia en el flujo y la determinación de las presiones de grandes masas de sólido.
- 20. Superficie equivalente:** Plano horizontal que delimita el mismo volumen de sólido almacenado que la superficie real. Ver la figura 8.
- 21. Transición:** Intersección entre la tolva y la pared vertical.

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES

1.1 Introducción

El Cantón Celica ubicado en la provincia de Loja es considerado como un área netamente agrícola en la cual se cultiva en su mayor parte maíz amarillo duro, producto que representa un instrumento fundamental en la integración de los actores públicos y privados vinculados con el consumo y su comercialización, pues en el proceso de su producción genera numerosas fuentes de empleo y por tanto de desarrollo del cantón. Por esta razón el Gobierno del cantón Celica busca mejorar las condiciones en las que se almacena este producto ya que actualmente no son las más adecuadas e intervienen de manera desfavorable en la calidad del grano y como consecuencia en el precio de venta del producto.

Este proyecto va destinado al diseño de un sistema de almacenamiento adecuado que permita mantener el producto en buenas condiciones por mucho más tiempo; se trata de un silo metálico cilíndrico que almacenará el maíz en forma eficiente asegurando un grano de calidad.

1.2 Planteamiento del problema

En la parte alta de Celica, en donde se cultivan en su mayor parte maíz blanco y maíz amarillo duro, existen problemas que han surgido como consecuencia del desarrollo agrícola, de éstos el mayor, es la falta de un sistema para el almacenamiento del producto. Se debe considerar que los productores almacenan por su propia cuenta el grano que cosechan, en galpones, los que no guardan las condiciones necesarias para que este se conserve por el tiempo necesario.

La necesidad de manejar a este grano en forma adecuada para lograr una mayor producción y una eficiente comercialización ha llevado al municipio de Celica a buscar una solución a este problema, y de esta manera mejorar las condiciones sociales y económicas de los productores de maíz, asegurándoles un ingreso seguro y a la vez generar recursos para la administración pública a favor de los habitantes del Cantón.

1.3 Justificación del problema

Este proyecto nace de la necesidad real del Municipio de Celica de la provincia de Loja pues requiere el diseño estructural de un sistema eficiente para almacenamiento de maíz amarillo duro, que es el producto que más se cultiva y comercializa en toda la zona, con la finalidad de utilizarlo para la construcción.

Se ha considerado que la mejor opción para el almacenamiento del maíz es un silo metálico ya que es una tecnología eficiente la cual garantiza su conservación por más tiempo disminuyendo considerablemente las pérdidas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar el diseño de un silo cilíndrico de fondo plano para almacenamiento de maíz con capacidad de 50 toneladas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar un silo cilíndrico metálico de fondo plano.
- Cumplir con los requisitos de capacidad y factores de diseño a fin de que el silo resista las cargas aplicadas sin que ocurran fallas.
- Elaborar los planos respectivos de conjunto y de detalle.
- Cumplir con la norma vigente UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.

1.5 Alcance del proyecto

Este proyecto está orientado al diseño de un silo para almacenamiento de maíz; será un silo cilíndrico, metálico, de fondo plano, que se encontrará apoyado sobre una base plana de concreto y tendrá la capacidad para almacenar y soportar 50 toneladas.

Estará provisto de una compuerta por donde se introducirá el producto a almacenar, una compuerta inferior para descargar el mismo, boquillas de venteo que se deben colocar en la parte alta del techo, manhole para la limpieza, escaleras en el cuerpo del silo.

Para el cálculo se tomará en cuenta las presiones de llenado y vaciado del silo, las cargas debidas al viento, cargas en el techo, cargas debidas a instalaciones de descarga mecánica, entre otras. Finalmente, se realizarán los respectivos planos de conjunto y de despiece.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 El grano de maíz

Maíz, nombre común de una gramínea muy cultivada como alimento básico para el hombre y una importante planta forrajera para los animales. Con el trigo y el arroz, el maíz es uno de los cereales más cultivados en el mundo.

El maíz se utiliza para consumo humano pero principalmente para alimentar a cerdos, ganado vacuno y aves de corral. Además tiene un gran número de aplicaciones industriales como la producción de glucosa, alcohol o la obtención de aceite y harina.

La mazorca de maíz y sus desechos, hojas, tallos, raíces y orujos contiene gran cantidad de furfural, un líquido utilizado en la fabricación de fibras de nylon y plásticos de fenol-formaldehído, el refinado de resinas de madera, la obtención de aceites lubricantes a partir del petróleo y la purificación del butadieno para producir caucho sintético. Con las mazorcas molidas se fabrica un abrasivo blando. Con las mazorcas de gran tamaño de cierta variedad se hacen pipas para tabaco. El aceite de maíz, extraído del germen del grano, se consume como grasa alimenticia, tanto para cocinar como crudo o solidificado, en forma de margarina; también se emplea en la fabricación de pinturas, jabones y linóleo. La investigación de nuevas fuentes de energía se ha fijado en el maíz; muy rico en azúcar, a partir de él se obtiene un alcohol que se mezcla con petróleo para formar el llamado gasohol; las partes vegetativas secas son importante fuente potencial de combustible de biomasa.

2.2 Características

2.2.1 Estructura física

Con respecto a la estructura del grano de maíz, es necesario considerar previamente su estructura desde el punto de vista de su utilización como alimento directo, así como también de su aprovechamiento industrial.

El maíz es un cereal de grano grande, formado de tres partes principales:

- La envoltura o cubierta exterior, en forma de cutícula delgada, fina y fibrosa, que protege al grano. Esta envoltura comprende a su vez el pericarpio o envoltura propiamente dicha y la cofia, que es un pequeño casquete que cubre la punta del grano y protege al embrión. La envoltura total representa en promedio 6% del peso total del grano.
- El germen o embrión, situado en la parte basal y ventral del grano, es rico en aceite, proteínas y minerales, representando del 9.5 al 12 % del peso total del grano.
- El endospermo o albumen es la parte feculosa y glutinosa del grano que rodea al germen excepto en su cara ventral donde el germen es cubierto solo por el pericarpio. La capa superior del endospermo es la aleurona, de espesor muy fino muy rica en proteínas y grasas. El endospermo representa aproximadamente el 80-85 % del peso del grano.¹

En la figura 1 se pueden observar las partes principales de un grano de maíz.

¹ FAO, Cruz, *Avances en la ingeniería agrícola: técnicas de almacenamiento*, Roma, 1990. p3

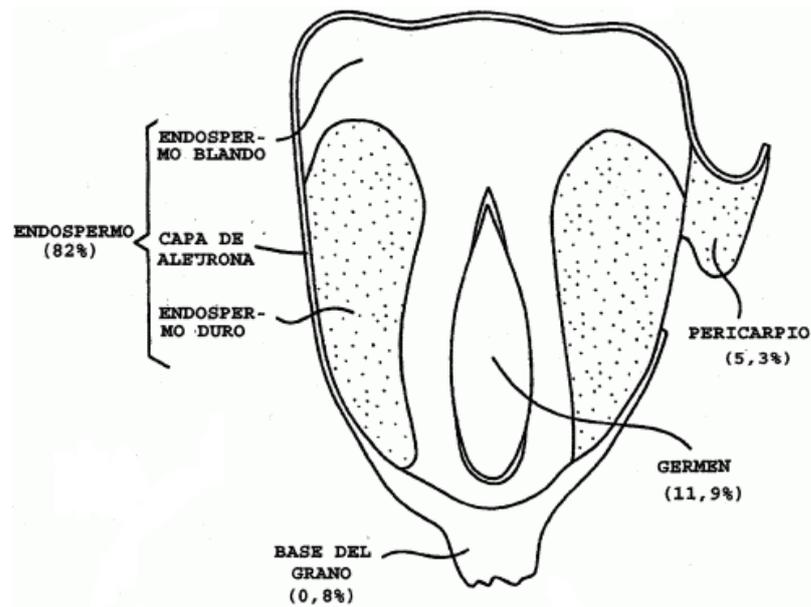


Figura 1. Estructura del grano de maíz

Fuente: <http://patentados.com/invento/proceso-para-la-molienda-de-maiz.html>

2.2.2 Composición química

El grano de maíz es rico en almidón y relativamente pobre en celulosa y proteínas. Con excepción de la avena el maíz es el cereal más rico en grasas, es pobre en calcio y relativamente rico en fósforo, contiene pequeñas cantidades de vitamina D, aceptables proporciones de vitamina A en el caso del maíz amarillo y de vitaminas B y E.

El grano tiene una composición relativamente sencilla considerándose en promedio, cuatro quintas partes del mismo están constituidas por almidón y otros carbohidratos, y la quinta parte restante está constituida por proteínas, celulosa y elementos minerales. Se estima que en promedio una tonelada de grano proporciona 30 Kg de

aceite, 260 Kg de sustancias alimenticias básicas y 550 Kg de almidón. La composición aproximada del grano de maíz se indica en la Tabla 1.²

Tabla 1. Composición química del grano de maíz

Parte del grano	Cenizas %	Proteínas %	Aceite %	Azúcar %	Carbohidratos Almidón %	% del peso del grano entero
Endospermo	0.31	9.4	0.8	0.64	86.4	81.9
Germen o embrión	10.10	18.8	34.5	10.8	8.2	11.9
Pericarpio	0.84	3.7	1.0	0.34	7.3	5.3
Raquilla	1.56	9.3	9.3	1.54	5.3	0.8

Fuente: IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura)

2.2.3 Propiedades físicas

2.2.3.1 Forma y tamaño

Los granos y semillas se pueden separar con base a la forma; los redondos tienden a deslizarse fácilmente y se pueden separar de los alargados o irregulares por gravedad o por fuerza centrífuga.³

La tabla 2 recoge las dimensiones más importantes de algunos granos.

² ICA, *Experiencias en el cultivo de maíz en el área andina*, volumen III, Quito Ecuador, 1995. p 11

³ OSPINA Julio, Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. p 59

Tabla 2. Dimensiones de algunos granos y semillas

GRANO	Diámetro mayor (mm)	Diámetro medio (mm)	Diámetro menor (mm)	Número granos por Kg	Contenido de humedad(bh) (%)
Arroz cáscara	8.46	3.13	2.26	35274	8.9
Avena	12.90	2.88	2.27	29670	8.6
Maíz amarillo	12.59	8.01	4.34	2860	10
Soya	9.14	7.74	6.03	6430	14.7
Cebada	10.94	3.67	2.97	26930	7.7
Trigo	6.58	3.21	3.10	23760	7.1
Quinua	2.08	1.11		333334	13.5
Arveja	8.98	7.8	7.5	2758	13.7

Nota: bh es el contenido de humedad del grano en base húmeda. Es utilizada comúnmente en el mercadeo y el almacenamiento del grano, y, es la proporción del peso del agua que posee el grano entre su peso total.

Fuente: OSPINA Julio, Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos

2.2.3.2 Densidad

La densidad se define como la relación entre la masa del producto y el volumen del mismo. Se distinguen dos tipos de densidad:

Densidad aparente; es la relación entre el peso y el volumen total de la masa del producto, incluyendo los espacios intersticiales que dejan los granos entre sí. También se denomina densidad volumétrica.

Densidad real; es la relación entre la masa del producto y el volumen real ocupado por los granos (excluyendo los espacios vacíos). Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho_r = \frac{m}{V} \quad \text{(Ecuación 1)}^4$$

Donde:

- m Peso del producto (Kg)
- V Volumen real del producto (m^3)
- ρ_r Densidad real (Kg/m^3)

2.2.3.3 Porosidad

Se refiere a la cantidad de espacios vacíos que dejan los granos entre sí dentro de un recipiente, los cuales son ocupados por el aire. Se expresa como la relación entre el volumen de dichos vacíos y el volumen total.

En la tabla 3 se recogen los valores de densidad y porosidad de algunos granos.⁵

2.3 Factores que deterioran el grano

2.3.1 Respiración: Manifestación de la actividad metabólica de los granos

Los granos son organismos vivos y como tales respiran. El mecanismo de la respiración se puede representar esquemáticamente como la degradación del almidón, el cual al combinarse con el oxígeno produce anhídrido carbónico, vapor de agua y desprende calor.

Almidón (grano) + oxígeno (aire) \longrightarrow Anhídrido carbónico + agua + calor.

⁴ OSPINA Julio, Op cit. p 61

⁵ OSPINA Julio, Op cit. p 66

Tabla 3. Valores de densidad aparente, densidad real y porosidad de algunos granos

PRODUCTO	Contenido humedad (%bh)	Densidad aparente (Kg/m³)	Densidad real (Kg/m³)	Porosidad
Soya	8.9	709	1166	36.1
Maíz	7.3	753	1232	
	13.0	737		
	14.3	726	1232	41.2
Arroz cáscara	12.0	578	1324	48.5
Cebada	10.7	605	1240	47.9
Trigo	10.8	386	1300	42.6
Quinoa	18.3	689	1185	41.8

Fuente: OSPINA Julio, Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos

Este fenómeno degradatorio es un proceso autoacelerado: cuanto más elevados sean el calor y el contenido de humedad más intensa será la respiración del grano. Esta reacción se observa frecuentemente cuando se almacenan granos húmedos, en los que se provoca un rápido aumento de temperatura, el desarrollo de mohos y la compactación de los granos. Cuando estos fenómenos se hacen evidentes es una muestra de que las condiciones de almacenamiento son muy defectuosas. Para conseguir condiciones de almacenamiento que sean seguras es necesario reducir los procesos degradatorios al mínimo mediante el control de los principales factores físicos de deterioración, tales como: la temperatura y la humedad.

2.3.2 Temperatura

La temperatura afecta en gran medida al almacenamiento de los granos porque aumenta su intensidad de respiración del producto almacenado. Se acepta en términos generales que el calor liberado por una masa de granos se duplica por cada incremento de 5°C de la temperatura, manteniéndose este efecto hasta aproximadamente 28°C; por encima de esta temperatura la influencia se va reduciendo. Por tanto, es esencial almacenar el grano a la temperatura más baja posible.⁶

El tiempo de almacenamiento y la conservación de su calidad están estrechamente correlacionados con el contenido de humedad y la temperatura de la masa de granos, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Tiempo seguro de almacenamiento en función de las diferentes temperaturas y el contenido de humedad de los granos

Contenido de Humedad (% base húmeda)	Temperatura del grano (° C)				
	10	15	20	25	30
	Días				
14	1314	634	368	218	129
16	339	164	95	56	33
20	64	31	19	11	7

Fuente: FAO, Cruz J, Avances en la ingeniería agrícola: Técnicas de almacenamiento.

⁶ FAO, Cruz. Op. Cit.

2.3.3 Humedad

La humedad es ciertamente el factor principal del deterioro del grano. Aumenta la intensidad de respiración y acelera los procesos de deterioro interno. En general se acepta que el calor liberado por una masa de granos se duplica por cada aumento adicional del 1.5 % en su contenido de humedad. Así, a una temperatura determinada, se puede considerar que el grano almacenado con el 15 por ciento de humedad se deteriora dos veces más rápido que aquel almacenado con el 13.5 por ciento.⁷

Cada producto debe tener un contenido de humedad adecuado para que pueda ser almacenado con seguridad, como aparece en la tabla 5.

Tabla 5. Contenido de humedad para el almacenamiento adecuado de algunos productos

PRODUCTO	CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GRANO (%)
Maíz	13
Arroz con cáscara	13-14
Arroz	13
Sorgo	13
Chicharo	15
Trigo	13
Alubias	14
Habas de soja	12
Cacahuetes	7
Cacao	7

Fuente: FAO, Cruz J, Avances en la ingeniería agrícola: técnicas de almacenamiento, Roma, 1990, pág.10.

Los factores de temperatura y humedad de almacenamiento del grano están relacionados el uno con el otro y presentan un efecto estrechamente combinado. Las

⁷ FAO, Cruz. Op.cit. p 7

curvas de equilibrio aire-grano muestran que cuando más alta sea la temperatura la humedad del grano deberá ser tanto más baja para asegurar un almacenamiento sin deterioros. En la figura 2 se muestran los diferentes deterioros que se pueden presentar dependiendo de la temperatura y de la humedad del grano.

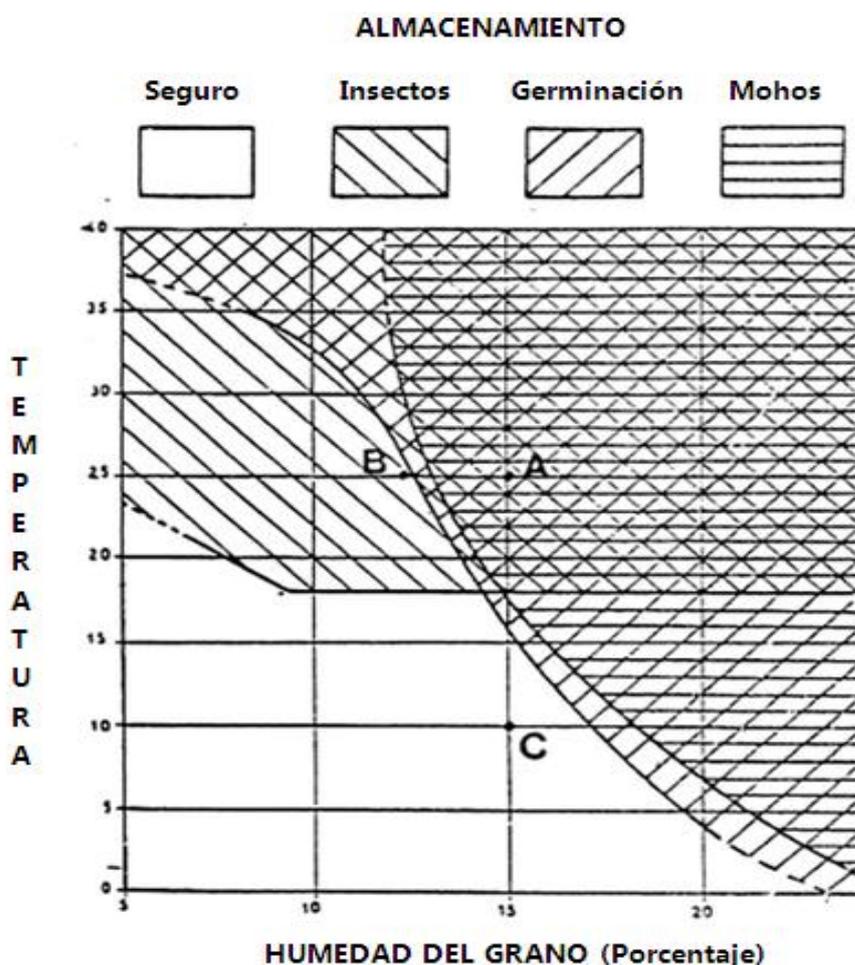


Figura 2. Diagrama de almacenamiento de grano (Burgess y Burrell)

Fuente: FAO, Cruz J, Avances en la ingeniería agrícola: técnicas de almacenamiento, Roma, 1990, pág.13.

Observaciones: Ver figura 2.

PUNTOS	CARACTERÍSTICAS	ATACADO POR
A	Temperatura 25°C y Contenido de humedad: 15%	Insectos, Mohos, Germinación
B	Temperatura 25°C y Contenido de humedad: 12.5%	Insectos
C	Temperatura 10°C y Contenido de humedad: 15%	Nada

2.4 Silos

2.4.1 Clasificación de los silos

Los silos se pueden clasificar de acuerdo a distintas categorías de clases de evaluación de las acciones, tal y como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación recomendada para las clases de evaluación de silos

Clase de evaluación de acción	Descripción
Clase de evaluación de acción 3	Silos de capacidad mayor de 10000 toneladas Silos de capacidad mayor de 1000 toneladas en las que puede producirse cualquiera de las siguientes situaciones de cálculo: a) descarga excéntrica con $e_0/dc > 0,25$ [ver la figura 3)]. b) silo poco esbelto con excentricidad en la superficie superior $e_t/dc > 0,25$
Clase de evaluación de acción 2	Todos los silos cubiertos por la Norma UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos. y que no tengan ubicación en otra clase.
Clase de evaluación de acción 1	Silos con capacidad menor de 100 toneladas.

Fuente: Norma UNE - EN1991: *Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.*

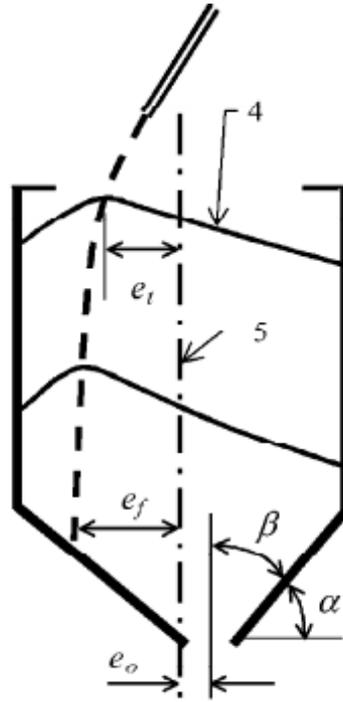


Figura 3. Silo poco esbelto con excentricidad en la superficie superior

Fuente: Norma UNE - EN1991: *Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.*

Una clasificación del silo según la relación de aspecto hc/dc , se muestra en la tabla 7. En este caso, hc es la altura del segmento vertical de la pared del silo, mientras que dc , es la dimensión característica interior de la sección de dicho cuerpo vertical.⁸

Tabla 7. Clasificación de esbeltez del silo

Relación de aspecto del silo, hc/dc	Clase de silo
$hc/dc \geq 2$	Esbelto
$1 < hc/dc < 2$	Esbeltez media
$0.4 < hc/dc \leq 1$	Poco esbelto
$hc/dc \leq 0.4$	Silo granero(fondo plano)

Fuente: Norma UNE - EN1991: *Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.*

⁸ Norma UNE - EN1991: *Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.*

Una clasificación del silo según la relación dc/t , se refleja en la tabla 8, donde dc es la dimensión característica interior de la sección de dicho cuerpo vertical, y t es el espesor de la pared del silo.⁹

Tabla 8. Clasificación del silo según el espesor de la pared

Relación de esbeltez del silo, dc/t	Clase de silo
$dc/t > 200$	Pared delgada
$dc/t < 200$	Pared gruesa

Fuente: Norma UNE - EN1991: *Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.*

La clasificación del silo según la superficie de la pared, se observa en la tabla 9.

2.4.2 Silos para almacenamiento de productos granulares

2.4.2.1 Flujo de vaciado de los productos granulares

El objetivo de conocer la forma de flujo de vaciado de los productos granulares, es determinar las presiones que éste producto almacenado transmite a las paredes y así poder diseñar un silo con las máximas garantías de seguridad.

Algunas de las formas del flujo durante el vaciado de acuerdo a ciertos autores son:

⁹ Norma UNE - EN1991. Op. Cit.

Tabla 9. Clasificación del silo según el tipo de superficie de la pared

Categoría	Título descriptivo	Materiales de la pared típicos
D1	Rozamiento bajo clasificado como “Deslizante”	Acero inoxidable laminado en frío Acero inoxidable pulido Superficie con un revestimiento para bajo rozamiento Aluminio pulido Polietileno de peso molecular ultraelevado
D2	Rozamiento moderado clasificado como “Liso”	Acero dulce liso (construcción soldada o atornillada) Acero inoxidable terminado con fresa Acero al carbono galvanizado Aluminio oxidado Superficie con un revestimiento para resistencia frente a la corrosión o al desgaste abrasivo
D3	Rozamiento elevado clasificado como “Rugoso”	Hormigón encofrado, hormigón enfoscado u hormigón envejecido Acero al carbono envejecido (oxidado) Acero resistente a la abrasión Piezas cerámicas
D4	Irregular	Paredes onduladas horizontalmente Chapa nervada con nervios horizontales Paredes especiales con grandes anomalías

Fuente: Norma UNE - EN1991: *Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.*

a) **Forma del flujo durante el vaciado según Chwetzoff**

Según el autor el proceso de vaciado se puede resumir en tres zonas (ver figura 4):

1. Zona superior de producto granular moviéndose a velocidad constante.
2. Zona en la que el material granular se mueve a velocidad variable hacia la boca de salida.
3. Producto granular en reposo.¹⁰

Fijándose en la figura 4 se puede predecir las presiones que el producto granular ejerce sobre las paredes y que se puede dividir en tres zonas anteriormente definidas:



Figura 4. Forma del flujo durante el vaciado, de acuerdo con Chwetzoff

Fuente: RAVENET, Juan. *Silos-Flujo de vaciado, formación de bóvedas, efectos*.
Barcelona: Editores técnicos asociados, 1983,355.

¹⁰ RAVENET, Juan, *Silos-Flujo de vaciado, formación de bóvedas, efectos*, Barcelona: Editores técnicos asociados, 1983.

b) Forma del flujo durante el vaciado según Deutsch y Clyde

Según Deutsch y Clyde el flujo de vaciado se puede resumir en las cuatro zonas siguientes (ver figura 5):

1. Las partículas granulares se mueven a velocidad constante (flujo másico).
2. Las partículas granulares con velocidad variable y desplazamientos transversales se denomina zona de alimentación.
3. Las partículas se mueven a velocidad constante dentro de un conducto.
4. Las partículas permanecen en reposo.¹¹

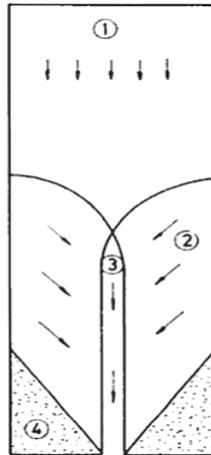


Figura 5. Forma del flujo durante el vaciado, según Deutsch y Clyde

Fuente: RAVENET, Juan. Silos-Flujo de vaciado, formación de bóvedas, efectos. Barcelona: Editores técnicos asociados, 1983,355.

c) Forma del flujo durante el vaciado según Mc Cabe

En la Figura 6 se ha dibujado la forma de flujo durante el vaciado.

Según los ensayos realizados por Mc Cabe a al abrirse la boca de salida de un silo cilíndrico, rápidamente aparece un nivel donde se forma un cráter central y situado un poco por debajo de la mitad del silo.

¹¹ RAVENET, Juan. Op. Cit.

A medida que el proceso de vaciado avanza quedan definidas cuatro zonas claramente diferenciadas (Ver figura 6):

1. Zona de reposo
2. Zona de vaciado libre
3. Zona de equilibrio dinámico
4. Zona de flujo másico

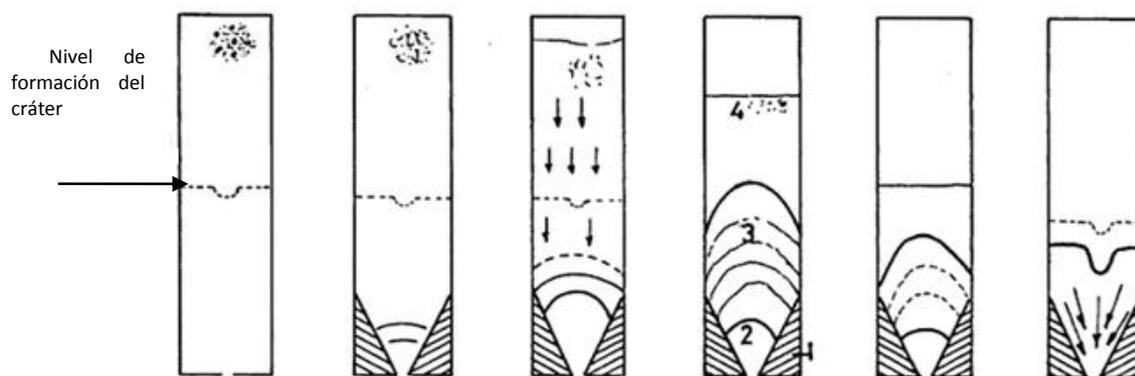


Figura 6. Forma del flujo durante el vaciado, según Mc Cabe

Fuente: RAVENET, Juan. Silos-Flujo de vaciado, formación de bóvedas, efectos.
Barcelona: Editores técnicos asociados, 1983,355.

d) Forma del flujo durante el vaciado según Tingate

En la Figura 7 se puede ver las tres fases que se presentan durante de vaciado en un silo alto.

Inicialmente se forma un flujo de vaciado tipo conducto, con casi todo el material almacenado en reposo. A medida que prosigue el vaciado el material en reposo es mínimo y por el contrario la zona de vaciado o conducto de vaciado aumenta, así como la zona de alimentación al conducto; por encima el material se mueve uniformemente.

Al final del vaciado la zona de material en reposo se ha extendido nuevamente a una porción bastante elevada.¹²

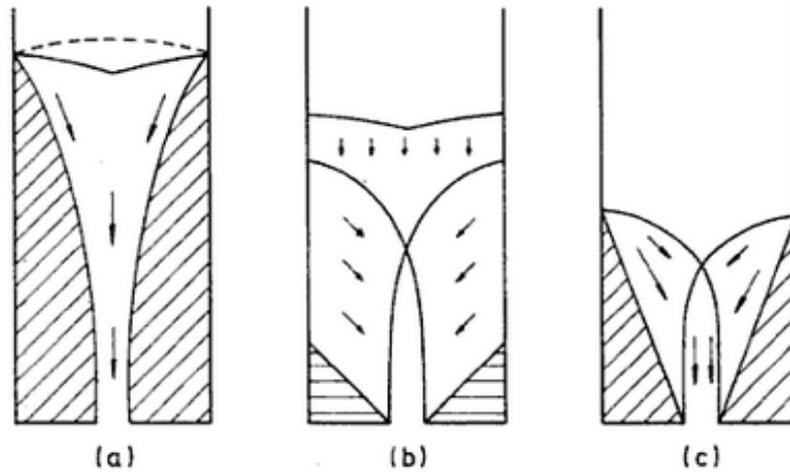


Figura 7. Formas del flujo durante el vaciado, de acuerdo con Tingate

Fuente: RAVENET, Juan. Silos-Flujo de vaciado, formación de bóvedas, efectos.

Barcelona: Editores técnicos asociados, 1983,355.

2.5 Consideraciones de diseño

2.5.1 Silos poco esbeltos

2.5.1.1 Cargas de llenado sobre las paredes verticales

a) Se calculan los valores de la presión horizontal después del llenado P_{hf} y de la presión de tracción por rozamiento en la pared después del llenado P_{wf} como:

$$P_{hf} = P_{ho} Y_R \quad (\text{Ecuación 2})^{13}$$

$$P_{wf} = \mu P_{hf} \quad (\text{Ecuación 3})^{14}$$

¹² RAVENET, Juan. Op. Cit.

¹³ Norma UNE - EN1991. Op. Cit.

¹⁴ Idem

Siendo,

$$Pho = \gamma K z_o = \gamma \frac{1}{\mu} \frac{A}{U} \quad (\text{Ecuación 4})^{15}$$

$$Y_R = \left(1 - \left\{\left(\frac{z-h_o}{z_o-h_o}\right) + 1\right\}^n\right) \quad (\text{Ecuación 5})^{16}$$

$$z_o = \frac{1}{K \mu} \frac{A}{U} \quad (\text{Ecuación 6})^{17}$$

$$n = -(1 + \tan \phi_r)(1 - h_o/z_o) \quad (\text{Ecuación 7})^{18}$$

Además

h_o Valor de z en el punto de contacto más elevado entre el sólido y la pared [ver la Figura 9].

b) Para un silo de sección circular de radio r , llenado simétricamente, h_o debería calcularse mediante:

$$h_o = \frac{r}{3} \tan \phi_r \quad (\text{Ecuación 8})^{19}$$

γ Valor del peso específico

μ Valor del coeficiente de rozamiento con la pared del silo para un sólido que desliza por una pared vertical

¹⁵ Idem

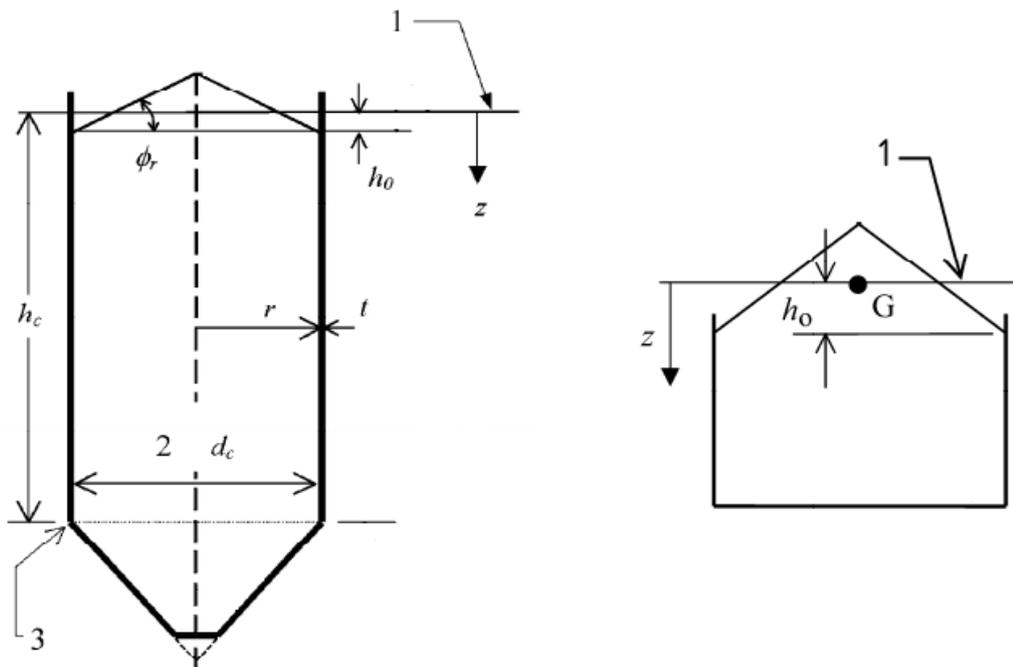
¹⁶ Idem

¹⁷ Idem

¹⁸ Idem

¹⁹ Norma UNE - EN1991. Op. Cit.

- K Valor del coeficiente de presiones laterales
- z Profundidad desde la superficie equivalente del sólido
- A Área de la sección transversal del silo
- U Perímetro interior de la sección transversal del silo
- ϕ_r Ángulo de talud natural del sólido (véase anexo C)
- Y_R Función de la variación de la presión de silos poco esbeltos con la profundidad
- z_o Profundidad característica de Janssen



1. Superficie equivalente
2. Dimensión interior
3. Transición

Figura 8. Formas de silo con notación de las dimensiones.

Fuente: Norma UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.

- c) Se calcula el valor de la tensión vertical P_{vf} a cualquier profundidad después del llenado como:

$$P_{vf} = \gamma z_v \quad (\text{Ecuación 9})^{20}$$

Siendo

$$z_v = h_o - \frac{1}{(n+1)} \left(z_o - h_o - \frac{(z+z_o-2h_o)^{n+1}}{(z_o-h_o)^n} \right) \quad (\text{Ecuación 10})^{21}$$

- d) Se calcula el valor de la tensión vertical resultante n_{zSk} (compresión) en la pared por unidad de longitud del perímetro a cualquier profundidad z como:

$$n_{zSk} = \int_0^z P_{wf}(z) dz = \mu P_{ho} (z - z_v) \quad (\text{Ecuación 11})^{22}$$

Donde z_v es una profundidad y viene dado por la ecuación 10.

2.5.1.2 Carga concentrada de llenado

No es necesario considerar la carga concentrada de llenado ($C_{pf} = 0$) para silos poco esbeltos ($h_c/d_c \leq 1,0$) en cualquiera de las clases de evaluación de acciones.²³

²⁰ Norma UNE - EN1991. Op. Cit

²¹ Idem

²² Norma UNE - EN1991. Op. Cit.

²³ Idem

2.5.1.3 Cargas de descarga sobre las paredes verticales

Para silos poco esbeltos ($h_c/d_c \leq 1,0$), las cargas de descarga simétricas pueden considerarse idénticas a las cargas de llenado.²⁴

2.5.1.4 Carga concentrada de descarga

No se debería tener en cuenta la carga concentrada de descarga ($C_{pe} = 0$) para silos poco esbeltos en la clase de evaluación de acciones 1.²⁵

2.5.1.5 Cargas sobre el fondo del silo

Se debe determinar la presión vertical media en la transición entre el segmento de pared vertical y el fondo del silo como:

$$P_{vft} = C_b P_{vf} \quad (\text{Ecuación 12})^{26}$$

Donde:

P_{vft} Valor de la presión vertical de llenado para una coordenada z igual a la altura de la pared vertical h_c [es decir, en la transición: ver la Figura 8.]

C_b Coeficiente de mayoración de cargas que tiene en cuenta la posibilidad de que el segmento de pared vertical transfiera mayores cargas al fondo ($C_b = 1.3$).

²⁴ Idem

²⁵ Idem

²⁶ Norma UNE - EN1991. Op. Cit.

2.5.1.6 Presiones verticales sobre el fondo del silo

La presión vertical P_{vsq} que actúa sobre el fondo plano de un silo poco esbelto puede tomarse como:

$$P_{vsq} = P_{vf} + \Delta P_{sq} \left(\frac{z - h_c / d_c}{z - h_{tp} / d_c} \right) \quad (\text{Ecuación 13})^{27}$$

Siendo

$$\Delta P_{sq} = P_{vtp} - P_{vho} \quad (\text{Ecuación 14})^{28}$$

$$P_{vtp} = \gamma h_{tp} \quad (\text{Ecuación 15})^{29}$$

Donde:

P_{vtp} Componente uniforme de la presión vertical, obtenida mediante la ecuación 9 con $z = h_c$;

P_{vho} Presión vertical en la base del cono superior, que se obtiene mediante la ecuación 9 con $z = h_o$;

h_o Profundidad de la base del cono superior bajo la superficie equivalente, definida como el punto más bajo de la pared que no está en contacto con el sólido almacenado (ver la Figura 9);

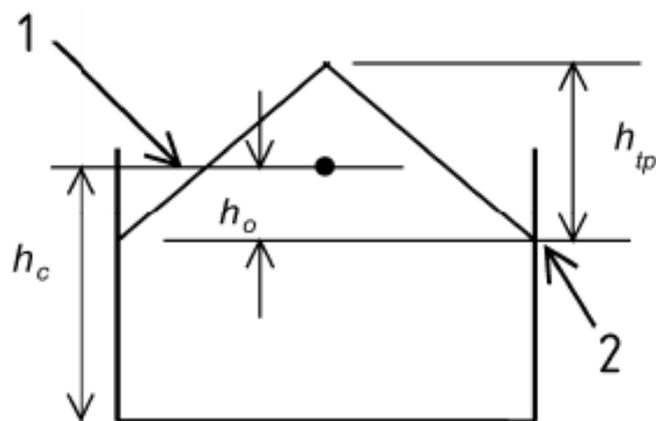
h_{tp} Altura total del cono superior, definida como la distancia vertical desde el punto más bajo de la pared que no está en contacto con el sólido almacenado hasta la partícula almacenada más elevada (ver la figura 9);

h_c Es la profundidad de la base del silo medida desde la superficie equivalente.

²⁷ Idem

²⁸ Idem

²⁹ Idem.



1. Superficie equivalente
2. Punto más bajo sin contacto con el sólido

Figura 9. Presiones en el fondo de un silo poco esbelto

Fuente: Norma UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.

La presión vertical P_{vft} dada por la ecuación 12 se puede tomar tanto para el momento posterior al llenado como durante la descarga.

2.5.2 Diseño del cuerpo

Después del cálculo de las presiones en las paredes verticales del silo, se procede al dimensionado del espesor de la lámina o chapa de acero que formará la pared del cuerpo del silo (el espesor de las láminas que conforman las paredes del cuerpo en ningún caso puede ser menor a lo indicado en la tabla 10), sin tener en cuenta el peso propio de esta. Para esto se puede utilizar lo expresado en el libro: “RAVENET, JUAN. Silos. 1992”.

Tabla 10. Espesor mínimo de placas del cuerpo según el diámetro del tanque

Diámetro (m)	Espesor mínimo (mm)
D < 15	5
15 < D < 36	6
36 < D < 60	8
D > 60	10

Fuente: API 650 - Sección 5.6.1.1

Para las presiones laterales:

$$t = \frac{p_h \times dc \times 10}{2 \times \sigma_t \times 100} \quad (\text{Ecuación 16})^{30}$$

Para las fuerzas de rozamiento sobre la pared:

$$t = \frac{p_r \times dc \times 10}{2 \times \sigma_t \times 100} \quad (\text{Ecuación 17})^{31}$$

Donde:

t Espesor de la chapa en mm.

p_h Valor de la presión horizontal sobre las paredes (kg/ m2)

dc Diámetro del silo

σ_t Coeficiente de trabajo de la chapa a tracción (kg/ m²)

De los dos valores obtenidos, se toma la suma de ambos.

³⁰ Norma UNE - EN1991. Op. Cit

³¹ Idem

2.5.3 Diseño del techo

Existen dos tipos de cubiertas para tanques de almacenamiento que son: techos fijos y techos flotantes. Dentro de los techos fijos se tiene tres tipos: cónicos, de domo y de sombrilla, los cuales pueden ser autosoportados o soportados por estructura (para el caso de techos cónicos de tanques de gran diámetro).

El techo cónico es una cubierta con la forma y superficie de un cono recto. El tipo domo es un casquete esférico, y el de tipo sombrilla, es un polígono regular curvado por el eje vertical.

Los techos autosoportados ya sean tipo cónico, domo, o sombrilla, tiene la característica de estar apoyados únicamente en su periferia, calculados y diseñados para que su forma geométrica, en combinación con el espesor mínimo requerido, absorban la carga generada por su propio peso más las cargas vivas, a diferencia de los techos soportados que contarán con una estructura que admita dichas cargas.

Independientemente de la forma o el método de soporte, los techos son diseñados para soportar una carga viva de por lo menos, 1.76 Kg/ cm^2 (25 lb / pie^2), más la carga muerta ocasionada por el mismo.

Las placas del techo tendrán un espesor mínimo nominal de 4.7 mm. (3/16 pulg.) o lámina calibre 7. Un espesor mayor puede ser requerido para el caso de techos autosoportados; la corrosión permisible puede ser incluida al espesor calculado a menos que el usuario especifique su exclusión, lo que es válido también a los techos soportados.

2.5.3.1 Diseño y cálculo de techos cónicos autosoportados

Los techos cónicos, autosoportados son empleados en tanques relativamente pequeños. Este consiste en un cono formado de placas soldadas a tope, el cual por su forma física, además de confirmar mediante un análisis de flexión basado en la teoría de placas, es capaz de sostenerse sin ningún elemento estructural y únicamente soportado en su periferia por el perfil de coronamiento.

Estos techos son diseñados y calculados para tanques que no exceden de un diámetro de 18288mm. (60 pies), pero es recomendable fabricar estos en un diámetro máximo de 12,192mm (40 pies).

Los techos cónicos autosoportados tendrán como máximo una pendiente de 37°, y como mínimo 9.5°, con respecto a la horizontal.

El espesor estará determinado por la ecuación 18, pero no deberá ser menor de 4.76 mm. (3/16 pulg.), y no mayor de 12.7 mm. (1/2 pulg.).³²

$$T_t = \frac{dc}{4800 \text{ Sen}\theta} \quad (\text{Ecuación 18})^{33}$$

Donde:

T_t Espesor mínimo requerido (cm.).

dc Diámetro del tanque (cm.).

θ Ángulo con respecto a la horizontal (grados).

Este espesor será incrementado en la siguiente relación cuando la suma de las cargas muertas más las cargas vivas excedan 220 Kg /m (45lb/ pie), más cualquier corrosión permisible.

³² Norma API - 650

³³ Idem

$$\sqrt{\frac{Cm+Cv}{220}}$$

(Ecuación 19)³⁴

Donde:

Cm Carga muerta (Kg /m2).

Cv Carga viva (Kg / m2).

Para este tipo de techos, se recomienda un espesor de 4.76 mm (3/16pulg.) a 9.52 mm (3/8pulg.).

2.5.4 Estabilidad por sismo

El silo será diseñado para resistir los movimientos telúricos que se ocasionan en un sismo y provocan movimientos de alta y baja frecuencia; los movimientos de alta frecuencia originan un movimiento lateral del terreno donde está instalado el silo, y los movimientos de baja frecuencia provocan un movimiento de masa del grano almacenado lo que genera un oleaje dentro del silo.

El movimiento lateral del grano, genera fuerzas que actúan en el centro de gravedad del silo, ocasionando la inestabilidad del conjunto, que multiplicado por el brazo de palanca respecto al fondo, originan un momento de volteo, produciendo una compresión longitudinal y provocando la deformación del cuerpo. El silo será diseñado para resistir este fenómeno de acuerdo con la realidad sísmica del Ecuador.

Para el efecto se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones y conceptos:

³⁴ Idem

2.5.4.1 Factor de zona sísmica Z

El lugar donde se construirá el silo determinará una de las seis zonas sísmicas del Ecuador, de acuerdo con la figura 10. Una vez que se ha identificado la zona sísmica correspondiente se adoptará el valor del factor de zona, Z, según la tabla 11, o para mayor exactitud se puede ver la tabla 12 que incluye el listado de algunos cantones de la provincia de Loja con el valor correspondiente.

El valor de Z representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño.

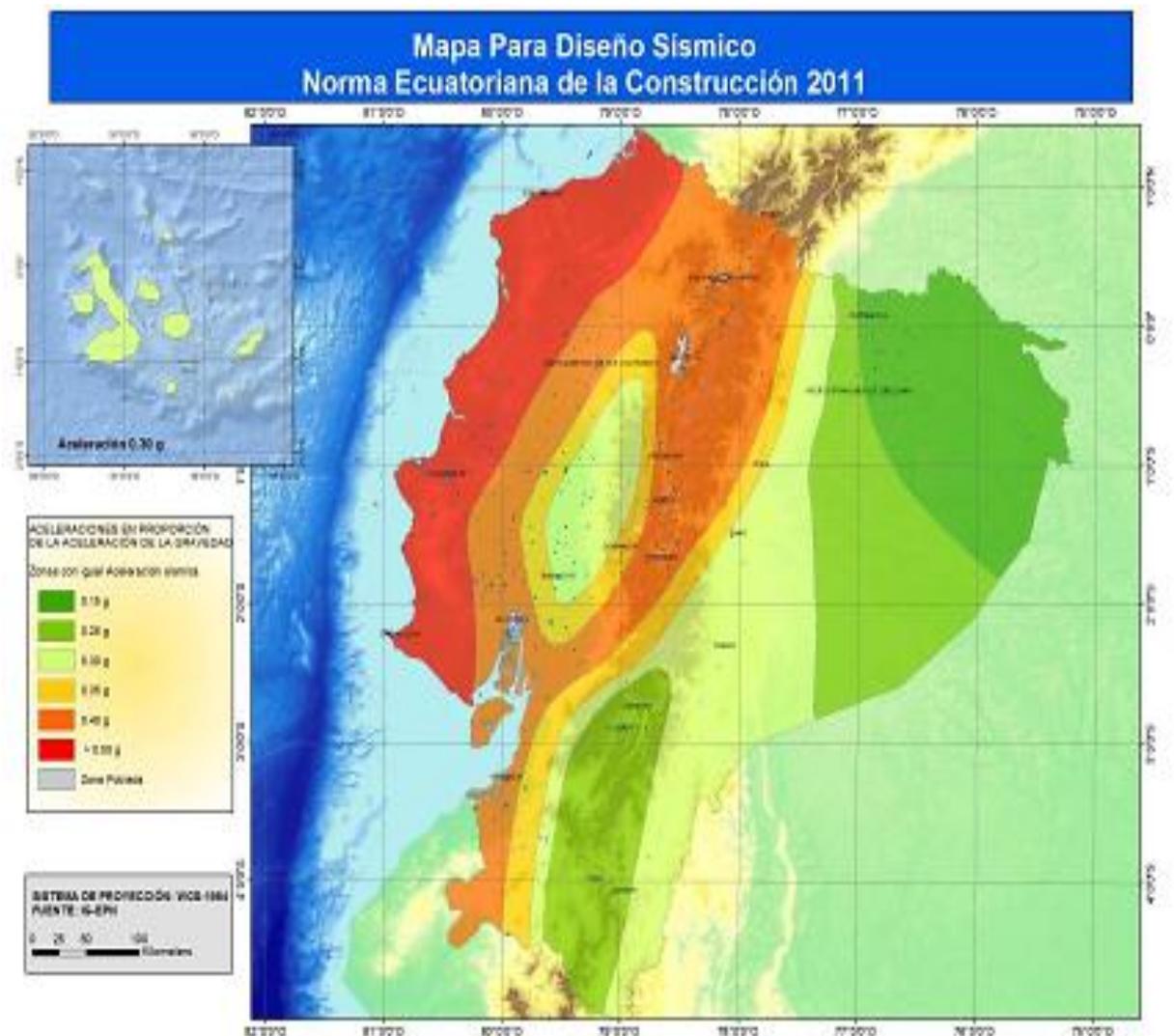


Figura 10. Ecuador, zonas sísmicas para propósito de diseño

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción.

Tabla 11. Valores del factor de zona Z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0,15	0,25	0,30	0,35	0,40	≥0,50
Caracterización de amenaza sísmica	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción

Tabla 12. Poblaciones ecuatorianas y el valor del factor Z

CIUDAD	PROVINCIA	CANTÓN	PARROQUIA	Z
LOJA	LOJA	ESPINDOLA	AMALUZA	0,25
LOJA	LOJA	CALVAS	CARIAMANGA	0,25
LOJA	LOJA	PALTAS	CATACOCCHA	0,30
LOJA	LOJA	CATAMAYO	CATAMAYO	0,25
LOJA	LOJA	LOJA	LOJA	0,25
LOJA	LOJA	CELICA	CELICA	0,35

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción

2.5.4.2 Perfil de suelo

Para evaluar los efectos que produce el sismo sobre el silo hay que tomar en cuenta el tipo de perfil de suelo, que se indica en la tabla 13, sobre el cual se asentará dicha estructura independientemente del tipo de cimentación empleado.

Tabla 13. Tipos de perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfil de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50$ $S_u \geq 100 \text{ KPa} (\approx 1 \text{ Kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > S_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180 \text{ m/s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kfg/cm}^2)$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista.	

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción

Para el caso de este proyecto, el silo estará ubicado en la provincia de Loja donde el tipo de suelo, según el mapa general de suelos del Ecuador, corresponde a la siguiente clasificación: (Ver tabla 14)

Tabla 14. Clasificación del suelo seco

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	Orden	Entisoles
	Suborden	Orthents
	Gran grupo	Ustorthents

Fuente: Mapa general de suelos del Ecuador

Según esto, el suelo en esta región se caracteriza por ser un suelo seco arcilloso con gravas y piedras y presenta una resistencia al corte de $0,25 \geq Su \geq 0,21$.

Por esta razón se ha considerado un suelo con un perfil tipo E por cumplir con la condición de la resistencia al corte del suelo, que de acuerdo a la norma ecuatoriana de la construcción tiene que ser menor a 50 KPa (0,50 Kgf /cm²), ver tabla 13, exigida para este perfil.

2.5.4.3 Coeficientes de amplificación o deamplificación dinámica de perfiles de suelo Fa, Fd y Fs.

En las tablas 15, 16 y 17 se pueden ver los valores del coeficiente Fa, Fd y Fs respectivamente, que dependen del tipo de perfil del suelo donde irá instalado el silo.

Tabla 15. Tipo de suelo y factores de sitio Fa

Tipo de perfil del suelo	Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Valor Z (Aceleración esperada en roca)	0,15	0,25	0,30	0,35	0,40	≥0,50
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	1,3	1,3	1,2	1,18
D		1,8	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15
E		2,2	1,5	1,4	1,17	1,15	1,05
F		Ver nota					

Nota: Para los suelos tipo F no se presentan valores de Fa, debido a que se requiere un estudio especial.

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción.

Tabla 16. Tipo de suelo y Factores de sitio Fd

Tipo de perfil del suelo	Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Valor Z (Aceleración esperada en roca)	0,15	0,25	0,30	0,40	0,40	≥0,50
A		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
B		1	1	1	1	1	1
C		1,6	1,5	1,4	1,35	1,3	1,25
D		2	1,8	1,7	1,55	1,4	1,3
E		3,2	2,8	2,6	2,4	1,6	1,5
F		Ver nota					

Nota: Para los suelos tipo F no se presentan valores de Fv, debido a que se requiere un estudio especial.

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción.

Tabla 17. Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo

F_s

Tipo de perfil del suelo	Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Valor Z (Aceleración esperada en roca)	0,15	0,25	0,30	0,40	0,40	≥0,50
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		1	1,1	1,2	1,25	1,3	1,45
D		1,2	1,25	1,3	1,4	1,5	1,65
E		1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
F		Ver nota					

Nota: Para los suelos tipo F no se presentan valores de F_v, debido a que se requiere un estudio especial.

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción.

2.5.4.4 Factor de importancia

El propósito del factor de importancia **I** es incrementar la demanda sísmica de diseño para estructuras, que por su uso e importancia deben en lo posible sufrir daños menores o en mejores casos permanecer operativas durante y después de un sismo de diseño.³⁵

Este factor de importancia se define de acuerdo al tipo de uso y el destino de la estructura. Ver tabla 18.

³⁵ Norma ecuatoriana de la construcción

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

CATEGORÍA	TIPO DE USO, DESTINO E IMPORTANCIA	FACTOR
Edificaciones esenciales y/o peligrosas	Centros de salud o de emergencia sanitaria, instalaciones militares, estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. 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, 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 clasifican dentro de las categorías anteriores.	1,0

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción.

2.5.4.5 Momento de volteo sísmico

Para el cálculo del momento de volteo sísmico se utilizará la ecuación 20.

$$M_s = \sqrt{[A_i(W_1X_1 + W_sX_s + W_rX_r)]^2 + [A_c(W_2X_2)]^2} \quad (\text{Ecuación 20})^{36}$$

³⁶ Norma API – 650

Donde (ver figura 11):

M_S Momento de volteo (N-m)

A_i Coeficiente de aceleración espectral impulsivo

A_c Coeficiente de aceleración espectral convectivo

W_S Peso total del cuerpo del silo(N)

X_S Altura desde el fondo del cuerpo del silo al centro de gravedad del mismo (m)

W_r Peso total del techo del silo más la carga viva (N)

H_r Altura total del cuerpo del silo (m)

W_1 Peso de la masa efectiva contenida en el silo que se mueve al unirlo con el cuerpo del silo (N)

X_1 Altura desde el fondo del cuerpo del silo al centroide de la fuerza lateral sísmica aplicada a W_1 (m)

W_2 Peso de la masa efectiva contenida en el silo que se mueve en el primer oleaje (N)

X_2 Altura desde el fondo del cuerpo del silo al centroide de la fuerza lateral sísmica aplicada a W_2 (m)

Los valores correspondientes a W_1 , W_2 , X_1 y X_2 se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$W_1 = \frac{\tanh\left(0,866\frac{D}{H}\right)}{0,866\frac{D}{H}} W_t \quad (\text{Ecuación 21})^{37}$$

$$W_2 = \left(1 - 0,218\frac{D}{H}\right) W_t \quad (\text{Ecuación 22})^{38}$$

$$X_1 = 0,375 H ; \quad D/H \geq 1,333 \quad (\text{Ecuación 23})^{39}$$

$$X_1 = \left(0,5 - 0,094\frac{D}{H}\right) H ; \quad \frac{D}{H} < 1,333 \quad (\text{Ecuación 24})^{40}$$

$$X_2 = \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{3,67}{D/H}\right) - 1}{\frac{3,67}{D/H} \sinh\left(\frac{3,67}{D/H}\right)} \right] H \quad (\text{Ecuación 25})^{41}$$

Donde;

W_t Peso del producto contenido en el silo.

H Altura total del grano contenido en el silo.

D Diámetro del silo

En la figura 11 se puede ver un esquema de los pesos efectivos y su centro de acción.

³⁷ Norma API – 650

³⁸ Norma API – 650

³⁹ Idem

⁴⁰ Idem

⁴¹ Idem

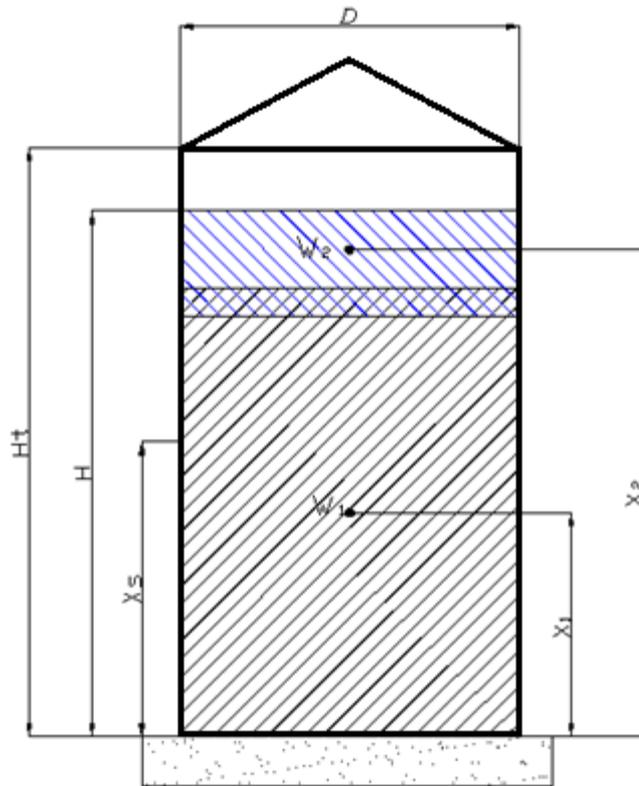


Figura 11. Centroides de pesos que pueden producir volteo cuando existan movimientos telúricos.

Fuente: API 650

2.5.4.6 Coeficientes de aceleración espectral

$$A_i = S_{DS}(I/R_{wi}) \quad (\text{Ecuación 26})^{42}$$

$$A_C = K S_{D1}(1/T_c)(I/R_{wc}); T_c \leq T_L \quad (\text{Ecuación 27})^{43}$$

$$S_{DS} = 2 F a S_S/3 \quad (\text{Ecuación 28})^{44}$$

$$S_S = n Z F a \quad (\text{Ecuación 29})^{45}$$

$$A_C = K S_{D1}(T_L/T_c^2)(I/R_{wc}); T_c > T_L \quad (\text{Ecuación 30})^{46}$$

⁴² Norma API – 650

⁴³ Idem

⁴⁴ Idem

⁴⁵ Idem

$$S_{D1} = 2 Fd S_1/3 \quad \text{(Ecuación 31)}^{47}$$

$$S_1 = n Z Fa \left(\frac{T_c}{T_L} \right)^R \quad \text{(Ecuación 32)}^{48}$$

Los límites para el período de vibración T_c y T_L se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$T_c = 0,55 F_s \frac{Fd}{Fa} \quad \text{(Ecuación 33)}^{49}$$

$$T_L = 2,4 Fd \quad \text{(Ecuación 34)}^{50}$$

Donde:

S_{DS} y S_{D1} son valores que dependen de la respuesta de aceleración espectral, S_s y S_1 respectivamente, que es un porcentaje de la gravedad.

R_{wi} y R_{wc} son los factores de modificación (ver tabla 19)

I Factor de importancia.

K Coeficiente de ajuste espectral ($K = 1,5$)

T_c El período natural de ondulación

T_L El período regional de transición dependiente para períodos largos de grandes movimiento ($T_L = 4\text{seg}$, para perfiles de suelo tipo D y E).

⁴⁶ Norma API – 650

⁴⁷ Idem

⁴⁸ Idem

⁴⁹ Idem

⁵⁰ Idem

- R R=1, para tipo de suelo A, B o C y r=1.5, para tipo de suelo D o E.
- n Relación de amplificación espectral, $\eta = 1.8$ (Provincias de la Costa, excepto Esmeraldas), 2.48 (Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos), 2.6 (Provincias del Oriente)

Tabla 19. Factores de modificación

Sistema de anclaje	R_{wi}	R_{wc}
Estable sin anclajes	3,5	2
Mecánicamente anclado	4	2

Fuente: API 650 APÉNDICE E- TABLA E4

Para determinar el sistema de anclaje del silo (ver tabla 20) se tiene en cuenta el radio de anclaje expresado en la ecuación 35.

$$J = \frac{M_S}{D^2[W_t(1 - 0,056 S_{DS}) + W_a]} \quad (\text{Ecuación 35})^{51}$$

Tabla 20. Sistema de anclaje dependiendo del valor del radio de anclaje (J)

Condición	Sistema de anclaje
$J < 0.785$	Estable sin anclajes (silo sin elevación)
$0.785 < J < 1.54$	Estable sin anclajes (silo elevado)
$J > 1.54$	Anclado mecánicamente

Fuente: API 650

⁵¹ Norma API – 650

En la ecuación 35

J Valor del radio de anclaje

W_t Carga por metro usado para resistir el volteo

$W_t = (\text{peso del cuerpo} + \text{peso del techo}) / \text{perímetro del silo}$

W_a Peso máximo del producto contenido en el silo usado para resistir el volteo.

$$W_a = 99t_a \sqrt{F_y G_e H} \leq 196 GDH \quad (\text{Ecuación 36})^{52}$$

Donde:

t_a Espesor de la placa del fondo (mm.)

F_y Mínimo esfuerzo de cedencia de la placa del fondo (MPa)

D Diámetro del silo.

H Altura del nivel del producto (m.)

G_e Densidad relativa efectiva del producto a almacenar incluyendo el efecto sísmico vertical

$$G_e = G (1 - 0.056SDS) \quad (\text{Ecuación 37})^{53}$$

G Densidad relativa del producto a almacenar.

⁵² Norma API – 650

⁵³ Idem

2.5.5 Estabilidad por viento

El silo estará diseñado para resistir un momento de volteo por acción del viento, que se considera una carga uniformemente repartida sobre una viga empotrada en un extremo (ver figura 12), por lo que el momento será igual a:

$$M = \frac{P_v D_{max}(H_t)^2}{2} \quad (\text{Ecuación 38})^{54}$$

Donde:

M Momento de volteo (Kgf – m).

P_v Presión de viento (Kg / m^2).

D_{max} Diámetro exterior del silo (m.)

H_t Altura total del tanque incluyendo el techo (m.)

2.5.5.1 Presión del viento

Para determinar la resistencia del elemento frente al empuje del viento, se puede establecer una presión de cálculo P_v , cuyo valor se determinará mediante la siguiente ecuación :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho v_b^2 C_e C_f \quad (\text{Ecuación 39})^{55}$$

⁵⁴ Norma ecuatoriana de la construcción

⁵⁵ Idem

Donde;

P Presión de cálculo expresada en Pa ó N/m^2

ρ Densidad del aire expresada en Kg/m³, se puede tomar un valor de 1.25 Kg/m³.

v_b Velocidad básica de viento en m/s

$$v_b = 21\text{m/s (75 km/h).}^{56}$$

C_e Coeficiente de entorno-altura, ver tabla 21

C_f Coeficiente de forma, ver tabla 22

Tabla 21. Coeficiente de entorno/altura

Construcción	C_e
Elementos situados en patios interiores	0,3
Elementos en fachadas protegidas en edificios alineados en calles rectas	0,8
Elementos en fachadas expuestas en edificaciones aisladas	1,3
Elementos en fachadas muy expuestas, situados al borde de la orilla de lagos o del mar, próximos a escarpaduras, laderas de fuerte inclinación, desfiladeros, y otros	1,5

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción

⁵⁶ Norma ecuatoriana de la construcción

Tabla 22. Coeficiente de forma, C_f

CONSTRUCCIÓN	Barlovento	sotavento
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular o elíptica.	+ 2,0	

Nota: El signo positivo (+) indica presión, el signo negativo (-) indica succión

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción

Para silos no anclados, el momento de volteo debido a la presión de viento no

debe ser mayor que $\frac{2}{3} \left(\frac{Wdc}{2} \right)$ es decir:

$$M < \frac{2}{3} \left(\frac{Wdc}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 40})^{57}$$

Donde:

W Peso muerto del silo disponible para resistir el levantamiento (Kg), menos cualquier corrosión permisible.

D Diámetro nominal del tanque (m)

Cuando la relación anterior sea menor o igual al momento de volteo, se considera un silo no estable y se tendrá que anclar. Ver figura 12.

⁵⁷ Norma ecuatoriana de la construcción

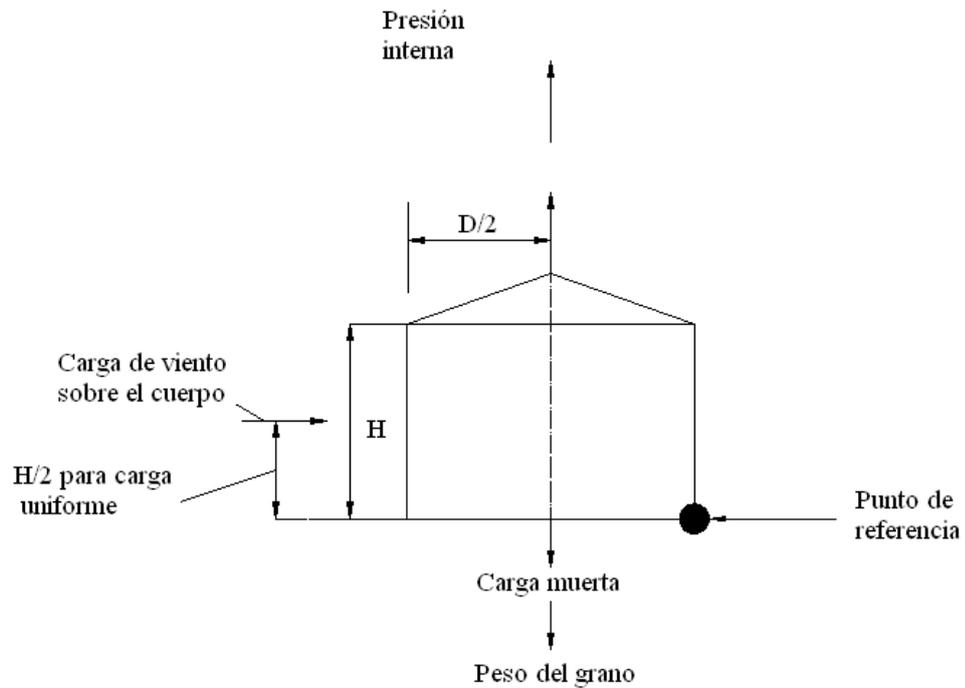


Figura 12. Momento de volteo para tanques no anclados

Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción

2.5.6 Accesorios

2.5.6.1 Boquillas

El silo contará con las siguientes boquillas:

1. Entrada de producto.
2. Salida de producto.
3. Entrada de hombre.
4. Venteos.

Todas las boquillas mayores o iguales a 76 mm de diámetro deben contar con una placa de refuerzo en la unión del cuello de la boquilla con el recipiente (de acuerdo a la tabla 23), con el fin de absorber la concentración de esfuerzos debidos a la perforación hecha al tanque y los esfuerzos producidos por la

carga que presenta la línea de la boquilla en cuestión, en el caso de las boquillas menores a 76mm de diámetro no se necesita refuerzo siempre y cuando la pared del tanque no exceda los 9.5mm de espesor.

Todas las placas de refuerzo de boquillas de 356 mm de diámetro y menores, deberán llevar un barreno de prueba de 6.35 mm de diámetro y las placas de refuerzo de boquillas mayores de 356 mm, deberán tener dos barrenos de prueba.

Se recomienda que las boquillas de 32 mm de diámetro y menores sean instaladas por medio de coples roscados de 3,000 y 6,000 *libras/pulgada*². Las boquillas de 38 mm y mayores deberán ser bridadas.

En el anexo A se muestra las dimensiones y tablas que se deben tener en cuenta en la instalación de una boquilla, la misma que es instalada con su eje perpendicular a las placas del tanque.

Las boquillas para la entrada de hombre en el cuerpo o techo son diseñadas con la finalidad de poder hacer limpieza, revisiones o reparaciones en el interior del tanque. Las dimensiones para su construcción se encuentran detalladas en el anexo B.

La boquilla exclusiva para venteo, tiene que ser diseñada con la finalidad de que dentro del tanque no se genere grandes variaciones en su presión interna al ser llenado o vaciado. Los venteos deben dimensionarse de acuerdo con API-2000, o bien deben de ser al menos igual a las conexiones de llenado o vaciado (o con un área equivalente a la suma de las conexiones de llenado o vaciado simultaneo) la que resulte mayor, pero en ningún caso menor a un diámetro nominal de 45mm en el caso de que el fluido no presente muchos vapores en su almacenamiento normal.⁵⁸

⁵⁸ Norma API - 650

Tabla 23. Dimensiones para cuellos de boquillas

NPS (Tamaño de la boquilla)	Diámetro exterior del tubo	Espesor nominal de la pared del tubo de la boquilla ^{a, b} t_n	Diámetro del agujero en la placa de refuerzo D_R	Longitud entre lados de la placa ^b de refuerzo $L = D_0$	Ancho de la placa de refuerzo W	Mínima distancia de la envolvente a la cara de la brida J	Mínima distancia del fondo del tanque al centro de la boquilla	
							Tipo regular H_N	Tipo bajo C
Conexiones bridadas								
1219 (48)	1219 (48)	e	1222 (48 ^{1/8})	2455 (96 ^{3/4})	2970 (117)	400 (16)	1325 (52)	1230 (48 ^{3/8})
1168 (46)	1168 (46)	e	1172 (46 ^{1/8})	2355 (92 ^{3/4})	2845 (112)	400 (16)	1275 (50)	1180 (46 ^{1/8})
1118 (44)	1118 (44)	e	1121 (44 ^{1/8})	2255 (88 ^{3/4})	2725 (107 ^{1/4})	375 (15)	1225 (48)	1125 (44 ^{3/8})
1016 (40)	1016 (40)	e	1019 (40 ^{1/8})	2050 (80 ^{3/4})	2485 (97 ^{1/4})	375 (15)	1125 (44)	1025 (40 ^{3/8})
965 (38)	965 (38)	e	968 (38 ^{1/8})	1950 (76 ^{3/4})	2355 (92 ^{3/4})	350 (14)	1075 (42)	975 (38 ^{3/8})
1067 (42)	1067 (42)	e	1070 (42 ^{1/8})	2155 (84 ^{3/4})	2605 (102 ^{1/2})	375 (15)	1175 (46)	1075 (42 ^{3/8})
914 (36)	914 (36)	e	918 (36 ^{1/8})	1850 (72 ^{3/4})	2235 (88)	350 (14)	1025 (40)	925 (36 ^{3/8})
864 (34)	864 (34)	e	867 (34 ^{1/8})	1745 (68 ^{3/4})	2115 (83 ^{1/4})	325 (13)	975 (38)	875 (34 ^{3/8})
813 (32)	813 (32)	e	816 (32 ^{1/8})	1645 (64 ^{3/4})	1995 (78 ^{1/2})	325 (13)	925 (36)	820 (32 ^{3/8})
762 (30)	762 (30)	e	765 (30 ^{1/8})	1545 (60 ^{3/4})	1865 (73 ^{1/2})	300 (12)	875 (34)	770 (30 ^{3/8})
711 (28)	711 (28)	e	714 (28 ^{1/8})	1440 (56 ^{3/4})	1745 (68 ^{3/4})	300 (12)	825 (32)	720 (28 ^{3/8})
660 (26)	660 (26)	e	664 (26 ^{1/8})	1340 (52 ^{3/4})	1625 (64)	300 (12)	750 (30)	670 (26 ^{3/8})
610 (24)	610 (24)	12,7 (0,50)	613 (24 ^{1/8})	1255 (49 ^{1/2})	1525 (60)	300 (12)	700 (28)	630 (24 ^{3/4})
559 (22)	559 (22)	12,7 (0,50)	562 (22 ^{1/8})	1155 (45 ^{1/2})	1405 (55 ^{1/4})	275 (11)	650 (26)	580 (22 ^{3/4})
508 (20)	508 (20)	12,7 (0,50)	511 (20 ^{1/8})	1055 (41 ^{1/2})	1285 (50 ^{1/2})	275 (11)	600 (24)	525 (20 ^{3/4})
457 (18)	457 (18)	12,7 (0,50)	460 (18 ^{1/8})	950 (37 ^{1/2})	1160 (45 ^{1/4})	250 (10)	550 (22)	475 (18 ^{3/4})
406 (16)	406 (16)	12,7 (0,50)	410 (16 ^{1/8})	850 (33 ^{1/2})	1035 (40 ^{3/4})	250 (10)	500 (20)	425 (16 ^{3/4})
356 (14)	356 (14)	12,7 (0,50)	359 (14 ^{1/8})	750 (29 ^{1/2})	915 (36)	250 (10)	450 (18)	375 (14 ^{3/4})
305 (12)	324 (12 ^{3/4})	12,7 (0,50)	327 (12 ^{1/8})	685 (27)	840 (33)	225 (9)	425 (17)	345 (13 ^{1/2})
254 (10)	273 (10 ^{3/4})	12,7 (0,50)	276 (10 ^{1/8})	585 (23)	720 (28 ^{1/4})	225 (9)	375 (15)	290 (11 ^{1/2})
203 (8)	219 (8 ^{3/8})	12,7 (0,50)	222 (8 ^{3/4})	485 (19)	590 (23 ^{1/4})	200 (8)	325 (13)	240 (9 ^{1/2})
152 (6)	168 (6 ^{3/8})	10,97 (0,432)	171 (6 ^{3/4})	400 (15 ^{3/4})	495 (19 ^{1/2})	200 (8)	275 (11)	200 (7 ^{1/8})
102 (4)	114 (4 ^{1/2})	8,56 (0,337)	117 (4 ^{3/8})	305 (12)	385 (15 ^{1/4})	175 (7)	225 (9)	150 (6)
76 (3)	89 (3 ^{1/2})	7,62 (0,300)	92 (3 ^{3/8})	265 (10 ^{1/2})	345 (13 ^{1/2})	175 (7)	200 (8)	135 (5 ^{1/4})
51 (2)	60 (2 ^{3/8})	5,54 (0,218)	63 (2 ^{1/2})	-----	-----	150 (6)	175 (7)	i
38 (1 ^{1/2})	48 (1,9)	5,08 (0,200)	51 (2)	-----	-----	150 (6)	150 (6)	i
1	33,4 (1,315)	6,35 (0,250)	-----	-----	-----	150 (6)	150 (6)	i
3/4	26,7 (1,05)	5,54 (0,218)	-----	-----	-----	150 (6)	150 (6)	i

Fuente: API 650

2.5.6.2 Escaleras

Requerimientos para escaleras (Según API. 650 tabla 3.18)

- Todas las partes de la escalera son metálicas.
- El ancho mínimo de la escalera es de 610 mm.
- El ángulo máximo entre las escaleras y una línea horizontal es de 50°.
- El ancho mínimo de los peldaños es de 203 mm.
- La elevación es uniforme a todo lo largo de la escalera.
- Los peldaños deben estar hechos de rejilla o material antiderrapante.
- La parte superior de la reja debe estar unida al pasamano de la plataforma sin margen y la altura, medida verticalmente desde el nivel del peldaño hasta el borde del mismo de 762 a 864 mm.
- La distancia máxima entre los postes de la rejilla medidos a lo largo de la elevación de 2,400 mm.
- La estructura completa es capaz de soportar una carga viva concentrada de 4450N, y la estructura del pasamano debe ser capaz de soportar una carga de 890N., aplicada en cualquier dirección y punto del barandal.
- Los pasamanos deben estar colocados en ambos lados de las escaleras rectas; éstos son colocados también en ambos lados de las escaleras circulares cuando el claro entre cuerpo-tanque y los largueros de la escalera excedan 203 mm.
- Las escaleras circunferenciales están completamente soportadas en el cuerpo del tanque y los finales de los largueros apoyados en el piso.⁵⁹

⁵⁹ Norma API - 650

CAPÍTULO 3

3. CÁLCULOS

En el presente capítulo se desarrollan los cálculos correspondientes para el diseño del silo, para esto se presentan a continuación los datos generales necesarios.

3.1 Datos generales:

A continuación se indica los datos necesarios para iniciar los cálculos correspondientes y algunos de éstos se pueden ver en la figura 13.

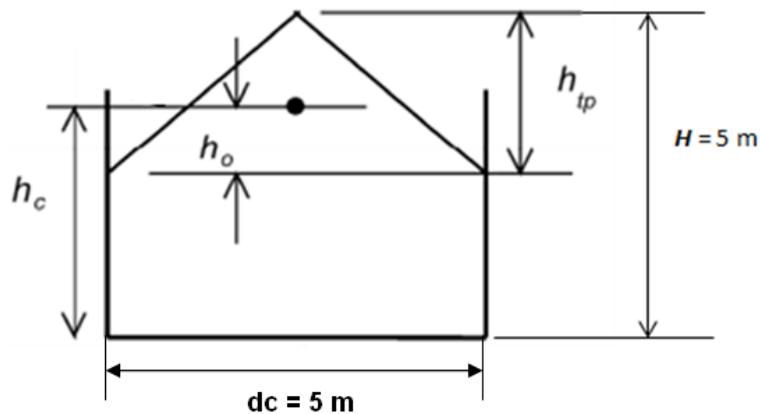


Figura 13. Silo fondo plano con notación de las dimensiones

Fuente: Norma UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.

Capacidad del silo = 50 t = 50000 Kg (maíz)

Peso específico, $\gamma = \frac{8\text{KN}}{\text{m}^3}$

Diámetro del cuerpo del silo, $dc = 5 \text{ m}$

Altura total del silo, $H = 5 \text{ m}$

Ángulo de talud natural del sólido, $\phi_r = 35^\circ$

Densidad del maíz, $\rho = 800 \text{ Kg}/\text{m}^3$

Volumen del silo, $V = 62.5 \text{ m}^3$

3.1.1 Valor de z en el punto de contacto más elevado entre el sólido y la pared, h_o . Ver figura 13.

De la ecuación 8, se tiene.

$$h_o = \frac{r}{3} \tan \phi_r$$

$$h_o = \frac{2.5 \text{ m}}{3} \tan 35^\circ$$

$$\mathbf{h_o = 0.584 \text{ m}}$$

3.1.2 Altura total del cono superior, h_{tp} . Ver figura 13.

$$h_{tp} = 3h_o$$

$$h_{tp} = 3(0.584\text{m})$$

$$\mathbf{h_{tp} = 1.75 \text{ m}}$$

3.1.3 Altura total del grano contenido en el silo, h_c . Ver figura 13.

$$H = h_c + h_{tp} - h_o$$

$$h_c = H + h_o - h_{tp}$$

$$h_c = 5\text{m} + 0.584\text{m} - 1.75\text{m}$$

$$\mathbf{h_c = 3.83 \text{ m}}$$

3.1.4 Relación de esbeltez

Se calcula el valor de la relación entre hc y dc que determina la clase de esbeltez del silo, para este caso

$$\frac{hc}{dc} = \frac{3.83 \text{ m}}{5 \text{ m}}$$

$$\frac{hc}{dc} = 0.766 \leq 1$$

Por tanto $hc/dc = 0.766 \leq 1$, de la tabla 7 Clasificación de esbeltez del silo, corresponde a un silo poco esbelto. ($0.4 < hc/dc \leq 1$).

3.1.5 Cálculo de cargas vivas y las cargas muertas

3.1.5.1 Cargas muertas

Peso del techo = peso específico del acero \times volumen

Peso del techo = peso específico del acero \times área del techo $\times Tt$

$$\text{área del techo} = \frac{(\pi \cdot r^2)(\pi \cdot r^2 \cdot 34^\circ)}{360^\circ} \quad (\text{Ver figura 14})$$

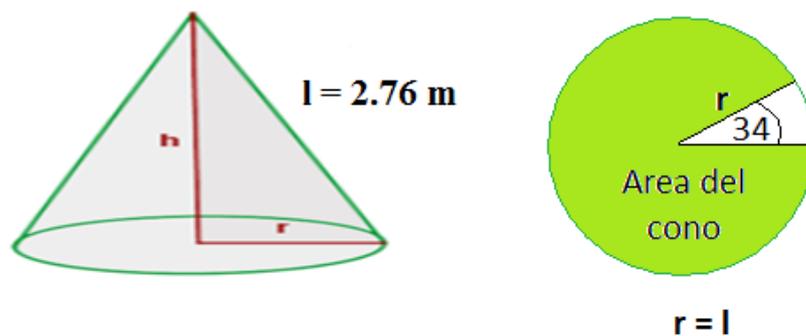


Figura 14. Representación esquemática del techo del silo.

Fuente: La autora

$$\text{Peso del techo} = \frac{78.5 \text{ KN}}{\text{m}^3} \times \frac{(\pi \cdot 2.76^2)(\pi \cdot 2.76^2 \cdot 34^\circ)}{360^\circ} \times 0.005 \text{ m}$$

$$\text{Peso del techo} = \frac{78.5 \text{ KN}}{\text{m}^3} \times (21.7 \text{ m}^2) \times 0.005 \text{ m}$$

$$\text{Peso del techo} = 8.52 \text{ KN}$$

Peso del cuerpo del silo

$$= \text{peso específico del acero} \times \text{volumen del cuerpo}$$

$$\text{Peso del cuerpo del silo} = \text{peso específico del acero} \times \text{área del cuerpo} \times t$$

$$\text{área del cuerpo} = L \times h \quad (\text{Ver figura 15})$$



Figura 15. Representación esquemática del cuerpo del silo

Fuente: La autora

$$\text{Peso del cuerpo del silo} = \frac{78.5 \text{ KN}}{\text{m}^3} \times [L \times h] \times 0.005 \text{ m}$$

$$\text{Peso del cuerpo del silo} = \frac{78.5 \text{ KN}}{\text{m}^3} \times [15.71 \text{ m} \times 3.83 \text{ m}] \times 0.005 \text{ m}$$

$$\text{Peso del cuerpo del silo} = 23.47 \text{ KN}$$

Entonces el valor de la suma del peso del techo + peso del cuerpo del silo es el valor total de la carga muerta.

$$\text{Carga muerta}(W) = 8.52 \text{ KN} + 23.47 \text{ KN} = 32 \text{ KN}$$

3.1.5.2 Sobrecargas de uso (carga viva)

En el techo del silo se considera una carga puntual por estar sujeta a mantenimiento de 1.4 KN, una carga distribuida de granizo de 1 KN por cada m^2 y una carga puntual por escaleras de 4.45 KN.

$$\text{Carga viva} = 1.4 \text{ KN} + 21.7 \text{ KN} + 4.45 \text{ KN} = 27.55 \text{ KN}$$

3.2 Cálculo de las cargas en el silo

Considerando que es un silo poco esbelto se determina las cargas de llenado y descarga sobre las paredes verticales y sobre el fondo del silo. (Ver figura 16)

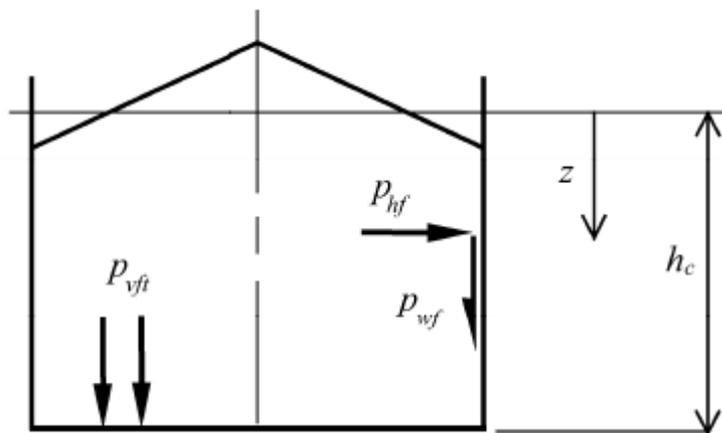


Figura 16. Presiones sobre las paredes verticales y fondo del silo

Fuente: Norma UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.

3.2.1 Presión horizontal después del llenado P_{hf}

Se debe calcular la presión horizontal después del llenado, ver figura 16, usando la ecuación 2.

$$P_{hf} = P_{ho} Y_R$$

Partiendo de esta ecuación es preciso conocer la presión horizontal a gran profundidad debida al sólido almacenado (P_{ho}) y la función de variación de la presión de silos poco esbeltos con la profundidad (Y_R). Mediante la ecuación 4 y 5 respectivamente.

Para obtener el valor de la presión horizontal mediante la ecuación $P_{ho} = \gamma K z_o$ se tiene los siguientes datos:

$$z_o = \frac{h_c}{2} = \frac{3.83 \text{ m}}{2} = 1.92 \text{ m}$$

$$K = 0.53 \text{ (Tomado del anexo C)}$$

Por lo tanto:

$$P_{ho} = 8 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 0.53 \times 1.92 \text{ m}$$

$$P_{ho} = 8.14 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Para obtener el valor de la función de variación de la presión Y_R se tiene los siguientes datos:

$$n = -(1 + \tan \phi_r)(1 - h_o/z_o)$$

$$n = -(1 + \tan 35) \left(1 - \frac{0.584 \text{ m}}{1.92 \text{ m}}\right)$$

$$n = -1.183$$

Por lo tanto de la ecuación 5

$$Y_R = \left(1 - \left\{ \left(\frac{z - h_o}{z_o - h_o} \right) + 1 \right\}^n \right)$$

$$Y_R = \left(1 - \left\{ \left(\frac{3.83 \text{ m} - 0.584 \text{ m}}{1.92 \text{ m} - 0.584 \text{ m}} \right) + 1 \right\}^{-1.183} \right)$$

$$Y_R = 0.767$$

Entonces la presión horizontal después del llenado es:

$$P_{hf} = 8.14 \frac{KN}{m^2} \times 0.767$$

$$P_{hf} = 7.06 \frac{KN}{m^2}$$

3.2.2 Presión de tracción por rozamiento en la pared después del llenado P_{wf}

Se calcula la presión de tracción por rozamiento en la pared vertical del silo después del llenado, ver figura 16, mediante la ecuación 3.

$$P_{wf} = \mu P_{hf}$$

Para el cálculo de dicha presión se tiene que $\mu = 0.36$ (Tomado del anexo C), y que la presión horizontal después del llenado es $P_{hf} = 7.06 \frac{KN}{m^2}$

Entonces la presión de tracción por rozamiento es:

$$P_{wf} = 0.36 \times 7.06 \frac{KN}{m^2}$$

$$P_{wf} = 2.54 \frac{KN}{m^2}$$

3.2.3 Presión vertical P_{vf} a cualquier profundidad después del llenado

Se calcula la presión vertical a cualquier profundidad después del llenado según la ecuación 9.

$$P_{vf} = \gamma z_v$$

Para este cálculo primero se debe encontrar la profundidad z_v de la ecuación 10.

$$z_v = h_o - \frac{1}{(n+1)} \left(z_o - h_o - \frac{(z + z_o - 2 h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n} \right)$$

$$z_v = 0.584 \text{ m} - \frac{1}{(-1.183 + 1)} \left(1.92 \text{ m} - 0.584 \text{ m} - \frac{(3.83 \text{ m} + 1.92 \text{ m} - 2 \times 0.584 \text{ m})^{-1.183+1}}{(1.92 \text{ m} - 0.584 \text{ m})^{-1.183}} \right)$$

$$z_v = 1.688 \text{ m}$$

Entonces a una profundidad de 1.688 m la presión vertical es:

$$P_{vf} = \frac{8 \text{ KN}}{\text{m}^3} \times 1.688 \text{ m}$$

$$P_{vf} = 13.51 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

3.2.4 Tensión vertical resultante n_{zsk} (compresión) en la pared por unidad de longitud del perímetro a cualquier profundidad z

Se calcula la tensión vertical resultante en la pared mediante la ecuación 11.

$$n_{zsk} = \mu P_{ho} (z - z_v)$$

Datos:

$$\mu = 0.36$$

$$P_{ho} = 7.06 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$z = h_c = 3.83 \text{ m}$$

$$z_v = 1.688 \text{ m}$$

Entonces reemplazando los datos en la ecuación 11 se tiene:

$$n_{zsk} = 0.36 \times 8.14 \frac{KN}{m^2} (3.83 \text{ m} - 1.688 \text{ m})$$

$$n_{zsk} = 6.28 \frac{KN}{m}$$

3.2.5 Carga concentrada de llenado

Según el apartado 2.5.1.2 no es necesario considerar la carga concentrada de llenado. Por lo tanto:

$$C_{pf} = 0$$

3.2.6 Cargas de descarga sobre las paredes verticales

Según el apartado 2.5.1.3 las cargas de descarga sobre las paredes verticales se toman iguales a las cargas de llenado, por lo que estas son:

Presión horizontal durante la descarga:

$$P_{he} = 7.06 \frac{KN}{m^2}$$

Presión de tracción por rozamiento en la pared durante la descarga:

$$P_{we} = 2.54 \frac{KN}{m^2}$$

3.2.7 Carga concentrada de descarga

Según el apartado 2.5.1.4 no es necesario considerar la carga concentrada de llenado. Por lo tanto:

$$C_{pe} = 0$$

3.2.8 Presión vertical P_{vsq} que actúa sobre el fondo plano del silo

Para calcular la presión vertical sobre el fondo del silo se utiliza la ecuación 13.

$$P_{vsq} = P_{vft} + \Delta P_{sq} \left(\frac{2 - h_c/d_c}{2 - h_{tp}/d_c} \right)$$

Primero se calcula la presión vertical en la transición entre el segmento de pared vertical y el fondo del silo (ver figura 16) y la diferencia entre presiones verticales.

Para encontrar la presión vertical en la transición entre el segmento de pared vertical y el fondo del silo se utiliza la ecuación 12.

$$P_{vft} = C_b P_{vf}$$

Para resolver la ecuación 12 se tiene como dato el coeficiente de mayoración de cargas sobre el fondo $C_b = 1.3$, y se calcula la tensión vertical en el sólido almacenado después del llenado mediante la ecuación 9 ($P_{vf} = \gamma z$) en la que la profundidad $z = h_o = 3.83 \text{ m}$. Entonces se tiene

$$P_{vft} = 1.3 \left(\frac{8 \text{ KN}}{\text{m}^3} \times 3.83 \text{ m} \right)$$

$$P_{vft} = 39.83 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Para encontrar la diferencia entre presiones verticales se utiliza la ecuación 14.

$$\Delta P_{sq} = P_{vtp} - P_{vho}$$

P_{vtp} Presión vertical granular en la base del cono superior obtenida mediante la ecuación 15.

$$P_{vtp} = \gamma h_{tp}$$

Reemplazando $h_{tp} = 1.75 \text{ m}$

Se tiene:

$$P_{vtp} = \frac{8\text{KN}}{\text{m}^3} \times 1.75 \text{ m}$$

$$P_{vtp} = 14 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

P_{vho} Es la presión vertical en la base del cono superior, que se obtiene mediante la ecuación 9 con $z = h_o = 0.584 \text{ m}$.

$$P_{vho} = \gamma h_o$$

$$P_{vho} = \frac{8\text{KN}}{\text{m}^3} \times 0.584 \text{ m}$$

$$P_{vho} = 4.672 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Entonces la diferencia entre presiones verticales es:

$$\Delta P_{sq} = 14 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} - 4.672 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P_{sq} = 9.33 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Reemplazando los datos anteriores en la ecuación 13 se tiene que la presión vertical en el fondo del silo es.

$$P_{vsq} = 39.83 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} + 9.33 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \left(\frac{2 - 0.766}{2 - 0.35} \right)$$

$$P_{vsq} = 46.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

3.3 Diseño del cuerpo

Las planchas que conformarán el cuerpo se pueden encontrar con las siguientes dimensiones:

Ancho: 1.2 m

Largo: 2.4 m

Espesores: distintos

Para calcular la cantidad de anillos de los que estará formado el cuerpo del silo se divide la altura del cuerpo del silo para el ancho de la plancha de acero y se tiene que:

$$\text{Cantidad de anillos} = \frac{\text{altura del cuerpo}}{\text{ancho de la plancha}}$$

$$\text{Cantidad de anillos} = \frac{3.830 \text{ m}}{1.2 \text{ m}} = 3.2 \Rightarrow 4 \text{ anillos}$$

Para calcular el ancho de las planchas se tiene que:

$$\text{Ancho de placas} = H \text{ del cuerpo} / (\# \text{ de Anillos})$$

$$\text{Ancho de placas} = 3.830 \text{ m} / 4 = 957.5 \text{ cm}$$

3.3.1 Espesor de las paredes verticales del silo

Para el cálculo del espesor del silo primero se obtendrá un espesor para la presión horizontal y después un espesor para la presión de tracción por rozamiento en la pared y se sumarán estos dos espesores y este último es el espesor de la pared del cuerpo del silo.

Para la presión horizontal según la ecuación 16

$$t = \frac{p_{ho} \times D \times 10}{2 \times \sigma_t \times 100}$$

Datos:

$$P_{ho} = \frac{8140 \text{ N}}{\text{m}^2} \times \frac{1 \text{ Kgf}}{9.80 \text{ N}}$$

$$P_{ho} = 830.61 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$\sigma_t = 5334 \text{ Kg/m}^2 \text{ (Con un coeficiente de seguridad de 1.38)}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 16 se tiene un espesor igual a:

$$t = \frac{830.61 \times 5 \times 10}{2 \times 5334 \times 100}$$

$$t = \mathbf{0.039 \text{ mm}}$$

Para la presión de tracción por rozamiento en la pared de la ecuación 17

$$t = \frac{p_{wf} \times D \times 10}{2 \times \sigma_t \times 100}$$

Datos:

$$P_{wf} = \frac{2540 \text{ N}}{\text{m}^2} \times \frac{1 \text{ Kgf}}{9.80 \text{ N}}$$

$$P_{wf} = 259.184 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$\sigma_t = 5334 \text{ Kg/m}^2 \text{ (Con un coeficiente de seguridad de 1.38)}$$

Reemplazando estos datos se tiene un espesor igual a:

$$t = \frac{259.184 \times 5 \times 10}{2 \times 5334 \times 100}$$

$$t = \mathbf{0.0122 \text{ mm}}$$

De estos dos espesores se toma la suma de ambos y se tiene que

$$t = 0.039 + 0.0122 = \mathbf{0.051 \text{ mm}}$$

Del cálculo anterior se tiene que el espesor de la pared del cuerpo del silo es 0.051 mm. Pero de acuerdo a la norma API 650 para un diámetro menor a 15 m el espesor mínimo debe ser de 5 mm

Entonces el espesor de las placas del cuerpo del silo es $t = 5 \text{ mm}$

3.4 Espesor de las placas del fondo del silo

Para el cálculo del espesor de las placas de fondo del silo se tendrá en cuenta la presión vertical en el fondo del silo P_{vsq} . Mediante la ecuación 16 se tiene.

$$t = \frac{P_{vsq} \times D \times 10}{2 \times \sigma_t \times 100}$$

Datos:

$$P_{vsq} = 46.81 \frac{KN}{m^2} \times \frac{1 \text{ Kgf}}{9.80 \text{ N}}$$

$$P_{ho} = 4776.53 \frac{Kgf}{m^2}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$\sigma_t = 5334 \text{ Kg/m}^2 \text{ (Con un coeficiente de seguridad de 1.38)}$$

Reemplazando los datos anteriores en la ecuación 16 se tiene.

$$t = \frac{4776.53 \times 5 \times 10}{2 \times 5334 \times 100}$$

$$t = 0.224 \text{ mm}$$

Del cálculo anterior se tiene que el espesor de las placas del fondo del silo es 0.224 mm. Pero de acuerdo a la norma API 650 el espesor de las placas del fondo no debe ser menor a 6 mm.

Entonces el espesor de las placas del fondo del silo es de $t = 6 \text{ mm}$.

3.5 Diseño del techo

De acuerdo al diámetro el techo con el que contará el silo será un techo fijo cónico autosoportado (se ha establecido un ángulo con respecto a la horizontal del techo de $\theta = 25^\circ$)

3.5.1 Cálculo del espesor de las placas del techo

El espesor de las planchas que conformarán el la estructura del techo se obtiene de la ecuación 18.

$$Tt = \frac{D}{4800 \text{ Sen}\theta}$$

Datos:

$$D = 5m = 500 \text{ cm}$$

$$\theta = 25^\circ$$

$$Tt = \frac{500 \text{ cm}}{4800 \text{ Sen } 25^\circ}$$

$$\mathbf{Tt = 0.182 \text{ cm} = 2.46 \text{ mm}}$$

Este espesor será incrementado cuando la suma de las cargas muertas más las cargas vivas excedan 220 Kg /m^2 (45lb/ pie):

Entonces:

$$Cm + Cv = (0.39 + 1.27) \text{ KN/m}^2$$

$$Cm + Cv = 1.66 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 169.7 \text{ Kg /m}^2$$

El incremento del espesor es:

$$\sqrt{\frac{Cm + Cv}{220}} = \sqrt{\frac{169.7}{220}} = 0.88$$

El incremento del espesor del techo del silo es del 88%

De acuerdo al cálculo anterior el espesor del techo sería 4.62 mm, pero según la norma API 650 el espesor del techo no deberá ser menor de 4.76 mm y no mayor de 12.7 mm

Entonces se tomará un espesor de las placas del techo igual a 5 mm.

$$Tt = 5 \text{ mm}$$

3.6 Estabilidad por sismo

3.6.1 Momento de volteo sísmico

Para el cálculo del momento de volteo se utiliza la ecuación 20.

$$M_s = \sqrt{[A_i(W_1X_1 + W_sX_s + W_rX_r)]^2 + [A_c(W_2X_2)]^2}$$

Datos: (ver figura 17)

$$X_s = 1.623 \text{ m}$$

$$X_r = 3.830 \text{ m}$$

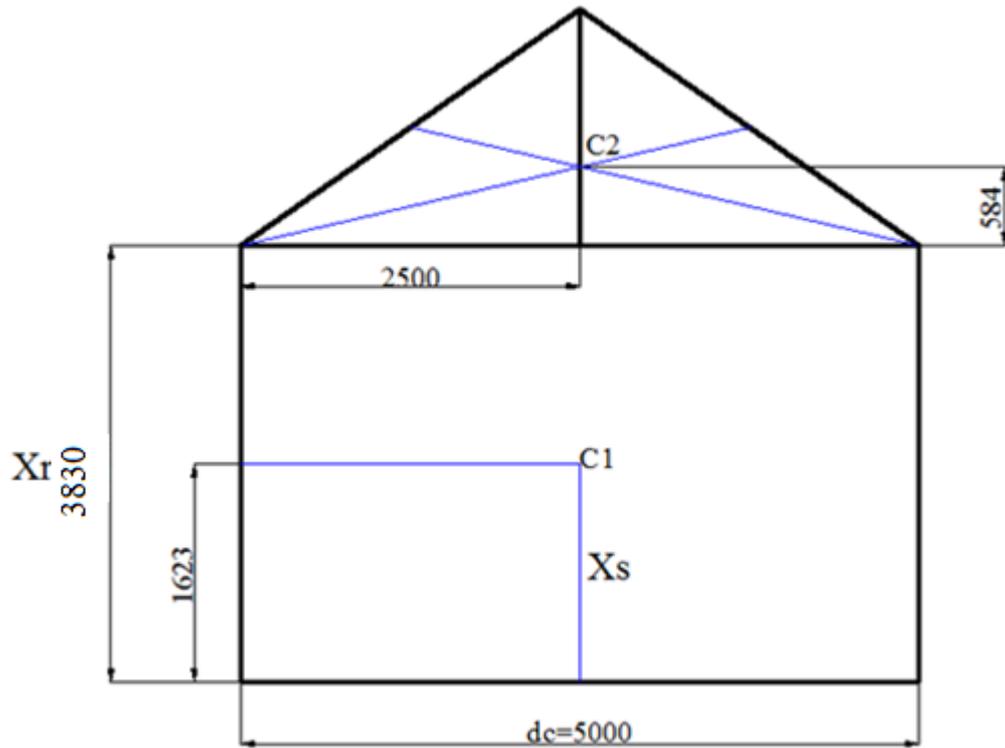


Figura 17. Centros de gravedad

Fuente. La Autora

Para el desarrollo de la ecuación 20 del momento sísmico primero se obtendrán los valores correspondientes a W_1 , W_2 , X_1 y X_2 mediante las ecuaciones 21,22,23,24,25 respectivamente. Para lo cual se cuenta con los siguientes datos.

$$W_t = 50000Kg \times 10 \text{ m/s}^2$$

$$W_t = 500 \text{ KN}$$

$$\frac{D}{hc} = \frac{5 \text{ m}}{3.83 \text{ m}} = 1.305$$

De la ecuación 21 se puede encontrar el peso de la masa efectiva contenida en el silo que se mueve al unirlo con el cuerpo del silo.

$$W_1 = \frac{\tanh\left(0,866 \frac{D}{hc}\right)}{0,866 \frac{D}{hc}} W_t$$

$$W_1 = \frac{\tanh(0,866 \times 1.305)}{0,866 \times 1.305} 500 \text{ KN}$$

$$W_1 = \mathbf{8.73 \text{ KN}}$$

De la ecuación 22 se calcula el peso de la masa efectiva contenida en el silo que se mueve en el primer oleaje.

$$W_2 = (1 - 0,218 \times 1.305) W_t$$

$$W_2 = \left(1 - 0,218 \frac{5 \text{ m}}{3.83 \text{ m}}\right) 500 \text{ KN}$$

$$W_2 = \mathbf{357.70 \text{ KN}}$$

Para el cálculo de la altura desde el fondo del cuerpo del silo al centroide de la fuerza lateral sísmica aplicada a W_1 , se tiene en cuenta la siguiente relación.

$$\frac{D}{hc} = 1.305 < 1.33$$

Entonces se aplica la ecuación 24.

$$X_1 = \left(0,5 - 0,094 \frac{D}{H}\right) H$$

$$X_1 = \left(0,5 - 0,094 \frac{5 \text{ m}}{3.83 \text{ m}}\right) 3.83 \text{ m}$$

$$X_1 = \mathbf{1.455 \text{ m}}$$

Para el cálculo de la altura desde el fondo del cuerpo del silo al centroide de la fuerza lateral sísmica aplicada a W_2 se aplica la ecuación 25.

$$X_2 = \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{3,67}{D/hc}\right) - 1}{\frac{3,67}{D/hc} \sinh\left(\frac{3,67}{D/hc}\right)}\right] hc$$

$$X_2 = \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{3,67}{1,305}\right) - 1}{\frac{3,67}{1,305} \sinh(1,305)} \right] 3,83 \text{ m}$$

$$X_2 = 3,86 \text{ m}$$

A continuación se obtienen los coeficientes de aceleración espectral impulsivo y convectivo se utilizarán las ecuaciones 26 y 27 respectivamente, para lo cual se contará con los siguientes datos:

$$I = 1 (\text{ver tabla 16})$$

$$R_{wi} = 3,5 (\text{ver tabla 17})$$

$$R_{wc} = 2 (\text{ver tabla 17})$$

El coeficiente de aceleración espectral impulsivo mediante la ecuación 26

$$A_i = S_{DS}(I/R_{wi})$$

Para el valor de S_{DS} se utiliza la ecuación 28

$$S_{DS} = 2 Fa S_S/3$$

Para resolver la ecuación 28 se necesita el valor de Fa que se obtiene de la tabla 15 conociendo los siguientes valores:

- Tipo de perfil de suelo: E
- Zona sísmica: IV
- Z : 0,35

$$\text{Entonces } Fa = 1,17$$

El valor de S_S se obtiene de la ecuación 29 en la que $n = 2,48$

$$S_S = n Z Fa$$

$$S_S = 2.48 \times 0.35 \times 1.17$$

$$S_S = 1.02$$

Entonces

$$S_{DS} = \frac{2 \times 1.17 \times 1.02}{3}$$

$$S_{DS} = 0.796$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 26 se tiene que el coeficiente de aceleración espectral impulsivo es:

$$A_i = 0.796(1/3.5)$$

$$A_i = \mathbf{0.227}$$

Para el coeficiente de aceleración espectral convectivo se utiliza la ecuación 27 o 30 según corresponda.

$$A_C = K S_{D1} (1/T_C) (I/R_{wc}); T_C \leq T_L$$

$$A_C = K S_{D1} (T_L/T_C^2) (I/R_{wc}); T_C > T_L$$

Los valores de los límites para el período de vibración T_C y T_L se utilizarán las ecuaciones 33 y 34 respectivamente.

$$T_C = 0,55 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_L = 2,4 F_d$$

Para el desarrollo de estas ecuaciones se cuenta con los siguientes datos, tomados de las tablas 15, 16 y 157 respectivamente.

$$F_a = 1.17$$

$$F_d = 2.4$$

$$F_s = 1.8$$

Reemplazando estos valores se tiene:

$$T_c = 0,55 \times 1.8 \frac{2.4}{1.17}$$

$$T_c = \mathbf{2.03}$$

$$T_L = 2,4 \text{ (2.4)}$$

$$T_L = \mathbf{5.76}$$

Como $T_c = 2.03 < T_L = 5.76$ entonces el coeficiente de aceleración convectivo se calculará mediante la ecuación 27.

$$A_c = K S_{D1} (1/T_c) (I/R_{wc})$$

Los valores de S_{D1} y S_1 se obtienen de las ecuaciones 31 y 32 según corresponda y reemplazando los datos anteriores de F_a, F_d, T_c y T_L

$$S_{D1} = 2 F_d S_1 / 3$$

$$S_1 = n Z F_a \left(\frac{T_c}{T_L} \right)^R$$

$$S_1 = 2.48 \times 0.35 \times 1.17 \left(\frac{2.03}{5.76} \right)^{1.5}$$

$$S_1 = 0.213$$

$$S_{D1} = 2 \times 2.4 \frac{0.213}{3}$$

$$S_{D1} = 0.339$$

Reemplazando los datos necesarios para el cálculo del coeficiente de aceleración espectral convectivo en la ecuación 27, se tiene

$$A_c = 1.5 \times 0.339 \left(\frac{1}{2.03} \right) \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$A_c = \mathbf{0.126}$$

Reemplazando todos los valores necesarios para resolver la ecuación 20 calculados anteriormente se tiene que el momento de volteo sísmico es:

$$M_s = \sqrt{[A_i(W_1X_1 + W_SX_S + W_rX_r)]^2 + [A_c(W_2X_2)]^2}$$

$$M_s = \sqrt{[0.227(500KN(1.455m) + 35.43KN(1.623m) + 10.8KN(3.830m))]^2 + [0.126(357.70KN(3.86m))]^2}$$

$$M_s = 254.79 \text{ KN m}$$

Una vez calculado el momento de volteo sísmico se establecerá si el silo resistirá dicho momento por lo que se procede al cálculo respectivo para determinar si el silo necesita o no anclajes.

3.6.2 Cálculo del sistema de anclaje

Para el cálculo del sistema de anclaje se tiene en cuenta el radio de anclaje determinado por la ecuación 35.

$$J = \frac{M_s}{dc^2[W_t(1 - 0,056 S_{DS}) + W_a]}$$

Datos:

$$M_s = 254.79 \text{ KN m}$$

$$dc^2 = (5 \text{ m})^2 = 25 \text{ m}^2$$

$$W_t = \frac{\text{peso del cuerpo} + \text{peso del techo}}{\text{perímetro del cuerpo} + \text{perímetro del techo}}$$

$$W_t = \frac{9.40 \text{ KN} + 35.43 \text{ KN}}{(2\pi r) + (2 \times 2\pi r + 2Xr) + (2\pi r + 2l)}$$

$$W_t = \frac{44.83 \text{ KN}}{75.42 \text{ m}}$$

$$W_t = 0.594 \text{ KN/m}$$

$$S_{DS} = 0.796$$

Se calcula primero el peso máximo del producto contenido en el silo usado para resistir el volteo W_a de la ecuación 36.

$$W_a = 99t_a \sqrt{F_y G_e hc} \leq 196 GDhc$$

Datos:

$$t_a = 6 \text{ mm}$$

$$F_y = 36734693.87 \text{ Kg/m}^2$$

$$hc = 3.83 \text{ m}$$

$$G_e = 764 \text{ Kg/m}^3$$

$$G = 800 \text{ Kg/m}^3$$

$$D = 5 \text{ m}$$

Reemplazando los datos se tiene

$$W_a = 99(0.006 \text{ m})\sqrt{36734693.87(764.32)3.83} \leq 196 (800)(5)(3.83)$$

$$W_a = 194787.76 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \leq 3002720 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}$$

$$W_a = 1908.92 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

Reemplazando todos los datos anteriores en la ecuación 35 se tiene un radio de anclaje igual a:

$$J = \frac{254.79 \text{ KN.m}}{25 \text{ m}^2 \left[0.594 \frac{\text{KN}}{\text{m}} (1 - 0.056(0.796)) + 1908.92 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \right]}$$

$$J = 0.0053$$

Como $J = 0.0053 < J = 0.785$, entonces se considera un silo estable sin anclajes.

3.7 Estabilidad por viento

Para el cálculo de la estabilidad por viento se determina el momento de voleo mediante la ecuación 38.

$$M = \frac{P_v dc(H_t)^2}{2}$$

Datos:

$$dc = 5m$$

$$(H_t)^2 = 25 m^2$$

La presión del viento P_v se obtiene de la ecuación 39

$$P_v = \frac{1}{2} \rho v_b^2 C_e C_f$$

Datos:

$$\rho = 1.25 \frac{Kg}{m^3}$$

$$v_b = 21 \frac{m}{seg}$$

$$C_e = 1.3 \text{ Tomado de la tabla 19}$$

$$C_f = 2 \text{ Tomado de la tabla 20}$$

Reemplazando se tiene:

$$P_v = \frac{1}{2} \times 1.25 \frac{Kg}{m^3} \left(21 \frac{m}{seg}\right)^2 \times 1.3 \times 2$$

$$P_v = 73.125 \frac{Kg}{m^2}$$

Reemplazando la presión del viento y los datos anteriores en la ecuación 38 se tiene que el momento de volteo es:

$$M = \frac{73.125 \frac{Kg}{m^2} \times 5 m \times 25 m^2}{2}$$

$$M = 4570.312 Kg.m$$

Para comprobar si el silo soportará el momento de volteo debido a la presión del viento se verifica con la ecuación 40.

$$M < \frac{2}{3} \left(\frac{Wdc}{2} \right)$$

Datos:

$$M = 4570.312 Kg.m$$

$$W = 44.83 KN = 4574.49 Kg$$

$$dc = 5 m$$

$$M < \frac{2}{3} \left(\frac{4574.49 Kg(5 m)}{2} \right)$$

$$M < 7624.15 Kg.m$$

$$4570.312 Kg.m < 7624.15 Kg.m \text{ Si cumple}$$

Entonces se concluye que el silo resiste el momento de volteo debido a la presión del viento y es estable sin anclajes.

3.8 Selección de accesorios

3.8.1 Boquilla de entrada y salida del producto

Caudal de carga y descarga del material: 10 ton/h

Diámetro boquilla de entrada del producto: 6 plg

Diámetro boquilla de salida del producto: 6 plg

3.8.2 Manhole lateral

Diámetro de la entrada: 600 mm

3.8.3 Manhole en el techo

Diámetro de la entrada: 600 mm

3.8.4 Boquilla de venteo

La boquilla de venteo será abierta a la atmosfera y de diámetro de 6 pulgadas.

3.8.5 Escaleras

En los planos se muestran los detalles constructivos de las escaleras.

CAPÍTULO 4

4. COSTOS

En este capítulo se hará el análisis de costos dando una descripción general de los mismos y se obtendrá el valor de la inversión total en la aplicación de este diseño para construcción del silo.

Para el análisis de costos se toma en cuenta los gastos por materiales, mano de obra, equipos o maquinarias utilizados y transporte, los mismos que se detallan a continuación.

a) Costos de materiales y accesorios mecánicos

Los costos de materiales y accesorios del silo se detallan en la tabla 24

Tabla 24. Costos de materiales y accesorios mecánicos

Material	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo (USD)
Plancha de acero galvanizado de 5 mm	21	62.5	1312.5
Plancha de acero galvanizado de 6 mm	7	75	525
Total			1837.5

Fuente: La autora

b) Costo por maquinaria y equipos utilizado.

El costo por la maquinaria y los equipos utilizados en la construcción del silo se detallan en la tabla 25.

Tabla 25. Costo por maquinaria y equipos utilizado

Máquina/ herramienta	Costo/ hora	Horas equipo	Costo (USD)
Equipo de oxicorte	70.00	8	560
Soldadura	50.00	40	2000.00
Roladora	25.00	8	200.00
Herramienta manual	5 % Mano de obra		100.00
Total			2860.00

Fuente: La autora

c) Costo por mano de obra

El costo por mano de obra del silo se puede ver en detalle en la tabla 26.

Tabla 26. Costos por mano de obra.

Trabajador	Cantidad	Salario/ hora	Horas hombre	Costo (USD)
Mecánico	2	2.50	120	600
Ayudante mecánico	1	1.875	120	225
Soldador	2	4.375	120	1050
Ayudante soldador	1	1.875	120	225
Armadores	2	2.50	120	600
Ayudantes armadores	1	1.875	120	225
Total				2925

Fuente: La autora

d) Costo por transporte

El detalle del costo total por transporte se puede ver en la tabla 27.

Tabla 27. Costo por transporte

Transporte	Costo flete	Cantidad	Costo
Material al taller	30	1	\$ 30
Silo al sitio de instalación	200	1	\$ 200
Total			\$ 230

Fuente: La autora

COSTO TOTAL DEL SILO

El costo total de la construcción del silo corresponde a la suma total de los gastos por materiales, mano de obra, equipos o maquinarias utilizados y transporte y es de USD 7852.50.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se cumplió con el objetivo principal de diseñar un silo cilíndrico metálico de fondo plano para almacenamiento de maíz con capacidad de 50 toneladas.
- El diseño del silo para almacenamiento de maíz cumple con todos los requerimientos exigidos por la norma vigente UNE - EN1991: Acciones en estructuras. parte 4: silos y depósitos en lo referente al cálculo de cargas necesarias que intervienen en la estructura del silo.
- El diseño del silo para almacenamiento de maíz cumple con los requisitos de capacidad y factores de diseño exigidos, para resistir todas las cargas aplicadas sin que ocurran fallas en su estructura.
- El diseño del silo proporciona los materiales y accesorios con los que éste debería construirse para garantizar la adecuada conservación del maíz.
- Se presenta planos de conjunto y detalle en los que se indican los datos constructivos del silo.

5.2 Recomendaciones

- Para el correcto funcionamiento del silo se recomienda utilizar un sistema de carga y descarga del material como por ejemplo un transportador helicoidal, el mismo que puede ser seleccionado y añadido al sistema.

- Para la construcción del silo de almacenamiento de maíz, se recomienda seguir lo especificado en los planos ya que contienen todos los detalles constructivos y los tipos de materiales recomendados que garantizan un sistema de almacenamiento eficiente.

- Se recomienda que para almacenar el producto por un período mayor al considerado como tiempo seguro de almacenamiento se debería instalar un sistema de aireación del silo que permita mantener el grano en perfectas condiciones por mucho más tiempo, para esto se puede ver la tabla 4 de éste proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

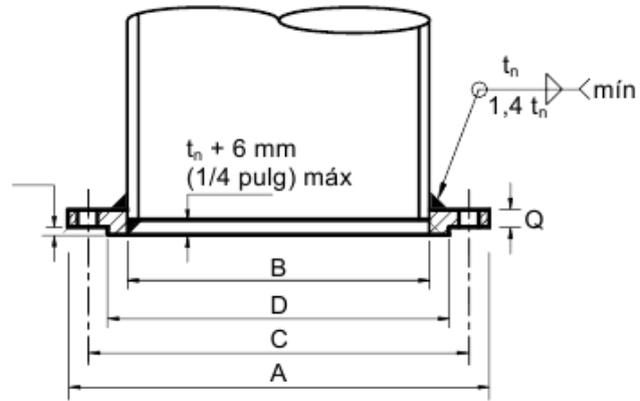
- Norma UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos.
- Norma API_ 650
- Código ASME sección VIII división 1
- Norma ecuatoriana de la construcción
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura)
- OSPINA Julio, Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos
- FAO, Cruz J, Avances en la ingeniería agrícola: técnicas de almacenamiento
- RAVENET, JUAN. Silos. 1992, volumen 1
- RAVENET, JUAN. Silos. 1992, volumen 2
- RAVENET, JUAN. Silos. 1992, volumen 3

ANEXOS

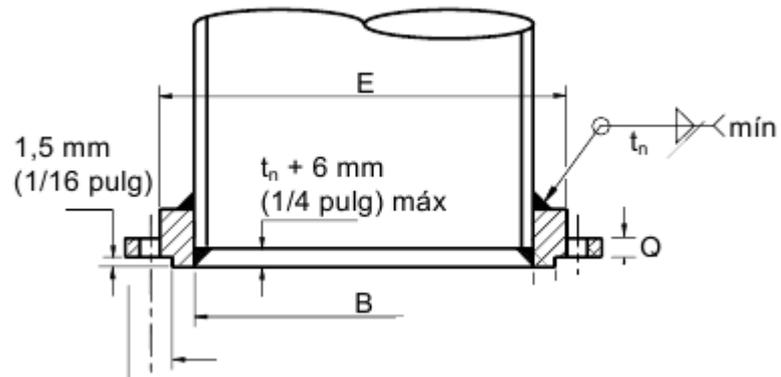
ANEXO A

DIMENSIONES PARA BRIDAS DE BOQUILLAS

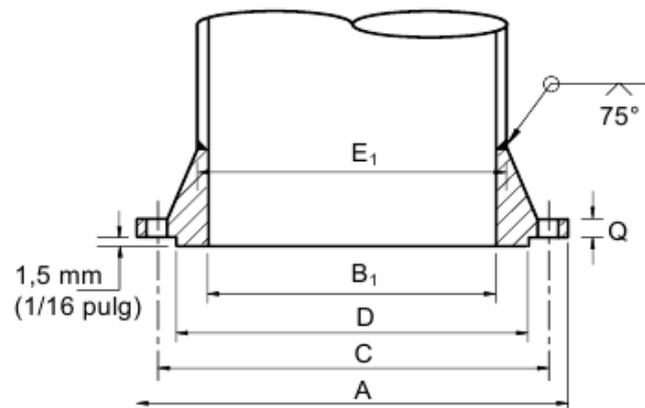
Brida tipo cuello deslizable para soldar anillo de placa



Brida tipo cuello deslizable para soldar anillo con mamelón



Brida tipo cuello soldable



Boquillas en la envolvente: espesores en tubo, placa y tamaño de soldaduras mm (pulg)

Tamaño de boquilla DN (NPS)	Mínimo espesor de brida ^d Q	Diámetro exterior de brida A	Diámetro de la cara realizada D	Diámetro del círculo de barrenos C	Numero de barrenos	Diámetro del barreno	Diámetro de tornillos	Diámetro interior de la brida (Bore)		Diámetro mínimo del mamelón (Hub) en el punto de soldar	
								Brida tipo deslizable: Diámetro exterior del tubo mas B	Brida tipo ^a cuello soldable: B ₁	Brida tipo ^b deslizable E	Brida tipo ^c cuello soldable E ₁
1219 (48)	70 (2¾)	1510 (59½)	1360 (53½)	1420 (56)	44	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,8 (½)	a	b	c
1168 (46)	68 (2 ¹¹ / ₁₆)	1460 (57½)	1295 (51)	1365 (53¾)	40	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,6 (½)	a	b	c
1118 (44)	67 (2 ⁵ / ₈)	1403 (55¼)	1245 (49)	1314 (51¾)	40	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,4 (½)	a	b	c
1067 (42)	67 (2 ⁵ / ₈)	1345 (53)	1195 (47)	1255 (49½)	36	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,2 (½)	a	b	c
1016 (40)	65 (2½)	1290 (50¾)	1125 (44¼)	1200 (47¼)	36	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,0 (½)	a	b	c
965 (38)	60 (2 ³ / ₈)	1240 (48¾)	1075 (42¼)	1150 (45¼)	32	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,8 (½)	a	b	c
914 (36)	60 (2 ³ / ₈)	1170 (46)	1022 (40¼)	1085 (42¾)	32	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,6 (½)	a	b	c
864 (34)	59 (2 ⁵ / ₁₆)	1110 (43¾)	960 (37¾)	1030 (40½)	32	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,4 (½)	a	b	c
813 (32)	57 (2¼)	1060 (41¾)	910 (35¾)	980 (38½)	28	42 (1 ⁵ / ₈)	38 (1½)	6,2 (½)	a	b	c
762 (30)	54 (2 ¹ / ₈)	985 (38 ³ / ₄)	855 (33 ³ / ₄)	915 (36)	28	33 (1 ³ / ₈)	30 (1¼)	6,0 (½)	a	b	c
711 (28)	54 (2 ¹ / ₁₆)	925 (36 ¹ / ₂)	795 (31 ¹ / ₄)	865 (34)	28	33 (1 ³ / ₈)	30 (1¼)	6,8 (½)	a	b	c
660 (26)	50 (2)	870 (34 ¹ / ₄)	745 (29 ¹ / ₄)	805 (31 ³ / ₄)	24	33 (1 ³ / ₈)	30 (1¼)	6,6 (½)	a	b	c
610 (24)	47,6 (1 ⁷ / ₈)	813 (32)	692 (27 ¹ / ₄)	749 (39 ¹ / ₂)	20	33 (1 ³ / ₈)	30 (1¼)	4,4 (¾)	a	b	c
559 (22)	46 (1 ¹³ / ₁₆)	750 (29 ¹ / ₂)	640 (25 ¹ / ₄)	690 (27 ¹ / ₄)	20	33 (1 ³ / ₈)	30 (1¼)	5,2 (¾)	a	b	c
508 (20)	43 (1 ¹¹ / ₁₆)	700 (27 ¹ / ₂)	585 (23)	635 (25)	20	30 (1 ¹ / ₄)	27 (1 ¹ / ₈)	5,0 (¾)	a	b	c
457 (18)	40 (1 ⁹ / ₁₆)	635 (25)	535 (21)	580 (22 ³ / ₄)	16	30 (1 ¹ / ₄)	27 (1 ¹ / ₈)	4,8 (¾)	a	b	c
406 (16)	36 (1 ⁷ / ₁₆)	595 (25 ¹ / ₂)	470 (18 ¹ / ₂)	540 (21 ¹ / ₄)	16	27 (1 ¹ / ₈)	24 (1)	4,6 (¾)	a	b	c
356 (14)	35 (1 ³ / ₈)	535 (21)	415 (16 ¹ / ₄)	475 (18 ³ / ₄)	12	27 (1 ¹ / ₈)	24 (1)	4,4 (¾)	a	b	c
305 (12)	32 (1 ¹ / ₄)	485 (19)	380 (15)	430 (17)	12	25 (1)	22 (7/8)	3,15 (¾)	a	b	c
254 (10)	30 (1 ³ / ₁₆)	405 (16)	325 (12 ³ / ₄)	360 (14 ¹ / ₄)	12	25 (1)	22 (7/8)	2,95 (¾)	a	b	c
203 (8)	28 (1 ¹ / ₈)	345 (13 ¹ / ₂)	270 (10 ⁵ / ₈)	300 (11 ³ / ₄)	8	23 (7/8)	20 (3/4)	2,92 (0,1)	a	b	c
152 (6)	25 (1)	280 (11)	216 (8 ¹ / ₂)	240 (9 ¹ / ₂)	8	23 (7/8)	20 (3/4)	2,72 (0,1)	a	b	c
102 (4)	24 (1 ¹⁵ / ₁₆)	230 (9)	157 (6 ³ / ₁₆)	190 (7 ¹ / ₂)	8	19 (3/4)	16 (5/8)	1,7 (0,06)	a	b	c
76 (3)	24 (1 ¹⁵ / ₁₆)	190 (7 ¹ / ₂)	127 (5)	152 (6)	4	19 (3/4)	16 (5/8)	1,1 (0,06)	a	b	c
51 (2)	20 (¾)	150 (6)	92 (3 ⁵ / ₈)	121 (4 ³ / ₄)	4	19 (3/4)	16 (5/8)	1,68 (0,07)	a	b	c

ANEXO B
DIMENSIONES PARA MANHOLE
MANHOLE LATERAL

ESPEORES DE TAPAS PLANAS

Altura Máxima del tanque (m)	Presión Hidrostática	Espesor Mínimo de la Tapa Plana (tc)			
		Registro de 500	Registro de 600	Registro de 750	Registro de 900
5.2	51	8	10	11	13
6.7	66	10	11	13	14
8	78	10	11	14	16
9.9	97	11	13	16	18
11.1	109	13	14	16	19
13.4	131	13	14	18	21
16.1	158	14	16	19	22
18.6	182	16	18	21	24
22.9	224	18	19	24	25

ESPEORES DE BRIDAS

Altura Máxima del tanque (m)	Presión Hidrostática (KPa)	Espesor Mínimo de la Tapa Plana (tf)			
		Registro de 500	Registro de 600	Registro de 750	Registro de 900
5.2	51	6	6	8	10
6.7	66	6	8	10	11
8	78	6	8	11	13
9.9	97	8	10	13	14
11.1	109	10	11	13	16
13.4	131	10	11	14	18
16.1	158	11	13	16	19
18.6	182	13	14	18	21
22.9	224	13	14	18	24

ESPEORES DEL CUELLO

Altura Máxima del tanque (m)	Espesor Mínimo de la Tapa Plana (tf)			
	Registro de 500	Registro de 600	Registro de 750	Registro de 900
5	5	5	5	5
6	6	6	6	6
8	6	6	8	8
10	6	6	8	10
11	6	6	8	10
12.5	6	6	8	10
14	6	6	8	10
16	6	6	8	10
18	6	6	8	10
19	6	6	8	10
20	6	6	8	10
21	8	6	8	10
22	10	8	8	10
24	11	11	11	11
25	11	11	11	11
27	11	11	11	11
28	13	13	13	13
30	14	14	14	14
32	16	14	14	14
33	16	16	16	16
35	17	16	16	16
36	17	17	17	17
40	19	19	19	19

MANHOLE EN EL TECHO

DIMENSIONES DE MANHOLE EN EL TECHO EN MM (PULG)

Diámetro Nominal	Diámetro Interior del Cuello ID	Diámetro Exterior de la Tapa Plana Dc	Diámetro del Agujero en el Techo y Placa de Refuerzo Dp	Diámetro Exterior de la Placa de Refuerzo Dr	Diámetro Círculo de Barrenos Db	Número de Pernos	Diámetro del Empaque	
							Interior	Exterior
600	600	750	615	1150	690	20	600	750
500	500	650	515	1050	590	16	500	650

ANEXO C

VENTEO

ANEXO D

CONEXIONES BRIDADAS EN EL TECHO

BOQUILLAS BRIDADAS EN EL TECHO. DIMENSIONES EN MM (PULG)

Diámetro nominal de la boquilla		Diámetro Nominal del cople		diámetro del agujero en la placa del techo o en la de refuerzo (D _P)	Diámetro exterior de la placa de refuerzo (D _R)		
19	(¾)	19	(¾)	36	(1 7/16)	100	(4)
25	(1)	25	(1)	44	(1 23/32)	110	(4½)
38	(1½)	38	(1½)	60	(2 11/32)	125	(5)
50	(2)	50	(2)	76	(3)	175	(7)
76	(3)	76	(3)	105	(4 1/8)	225	(9)
100	(4)	100	(4)	135	(5 11/32)	275	(11)
150	(6)	150	(6)	192	(7 17/32)	375	(15)
200	(8)	200	(8)	250	(9 7/8)	450	(18)
250	(10)	250	(10)	305	(12)	550	(22)
300	(12)	300	(12)	360	(14¼)	600	(24)

ANEXO D

VALORES DE LAS PROPIEDADES DE LOS SÓLIDOS DISGREGADOS

Tipo de sólido disgregado ^{d,e}	Peso específico ^b		Ángulo de talud natural	Ángulo de rozamiento interno		Coeficiente de presiones laterales		Coeficiente de rozamiento con la pared ^c				Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas C_{op}
	γ		ϕ	ϕ		K		μ ($\mu = \tan \phi_w$)				
	γ_i	γ_s	ϕ	ϕ_m	a_ϕ	K_m	a_K	Tipo de pared D1	Tipo de pared D2	Tipo de pared D3	a_μ	
	Inferior	Superior		Medio	Coeficiente	Medio	Coeficiente	Medio	Medio	Medio	Coeficiente	
		grados	grados									
Material por defecto	6,0	22,0	40	35	1,3	0,50	1,5	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0
Áridos	17,0	18,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4
Aluminio	10,0	12,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Mezcla de piensos	5,0	6,0	39	36	1,08	0,45	1,10	0,22	0,30	0,43	1,28	1,0
Piensos en pellets	6,5	8,0	37	35	1,06	0,47	1,07	0,23	0,28	0,37	1,20	0,7
Cebada	7,0	8,0	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5
Cemento	13,0	16,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Clinker de cemento	15,0	18,0	47	40	1,20	0,38	1,31	0,46	0,56	0,62	1,07	0,7
Carbón	7,0	10,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,44	0,49	0,59	1,12	0,6
Carbón en polvo	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Coque	6,5	8,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,6
Cenizas volantes	8,0	15,0	41	35	1,16	0,46	1,20	0,51	0,62	0,72	1,07	0,5
Harina	6,5	7,0	45	42	1,06	0,36	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,6
Pellets de mineral de hierro	19,0	22,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,5
Cal hidratada	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,36	0,41	0,51	1,07	0,6
Caliza en polvo	11,0	13,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Maíz	7,0	8,0	35	31	1,14	0,53	1,14	0,22	0,36	0,53	1,24	0,9

PLANOS

