



POSGRADOS

MAESTRÍA EN

INGENIERÍA MECÁNICA CON MENCIÓN EN DISEÑO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS EN OBRAS CIVILES E INDUSTRIALES

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN
SILO CILÍNDRICO FABRICADO EN
ACERO ESTRUCTURAL PARA
ALMACENAMIENTO Y DESCARGA
DE HARINA DE TRIGO CON
CAPACIDAD DE 110 TONELADAS.

AUTOR(ES)

JIMMY JAVIER QUINGA VEGA

DIRECTOR:

WILLIAM GUSTAVO DÍAZ DÁVILA

QUITO – ECUADOR

2023



Autor(es):



Jimmy Javier Quinga Vega

Ingeniero Mecánico

Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño De Estructuras Metálicas En Obras Civiles E Industriales por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.

jquingav1@est.ups.edu.ezac

Dirigido por:



William Gustavo Díaz Dávila

Ingeniero Mecánico

Magíster en Gestión de la Producción

wdiaz@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

JIMMY JAVIER QUINGA VEGA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SILO CILINDRO FABRICADO EN ACERO ESTRUCTURAL PARA ALMACENAMIENTO Y DESCARGA DE HARINA DE TRIGO CON CAPACIDAD DE 110 TONELADAS.

DEDICATORIA

A mi madre Aida por su amor infinito, por su comprensión y cariño que me ha dado durante toda mi vida, por su entrega como madre y su confianza en mí, por su empuje y motivación que ha hecho que logre lo que me he propuesto en mi vida, por su apoyo incondicional que ha impulsado que siga con mis estudios.

A mi padre Luis por su ejemplo de lucha y perseverancia que ha sido una inspiración para mí, por sus consejos que me han hecho un hombre mejor, por su apoyo que así como mi madre han impulsado que siga con mis estudios.

AGRADECIMIENTO

A mi padre Luis y a mi madre Aida por su ejemplo, por su amor incondicional, por sus enseñanzas de vida y por todo lo que han hecho por mí a lo largo de mi vida, me han demostrado que con esfuerzo y trabajo duro se puede alcanzar lo que uno desee, gracias por nunca dejarme solo y guiarme siempre, gracias a ellos son la persona que soy.

Al Ing. William Díaz y a mis profesores que con su gran sabiduría, guía y colaboración hicieron que pueda concluir con mi etapa de maestrante.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	13
Abstract.....	14
1 Introducción	15
2 Determinación del Problema	17
2.1 Formulación del problema.....	17
2.2 Justificación.....	17
2.3 Objetivos	18
2.3.1 Objetivo General.....	18
2.3.2 Objetivos Específicos	18
3 Marco teórico referencial.....	19
3.1 Materiales granulares	19
3.2 Trigo y sus características	19
3.2.1 Características del trigo	20
3.3 Procesamiento de la harina de trigo.....	21
3.4 Herramientas CAD/CAM	22
3.4.1 Diseño asistido por computadora (CAD)	22
3.5 Silos	22
3.5.1 Silos de torre.....	23
3.5.2 Silos tipo bolsa	23
3.5.3 Silos tipo Bunker	24
3.6 Clasificación de los silos	24
3.6.1 Partes del silo.....	26
3.7 Recubrimiento para silos	26
3.7.1 Acrílicos.....	27
3.7.2 Epóxidos.....	27
3.7.3 Galvanizado en Caliente	28
3.8 Tipología del silo	28
3.9 Peligros con los silos	29

3.9.1	Incendios y explosiones	29
3.9.2	Accidentes mecánicos y atrapamientos	29
3.9.3	Espacios confinados.....	29
3.10	Carga y descarga de Silos	30
3.10.1	Carga de silos	30
3.10.2	Descarga de silos	31
3.11	Normas de diseño de silos	32
4	Materiales y metodología.....	33
4.1	Formulación del diseño.....	33
4.1.1	Especificaciones	33
4.1.2	Localización del silo	34
4.1.3	Requerimientos	35
4.1.4	Estructura de funciones.....	35
5	Resultados y discusión.....	36
5.1	Datos generales	36
5.2	Cálculo del volumen del silo	36
5.2.1	Datos: Silo	37
5.2.2	Definiciones de la norma Euro Código	38
5.2.3	Parámetros generales de diseño de silos de chapa lisa	40
5.2.4	Cálculo del coeficiente k (material almacenado en reposo)	41
5.2.5	Cálculo del coeficiente u (rozamiento del material con las paredes laterales) [Tabla: Anexo B].....	41
5.2.6	Cálculo de presiones de diseño de silo de chapa lisa	42
5.2.7	Cálculos del silo según compresión	44
5.2.8	Presiones y cargas de la tolva.....	45
5.2.9	Cargas sobre las paredes verticales en el llenado.....	47
5.2.10	Valor característico de la fuerza vertical resultante.....	50
5.2.11	Presión concentrada en el llenado	50
5.2.12	Cargas concentradas en el llenado de silos circulares de pared delgada	51
5.2.13	Fuerza horizontal total	51
5.2.14	Cargas sobre las paredes verticales en la descarga.....	51
5.2.15	Valor característico de la fuerza vertical resultante.....	52

5.2.16	Presión concentrada en el llenado	53
5.2.17	Cargas concentradas en el llenado de silos circulares de pared delgada	54
5.2.18	Cargas sobre la tolva.....	54
5.2.19	Presión vertical media	55
5.2.20	Coeficiente de rozamiento característico	56
5.2.21	Cargas de llenado	56
5.2.22	Presión normal.....	57
5.2.23	Presión de tracción	58
5.2.24	Cargas de Descarga.....	58
5.2.25	Diseño de viga de soporte de silo.....	59
5.2.26	Cálculo de distancias	59
5.2.27	Cálculo del peso del producto:	60
5.2.28	Carga distribuida W	60
5.3	Diseño del silo 3D.....	63
5.3.1	Tipo	63
5.3.2	Silo	63
5.3.3	Producto: Harina de trigo	64
5.3.4	Material	64
5.3.5	Software.....	64
5.4	Simulación.....	64
5.5	Análisis estático de la pared del silo	64
5.6	Análisis de sección	64
5.6.1	Sección con espesor de 2mm	67
5.6.2	Sección con espesor de 3mm	67
5.6.3	Sección con espesor de 4mm	68
5.6.4	Sección con espesor de 5mm	69
5.6.5	Sección con espesor de 6mm	69
5.7	Análisis estático del silo	71
5.7.1	Sujeciones.....	71
5.7.2	Cargas	71
5.7.3	Mallado.....	72
5.7.4	Resultados	73

6 Conclusiones.....	80
6.1 Conclusiones	80
6.2 Recomendaciones.....	81
Referencias	82
Anexos	84

Índice de Tablas

Tabla 1 Tamaño de granos usados en la industria alimenticia.....	19
Tabla 2 Clasificación Para las clases de evaluación de Silos	24
Tabla 3. Clasificación de esbeltez del silo	25
Tabla 4. Clasificación del silo según el espesor de la pared	26
Tabla 5. Años de duración galvanizado en caliente	28
Tabla 6. Condiciones meteorológicas – M0041 SANGAY	34
Tabla 7. Sujeciones del silo	71
Tabla 8. Cargas del silo	72
Tabla 9. Mallado del silo	72
Tabla 10. Información del mallado	72
Tabla 11. Tensión de von Mises.....	73
Tabla 12. Tensión axial sobre la estructura	73
Tabla 13. Desplazamiento	74
Tabla 14. Factor de seguridad del silo completo.....	75
Tabla 15. Factor de seguridad del silo	76
Tabla 16. Factor de seguridad de la estructura	77
Tabla 17 Costos de materia prima.....	78
Tabla 18 Costos de talento humano.....	79

Índice de Figuras

Figura 1. Composición del grano de trigo.....	20
Figura 2. Silos tipo torre.	23
Figura 3. Silos tipo bola	24
Figura 4. Silo tipo Bunker.....	24
Figura 6. Partes de un Silo	26
Figura 7. Tamiz con una capacidad máxima de 30.000 kg/h.....	31
Figura 8. Diseño del cuerpo del silo.....	36
Figura 9. Silo con notación de medidas	39
Figura 10. Sección de cuerda del silo.....	46
Figura 11. Presiones que actúan sobre el silo	48
Figura 12. Presiones verticales que actúan sobre el silo.....	54
Figura 13. Semi ángulo de tolva β (grados)	55
Figura 14. Diseño de viga de soporte	59
Figura 15. Diseño del Silo.....	63
Figura 16. Simulación de pandeo en sección del Silo.....	65
Figura 17. Simulación de sección del silo aplicando fuerza horizontal	66
Figura 18 Simulación de sección del silo aplicando presión de rozamiento.	66
Figura 19. Simulación de sección del silo con espesor 2 mm.....	67
Figura 20. Simulación de sección del silo con espesor 3 mm.....	68
Figura 21. Simulación de sección del silo con espesor 4 mm.....	68
Figura 22. Simulación de sección del silo con espesor 5 mm.....	69
Figura 23. Simulación de sección del silo con espesor 6 mm.....	70
Figura 24. Representación esquemática del silo	71
Figura 25. Silo Completo-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones1.....	73
Figura 26. Silo Completo-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones2.....	74
Figura 27. Silo Completo-Análisis estático 1-Desplazamientos-Desplazamientos1.....	75
Figura 28. Silo Completo-Análisis estático 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad1	76
Figura 29. Silo Completo-Análisis estático 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad2	77

Figura 30. Silo Completo-Análisis estático 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad3
..... 78

DISEÑO Y SIMULACIÓN
DE UN SILO
CILÍNDRICO
FABRICADO EN ACERO
ESTRUCTURAL PARA
ALMACENAMIENTO Y
DESCARGA DE HARINA
DE TRIGO CON UNA
CAPACIDAD DE 110
TONELADAS.

AUTOR(ES):

JIMMY JAVIER QUINGA VEGA

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es diseñar y simular un silo cilíndrico fabricado en acero estructural para almacenamiento y descarga de harina de trigo con una capacidad de 110 toneladas. Para ello, se identificó los tipos de silos utilizados para el almacenamiento. Esta investigación aplica una metodología específica para el diseño que consta de cuatro etapas esenciales que son: diseño del concepto, diseño funcional, estructura y detalle. El silo presentado en este proyecto cumple satisfactoriamente con la normativa vigente para la construcción, además, se ha sido verificado mediante una simulación de elementos finitos en SolidWorks. El hecho de que el factor de seguridad obtenido sea de 7 evidencia que tanto la selección del material como el diseño del silo han sido adecuados y acordes a los requerimientos especificados, en la simulación se constata que al aplicar presiones dentro del silo el esfuerzo de Von Mises máximo en el diseño es de 644 kg/cm^2 , el cual es menor al esfuerzo de fluencia del material que es de 2109 kg/cm^2 ; esto garantiza que el silo no falle con los esfuerzos aplicados. Finalmente se identificó que el diseño propuesto genera un desplazamiento máximo de alrededor de 2,88 mm en la parte superior del silo donde la chapa es de 2mm y un mínimo de desplazamiento de 1.44mm en la parte inferior del silo donde la chapa es de 5mm, estas chapas metálicas de acero galvanizado garantizan la fiabilidad, el uso, la limpieza y el mantenimiento del silo.

Palabras clave: Silos, Von Mises, Acrílicos, Herramientas CAD/CAM, Galvanizado.

ABSTRACT

The objective of this research is to design and simulate a cylindrical silo made of structural steel for storage and unloading of wheat flour with a capacity of 110 tons. For this purpose, the types of silos used for the storage of wheat flour were identified, in this research applies a specific methodology for design that consists of four essential stages that: concept design, functional design, structure and detailing. The silo presented in this project has been satisfactory in terms of the calculations made in accordance with current regulations and which have been verified by finite element simulation in SolidWorks. The fact that the safety factor obtained is 7 shows that both the selection of the material and the design of the silo have been adequate and in accordance with the specified requirements, in the simulation it is verified that when applying pressures inside the silo the effort of Von Maximum mises in the design is 644 kg/cm^2 , which is less than the yield stress of the material, which is 2109 kg/cm^2 ; this guarantees that the silo will not fail with the applied stresses. Finally, it was identified that the proposed design generates a maximum displacement of about 2.88 mm in the upper part of the silo where the plate is 2 mm and a minimum displacement of 1.44 mm in the lower part of the silo where the plate is 5 mm, these galvanized steel metal sheets guarantee the reliability, use, cleanliness and maintenance of the silo.

Key words: Silos, Von Mises, Acrylics, CAD/CAM tools, Galvanized.

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto de titulación tiene como objetivo diseñar y simular un silo cilíndrico en acero estructural para el almacenamiento y descarga de harina de trigo, con una capacidad de 110 toneladas. El propósito de este proyecto es satisfacer la necesidad común de la industria de contar con una infraestructura adecuada para el almacenamiento de granos y productos alimenticios. El diseño del silo se basará en las normas y estándares internacionales de ingeniería, asegurando la seguridad, eficiencia y rentabilidad de la estructura. La simulación permitirá comprobar el comportamiento del silo ante diversas situaciones y cargas, para optimizar su funcionamiento y garantizar su capacidad de almacenamiento y descarga.

Es comúnmente conocido que los silos son utilizados en la industria alimentaria debido a su eficiencia y flexibilidad en la conservación de la calidad y nutrientes de diversos productos alimenticios [1]. En el Ecuador se almacena maíz, trigo, cebada, soya, además de productos procesados como harina, balanceados y materiales de construcción como arena, cemento entre otros. La mayoría de los productos alimenticios provienen de grandes y pequeños productores según la Unidad Nacional de Almacenamiento UNA EP [2].

A pesar de que el Ecuador no es un país productor de trigo dado que apenas el 1.13% de la demanda llega de los campos ecuatorianos y el resto de los países como Canadá, Estados Unidos y Argentina, la demanda de trigo aumenta cerca del 2% al 3% anual, teniendo una producción promedio de 624 000 toneladas para importaciones y 3 000 toneladas para consumo local [3]. Sin embargo, una consecuencia de la pandemia COVID-19 fue que la demanda de derivados de trigo aumente llegando a las 14 647 toneladas a nivel local. Este hecho ha tenido un impacto en la industria alimenticia puesto que necesitan aumentar su capacidad de producción y almacenamiento, por lo que requieren un incremento en su infraestructura para satisfacer a las necesidades del mercado actual [4].

Este estudio tiene como objetivo diseñar y simular un silo cilíndrico en acero estructural para el almacenamiento y descarga de harina de trigo con una capacidad de 110 toneladas. El primer capítulo establece el problema de investigación, los objetivos y las preguntas de investigación. El segundo capítulo presenta una revisión bibliográfica de los conceptos teóricos relacionados con el diseño y simulación de silos cilíndricos. En el tercer capítulo se describen los materiales y equipos utilizados en la construcción del silo, así como la metodología utilizada para su diseño y simulación. En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos y se discuten los hallazgos en comparación con otros estudios similares. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y contribuciones del estudio para la industria de almacenamiento y descarga de harina de trigo.

2 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En consecuencia, a la problemática antes mencionada se plantea el diseño de un silo metálico por las ventajas que ofrece para su uso en las industrias alimenticias las cuales son: fácil mantenimiento, higiene en el producto almacenado evitando la proliferación de bacterias u otros microorganismos, es hermético y mantiene libre de humedad al producto entre otras ventajas. El silo se diseñará utilizando las UNE-EN 1991-4:206 Parte 4 [5] y CPE INE 008:2013[6] vigentes en el Ecuador.

2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible realizar el diseño y simulación de un silo cilíndrico fabricado en acero estructural para almacenamiento y descarga de harina de trigo con una capacidad de 110 toneladas?

2.2 JUSTIFICACIÓN

El aumento progresivo de la producción y el almacenamiento de los derivados de trigo hace que las panificadoras y molineras necesiten aumentar su infraestructura. El diseño de un silo es factible dado que aumenta la capacidad almacenamiento de una empresa, por lo cual las industrias en crecimiento necesitan un modelo factible y simulado asegurando su integridad estructural para una futura construcción puesto que se sabe que con un silo construido se puede realizar un bloque maximizando el almacenamiento.

La intención de crecimiento en el procesamiento de harina de trigo en el Ecuador trata de ser el 26% aproximadamente [3]. Las industrias requieren un diseño de silo versátil que se adapte a sus necesidades, por lo que se plantea un modelo cilíndrico puesto que son idóneos para almacenamiento de productos granulares cuando se dispone de una superficie limitada de construcción, además son de fácil montaje y mantenimiento, el material debe garantizar la conservación del producto

almacenado libre de contaminación y humedad. Para el fondo del silo se verificará las ventajas y desventajas que el fondo cónico a comparación con un plano, analizando cual es el óptimo para el diseño.

La propuesta de diseño por plantearse va a estar respaldada de una simulación a través de un software computacional de análisis de elementos finitos, con la finalidad de garantizar la integridad de este comprobando que no va a existir fallas estructurales.

2.3 OBJETIVOS

2.3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular un silo cilíndrico fabricado en acero estructural para almacenamiento y descarga de harina de trigo con una capacidad de 110 toneladas.

2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un silo cilíndrico determinando el fondo de este para facilitar la descarga del producto tomando en cuenta su facilidad de operación y costo.
- Realizar el análisis de cargas a las que el silo y la estructura están sometidas para definir el diseño.
- Realizar el diseño del silo utilizando la normativa UNE-EN 1991-4: 2006 y CPE INE 008:2013 para garantizar la funcionalidad y seguridad del silo.
- Simular el silo utilizando un software especializado considerando las especificaciones de capacidad y los factores de diseño correspondientes para conseguir el diseño óptimo

3 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 MATERIALES GRANULARES

Los materiales granulares están formados de partículas microscópicas solidas individuales de forma que las fuerzas de interacción entre ellas sea la de rozamiento, dando lugar a los fenómenos como son las avalanchas, los atascamientos en solios de descarga entre otros [7]. Se tiene los materiales granulares como son los granos, semilla, nieve, azúcar, arena, graba, entro otros. En la Tabla 1 se observa los granos utilizados en la industria alimenticias haciendo énfasis en su diámetro y numero de grano por kilogramo[8].

Tabla 1
Tamaño de granos usados en la industria alimenticia

Grano	Diámetro mayor [mm]	Diámetro promedio [mm]	Diámetro menor [mm]	Número granos por [kg]	Contenido de humedad [%]
Arroz cascara	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
Quinoa	2,08	1,11		333334	13,5
Arveja	8,98	7,8	7,5	2758	13,7

3.2 TRIGO Y SUS CARACTERÍSTICAS

Según los artículos desarrollados en investigaciones anteriores [9] y [10] concuerdan que el trigo es una variedad de cereal perteneciente a las gramíneas, que es cultivado a nivel mundial puesto que es un grano altamente nutritivo que contiene vitaminas, celulosa, fibra, almidón, gluten, cada uno siendo muy beneficioso para el consumo humano debido a que favorece la asimilación de los alimentos, depura el organismo y facilita la deposición, así también ayuda a mitigar

los síntomas del raquitismo y anemia, el trigo harinero es el más cultivado puesto que es consumido principalmente en harina, fideos y masas, es una planta muy versátil y adaptable, para su cultivo solamente se necesita aire, humedad y una temperatura de 3 a 30°C. En la figura 1, se describe las partes del grano de trigo:

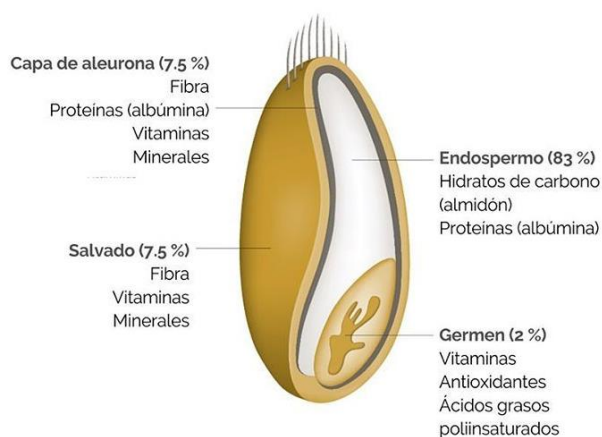


Figura 1. Composición del grano de trigo

- Endospermo o albumen: Capa interior del grano que abarca el 80% del peso total, se encuentra el almidón y el germen que contiene grasas, vitaminas y proteínas.
- La testa o tegmen: Capa interior situada entre la envoltura externa y endospermo, tiene una considerable cantidad de aceite.
- Salvado: Capas que recubre el grano, que se retira mediante el refinado de harina.
- Pericarpio, mesocarpio y epicarpio: Capas ubicadas bajo el salvado, su función es la protección del grano. Posee proteínas, vitaminas y minerales. Se retira en el refinado.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL TRIGO

A. Amerah [11] realizó una investigación en donde señala las características más importantes del grano de trigo para el consumo humano, las cuales son:

- Se necesita de una temperatura de 3° a 30° C para su cultivo siendo una plana adaptable a las temperaturas, pero su cultivo óptimo se da en temperaturas de 20°.
- La planta alcanza una altura de 0,7 a 1,2 m y crece en suelos profundos y tierra suelta.
- Principalmente es usado para la producción de cerveza, harina, sémola entre otros alimentos.
- Los granos de trigo son cariósides, es decir, tienen una forma ovalada con puntas redondeadas.

3.3 PROCESAMIENTO DE LA HARINA DE TRIGO

Tal y como señala González y Paz Vergara [12] la materia prima se obtiene mediante la molienda de trigo, con la cual se reduce la presencia del germen del cereal. Para la correcta obtención de la harina de trigo se debe seguir ciertos procesos, los mismos que son descritos a continuación:

- Selección: En este proceso el trigo es sometido a varias verificaciones en las cuales se determinan la cantidad de humedad, impurezas, granos dañados, entre otros con el fin de obtener una materia prima de calidad.
- Limpieza: En esta etapa el trigo es limpiado y procesado mediante un separador magnético, separadores de cribas y aspiración, con los cuales se elimina residuos metálicos y polvo existente en la materia prima.
- Acondicionamiento: Para este punto se añade agua y se deja reposar hasta 24 horas. Obteniendo dos beneficios: mejorar significativamente la calidad del grano y a su vez del producto final y obtener una separación más pura del tejido nutritivo del mismo.
- Molienda: Es una etapa que separa el endospermo del salvado, suele ser de 5 o 6 trituraciones producidas cilindros estriados.
- Separación: Es donde el producto es separado por tamaño, en cada trituración se tiene mallas de filtrado; asimismo, se llega a la fase de purificación en donde se procesa la materia que llega de los cernidores,

puesto que aun en este producto se encuentra una mezcla de salvado y endospermo, se succiona las partículas de salvado.

- Compresión: En esta etapa produce diferentes tipos de finura, dependiendo la configuración de los rodillos lisos.

Luego de varias operaciones se logran obtener las diferentes materias primas para productos como: harina, germen y salvado en el caso de trigos suaves.

3.4 HERRAMIENTAS CAD/CAM

Citando el artículo de las herramientas de gestión de la innovación aplicadas en las organizaciones empresariales [13] las herramientas CAD/CAM son tecnologías aplicadas en la ingeniería industrial mediante ordenadores con el objetivo de facilitar las tareas industriales a los usuarios.

3.4.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)

La herramienta CAD permite el desarrollo de un modelo computarizado de un producto antes de producirse con el fin de aplicar pruebas virtuales e identificar posibles fallos en el prototipo[13]. Entre las características más relevantes están la simulación virtual dinámica para visualizar los procesos y resultados, desarrollo de sistemas virtuales que ayudan a eliminar prototipos con fallas, arquitectura abierta al software y aplicación de ingeniería inversa.

3.5 SILOS

Son estructuras diseñadas con el objetivo de almacenar grandes cantidades de productos a granel como: harinas, semillas, granos y materiales de construcción como cemento o cualquier material que requiera estar libre de humedad. Generalmente los silos son torres cilíndricas de fondo cónico con descarga por la parte inferior, siendo flexibles en costos de materiales para la construcción. Los silos que son construidos con más frecuencia debido a su bajo costo de inversión son:

3.5.1 SILOS DE TORRE

Como se observa en la figura 2 los silos de torre son construcciones que tiene una altura de 10 a 25 metros con un ancho de 4 a 8 metros, generalmente están construidas con vigas de madera, hormigón material galvanizado ondulado, en estos silos se almacena principalmente productos como granos o productos alimenticios que requieren estar alejados de la humedad para preservar la conservación a más tiempo. Su descarga se realiza por la parte inferior.



Figura 2. Silos tipo torre [14]

3.5.2 SILOS TIPO BOLSA

Este tipo de silo es el más económico que existe actualmente, es utilizado principalmente por los micro productores, debido que la cantidad de productos que almacenan son muy reducidas, en este tipo de silos se puede hasta 200 toneladas de producto como se muestra en Figura 3. El proceso de almacenado de estos silos es que las bolsas se llenan y se van sellando por medio de una maquina embolsadora, permitiendo un almacenamiento más eficiente, debido que se puede sellar una parte y volver a utilizar el restante, pero una vez que se realiza la descarga tienen a romperse y los dejan inservibles es por ello que no es de mucha utilidad.



Figura 3. Silos tipo bolsa [14]

3.5.3 SILOS TIPO BUNKER

Son construcciones fabricadas a nivel del suelo, siendo más económicos que los silos de torre; están hechos por lo general de concreto, malla o madera se enfocan principalmente para el almacenamiento de material de construcción, como también de municiones y armamento, tal como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Silo tipo Bunkere [14]

3.6 CLASIFICACIÓN DE LOS SILOS

Actualmente existen diferentes clases de silos estos están clasificados según la categoría de clases de evaluación de acciones según la Norma UNE – EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos [15]. En la tabla 2 se identifica la clasificación para las clases de evaluación de silos:

Tabla 2

Clasificación Para las clases de evaluación de Silos

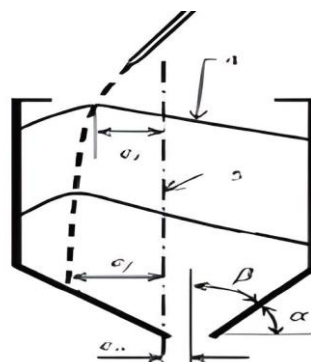
Clase de evaluación de acción	Descripción
-------------------------------	-------------

Clase de evaluación de acción 3 Los silos que se encuentran en esta clase tienen una capacidad mayor de 10000 toneladas en los cuales se pueden producir cualquiera de las siguientes situaciones de cálculo:

Descarga excéntrica con $e_o/d_c > 0,25$

Silo poco esbelto con excentricidad en la superficie superior

$e_t/d_c > 0.25$



Clase de evaluación de acción 2 En esta clase de evaluación de acción se encuentran todos los silos cubiertos por la Norma, que no se encuentran ubicados en otra clase.

Clase de evaluación de acción 1 Según la Norma, se encuentran los silos con capacidad menor de 100 toneladas.

Nota: Tomado de la Norma UNE – EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos [15]

Los silos también se clasifican según la relación de aspecto h_c/d_c . Donde la h_c es la altura del segmento vertical de la pared del silo y d_c es la dimensión característica interior de la sección del Silo [15]. En la Tabla 3 se muestra la clasificación de la esbeltez.

Tabla 3.

Clasificación de esbeltez del silo

Relación de aspecto del silo, h_c/d_c	Clase de silo
$h_c/d_c \geq 2$	Esbelto
$1 < h_c/d_c < 2$	Esbeltez media
$0,4 < h_c/d_c \leq 1$	Poco esbelto
$h_c/d_c \leq 0,4$	Silo granero (fondo plano)

Nota: Tomado de Norma UNE – EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos [15]

A diferencia de la clasificación de los Silos, según la relación d_c/t , donde d_c es la dimensión característica interior de la sección de dicho cuerpo vertical, y t es el

espesor de la pared del silo [15]. A continuación, en la Tabla 4 se muestra la clasificación del silo según el espesor de la pared.

Tabla 4.

Clasificación del silo según el espesor de la pared

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

Nota: Tomado de: Norma UNE – EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos [15]

3.6.1 PARTES DEL SILO

La forma del silo dependerá netamente de las necesidades que tiene la industria para su construcción, a continuación, en la Figura 5 se tiene las partes de un silo [16].



Figura 5. Partes de un Silo

3.7 RECUBRIMIENTO PARA SILOS

Actualmente, existen distintas técnicas disponibles para recubrir y resguardar tanto la superficie exterior como interior de los silos debido a que se encuentran expuestos a varios factores ambientales que podrían echar a perder el material almacenado, es así como se ha ido buscando alternativas para protegerlos y prolongar el tiempo de su vida útil. Se tiene los materiales como: epóxidos, acrílicos,

galvanizado en caliente que cumplen la función de proteger de la corrosión y de los factores ambientales.

Para la correcta selección del material con el cual se recubrirá el silo se debe tomar en cuenta el valor de construcción y el tiempo de duración del silo. A continuación, se analiza los recubrimientos más utilizados en los sistemas de almacenaje y se reconoce cual es el más recomendable, según el espesor de la capa de recubrimiento.

3.7.1 ACRÍLICOS

Hoy en día el acrílico es el material más utilizado para el recubrimiento de los silos, está basado en agua debido a las políticas de protección ambiental. La cualidad más destacable de este producto es su resistencia a la exposición a la luz y a los rayos UV. Se sugiere su utilización en ambientes que no sean demasiados hostiles y únicamente en exteriores [17].

3.7.2 EPÓXIDOS

Es el recubrimiento que se utiliza con mayor frecuencia en los tanques y silos, debido que brinda una protección interior y exterior, dando mayor protección contra los factores ambientales y la corrosión. Actualmente, hay una amplia gama de resinas disponibles en el mercado que cumplen con los estándares de calidad requeridos en la industria alimentaria, proporcionando durabilidad y asepsia. De hecho, algunos de estos recubrimientos ofrecen garantías de hasta de 10 años. Pintuco es uno de los distribuidores más grandes en el Ecuador y ofrece a sus clientes variedad de epóxidos. Epoxi - Poliamida es el más recomendable para utilizar en el interior de taque debido a que es el más adecuado para proteger estructuras que se requieren un alto grado de asepsia que no permitan la corrosión de los silos de alimentos principalmente [17].

3.7.3 GALVANIZADO EN CALIENTE

La protección de galvanizado en caliente es el método más costoso para proteger los silos debido a que es un proceso tecnológico que lleva tiempo. Consiste en formar una capa protectora de zinc sobre el hierro o acero a una temperatura de 449°C para evitar la corrosión de los materiales. La duración de esta capa de protección dependerá del espesor del recubrimiento aplicado [17]. En la Tabla 5 se muestra los espesores utilizados y el número de años en promedio de duración.

Tabla 5.
Años de duración galvanizado en caliente

Espesor del recubrimiento		Número de años en promedio de duración hasta que aparece una oxidación del 5% sobre la superficie de acero.			
Metros [e-8]	gr/m ²	Atmosfera Rural	Atmosfera Marina	Atmosfera Urbana	Atmosfera Industrial
3,81 a 7,87	269 a 557	17 - 35	12 - 20	10 - 15	4 - 8
7,87 a 11,938	557 a 844	35 - 50	20 - 35	15 - 25	8 - 12
11,938 a 19,812	884 a 1400	50 - 75	35 - 50	25 - 40	12 - 18

3.8 TIPOLOGÍA DEL SILO

En relación con el tema de investigación se identifica que en la actualidad [18] existen múltiples estructuras que sirven para almacenamiento de grano, mismas que han sido clasificadas bajo distintos criterios: según el material, estos pueden ser metálicos de hierro galvanizado con chapas lisas soldadas o chapas onduladas atornilladas, también pueden ser fabricados de hormigón para instalaciones de larga durabilidad o un elevado riesgo de corrosión.

De acuerdo con el tipo de sección [19], existen silos cilíndricos, cuadrados, rectangulares, entre otros. Así mismo se puede clasificar en función del material almacenado como: materiales pulverulentos o líquidos. También en función de su fondo con tolva o fondo plano. Los silos cilíndricos metálicos son los más utilizados en la industria.

3.9 PELIGROS CON LOS SILOS

Con la utilización de los silos para el almacenamiento de materiales se tiene varios peligros que pueden destruir este material, entre ellos se tiene

3.9.1 INCENDIOS Y EXPLOSIONES

Para evitar este tipo de accidentes laborales con el silos se debe controlar las nubes de polvo, especialmente las que se encuentran cerca de posibles fuentes de ignición, es así que se debe tener una limpieza completa del área evitando levantar polvo, se recomienda utilizar separadores magnéticos para su control de las partículas de polvo, de la misma forma se recomienda tener un silo siempre lleno, debido que, un silo vacío es más propenso a sufrir explosiones, no fumar dentro de las instalaciones donde se encuentran los silos, evitando la caída de objetos que puedan generar chispas o alguna reacción que genere fuego, se tiene que seguir todos los procedimientos de seguridad que los proveedores de la maquinaria recomiendan. Está prohibido dentro soldar o realizar tareas que generen calor dentro del área donde esta él solo, así también se tiene que utilizar equipos eléctricos seguros [20].

3.9.2 ACCIDENTES MECÁNICOS Y ATRAPAMIENTOS

Los accidentes mecánicos son generados por los errores humanos esto se debe que las personas utilizan joyería, cabello suelto, ropa holgada estas prendas pueden quedar atrapadas entre la maquinaria lo que provoca estos accidentes así mismo se debe seguir los protocolos para la realización de la operación como el mantenimiento de las piezas mecánicas, siendo estas áreas de acceso restringido solo para el personal preparado [20].

3.9.3 ESPACIOS CONFINADOS

El personal encargado de revisar el silo no debe de ingresar al mismo antes de los 30 minutos después de ser vaciado y haya circulado aire dentro del mismo como

también para su ingreso debe realizarse con equipo de respiración especial, así también para el mantenimiento de las líneas energizadas se debe impedir el movimiento de máquinas, interrumpiendo el fluido eléctrico asegurándose con la ayuda de un candado fijando un aviso que está prohibido cambiar el estado del circuito, se debe realizar pruebas de contenido de oxígeno en el aire, donde debe tener entre el 19,5% y 21,5% de oxígeno con ello se controla los vapores inflamables en el silo. El personal que manipula estos silos debe contar con todos los equipos de protección y de rescate adecuados ante situaciones de riesgo, así también la empresa debe contar con equipos de iluminación, cascos, caretas, escaleras, arnés, cuerdas y elementos de comunicación como radios o pitos. Estas herramientas no deben producir chispas debido que podría provocarse una explosión [20].

3.10 CARGA Y DESCARGA DE SILOS

3.10.1 CARGA DE SILOS

Cistema - Suratep S.A. [21] manifiesta que para su mejor funcionamiento los silos cuentan con equipo mecanizado para la carga del producto, con piso perforado que permite el secado del grano, o bien, tiene integrado un sistema de aireación mediante conductos, ventiladores y sensores térmicos para monitorear la temperatura de los granos almacenados. Proymec [22] propone la carga de los silos a través de camiones cisterna y una línea de seguridad fabricado en acero inoxidable, como se muestra en la Figura 6. AISI 316 es fácil de limpieza y mínimo mantenimiento, cuenta con una presión máxima de 4 bar y una capacidad máxima de 30.000 kg/h y corte granulométrico, así mismo cuenta con una facilidad de recogida de rechazo a través de una válvula de descarga



Figura 6. Tamiz con una capacidad máxima de 30.000 kg/h

3.10.2 DESCARGA DE SILOS

La empresa Vibrafloor [23] propone un sistema de descarga innovador a través de módulos vibrantes el mismo que es el único sistema de descarga que permite la extracción de grandes cantidades de productos a granel tales como cereales, biomásas, productos agroalimentarios, productos industriales ya sean estos almacenados en silos metálicos, concretos, cilíndricos, rectangulares entre otros, así también otra de las maneras de descarga más eficientes según AZO. [24] se tiene los fondos sopladores o toberas, que emana aire a través de tubos que permitan la descarga del material almacenado en los silos. A diferencia de la descarga manual por gravedad, este sistema permite la descarga de manera automática garantizando la extracción del producto almacenado sin la intervención humana al interior del silo. Entre las principales ventajas de descarga que posee este módulo es que no se requiere de personal dentro del silo para realizar la descarga total, siendo esta forma totalmente segura y no requiere de un mantenimiento, utiliza materiales cohesivos haciéndolo altamente eficiente en altos caudales, tiene una operación automática de descarga con un bajo consumo de energía y no produce vibración transferida a la estructura.

Claudius Peters [25] propone que para la descarga de sólidos a granel se debe determinar una compuerta de control de flujo que permite la descarga de silos y

tolvas, de manera medida y controlada, esta compuerta ha sido diseñada para los silos donde el espacio que existe debajo es limitado y no se puede utilizar una descarga lateral, así mismo se cuenta con el triturador de grumos el cual rompe los grumos formados en el almacenamiento. Finalmente, para una correcta descarga se tiene el alimentador rotativo DKZ que es utilizado para el control de sólidos a granel que se descarguen de forma más controlada y dosificada desde silos y tolvas.

3.11 NORMAS DE DISEÑO DE SILOS

El dimensionado de silos para el almacenamiento de harinas viene regulado por normas diferentes según los países. Las normas usadas en países europeos son: la ANSI-ASAE EP433 en USA y la DIN 1055 [26] . El EUROCÓDIGO 1- PARTE 4: silos y depósitos 4; [27] es una norma elaborada por la Unión Europea. En el Ecuador se utiliza la normativa CPE INEN 008:2013 [6]..

4 MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo investigativo se estableció una metodología para el diseño y simulación de un silo cilíndrico el cual se encuentra fabricado en acero estructural para almacenamiento y descarga de harina de trigo con capacidad de 110 toneladas, para el desarrollo de esta investigación se presenta la información necesaria de forma ordenada y sistemática que facilite el cumplimiento de los objetivos propuestos. Analizando trabajos anteriormente desarrollados se ha logrado identificar cuatro etapas que servirán para la elaboración del silo, estas son: diseño del concepto, diseño funcional, estructura y detalle, a continuación, se describe el proceso metodológico para el desarrollo y simulación.

4.1 FORMULACIÓN DEL DISEÑO

Para el desarrollo del diseño del silo, se utiliza un proceso sistemático guiado en las normas Eurocódigo UNE-EN 1991-4 y CPE INEN, de las cuales se utilizarán las etapas generales, que se adaptaran a la elaboración del silo de almacenamiento de harina de trigo, estas son:

- Especificaciones
- Estructura de funciones
- Búsqueda de soluciones
- Estructura modelo

4.1.1 ESPECIFICACIONES

Durante esta fase, se determinan las especificaciones técnicas del silo para almacenamiento de harina de trigo.

- Capacidad: El silo puede almacenar 110 toneladas, por lo que se considera una capacidad intermedia y puede ser transportado.

- Disposición: Para este proyecto debe tener una disposición vertical para garantizar el almacenamiento del producto.
- Geometría. El silo tiene forma cilíndrica, por su resistencia circunferencial a diferencia de otros silos con diferentes figuras geométricas como los poligonales, los mismos que necesitan de una rigidez estructural.
- Material. El prototipo del silo está diseñado para elaborarse en acero estructural el cual por su resistencia tiene varios años de vida útil.

4.1.2 LOCALIZACIÓN DEL SILO

El diseño del silo que simulara un silo cilíndrico para almacenamiento de harina se encuentra desarrollado para soportar las diferentes condiciones climáticas más difíciles a las cuales puede estar expuesta la estructura en el Ecuador. Con esta investigación se ha identificado los tipos de suelo, humedad ambiente, humedad relativa y zona sísmica de las regiones naturales del Ecuador como son: Costa, Sierra, Oriente y Región Insular. Una de las regiones que menos tiempo de duración tienen los silos es la región amazónica, debido a sus condiciones ambientales que puede tener suelos blandos, altas temperaturas, humedad relativa y precipitaciones de suelo, lo cual daña el diseño del silo porque no es un clima relativamente estable. De acuerdo con el INAMHI 2011, en la Tabla 6 se muestra que en la región amazónica las temperaturas son:

Tabla 6.
Condiciones meteorológicas – M0041 SANGAY

M0041 - INAMHI	
Temperatura máxima	30 °C
Temperatura mínima	12,4°C
Humedad relativa	92%
Punto de rocío	20,4°C
Precipitación	358 mm/día
Velocidad media aire	1,5 Km/h

Nota: Tomado de (Anuario Meteorológico, INAMHI N°51 2011 - Quito 2014. pag. 149)

4.1.3 REQUERIMIENTOS

Tomando como referencia el marco teórico desarrollado en el anterior capítulo, se toman en cuenta el desgaste que tienen los silos dependiendo la zona en donde se realicen, así mismo se toma en cuenta las precauciones que se debe de tener para el almacenamiento de la harina de maíz, por lo que se tiene que tomar en cuenta la correcta captación de aire para mantener ventilado el silo, dicho esto se tiene que realizar una correcta desinfección del silo, no almacenar en lugares que con humedad superior al 15%, porque favorece la proliferación de insectos provocando apelmazamiento con ello aparece bloques de harina en los sacos almacenados en los silos, es así que el lugar debe permanecer completamente seco, la temperatura de almacenamiento no debe de superar los 18° C esto se controla a través de la implementación del sistema de autocontrol (APPCC), evitando el deterioro de la harina contando con mejor calidad [29]. Por lo tanto, se llegó a la conclusión que para la construcción de este silo para el almacenamiento de harina de trigo se requiere que sea trascendental e impermeable.

4.1.4 ESTRUCTURA DE FUNCIONES

El objetivo principal de la construcción del silo es la conservación de harina de trigo, tiene como enfoque principal analizar el correcto método de descarga que determina el diseño funcional y estructura del silo.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PARAMETRIZACIÓN DEL SILO CILÍNDRICO 110 T

5.1 DATOS GENERALES

Especificaciones de dimensionamiento para el diseño y simulación de un silo con capacidad de 110 toneladas, para el almacenamiento de harina utilizando como referencia la densidad y ángulos de rozamiento del producto.

Donde el producto que va a ser almacenado es harina de trigo el cual para calcular el peso específico es igual a un 75% del producto granulado (trigo) el cual tiene un valor de 797 kg/m^3 y la harina tiene un peso específico aparente de $597,75 \text{ kg/m}^3$.

5.2 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL SILO

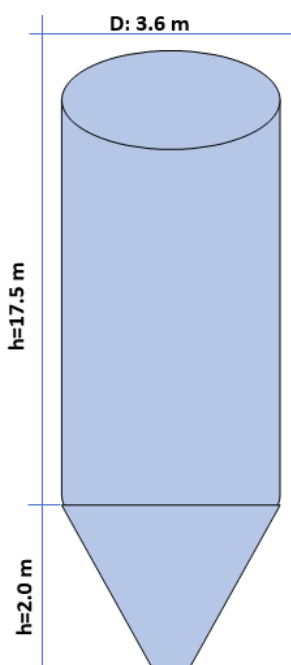


Figura 7. Diseño del cuerpo del silo

5.2.1 DATOS: SILO

Capacidad del silo: 110 *ton*

Diámetro del silo: 3,6 *m*

Altura del silo: 17,5 *m*

- **Cilindro**

Cálculo del volumen necesario para almacenar una masa específica de material sobre el cilindro, a través de la ecuación (1).

$$\text{Volumen} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \quad (1)$$

Donde:

d: densidad [m]

h: altura [m]

$$V = \frac{\pi \cdot 3.6^2}{4} \cdot 17,5 = 178,12 \text{ m}^3$$

- **Tolva**

Cálculo del volumen que tendrá la parte inferior del silo y necesario para almacenar una masa específica de material sobre la tolva, mediante la ecuación (2).

$$\text{Volumen} = \frac{\pi \cdot r^2}{3} \cdot h \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi \cdot 1.8^2}{3} \cdot 2 = 6,78 \text{ m}^3$$

- **Volumen del silo**

Obtención del volumen total para el almacenamiento del material sobre el silo, mediante la ecuación (3).

$$\text{Volumen total} = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{tolva}} \quad (3)$$

$$\text{Volumen total} = 178,12 + 6,78 = 184,9 \text{ m}^3$$

- **Capacidad de almacenaje silo**

Mediante el volumen total del silo y el peso específico del producto a almacenarse se obtiene la capacidad de este dando un promedio de 110 toneladas, por medio de la ecuación (4).

$$\text{Capacidad} = \text{Volumen total} \cdot \text{Densidad del producto} \quad (4)$$

$$\text{Capacidad} = 184,9 \cdot 597,75 = 110523,9 \text{ Kg} \approx 110 \text{ Tn}$$

5.2.2 DEFINICIONES DE LA NORMA EURO CÓDIGO

Limitaciones geométricas sobre una estructura mediante la aplicación de criterios y normas para el diseño del silo y cálculo de sus elementos, como se muestra en la Figura 8.

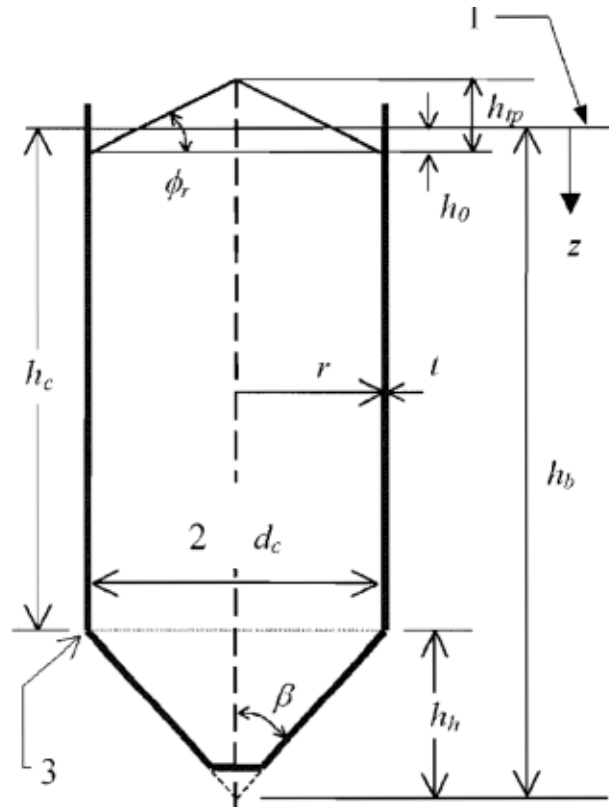


Figura 8. Silo con notación de medidas

Como regla para el diseño del silo se aplica:

- La altura total sobre el dimensionamiento de la sección transversal de ser menor a 10m, empleando la ecuación (5).
- La altura total del silo debe ser menor a 100 metros, empleando la ecuación (6).
- El dimensionamiento de la sección transversal debe ser menor a 60 metros, empleando la ecuación (7).

$$\frac{h_b}{d_c} < 10 \rightarrow \frac{20}{3.6} < 10 \rightarrow 5.55 < 10 \rightarrow OK \quad (5)$$

$$h_b < 100 \text{ m} \rightarrow 20 \text{ m} < 100 \text{ m} \rightarrow OK \quad (6)$$

$$d_c < 60 \text{ m} \rightarrow 3.6 \text{ m} < 60 \text{ m} \rightarrow OK \quad (7)$$

- **Esbeltez del silo**

Silo esbelto cuando la altura total de la estructura en este caso del silo sobre el dimensionamiento de la sección transversal es mayor a 2, este cálculo es realizado mediante la ecuación (8).

$$\frac{h_b}{d_c} \geq 2.0 \quad (8)$$

$$\frac{20}{3.6} \geq 2.0$$

$$5.55 \geq 2.0$$

El tipo de silo según las características técnicas de construcción posee una característica de silo esbelto.

5.2.3 PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DE SILOS DE CHAPA LISA

Cuando el silo está en su máxima capacidad, la presión sobre las paredes se puede expresar en base al radio hidráulico, mediante la ecuación (9).

$$\text{Radio Hidráulico} = \frac{A}{U} \quad (9)$$

Donde:

A: area en [m²]

U: perimetro en [m]

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (10)$$

$$A = \frac{\pi \cdot 3.6^2}{4} = 10,17 \text{ m}^2$$

$$U = \pi \cdot D \quad (11)$$

$$U = \pi \cdot 3,6 = 11,30 \text{ m}$$

$$\text{Radio Hidráulico} = \frac{10.17}{11.30} = 0.9 \text{ m}$$

5.2.4 CÁLCULO DEL COEFICIENTE K (MATERIAL ALMACENADO EN REPOSO)

Para la especificación de la constante k del material en reposo se sabe que el ángulo de reposo (Φ) es una propiedad de los materiales granulares que indica la máxima pendiente que puede tener un este material cuando esta agrupado. Este ángulo es determinado por la forma de las partículas, la cohesión y la fricción, para la harina el ángulo es de 45 grados y se obtiene a través la ecuación (12) [Anexo A]

$$k = \frac{1 - \sin \Phi}{1 + \sin \Phi} = \frac{1 - \sin 45}{1 + \sin 45} \quad (12)$$

$$k = 0,171$$

5.2.5 CÁLCULO DEL COEFICIENTE U (ROZAMIENTO DEL MATERIAL CON LAS PAREDES LATERALES) [TABLA: ANEXO B].

Para el rozamiento del material con las paredes laterales se usa el vamos de $\mu = 0.48$ [Tabla: ANEXO B]

El coeficiente μ mediante el uso de ensayos y aplicación de criterios proporciona la norma Euro Código referencia EN –1991 – 4 y se obtiene con el uso de la ecuación (13) [Anexo E].

- **Cálculo del factor**

$$\mu \cdot \frac{k}{R} \quad (13)$$

$$0,48 \cdot \frac{0,171}{0,9} = 0,0912$$

5.2.6 CÁLCULO DE PRESIONES DE DISEÑO DE SILO DE CHAPA LISA

La estructura de un silo constituye que un producto en su interior y sobre un área específica, genere distintas presiones por el efecto de rozamiento y almacenamiento.

- Calculo Presiones Máximas

$$P_{hmax} = \frac{w \cdot R}{\mu} \quad (14)$$

$$P_{hmax} = \frac{597.75 \cdot 0.9}{0.48} = 1120,78 \text{ kg/m}^2$$

- Presión horizontal para una altura de 17.5 m

$$P_h = \frac{wR}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu k}{R} * h} \right) \quad (15)$$

$$P_h = 1120.78 (1 - e^{-0.0912 * 17.5}) = 893.5 \text{ kg/m}^2$$

- La presión vertical para la carga aplicada sobre el silo es:

$$P_v = \frac{P_h}{k} \quad (16)$$

$$P_v = \frac{893.5}{0.171} = 5225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad (\text{Janssen})$$

- Cálculo del espesor de la chapa para cada sección considerando tracción se utiliza la siguiente ecuación:

$$e = \frac{P \cdot D}{20[\sigma]} \quad (17)$$

Donde:

e: espesor de la chapa [mm]

Ph: presión horizontal $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$

D: diámetro de la sección del silo [m]

$[\sigma]$: Esfuerzo de tracción $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$

Donde el material para la chapa es: ASME/ASTM A 572 Grado A50

La propiedad el esfuerzo del material es:

$$F_y: 50 \text{ KSI} \approx 3515 \frac{kg}{cm^2}$$

$$[\sigma] = 0,6 F_y \quad (18)$$

$$[\sigma] = 0,6(3515) = 2109 \frac{kg}{cm^2}$$

$$e = \frac{893.5 \cdot 3.6}{20 \cdot 2109} = 0,076 \text{ mm}$$

Cálculo de la presión horizontal para una altura $h = 17,5 \text{ m}$ [Ravenet]

$$\text{factor } k = 1,65$$

$$P_h = k \cdot 893 \frac{kg}{m^2} \quad (19)$$

$$P_h = 1,65 \cdot 893 \frac{kg}{m^2} = 1473.45 \frac{kg}{m^2}$$

Reemplazar valores para el espesor:

$$e = \frac{1473.45 \cdot 3.6}{20 \cdot 2109} = 0,12 \text{ mm}$$

Para el diseño del silo se aplica las directrices según norma Eurocódigo el formulario de construcción donde:

$$dc/t = 3,6/0,03 = 1200 > 200$$

El silo se clasifica como silo de paredes delgadas de acuerdo con 1.5.44 de EN 1991-4.

5.2.7 CÁLCULOS DEL SILO SEGÚN COMPRESIÓN

$$F_{r\ total} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (h \cdot \gamma - P_v) \quad (20)$$

Donde:

$F_{r\ total}$: Fuerza de rozamiento sobre toda la pared a la altura h en $[Kg]$.

h : Altura del borde superior del silo a la sección considerada en $[m]$.

D : Diámetro del silo en $[m]$.

γ : Densidad del producto ensilado en $[Kg/m^3]$

P_v : Presión sobre el fondo a la altura h en $[Kg/m^2]$

Entonces el diseño del cilindro del silo considerando elemento corto a compresión.

Fuerza de rozamiento total a una altura de $h = 17,5\ m$

$$F_{r\ total} = \frac{\pi \cdot 3,6^2}{4} \cdot (17,5 \cdot 597,75 - 5225) = 53292\ kg$$

- Fuerza de rozamiento por metro lineal

$$F_{r\ u} = \frac{F_{r\ total}}{\pi \cdot D} \quad (21)$$

$$F_{r\ u} = \frac{53292}{\pi \cdot 3,6} = 4712\ kg/m$$

El resultado expresado en la sección anterior implica que en 1 m de construcción del silo tiene una carga de 4712 kg fuerza.

El valor obtenido se lo utiliza en el diseño del silo como la fuerza que se aplicara a las paredes de la estructura y verificar la capacidad del material frente a la acción de la fuerza.

5.2.8 PRESIONES Y CARGAS DE LA TOLVA

El esfuerzo de compresión es el resultado de la suma de las presiones existentes en el interior del silo, el cual se caracteriza porque tiende a una disminución de volumen o en una determinada reducción para el análisis se utiliza una chapa de 5 mm de espesor y considerando 1 m de pared del silo, se tiene el esfuerzo de compresión:

Donde:

f_a : esfuerzo de compresión [kg/cm^2].

A : Área de una sección de la tolva en [m^2].

Pv : Presión sobre el fondo a la altura h en [Kg/m^2]

$$f_a = \frac{Pv}{A} \quad (22)$$

$$f_a = \frac{5225}{100 \cdot 0.6} = 104,5 \text{ kg/cm}^2$$

Considerando:

Material ASME/ASTM A 572 Grado A50 $\rightarrow Fy: 50 \text{ KSI} = 3515 \text{ kg/cm}^2$

Considerando diseño del cilindro por pandeo localizado.

La verificación al pandeo de la placa se hace por esbeltez respecto al eje Y.

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (23)$$

$$\lambda = \frac{K \cdot l}{r_y} \quad (24)$$

Donde:

r_y : radio de giro respecto al eje Y en [cm]

I_y : Inercia respecto al eje Y en [cm^4]

A : Área de la sección considerada en [cm^2]

e : Espesor de la chapa en [cm]

l : Longitud de pandeo en [cm]

λ : Coeficiente de esbeltez.

Considerando Articulado-Articulado se tiene $K = 1$ [Anexo C]

Para una placa de espesor 3 mm de una sección curva de 190 cm de cuerda, en el análisis se aplicó un perfil de refuerzo de 60x8 por la altura que tiene el silo, como se indica en la figura; se obtiene el radio de giro gráficamente con el software SolidWorks obteniéndose la siguiente información:

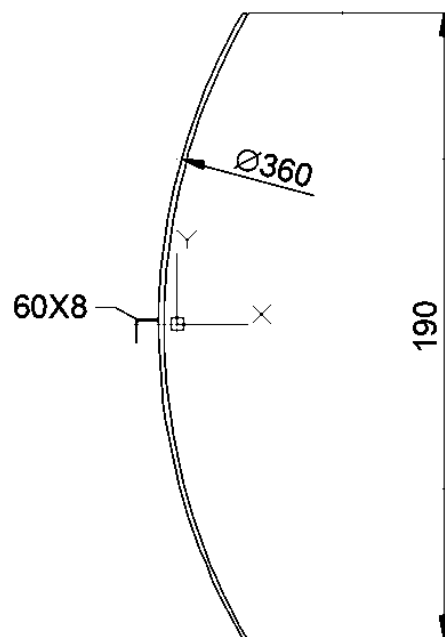


Figura 9. Sección de cuerda del silo

$$I_y = 6123,87 \text{ cm}^4 ; A = 75,40 \text{ cm}^2$$

Reemplazando valores se tiene:

$$r_y = \sqrt{\frac{6123,87}{75,40}} = 9,01 \text{ cm}$$

Cálculo de la esbeltez sobre la sección del silo según el espesor de 3 mm.

$$\lambda = \frac{1 \cdot 17,5 / 4 \cdot 100 \text{ cm}}{9,01 \text{ cm}} = 48,55$$

Esbeltez admisible [λ] = 95 recomendado por norma

$$48,55 < 95 \rightarrow OK$$

$$\text{Con } \lambda = 48,55 \approx 49 \rightarrow Fa = 24,51Ksi = 1723,22kg/cm^2$$

El Fa se especifica en el [Anexo D]

Donde el esfuerzo es sobre la sección de análisis de la inercia y el área.

f_a : esfuerzo de compresión [kg/cm^2].

$$f_a = \frac{Pv}{A} = \frac{5225 \cdot 1.9}{75.40} = 131,66 kg/cm^2$$

El resultado del esfuerzo de compresión es validado con el obtenido por inspección en el Anexo D.

$$f_a < Fa \rightarrow OK \quad (25)$$

$$131,66 \frac{kg}{cm^2} < 1723,22 \frac{kg}{cm^2} \rightarrow OK$$

Los resultados obtenidos permiten comparar el esfuerzo a compresión sobre el silo con el esfuerzo a compresión mediante el cálculo de la esbeltez por la carga dentro del mismo, el cual es mayor y cumple para el diseño del silo.

5.2.9 CARGAS SOBRE LAS PAREDES VERTICALES EN EL LLENADO

En la siguiente Figura 10 se muestra las presiones que actúan sobre el silo

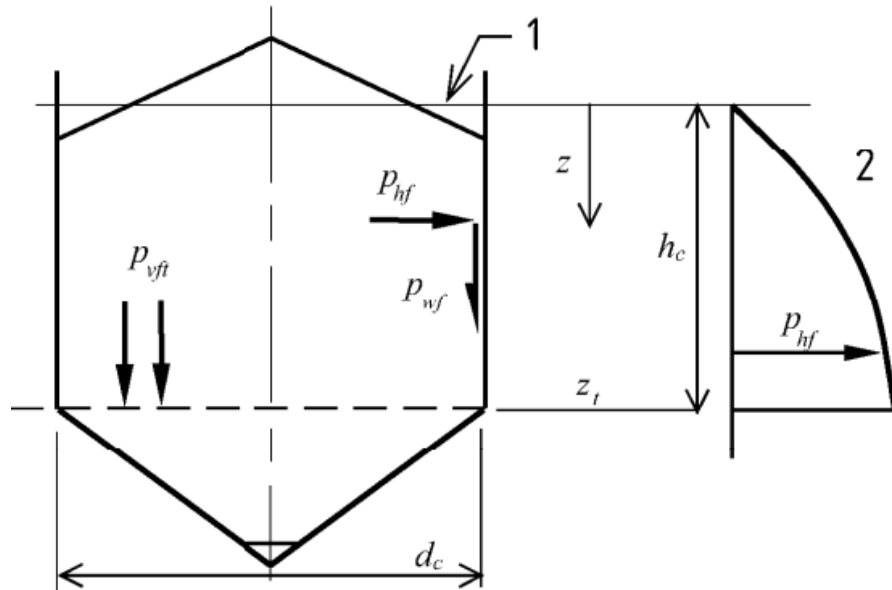


Figura 10. Presiones que actúan sobre el silo

Para el encontrar la carga simétrica para el llenado se aplica las siguientes expresiones:

- Presión horizontal

$$P_{hf} = P_{ho} \cdot Y_j \quad (26)$$

- Presión de tracción por rozamiento con la pared

$$P_{wff} = \mu \cdot P_{ho} \cdot Y_j \quad (27)$$

- Presión vertical

$$P_{vff} = \frac{P_{ho}}{K} \cdot Y_j \quad (28)$$

Siendo:

P_{ho} : Presión horizontal asintótica debido al sólido disgregado almacenado

$$P_{ho} = \gamma \cdot K \cdot z_o \quad (29)$$

Donde:

γ : peso específico.

K : Coeficiente de presiones laterales.

z_o : Profundidad característica de Janssen.

$$z_o = \frac{1}{K\mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (30)$$

Donde:

μ : Valor característico del coeficiente de rozamiento con la pared del silo.

A : Área de la sección horizontal de la zona de paredes verticales.

U : Perímetro interno de sección plana de pared vertical.

$$z_o = \frac{1}{0.171 \cdot 0.48} \cdot 0,9 = 10,86 \text{ m}$$

$$P_{ho} = 5850,6 * 0,171 * 10,96 = 10964,9 \text{ Pa} = 109 \text{ KPa} = 1111,49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$Y_j = 1 - e^{-z/z_o} \quad (31)$$

Donde:

Y_j : Función de la variación de la presión de silos esbeltos con la profundidad.

z : Profundidad desde la superficie equivalente del sólido en la condición de lleno

$$Y_j = 1 - e^{-17/10.86}$$

$$Y_j = 0,79$$

Entonces la presión horizontal es:

$$P_{hf} = 10,9 \cdot 0,79 = 8,61 \text{ KPa} = 877,97 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Presión de tracción por rozamiento:

$$P_{wf} = 0,48 \cdot 10,9 \cdot 0,79 = 4,13 \text{ KPa} = 421,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Presión vertical

$$P_{vf} = \frac{10.9}{0.171} \cdot 0,79 = 50,35 \text{ KPa} = 5134,27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

5.2.10 VALOR CARACTERÍSTICO DE LA FUERZA VERTICAL RESULTANTE

Se determina el valor de la fuerza vertical total según compresión en la pared del silo por unidad de longitud a cualquier profundidad en su llenado.

$$n_{zSK} = \int_0^z P_{wf}(z) dz = \mu * P_{ho} * [z - z_o * Y_j] \quad (32)$$

$$n_{zSK} = 0,48 * 10,9 * [17 - 10,86 * 0,79] = 44 \text{ kPa} = 4486,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

5.2.11 PRESIÓN CONCENTRADA EN EL LLENADO

Se evalúa la presión concentrada que se tendrá en el llenado según el tipo de producto ensilado a una determinada altura.

$$P_{pf} = C_{pf} \cdot P_{hf} \quad (33)$$

Siendo:

$$C_{pf} = 0.21 \cdot C_{op} \cdot [1 + 2E^2] \cdot \left(1 - e^{\{-1.5 \cdot [(\frac{h_c}{d_c}) - 1]\}}\right) \quad (34)$$

$$E = 2 \cdot \left(\frac{e_f}{d_c}\right) \quad (35)$$

Donde:

e_f : Excentricidad máxima de la superficie del cono superior durante el llenado.

P_{pf} : Valor local de la presión en el llenado a la altura a la que se aplica la carga concentrada.

C_{op} : Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas

$$E = 2 \cdot \left(\frac{0.25 \cdot (3.6)}{3.6}\right) = 0,5$$

$$C_{pf} = 0.21 \cdot 0.6 \cdot [1 + 2 \cdot 0.5^2] \cdot \left(1 - e^{\{-1.5 \cdot [(\frac{17}{3.6}) - 1]\}}\right)$$

$$C_{pf} = 0,18$$

Presión concentrada en el llenado:

$$P_{pf} = 0,18 \cdot 7,88 = 1,41 \text{ KPa} = 143,78 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

5.2.12 CARGAS CONCENTRADAS EN EL LLENADO DE SILOS CIRCULARES DE PARED DELGADA

Para los silos circulares de pared delgada se debe cumplir que el dimensionamiento de la sección transversal sobre el espesor sea mayor a 200:

$$d_c/e > 200 \quad (36)$$

$$\frac{3600}{5} > 200 : 720 > 200 \rightarrow \text{Cumple}$$

5.2.13 FUERZA HORIZONTAL TOTAL

$$F_{pf} = \frac{\pi}{2} \cdot s \cdot d_c \cdot P_{pf} \quad (37)$$

$$s = 0.2 \cdot d_c \quad (38)$$

$$s = 0.2 \cdot 3.6 = 0.72$$

$$F_{pf} = \frac{\pi}{2} \cdot 0.72 \cdot 3.6 \cdot 1.41 = 5.74 \text{ KN} = 143.78 \text{ Kg} - \text{ fuerza}$$

Según la carga concentrada en el llenado la fuerza horizontal en un silo de pared delgada es 143,78 kg.

5.2.14 CARGAS SOBRE LAS PAREDES VERTICALES EN LA DESCARGA

Presiones simétricas de descarga:

- Presión horizontal por descarga

$$P_{he} = C_h \cdot P_{hf} \quad (39)$$

- Presión de rozamiento por descarga

$$P_{we} = C_w \cdot P_{wf} \quad (40)$$

Donde:

C_h : Coeficiente de descarga para la presión horizontal

C_w : Coeficiente de descarga para la presión de tracción por rozamiento

Para silos esbeltos, se deberían determinar los coeficientes de descarga según:

$$C_h = C_o = 1.15$$

$$C_w = 1.10$$

Donde:

C_o : Coeficiente de descarga para todos los sólidos ($C_o = 1,15$).

Entonces se obtiene las presiones cuando el material ensilado es descargado:

$$P_{he} = 1,15 \cdot 7,88 = 9,06 \text{ kPa} = 923,86 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$P_{we} = 1,10 \cdot 4,33 = 4,76 \text{ kPa} = 485,38 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

5.2.15 VALOR CARACTERÍSTICO DE LA FUERZA VERTICAL RESULTANTE

Se determina el valor de la fuerza vertical resultante según compresión en la pared del silo por unidad de longitud a cualquier profundidad en su descarga.

$$n_{zSK} = \int_0^z P_{we} dz = C_w \cdot \mu \cdot P_{ho} \cdot [z - z_o \cdot Y_j] \quad (41)$$

$$n_{zSK} = 1,10 \cdot 0,48 \cdot 10,9 \cdot [17 - 10,86 \cdot 0,79] = 48,46 \text{ kPa} = 4941,54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

5.2.16 PRESIÓN CONCENTRADA EN EL LLENADO

Se calcula la presión concentrada que se tendrá en la descarga según el tipo de producto ensilado a una determinada altura.

$$P_{pe} = C_{pe} \cdot P_{he} \quad (42)$$

Siendo:

$hc/dc > 1,2$, C_{pe} se obtiene de la expresión:

$$C_{pe} = 0,42 \cdot C_{op} \cdot [1 + 2E^2] \cdot \left(1 - e^{\{-1,5 \cdot [(hc/dc) - 1]\}}\right) \quad (43)$$

$$E = 2 \cdot \left(\frac{e}{dc}\right) \quad (44)$$

Donde:

e_f : Excentricidad máxima de la superficie del cono superior durante el llenado;

e_o : Excentricidad del centro de la boca de descarga.

P_{he} : Valor local de la presión de descarga a la altura a la que se aplica la carga concentrada.

$$E = 2 \cdot \left(\frac{0,25(3,6)}{3,6}\right) = 0,5$$

$$C_{pe} = 0,42 \cdot 0,6 \cdot [1 + 2 \cdot 0,5^2] \cdot \left(1 - e^{\{-1,5 \cdot [(17/3,6) - 1]\}}\right)$$

$$C_{pe} = 0,36$$

Entonces:

$$P_{pe} = 0,36 \cdot 9,06 = 3,26 \text{ kPa} = 332,42 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

5.2.17 CARGAS CONCENTRADAS EN EL LLENADO DE SILOS CIRCULARES DE PARED DELGADA

Fuerza horizontal total debida a la carga concentrada en la descarga

$$F_{pe} = \frac{\pi}{2} \cdot s \cdot d_c \cdot P_{pe} \quad (45)$$

$$s = 0,2 \cdot d_c = 0,2 \cdot 3,6 = 0,72$$

$$F_{pf} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,72 \cdot 3,6 \cdot 3,26 = 13,27 \text{ KN} = 1353 \text{ Kg} - \text{ fuerza}$$

Según la carga concentrada en la descarga la fuerza horizontal en un silo de pared delgada es 1353 kg.

Este valor permitirá analizar la sección inferior del silo que está sometido a esfuerzos por la acción de descarga del material.

5.2.18 CARGAS SOBRE LA TOLVA

Se deben usar los valores característicos tanto de las cargas de llenado y de descarga sobre el fondo de los silos:

Presiones de llenado en tolvas agudas y aplanadas.

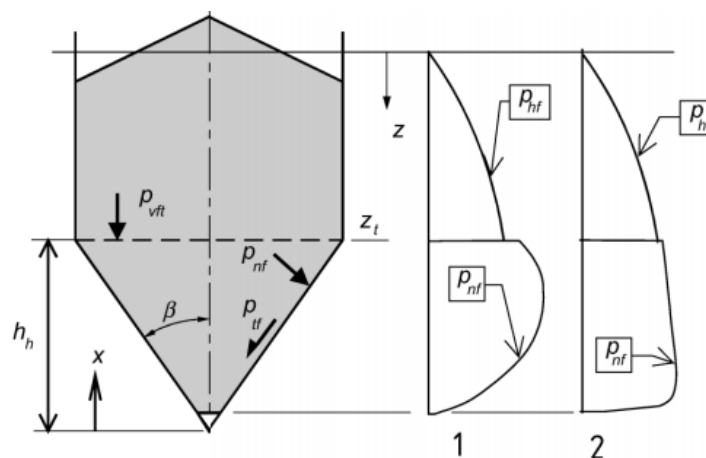


Figura 11. Presiones verticales que actúan sobre el silo

Límite en tolvas aplanadas y agudas

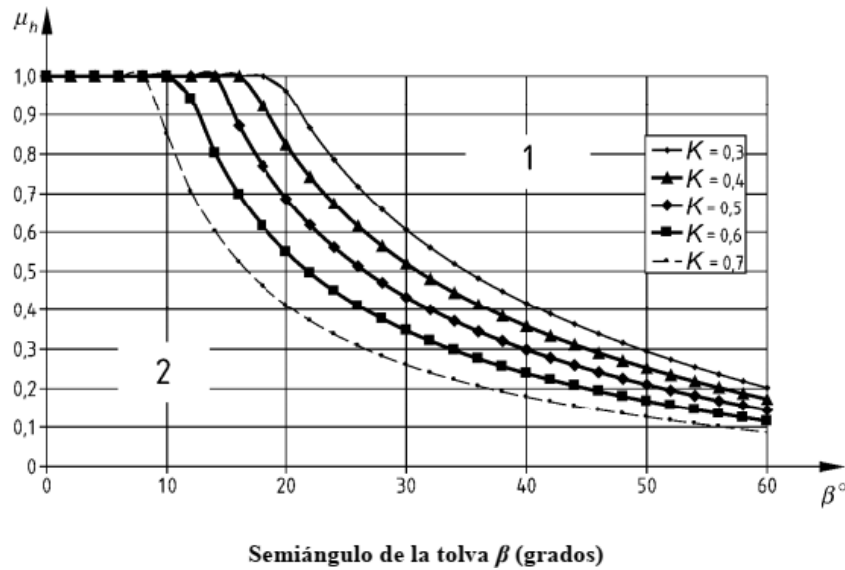


Figura 12. Semi ángulo de la tolva β (grados)

Donde:

1: Tolva aplanada

2: tolva aguda

β : Semi ángulo del vértice de la tolva Figura 12 (grados)

μ_h : Valor característico inferior del coeficiente de rozamiento de la pared

5.2.19 PRESIÓN VERTICAL MEDIA

Esta presión aparece entre el segmento de pared vertical del silo y la tolva

$$P_{vft} = C_b \cdot P_{vf} \quad (46)$$

Donde:

P_{vf} : Valor de la presión vertical de llenado en $\left[\frac{Kg}{m^2}\right]$.

C_b : Coeficiente de mayoración de cargas que tiene en cuenta la posibilidad de que el segmento de pared vertical transfiera mayores cargas a la tolva o al fondo.

$$C_b = 1.3$$

$$P_{vft} = 1,3 \cdot 50,35 = 65,45 \text{ kPa} = 6674,04 \frac{kg}{m^2}$$

5.2.20 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO CARACTERÍSTICO

En las tolvas aplanadas el rozamiento es:

$$\mu_{heff} = \frac{1-k}{2 \tan \beta} \quad (47)$$

Donde:

μ_{heff} = Rozamiento movilizado o efectivo en una tolva aplanada.

K = Coeficiente de presiones laterales.

β = Semi ángulo del vértice de la tolva [grados].

$$\mu_{heff} = \frac{1-0.36}{2 \tan 32^\circ}$$

$$\mu_{heff} = 0,5$$

5.2.21 CARGAS DE LLENADO

Cálculo del coeficiente de presiones posterior del llenado

$$F_f = 1 - \left\{ \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_{heff}}\right)} \right\} \quad (48)$$

Donde:

μ_{heff} = Coeficiente rozamiento, efectivo o movilizado, con la pared de la tolva aplanada.

b = es un coeficiente empírico: $b = 0,2$.

$$F_f = 1 - \left\{ \frac{0.2}{\left(1 + \frac{\tan 32^\circ}{0.5}\right)} \right\}$$

$$F_f = 0.91$$

El parámetro de la potencia en el coeficiente de la presión en la tolva (n) viene dado por:

$$n = S(1 - b) \cdot \mu_{heff} \cdot \cot \beta \quad (49)$$

Donde:

n = potencia en el coeficiente de presiones en la tolva.

S = coeficiente de geometría de la tolva (2 para tolva cónica, 1 para tolva en forma de cuña)

$$n = 2(1 - 0,2) \cdot 0,5 \cdot \cot 32$$

$$n = 1,28$$

Tensión vertical media en el sólido a una altura "x" sobre el vértice de la tolva para cada condición en una tolva

$$P_v = \left(\frac{\gamma \cdot h_h}{n-1} \right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h} \right) - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right\} + P_{vft} \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \quad (50)$$

Donde:

γ = Valor característico superior del peso específico del sólido;

h_h : Altura entre el vértice de la tolva y la transición (2.10m)

x : Coordenada vertical sobre el vertice de la tolva (1.05m)

$$P_v = \left(\frac{5.86 \cdot 2.10}{1.28-1} \right) \left\{ \left(\frac{1.05}{2.10} \right) - \left(\frac{1.05}{2.10} \right)^{1.28} \right\} + 65,45 \left(\frac{1.05}{2.10} \right)^{1.28}$$

$$P_v = 30,82 \text{ kPa} = 3142,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

5.2.22 PRESIÓN NORMAL

$$P_{nf} = F_f \cdot P_v \quad (51)$$

Donde:

P_{nf} : Presión normal a la pared de la tolva después del llenado $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \right]$.

F_f : Coeficiente de presión en la tolva después del llenado

P_v : Tensión vertical en el sólido almacenado $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \right]$.

$$P_{nf} = 0,91 \cdot 30,82$$

$$P_{nf} = 28,05 \text{ kPa} = 2860,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

La presión normal a la que están sometidas las paredes del silo por el almacenamiento es $2860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

5.2.23 PRESIÓN DE TRACCIÓN

$$P_{tf} = \mu_{heff} \cdot F_f \cdot P_v \quad (52)$$

Donde:

P_{tf} = presión de tracción por rozamiento en la tolva después del llenado en $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}\right]$.

μ_{heff} = rozamiento movilizado o efectivo en una tolva aplanada.

F_f = coeficiente de presiones en la tolva después del llenado.

P_v = tensión vertical en el sólido almacenado en $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}\right]$.

$$P_{tf} = 0,5 \cdot 0,91 \cdot 30,8$$

$$P_{tf} = 14,01 \text{ kPa} = 1428,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

La presión por tracción ejercida en las paredes del silo por el material almacenado es $1428,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$. El resultado obtenido mediante los coeficientes de presiones laterales por la harina cuando se encuentra almacenada permitirá verificar el esfuerzo que se genera en las paredes del silo y verificar su deformación.

5.2.24 CARGAS DE DESCARGA

Para el caso de las tolvas aplanadas estado de descarga, la presión normal y de tracción por rozamiento tiene el mismo valor que el estado de carga.

5.2.25 DISEÑO DE VIGA DE SOPORTE DE SILO

La viga soporte del silo es perimetral y está ubicada en el nivel de apoyo a la estructura principal soporte del silo.

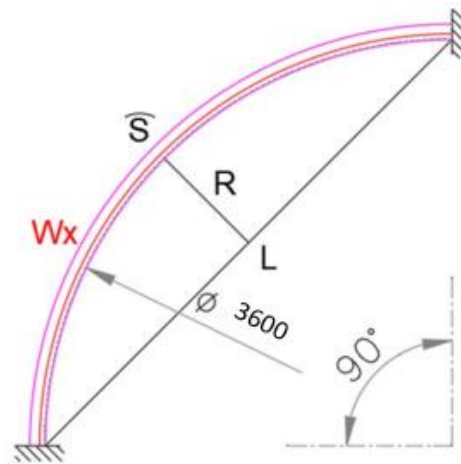


Figura 13. Diseño de viga de soporte

Para el cálculo de la longitud S en arco se necesita conocer el número de apoyos en el perímetro del silo, para este caso:

$$N = 8 \text{ apoyos.}$$

$$D = 3,6 \text{ m (Diámetro del silo)}$$

5.2.26 CÁLCULO DE DISTANCIAS

$$S = \pi \cdot \frac{D}{N} \quad (53)$$

$$S = \pi \cdot \frac{360 \text{ cm}}{8} = 141,37 \text{ cm}$$

$$L = D \sin\left(\frac{180}{N}\right) \quad (54)$$

$$L = 360 \text{ cm} \cdot \sin\left(\frac{180}{8}\right) = 137,76 \text{ cm}$$

$$R = \frac{D}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{180}{N}\right)\right) \quad (55)$$

$$R = \frac{360}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{180}{8}\right) \right) = 13,70 \text{ cm}$$

5.2.27 CÁLCULO DEL PESO DEL PRODUCTO:

$$Peso = P_v \cdot A \tag{56}$$

$$Peso = 5225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 10,17 \text{ m}^2 = 53138,25 \text{ kg}$$

$$Carga \text{ total} = 53292 \text{ kg} + 53138,25 \text{ kg} = 106430,25 \text{ kg}$$

5.2.28 CARGA DISTRIBUIDA W

$$W = \frac{Carga \text{ total}}{Perimetro}$$

(57)

$$W = \frac{106430,25 \text{ kg}}{11,30 \text{ m}} = 9418,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 94,18 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

La viga soporte del silo es diseñada mediante un tipo UPN 220 tiene las siguientes propiedades:

$$I_{xx} = 2690 \text{ cm}^4$$

$$I_{yy} = 197 \text{ cm}^4$$

$$S_{xx} = 245 \text{ cm}^3$$

$$S_{yy} = 33,60 \text{ cm}^3$$

Para el cálculo de **Mx** se considera la carga proyectada de la curva a la cuerda

$$F_1 = \frac{S}{L} \tag{58}$$

$$F_1 = \frac{141,37 \text{ cm}}{137,76 \text{ cm}} = 1,02$$

$$w_{xp} = 94,18 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} * 1,02 = 96,06 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

Considerando viga empotrada con carga distribuida se tiene

$$M_{x \max} = \frac{wL^2}{12} \quad (59)$$

$$M_{x \max} = \frac{96.06 \frac{kg}{cm} \cdot (137.76 \text{ cm})^2}{12} = 151917,42 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Para el momento en el eje Y se considera viga en voladizo:

$$F_2 = \frac{S}{R} \quad (60)$$

$$F_2 = \frac{141.37 \text{ cm}}{13.70 \text{ cm}} = 10,31$$

Se considera que tiene dos apoyos, por tanto, el factor se divide para 2

$$w_{yp} = 94,18 \frac{kg}{cm} \cdot \frac{10.31}{2} = 485,49 \frac{kg}{cm}$$

$$M_{y \max} = \frac{w \cdot L^2}{2} \quad (61)$$

$$M_{y \max} = \frac{485.49 \frac{kg}{cm} \cdot (13.70 \text{ cm})^2}{2} = 45560,8 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Verificación por flexión la UPN 220, la cual tiene las siguientes propiedades:

Donde:

M_x Momento respecto al eje X en $[kg \cdot cm]$.

M_y Momento respecto al eje y en $[kg \cdot cm]$.

F_{bx} Esfuerzo admisible a flexión en el eje X en $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$; $F_{bx} = 0,66 F_y$ si existe apoyo lateral total.

F_{by} Esfuerzo admisible a flexión en el eje Y en $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$; $F_{by} = 0,75 F_y$ en todos los casos.

$$f_{bx} = \frac{M_x}{S_x} \quad (62)$$

$$f_{bx} = \frac{151917.42 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{245 \text{ cm}^3} = 620,07 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_{by} = \frac{M_y}{S_y} \quad (63)$$

$$f_{by} = \frac{45560.8 \text{ kg}\cdot\text{cm}}{33.60 \text{ cm}^3} = 1355,97 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{bx} = 0,66 \cdot F_y \quad (64)$$

$$F_{bx} = 0,66 \cdot 3515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2319,9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{by} = 0,75 \cdot F_y \quad (65)$$

$$F_{by} = 0,75 \cdot 3515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2636,25 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Reemplazando valores en la ecuación de interacción se tiene.

$$\frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1; \quad (66)$$

$$\frac{620.07}{2319.9} + \frac{1355.97}{2636.25} = 0,78 \leq 1 \rightarrow \text{Cumple}$$

Verificación por deflexión:

Ecuaciones obtenidas del manual AISC

Deflexión 1:

$$\Delta_1 = \frac{wL^4}{384EI} \quad (67)$$

$$\Delta_1 = \frac{94.18 \cdot 1.02 \cdot (137.76)^4}{384 \cdot 2.1 \times 10^6 \cdot 2690 \text{ cm}^4} = 0,015 \text{ cm}$$

Deflexión 2:

$$\Delta_2 = \frac{wL^4}{8EI} \quad (68)$$

$$\Delta_2 = \frac{94.18 \cdot 10.31 \cdot (13.70)^4}{8 \cdot 2.1 \times 10^6 \cdot 197} = 0,010 \text{ cm}$$

$$\text{Deflexion total: } \Delta_1 + \Delta_2 = 0,015 + 0,010 = 0,025 \text{ cm}$$

Deflexión admisible $[\Delta]$

$$[\Delta] = \frac{S}{500} \quad (69)$$

$$[\Delta] = \frac{141.37 \text{ cm}}{500} = 0,28 \text{ cm}$$

$0.025 \text{ cm} < 0.28 \text{ cm} \rightarrow OK (138)$

5.3 DISEÑO DEL SILO 3D

5.3.1 TIPO

Silo Diámetro 3,6 m, Altura 17,5 m, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Diseño del silo

Especificaciones técnicas para el diseño según especificaciones de fabricación.

5.3.2 SILO

Capacidad: 110 toneladas

Diámetro: 3,6 m

Altura: 17,5 m

5.3.3 PRODUCTO: HARINA DE TRIGO

Densidad: 597,75 kg/m^3

Ángulo de talud natural: 45°

Ángulo de rozamiento interno: 29,1°

5.3.4 MATERIAL

ASME/ASTM A 572 Grado A50

5.3.5 SOFTWARE

Diseño: SolidWorks 2021

Simulación: SolidWorks Simulation

5.4 SIMULACIÓN

A continuación, se presentan los resultados del silo con capacidad de almacenamiento de 110 toneladas de harina de trigo. Para el análisis se utiliza la geometría diseñada en 3D del silo y la estructura y obtener resultados de estudio en tensión de Von Mises, Desplazamientos y Factor de seguridad.

5.5 ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA PARED DEL SILO

Para determinar si la chapa para el diseño del silo no sufrirá falla por pandeo se analiza diferentes tamaños de espesor.

5.6 ANÁLISIS DE SECCIÓN

La aplicación de la presión vertical y la fuerza de compresión sobre la pared en una sección del silo permite identificar puntos de flexión en donde se podría producir

pandeo, y también mediante el cambio de espesor del material verificar si la capacidad del silo permite almacenar el material sin que exista falla por fractura.

La flexión que se genera permite identificar una posible falla por pandeo. En el silo se encuentra en el medio debido a que es donde se produce la mayor cantidad de esfuerzo por el almacenamiento del material y genera un esfuerzo de 359 Kg/cm^2 como se muestra en la Figura 15.

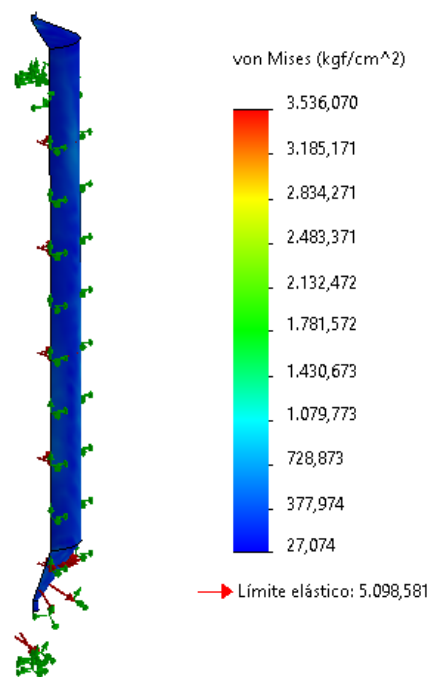


Figura 15. Simulación de pandeo en sección del silo

Al aplicar una fuerza horizontal sobre la pared del silo según la información de la Figura 16, se tendrá que por el almacenamiento del material se incrementa el esfuerzo a 1066 Kg/cm^2 .

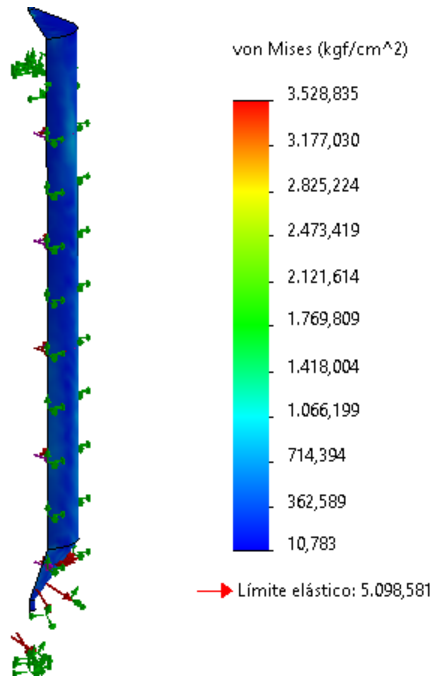


Figura 16. Simulación de sección del silo aplicando fuerza horizontal

También la presión generada por el rozamiento del material en las paredes del silo produce el aumento del esfuerzo a 1525 Kg/cm², como se indica en la Figura 17.

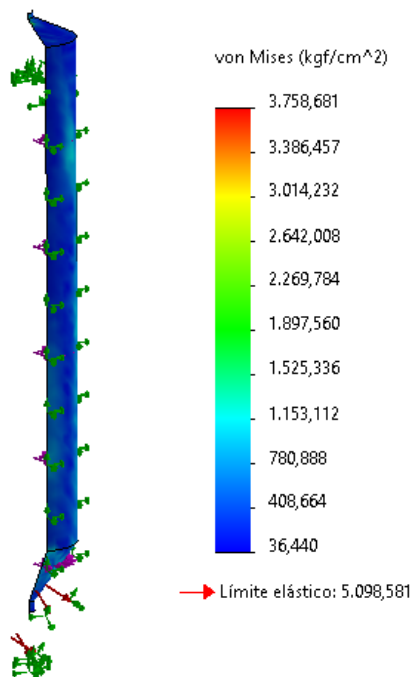


Figura 17. Simulación de sección del silo aplicando presión de rozamiento

Al aplicar las presiones y fuerzas que se encuentran presentes en el silo e identificar los puntos de mayor interés considerados críticos mediante la observación de

valores en la regleta de colores de la simulación (Von Mises). El material seleccionado para el diseño del silo no supera la tensión máxima admisible.

Se analiza una sección del silo con diferentes tamaños de espesor:

5.6.1 SECCIÓN CON ESPESOR DE 2MM

En este punto y con un espesor de material de 2 mm se observa en la Figura 18 que con lo justo el material resistirá la presión por el almacenamiento dado que se obtiene un factor de seguridad de 1,2.

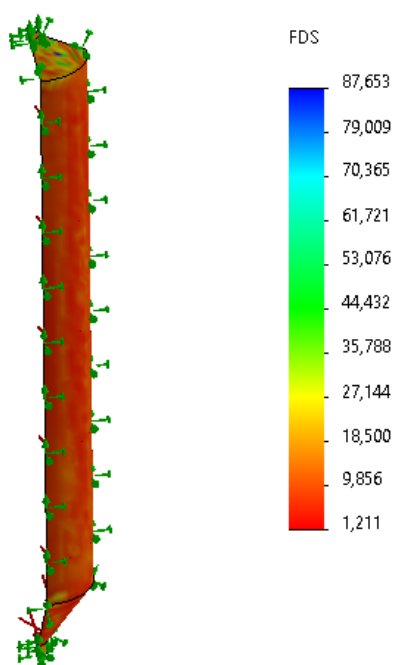


Figura 18. Simulación de sección del silo con espesor 2 mm

5.6.2 SECCIÓN CON ESPESOR DE 3MM

Mientras que con un espesor de material de 3 mm se observa en la Figura 19 que el material genera un factor de seguridad de 1,4 el cual aumenta en base a su espesor y resistirá la presión por el almacenamiento.

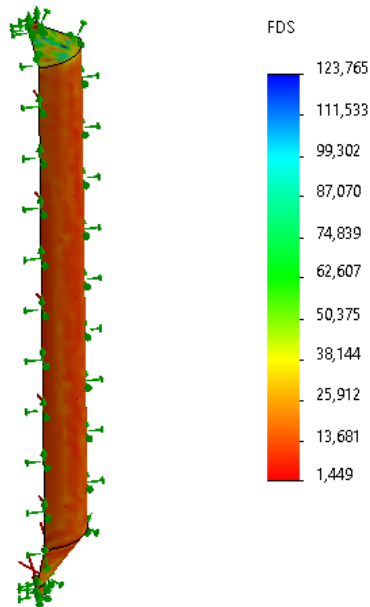


Figura 19. Simulación de sección del silo con espesor 3 mm

5.6.3 SECCIÓN CON ESPESOR DE 4MM

Con un espesor de material de 4 mm se observa en la Figura 20 que el material genera un factor de seguridad de 1,9 el cual aumenta en base a su espesor y resistirá la presión por el almacenamiento.

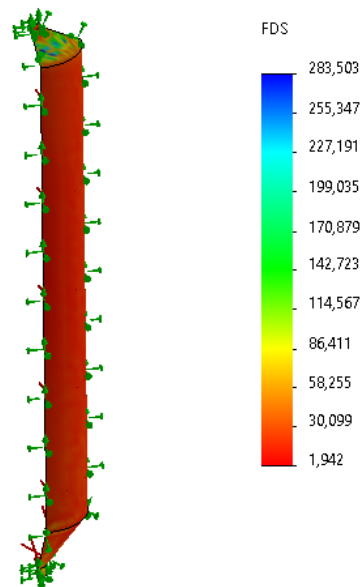


Figura 20. Simulación de sección del silo con espesor 4 mm

5.6.4 SECCIÓN CON ESPESOR DE 5MM

Con un espesor de material de 5 mm se observa en la Figura 21 que el material genera un factor de seguridad de 2.0 el cual aumenta en base a su espesor y resistirá la presión por el almacenamiento.

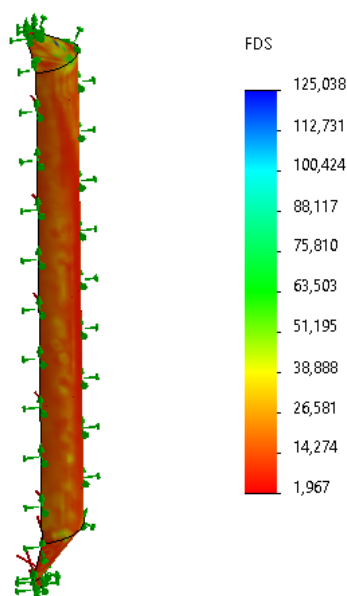


Figura 21. Simulación de sección del silo con espesor 5mm

5.6.5 SECCIÓN CON ESPESOR DE 6MM

Por ende, con un espesor de material de 6 mm se observa en la Figura 22 que el material genera un factor de seguridad de 2.2 el cual satisface los requerimientos de diseño y permite tener una estructura segura por las presiones generadas por el almacenamiento del material.

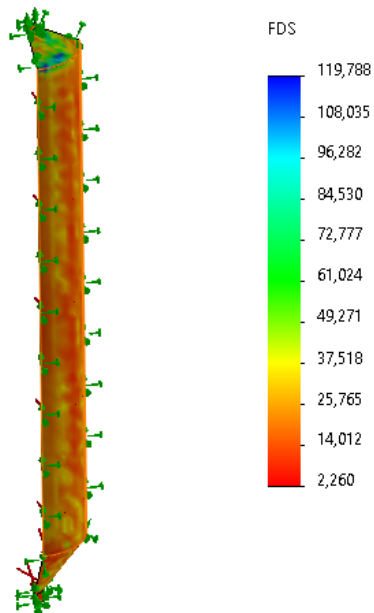


Figura 22. Simulación de sección del silo con espesor 6mm

Al aplicar la presión vertical de $5225 \frac{kg}{m^2}$ a la sección del silo e identificando la variación de espesores se obtiene que el factor de seguridad por la presión aplicada en un espesor de 2mm es 1.3, para 3mm 1.4, para 4mm 1.9, para 5mm 2.0 y para 6mm es 2.2, entonces es evidente que al aumentar el espesor el diseño está asegurado y no existiera falla y también se observa que sobre todo la sección vertical del silo se genera el mayor esfuerzo.

Los datos obtenidos permiten crear criterios para el diseño del silo como son la ubicación de perfiles de sujeción tipo lámina sobre la sección transversal y también al obtener resultados favorables de factor de seguridad en la aplicación de distintos tamaños de espesores se opta por generar un diseño basado en secciones como se muestra en la figura.

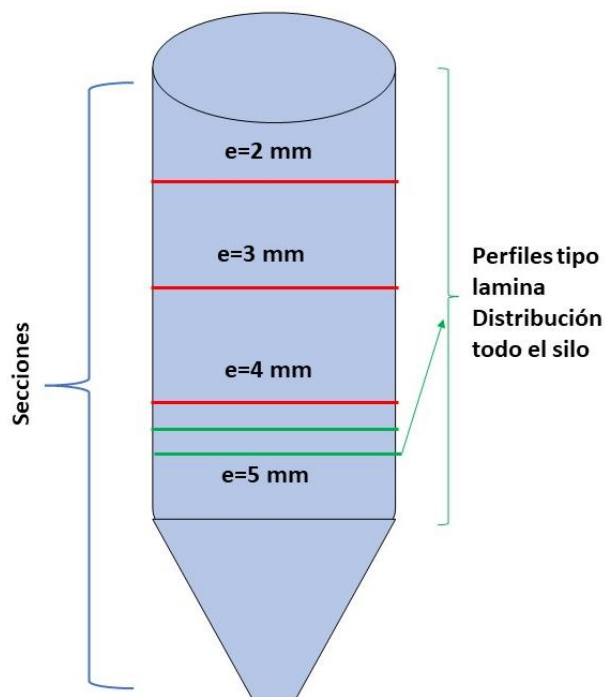


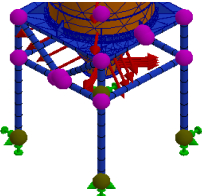
Figura 23. Representación esquemática del silo

5.7 ANÁLISIS ESTÁTICO DEL SILO

5.7.1 SUJECIONES

Puntos de apoyo en donde el objeto en 3D analizado se encuentra sujeto, en este caso la unión de la estructura sobre el piso. En la Tabla 7 se muestran los resultados:


Tabla 7.
Sujeciones del silo

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		Tipo: Geometría fija del silo en la base de la estructura de soporte.

5.7.2 CARGAS

En la Tabla 8 muestra la asignación de la presión vertical generada por el almacenamiento del producto sobre el silo y para el estudio es $5225 \frac{kg}{m^2}$

Tabla 8.
Cargas del silo

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Presión-1		Entidades:	6 cara(s)
		Tipo:	Normal a cara seleccionada
		Valor:	-0,523
		Unidades:	kgf/cm ²
		Ángulo de fase:	0
		Unidades:	deg

5.7.3 MALLADO

El mallado asignado al estudio mejorar la calidad de los resultados y también que se utiliza en geometrías complejas es por ende que se utilizada malla basado en curvatura, obteniendo los siguientes parámetros al aplicar al modelo 3D. En la Tabla 9, se presentan los resultados.

Tabla 9.
Mallado del silo

Tipo de malla	Malla mixta
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Verificación jacobiana para el vaciado	Activar
Tamaño máximo de elemento	975,886 mm
Tamaño mínimo del elemento	195,177 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

5.7.3.1 Información de mallado

Tabla 10.
Información del mallado

Número total de nodos	40370
Número total de elementos	14969
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:40

5.7.4 RESULTADOS

5.7.4.1 Tensión de Von Mises

En la Tabla 11 se muestra las tensiones presentes en el silo expresadas en Von Mises o tensión equivalente, en este caso la Figura 24 indica una tensión máxima de 644,038 kg/cm² en el nodo 21492.

Tabla 11.

Tensión de Von Mises

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de Von Mises	0,031kg/cm ²	644,038 kg/cm ² Nodo: 21492
		Nodo: 40215	

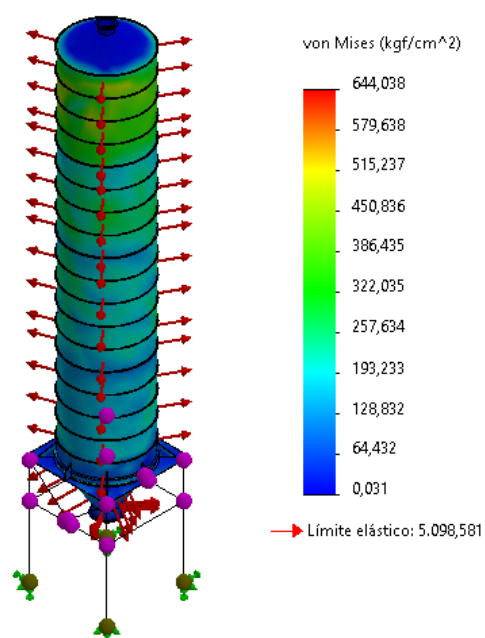


Figura 24. Silo Completo-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones1

5.7.4.2 Tensión axial sobre la estructura

En la Tabla 12 se muestra las tensiones presentes en la estructura, en este caso la Figura 25 indica una tensión máxima de 726,894 kg/cm² en el nodo 14913.

Tabla 12.

Tensión axial sobre la estructura

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
--------	------	------	------

Tensiones2	Tensión axial y de flexión	1,08e-6Kg/cm ²	726,894 kg/cm ²
		Elemento: 14957	Elemento: 14913

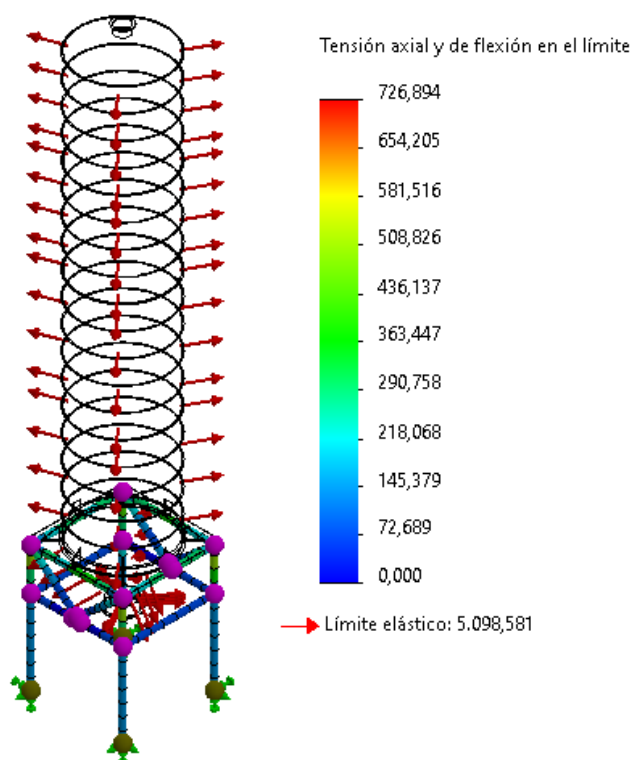


Figura 25. Silo Completo-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones2

5.7.4.3 Desplazamiento

En la Tabla 13 se muestra los desplazamientos generados sobre el silo completo aplicando las cargas de presiones, en este caso la Figura 26 indica un desplazamiento máximo de 2,883 mm en el nodo 31670.

Tabla 13.

Desplazamiento

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	1e-3mm	2,883mm
		Nodo: 40223	Nodo: 31670

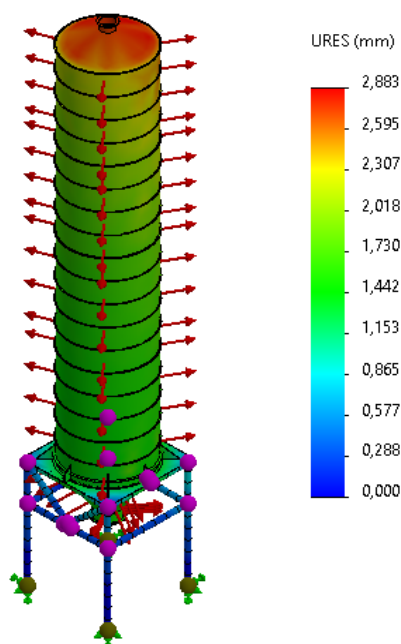


Figura 26. Silo Completo-Análisis estático 1-Desplazamientos-Desplazamientos1

5.7.4.4 Factor de seguridad del silo completo

En la Tabla 14 se muestra el factor de seguridad que sufre el elemento por acción de la presión aplicada a las paredes del silo, según la Figura 27 obteniendo la zona de material donde podría empezar a fallar con un valor mínimo de 7 en el nodo 40310.

Tabla 14.
Factor de seguridad del silo completo

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	7,014 Nodo: 40310	2,5e1 Nodo: 40297

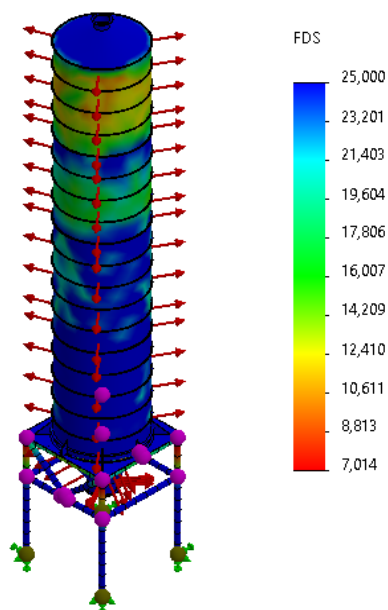


Figura 27. Silo Completo-Análisis estático 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad1

5.7.4.5 Factor de seguridad del silo

En la Tabla 15. se muestra el factor de seguridad que sufre el elemento por acción de la presión aplicada a las paredes del silo, según la Figura 28. Silo Completo-Análisis estático 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad2 obteniendo la zona de material donde podría empezar a fallar con un valor mínimo de 9,7 en el nodo 31680.

Tabla 15.

Factor de seguridad del silo

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad2	Tensión de Con Mises	9,7	2,5e1
	máx.	Nodo: 31680	Nodo: 35700

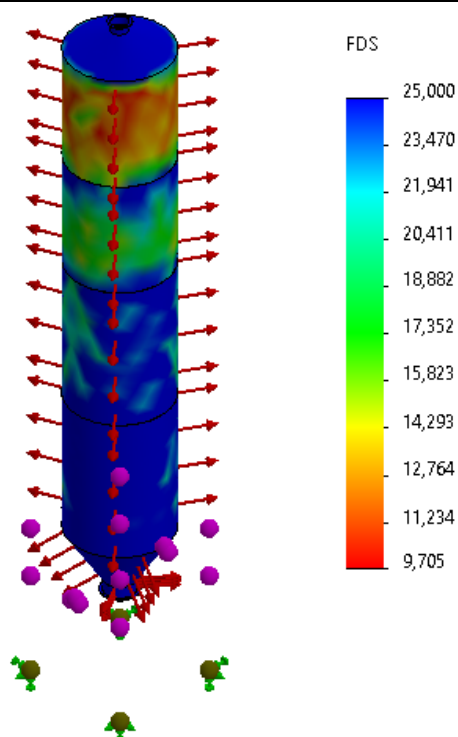


Figura 28. Silo Completo-Análisis estático 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad2

5.7.4.6 Factor de seguridad de la estructura

En la Tabla 16 se muestra el factor de seguridad que sufre el elemento por acción de la presión ejercida por el silo y la carga, según la Figura 29 obteniendo la zona de material donde podría empezar a fallar con un valor mínimo de 7,04 en el nodo 40310.

Tabla 16.
Factor de seguridad de la estructura

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad3	Automático	7,014e0 Nodo: 40310	2,5e1 Nodo: 40297

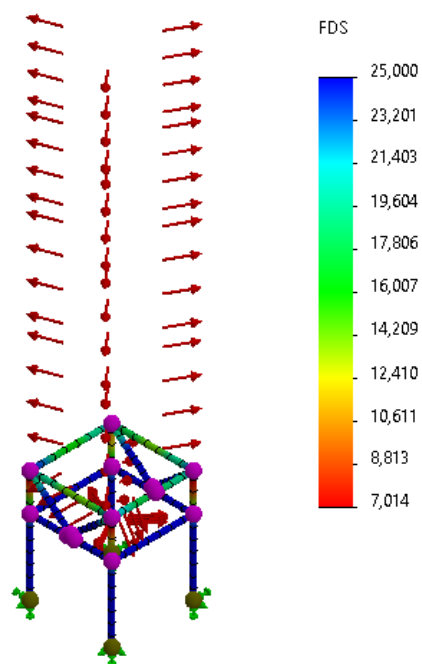


Figura 29. Silo Completo-Análisis estático 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad3

5.7.4.7 Costos

Los costos para la construcción del silo de 110T, están divididos en dos partes que son: materiales y talento humano.

Costos materia prima

En la Tabla 17, se presenta una lista de los materiales necesarios, para la construcción del silo de 110T.

Tabla 17
Costos de materia prima

Materiales	Cantidad	Longitud	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Planchas de acero A572 (3mm)	25	1,2 x 2,4	37,50	937,50
Planchas de acero A572 (4mm)	20	1,8 x 2,4	50,00	1000,00
Planchas de acero A572 (5mm)	25	1,2 x 2,4	62,50	1562,50
Planchas de acero A572 (6mm)	18	1,2 x 2,4	112,50	2025,00

Columnas HEB 300	10	6 metros	464,91	4649,10
Viga UPN 220	1	6 metros	220,00	220,00
Pernos, tuerca y arandela	1972	½ pulgada	3,00	5916,00
Tubo respiradero	1	1 metro	23,72	23,72
Electrodo 7018	22	Caja	31,50	693,00
Pintura	22	Galones	46,40	1020,80
Total (USD)				18047,62

Costo de talento humano

En la Tabla 18, se presenta, la descripción costos de la mano de obra y diseño de ingeniería, para la construcción del silo de 110T.

Tabla 18
Costos de talento humano

Trabajador	Cantidad	Salario (USD/Hora)	Tiempo Total (Horas)	Costo Total (USD)
Mecánico	5	4,35	130	2827,50
Ayudante de mecánica	5	4,26	130	2769,00
Soldador	5	4,30	90	1935,00
Ayudante del Soldador	5	4,26	90	1917,00
Maestro Armador	5	4,66	70	1631,00
Ayudante del armador	5	4,26	70	1491,00
Pintor	4	4,30	70	1204,00
Ingeniero Mecánico y Estructural (Diseño)	2	6,00	220	2640,00
Total (USD)				16414,5

Costo total

Para la construcción del silo de 110T, se estima un costo total de 34462,14 USD acuerdo al costo de materiales y el talento humano. Los costos de materia prima están respaldados por licitaciones anteriores, mientras que los costos de talento humano están basados por la regulación salarial nacional.

6 CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la norma europea Eurocódigo-Parte 4 permite obtener cálculos de las presiones que tiene el silo durante la carga y descarga del material.

El diseño del silo cumple satisfactoriamente con los cálculos obtenidos mediante la norma y comprobados mediante la simulación de elementos finitos en SolidWorks generando un factor de seguridad de 7 lo cual valida su correcto diseño y selección de material para la construcción. El esfuerzo de Von Mises obtenido en el diseño 644 kg/cm^2 al aplicar las presiones como se aprecia en la Tabla 11, es menor al límite del material que es 2109 kg/cm^2 lo que garantiza que el material no fallara por esfuerzos aplicados.

El diseño propuesto genera un desplazamiento máximo de alrededor de 2,88 mm en la parte superior del silo donde la chapa es de 2mm y un mínimo de desplazamiento de 1.44mm en la parte inferior del silo donde la chapa es de 5mm, tal como se indica en la Tabla 13, debido a que el diseño se emplea perfiles de sujeción tipo lamina lo que garantiza la fiabilidad y el uso se considera el tamaño y la capacidad del silo.

Los ensayos realizados demuestran que la presión ejercida sobre las paredes del silo con espesores variables de 2mm a 5mm sobre el cilindro del silo no sufrirá falla, la sección que menor espesor tiene el mayor esfuerzo produciendo en factor de seguridad de 9.7 y mientras aumenta el espesor a 5mm tiene un factor de seguridad de 18, tal como se indica en la Tabla 15.

Según se observa en la simulación la deformación sobre la viga es mínima que no se la aprecia y comprueba con los cálculos realizados en el diseño de la viga que es de 0.009 cm.

El diseño del silo consista en la unión de planchas de acero ASTM A572 de Grado A50, de tipo barolada y con pestañas en sus extremos para la sujeción mediante bridas por toda la sección transversal dado que la anchura de las planchas es de 1.22 metros

6.2 RECOMENDACIONES

Para aplicar calidad en los diseños de silos, hay que tomar en cuenta estándares como la norma europea Eurocódigo-Parte 4 y norma CPE INEN 008:2013.

Para el análisis estático por elementos finitos, tomar en cuenta la variación del espesor del material y las cargas permisibles que pueden soportar.

El silo debe poseer escaleras de tipo marinera en los lados del para supervisar la operación de carga y descarga del material. Para evitar caídas desde el silo o alrededor del mismo, comprobar que las escaleras estén en buen estado según el tiempo de mantenimiento.

Para la implementación del silo se debe considerar los apoyos entre el silo y la estructura de soporte tengan una forma tipo doble costilla, que permitan que el silo con su máxima capacidad de carga abarque una mayor área de apoyo.

Para que el silo no sufra corrosión por distintos materiales contaminantes que se encuentran en el medio se debe realizar un recubrimiento superficial de tipo granallado el cual alisa las paredes y elimina los materiales contaminantes del silo.

Para el montaje y preparación del silo se debe realizar obra civil para asentar las bases de la estructura que por acción de factores como el peso, viento, la carga y descarga del material exista deformaciones.

Para un correcto funcionamiento del silo se debe tener un plan de mantenimiento preventivo para evitar accidentes y también para evitar que el material almacenado que es harina de trigo se degrade.

REFERENCIAS

- [1] MS Soluciones en Ingeniería, “Características y Aplicaciones de Silos ,” MS Soluciones en Ingeniería, Sep. 27, 2022. <https://www.ms-ingenieria.com.mx/capacitacion-y-normativas/caracteristicas-y-aplicaciones-de-silos/> (accessed Sep. 26, 2022).
- [2] Ecuador - Guía Oficial de Trámites y Servicios, “Unidad Nacional de Almacenamiento,” Ecuador - Guía Oficial de Trámites y Servicios, Feb. 03, 2022. <https://www.gob.ec/una> (accessed Sep. 26, 2022).
- [3] W. Benalcázar, “Agricultores carchenses reviven la producción del trigo nacional,” Carchi, Aug. 2021. Accessed: Sep. 26, 2022. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/agricultores-carchi-produccion-trigo-sierra.html>
- [4] A. Bárcena, “Impactos de la pandemia en los sectores productivos más afectados abarcarán a un tercio del empleo y un cuarto del PIB de la región,” Naciones Unidas, Santiago de Chile, Jul. 02, 2020. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.cepal.org/es/comunicados/impactos-la-pandemia-sectores-productivos-mas-afectados-abarcaran-un-tercio-empleo-un>
- [5] Normalización Española, “UNE-EN 1991-4:2006,” UNE, Dec. 13, 2011.
- [6] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “CÓDIGO DE PRÁCTICA ECUATORIANO CPE INEN 010:2013 Primera revisión Primera edición SAFETY CODE ON CRANES,” Quito, Sep. 2013.
- [7] L. F. Calle Landázuri and F. F. Rodríguez Herrera, “Diseño de silos cuadrados con chapa de pared trapecial para almacenamiento de productos granulares, pulverulentos mediante una hoja de cálculo,” Universidad Politécnica Salesiana, 2009, Accessed: Sep. 22, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6659>
- [8] J. R. Darias, “Los materiales granulares: una mirada al interior del pimentero,” Laboratorio de Óptica y Fluidos, vol. 65, no. 1, pp. 62–72, 2014, Accessed: Sep. 22, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/283326032_LOS_MATERIALES_GRANULARES_UNA_MIRADA_AL_INTERIOR_DEL_PIMENTERO
- [9] OECD, “Consensus Document on the Biology of Triticum Aestivum (Bread Wheat),” OECD, vol. 9, pp. 1–48, 1999, Accessed: Sep. 25, 2022. [Online]. Available: <https://conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/divulgacion/cultivos/ENVJMMONO-trigo.pdf>
- [10] S. Geisslitz et al., “Wheat ATIs: Characteristics and Role in Human Disease,” Front Nutr, vol. 8, p. 265, May 2021, doi: 10.3389/FNUT.2021.667370/BIBTEX.
- [11] A. M. Amerah, “Interactions between wheat characteristics and feed enzyme supplementation in broiler diets,” Anim Feed Sci Technol, vol. 199, pp. 1–9, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.ANIFEEDSCI.2014.09.012.
- [12] C. González and C. PazVergara, “Presentación Industria de la harina - Casiopea,” Caupolican, 3, 2016. Accessed: Sep. 25, 2022. [Online]. Available: https://wiki.ead.pucv.cl/Presentaci%C3%B3n_Industria_de_la_harina

- [13] F. A. Gómez Romero, "Herramientas de gestión de la innovación aplicadas en las organizaciones empresariales," Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, pp. 39–45, Feb. 2019, Accessed: Sep. 25, 2022. [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/25611>
- [14] Grupo Acura, "Qué es un silo de almacenamiento," Grupo Acura, Sep. 21, 2021. <https://grupoacura.com/blog/soluciones-y-tecnologia/que-es-un-silo/> (accessed Sep. 25, 2022).
- [15] Norma UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos, "Norma UNE - EN1991: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos," 1991. Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/525696028/UNE-En-1991-4-2011-Eurocodigo-1-Parte-4-Silos-y-Depositos>
- [16] AGI, "Silo de almacenamiento con fondo de tolva y fondo plano," 2017.
- [17] J. B. Garibaldi, "Recubrimientos para tanques de almacenamiento," Perú, 2007. Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <http://www.inpralatina.com/20071210250/articulos/consultorio-del->
- [18] A. Khelil, Z. Belhouchet, and J. C. Roth, "Analysis of elastic behaviour of steel shell subjected to silo loads," *J Constr Steel Res*, vol. 57, no. 9, pp. 959–969, Sep. 2001, doi: 10.1016/S0143-974X (01)00020-7.
- [19] Meprosa, "Tipos de silo para la industria agrícola," Meprosa, Apr. 14, 2018. <https://meprosa.mx/tipos-silo-la-industria-agricola/> (accessed Oct. 12, 2022).
- [20] SISTEMA – SURATEP S.A., "Almacenamiento en Silos," May 2004. Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <https://docplayer.es/21551130-Almacenamiento-en-silos.html>
- [21] Cistema - Suratep S.A., "Almacenamiento en silos," Cistema - Suratep S.A., pp. 6–11, 2004.
- [22] Proymec, "Innovación en la carga de los silos desde el camión cisterna," *Mixing Technology*, Nov. 03, 2010. <https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/44679-Innovacion-en-la-carga-de-los-silos-desde-el-camion-cisterna.html> (accessed Nov. 24, 2022).
- [23] Vibrafloor, "Descarga de Silos," Vibrafloor, 2022. <https://www.vibrafloor.com/es/la-compania/> (accessed Nov. 24, 2022).
- [24] AZO., "Silos y sistemas de descarga para materiales a granel," AZO., 2022. <https://www.azo.com/es-de/productos/silos-y-sistemas-de-descarga> (accessed Nov. 24, 2022).
- [25] Claudius Peters, "Descarga De Silos," Claudius Peters, 2022. <https://www.claudiuspeters.com/es-ES/4675/descarga-de-silos> (accessed Nov. 24, 2022).
- [26] J. Carson and D. Craig, "Silo Design Codes: Their Limits and Inconsistencies," *Procedia Eng*, vol. 102, pp. 647–656, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROENG.2015.01.157.
- [27] Prado Silos, "Normativas De Calculo - Silos de almacenamiento", Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <https://pradosilos.com/es/normativas-de-calculo/>
- [28] INAMHI, Anuario Meteorológico. Republica del Ecuador, 2014.
- [29] Silos Cordoba, "Almacenamiento del trigo para proteger su calidad," Cordoba, 14014, 2014. Accessed: Dec. 04, 2022. [Online]. Available: www.siloscordoba.com

ANEXOS

Anexo A

Material (condición)	Ángulo de reposo (sexagesimal)
Ceniza	40°
Asfalto (frío)	30–45°
Aserrín	30–45°
Corteza (trozos secos)	45°
Salvado	30–45°
Tiza	45°
Arcilla (seca)	25–40°
Arcilla (húmeda excavada)	15°
Trébol (semillas)	28°
Cocos (rallado)	45°
Café (grano fresco)	35–45°
Suelo	30–45°
Harina	45°
Granito	35–40°
Grava (suelta y seca)	30–45°
Grava (natural con arena)	25–30°
Malta	30–45°
Arena (seca)	34°
Arena (muy mojada)	15–30°
Arena (húmeda)	45°
trigo	28°

Anexo B

EN 1991-4:2006

- 104 -

AENOR

ANEXO E (Normativo)

VALORES DE LAS PROPIEDADES DE LOS SÓLIDOS DISGREGADOS

E.1 Generalidades

(1) Este anexo proporciona los valores de las propiedades de los sólidos almacenados a utilizar en el cálculo.

E.2 Valores definidos

(1) La tabla E.1 proporciona los valores que se deberían usar en el cálculo.

Tabla E.1 – Propiedades de los sólidos disgregados

Tipo de sólido disgregado ^a	Peso específico ^b		Angulo de talud natural	Angulo de rozamiento interno		Coeficiente de presiones laterales		Coeficiente de rozamiento con la pared ^c				Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas C_{ep}
	γ_i	γ_s	ϕ	ϕ_m	α_ϕ	K_m	α_K	Tipo de pared D1	Tipo de pared D2	Tipo de pared D3	μ	
	Inferior	Superior		Medio	Coeficiente	Medio	Coeficiente	Medio	Medio	Medio	Coeficiente	
	kN/m ³	kN/m ³	grados	grados								
Material por defecto ^a	6,0	22,0	40	35	1,3	0,50	1,5	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0
Aridos	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
Pienso 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
Fosfato	16,0	22,0	34	29	1,18	0,56	1,15	0,39	0,49	0,54	1,12	0,5
Patatas	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,33	0,38	0,48	1,16	0,5
Arena	14,0	16,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,38	0,48	0,57	1,16	0,4
Escoria de clinker	10,5	12,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,48	0,57	0,67	1,16	0,6
Semillas de soja	7,0	8,0	29	25	1,16	0,63	1,11	0,24	0,38	0,48	1,16	0,5
Azúcar ☉	8,0	9,5	38	32	1,19	0,50	1,20	0,46	0,51	0,56	1,07	0,4
Remolacha azucarera en pellets	6,5	7,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,35	0,44	0,54	1,12	0,5
Trigo ☉	7,5	9,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5

NOTA Se deberían realizar ensayos cuando esta tabla no contenga el material a almacenar.

^a Para situaciones en las que es difícil justificar el coste del ensayo porque las implicaciones de usar un rango más amplio de propiedades son menores, se pueden usar los valores del "material por defecto". Estas propiedades pueden ser adecuadas para instalaciones pequeñas. Sin embargo para grandes silos producirán proyectos muy antieconómicos y siempre se debería preferir realizar ensayos.

^b El peso específico del sólido γ_s es el valor característico superior a usar en todos los cálculos de las acciones. El valor característico inferior γ_i se proporciona en la tabla E.1 para ayudar en la estimación del volumen necesario de silo que tendrá una capacidad definida.











^c El rozamiento efectivo con la pared para el tipo de pared D4 (pared ondulada) puede hallarse usando el método definido en el capítulo D.2.

^d Los sólidos de esta tabla que se sabe que son susceptibles de explosión de polvo están marcados con el símbolo ☉.

^e Los sólidos que son susceptibles de bloqueo mecánico están marcados con el símbolo ☼.

Anexo C

Table C-C2.1

Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
						
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
End condition code	   	Rotation fixed and translation fixed Rotation free and translation fixed Rotation fixed and translation free Rotation free and translation free				

Anexo D

3 - 17

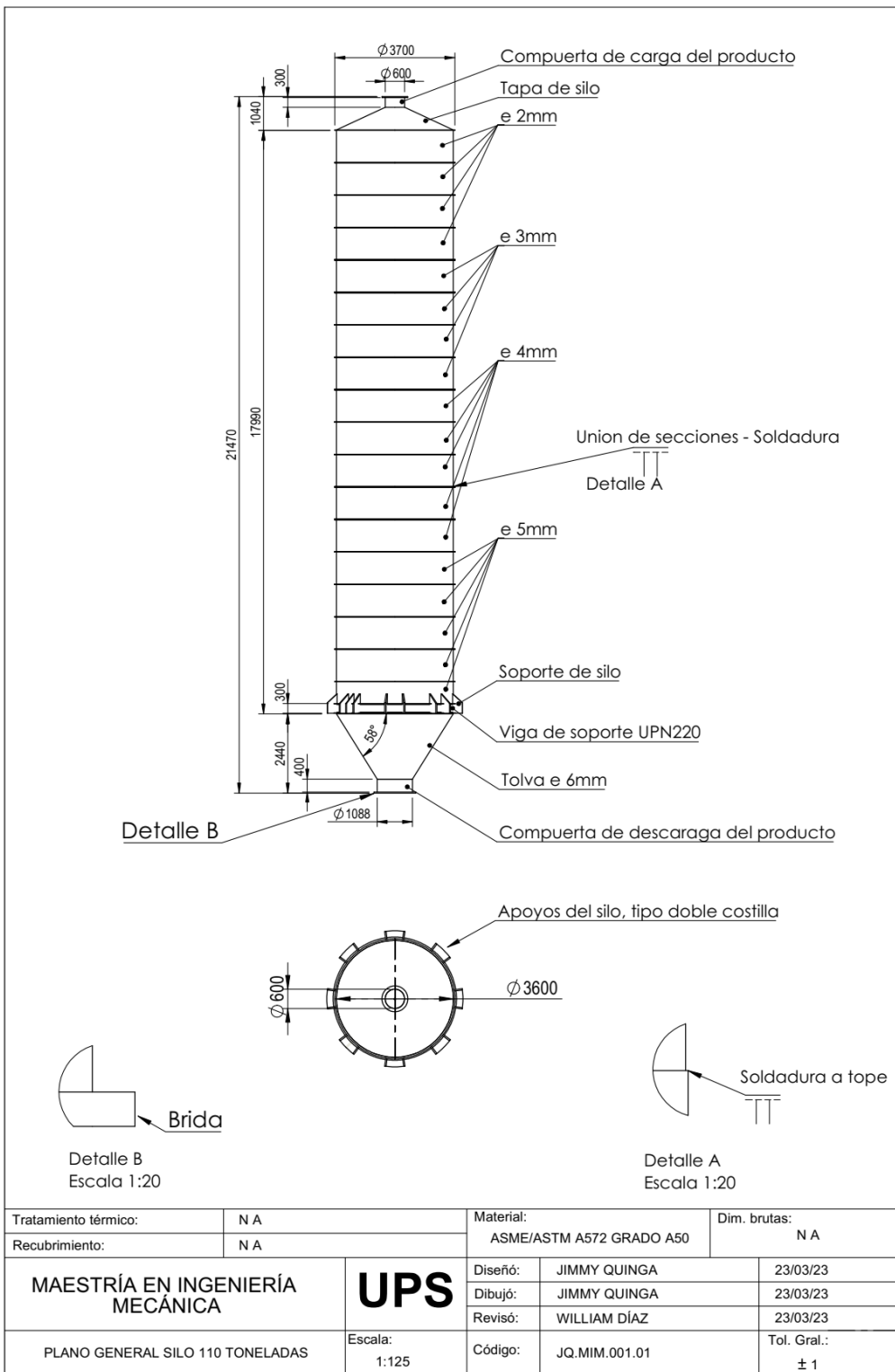
Table C-50
Allowable Stress
For Compression Members of 50-ksi Specified Yield Stress Steel^a

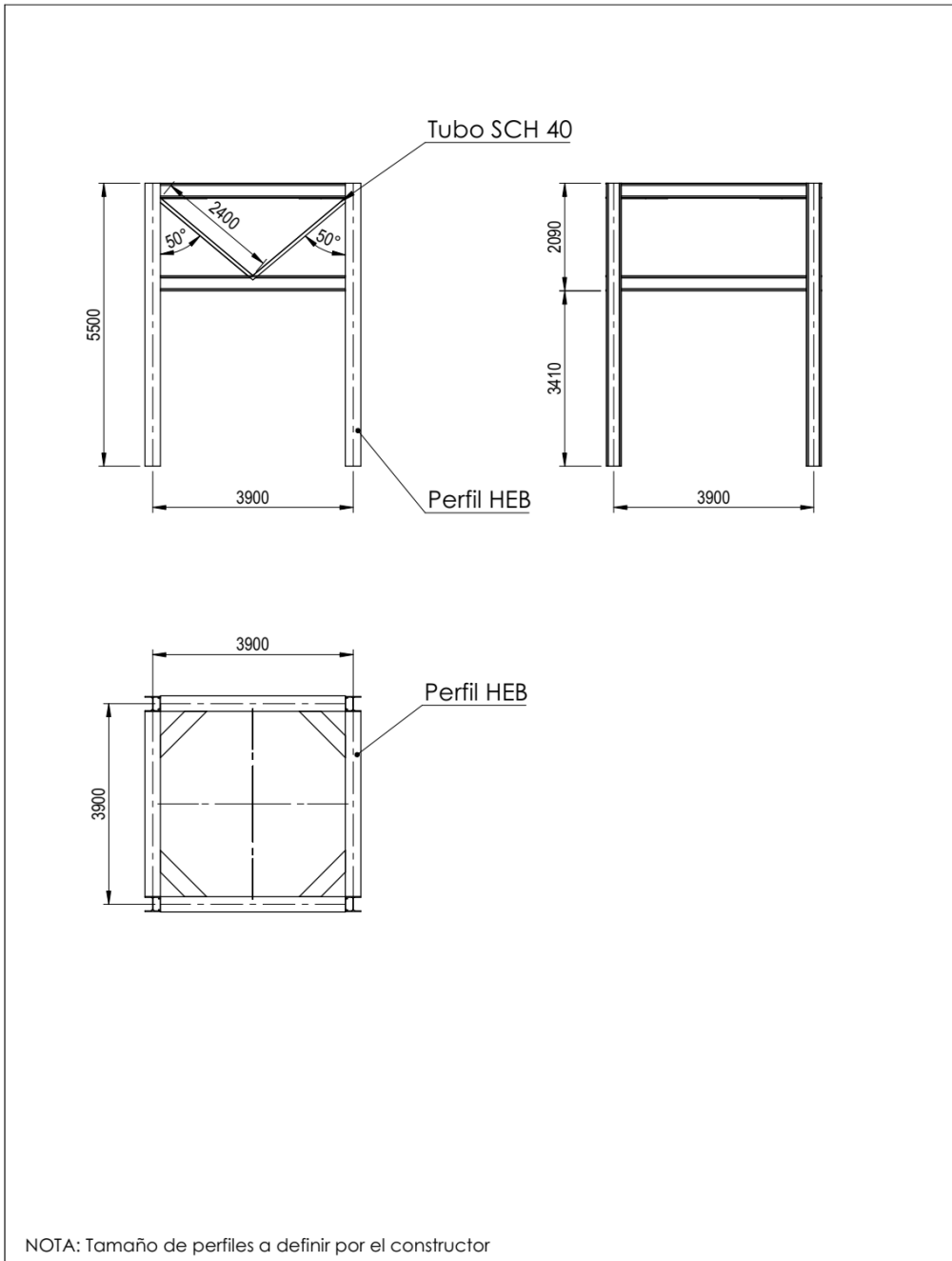
$\frac{Kl}{r}$	F_a (ksi)	$\frac{Kl}{r}$	F_a (ksi)	$\frac{Kl}{r}$	F_a (ksi)	$\frac{Kl}{r}$	F_a (ksi)	$\frac{Kl}{r}$	F_a (ksi)
1	29.94	41	25.69	81	18.81	121	10.20	161	5.76
2	29.87	42	25.55	82	18.61	122	10.03	162	5.69
3	29.80	43	25.40	83	18.41	123	9.87	163	5.62
4	29.73	44	25.26	84	18.20	124	9.71	164	5.55
5	29.66	45	25.11	85	17.99	125	9.56	165	5.49
6	29.58	46	24.96	86	17.79	126	9.41	166	5.42
7	29.50	47	24.81	87	17.58	127	9.26	167	5.35
8	29.42	48	24.66	88	17.37	128	9.11	168	5.29
9	29.34	49	24.51	89	17.15	129	8.97	169	5.23
10	29.26	50	24.35	90	16.94	130	8.84	170	5.17
11	29.17	51	24.19	91	16.72	131	8.70	171	5.11
12	29.08	52	24.04	92	16.50	132	8.57	172	5.05
13	28.99	53	23.88	93	16.29	133	8.44	173	4.99
14	28.90	54	23.72	94	16.06	134	8.32	174	4.93
15	28.80	55	23.55	95	15.84	135	8.19	175	4.88
16	28.71	56	23.39	96	15.62	136	8.07	176	4.82
17	28.61	57	23.22	97	15.39	137	7.96	177	4.77
18	28.51	58	23.06	98	15.17	138	7.84	178	4.71
19	28.40	59	22.89	99	14.94	139	7.73	179	4.66
20	28.30	60	22.72	100	14.71	140	7.62	180	4.61
21	28.19	61	22.55	101	14.47	141	7.51	181	4.56
22	28.08	62	22.37	102	14.24	142	7.41	182	4.51
23	27.97	63	22.20	103	14.00	143	7.30	183	4.46
24	27.86	64	22.02	104	13.77	144	7.20	184	4.41
25	27.75	65	21.85	105	13.53	145	7.10	185	4.36
26	27.63	66	21.67	106	13.29	146	7.01	186	4.32
27	27.52	67	21.49	107	13.04	147	6.91	187	4.27
28	27.40	68	21.31	108	12.80	148	6.82	188	4.23
29	27.28	69	21.12	109	12.57	149	6.73	189	4.18
30	27.15	70	20.94	110	12.34	150	6.64	190	4.14
31	27.03	71	20.75	111	12.12	151	6.55	191	4.09
32	26.90	72	20.56	112	11.90	152	6.46	192	4.05
33	26.77	73	20.38	113	11.69	153	6.38	193	4.01
34	26.64	74	20.10	114	11.49	154	6.30	194	3.97
35	26.51	75	19.99	115	11.29	155	6.22	195	3.93
36	26.38	76	19.80	116	11.10	156	6.14	196	3.89
37	26.25	77	19.61	117	10.91	157	6.06	197	3.85
38	26.11	78	19.41	118	10.72	158	5.98	198	3.81
39	25.97	79	19.21	119	10.55	159	5.91	199	3.77
40	25.83	80	19.01	120	10.37	160	5.83	200	3.73

F_y = 50 ksi

^aWhen element width-to-thickness ratio exceeds noncompact section limits of Sect. B5.1, see Appendix B5.
 Note: C_c = 107.0

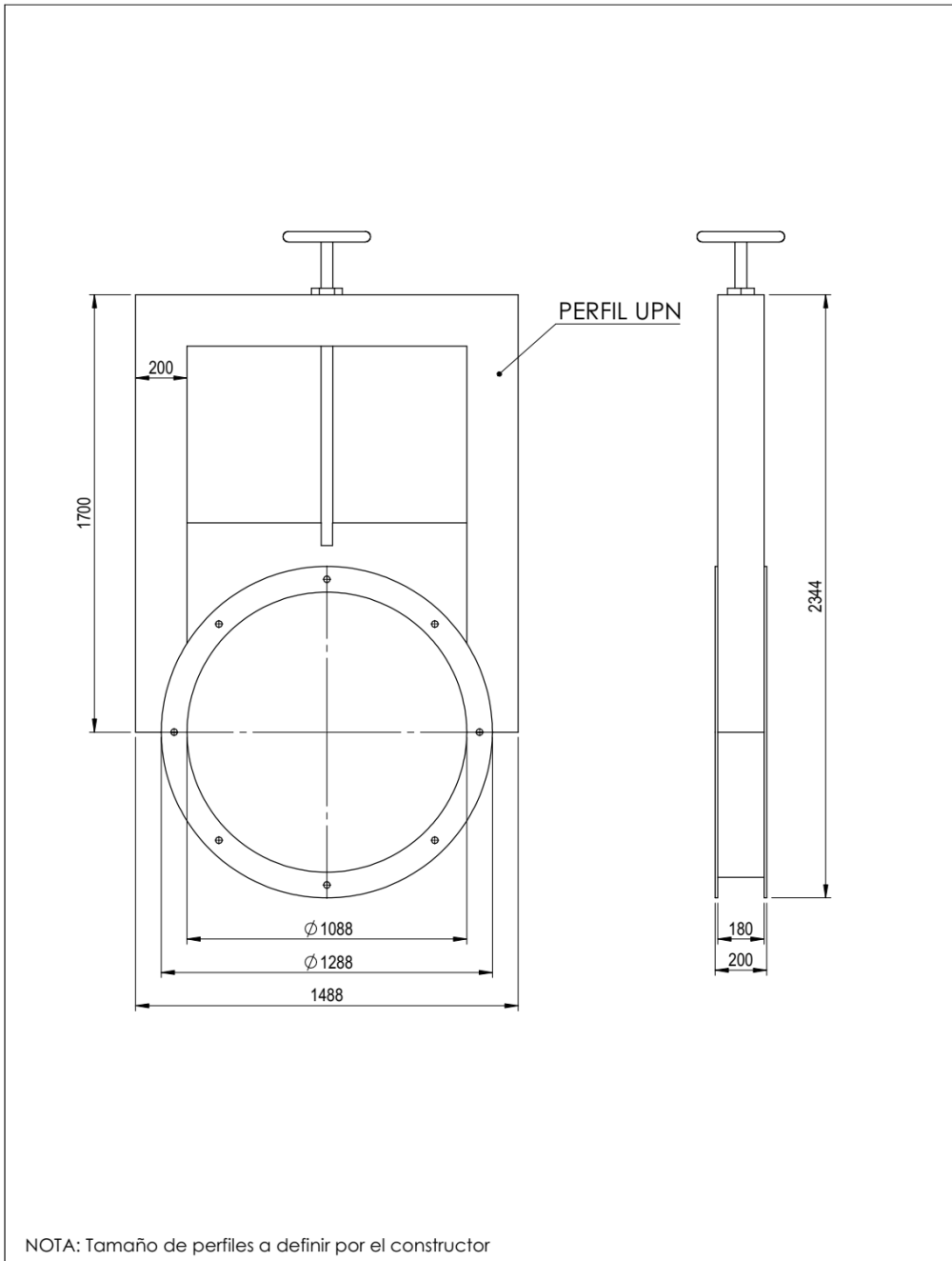
Anexo E
Planos





NOTA: Tamaño de perfiles a definir por el constructor

Tratamiento térmico:	N A	Material:	ASTM A36	Dim. brutas:	N A
Recubrimiento:	N A				
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA	UPS	Diseño:	JIMMY QUINGA	23/03/23	
		Dibujó:	JIMMY QUINGA	23/03/23	
		Revisó:	WILLIAM DÍAZ	23/03/23	
SOPORTE ESTRUCTURAL DEL SILO	Escala: 1:100	Código:	JQ.MIM.002.01	Tol. Gral.:	± 1



NOTA: Tamaño de perfiles a definir por el constructor

Tratamiento térmico:	N A	Material:	ASTM A36	Dim. brutas:	N A
Recubrimiento:	N A				
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA	UPS	Diseño:	JIMMY QUINGA	23/03/23	
		Dibujó:	JIMMY QUINGA	23/03/23	
		Revisó:	WILLIAM DÍAZ	23/03/23	
COMPUERTA DE TOLVA DEL SILO	Escala: 1:20	Código:	JQ.MIM.003.01	Tol. Gral.:	± 1