



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**Diseño y análisis de un silo de pared corrugada con fondo cónico para
almacenamiento de granos con capacidad de 100 toneladas**

ALEX FERNANDO CHAUCA CHICAIZA

**Trabajo de Titulación modalidad: Proyecto de Investigación y Desarrollo,
presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH,
como requisito parcial para la obtención del grado de:**

MAGÍSTER EN DISEÑO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

Marzo 2023

©2023, Alex Fernando Chauca Chicaiza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, denominado: Diseño y análisis de un silo de pared corrugada con fondo cónico para almacenamiento de granos con capacidad de 100 toneladas, de responsabilidad del señor Alex Fernando Chauca Chicaiza, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Ing. Luis Eduardo Hidalgo Almeida, PhD.

PRESIDENTE

Ing. Miguel Ángel Escobar Guachambala, Mag.

DIRECTOR

Ing. Orna Chávez Javier Enrique, Mag.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. López Ortiz Santiago Alejandro, Mag.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Riobamba, marzo 2023

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Alex Fernando Chauca Chicaiza, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Alex Fernando Chauca Chicaiza

No. Cédula: 060382706-4

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Alex Fernando Chauca Chicaiza, declaro que el presente **Trabajo de Investigación modalidad Proyecto de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Alex Fernando Chauca Chicaiza

No. Cédula: 060382706-4

DEDICATORIA

A mis amados padres quienes son mi fuente de inspiración para seguir adelante, a mis hermanos y a mi esposa por sus palabras de aliento para culminar mi proyecto de titulación.

A mis amigos quienes compartieron la experiencia durante la colegiatura, haciendo de esta una experiencia agradable.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación académica.

A mi director y miembros, quienes colaboraron con su experiencia y conocimientos para la ejecución de este proyecto.

A INNOMECC por la predisposición de colaborar siempre, a fin de conseguir un proyecto confiable y funcional que apoye a la industria ecuatoriana.

A mi familia, por su apoyo incondicional para alcanzar mis sueños.

Alex Fernando

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xvii
SUMMARY	xviii
CAPÍTULO I.....	1
<i>1. INTRODUCCIÓN.....</i>	<i>1</i>
1.1 Planteamiento del problema	2
<i>1.1.1 Situación problemática</i>	<i>2</i>
<i>1.1.2 Formulación del problema</i>	<i>3</i>
<i>1.1.3 Justificación de la investigación</i>	<i>3</i>
<i>1.1.4 Objetivo de la investigación</i>	<i>3</i>
<i>1.1.4.1 Objetivo general</i>	<i>3</i>
<i>1.1.4.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.5 Hipótesis</i>	<i>4</i>
<i>1.1.5.1 Hipótesis general.....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.5.2 Hipótesis específicas.....</i>	<i>4</i>
CAPÍTULO II	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes del Problema	5
2.2 Bases teóricas.....	6
<i>2.2.1 Silos</i>	<i>6</i>
<i>2.2.2 Partes constitutivas principales de un silo</i>	<i>6</i>
<i>2.2.2.1 Cubierta.....</i>	<i>6</i>
<i>2.2.2.2 Cuerpo.....</i>	<i>6</i>
<i>2.2.2.3 Tolva.....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.3 Clasificación de los silos.....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.3.1 Por el material de fabricación.....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.3.2 Por su geometría.....</i>	<i>9</i>

2.2.3.3	<i>Por su disposición.....</i>	9
2.2.3.4	<i>Por su esbeltez</i>	10
2.2.4	<i>Modos de falla en silos.....</i>	11
2.2.4.1	<i>Pandeo bajo compresión axial</i>	11
2.2.4.2	<i>Flexión de paredes circulares.....</i>	11
2.2.4.3	<i>Colapso y pandeo de la tolva.....</i>	12
2.2.5	<i>Patrones de flujo en los silos</i>	13
2.2.5.1	<i>Flujo Másico.....</i>	13
2.2.5.2	<i>Flujo Tubular.....</i>	13
2.2.5.3	<i>Flujo Mixto</i>	14
2.2.6	<i>Presiones en un silo</i>	14
2.2.7	<i>Limitaciones e inconsistencias de códigos utilizados en el diseño de silos ..</i>	15
CAPÍTULO III.....		18
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
3.1	Diseño Conceptual	18
3.1.1	<i>Determinación de requerimientos y especificaciones.....</i>	18
3.1.1.1	<i>Desarrollo de la función de calidad QFD (Quality Function Deployment)....</i>	18
3.1.1.2	<i>Especificaciones técnicas del equipo.....</i>	21
3.1.2	<i>Análisis Funcional.....</i>	21
3.1.3	<i>Selección de la mejor alternativa</i>	22
3.1.3.1	<i>Matriz Morfológica.....</i>	22
3.1.3.2	<i>Evaluación de soluciones.....</i>	24
3.2	Diseño de materialización	26
3.2.1	<i>Algoritmo de diseño del silo.....</i>	26
3.2.2	<i>Desarrollo del algoritmo de diseño del silo</i>	27
3.2.2.1	<i>Determinación de la categoría de la superficie de pared</i>	27
3.2.2.2	<i>Determinación de las propiedades del material a ensilar.....</i>	28
3.2.2.3	<i>Datos del material de fabricación del silo.....</i>	29
3.2.2.4	<i>Dimensionamiento del silo.....</i>	30
3.2.2.5	<i>Verificación del cumplimiento de las limitaciones dimensionales</i>	37
3.2.2.6	<i>Verificación del cumplimiento de las limitaciones relativas</i>	38

3.2.2.7	<i>Clasificación del silo</i>	39
3.2.2.8	<i>Consideraciones de cálculo</i>	40
3.2.2.9	<i>Determinación de la carga simétrica de llenado sobre la pared vertical</i>	41
3.2.2.10	<i>Determinación de la carga simétrica de descarga sobre la pared vertical</i>	45
3.2.2.11	<i>Cargas sobre Tolvas</i>	47
3.2.2.12	<i>Carga sísmica (según la norma NEC 2014)</i>	51
3.2.2.13	<i>Cálculo de la carga de viento según la Norma ASCE 7 -10</i>	56
3.2.2.14	<i>Cálculo de la soportería utilizando SAP 2000</i>	58
3.2.2.15	<i>Comprobación manual de la soportería aplicando la AISC 360</i>	62
3.2.2.16	<i>Resistencia a la compresión</i>	65
3.2.2.17	<i>Cálculo del espesor de la plancha de la parte cilíndrica</i>	71
3.2.2.18	<i>Cálculo del espesor de la tolva</i>	73
3.2.2.19	<i>Selección de pernos</i>	74
3.3	Análisis del silo	76
3.3.1	Objetivo	76
3.3.2	Alcance	76
3.3.3	Documentos de referencia	77
3.3.4	Códigos y normas aplicados en el análisis	77
3.3.5	Descripción del análisis	77
3.3.6	Bases y premisas del análisis	78
3.3.7	Método de análisis	78
3.3.7.1	<i>Pre-proceso</i>	78
3.3.7.2	<i>Proceso</i>	78
3.3.7.3	<i>Post-proceso</i>	79
3.3.8	Descripción del modelo numérico	79
3.3.8.1	<i>Geometría</i>	79
3.3.8.2	<i>Mallado</i>	80
3.3.8.3	<i>Materiales</i>	81
3.3.8.4	<i>Cargas y condiciones</i>	82
3.3.9	Validación del modelo	84
3.3.9.1	<i>Con Carga</i>	84
3.3.9.2	<i>Con Carga, viento y sismo</i>	86

3.3.9.3	<i>Sin Carga, viento y sismo</i>	87
3.3.9.4	<i>Solo Descarga</i>	88
3.3.9.5	<i>Descarga, viento y sismo</i>	89
CAPÍTULO IV		90
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	90
CAPÍTULO V		92
5.	PROPUESTAS	92
5.1	Aplicación informática para el prediseño de un silo	92
5.2	Manual de seguridad, operación y mantenimiento	98
5.2.1	<i>Manual de seguridad</i>	98
5.2.1.1	<i>Seguridad de mantenimiento</i>	98
5.2.1.2	<i>Seguridad operacional</i>	99
5.2.2	<i>Manual de operación</i>	99
5.2.2.1	<i>Previo a la utilización del silo</i>	99
5.2.2.2	<i>Llenado del silo</i>	99
5.2.2.3	<i>Uso y almacenamiento</i>	100
5.2.2.4	<i>Descarga del silo</i>	101
5.2.3	<i>Manual de mantenimiento</i>	101
CONCLUSIONES		103
RECOMENDACIONES		104
GLOSARIO		
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-2:	Elementos de un silo	7
Figura 2-2:	Silos de concreto	8
Figura 3-2:	Silos de metal de fondo plano.....	8
Figura 4-2:	Formas de la sección transversal de un silo.....	9
Figura 5-2:	Silos bolsa.....	9
Figura 6-2:	Silos verticales con fondo de pared inclinada (tolva).....	10
Figura 7-2:	Pandeo bajo compresión axial de un silo.....	11
Figura 8-2:	Falla en silos de descarga excéntrica	12
Figura 9-2:	Falla por colapso de la tolva de un silo.....	12
Figura 10-2:	Patrón de flujo en un silo	13
Figura 11-2:	Perfiles de presión.....	14
Figura 12-2:	Presiones que actúan en un silo	15
Figura 13-2:	Registro de presiones que actúan en un silo vertical	15
Figura 1-3:	Análisis funcional del silo.....	22
Figura 2-3:	Alternativas de solución.....	23
Figura 3-3:	Algoritmo para diseñar un silo.....	27
Figura 4-3:	Dimensiones de las chapas de acero.....	28
Figura 5-3:	Dimensiones de un silo	30
Figura 6-3:	Dimensiones de la tolva.....	33
Figura 7-3:	Dimensiones de la tolva para calcular su volumen.....	33
Figura 8-3:	Dimensiones del talud natural.....	34
Figura 9-3:	Excentricidades de un silo	39
Figura 10-3:	Presiones de llenado en un silo de esbeltez media	41
Figura 11-3:	Distribución de presiones de llenado sobre una tolva aguda.....	47
Figura 12-3:	Distribución de presiones de llenado sobre una tolva aguda.....	51
Figura 13-3:	Elemento importado desde AutoCAD a SAP 2000.....	58
Figura 14-3:	Perfil de presión horizontal linealizado	59
Figura 15-3:	Presiones cargadas al silo debido al grano almacenado	59
Figura 16-3:	Cargas de viento según ASCE 7-10.....	60
Figura 17-3:	Carga de sismo – Cortante Basal	60

Figura 18-3:	Análisis de los elementos estructurales del silo.....	61
Figura 19-3:	Resultado de resistencia de columnas.....	62
Figura 20-3:	Propiedades del perfil de la columna.....	63
Figura 21-3:	Carga a compresión	63
Figura 22-3:	Diagrama de momento M3 de la columna.....	64
Figura 23-3:	Diagrama de momento M2 de la columna.....	64
Figura 24-3:	Dimensiones del perfil de la columna.....	65
Figura 25-3:	Valores de longitud efectiva	67
Figura 26-3:	Distribución de planchas por anillo	71
Figura 27-3:	Distribución de planchas de la tolva.....	74
Figura 28-3:	Distribución de las salidas de aire en el techo	75
Figura 29-3:	Silo de 100 toneladas de pared corrugada y tolva cónica.....	76
Figura 30-3:	Geometría del silo diseñado.....	79
Figura 31-3:	Mallado del silo	80
Figura 32-3:	Análisis de convergencia en ANSYS	81
Figura 33-3:	Propiedades mecánicas del material del silo.....	81
Figura 34-3:	Cargas y restricciones del silo (descarga + viento + sismo).....	82
Figura 35-3:	Cargas y restricciones del silo (solo carga del grano)	82
Figura 36-3:	Cargas y restricciones del silo (Con carga + viento + sismo).....	83
Figura 37-3:	Cargas y restricciones del silo (sin carga + sismo + viento).....	83
Figura 38-3:	Cargas y restricciones del silo (solo descarga).....	84
Figura 39-3:	Esfuerzo de von Mises en el silo (solo carga del grano)	85
Figura 40-3:	Deformación del silo con el peso propio y del grano	85
Figura 41-3:	Esfuerzo de von Mises en el silo (Con carga + viento + sismo).....	86
Figura 42-3:	Deformación del silo (Con carga + viento + sismo).....	86
Figura 43-3:	Esfuerzo de von Mises en el silo (sin carga + sismo + viento).....	87
Figura 44-3:	Deformación del silo (sin carga + sismo + viento).....	87
Figura 45-3:	Esfuerzo de von Mises en el silo (solo descarga).....	88
Figura 46-3:	Deformación del silo (solo descarga)	88
Figura 47-3:	Esfuerzo de Von Mises en el silo (descarga + viento + sismo)	89
Figura 48-3:	Deformación del silo (descarga + viento + sismo)	89
Figura 1-4:	Análisis de la combinación descarga + viento + sismo	90
Figura 2-4:	Análisis de pandeo del silo	91

Figura 1-5:	Portada de la aplicación informática para prediseño de un silo.....	92
Figura 2-5:	Ingreso a la aplicación informática	93
Figura 3-5:	Parámetros de ingreso para el prediseño.....	93
Figura 4-5:	Datos iniciales necesarios para el prediseño.....	94
Figura 5-5:	Valores característicos para el cálculo en el prediseño.....	94
Figura 6-5:	Datos necesarios para el dimensionamiento del silo	95
Figura 7-5:	Cargas de llenado y descarga en las paredes verticales	95
Figura 8-5:	Cargas de llenado y descarga en las paredes de la tolva.....	96
Figura 9-5:	Determinación de espesor de la pared cilíndrica y la tolva	96
Figura 10-5:	Resumen de material necesario para la construcción del silo.....	97
Figura 11-5:	Llenado recomendado de un silo	100
Figura 12-5:	Carga excesiva del silo	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-2:	Clasificación de silos por su esbeltez.....	10
Tabla 2-2:	Condiciones de carga cubiertas por varios códigos	16
Tabla 1-3:	Voces del usuario e ingeniero	19
Tabla 2-3:	Matriz QFD aplicada al caso de definición de características de un silo.	20
Tabla 3-3:	Especificaciones técnicas del silo para almacenamiento de granos.....	21
Tabla 3-3:	Matriz morfológica.....	22
Tabla 5-3:	Evaluación de criterios.....	24
Tabla 6-3:	Evaluación de alternativas respecto al costo.....	25
Tabla 7-3:	Evaluación de alternativas respecto al flujo.....	25
Tabla 8-3:	Evaluación de alternativas respecto a la geometría de la chapa.....	25
Tabla 9-3:	Evaluación de alternativas respecto a la capacidad de almacenamiento..	26
Tabla 10-3:	Conclusiones	26
Tabla 11-3:	Propiedades del material a ensilar.....	28
Tabla 12-3:	Valores característicos del maíz según la EN 1991-4:2011.....	29
Tabla 13-3:	Valores de las propiedades del material.....	30
Tabla 14-3:	Dimensiones necesarias para el diseño de un silo.....	31
Tabla 15-3:	Dimensiones del silo	37
Tabla 16-3:	Verificación de limitaciones dimensionales del silo.....	37
Tabla 17-3:	Clasificación recomendada para las clases de evaluación de silos	40
Tabla 18-3:	Coeficientes para las evaluaciones de diferentes cargas en paredes	41
Tabla 19-3:	Presiones de llenado sobre la tolva	49
Tabla 20-3:	Presiones de descarga sobre la tolva	51
Tabla 21-3:	Carga sísmica que actúa en el silo sin carga	55
Tabla 22-3:	Carga sísmica que actúa en el silo con carga	55
Tabla 23-3:	Tabla con valores del factor de dirección de viento.....	56
Tabla 24-3:	Coeficientes de presión interna	57
Tabla 25-5:	Datos del análisis de convergencia.	80
Tabla 1-4:	Resultados de la combinación.....	90
Tabla 1-5:	Costos directos del proyecto	97
Tabla 2-5:	Costos indirectos y totales del proyecto.....	98

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ENCUESTA

ANEXO B: TABLAS UTILIZADAS EN EL DISEÑO

ANEXO C: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL SILO

ANEXO D: CONSTRUCCIÓN DEL SILO

RESUMEN

La presente investigación se basa en el diseño y análisis de un silo de pared corrugada con fondo cónico para el almacenamiento de granos con capacidad de 100 toneladas, partiendo de que en el país no se dispone de una norma que permita el diseño de este tipo de estructura, en consecuencia se realizó el diseño utilizando las normas EN 1991-4:2011, EN 1993-4-1:2007, AS-3774:1996, AISC 360-10, la ASCE 7-10, NEC 2014 para ello inicialmente se determina la conceptualización del silo y se selecciona la mejor alternativa de entre 3 soluciones, luego mediante el diseño de materialización se dimensionó la estructura, considerando planchas de acero galvanizado de 1220x2440 mm con un espesor de 3 mm, siendo corrugada en la parte cilíndrica y plana en la tolva y tapa, los planos del silo se modelaron en SolidWorks, para posteriormente utilizarlos en la validación mediante el método de elementos finitos con ANSYS WORKBENCH donde se determinó que la combinación descarga + sismo + viento es la más crítica, obteniéndose un esfuerzo de von Mises máximo de 272 MPa en la conexión donde la resistencia elástica del perno es 896 MPa; además la soportería se validó utilizando SAP2000 donde se determinó que la relación D/C es 0.666 lo cual garantiza un óptimo funcionamiento de toda la estructura, finalmente se presenta la aplicación informática que permite realizar el prediseño de un silo dando a conocer el espesor de la chapa, la cantidad de material a utilizar en la construcción y un costo que permite al usuario tener una idea del precio que le costaría fabricar una estructura de este tipo.

Palabras Claves: <DISEÑO MECÁNICO>, <SILO>, <ELEMENTOS FINITOS>, <PARED CORRUGADA>, <VALIDACIÓN>.

LUIS
ALBERTO
CAMINOS
VARGAS

Firmado digitalmente
por LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS
Nombre de
reconocimiento (DN):
c=EC, l=RIOBAMBA,
serialNumber=06027669
74, cn=LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS
Fecha: 2021.06.14
13:12:24 -05'00'



0080-DBRAI-UPT-IPEC-2021

SUMMARY

This research is based on the design and analysis of a corrugated wall silo with conical bottom for grain storage with a capacity of 100 tons, centred on the fact that there is no standard in the country that allows the design of this type of structure, consequently the design was carried out using the standards EN 1991-4:2011, EN 1993-4-1:2007, AS-3774: 1996, AISC 360-10, the ASCE 7-10, NEC 2014 for this initially the conceptualization of the silo is determined and the best alternative is selected from among 3 solutions, then through the materialization design the structure was dimensioned, considering galvanized steel plates of 1220x2440 mm with a thickness of 3 mm, being corrugated in the cylindrical part and flat in the hopper and lid, the silo drawings were modeled in SolidWorks, to be later used in the validation by means of the finite element method with ANSYS WORKBENCH where it was considered that the combination of unloading + earthquake + wind is the most critical, obtaining a maximum von Mises stress of 272 MPa in the connection where the elastic resistance of the bolt is 896 MPa; Furthermore, the support was validated using SAP2000 where it was determined that the D/C ratio is 0.666, which guarantees an optimum performance of the whole structure. Finally, a computer application is presented that allows the pre-design of a silo, giving the thickness of the sheet metal, the amount of material to be used in the construction and a cost that allows the user to have an idea of the price that it would cost to manufacture a structure of this type.

Keywords: <MECHANICAL DESIGN>, <SILO>, <FINITE ELEMENTS>, <CORRUGATED WALL>, <VALIDATION>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se refiere al diseño y análisis de un silo de pared corrugada con fondo cónico para almacenamiento de granos con una capacidad de 100 toneladas, basando el diseño en las normas (UNE-EN-1991-4, 2011), (AS-3774, 1996), (AS-3774, 1996), (ANSI/AISC-360, 2010), (UNE-EN-1993-4-1, 2007) y validándolo mediante el método de elementos finitos utilizando ANSYS WORKBENCH para el cuerpo del silo y SAP2000 para la soportería.

La base principal para la ejecución de este proyecto es brindar a los constructores de silos una aplicación informática que les permitan hacer un prediseño y poder estimar de forma rápida una proforma con un costo estimado de la fabricación del silo, considerando una estructura cilíndrica con fondo cónico y soportado por columnas de perfil omega.

Este proyecto se realiza para apoyar a la industria nacional permitiendo obtener un producto que cumpla las exigencias nacionales e internacionales mediante la aplicación de las normas, tales como: (UNE-EN-1991-4, 2011), (AS-3774, 1996), (AS-3774, 1996), (ANSI/AISC-360, 2010), (UNE-EN-1993-4-1, 2007) y puedan competir con el mercado internacional considerando como factor principal el costo, mismo que es elevado debido a los impuestos de importación y al costo de instalación.

Para la ejecución de esta investigación se optó por realizar un diseño conceptual a partir del requerimiento del cliente, concatenando con el criterio ingenieril para lograr alternativas que cumplan los parámetros establecidos y permitan ser evaluadas por el método ordinal de criterios ponderados, para posteriormente realizar el diseño de materialización que dimensionan el silo y permiten obtener el plano de conjunto que ayudan al constructor a minimizar recursos durante su construcción.

Finalmente se presenta los resultados del análisis del comportamiento del silo frente a diferentes combinaciones de cargas utilizando el método de elementos finitos en ANSYS WORKBENCH, permitiendo obtener un índice de seguridad que garantice la vida de los operarios del silo.

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Situación problemática

En la actualidad los silos son imprescindibles en los procesos de producción y distribución en la industria agrícola, agroalimentaria, textil, química, farmacéutica, petroquímica, cementera, entre otras, no obstante, aún quedan inquietudes por resolver, que generan dudas en el comportamiento de los silos (Yáñez, 2001), debido a que provocan fallos, hundimientos, agrietamientos, explosiones que terminan con la vida de personas que trabajan en estas estructuras. Un estudio realizado por la Universidad de Purdue señala que en Estados Unidos en el año 2017 se produjeron 23 decesos a causa de accidentes en silos, mientras que en Shandong – China se registró 6 muertos. (Fellet, 2018)

Según Lucio Cáceres, especialista de infraestructura de la UNOPS en un proyecto el diseño tiene un costo del 3 % del valor total del mismo, siendo innecesario ahorrarse dicho rubro, además indica que en Latinoamérica a causa de un mal diseño un 62% de las fallas localizadas en la construcción luego de un desastre natural se relacionan con este error (Saez, 2017). La BBC News señala que Brasil es considerado el mayor productor de granos en Sudamérica, además el trabajo en silos es considerado una actividad de alto riesgo, ya que en el 2017 se registró 24 fallecidos; en cambio Argentina registra su mayor mortalidad a consecuencia de accidentes en silos en 1985 donde 22 personas perdieron la vida. (Fellet, 2018)

En Ecuador, el IESS es la entidad que posee los datos estadísticos a nivel nacional del seguro de Riesgos de Trabajo pero no dispone de una base de datos al que se pueda acceder para cuantificar los accidentes laborales producidos en silos, por lo que resulta imprescindible que en el diseño del silo se considere todas las variantes que influyen en el mismo, a fin de garantizar un margen de seguridad al usuario y evitar un sobredimensionamiento que conlleve al sobreprecio de la construcción del silo y por ende la reducción de la utilidad al fabricante. En el país el costo de producción de un silo de capacidad de 100 toneladas tiene un costo aproximado de 18000 usd, mientras que importar uno cuesta 23000 usd, adicionalmente se debe contratar personal para el armado del mismo.

1.1.2 Formulación del problema

¿Cómo diseñar y analizar un silo de pared corrugada con fondo cónico para almacenamiento de granos con capacidad de 100 toneladas?

1.1.3 Justificación de la investigación

La escasa información que existe en lo referente al diseño de silos, así como también el desconocimiento de pequeñas empresas de la existencia de softwares que permitan la validación de la estructura motivan al desarrollo de la investigación a fin de establecer una metodología de diseño y validación de un silo utilizando normas nacionales e internacionales.

La contribución teórica de la investigación se basa en el uso de diferentes normas que permiten obtener un modelo numérico del silo que pueda ser evaluado en ANSYS WORKBENCH utilizando el método de elementos finitos para validarlo, permitiendo de esta forma ahorrar costos de producción debido a la correcta selección de materiales, específicamente en el espesor y geometría de la chapa y por sobre todo garantizando entregar un producto de calidad.

La metodología aplicada combinando las normas EN 1991-4:2011, la NEC 2014 y el catálogo de MFS-STORMOR permitirán aportar información referente al diseño de silos de pared corrugada y empernada, ya que la mayoría de información contempla silos de pared lisa y soldados. Esta información considera silos de esbeltez media cuya relación $\frac{h_c}{d_c}$ es menor a 2, con tolva cónica.

Con el desarrollo de esta investigación se procura beneficiar a la industria nacional permitiendo competir con el mercado internacional al ofertar a sus clientes productos de excelente calidad que cumple normas de construcción.

1.1.4 Objetivo de la investigación

1.1.4.1 Objetivo general

Diseñar y analizar un silo de pared corrugada con fondo cónico para almacenamiento de granos con capacidad de 100 toneladas.

1.1.4.2 Objetivos específicos

- Elaborar una metodología sistematizada de diseño aplicando la norma EN 1991-4:2011 que permita obtener un proyecto confiable y funcional.
- Validar el diseño del silo aplicando el método de elementos finitos basando los fundamentos propuestos en estándares nacionales e internacionales.
- Elaborar una aplicación informática que permita realizar el prediseño de un silo según la norma EN 1991-4, 2011.
- Efectuar la ingeniería de detalle mediante planos de construcción, lista de materiales como resultado del diseño y cálculo efectuado.

1.1.5 Hipótesis

1.1.5.1 Hipótesis general

¿El material, espesor y geometría de la chapa metálica si permitirán soportar los esfuerzos críticos de trabajo?

1.1.5.2 Hipótesis específicas

- ¿Aplicando la Norma EN 1991-4:2011 si se logrará elaborar un proceso metodológico sistematizado de diseño?
- ¿Aplicando el método de elementos finitos basando los fundamentos propuestos en estándares nacionales e internacionales si se validará el diseño del silo?
- ¿Al elaborar una aplicación informática si se permitirá realizar el prediseño de un silo según la norma EN 1991-4, 2011?
- ¿Al efectuar la ingeniería de detalle mediante planos de construcción, lista de materiales como resultado del diseño y cálculo efectuado si se permitirá optimizar recursos?

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del Problema

De acuerdo a la bibliografía consultada acerca del diseño y análisis de un silo se encontró la existencia de investigaciones donde se analiza el comportamiento de la estructura una vez sometida a cargas de trabajo que soporta el silo, basando su diseño en una norma y la simulación del sistema aplicando el método de elementos finitos. A continuación, se muestra las investigaciones relevantes que aportan al desarrollo del trabajo de titulación y permiten tener un enfoque claro del objetivo que se quiere lograr.

La investigación con el título “Structural Analysis of corn silo by computing vertical and lateral forces” obtiene el modelo de un silo para almacenar 15 toneladas de maíz en un volumen de 46.2 metros cúbicos utilizando una técnica de modelado paramétrico en Autodesk Inventor, las presiones que soporta la estructura fueron calculadas en Matlab aplicando el enfoque de Janssen debido que altura del silo diseñado era mayor que el diámetro; mientras que para determinar la resistencia estructural del sistema diseñado se utilizó el método de elementos finitos aprovechando el módulo static structural en ANSYS Workbench. En las conclusiones se señala, que el factor de seguridad del sistema es 1.9 garantizando su resistencia mecánica y la selección adecuada del material, considerando un acero S235, finalmente indica que el esfuerzo máximo en la soportería es 123.6 MPa. (Ismail BOGREKCI, 2018)

En la tesis doctoral denominada “Simulación de empujes del material almacenado en silos con modelos de comportamiento del material no elásticos” se menciona que los efectos de origen dinámico, así como también las sobrepresiones que se generan en el vaciado del silo no están contemplados en la Teoría de Janssen, por consiguiente se analiza la generación del modelo de elementos finitos tomando en cuenta ciertos parámetros numéricos y se contrasta la teoría de comportamiento elastoplástico e hipoplástica en silos de propiedades parecidas donde al simular se obtiene un resultado equivalente cuando el material está en reposo y con algunas diferencias en el vaciado; adicional presenta un modelo para la simulación de llenado progresivo considerando la excentricidad del

llenado. El autor concluye que con ANSYS y ABAQUS las presiones normales son similares al considerar un modelo de comportamiento (LE) Lineal-Elástico. (Gallego, 2006)

En la investigación titulada “Análisis de la distribución de presiones estáticas en silos cilíndricos con tolva excéntrica mediante el M.E.F. influencia de la excentricidad y comparación con el Eurocódigo 1” aplicando el método de elementos finitos con el apoyo de ANSYS 5.5 con licencia universitaria se determina que para cualquier excentricidad la transición silo-tolva es el lugar donde se genera el máximo empuje normal a la pared del silo, situándose del lado opuesto al desplazamiento de la boca de salida, además, al comparar con el Eurocódigo los autores concluyen que cuando el silo tenga una descarga concéntrica para los empujes normales a la pared de la tolva se podría emplear un método de cálculo menos cauteloso, mientras que cuando se trabaje con silos con descargas excéntricas se tome en cuenta coeficientes que consideren la diferencia originados en estado estático. (Yáñez, 2001).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Silos

Un silo es un depósito cerrado cilíndrico o prismático utilizado para almacenar materia granular o pulverizada en cantidades variables, con la finalidad de evitar el contacto directo con el ambiente. La geometría, material y dimensiones depende del producto y volumen a almacenar.

2.2.2 Partes constitutivas principales de un silo

2.2.2.1 Cubierta

Es el elemento situado en la parte superior del cuerpo, puede ser de forma semiesférica, semielíptica, o cónica de acuerdo al diseño. Por lo general, sobre su estructura se sitúa un manhole para el acceso al interior del silo y poder realizar inspecciones, limpieza, mantenimiento o reparaciones de ser necesario.

2.2.2.2 Cuerpo

Es el componente de mayor tamaño que almacena gran cantidad de la capacidad total del silo, está diseñada para aislar el producto del contacto directo con el ambiente y soportar todas las cargas que actúan dentro y fuera de la estructura. Su geometría puede ser circular o poligonal y se considera silo de pared gruesa cuando la relación entre la dimensión característica de la sección transversal interna del silo y el espesor de la pared es menor que $\frac{d_c}{t} \leq 200$ y de pared delgada cuando $\frac{d_c}{t} \geq 200$. (UNE-EN-1991-4, 2011).

2.2.2.3 Tolva

Es un depósito con paredes inclinadas situado en la parte inferior del cuerpo del silo, su dimensionamiento depende del método de descarga y la capacidad de almacenamiento y puede ser cónica si el silo es circular o trapezoidal si es rectangular, en ocasiones puede presentar excentricidad en la salida. La sección donde se une el cuerpo y la tolva del silo es conocida como transición.

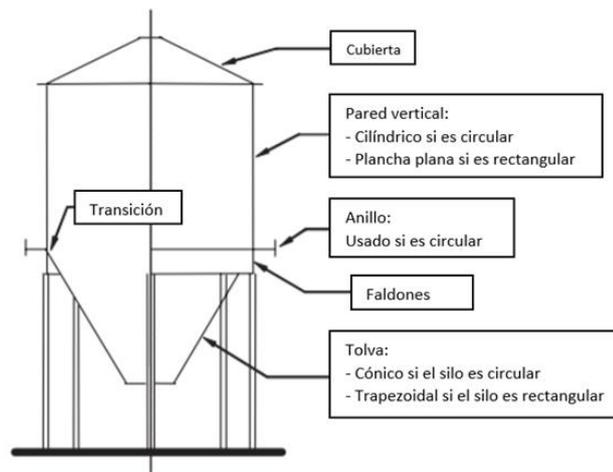


Figura 1-2: Elementos de un silo

Fuente: (UNE-EN-1993-4-1, 2007)

2.2.3 Clasificación de los silos

2.2.3.1 Por el material de fabricación

- **Silo de Concreto.** Son estructuras de gran tamaño diseñadas para almacenar granos y generalmente material polvorizado, tienen larga vida útil y requieren mantenimiento oportuno a fin de evitar fisuras que corraa el acero de refuerzo a consecuencia del

agua lluvia que puede ingrese al concreto, además en zonas industriales se debe evitar la carbonatación del concreto por presencia de carbono CO_2 (Reyes, 2013).



Figura 2-2: Silos de concreto

Fuente: (Fernández, 2013)

- **Silos Metálicos.** puede ser de acero liso o corrugado, soldado o empernado. Su tiempo de construcción es menor que uno de concreto, y consiste en la colocación de planchas previamente baroladas para formar los cilindros verticales, los cuales soportan el peso de la estructura y el material que contiene. Generalmente las planchas de mayor espesor son colocadas en la parte inferior del silo y conforme sube de nivel el espesor disminuye, en ocasiones se mantiene el mismo espesor en toda la estructura. (Reyes, 2013)



Figura 3-2: Silos de metal de fondo plano

Fuente: (Fernández, 2013)

2.2.3.2 Por su geometría

Dependiendo de la funcionalidad del silo, capacidad de almacenamiento, propiedades del material ensilado, del costo de fabricación, del sitio disponible para la instalación y más factores que influyen en el diseño los silos pueden ser:

- Silo Cilíndrico
- Silo Poligonal

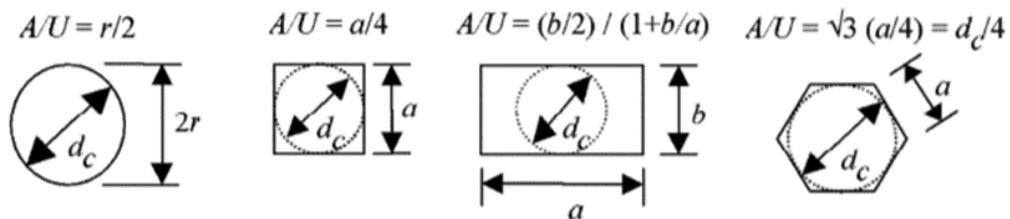


Figura 4-2: Formas de la sección transversal de un silo

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

El silo circular es el que tiene la menor capacidad de almacenamiento en comparación con otras geometrías, como las mostradas en la figura 4-2. (Ccarita, 2011)

2.2.3.3 Por su disposición

- **Silo Horizontal:** son utilizados para almacenar productos por periodos cortos, o para transportar materiales de un lugar a otro. Para el almacenamiento de forrajes y granos se utilizan los silos bolsa fabricadas de polietileno que asegura la conservación del producto.



Figura 5-2: Silos bolsa

Fuente: (MAG, 2020)

- **Silo Vertical:** son los más comunes en la industria, pueden de ser de fondo plano o con tolva según la necesidad, se usan para el almacenamiento temporal de productos, incluso dentro de procesos productivos en industrias, tales como: la alimenticia, la agroindustrial, la farmacéutica y más.



Figura 6-2: Silos verticales con fondo de pared inclinada (tolva)

Fuente: (Cigarruista, 2016)

2.2.3.4 Por su esbeltez

Según la (UNE-EN-1991-4, 2011) para esta clasificación se considera la relación entre la altura del silo medida desde la transición hasta la superficie equivalente (h_c) con la dimensión característica de la sección transversal del silo (d_c), es decir $\frac{h_c}{d_c}$. Se obtiene entonces:

Tabla 1-2: Clasificación de silos por su esbeltez

Tipo de silo	Relación	Observación
Esbelto	$\frac{h_c}{d_c} \geq 2$	Silo con tolva de flujo expandido sometida a flujo mixto $\frac{h_b}{d_c} \geq 2$
Esbeltez intermedia	$1 < \frac{h_c}{d_c} < 2$	Excepto en silo con tolva de flujo expandido sometida a flujo mixto
Poco esbeltos	$0.4 < \frac{h_c}{d_c} < 1$	Si el silo tiene tolva en la base y cumple $\frac{h_c}{d_c} \leq 0.4$
Granero	$\frac{h_c}{d_c} \leq 0.4$	Solo silos de fondo plano

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

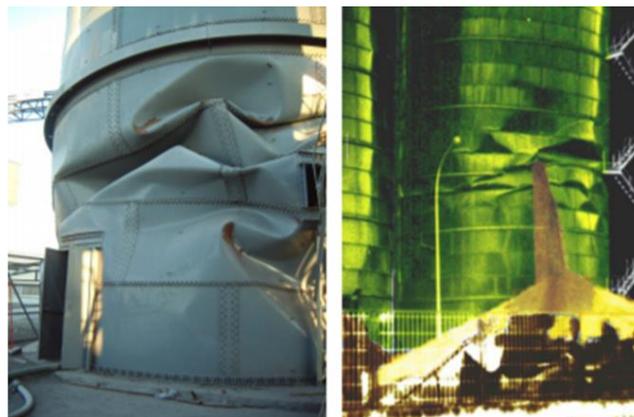
Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

2.2.4 Modos de falla en silos

Según (Ayuga, 1995) los silos son considerados estructuras con un porcentaje de siniestralidad alto, producto del fallo del silo, tales como: pandeos, fisuras, colapso de paredes, explosiones, entre otras.

2.2.4.1 Pandeo bajo compresión axial

Es el modo de falla más común en los silos metálicos cilíndricos que tiene resultados desastrosos, se genera por la fricción que comunica el material almacenado a las paredes del silo o también por las presiones asimétricas durante la descarga que actúan sobre la pared produciendo fenómenos de flexión en la carcasa. El pandeo sucede a tensiones muy bajas respecto a la resistencia del material de la pared, cuando falla por presiones internas altas el pandeo es conocido como “pata de elefante” por su forma aplastada. (Rotter M. , 2008).



a) Compresión uniforme b) Compresión asimétrica

Figura 7-2: Pandeo bajo compresión axial de un silo

Fuente: (Rotter J. M., 2009)

2.2.4.2 Flexión de paredes circulares

Se produce cuando existe excentricidad en la descarga del silo, o cuando existe múltiples tolvas en la descarga, esto da como resultado presiones no uniformes alrededor del perímetro del silo generando momentos flectores en el cuerpo de la estructura. Por eso es recomendable considerar siempre que sea posible diseñar un silo con el ingreso y la salida concéntricos, o a su vez tomar las medidas necesarias en el diseño a fin que se garantice

que el silo soporte condiciones de carga no uniformes y por lo tanto los momentos flectores resultantes, es muy saludable hacer particiones en el flujo de descarga fuera de la tolva, a tal punto de que no se generen cargas que afecten la estructura. (Carson J. , 2000)



Figura 8-2: Falla en silos de descarga excéntrica

Fuente: (Rotter J. M., 2009)

2.2.4.3 Colapso y pandeo de la tolva

La descarga acelerada del silo origina un vacío parcial produciendo fallos en el techo o paredes de la estructura, mientras que la tolva falla cuando las estructuras conectadas a ella ejercen fuerzas verticales en su base, o los flujos excéntricos de descarga originan presiones asimétricas generando tensiones de compresión en un lado (Rotter J. M., 2009)



Figura 9-2: Falla por colapso de la tolva de un silo

Fuente: (Llano_Tv, 2020)

2.2.5 Patrones de flujo en los silos

Según la Norma EN 1991-4-1, se pueden presentar los siguientes flujos.

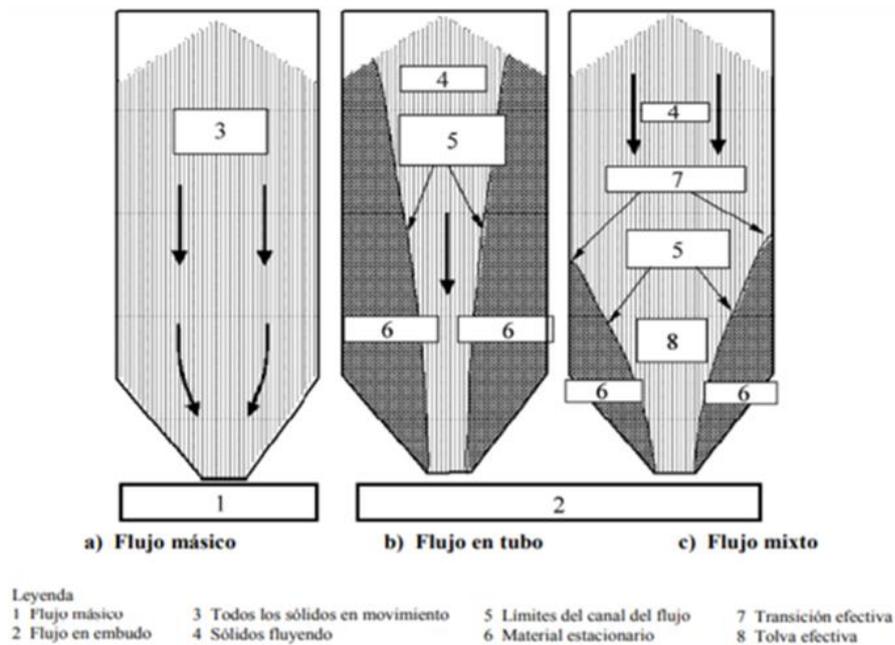


Figura 10-2: Patrón de flujo en un silo

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

2.2.5.1 Flujo Másico

Permite aprovechar la capacidad total de acopio del silo debido a que el material almacenado se mueve simultáneamente al iniciar su descarga bajo en el principio de “first in – first out”, es decir el producto que ingresa primero sale primero, evitando obstrucciones de flujo y por consiguiente zonas muertas.

2.2.5.2 Flujo Tubular

Es un patrón de flujo en embudo, donde el material ensilado se desplaza a la tolva por un canal vertical o cónico formado por el material que permanece estático junto a las paredes, provocando un flujo variable con el paso del tiempo. Es recomendable evitar el efecto “pistón” por la formación de bóvedas junto a la tolva debido a que bloquea la descarga y al reanudarse nuevamente el flujo incrementan los esfuerzos verticales y horizontales (Ayuga, 1995)

2.2.5.3 Flujo Mixto

También tiene un patrón de flujo en embudo, que es considerado como la combinación entre el flujo másico y tubular, en este caso el material que tiene un flujo menor que el tubular se acumula entre la tolva y la pared del silo en punto llamado transición efectiva. (UNE-EN-1991-4, 2011)

2.2.6 Presiones en un silo

En los tanques donde se almacena líquidos la presión depende únicamente de la altura a la que se encuentre el fluido, es decir en el fondo del tanque la presión es mayor que en la parte superior; a diferencia de un silo, donde las presiones dependen de las cargas que genere el material a almacenar al entrar en contacto con las paredes del silo. La figura 11-2 muestra la diferencia entre las curvas altura-presión entre un tanque y un silo.

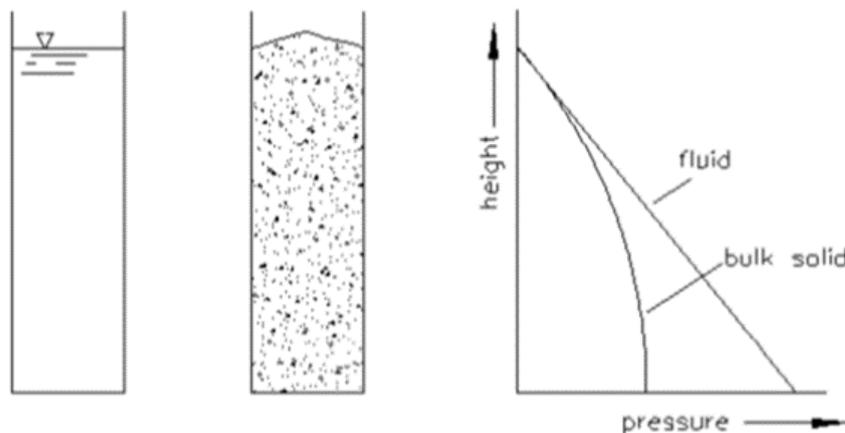


Figura 11-2: Perfiles de presión

Fuente: (CRIBA, 2018)

Según la EN-1991-4 las presiones que actúan en un silo son:

- ✓ p_h - presión horizontal debido al material ensilado
- ✓ p_w - presión de tracción por rozamiento (pared vertical)
- ✓ p_v - presión vertical en el sólido almacenado
- ✓ p_n - presión horizontal a la pared de la tolva por el material ensilado
- ✓ p_t - presión de tracción por rozamiento (tolva)

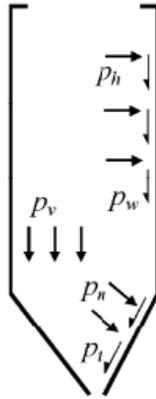


Figura 12-2: Presiones que actúan en un silo

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

En el 2009, el Prof. Michael Rotter presentó un registro de presiones que actúan en un silo, donde existe una relativa estabilidad de las presiones luego del llenado y durante el acopio, no así para la descarga donde se han realizado análisis cuasi estáticos a fin de explicar las presiones erráticas que se generan, como se muestra en la Figura 13-2, por ello en las normas las presiones de descarga resultan de simplificaciones de las mediciones experimentales. (Rotter M. , 2008)

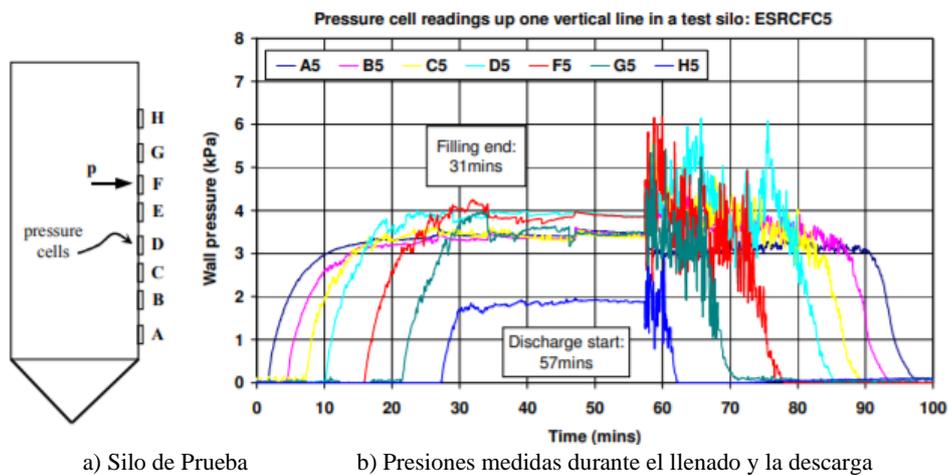


Figura 13-2: Registro de presiones que actúan en un silo vertical

Fuente: (Rotter J. M., 2009)

2.2.7 Limitaciones e inconsistencias de códigos utilizados en el diseño de silos

Dentro del diseño de silos, es imprescindible determinar todas las cargas que soportará la estructura, para ello existen códigos y normas que se pueden utilizar, entre las más comunes usadas en el mundo, se tiene:

- Norma Europea UNE EN 1991-4: 2011 "Eurocódigo 1 - Acciones en estructuras - Parte 4: Silos y tanques"
- Instituto Americano del Concreto ACI 313-97 "Práctica estándar para el diseño y construcción de silos de concreto y tubos apilables para almacenar materiales granulares"
- Sociedad Estadounidense de Ingenieros Agrícolas ANSI / ASAE EP433 DEC1988 (R2011) "Cargas ejercidas por el grano que fluye libremente en los contenedores"
- Norma australiana AS 3774-1996 "Cargas en contenedores de sólidos a granel"

En la Tabla 2-2, se muestra las limitaciones e inconsistencias de estas normas considerando diferentes condiciones cargas.

Tabla 2-2: Condiciones de carga cubiertas por varios códigos

Condiciones de Carga	EN 1991-4:2011	ACI 313-97	ANSI/ASAE EP433-1988	AS3774-1996
Geometría de la tolva				
Cono simple simétrico	Si	Si	Si	Si
Pirámide cuadrada	Si	No	No	Si
Cuña con paredes de extremo verticales	Si	No	No	Si
Condiciones de llenado y descarga				
Cargas parche	Si	No	No	No
Llenado y descarga excéntricos	Si	Pobremente	No	Si
Flujo de masa	Si	No	No	Si
Flujo de embudo				
Flujo de tubería	Si	Si	Si	Si
Flujo mixto	Si	No	Si	No
Flujo expandido	No	No	No	No
Cargas de impacto en el llenado	No	No	No	Si
Silo movedizo	No	No	No	Si
Internos	No	No	No	Si
Trinquete térmico	Si	No	Si	Si
Hinchazón de granos	No	No	Si	Si
Efectos de las presiones de los gases				
Contenidos completamente fluidizados	Si	Si	No	Si
Contenido parcialmente fluidizado	No	No	No	No
Equipo externo	No	No	No	Si

Fuente: (Carson J. , 2015)

Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

De acuerdo a la tabla anterior, existe una similitud entre la norma UNE EN 1991-4:2011 y la AS 3774-1996, por cuanto la norma europea se elaboró a partir de la australiana; la diferencia radica en que Eurocódigo tiene una clasificación por capacidad de almacenamiento, conocida como CLASE DE EVALUACIÓN DE ACCIONES.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se utiliza una combinación de las dos normas (UNE-EN-1991-4, 2011) y la (AS-3774, 1996) para la determinación de cargas de llenado y descarga, mientras que para determinar las cargas de viento se usará la (ASCE-7, 2010), además para la soportería se utiliza la (ANSI/AISC-360, 2010).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de este capítulo, se considera seguir la metodología de diseño sugerida por (Riba, 2002), donde se considera 3 etapas; la primera determina el diseño conceptual, la segunda el diseño de materialización y finalmente la validación del diseño propuesto.

3.1 Diseño Conceptual

Se analiza las posibles alternativas de diseño, utilizando la ingeniería concurrente se determina el concepto del silo para almacenamiento de granos, partiendo desde los requerimientos del usuario para establecer las especificaciones técnicas que permiten generar alternativas para evaluarlas y seleccionar la mejor opción aplicando el método ordinal corregido de criterios ponderados.

3.1.1 *Determinación de requerimientos y especificaciones*

3.1.1.1 *Desarrollo de la función de calidad QFD (Quality Function Deployment)*

El QFD es una herramienta que permite determinar las características de mayor prioridad de un equipo, considerando las necesidades del cliente, las respuestas técnicas a estas y la comparación con equipos similares existentes en el mercado.

(Riba, 2002) señala que “Consiste en un proceso estructurado que permite traducir los requerimientos y deseos de los usuarios en requerimientos de ingeniería en cada fase del diseño y de la fabricación”

- **La voz del usuario**

Se realizó una encuesta (Anexo A) al dueño de INNOMECA, empresa Riobambena dedicada al diseño y fabricación de maquinaria y equipos para la industria de balanceados para animales; quién da a conocer los requerimientos y necesidades que tiene.

- **La voz del ingeniero**

Una vez revisada y analizada la información obtenida de la encuesta a INNOMECE, se enlista los requerimientos que debe cumplir el silo, ajustando estas necesidades a ser solucionadas mediante criterios técnicos propuestos por la voz del ingeniero.

La tabla 1-3 muestra los requerimientos establecidos por INNOMECE (voz del usuario) y la solución propuesta en esta investigación (voz del ingeniero).

Tabla 1-3: Voces del usuario e ingeniero

Voz del usuario	Voz del ingeniero
Facilidad de llenado y descarga	Tipo de flujo
Tamaño Adecuado	Capacidad de almacenamiento
Estético	Esbeltez
Resistente	Espesor de la chapa
Facilidad Constructiva	Geometría
No ocupe demasiado espacio	Posición
Accesible para dar mantenimiento	Tipo de techo
Seguro	Material del silo
Precio accesible	Costo

Realizado por: Alex Chauca, 2020

- **Análisis de competitividad**

Una parte del desarrollo de la matriz QFD contempla la ponderación con estructuras similares existentes en el mercado, para ello se ha tomado la experiencia de INNOMECE para evaluar a la competencia, siendo considerados los silos importados.

- **Resultado de la matriz OFD**

Para la elaboración de la matriz se sigue los lineamientos establecidos en (Riba, 2002). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2-3, cuya estructura esta formada por:

definición del cliente, análisis de competitividad, requerimientos técnicos, correlaciones, evaluación técnica y compromisos técnicos.

Tabla 2-3: Matriz QFD aplicada al caso de definición de características de un silo

		VOZ DEL INGENIERO	tipo de flujo	capacidad de almacenamiento	material a almacenar	esbeltez	espesor de la chapa	geometría	Posición	costo	tipo de cubierta	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
												IMPORTANCIA	PROPIA EMPRESA	COMPETENCIA 1	COMPETENCIA 2	OBJETIVOS	INDICE DE MEJORIA	FACTOR DE VENTA	PONDERACIÓN	PONDERACIÓN EN %	
Requerimientos VOR DEL USUARIO	facilidad de llenado y descarga	B	●	○	○	○	○			○		5	1	3	4	4	4	●	30	16.05	
	tamaño adecuado	B	○	●	●				○	●		4	1	3	3	4	4	○	19	10.27	
	estético	E				●		○		●		3	1	1	2	3	3		9	4.815	
	resistente	B	●				●					5	1	3	4	5	5	○	30	16.05	
	facilidad constructiva	U				●				○		4	1	3	2	4	4	○	19	10.27	
	no ocupe demasiado espacio	U		●				●	●			3	1	3	3	3	3		9	4.815	
	precio accesible	U		●			●					4	1	2	3	4	4	●	24	12.84	
	accesible para dar mantenimiento	E		○	▽						●		3	1	3	4	3	3		9	4.815
	seguro	B	○		▽		○				●		5	1	4	5	5	5	●	38	20.06
												187								100	
	Propia empresa		1	1	1	1	1	1	1	1	1										
	Competencia 1		3	3	3	4	4	4	4	4	1										
	Competencia 2		4	3	4	4	4	3	4	2	3										
	Incidencia		710	587	309	344	689	108	139	739	81										3705
	Incidencia en %		19.17	15.84	8.348	9.279	18.58	2.915	3.741	19.94	2.186										100
	Especificaciones		másico	100 Toneladas	maiz	Esbelto $h_r/d_c \geq 2$	acero	Cilíndrico y tolva cónica	vertical	\$18.000	cónica										

Realizado por: Alex Chauca, 2020

• **Análisis de la matriz QFD**

De acuerdo al porcentaje de incidencia, las especificaciones a considerar en el diseño del silo según su prioridad son las siguientes:

- ✓ Costo
- ✓ Tipo de flujo
- ✓ Espesor de la chapa
- ✓ Capacidad de almacenamiento
- ✓ Material a almacenar

3.1.1.2 Especificaciones técnicas del equipo

El silo para almacenamiento de granos queda definido por las especificaciones técnicas enunciadas en la tabla 3-3, las cuales constituyen la guía y referencia para su diseño y validación.

Tabla 3-3: Especificaciones técnicas del silo para almacenamiento de granos

EMPRESA: INNOMECC		PRODUCTO: Silo de para almacenamiento de granos		Fecha inicial: Última revisión:
DISEÑADOR: Alex Chauca				Página 1/1
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función		C	R	Depósito para almacenar granos por periodos cortos
Dimensiones		C I I	D	100 Toneladas de capacidad Silo esbelto
Movimientos		I	D	Flujo másico
Energía		I	R	Descarga por gravedad
Materiales		I	D	plancha corrugada
Fabricación y montaje		I	D	Silo empernado
Costos		C	D	\$ 18 000
Aspectos legales		I	R	UNE EN 1990-1-4:2006
Propone: C = Cliente; I = Ingeniería R/D: R = Requerimiento; MR = Modif. Requerimiento; NR = Nuevo requerimiento; D = Deseo				

Realizado por: Alex Chauca, 2020

3.1.2 Análisis Funcional

Para el análisis funcional se considera al silo como un todo, teniendo en cuenta que su función global es el almacenamiento temporal y conservación de granos, resaltando el método de descarga como un lineamiento indispensable para el dimensionamiento de la estructura.

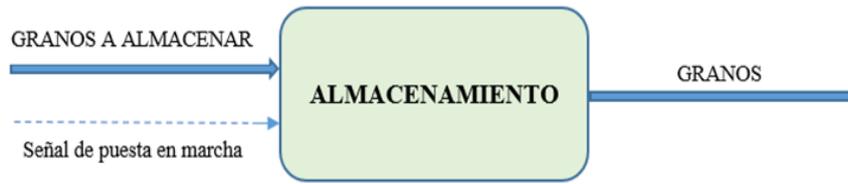


Figura 1-3: Análisis funcional del silo

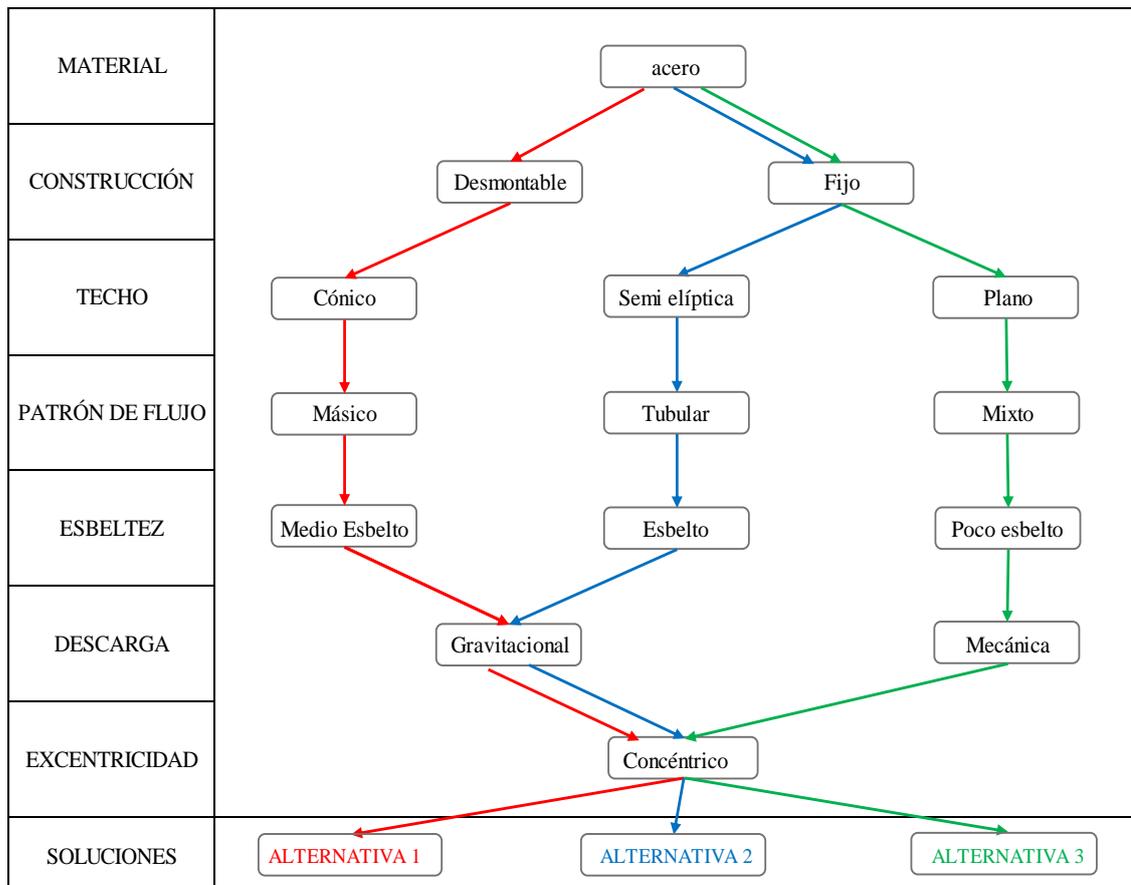
Realizado por: Alex Chauca, 2020

3.1.3 Selección de la mejor alternativa

Se genera alternativas de solución, considerando los requerimientos técnicos a fin de cumplir la función principal del silo.

3.1.3.1 Matriz Morfológica

Tabla 4-3: Matriz morfológica



Realizado por: Alex Chauca, 2020

De acuerdo a la matriz morfológica las alternativas que pueden dar solución a los requerimientos técnicos, son las siguientes:

- **Alternativa 1**

El silo presentado como primera solución es desmontable, fabricado con planchas de acero onduladas trapezoidal o sinusoidal, considerando una inclinación de la tolva adecuada para garantizar un flujo másico y con la descarga solo por efecto de la gravedad.

- **Alternativa 2**

El silo sugerido como segunda solución es soldado, fabricado con planchas de acero lisas, considerando un techo semi elíptico, con una tolva cónica que garantiza un flujo tubular y una descarga gravitacional.

- **Alternativa 3**

El silo propuesto como tercera solución es soldado, fabricado con planchas de acero lisas, considerando un techo plano, con una tolva cónica que utiliza un sistema rompe bóvedas que garantiza un flujo adecuado.

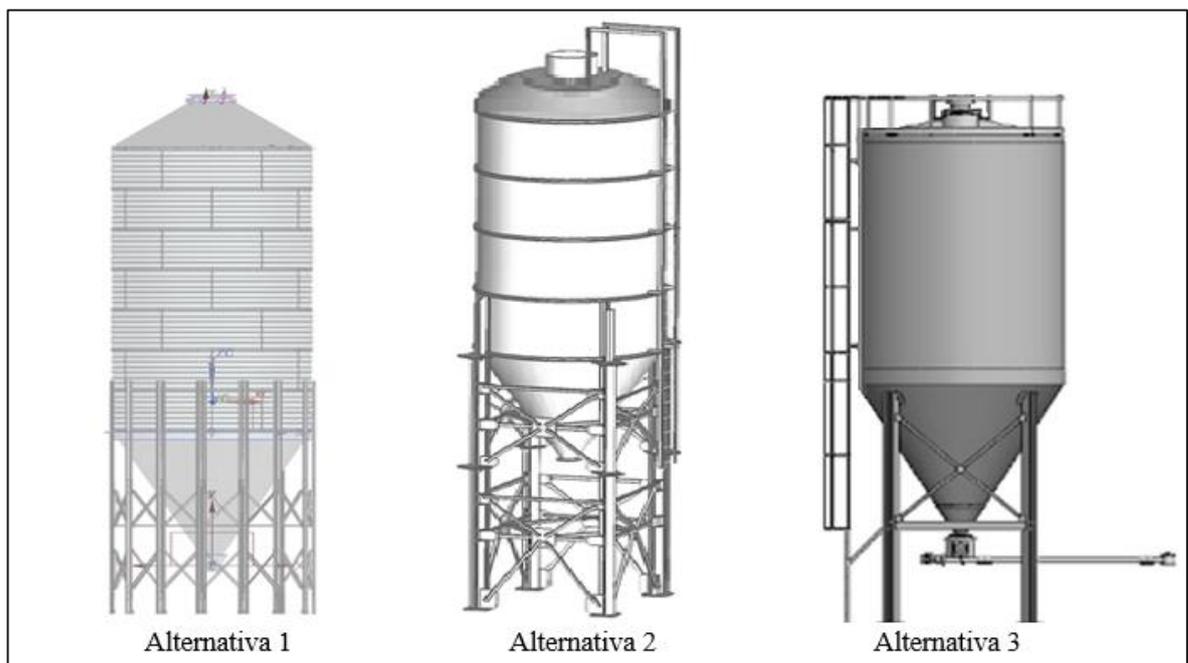


Figura 2-3: Alternativas de solución

Realizado por: Alex Chauca, 2020

3.1.3.2 Evaluación de soluciones

Se aplica el método ordinal corregido de criterios ponderados para evaluar las soluciones, considerando 2 elementos:

- ✓ **Alternativas.** Se cuenta con 3 a ser evaluadas.
- ✓ **Criterios.** Deben permitir evaluar las alternativas, por ello los criterios de valoración son los siguientes:
 - a) Costo, debido a que debe ser competitivo con los silos importados.
 - b) Tipo de flujo, debido a que no debe existir atascamiento durante la descarga.
 - c) Geometría de la chapa, permitirá disminuir el espesor de la plancha de acero.
 - d) Capacidad de almacenamiento.

- **Evaluación de criterios**

Según (Riba, 2002) se realiza tablas con todas las alternativas, evaluando y comparando según el siguiente criterio.

- ✓ **1** → Si la solución (o criterio) de la fila es superior (o mejor; >) que el de la columna
- ✓ **0,5** → Si la solución (o criterio) de la fila es equivalente (=) al de la columna
- ✓ **0** → Si la solución (o criterio) de la fila es inferior (o peor; <) que el de la columna

Luego, se suman los valores de cada fila, añadiendo la unidad a cada una de ellas. Para determinar el valor de la ponderación se divide esta sumatoria para el total.

Tabla 5-3: Evaluación de criterios

	costo	>	flujo	>	chapa	>	capacidad
Criterio	Costo		Flujo		Geometría Chapa		Capacidad
Costo			1		1		1
Flujo	0				1		1
Geometría Chapa	0		0				1
Capacidad	0		0		0		
							10
							1

Realizado por: Alex Chauca, 2020

- **Evaluación de cada alternativa con cada criterio**

Se evalúa todas las alternativas propuestas con cada una de los criterios, para determinar el valor de ponderación que nos permitirá hallarlas conclusiones del análisis.

El resultado se resume en las tablas siguientes.

Tabla 6-3: Evaluación de alternativas respecto al costo

alternativa 1 > alternativa 3 > alternativa 2					
Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.50
Alternativa 2	0		0	1	0.17
Alternativa 3	0	1		2	0.33
				6	1

Realizado por: Alex Chauca, 2020

Tabla 7-3: Evaluación de alternativas respecto al flujo

alternativa 3 > alternativa 1 > alternativa 2					
Flujo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	ponderación
Alternativa 1		1	0	2	0.33
Alternativa 2	0		0	1	0.17
Alternativa 3	1	1		3	0.50
				6	1

Realizado por: Alex Chauca, 2020

Tabla 8-3: Evaluación de alternativas respecto a la geometría de la chapa

alternativa 1 > alternativa 2 = alternativa 3					
Geometría chapa	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.50
Alternativa 2	0		0.5	1.5	0.25
Alternativa 3	0	0.5		1.5	0.25
				6	1

Realizado por: Alex Chauca, 2020

Tabla 9-3: Evaluación de alternativas respecto a la capacidad de almacenamiento

alternativa 1 = alternativa 2 = alternativa 3					
Capacidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	ponderación
Alternativa 1		0.5	0.5	2	0.33
Alternativa 2	0.5		0.5	2	0.33
Alternativa 3	0.5	0.5		2	0.33
				6	1

Realizado por: Alex Chauca, 2020

- **Conclusiones**

Una vez analizada todas las alternativas con los criterios establecidos, se obtiene el siguiente resumen que permite visualizar el orden de estas por su prioridad.

Tabla 10-3: Conclusiones

Conclusión	costo	flujo	geometría Chapa	capacidad	Σ	prioridad
Alternativa 1	0.20	0.1	0.1	0.0333	0.43	1
Alternativa 2	0.07	0.05	0.05	0.0333	0.20	3
Alternativa 3	0.13	0.15	0.05	0.0333	0.37	2

Realizado por: Alex Chauca, 2020

Una vez evaluadas todas las alternativas propuestas, se determina que la **alternativa 1** es la mejor solución que cumple con los requerimientos técnicos establecidos.

3.2 Diseño de materialización

En este capítulo se establece una metodología sistematizada del diseño de silos para almacenamiento de granos aplicando las normas EN 1991-4:2011, (ASCE-7, 2010), (AS-3774, 1996), (ANSI/AISC-360, 2010), (UNE-EN-1993-4-1, 2007) que permita obtener un proyecto confiable y funcional.

3.2.1 Algoritmo de diseño del silo

El algoritmo nos permite establecer los pasos a seguir para determinar las cargas de llenado y descarga del silo.

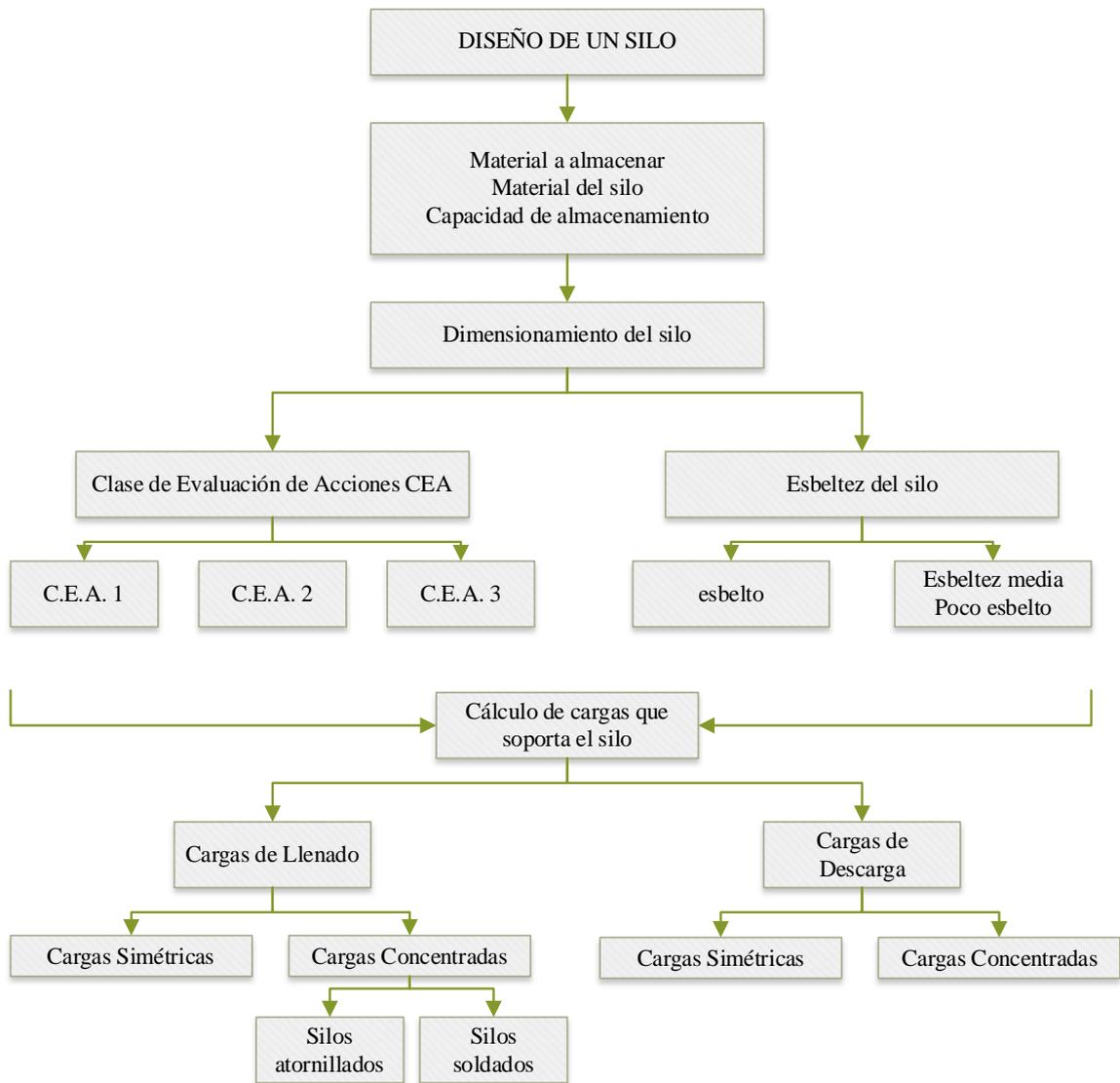


Figura 3-3: Algoritmo para diseñar un silo

Realizado por: Alex Chauca, 2020

3.2.2 *Desarrollo del algoritmo de diseño del silo*

3.2.2.1 *Determinación de la categoría de la superficie de pared*

Según la (UNE-EN-1991-4, 2011), la categoría depende del del material y geometría de la pared con la que se fabricará el silo.

De acuerdo a la Tabla 4-1 de la norma y considerando la alternativa seleccionada se tiene que la categoría de la superficie de la pared es D4.

3.2.2.2 Determinación de las propiedades del material a ensilar

El anexo E de la norma (UNE-EN-1993-1-1, 2005) proporciona las propiedades de los sólidos comúnmente utilizados en la industria, dicha tabla se muestra en los anexos de esta investigación.

Tabla 11-3: Propiedades del material a ensilar

Tipo de sólido o disgregado	Peso específico γ		Ángulo de talud natural ϕ_r	Ángulo de rozamiento interno ϕ_i		Coeficiente de presiones laterales K		Coeficiente de rozamiento con la pared μ ($\mu = \tan \phi_w$)				Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas C_{op}	
	γ_i	γ_u	ϕ_r	ϕ_{im}	a_ϕ	K_m	a_k	Tipo de pared D1	Tipo de pared D2	Tipo de pared D3	a_u		
	Inferior	Superior		Medio	Coeficiente	Medio	Coeficiente	Medio	Medio	Medio	Medio		Coeficiente
	$\frac{kN}{m^3}$	$\frac{kN}{m^3}$	grados	grados									
Maiz	7	8	35	31	1.14	0.53	1.14	0.22	0.36	0.53	1.24	0.9	

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

Cuando el silo es de categoría D4, el coeficiente de rozamiento efectivo μ_{eff} se determina a partir del perfil de la chapa, calculando la superficie de contacto con la pared a_w , de acuerdo al Anexo D de la Norma (UNE-EN-1991-4, 2011).

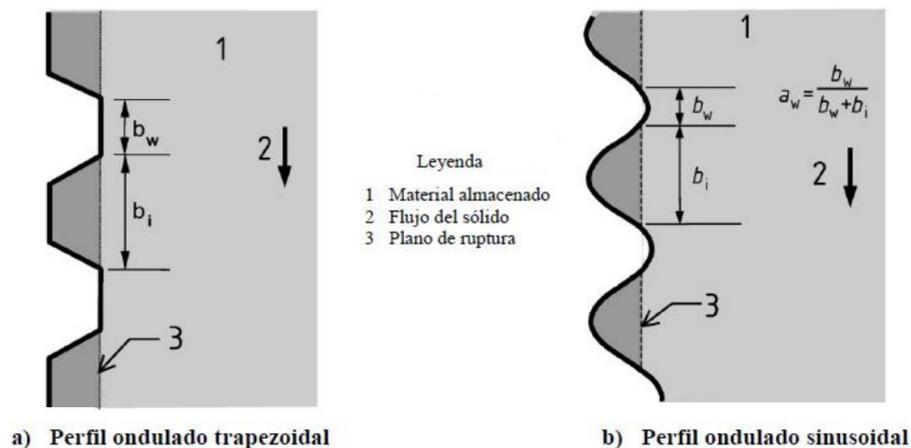


Figura 4-3: Dimensiones de las chapas de acero

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

$$a_w = \frac{b_w}{b_w + b_i} \quad (1)$$

$$a_w = \frac{90}{90 + 120}$$

$$a_w = 0.43$$

Con los valores del ángulo de rozamiento interno ϕ_i y del coeficiente de rozamiento considerando una superficie lisa μ_w , obtenidos de la tabla 1-4 se halla μ_{eff} .

$$\mu_{eff} = (1 - a_w) \tan\phi_i + a_w \mu_w \quad (2)$$

$$\mu_{eff} = (1 - a_w) \tan\phi_i + a_w \mu_w$$

$$\mu_{eff} = (1 - 0.43) \tan 31 + 0.43 * 0.36$$

$$\mu_{eff} = 0.49$$

Con las propiedades del producto a ensilar establecidas, se determina los valores característicos que sirven para cálculos posteriores.

Tabla 12-3: Valores característicos del maíz según la EN 1991-4:2011

Ángulo de rozamiento interno				Coeficiente de presiones laterales				Coeficiente de rozamiento con la pared tipo D4			
ϕ_{im}	a_ϕ	ϕ_{is}	ϕ_{ii}	k_m	a_k	k_s	k_i	μ	a_μ	μ_s	μ_i
31°	1.14	35.34°	27.19°	0.53	1.14	0.60	0.465	0.497	1.24	0.616	0.40

Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

3.2.2.3 Datos del material de fabricación del silo

Para las paredes del silo se utiliza planchas galvanizadas, cuyas dimensiones en el mercado nacional son 1220 x 2440 mm. Las propiedades mecánicas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 13-3: Valores de las propiedades del material

Calidad Estructural SS	% Max. Elemento	Fluencia YP Mínima	Resistencia Máxima-Mínima	Elongación Mínima
	GRADO	Mpa	Mpa	%
	33	230	310	20
	37	255	360	18
	40	275	380	16
	50	340	450	12

Fuente: (ACESCO, 2019)

3.2.2.4 Dimensionamiento del silo

Antes de iniciar el diseño de un silo es indispensable conocer los datos dimensionales que intervienen en los cálculos. De acuerdo a la EN-1991-4:2011, los datos más importantes para el cálculo son los mostrados en la figura siguiente.

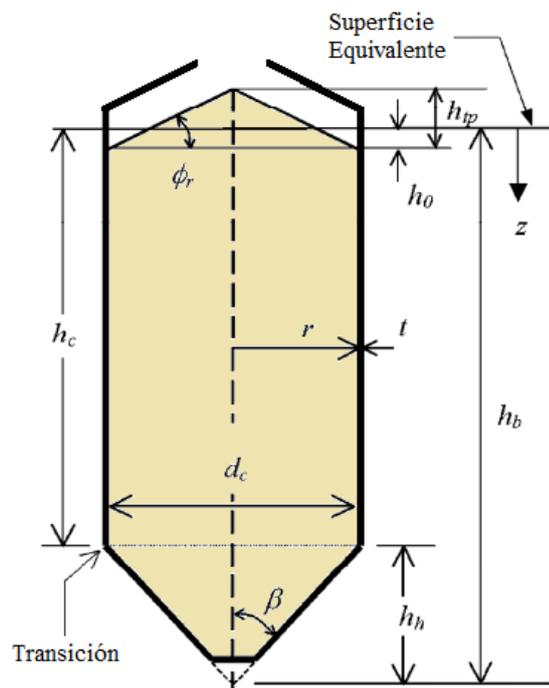


Figura 5-3: Dimensiones de un silo

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

Donde:

Tabla 14-3: Dimensiones necesarias para el diseño de un silo

Dimensión	Símbolo	Unidades
Capacidad de almacenamiento	C	m^3 – Ton
Diámetro interior del silo	d_c	mm - m
Altura desde la transición a la superficie equivalente	h_c	mm - m
Altura de la tolva considerando el vértice	h_h	mm - m
Altura desde el vértice de la tolva a la superficie equivalente	h_b	mm - m
Altura de talud natural	h_{tp}	mm - m
Profundidad medida de la superficie equivalente a la base del talud natural	h_o	mm - m
Ángulo de talud natural	ϕ_r	°
Ángulo de inclinación de la pared de la tolva respecto a la vertical	β	°

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

- **Capacidad de almacenamiento (V)**

Es el dato entregado por el cliente, a partir del cual se procede al dimensionamiento del silo. Es importante tener en cuenta las siguientes formulas:

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (3)$$

$$\gamma = \delta g \quad (4)$$

Donde:

- ✓ δ - densidad del material a ensilar $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- ✓ γ - peso específico del material $\left(\frac{N}{m^3}\right)$
- ✓ m - masa del material (kg)
- ✓ V - volumen (m^3)
- ✓ g - aceleración de la gravedad $\left(9.8 \frac{m}{s^2}\right)$

Para este caso de estudio considerando una capacidad de 100 toneladas y aplicando las ecuaciones 3 y 4, se tiene:

$$V = \frac{(100000 * 9.8 N) * m^3}{7000 N} = 142.86 m^3$$

- **Determinación del diámetro del silo (d_c)**

El diámetro del silo depende del espacio donde se va a instalar, de la esbeltez requerida por el cliente, pero sobre todo de la optimización del material al momento de construir. Para este caso, considerando la utilización de planchas galvanizadas de 1220x2440 mm, donde el traslape en plancha y plancha en cada anillo será de 45 mm se tiene que la longitud útil de plancha será 2395 mm, como se indica a continuación:

$$\text{longitud útil} = \text{largo de la plancha} - \text{traslape} \quad (5)$$

$$\text{longitud útil} = 2440 \text{ mm} - 45 \text{ mm}$$

$$\text{longitud útil} = 2395 \text{ mm}$$

De acuerdo al espacio disponible para la instalación se considera trabajar con 6 planchas para formar cada uno de los anillos de la estructura del silo, es así que para determinar el diámetro del silo se usa la ecuación 6.

$$d_c = \frac{\text{longitud útil} * \# \text{de planchas}}{\pi} \quad (6)$$

$$d_c = \frac{2395 \text{ mm} * 6}{\pi}$$

$$d_c = 4.57 \text{ m}$$

- **Selección del ángulo de inclinación de la pared de la tolva (β), el diámetro de ingreso al silo (d_i) y diámetro de descarga de la tolva (d_r)**

Para la selección se utiliza el catálogo (STORMOR-mfs, 2015), donde se recomienda un ángulo de inclinación de la tolva de 30° para garantizar un flujo másico, además un diámetro de ingreso de 914 mm y la salida de la tolva de 432 mm para que no se exista en la descarga, puede verificarse en Anexos.

- **Determinación de la altura de la tolva desde el vértice a la transición (h_h)**

Haciendo uso de la ecuación 7, se determina la altura h_h

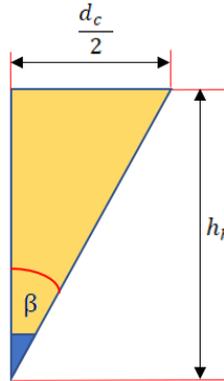


Figura 6-3: Dimensiones de la tolva

Realizado: Alex Chauca, 2020

$$h_h = \frac{d_c}{2 \tan \beta} \quad (7)$$

$$h_h = \frac{4570 \text{ mm}}{2 * \tan 30}$$

$$h_h = 3957 \text{ mm} = 3.957 \text{ m}$$

- **Determinación del volumen de la tolva (V_{tr})**

Previo a determinar el volumen, se halla el valor útil de la tolva, para ello se utiliza las ecuaciones 8 y 9.

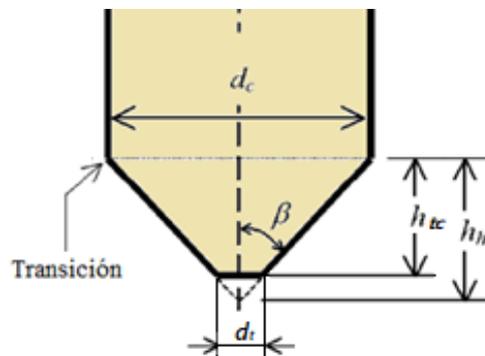


Figura 7-3: Dimensiones de la tolva para calcular su volumen

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

$$h_{tc} = \frac{(d_c - d_t)}{2 \tan \beta} \quad (8)$$

$$h_{tc} = \frac{(4570 - 432) \text{ mm}}{2 * \tan 30}$$

$$h_{tc} = 3583 \text{ mm}$$

$$h_{tc} = 3.58 \text{ m}$$

$$V_{tc} = \frac{\pi * h_{tc} * (d_c^2 + d_t^2 + d_c d_t)}{12} \quad (9)$$

$$V_{tc} = \frac{\pi * 3.58 \text{ m} * (4.57^2 + 0.432^2 + 4.57 * 0.432) \text{ m}^2}{12}$$

$$V_{tc} = 21.299 \text{ m}^3$$

- Determinación de la altura de talud natural (h_{tp})

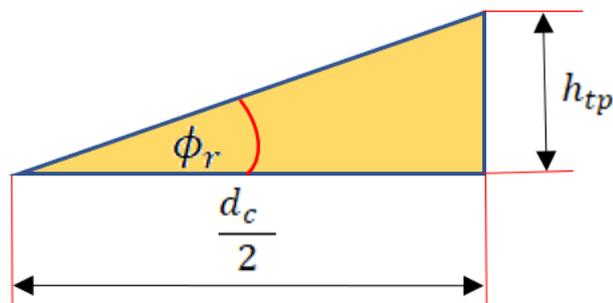


Figura 8-3: Dimensiones del talud natural

Realizado: Alex Chauca, 2020

$$h_{tp} = \frac{d_c * \tan \phi_r}{2} \quad (10)$$

$$h_{tp} = \frac{4570 \text{ mm} * \tan 35}{2}$$

$$h_{tp} = 1599 \text{ mm}$$

$$h_{tp} = 1.59 \text{ m}$$

- **Determinación de la profundidad de la superficie equivalente a la base del cono superior (h_o)**

Aplicando la norma (UNE-EN-1991-4, 2011), mediante la ecuación 11 se obtiene:

$$h_o = \frac{h_{tp}}{3} \quad (11)$$

$$h_o = \frac{1599 \text{ mm}}{3}$$

$$h_o = 533 \text{ mm}$$

$$h_o = 0.533 \text{ m}$$

- **Determinación del volumen generado por el talud natural (V_{tn})**

Considerando como un cono se determina el volumen, con la ecuación 12.

$$V_{tn} = \frac{\pi * h_{tp} * d_c^2}{12} \quad (12)$$

$$V_{tn} = \frac{\pi * 1.59 \text{ m} * (4.57 \text{ m})^2}{12}$$

$$V_{tn} = 8.693 \text{ m}^3$$

- **Cálculo del volumen de la parte cilíndrica del silo (V_c)**

Inicialmente se determina el volumen que contiene la parte cilíndrica del silo, despejando de la ecuación 13, conociendo el volumen de la tolva y del talud natural.

$$V = V_{tc} + V_c + V_{tn} \quad (13)$$

$$V_c = V - V_{tc} - V_{tn}$$

$$V_c = (142.857 - 21.299 - 8.693) \text{ m}^3$$

$$V_c = 112.865 \text{ m}^3$$

- **Cálculo de la altura del cilindro (h_r)**

Se sabe que el volumen del cilindro es:

$$V_c = \frac{\pi * d_c^2 * h_r}{4} \quad (14)$$

Despejando de la ecuación 14 se tiene:

$$h_r = \frac{4 * V_c}{\pi * d_c^2}$$

$$h_r = \frac{4 * 112.865 \text{ m}^3}{\pi * (4.57 \text{ m})^2}$$

$$h_r = 6.88 \text{ m}$$

- **Determinación de la altura desde la transición a la superficie equivalente (h_c)**

$$h_c = h_r + h_o \quad (15)$$

$$h_c = 6.88 \text{ m} + 0.533 \text{ m}$$

$$h_c = 7.413 \text{ m}$$

- **Determinación de la altura desde el vértice de la tolva a la superficie equivalente (h_b)**

$$h_b = h_c + h_h \quad (16)$$

$$h_b = 7.413 \text{ m} + 3.957 \text{ m}$$

$$h_b = 11.37 \text{ m}$$

Una vez cálculo las dimensiones del silo, se presenta un resumen de los valores calculados en la Tabla 15-3.

Tabla 15-3: Dimensiones del silo

Dimensión	Símbolo	Unidades
Capacidad de almacenamiento	C	142.86m ³
Diámetro interior del silo	d_c	4.57 m
Diámetro de la descarga del silo	d_t	0.43 m
Diámetro del ingreso al silo	d_i	0.91 m
Altura desde la transición a la superficie equivalente	h_c	7.41 m
Altura de la tolva considerando el vértice	h_h	3.95 m
Altura desde el vértice de la tolva a la superficie equivalente	h_b	11.37 m
Altura de talud natural	h_{tp}	1.59 m
Profundidad medida de la superficie equivalente a la base del talud natural	h_o	0.533 m
Ángulo de talud natural	ϕ_r	35 °
Ángulo de inclinación de la pared de la tolva respecto a la vertical	β	30 °

Realizado: Alex Chauca, 2020

3.2.2.5 Verificación del cumplimiento de las limitaciones dimensionales

Según la (UNE-EN-1991-4, 2011), para aplicar la norma se debe verificar que se cumpla siguientes limitaciones dimensionales, donde intervienen h_c y d_c .

$$\frac{h_c}{d_c} < 10 \quad (17)$$

$$h_c < 100 \text{ m} \quad (18)$$

$$d_c < 60 \text{ m} \quad (19)$$

Tabla 16-3: Verificación de limitaciones dimensionales del silo

Parámetro	Valor	Condición	Cumple la condición
h_c	7.41	$\frac{h_c}{d_c} < 10$	si
d_c	4.57	$h_c < 100 \text{ m}$	si
$\frac{h_c}{d_c}$	1.62	$d_c < 60 \text{ m}$	si

Realizado: Alex Chauca, 2020

3.2.2.6 Verificación del cumplimiento de las limitaciones relativas

Según la (UNE-EN-1991-4, 2011), establece que se debe cumplir las siguientes condiciones:

- El tamaño máximo de la partícula a almacenar es $\leq 0.03 d_c$
- El material almacenado fluye libremente

Para la verificación se sigue los pasos detallados a continuación.

- **Determinación del diámetro del material a ensilar**

El tamaño de grano se obtiene utilizando la Tabla B2 de la Norma Australiana Standard AS 3774-1996, mientras que los rangos de las propiedades típicas del material se escogen en la Tabla B1 de la misma norma. Ver anexos.

Para este caso se tiene un tamaño S3, que corresponde a un grano grueso < 12 mm.

Entonces se tiene:

$$\phi_{material} \leq 0.03 * d_c \quad (20)$$

$$0.012 \leq 0.03 * 4.57$$

$$0.012 \leq 0.137$$

✓ Se verifica que si cumple la condición.

- **Verificación del flujo del material de descarga**

Según (Estrual, 2017), para garantizar que el material fluya libremente, con la ecuación 7 se determina el valor de “m” y se verifica que condición cumple en la Tabla de Flujos de vaciado, que se encuentra en anexos.

$$m = \frac{\phi \text{ de salida de la tolva}}{\phi \text{ máximo de partícula almacenada}} \quad (21)$$

$$m = \frac{432 \text{ mm}}{12 \text{ mm}}$$

$$m = 36$$

Como $m \geq 5$ se garantiza tener un flujo de vaciado estable que no presentará problemas de formación de arcos o bóvedas.

- ✓ Por consiguiente, si cumple la condición.

3.2.2.7 Clasificación del silo

- **Por su excentricidad**

Se considera como excentricidad en el llenado cuando el cono del talud natural durante cualquier etapa del llenado no está centrado al eje vertical del silo, mientras que existe una excentricidad en la descarga cuando el eje de la tolva está instalada desfasada al eje vertical. Por ello, de existir excentricidad, se puede tener en el llenado e_t , en la descarga e_o , siendo e_f la máxima excentricidad en la punta de la superficie durante el llenado. (UNE-EN-1991-4, 2011)

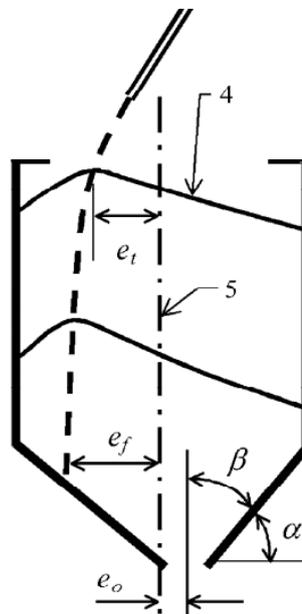


Figura 9-3: Excentricidades de un silo

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

- **Por su esbeltez**

La esbeltez de un silo depende de la relación $\frac{h_c}{d_c}$, pudiendo obtener un silo esbelto, esbeltez media, poco esbelto o tipo granero según el resultado.

- ✓ Para este caso, como la relación $\frac{h_c}{d_c} = 1.62$, se verifica en la Tabla 1-2 que esta cumple la condición $1 < \frac{h_c}{d_c} \leq 2$, por lo tanto, se tiene un SILO DE ESBELTEZ MEDIA

- **Por su Clase de Evaluación de Acciones (C.E.A)**

Es importante conocer la Clase de Evaluación de Acción (C.E.A) a la que corresponde el silo a diseñar, considerando su capacidad de almacenamiento y la excentricidad. Según la (UNE-EN-1991-4, 2011) la clase se puede determinar en la tabla 17-3.

Tabla 17-3: Clasificación recomendada para las clases de evaluación de silos

Clase de evaluación de acción	Descripción
Clase de evaluación de acción 3	Silos de capacidad mayor de 10 000 toneladas Silos de capacidad mayor de 10 000 toneladas en las que pueda producir cualquiera de las siguientes situaciones de cálculo. a) descarga excéntrica con $eo/d_c > 0,25$ b) silo poco esbelto con excentricidad en la superficie $eo/d_c > 0,25$
Clase de evaluación de acción 2	Todos los silos cubiertos por esta norma y que no tengan ubicación en otra clase
Clase de evaluación de acción 1	Silos con capacidad menor de 100 toneladas

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

- ✓ Para este caso, como el silo es excéntrico y tiene una capacidad de 100 toneladas, el silo es de Esbeltez media y de CLASE DE EVALUACIÓN DE ACCIÓN 2

3.2.2.8 Consideraciones de cálculo

Según la EN 1991-4-1, se debe tener en cuenta que:

- ✓ La relación de esbeltez conjuntamente con la C.E.A. determinan el procedimiento a seguir para la determinación de cargas que actúan en el silo.

Tabla 18-3: Coeficientes para las evaluaciones de diferentes cargas en paredes

Para pared vertical	Coeficiente de rozamiento con la pared μ	Coeficiente de presiones laterales K	Ángulo de rozamiento interno
Presión normal máxima en la pared vertical	$\mu_i = 0.401$	$K_s = 0.604$	$\phi_{ii} = 27.19$
Presión de tracción por rozamiento máxima en la pared vertical	$\mu_s = 0.617$	$K_s = 0.604$	$\phi_{ii} = 27.19$
Carga vertical máxima en la tolva o en el fondo del silo	$\mu_i = 0.401$	$K_i = 0.465$	$\phi_{is} = 35.34$

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

- ✓ Para maximizar las hipótesis de carga los valores característicos μ, k y ϕ de los materiales a almacenar para las diferentes fórmulas se consideran según la Tabla 3.1 de la Norma (UNE-EN-1991-4, 2011), misma que se encuentra en anexos.

3.2.2.9 Determinación de la carga simétrica de llenado sobre la pared vertical

Se procede de acuerdo al apartado 5.3.1 de la norma EN 1991-4-1

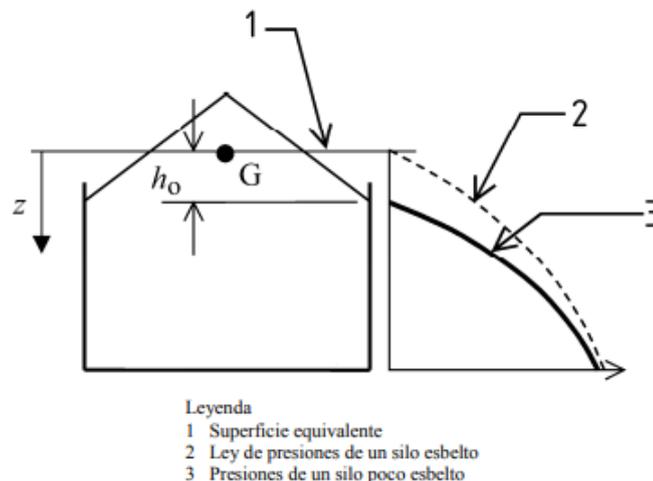


Figura 10-3: Presiones de llenado en un silo de esbeltez media

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

1. Cálculo del área de la sección circular del cilindro (A)

$$A = \frac{\pi (d_c)^2}{4} \quad (22)$$

$$A = \frac{\pi (4.57 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 16.403 \text{ m}^2$$

2. Cálculo del perímetro interior del silo (U)

$$U = \pi d_c \quad (23)$$

$$U = \pi (4.57 \text{ m})$$

$$U = 14.357 \text{ m}$$

3. Cálculo de la profundidad característica de Janssen (z_o)

$$z_o = \frac{A}{K \mu U} \quad (24)$$

En este punto, se debe tomar en cuenta los valores característicos de la Tabla 8-4 para encontrar los valores máximos para p_{hf} , p_{wf} y p_{vf}

$$p_{hf} \rightarrow z_o = \frac{A}{K_s \mu_i U} \rightarrow \frac{16.403 \text{ m}^2}{0.604 * 0.401 * 14.357 \text{ m}} = 4.712 \text{ m}$$

$$p_{wf} \rightarrow z_o = \frac{A}{K_s \mu_s U} \rightarrow \frac{16.403 \text{ m}^2}{0.604 * 0.617 * 14.357 \text{ m}} = 3.064 \text{ m}$$

$$p_{vf} \rightarrow z_o = \frac{A}{K_i \mu_i U} \rightarrow \frac{16.403 \text{ m}^2}{0.465 * 0.401 * 14.357 \text{ m}} = 6.123 \text{ m}$$

4. Cálculo del coeficiente n

$$n = -(1 + \tan\phi_r) \left(1 - \frac{h_o}{z_o}\right) \quad (25)$$

Se obtiene entonces:

$$p_{hf} \rightarrow n = -(1 + \tan\phi_r) \left(1 - \frac{h_o}{z_o}\right) = -(1 + \tan 35^\circ) \left(1 - \frac{0.533}{4.712}\right) = -1.508$$

$$p_{wf} \rightarrow n = -(1 + \tan\phi_r) \left(1 - \frac{h_o}{z_o}\right) = -(1 + \tan 35^\circ) \left(1 - \frac{0.533}{3.064}\right) = -1.404$$

$$p_{vf} \rightarrow n = -(1 + \tan\phi_r) \left(1 - \frac{h_o}{z_o}\right) = -(1 + \tan 35^\circ) \left(1 - \frac{0.533}{6.123}\right) = -1.552$$

5. Cálculo de la función $Y_R(z)$

$$Y_R = \left[1 - \left(\left(\frac{z-h_o}{z_o-h_o}\right) + 1\right)^n\right] \quad (26)$$

Se obtiene entonces:

$$p_{hf} \rightarrow Y_R = \left[1 - \left(\left(\frac{z-h_o}{z_o-h_o}\right) + 1\right)^n\right] = \left[1 - \left(\left(\frac{7.39-0.533}{4.712-0.533}\right) + 1\right)^{-1.508}\right] = 0.788$$

$$p_{wf} \rightarrow Y_R = \left[1 - \left(\left(\frac{z-h_o}{z_o-h_o}\right) + 1\right)^n\right] = \left[1 - \left(\left(\frac{7.39-0.533}{3.064-0.533}\right) + 1\right)^{-1.404}\right] = 0.856$$

$$p_{vf} \rightarrow Y_R = \left[1 - \left(\left(\frac{z-h_o}{z_o-h_o}\right) + 1\right)^n\right] = \left[1 - \left(\left(\frac{7.39-0.533}{6.123-0.533}\right) + 1\right)^{-1.552}\right] = 0.733$$

6. Cálculo de la presión horizontal asintótica p_{ho} debido al grano ensilado

$$p_{ho} = \gamma K z_o = \frac{\gamma A}{\mu U} \quad (27)$$

Se obtiene entonces:

$$p_{hf} \rightarrow p_{ho} = \gamma_u K_s z_o = 8 * 0.604 * 4.712 = 22.768 \frac{kN}{m^2}$$

$$p_{wf} \rightarrow p_{ho} = \gamma_u K_s z_o = 8 * 0.604 * 3.064 = 14.805 \frac{kN}{m^2}$$

$$p_{vf} \rightarrow p_{ho} = \gamma_u K_i z_o = 8 * 0.465 * 6.123 = 22.778 \frac{kN}{m^2}$$

7. Cálculo de la presión horizontal después del llenado p_{hf}

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R \quad (28)$$

Se obtiene entonces:

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R(Z) = (22.768 * 0.788)$$

$$p_{hf} = 17.941 \frac{kN}{m^2}$$

8. Cálculo de la presión por rozamiento en la pared después del llenado p_{wf}

$$p_{wf} = \mu p_{hf} \quad (29)$$

$$p_{wf} = \mu_s p_{ho} Y_R(z) = (0.617 * 14.805 * 0.856)$$

$$p_{wf} = 7.82 \frac{kN}{m^2}$$

9. Cálculo de la presión vertical después del llenado p_{vf} a cualquier profundidad

- Previamente se determina el valor de z_v con la siguiente ecuación.

$$z_v = h_o - \frac{1}{(n+1)} \left(z_o - h_o - \frac{(z + z_o - 2h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n} \right) \quad (30)$$

$$z_v = 0.533 - \frac{1}{(-1.552 + 1)} \left(6.123 - 0.533 - \frac{(7.39 + 6.123 - 2 * 0.533)^{-1.552+1}}{(6.123 - 0.533)^{-1.552}} \right)$$

$$z_v = 4.149$$

- A continuación, se determina p_{vf}

$$p_{vf} = \gamma z_v \quad (31)$$

$$p_{vf} = 8 * 4.149$$

$$p_{vf} = 33.192 \frac{kN}{m^2}$$

10. Cálculo de la tensión vertical resultante n_{zSk} en la pared por unidad de longitud del perímetro

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu_s p_{ho}(z - z_v) \quad (32)$$

$$n_{zSk} = 0.617 * 14.805 (7.39 - 4.149)$$

$$n_{zSk} = 29.61 \frac{kN}{m}$$

Se puede interpretar como una fuerza de compresión a una profundidad z que se requiera.

3.2.2.10 Determinación de la carga simétrica de descarga sobre la pared vertical

Según el apartado 5.3.2.1 de la EN-1991-4-1, para un silo de esbeltez media y considerado como C.E.A 2, se debe calcular la presión de tracción por rozamiento p_{we} y la presión horizontal durante la descarga p_{he} , para ello se sigue el siguiente procedimiento.

1. Cálculo del coeficiente de corrección de la esbeltez C_s

$$C_s = \frac{h_c}{d_c} - 1 \quad (33)$$

$$C_s = \frac{7.69}{4.57} - 1 = 0.617$$

2. Cálculo de los coeficientes de mayoración de cargas C_h y C_w

$$C_h = 1 + 0.15 C_s \quad (34)$$

$$C_h = 1 + 0.15 (0.6217) = 1.093$$

$$C_w = 1 + 0.1 C_s \quad (35)$$

$$C_w = 1 + 0.1 (0.617) = 1.062$$

3. Cálculo de la presión horizontal durante la descarga p_{he}

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (36)$$

$$p_{he} = 1.093 * 17.941$$

$$p_{he} = 19.61 \frac{kN}{m^2}$$

4. Cálculo de la presión de tracción por rozamiento en la pared durante la descarga p_{we}

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (37)$$

$$p_{we} = 1.062 * 7.82$$

$$p_{we} = 8.305 \frac{kN}{m^2}$$

5. A continuación, se determina la tensión vertical resultante n_{zSk} (compresión)

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{we}(z) dz = C_w \mu p_{ho}(z - z_v) \quad (38)$$

$$n_{zSk} = 1.062 * 0.617 * 14.805(7.39 - 4.149)$$

$$n_{zSk} = 31.44 \frac{kN}{m}$$

3.2.2.11 Cargas sobre Tolvas

- **Propiedades físicas**

Se determina el tipo de la tolva, utilizando la ecuación 51 y considerando el coeficiente de rozamiento inferior μ_h y coeficiente de presiones laterales inferior k de la Tabla 8-4. según la (UNE-EN-1991-4, 2011).

$$\tan \beta < \frac{1-k}{2 \mu_h} \quad (39)$$

$$\tan 30 < \frac{1 - 0.465}{2 * 0.401}$$

$$0.577 < 0.667$$

✓ Como cumple la condición, se determina que la tolva es AGUDA.

- **Reglas generales**

Para determinar las presiones en las paredes de la tolva, se aplicará el método de referencia, según el apartado 6.1.2 de la (UNE-EN-1991-4, 2011).

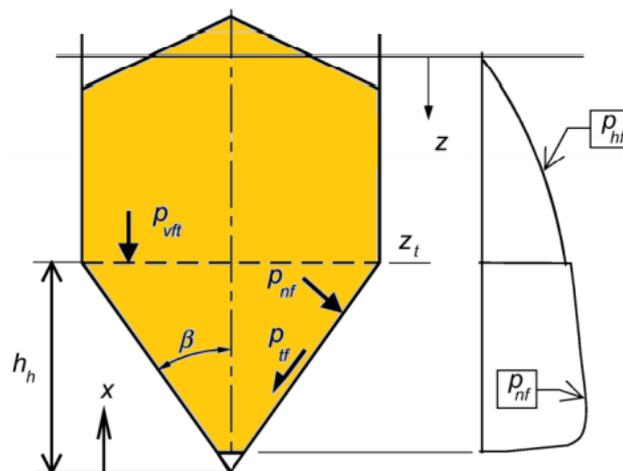


Figura 11-3: Distribución de presiones de llenado sobre una tolva aguda

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

1. Cálculo de la presión vertical media en la transición del silo p_{vft}

$$p_{vft} = C_b p_{vf} \quad (40)$$

Donde:

$$\checkmark p_{vf} = 33.192 \frac{kN}{m^2} \text{ calculado anteriormente}$$

$$\checkmark C_b = 1 \text{ por ser un silo C.E.A 2 (ítem 3 del apartado 6.1.2)}$$

Se tiene entonces:

$$p_{vft} = 1 * 33.192$$

$$p_{vft} = 33.192 \frac{kN}{m^2}$$

- **Cargas de llenado**

1. Cálculo del coeficiente de presiones en la tolva $F = F_f$

$$F_f = 1 - \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_h}\right)} \quad (41)$$

Donde, b es un coeficiente empírico $b = 0.2$

$$F_f = 1 - \frac{0.2}{\left(1 + \frac{\tan 30}{0.401}\right)}$$

$$F_f = 0.918$$

2. Determinación de parámetros calculados anteriormente

$$n = S (F \mu_{heff} \cot \beta + F) - 2 \quad (42)$$

$$\checkmark \text{ Como } \mu_{heff} = \mu_h = 0.401 \text{ y } S = 2 \text{ para tolvas cónicas}$$

$$n = 2 (0.918 * 0.401 * \cot 30 + 0.918) - 2$$

$$n = 1.11$$

3. Cálculo de la tensión vertical media en el sólido a una altura x sobre el vértice de la tolva

$$p_v = \left(\frac{\gamma h_h}{n-1}\right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h}\right) - \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \quad (43)$$

✓ Como se conoce que $h_h = 3.957 \text{ m}$ y $\gamma = 8$, se tiene:

$$p_v = \left(\frac{8 * 3.957}{1.11 - 1}\right) \left\{ \left(\frac{x}{3.957}\right) - \left(\frac{x}{3.957}\right)^{1.11} \right\} + 33.192 \left(\frac{x}{3.957}\right)^{1.11}$$

$$p_v = (287.78) \left\{ \left(\frac{x}{3.957}\right) - \left(\frac{x}{3.957}\right)^{1.11} \right\} + 33.192 \left(\frac{x}{3.957}\right)^{1.11}$$

Se realiza una tabla de cálculo y se obtiene los resultados expuestos en la tabla 9-4.

4. Cálculo en cualquier punto x de la presión normal p_{nf} y la presión de tracción por rozamiento p_{tf} durante el llenado

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (44)$$

$$p_{tf} = \mu_h F_f p_v \quad (45)$$

Los resultados se muestran en la Tabla 19-3.

Tabla 19-3: Presiones de llenado sobre la tolva

$x \text{ (m)}$	$p_v \left(\frac{kN}{m^2}\right)$	$p_{nf} \left(\frac{kN}{m^2}\right)$	$p_{tf} \left(\frac{kN}{m^2}\right)$
0	0.00	0.00	0.00
0.5	10.74	9.86	3.95
1	17.42	15.99	6.41
1.5	22.35	20.52	8.23
2	26.08	23.94	9.60
2.5	28.89	26.52	10.64
3	30.95	28.42	11.39
3.5	32.38	29.72	11.92
3.957	33.19	30.47	12.22

Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

- Cargas de descarga

1. Cálculo de ϕ_{wh}

$$\phi_{wh} = \text{Tan}^{-1} \mu_h \quad (46)$$

$$\phi_{wh} = \text{Tan}^{-1} 0.401$$

$$\phi_{wh} = 21.85^\circ$$

2. Cálculo de ε

$$\varepsilon = \phi_{wh} + \text{Sen}^{-1} \left\{ \frac{\text{Sen } \phi_{wh}}{\text{Sen } \phi_1} \right\} \quad (47)$$

$$\varepsilon = 21.85 + \text{Sen}^{-1} \left\{ \frac{\text{Sen } 21.85}{\text{Sen } 35} \right\}$$

$$\varepsilon = 62.31^\circ$$

3. Se determina el parámetro $F = F_e$

$$F_e = \frac{1 + \text{Sen } \phi_1 \text{Cos } \varepsilon}{1 - \text{Sen } \phi_1 \text{Cos } (2\beta + \varepsilon)} \quad (48)$$

$$F_e = \frac{1 + \text{Sen } 35^\circ \text{Cos } 62.31^\circ}{1 - \text{Sen } 35^\circ \text{Cos } (2 * 30 + 62.31^\circ)}$$

$$F_e = 2.88$$

4. Cálculo en cualquier punto x durante la descarga de la presión normal p_{ne} y la presión de tracción por rozamiento p_{te}

$$p_{ne} = F_e p_v \quad (49)$$

$$p_{te} = \mu_h F_e p_v \quad (50)$$

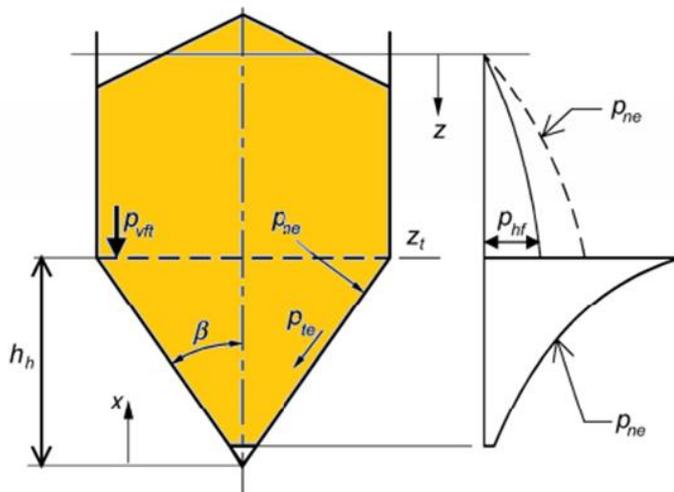


Figura 12-3: Distribución de presiones de llenado sobre una tolva aguda

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

Usando los valores de la tabla 9-4, reemplazando en la ecuación 61 y 62, se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 20-3: Presiones de descarga sobre la tolva

x (m)	$p_v \left(\frac{kN}{m^2} \right)$	$p_{ne} \left(\frac{kN}{m^2} \right)$	$p_{te} \left(\frac{kN}{m^2} \right)$
0.5	3.95	11.39	4.57
1	6.41	18.47	7.41
1.5	8.23	23.69	9.50
2	9.60	27.65	11.09
2.5	10.64	30.63	12.28
3	11.39	32.82	13.16
3.5	11.92	34.33	13.76
3.957	12.22	35.19	14.11

Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

3.2.2.12 Carga sísmica (según la norma NEC 2014)

- Cálculo del espectro de diseño en aceleración S_a

Se sigue el siguiente procedimiento, según el apartado 3.3 de la NEC

1. Determinación del periodo de vibración T

$$T = C_t h_n^\alpha \quad (51)$$

- ✓ Para estructuras de acero con arriostramientos, $C_t = 0,073$ y $\alpha = 0,75$
- ✓ h_n = altura máxima de la edificación, medida desde la base de la estructura, en metros.

$$h_n = 13.84 \text{ m}$$

$$T = (0,073) * 13.84^{0.75}$$

$$T = 0.52 \text{ s}$$

2. *Determinación del periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico – T_c*

Según el apartado 3.3 de la (NEC, 2014), se determina $Z = 0.4$ y el tipo de perfil C respectivamente, con la intersección de estos valores de halla F_a , F_d y F_s

$$F_a = 1.2$$

$$F_d = 1.11$$

$$F_s = 1.11$$

Reemplazando en la ecuación 64 se obtiene:

$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (52)$$

$$T_c = 0.55 * 1.11 * \frac{1.11}{1.2}$$

$$T_c = 0.56$$

3. *Espectro elástico de diseño en aceleraciones (S_a)*

Como $0 \leq T \leq T_c$

Entonces

$$S_a = \eta Z F_a \quad (53)$$

$\eta = 2.8$ (para provincias de la Sierra)

$$S_a = 2.8 * 0.4 * 1.2$$

$$S_a = 1.34$$

- **Determinación del factor de importancia I**

Según el apartado 4.1 de la (NEC, 2014), el valor del factor I es 1.

- **Determinación del factor de reducción de resistencia sísmica R**

Según el apartado 6.3.4 en la (NEC, 2014), para depósitos soportadas mediante columnas o soportes arriostrados o no arriostrados se considera el valor del factor R igual a 2.

- **Determinación coeficiente de configuración en planta Φ_p y elevación Φ_E**

Según el apartado 5.2.3 de la (NEC, 2014), se considera como regular en planta y en elevación, puesto que la estructura no se enmarca en los tipos de irregularidades contempladas en las tablas correspondiente de la Norma.

$$\Phi_p = 1$$

$$\Phi_E = 1$$

- **Determinación de la cortante basal (V)**

La cortante basal es la carga que se aplica al silo para analizar el comportamiento de la estructura ante la acción de sismo.

$$V = \frac{I S_a}{R \Phi_p \Phi_E} W \quad (54)$$

$$V = \frac{(1)(1,344)}{(2)(1)(1)} W$$

$$V = 0.672 * W$$

- ✓ La carga sísmica reactiva W, se define según el apartado 6.1.7 de la (NEC, 2014)

La distribución vertical de fuerzas sísmicas laterales se establece según indica el apartado 6.3.5 de la (NEC, 2014), donde:

$$Cv_x = \frac{m_x (h_x)^k}{\sum_i^n [m_i (h_i)^k]} \quad (55)$$

$$F_x = Cv_x * V \quad (56)$$

Donde:

- ✓ V es la cortante basal total en la base de la estructura
- ✓ m_x es el peso asignado al piso o nivel x
- ✓ m_i es el peso asignado al piso o nivel i
- ✓ h_x es la altura del peso x de la estructura
- ✓ h_i es la altura del peso i de la estructura
- ✓ K es el coeficiente que depende del periodo de vibración de la estructura T

Como $0 \leq T \leq T_c$, entonces $k = 0.75 + 0.5 T$

$$k = 0.75 + (0.5 * 0.52)$$

$$k = 1.01$$

- **SIN CARGA**

$$W = 4876.88 \text{ Kg}$$

$$V = 0.672 * 4876.88 \text{ Kg} = 3277.26 \text{ Kg}$$

$$V = 3277.26 \text{ Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 32117.15 \text{ N}$$

Tabla 21-3: Carga sísmica que actúa en el silo sin carga

h_x (m)	m_x (Kg)	$m_x * h_x^k$	Cv_x	V (N)	F_x (N)
3	853.62	2589.14903	0.06472715	32117.15	2078.8516
6	1471.63	8989.41428	0.22472989		7217.68351
9	1139.37	10482.1342	0.26204698		8416.20206
12	1114.99	13716.5228	0.34290473		11013.1225
13.84	297.27	4223.7532	0.10559126		3391.29034
	4876.88	40000.9735	1		32117.15

Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

• **CON CARGA**

Según el apartado 6.1.7 de la norma NEC 2014, indica que la carga sísmica $W = D + 0.25 L_i$

Donde:

- ✓ W es la carga muerta total de la estructura
- ✓ L_i es la carga viva del piso i

$$W = 4876.88 \text{ Kg}$$

$$W_2 = W + 0.25(100000 \text{ Kg}) = 29876.88 \text{ kg}$$

$$V = 0.672 * 29876.88 \text{ Kg} = 20077.26 \text{ Kg}$$

$$V = 20077.26 \text{ Kg} * 9.8 \frac{m}{s^2} = 196757.18 \text{ N}$$

Tabla 22-3: Carga sísmica que actúa en el silo con carga

h_x (m)	m_x (Kg)	$m_x * h_x^k$	Cv_x	V (N)	F_x (N)
3	1951.62	5919.5368	0.0230773	196757.18	4540.6186
6	9727.63	59420.979	0.2316522		45579.242
9	10723.37	98654.347	0.3846032		75673.448
12	7176.99	88290.789	0.344201		67724.015
13.84	297.27	4223.7532	0.0164663		3239.8569
	29876.88	256509.41	1		196757.18

Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

3.2.2.13 Cálculo de la carga de viento según la Norma ASCE 7 -10

- **Velocidad básica de viento, V – Basic Wind Speed**

Se considera el lugar donde será instalado el silo, 80 Km/h.

- **Factor de dirección del viento, k_d - Wind Directionally Factor**

Se debe considerar la tabla 26.6-1 de la ASCE, mostrada a continuación. Este factor solo se aplicará cuando se utilice junto con las combinaciones de carga especificadas en el ítem 3.2.2.14

Tabla 23-3: Tabla con valores del factor de dirección de viento

Tipo de estructura	Factor Direccional k_d*
Edificios	
Sistema Principal Resistente a Cargas de Viento	0.85
Componentes y Revestimientos	0.85
Techo Arqueado	0.85
Chimeneas, Tanques y estructuras simultáneas	
Cuadrado	0.9
Hexagonal	0.95
Redondeado	0.95
Paredes Independientes y sólidas	0.85
Letreros independientes y adjuntos	
Signos abiertos y pórticos entramado	0.85
Torres atadas	
Triangular, cuadrada, rectangular	0.85
Todas las demás secciones	0.95

Fuente: (ASCE-7, 2010)

Para el estudio de caso se considera $k_d = 0.95$

- **Categoría de Exposición – Exposure Category**

Busca categorizar los espacios tomando en cuenta la topografía natural del terreno, la vegetación y las construcciones en el sector, para el análisis de la dirección del viento hay que considerar la superficie del terreno donde se va a construir, por ello para este caso de investigación se toma como:

- ✓ **Superficie C:** Áreas abiertas con construcciones dispersas con alturas menores a 9.1 m. Incluye terrenos de campo abierto y pastizales (ASCE-7, 2010).

- **Efectos Topográficos, k_{zt} – Topographic Effects**

A consecuencia de la topografía se da una sobre aceleración del viento, pero esto ocurre cuando en el terreno hay colinas o crestas (ASCE-7, 2010). Para este caso de estudio se considera un terreno estable, por lo tanto, según el apartado 26.8.2 de la ASCE 7-10, se tiene:

$$k_{zt} = 1$$

- **Factor de Efecto de Ráfaga – Gust-Effect Factor**

Según la ASCE 7-10, se considera tomar el factor de efecto de ráfaga para edificaciones rígidas u otras estructuras con un valor de 0.85

- **Coefficiente de Presión Interna – Internal Pressure Coefficient**

Tabla 24-3: Coeficientes de presión interna

Clasificación de Recinto	GC_{pi}
Edificios abiertos	0.00
Edificios parcialmente cerrados	+0.55 -0.55
Edificios cerrados	+0.18 -0.18

Fuente: (ASCE-7, 2010)

Depende de la clasificación de recinto. Los coeficientes de presión interna son ± 0.18 , según la ASCE, considerando al silo como un edificio cerrado.

Los coeficientes calculados en este apartado serán utilizados para el análisis de la carga de viento en SAP 2000.

3.2.2.14 Cálculo de la soportería utilizando SAP 2000

El cálculo de los soportes se determina con la ayuda del software SAP 2000, donde se importa el modelo generado en AutoCAD para ingresar las cargas correspondientes a la presión interna, carga muerta, carga viva, carga de viento y sismo calculada anteriormente; mediante un análisis bajo el método LRFD que permitirá determinar el estado de máxima carga de las diferentes combinaciones.

El número y perfil de las columnas se determina del catálogo de construcción de silos (STORMOR-mfs, 2015), de acuerdo al diámetro y a la capacidad de almacenamiento, siendo para este caso 15 soportes tipo omega con arriostramientos. Inicialmente se importa a SAP2000 la geometría generada en AutoCAD, como se muestra en la siguiente figura.

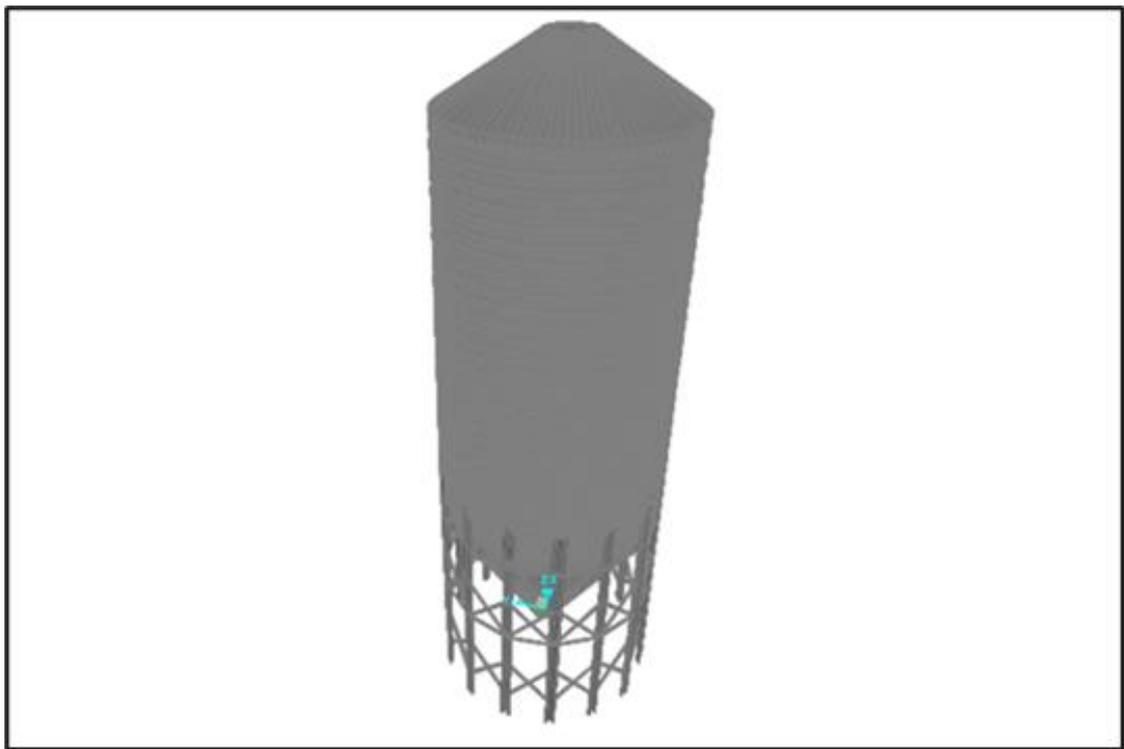


Figura 13-3: Elemento importado desde AutoCAD a SAP 2000

Realizado: Alex Chauca, 2020

Para ingresar los datos de p_{he} calculados anteriormente, se linealiza la curva del perfil de presión. Fraccionándola en 3 partes debido a que SAP 2000 solo admite perfiles de carga lineal.



Figura 14-3: Perfil de presión horizontal linealizado

Realizado: Alex Chauca, 2020

Todas las cargas calculadas tanto para la parte cilíndrica como para la tolva son ingresadas a SAP 2000 para el respectivo análisis, como se muestra en la figura 14-4.

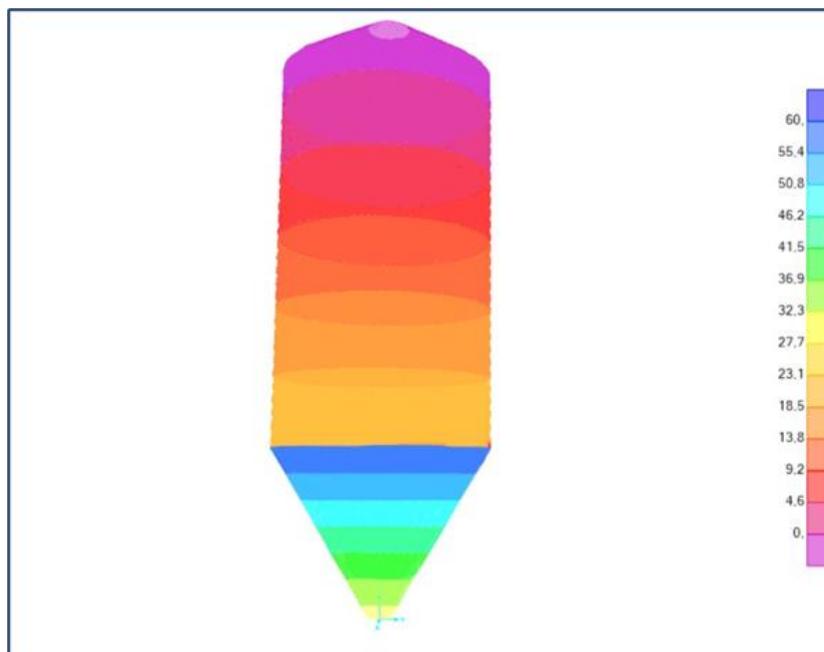


Figura 15-3: Presiones cargadas al silo debido al grano almacenado

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

Se ingresa la carga de viento, considerando los coeficientes determinados en el apartado 3.2.2.13 de este trabajo, según la (ASCE-7, 2010)

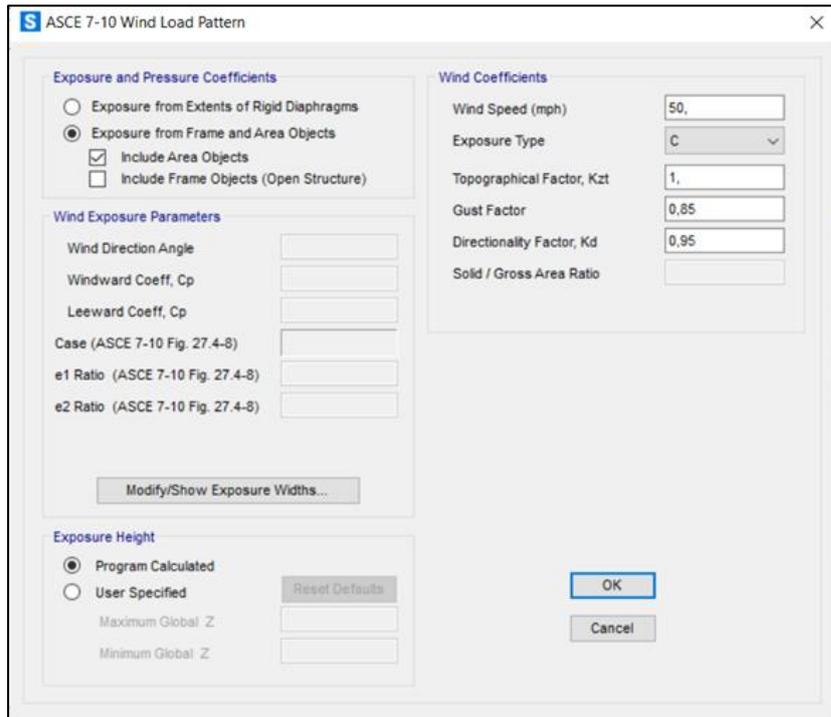


Figura 16-3: Cargas de viento según ASCE 7-10

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

Se ingresa la carga de sismo, considerando el método de Cortante Basal e ingresando los factores C y K calculados en el inciso 3.2.2.12 de este trabajo y se muestran en la figura 17-3.

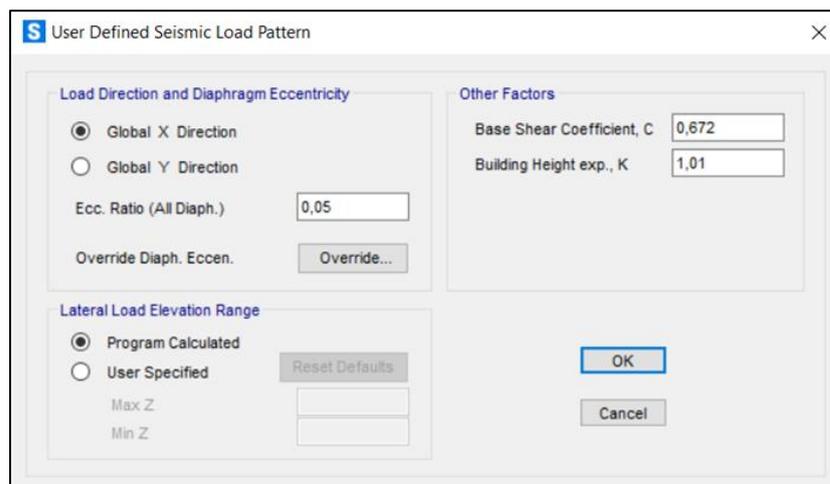


Figura 17-3: Carga de sismo – Cortante Basal

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

Según la (ASCE-7, 2010), para la Carga Viva debido a trabajos de mantenimiento se considera $20 \frac{kN}{m^2}$ que es distribuida en el techo del silo, además indica que las estructuras

deben diseñarse de manera que su resistencia de diseño iguale o exceda los efectos de las cargas factorizadas en las siguientes combinaciones analizadas por el método LRFD.

- ✓ Combo1: $1,4D$
- ✓ Combo2: $1,2D + 1,6Pg + 0,5 L$
- ✓ Combo3: $1,2D + 1,6L + 0,8W$
- ✓ Combo4: $1,2D + 1,6W + 0,5L$
- ✓ Combo5: $1,2D + Q$
- ✓ Combo6: $0,9D + 1,6W + 1,6P$
- ✓ Combo7: $0,9D + Q + 1,6P$

Para los arriostramientos se usa perfiles L50X3, la plancha del silo de 3mm está considerada como elementos Shell, tipo membrana para que las fuerzas se transfieran a los elementos estructurales a analizar. En la figura 18-3, se muestra la capacidad a la que actúa cada elemento, es decir mientras menor valor tienen es mejor.

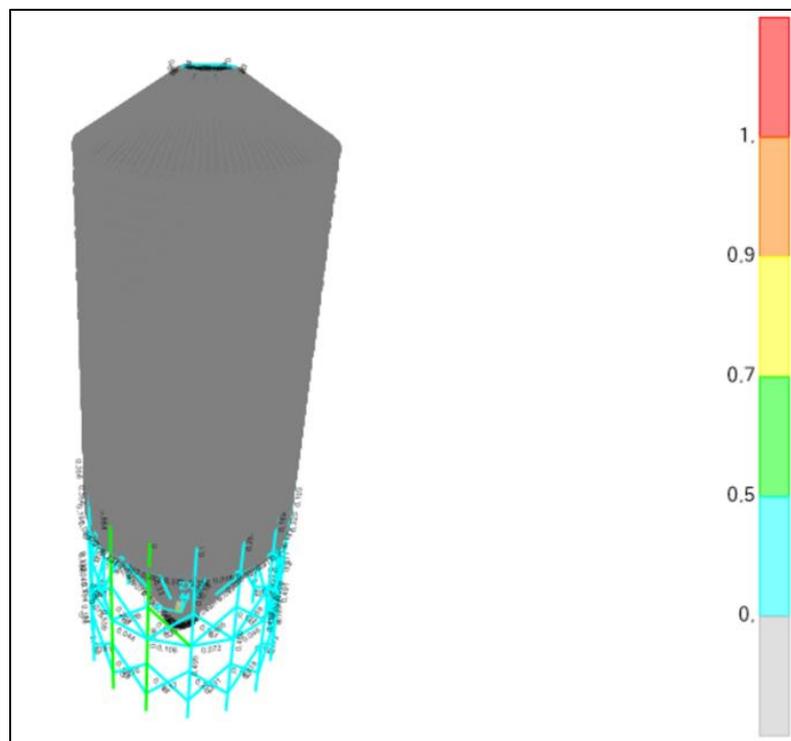


Figura 18-3: Análisis de los elementos estructurales del silo

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

De la figura anterior se muestra que la columna es el elemento crítico por lo que se debe verificar ese elemento manualmente según la (ANSI/AISC-360, 2010), la combinación crítica es el Combo 3.

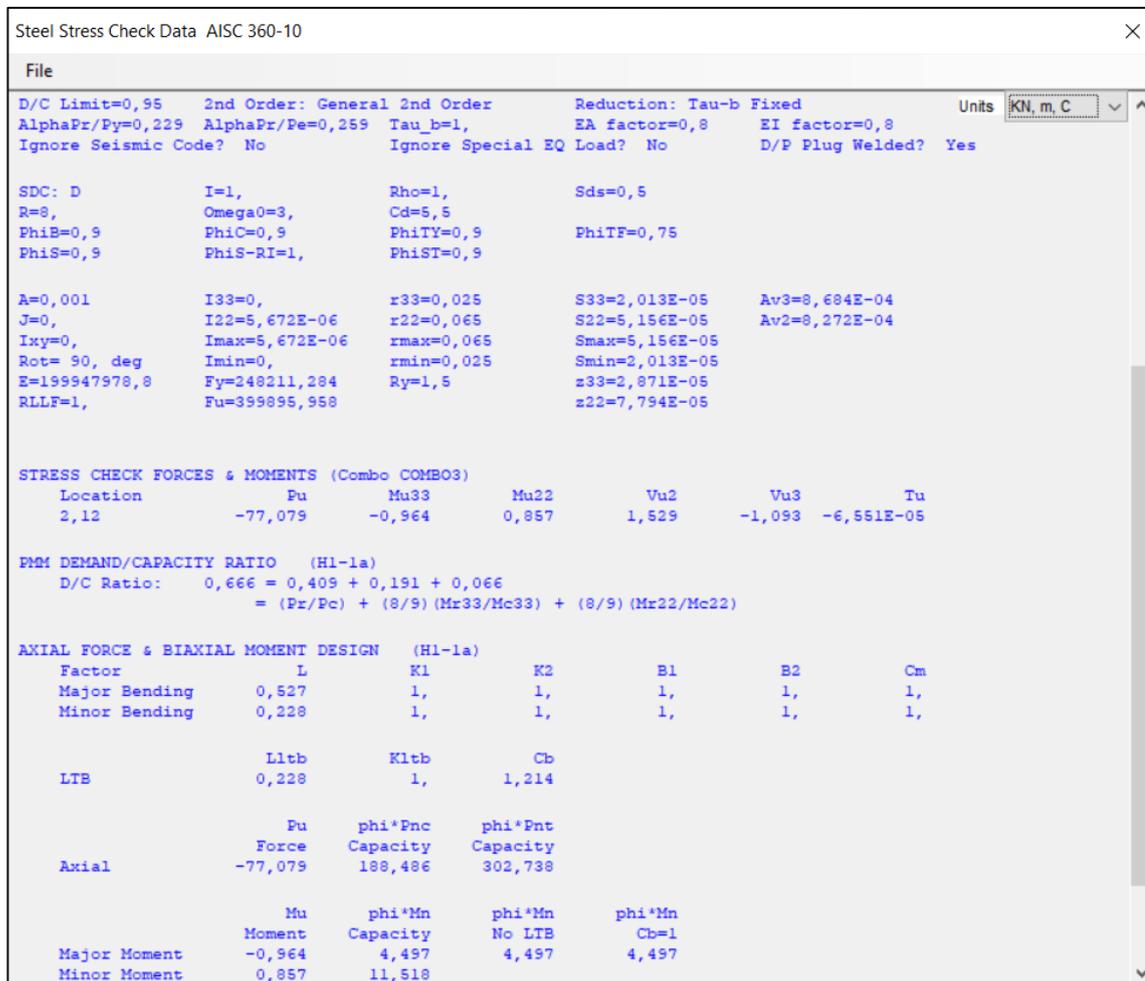


Figura 19-3: Resultado de resistencia de columnas

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

Mediante SAP 2000, se determina el valor $D/C = 0.666$, con lo que se verifica que la columna resiste la carga.

3.2.2.15 Comprobación manual de la soportería aplicando la AISC 360

Se determina las propiedades del perfil de la columna mediante SAP 2000, como se muestra en la figura 20-3.

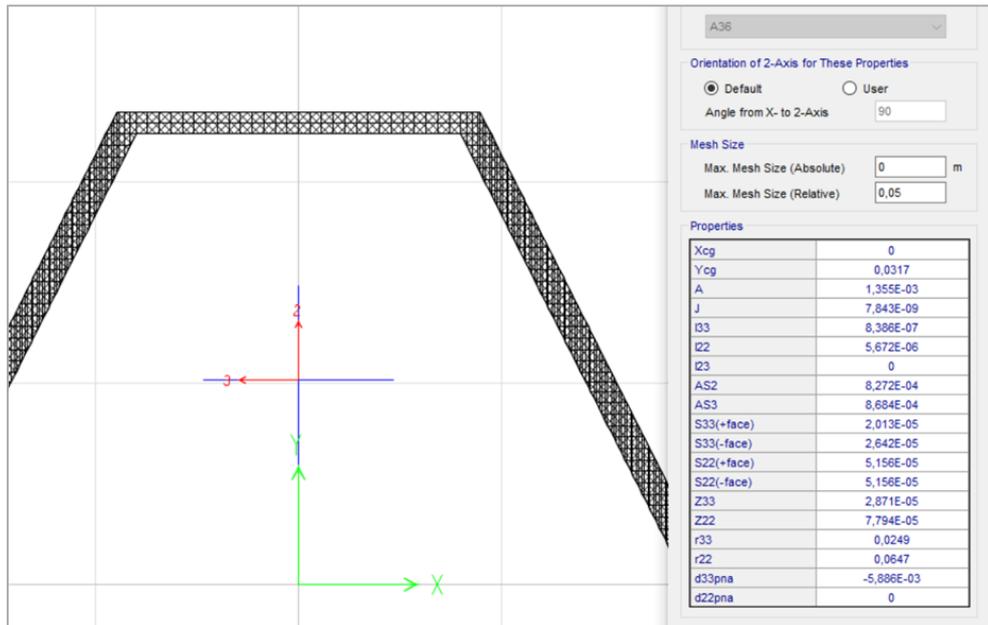


Figura 20-3: Propiedades del perfil de la columna

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

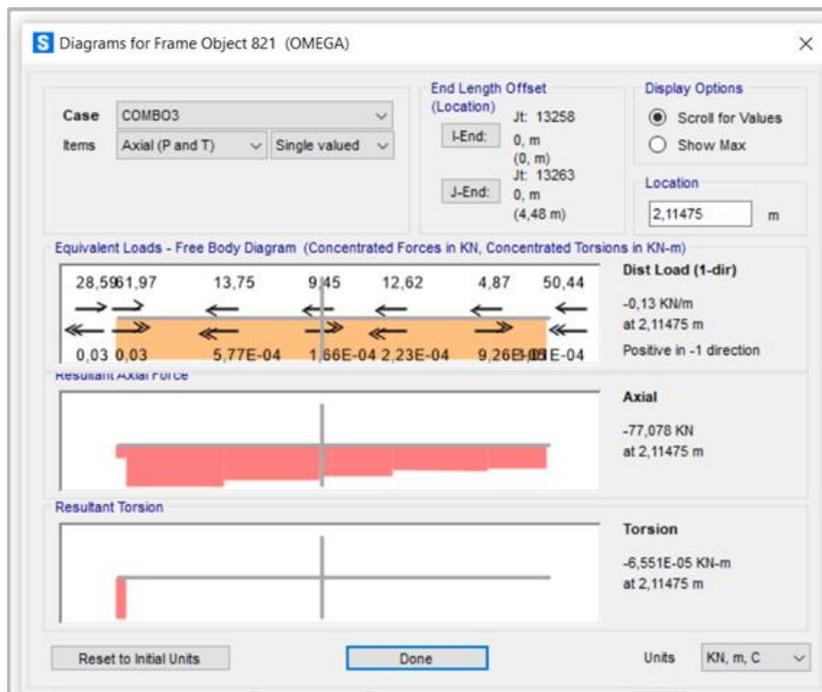


Figura 21-3: Carga a compresión

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

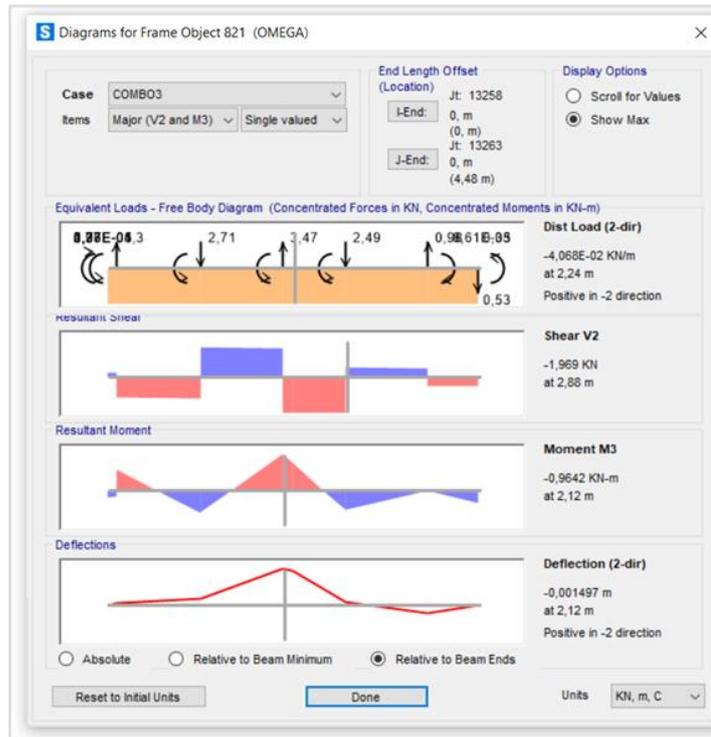


Figura 22-3: Diagrama de momento M3 de la columna

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

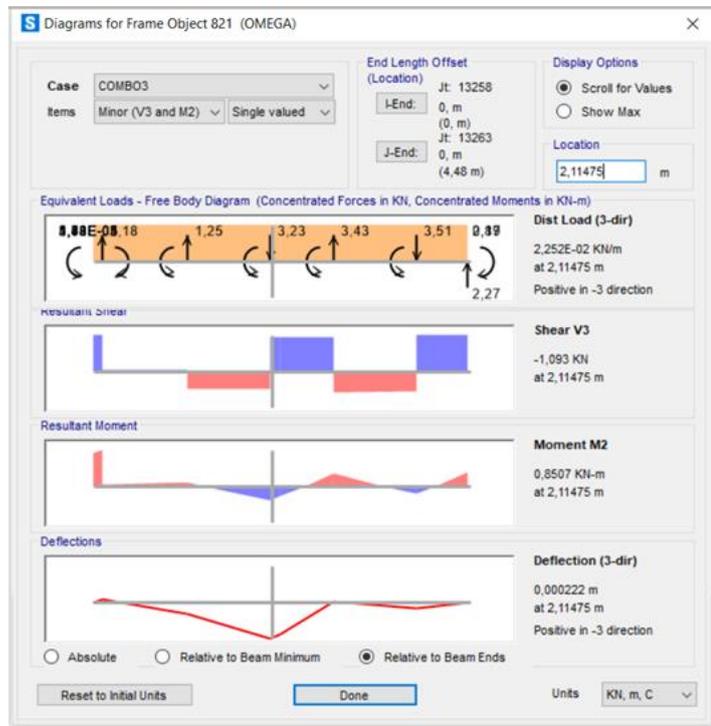


Figura 23-3: Diagrama de momento M2 de la columna

Realizado: Alex Chauca, captura de pantalla del software SAP 2000

3.2.2.16 Resistencia a la compresión

Tomando en cuenta las dimensiones del perfil, según se indica en la figura 20-4, se establece la esbeltez del mismo, comparando la razón ancho espesor $\left(\frac{b}{t}\right)$ y razón límite ancho – espesor (λ_r), donde si $\frac{b}{t} > \lambda_r$ la sección se considera esbelta, caso contrario será no esbelta.

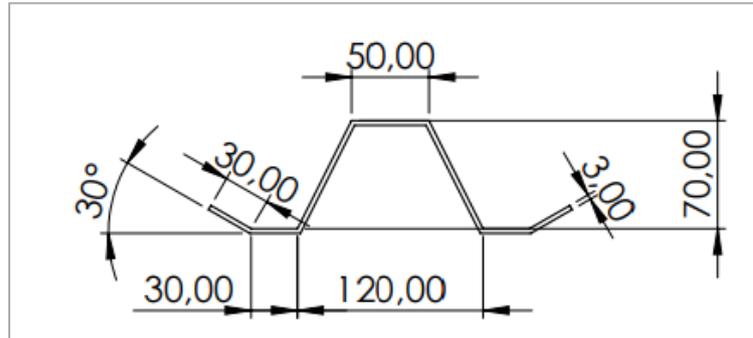


Figura 24-3: Dimensiones del perfil de la columna

Realizado: Alex Chauca, 2000

Considerando como un elementos no rigidizado, de acuerdo a la Tabla B4.1a de la Norma (ANSI/AISC-360, 2010) se contempla como el caso 3.

Se tiene entonces:

$$\frac{b}{t} = \frac{30}{3} = 10 \quad (57)$$

$$\lambda_r = 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (58)$$

$$\lambda_r = 0.45 \sqrt{\frac{210\,000}{245}} = 13.175$$

Como $\frac{b}{t} < \lambda_r$, la sección es NO ESBELTA.

Considerando como un elementos rigidizado, de acuerdo a la Tabla B4.1a de la Norma (ANSI/AISC-360, 2010) se contempla como el caso 5, comparando la razón ancho

espesor $\left(\frac{h}{t}\right)$ y razón límite ancho – espesor (λ_r) , donde si $\frac{h}{t} > \lambda_r$ la sección se considera esbelta, caso contrario será no esbelta.

Se tiene entonces:

$$\frac{h}{t} = \frac{70}{3} = 23.333 \quad (59)$$

$$\lambda_r = 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (60)$$

$$\lambda_r = 1.49 \sqrt{\frac{210\,000}{245}} = 43.623$$

Como $\frac{h}{t} < \lambda_r$, la sección es NO ESBELTA.

Una vez conocida que la sección es NO ESBELTA, usando la Tabla Nota E1.1 de la (ANSI/AISC-360, 2010), se determina los posibles casos de falla del perfil a compresión, el cual es “FB = Pandeo por flexión”.

La resistencia de compresión nominal (P_n) , en base al estado límite “FB” es:

$$P_n = F_{cr} * A_g \quad (61)$$

La Fuerza crítica (F_{cr}) , se determina con la siguiente ecuación, dependiendo la condición que se cumpla.

$$\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{entonces} \quad F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] * F_y \quad (62)$$

$$\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{entonces} \quad F_{cr} = 0.877 * F_e \quad (63)$$

La tensión de pandeo elástico (F_e) se determina usando la siguiente ecuación:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (64)$$

Donde:

- ✓ L es la longitud no arriostrada lateralmente del miembro (mm)
- ✓ r es el radio de giro (mm)
- ✓ El valor teórico de k se obtiene de la siguiente tabla.

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	2.1	2.0
End condition code	<ul style="list-style-type: none"> Rotation fixed and translation fixed Rotation free and translation fixed Rotation fixed and translation free Rotation free and translation free 					

Figura 25-3: Valores de longitud efectiva

Fuente: (ANSI/AISC-360, 2010)

Una vez, considerada los datos necesarios se tiene:

- ✓ $L = 1120 \text{ mm}$ longitud no arriostrada
- ✓ $K = 1$
- ✓ $A_g = 1355.2 \text{ mm}^2$
- ✓ $r_x = 64.7 \text{ mm}$
- ✓ $r_t = 24.9 \text{ mm}$
- ✓ $\phi_c = 0.90$ (LRFD)

Se calcula, las relaciones:

$$\checkmark \frac{KL}{r_x} = \frac{1 \cdot 1120}{64.7} = 17.313$$

$$\checkmark \frac{KL}{r_y} = \frac{1 \cdot 2380}{64.7} = 95.678 \quad \text{predomina al ser el mayor}$$

$$\checkmark 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71 \sqrt{\frac{210000}{245}} = 137.895$$

Como $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, entonces:

$$\checkmark F_e = \frac{\pi^2 * 245}{(95.678)^2} = 2.264 * 10^8 Pa$$

$$\checkmark F_{cr} = \left[0.658^{\frac{245}{226}} \right] * 245 = 155.763 MPa$$

$$\checkmark P_n = F_{cr} * A_g = 2.11 * 10^5 N$$

- **Resistencia a la flexión**

Para flexión, las secciones se clasifican como compactas, no compactas y esbeltas. De acuerdo a las siguientes condiciones.

- ✓ Si, $\lambda < \lambda_p$, el elemento es compacto
- ✓ Si, $\lambda > \lambda_r$, el elemento es esbelto
- ✓ Si, $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, el elemento es no compacto

Considerando como un elemento no rigidizado, de acuerdo a la Tabla B4.1b de la Norma (ANSI/AISC-360, 2010) se contempla como el caso 10, donde:

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (65)$$

$$\lambda_r = 1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (66)$$

Se tiene entonces:

$$\checkmark \lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{210000}{245}} = 11.125$$

$$\checkmark \lambda_r = 1.0 \sqrt{\frac{210000}{245}} = 29.277$$

$$\checkmark \lambda = \frac{b}{t} = \frac{30}{3} = 10$$

Como, $\lambda < \lambda_p$, el elemento es compacto

Considerando como un elemento rigidizado, de acuerdo a la Tabla B4.1b de la Norma (ANSI/AISC-360, 2010) se contempla como el caso 15, donde:

$$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (67)$$

$$\lambda_r = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (68)$$

✓ Se tiene entonces:

$$\checkmark \lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{210000}{245}} = 110.082$$

$$\checkmark \lambda_r = 5.7 \sqrt{\frac{210000}{245}} = 166.879$$

$$\checkmark \lambda = \frac{h}{t} = \frac{70}{3} = 23.333$$

Como, $\lambda < \lambda_p$, el elemento es compacto

- **Análisis de fluencia Y**

PLANO 1 – EJE MAYOR

$$\checkmark Z_y = 2.86 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\checkmark Z_x = 7.794 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\checkmark L_p = 1.76 * r_x \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.333 \text{ m}$$

$$\checkmark \phi_b = 0.90 \text{ (LRFD)}$$

$$\checkmark M_{ux} = 0.8507 \text{ kNm}$$

$$\checkmark M_{nx} = F_y * Z_x = 1.91 * 10^4 \text{ Nm}$$

PLANO 2 – EJE MENOR

$$\checkmark M_{uy} = 1.384 \text{ kNm}$$

$$\checkmark M_p = F_y * Z_y = 7.007 * 10^3 \text{ Nm}$$

$$\checkmark M_{ny} = M_p$$

Se determina la acción de las cargas combinadas, según las siguientes condiciones:

$$\bullet \frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.20 \quad \text{-----} \rightarrow \quad \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1 \quad (69)$$

$$\bullet \frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.20 \quad \text{-----} \rightarrow \quad \frac{P_u}{2 * \phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1 \quad (70)$$

Como: $\frac{P_u}{\phi_c P_n} = 0.406$, entonces, se utiliza la ecuación 69.

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1$$

$$0.406 + \frac{8}{9} \left[\frac{0.8507}{0.9 * 19.1} + \frac{1.384}{0.9 * 7.007} \right] \leq 1$$

$$0.406 + 0.239 \leq 1$$

$$0.645 \leq 1$$

El valor de 0.645 representa el radio teórico D/C, e indica que el perfil de la soportería seleccionada resiste sin problema las cargas de flexo-compresión, corroborando de esta manera el resultado obtenido en SAP2000 con un D/C = 0.666

3.2.2.17 Cálculo del espesor de la plancha de la parte cilíndrica

De acuerdo al apartado 5.3.4.2 de la norma (UNE-EN-1993-4-1, 2007) se considera instalar en dirección horizontal 49 pernos a una distancia de 48 mm teniendo una separación para el traslape de 44 mm a cada lado, mientras que verticalmente se considera instalar 20 pernos.

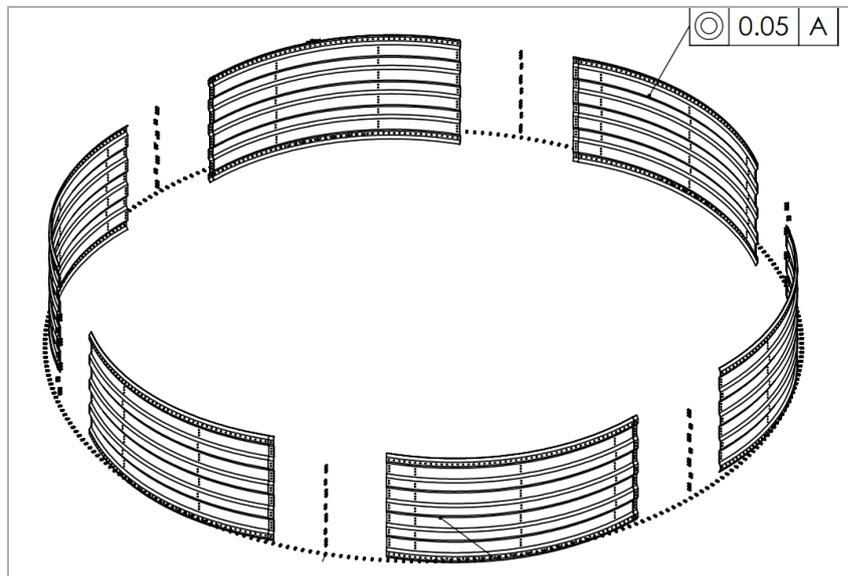


Figura 26-3: Distribución de planchas por anillo

Fuente: (Chauca Alex, 2020)

Aplicando la teoría simplificada para recipientes de pared delgada y conociendo el valor de la presión horizontal y vertical se puede determinar el espesor de la pared vertical aplicando las fórmulas según la (CPE-INEN-008, 2013) y (Ravenet, 1977)

$$\sigma_l = \frac{p \cdot R}{2 \cdot t} = \frac{p_{we} \cdot d_c}{4 \cdot t} \quad (71)$$

Despejando, se tiene:

$$t = \frac{p_{we} \cdot d_c \cdot n}{392 \cdot \sigma_l} \quad (72)$$

Donde:

- ✓ p_{we} es el valor de la presión de rozamiento sobre las paredes $\left(\frac{kN}{m^2}\right)$
- ✓ d_c es el diámetro del silo (m)
- ✓ σ_l esfuerzo máximo admisible del acero $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$
- ✓ n es el factor de seguridad

$$t_1 = \frac{8.305 * 4.57 * 1.57}{392 * 2319} = 0.000066 \text{ m}$$

$$t_1 = 0.06 \text{ mm}$$

$$\sigma_t = \frac{p * R}{t} = \frac{p_{he} * d_c * n}{2 * t} \quad (73)$$

Despejando, se tiene:

$$t = \frac{p_{he} * d_c * n}{196 * \sigma_t} \quad (74)$$

Donde:

- ✓ p_{he} es el valor de la presión horizontal sobre las paredes $\left(\frac{kN}{m^2}\right)$
- ✓ d_c es el diámetro del silo (m)
- ✓ σ_l esfuerzo máximo admisible del acero $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$
- ✓ n es el factor de seguridad

$$t_2 = \frac{19.61 * 4.57 * 1.57}{196 * 2319} = 0.000309 \text{ m}$$

$$t_2 = 0.31 \text{ mm}$$

$$t_c = t_1 + t_2 \quad (75)$$

$$t_c = (0.06 + 0.31) \text{ mm} = 0.37 \text{ mm}$$

De acuerdo a la norma (UNE-EN-1993-4-1, 2007), los efectos de la abrasión del material almacenado se deben considerar para determinar el espesor de la pared, cuando no se dispone de información específica se supondrá 2 mm.

$$\Delta t = 2 \text{ mm}$$

Se obtiene, entonces:

$$t = t_c + \Delta t \quad (76)$$

$$t = (0.37 + 2) \text{ mm}$$

$$t = 2.37 \text{ mm}$$

Como para el cálculo solo se considera las presiones generadas durante la descarga y no las otras cargas, se selecciona un espesor comercial de la chapa mayor al calculado, es decir de 3 mm.

3.2.2.18 Cálculo del espesor de la tolva

Según (Ravenet, 1977) el espesor de la chapa de la tolva, se determina según la siguiente ecuación:

$$t_t = \frac{P \cdot d_c \cdot n}{2 \cdot \cos \alpha \cdot 980 \cdot \sigma_{adm}} \quad (77)$$

Donde:

- ✓ p es la presión normal a la pared de la tolva en $\left(\frac{kN}{m^2}\right)$
- ✓ d_c es el diámetro del silo (m)
- ✓ σ_t coeficiente de trabajo a tracción del acero admisible $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$

✓ n es el factor de seguridad

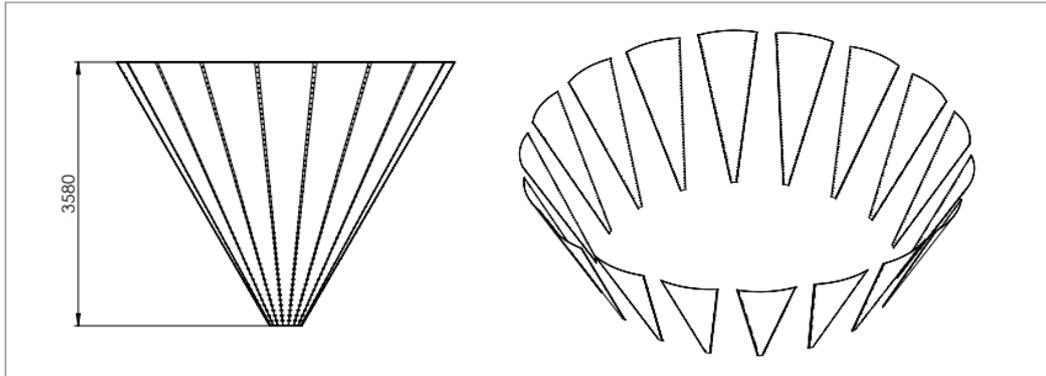


Figura 27-3: Distribución de planchas de la tolva

Fuente: (Chauca Alex, 2020)

Se tiene entonces:

$$t_t = \frac{58.25 * 4.57 * 1.57}{2 * \text{Cos } 60^\circ * 980 * 2319}$$

$$t_t = 0.00018 \text{ m} = 0.18 \text{ mm}$$

Para determinar el espesor total, se toma en cuenta el espesor por abrasión recomendado por la (UNE-EN-1993-4-1, 2007)

$$t_{tT} = t_t + \Delta t$$

$$t_{tT} = 0.18 + 2 = 2.18 \text{ mm}$$

Como para el cálculo solo se considera las presiones generadas en la tolva durante la descarga y no las otras cargas, se selecciona un espesor comercial de la chapa mayor al calculado, es decir de 3 mm.

3.2.2.19 Selección de pernos

Aplicando la ecuación recomendada por (Ravenet, 1977), se determina el diámetro del perno.

$$\sigma_{\tau adm} = \frac{p * d_c * n * 0.94}{2 * S_T * n_T} = \frac{2 * p * d_c * n * 0.94}{\pi * d_n^2 * n_T} \quad (78)$$

Despejando, se tiene:

$$d_n = \sqrt{\frac{2 * p * d_c * n * 0.94}{\pi * \sigma_{\tau adm} * n_T}}$$

Donde:

- ✓ p es la presión lateral en $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$
- ✓ d_c es el diámetro del silo (m)
- ✓ $\sigma_{\tau adm}$ es el esfuerzo admisible del tornillo a cortadura $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$
- ✓ n es el factor de seguridad

$$d_n = \sqrt{\frac{2 * 847.11 * 4.57 * 0.94 * 1.57}{\pi * 8436 * 20 * 10000}}$$

$$d_n = 0.0046 m = 4.6 mm$$

De acuerdo a la norma (UNE-EN-1993-4-1, 2007), en la construcción con pernos, el tamaño del perno no debe ser menor que M8, por lo tanto, se considera el uso de pernos 5/16"x1".

3.2.2.20 Salidas de aire

De acuerdo al catálogo de construcción de silos (STORMOR-mfs, 2015), se recomienda el uso de salidas de aire para reducir la cantidad de condensados que ocurren en el interior del techo, ya que su precipitación sobre la capa superior de granos almacenados puede arruinar el producto.

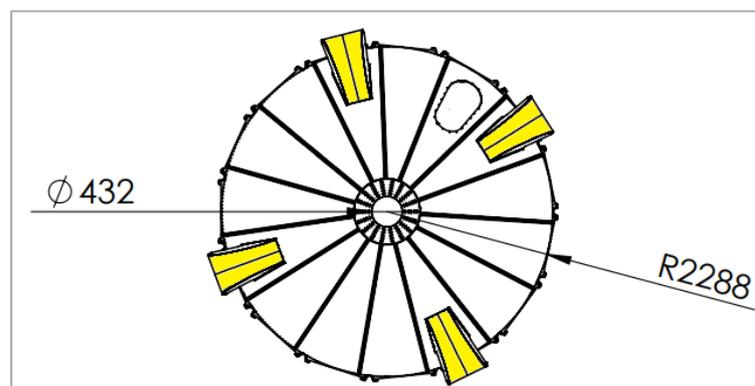


Figura 28-3: Distribución de las salidas de aire en el techo

Realizado: Alex Chauca, 2020

Considerando el diámetro del silo, 4.57 m, se usa 4 salidas de aire distribuidas en el techo, tomando en cuenta las dimensiones recomendadas en el catálogo. El diseño de silo propuesto es el indicado en la figura 29-3.

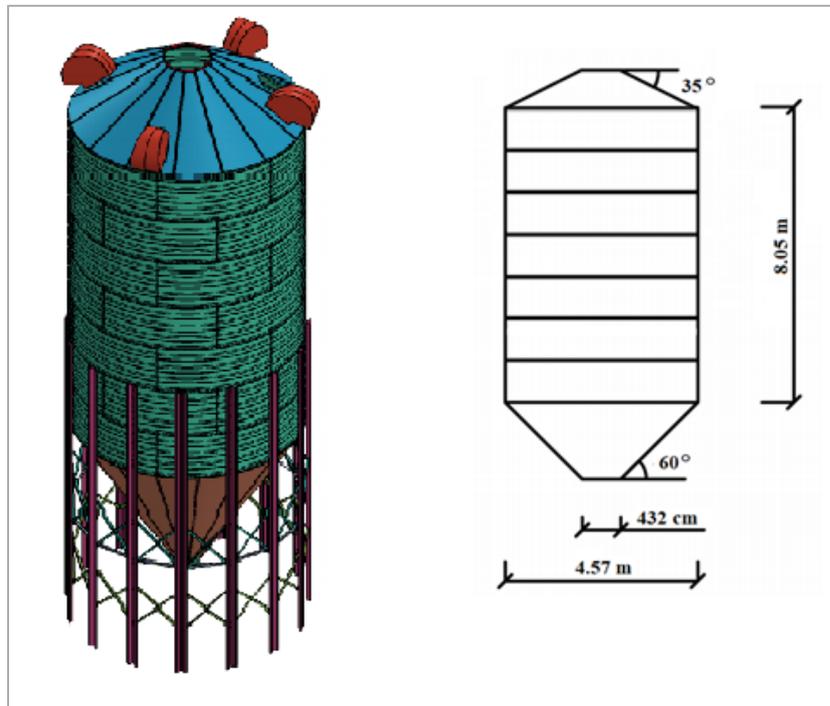


Figura 29-3: Silo de 100 toneladas de pared corrugada y tolva cónica

Realizado: Alex Chauca, 2020

3.3 Análisis del silo

3.3.1 Objetivo

Garantizar la resistencia estructural del silo, es decir, soporte las cargas generadas durante el llenado y vaciado, así como también su peso propio, cargas de sismo y de viento; a fin de garantiza su óptimo funcionamiento.

3.3.2 Alcance

La metodología utilizada puede ser aplicada para el análisis de silos de pared corrugada trapezoidal de esbeltez media, de clase de evaluación de acción 2 y de pared delgada destinados al almacenamiento de productos granulares de diferente peso específico.

3.3.3 Documentos de referencia

(Sharhan, 2012) presenta un estudio de la concentración de esfuerzos en la transición de cilindro-cono de un silo utilizando el MEF, donde las superficies cilíndricas y cónicas fueron modeladas con exactitud, los apoyos estaban constituida por una viga perimetral y apoyadas en un elemento rígido. Concluye la concentración de esfuerzos y la flexión en el punto de análisis puede reducirse incrementando el ángulo de inclinación de la tolva o instalando un refuerzo perimetral lo más cercano a la transición.

(Mahmound, 1975) establece una formulación de elementos finitos para el análisis de deformaciones y tensiones en silos agrícolas circulares, durante la carga secuencial. El modelo permite la simulación de la secuencia de llenado, la fricción a lo largo de la interfaz del silo-material y las deformaciones de la pared.

3.3.4 Códigos y normas aplicados en el análisis

Para el análisis se usa la norma (UNE-EN-1991-4, 2011) y la (AS-3774, 1996) para establecer las cargas de llenado y descarga para dimensionar el silo, la (ASCE-7, 2010) para determinar cargas de viento y la (NEC, 2014) para la carga de sismo; además se emplea un procedimiento recomendado por ESSS para la simulación al aplicar un análisis con elementos finitos.

3.3.5 Descripción del análisis

Para el análisis estructural del silo se utiliza el método de elementos finitos (MEF), empleando el software ANSYS WORKBENCH. Este método subdivide la geometría de la estructura en partes pequeñas (elementos) y propone la sustitución de un número infinito de variables desconocidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido, mismas que pueden tener varias formas dependiendo del tipo y tamaño del problema (ESSS, 2020).

Los elementos están enlazados entre si por puntos, conocidos como nodos; la combinación de elementos y nodos dan como resultado la malla. La precisión de este método depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de

elementos de malla, por eso para que los resultados de análisis sean más precisos se recomienda que en una malla el tamaño sea menor y el número de elementos mayor.

3.3.6 Bases y premisas del análisis

El silo a analizar está diseñado para almacenar 100 toneladas de maíz, sus paredes son de acero galvanizado con un corrugado trapezoidal, tiene un espesor de pared de 3 mm, además consta de una tova de descarga con una inclinación de pared de 60 grados y está soportada por 15 perfiles omegas los cuales están distribuidos simétricamente alrededor de su perímetro.

Para el análisis, según la EN 1991-4:2011, se considera las siguientes combinaciones de carga:

- ✓ Con carga
- ✓ Con Carga, viento y sismo
- ✓ Sin Carga, viento y sismo
- ✓ Solo descarga
- ✓ Descarga, viento y sismo

3.3.7 Método de análisis

Se utiliza el método de elementos finitos (FEM) mediante ANSYS WORKBENCH para realizar un análisis estático en el estado crítico que se determina de las diferentes combinaciones de carga. Para el análisis se considera el elemento tipo beam para la soportería y shell para las paredes del silo. El proceso de análisis está dividido en:

3.3.7.1 Pre-proceso

Se contempla la generación de la geometría, propiedades del material, generación de malla, condiciones de contorno y definición de cargas.

3.3.7.2 Proceso

Considera la aplicación de cargas, contemplando condiciones de borde en los nodos y elementos, además, permite obtener la solución, que se obtiene cuando todos los valores del problema son conocidos. Este proceso puede durar minutos, horas o incluso días en simular, dependiendo del modelo generado.

3.3.7.3 *Post-proceso*

Conciérne a la visualización de resultados, que puede ser la geometría deformada, o datos en una tabla.

3.3.8 *Descripción del modelo numérico*

3.3.8.1 *Geometría*

La geometría tipo superficie fue generada en SolidWorks, e importada a ANSYS WORKBENCH utilizando el módulo static structural.

Para el modelado de la estructura se consideró las dimensiones calculadas en la Capítulo IV de este trabajo de investigación.

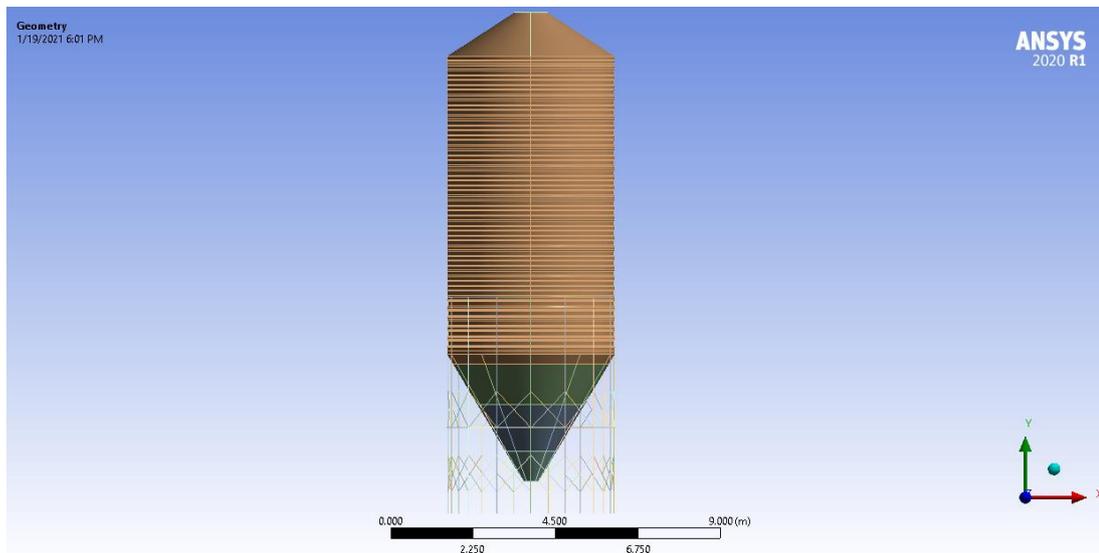


Figura 30-3: Geometría del silo diseñado

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

3.3.8.2 Mallado

La generación de la malla es una de las etapas más importantes del pre-procesamiento, el modelo geométrico se usa como referencia para la creación de nodos y elementos.

Para el análisis del silo, se realiza un mapeo con elementos tipo *Shell*, con un tamaño inicial de 160 mm, luego se realiza un refinamiento en las zonas críticas con tamaño inicial de 50 mm. En la figura 2-5, se muestra la calidad de malla del silo, donde se indica 0.13876 como valor mínimo y un 0.6043 de valor promedio; siendo una malla aceptable.

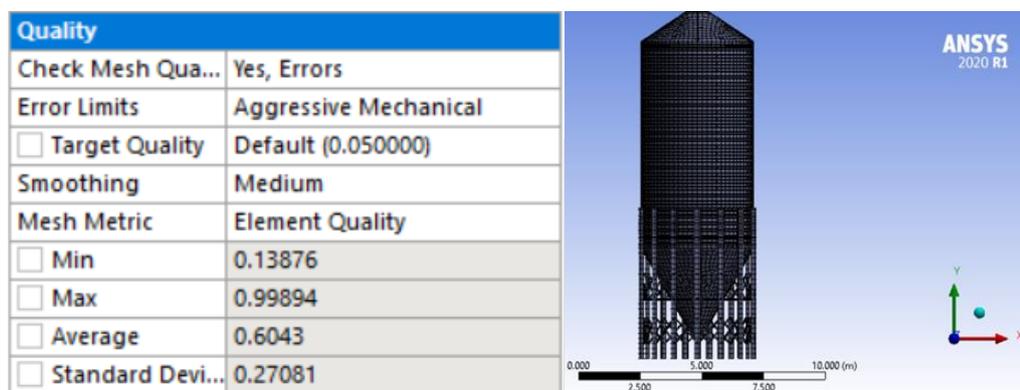


Figura 31-3: Mallado del silo

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

Para tener un correcto refinamiento de malla se realiza un análisis de convergencia, considerando la variación del esfuerzo de von Mises, y la deformación máxima de la combinación de carga crítica descarga + viento + sismo como se indica en la Tabla 1-5.

Tabla 25-5: Datos del análisis de convergencia.

Número de elementos	Esfuerzo von Misses	Variación (%)	Deformación maxima
6912	259.4	20.45875096	26.93
12853	312.47	8.743239351	27.02
23545	285.15	2.458355252	27.45
42403	278.14	1.901919896	28.057
85661	272.85	1.901919896	

Realizado por: (Alex Chauca, 2020)

Al observar la Tabla 1-5 se puede observar que al duplicar el número de elementos la variación existente en los parámetros medidos disminuye, lo cual indica que existe una convergencia como se aprecia en la figura 8-5.

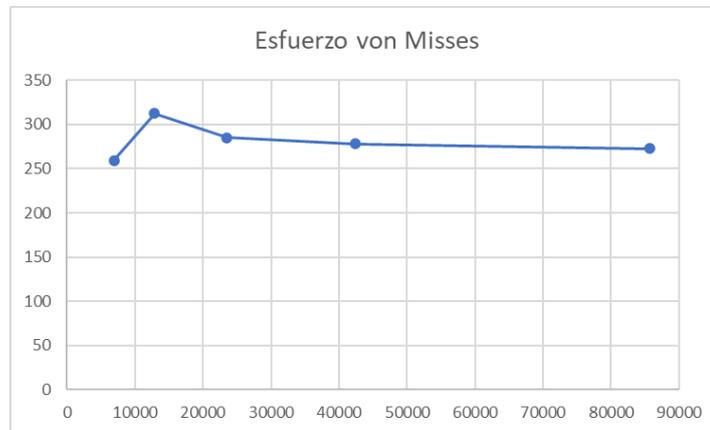


Figura 32-3: Análisis de convergencia en ANSYS

Realizado por: Alex Chauca

3.3.8.3 Materiales

Las paredes del silo son de acero galvanizado SS33, cuyas propiedades mecánicas según la norma ASTM A653, se muestran a continuación.

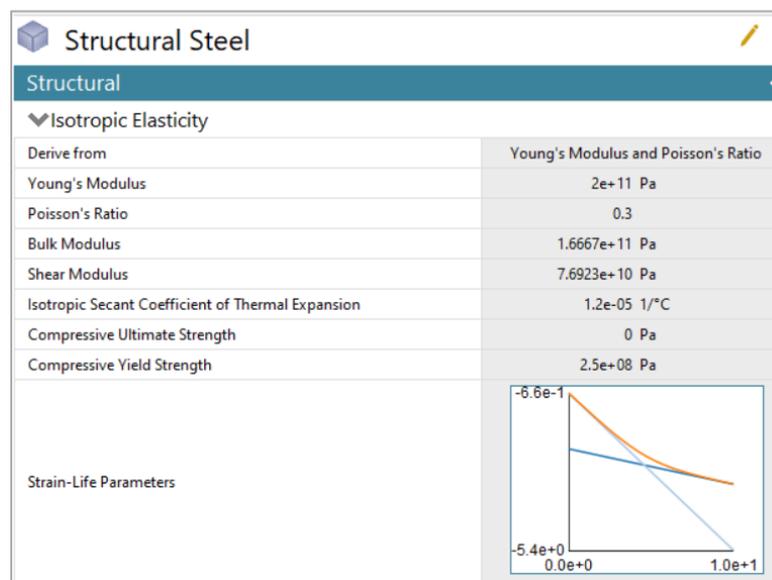


Figura 33-3: Propiedades mecánicas del material del silo

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

3.3.8.4 Cargas y condiciones

Las cargas y condiciones son usadas para representar las condiciones de operación del modelo y dependen de la combinación de carga a analizar, es así que para la combinación DESCARGA + VIENTO + SISMO se tiene: carga del material almacenado (A), carga sísmica (B, D, F, G, H), peso propio de la estructura (C), carga de viento (E, I, M) y soportes fijos en la base (N)

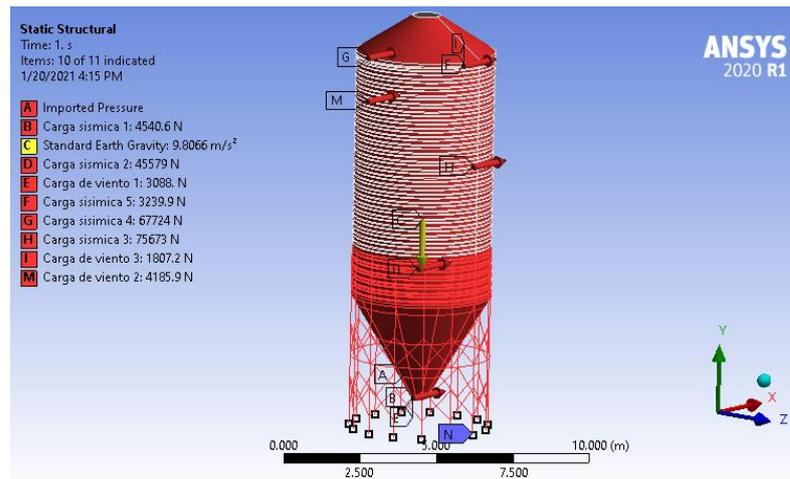


Figura 34-3: Cargas y restricciones del silo (descarga + viento + sismo)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

Para la combinación SOLO CARGA, se tiene: carga del material almacenado (A), peso propio de la estructura (B) y soportes fijos en la base (C)

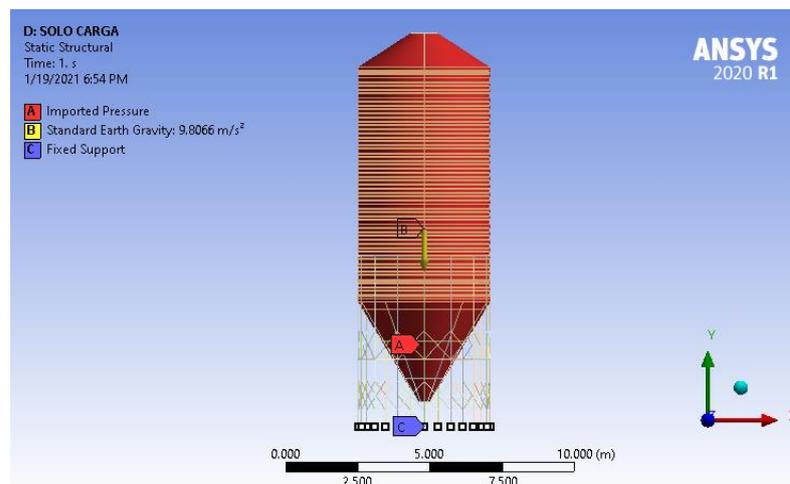


Figura 35-3: Cargas y restricciones del silo (solo carga del grano)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

Para la combinación: CARGA + VIENTO + SISMO, se tiene: carga del material almacenado (A), carga sísmica (B, D, E, G, H), peso propio de la estructura (C), carga de viento (F, I, K) y soportes fijos en la base (N).

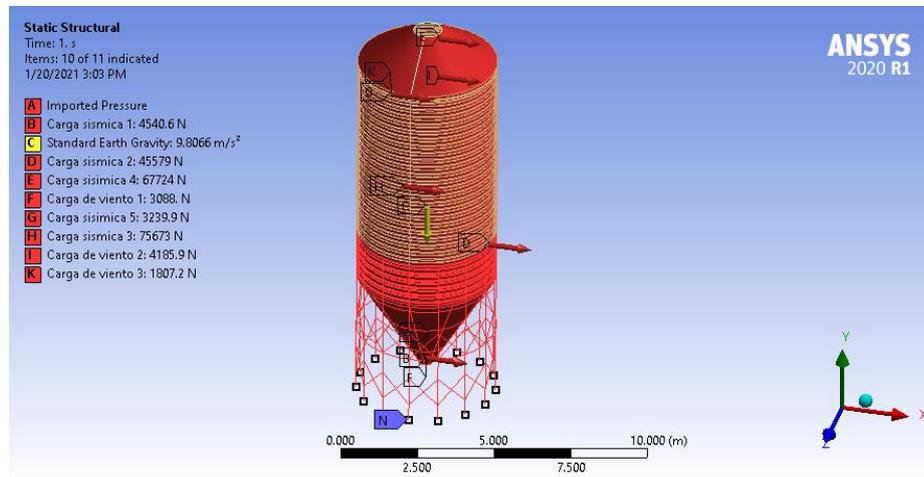


Figura 36-3: Cargas y restricciones del silo (Con carga + viento + sismo)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

Para la combinación: SIN CARGA + SISMO + VIENTO, se tienen: carga sísmica (B, E, F, G, H), peso propio de la estructura (C), carga de viento (D, I, J) y soportes fijos en la base (N).

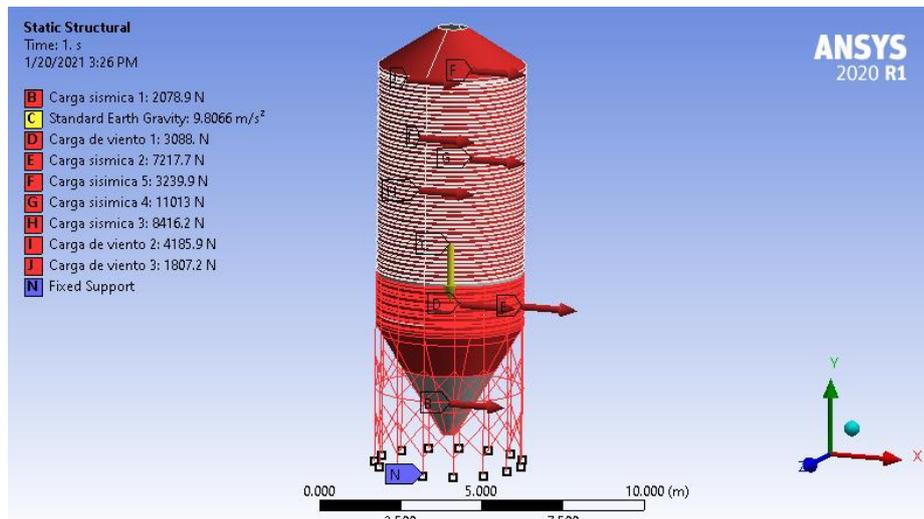


Figura 37-3: Cargas y restricciones del silo (sin carga + sismo + viento)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

Para la combinación: SOLO DESCARGA, se tiene: carga del material almacenado (A), peso propio de la estructura (B) y soportes fijos en la base (C).

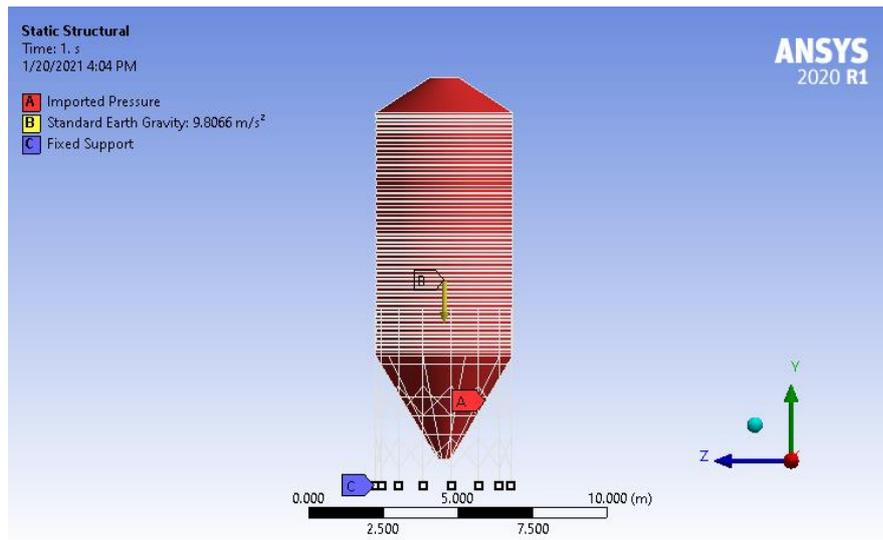


Figura 38-3: Cargas y restricciones del silo (solo descarga)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

3.3.9 Validación del modelo

A fin de evitar un análisis equivocado, previo a la validación, es importante verificar el modelo con cautela, para identificar posibles errores, como:

- ✓ Sentido y magnitud de cargas
- ✓ Condiciones iniciales de contacto
- ✓ Operaciones generales del análisis

Una vez verificado las condiciones, se procede a simular el modelo en ANSYS WORKBENCH, donde se halla el esfuerzo de von Mises y la deformación para cada una de las combinaciones indicadas en el apartado 5.6.

3.3.9.1 Con Carga

- **Esfuerzo de von Mises**

El esfuerzo de von Mises máximo es de 134 MPa y se encuentra localizado en la junta entre el cilindro y la soportería en la transición del silo.

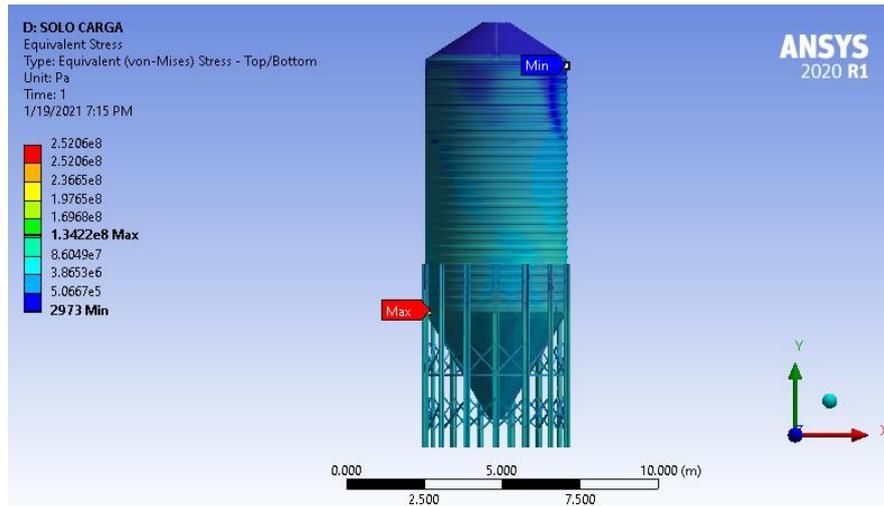


Figura 39-3: Esfuerzo de von Mises en el silo (solo carga del grano)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

- **Deformación**

La deformación máxima que sufre el silo considerando solo la carga del maíz y el peso propio del silo es 0.0041 m.



Figura 40-3: Deformación del silo con el peso propio y del grano

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

3.3.9.2 Con Carga, viento y sismo

- **Esfuerzo de von Mises**

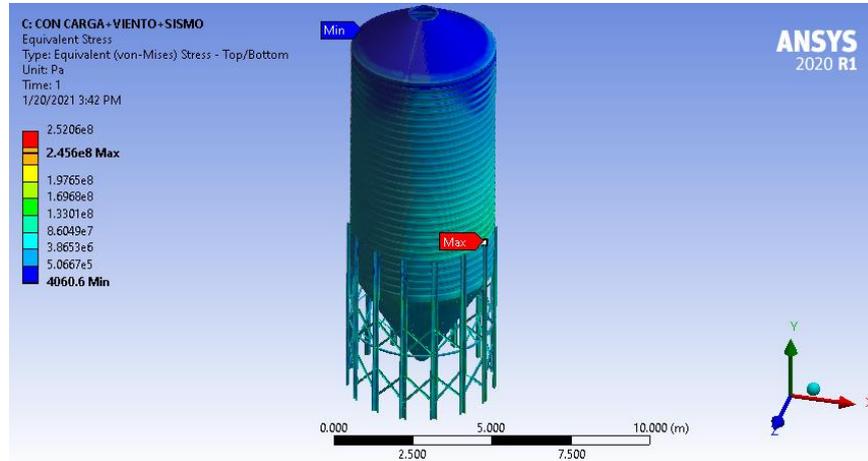


Figura 41-3: Esfuerzo de von Mises en el silo (Con carga + viento + sismo)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

El esfuerzo de von Mises máximo en esta combinación es de 245 MPa y se encuentra localizado *en la junta entre el cilindro y la soportería en el primer anillo*.

- **Deformación**

La deformación máxima que sufre el silo que está lleno, más la carga de viento y sismo es 0.027 m y se da en el ingreso del silo.

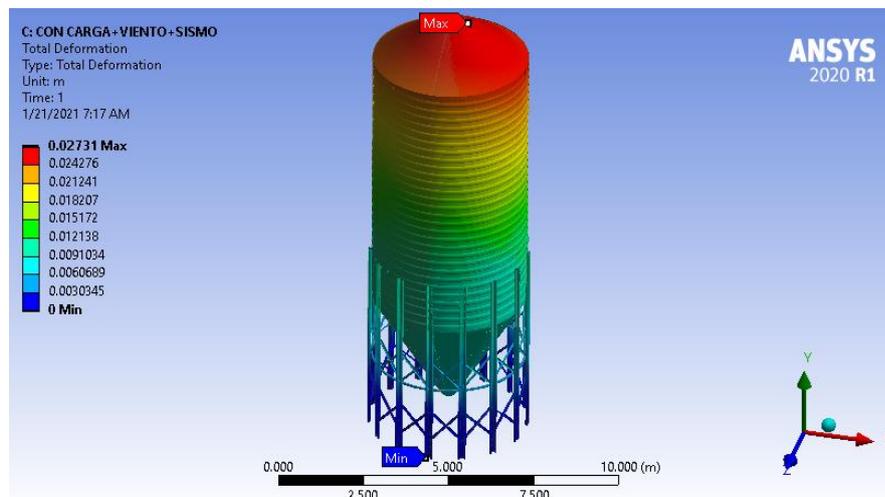


Figura 42-3: Deformación del silo (Con carga + viento + sismo)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

3.3.9.3 Sin Carga, viento y sismo

- **Esfuerzo de von Mises**

El esfuerzo de von Mises máximo en esta combinación de cargas es de 50.43 MPa y se encuentra localizado en la junta entre el silo y la soportería en el primer anillo.

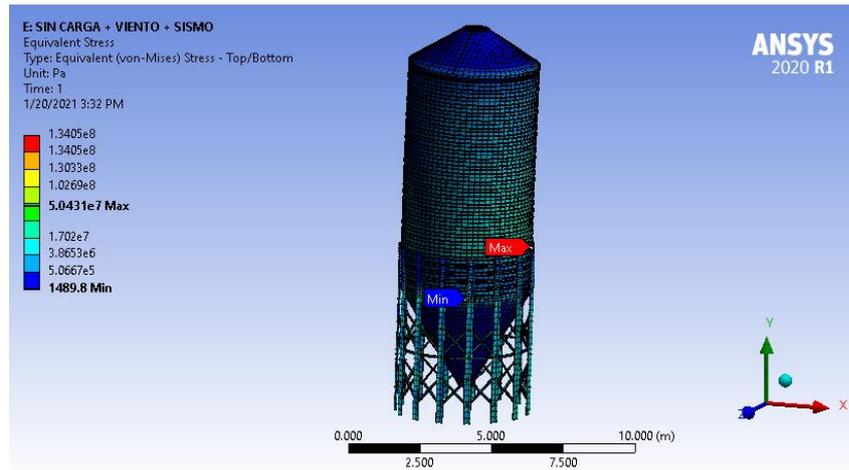


Figura 43-3: Esfuerzo de von Mises en el silo (sin carga + sismo + viento)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

- **Deformación**

La deformación máxima considerando el silo vacío más la carga sísmica y de viento es 0.0066 m, se da en la boca de ingreso del silo.

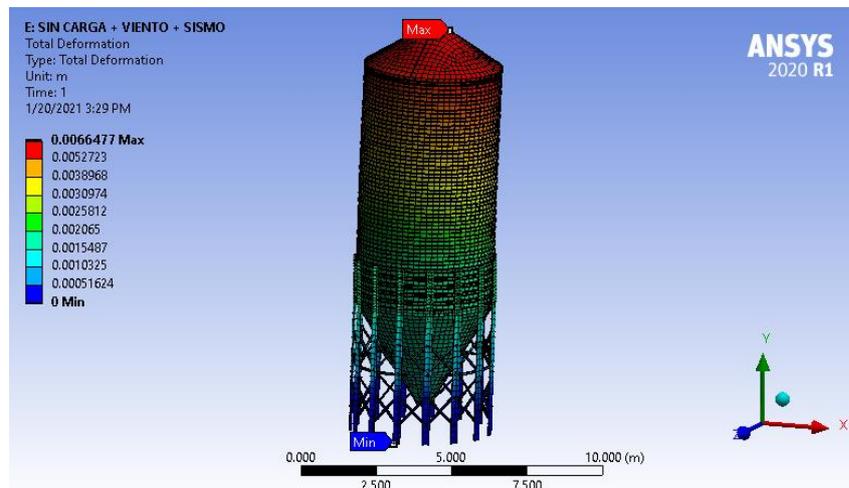


Figura 44-3: Deformación del silo (sin carga + sismo + viento)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

3.3.9.4 Solo Descarga

- **Esfuerzo de von Mises**

El esfuerzo de von Mises máximo es de 205 MPa y se encuentra localizada en la transición y se da en la junta entre el cilindro y la soportería del silo.

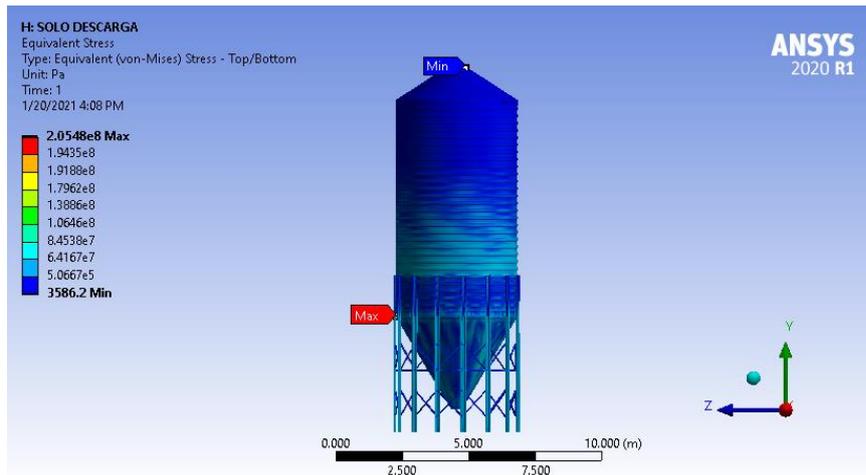


Figura 45-3: Esfuerzo de von Mises en el silo (solo descarga)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

- **Deformación**

La deformación máxima que sufre el silo se da en la tolva y tiene un valor de 0.0074 m.

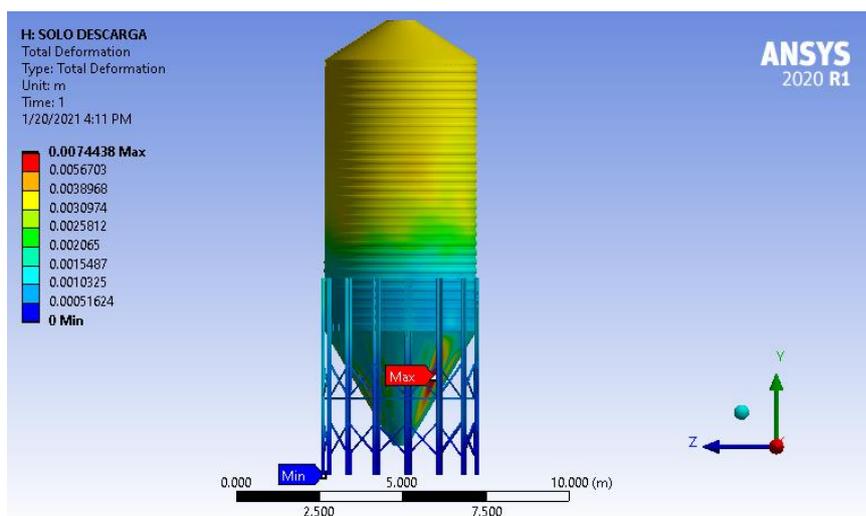


Figura 46-3: Deformación del silo (solo descarga)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

3.3.9.5 Descarga, viento y sismo

- **Esfuerzo de von Mises**

El esfuerzo de von Mises máximo durante el llenado es de 272 MPa y se encuentra localizado en la junta entre el cilindro y la soportería en la transición del silo.

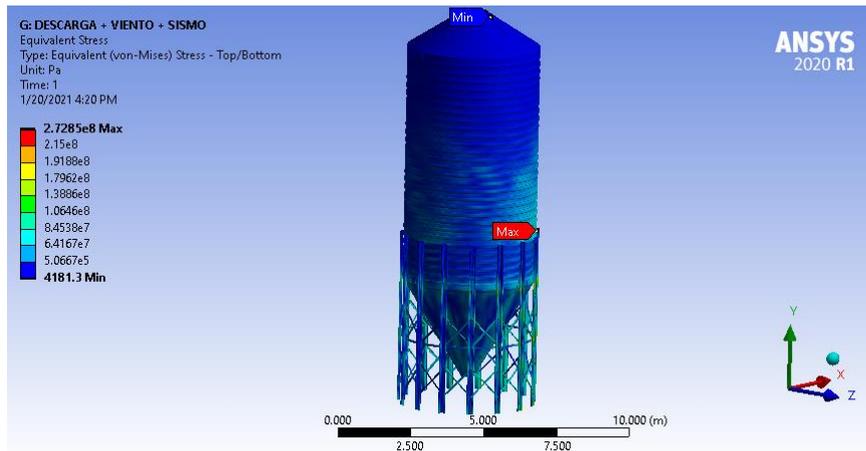


Figura 47-3: Esfuerzo de Von Mises en el silo (descarga + viento + sismo)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

- **Deformación**

La deformación máxima al aplicar esta combinación es de 0.026 m y se da en el ingreso del silo.

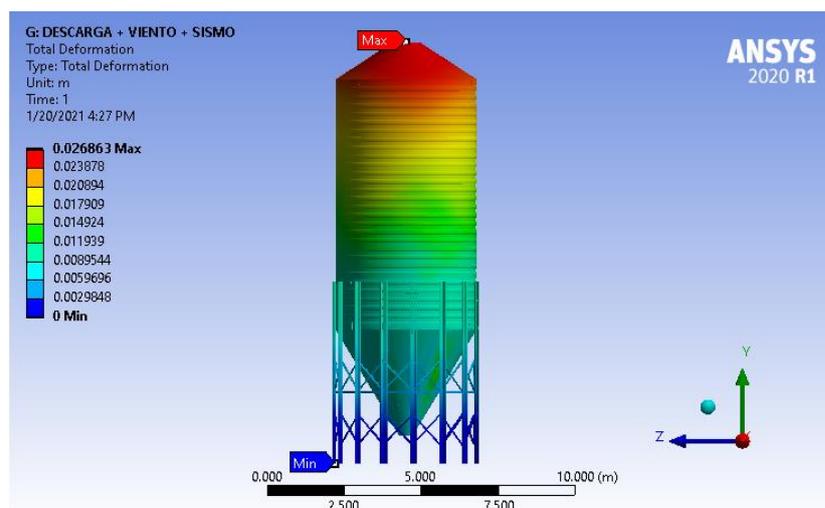


Figura 48-3: Deformación del silo (descarga + viento + sismo)

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez analizado el comportamiento del silo ante las combinaciones establecidas aplicando el método de elementos finitos mediante ANSYS WORKBENCH, se determina que la combinación crítica es: descarga + viento + sismo, como se muestra en la tabla adjunta.

Tabla 1-4: Resultados de la combinación

Combinación	Esfuerzo de von-Mises máximo (MPa)	Deformación (m)
Con carga	134	0.0041
Con carga + viento + sismo	245	0.027
Sin carga + viento + sismo	50.43	0.0066
Solo descarga	205	0.0074
Descarga + viento + sismo	272	0.026

Realizado por: Alex Chauca, 2020

Al analizar la combinación descarga crítica, se determina que el esfuerzo máximo es de 272 MPa y se da en la junta empernada entre la soportería y la pared del silo; pero como la unión de los elementos se realiza con un perno 5/16" grado 8.2 que tiene una resistencia elástica de 896 MPa se garantiza el óptimo funcionamiento del silo. Además, se observa que el esfuerzo en el resto de la estructura es menor a 100 MPa, como se muestra en la siguiente figura.

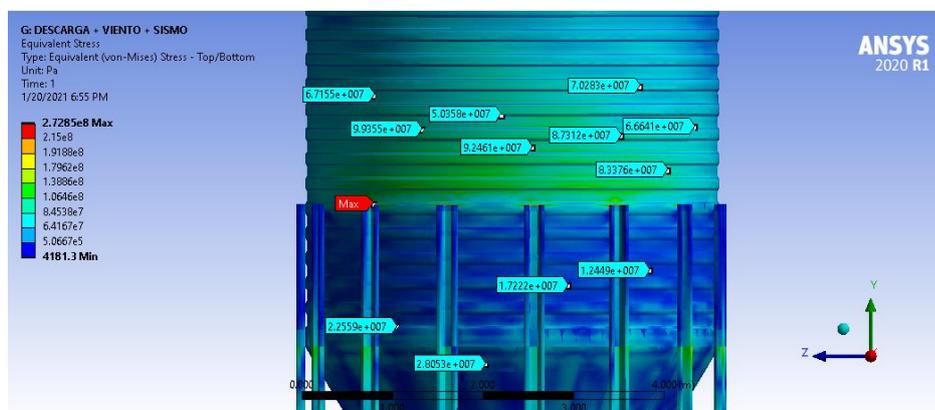


Figura 1-4: Análisis de la combinación descarga + viento + sismo

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

Al realizar un análisis de pandeo se verifica que el valor del factor load multiplier es de 1.4007, es decir la estructura puede soportar un 40% más del peso total para empezar a pandearse.

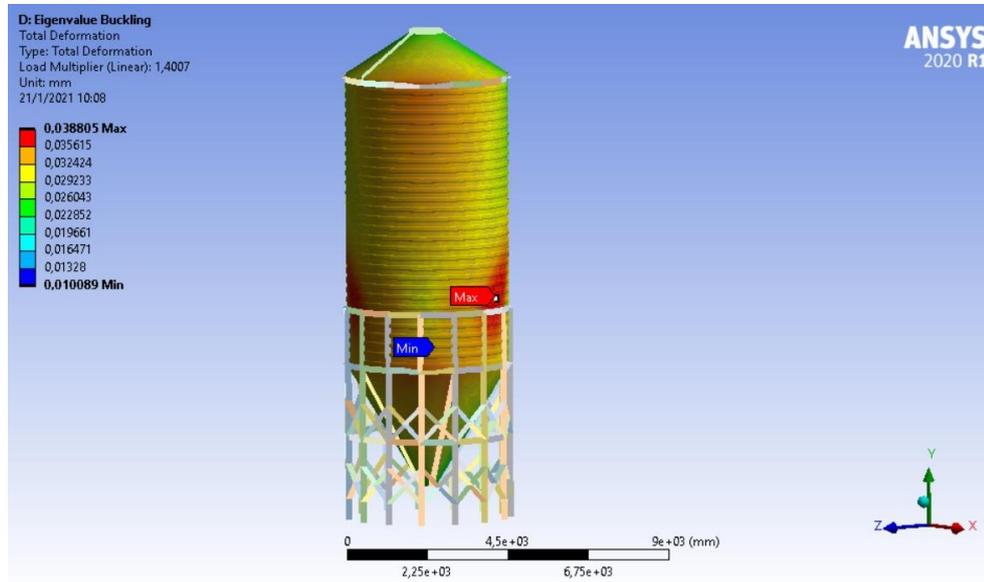


Figura 2-4: Análisis de pandeo del silo

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla software ANSYS

CAPÍTULO V

5. PROPUESTAS

Para ayudar a la pequeña industria, que eventualmente fabrican silos se presenta una aplicación informática la cual permite realizar el prediseño del silo, tomando en consideración los parámetros establecidos en la norma EN-1991-4:2011.

5.1 Aplicación informática para el prediseño de un silo

Debido a que el acceso al sistema es libre, se decidió realizar la programación en PHP, que es un lenguaje de programación que permite subir a la web la aplicación informática.

La arquitectura de desarrollo es Modelo/Vista/ Controlador (MVC), donde:

- ✓ Modelo: permite el acceso a la base de datos
- ✓ Vista: se refiere a la interfaz (presentación de la información)
- ✓ Controlador: permite la coordinación entre la vista y el modelo.

Para acceder a la aplicación debe ingresar a: <https://silo.presencesystem.com.ec/>



Figura 1-5: Portada de la aplicación informática para prediseño de un silo.

Realizado por: Alex Chauca, captura de pantalla de aplicación informática

Se *inicia sesión* en la esquina superior derecha, utilizando la palabra *demo* como usuario y contraseña.



Figura 2-5: Ingreso a la aplicación informática

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

Al ingresar al sistema, en la parte superior izquierda, se visualiza las opciones que se puede ir desplazando conforme se ingresan datos.

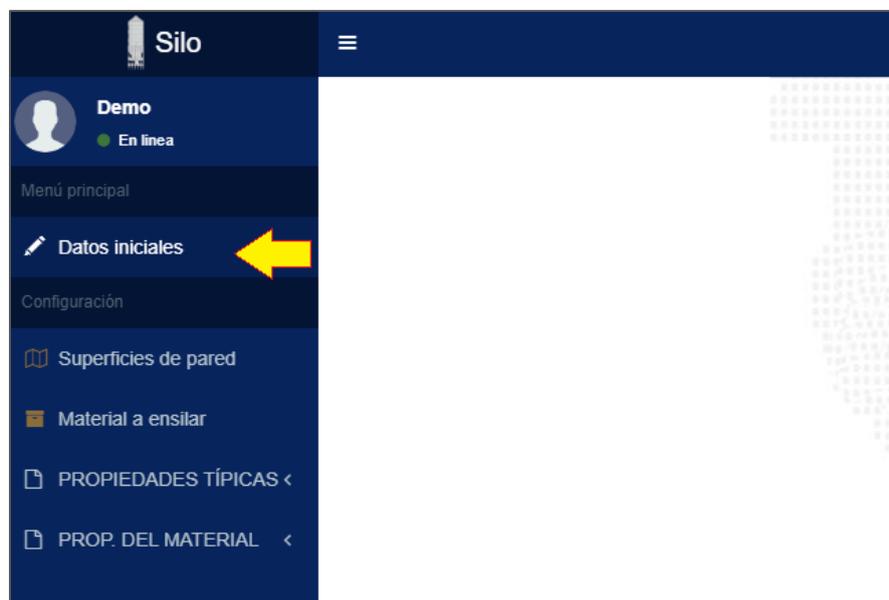


Figura 3-5: Parámetros de ingreso para el prediseño

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

Al dar click en la opción *Datos iniciales*, se desplaza una ventana en la que se puede ingresar la capacidad y tipo de material a almacenar.

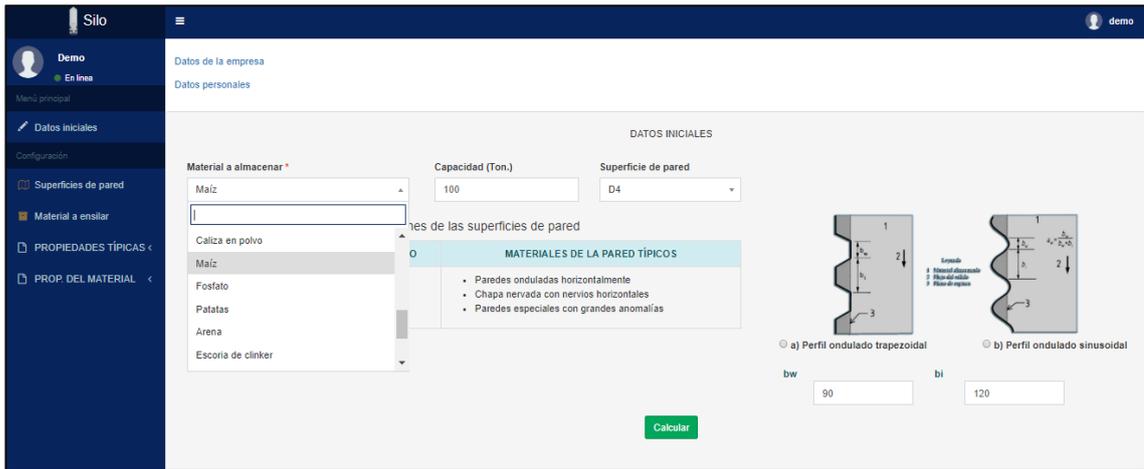


Figura 4-5: Datos iniciales necesarios para el prediseño

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

Al pulsar el botón **calcular**, se generan los valores característicos necesarios para el cálculo de cargas.

Tabla 1: Propiedades del material a ensilar

Tipo de sólido disgregado	Peso específico γ		Ángulo de talud natural ϕ_r	Ángulo de rozamiento interno ϕ_i		Coeficiente de presiones laterales K		Coeficiente de rozamiento con la pared μ ($\mu = \tan \phi_w$)				Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas Cop
	γ_i	γ_u	ϕ_r	ϕ_{im}	$a\phi$	Km	ak	Tipo de pared D1	Tipo de pared D2	Tipo de pared D3	au	
	Inferior	Superior		Medio	Coefficiente	Medio	Coefficiente	Medio	Medio	Medio	Coefficiente	
	kN/m ³	kN/m ³	grados	grados								
Maíz	7	8	35	31	1.14	0.53	1.14	0.22	0.36	0.53	1.24	0.9

Tabla 2: Valores característicos del Maíz según la EN 1991-4:2011

Ángulo de rozamiento interno				Coeficiente de presiones laterales				Coeficiente de rozamiento con la pared tipo D4			
ϕ_{im}	$a\phi$	ϕ_{is}	ϕ_{ii}	km	ak	ks	ki	μ	au	μ_s	μ_i
31	1.14	35.34	27.19	0.53	1.14	0.6	0.46	0.497	1.24	0.616	0.401

Figura 5-5: Valores característicos para el cálculo en el prediseño

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

Se activa la opción **dimensionamiento del silo**, en la parte superior izquierda, donde al dar click se abre una ventana que permite ingresar información correspondiente a inclinación de la tolva, diámetro de ingreso, diámetro de salida, inclinación de la tapa y numero de planchas enteras que se usará para formar cada anillo.

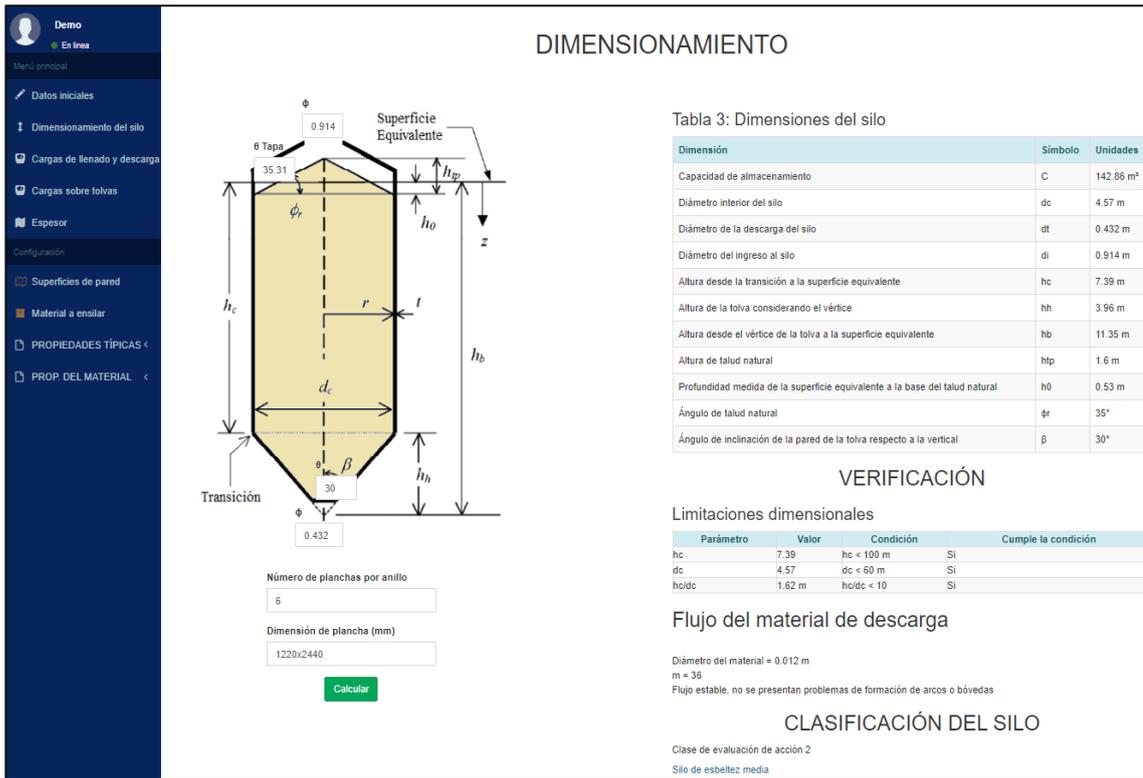


Figura 6-5: Datos necesarios para el dimensionamiento del silo

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

Al pulsar el botón **calcular**, se visualiza las cargas de llenado y descarga en las paredes verticales y en la tolva (click en la parte superior izquierda).

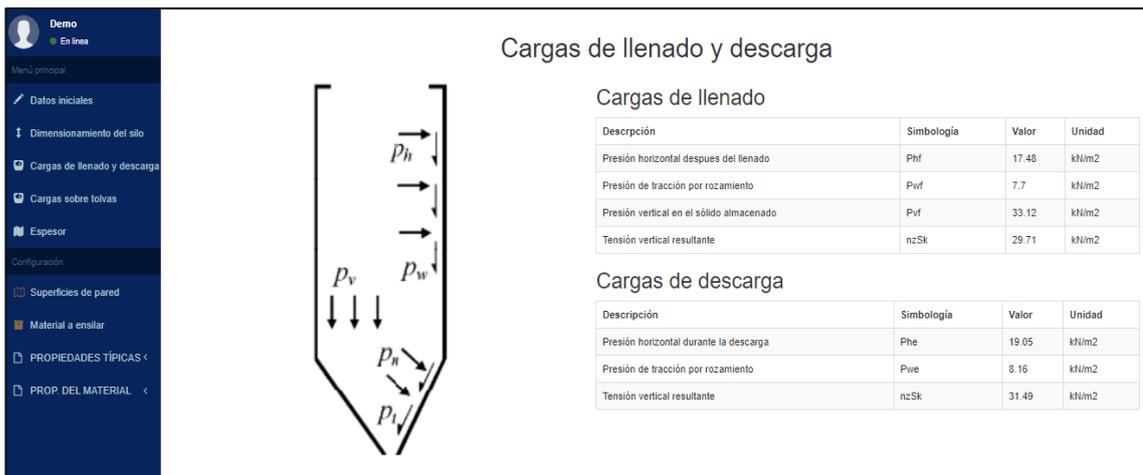


Figura 7-5: Cargas de llenado y descarga en las paredes verticales

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

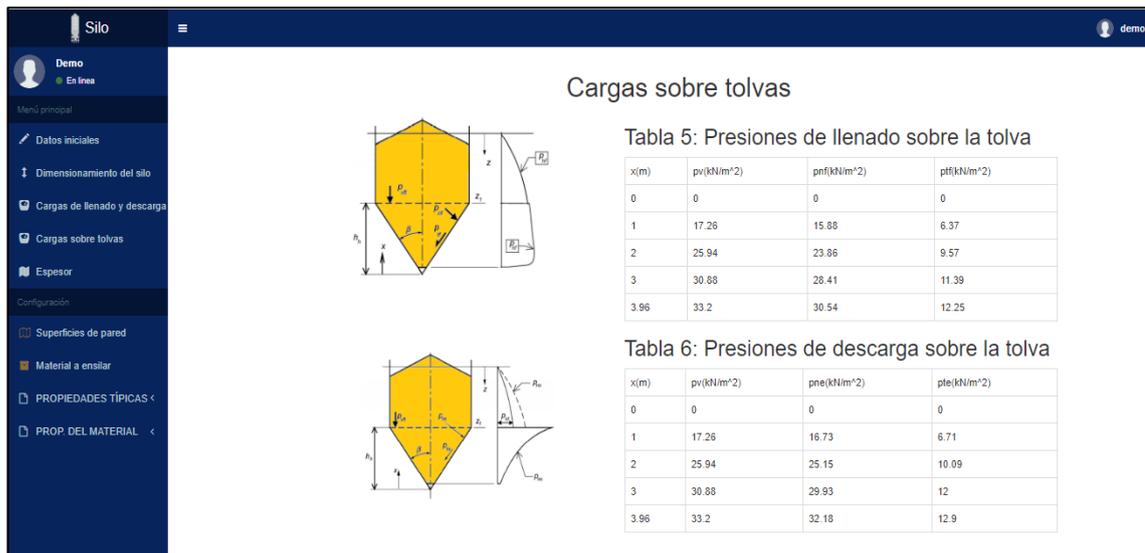


Figura 8-5: Cargas de llenado y descarga en las paredes de la tolva

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

También se habilita la siguiente opción que permite determinar el espesor del cilindro y la tolva, (click en *espesor* en la parte intermedia izquierda).

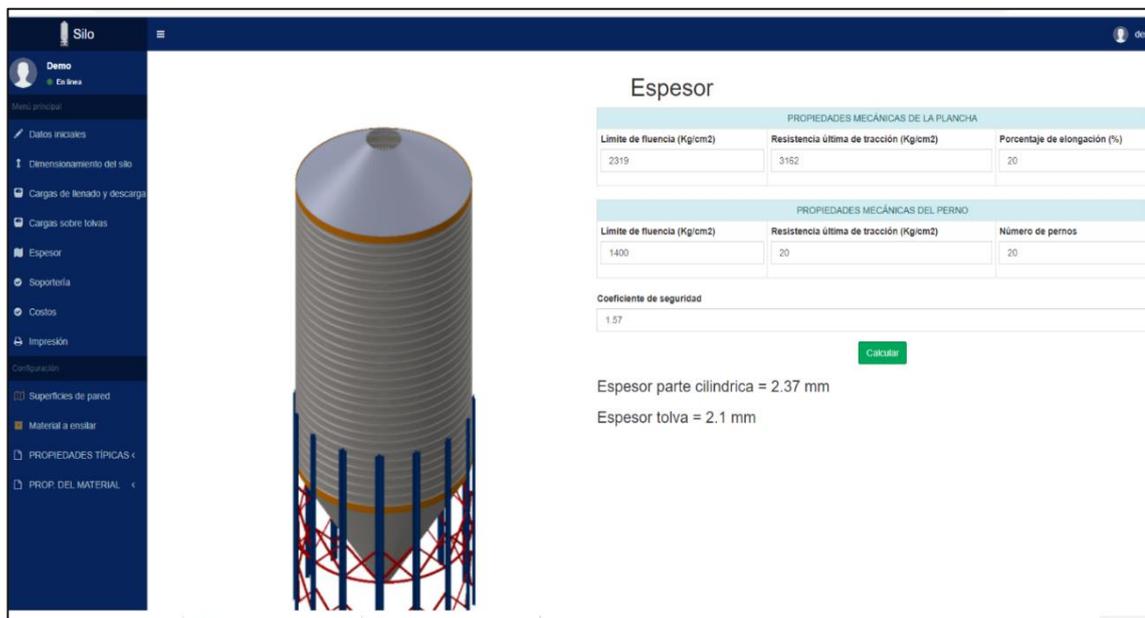


Figura 9-5: Determinación de espesor de la pared cilíndrica y la tolva

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

La opción *soportería*, permite visualizar el resumen del prediseño considerando los materiales a utilizar.



Figura 10-5: Resumen de material necesario para la construcción del silo.

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

Finalmente se presenta una estimación del costo que tendría la prefabricación del silo, esto permitirá al constructor tener una idea del precio.

Tabla 1-5: Costos directos del proyecto

MATERIALES				MANO DE OBRA				HERRAMIENTAS Y EQUIPOS								
Materiales	Cantidad	V.U. \$	V.Total \$	Trabajador	Cant.	Tiempo en horas	Costo hora	V. Total \$	Maquinaria	Costo hora	Horas de uso	V.Total \$				
Planchas galvanizadas	60	<input type="text" value="75"/>	4500	Mecánico	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="120"/>	<input type="text" value="3.7"/>	900	Oxicorte	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="25.2"/>	504				
Pernos	10242	<input type="text" value="0.3"/>	3072.6	Ayudante	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="120"/>	<input type="text" value="2.7"/>	660	Dobladora	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="21"/>	315				
Soporteria	15	<input type="text" value="75"/>	1125	SUBTOTAL 2				1560	Roladora	<input type="text" value="18"/>	<input type="text" value="17.64"/>	317.52				
Boca de ingreso	1	<input type="text" value="200"/>	200	TRANSPORTE				Servicio	Costo	Cantidad de viajes	V.Total \$	Herramientas	<input type="text" value="390"/>	390		
Boca de salida	1	<input type="text" value="200"/>	200	Transporte de personal	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="10"/>		300	Transporte de materiales	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="20"/>	40	Compresor	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="5"/>	25
SUBTOTAL 1			9097.6	SUBTOTAL 4				340	SUBTOTAL 3				1551.52			

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

Tabla 2-5: Costos indirectos y totales del proyecto

COSTO TOTAL DIRECTO			
Subtotal 1			9097.6
Subtotal 2			1560
Subtotal 3			340
Subtotal 4			1551.52
TOTAL			12549.12
Costos indirectos			
INGENIERIL	12549.12	5 %	627.456
UTILIDAD	12549.12	30 %	3764.736
IMPREVISTOS	12549.12	5 %	627.456
TOTAL			5020
COSTO TOTAL			
Costo directo			12549.12
Costo indirecto			5020
TOTAL			17569
IMPRIMIR			

Realizado por: Alex Chauca, captura de aplicación informática

5.2 Manual de seguridad, operación y mantenimiento

Es una indispensable que el propietario del silo capacite al operador, dando a conocer los riesgos existentes y las precauciones que se deben tomar antes, durante y después de su uso. De acuerdo a la (STORMOR-mfs, 2015) se indica lo siguiente.

5.2.1 Manual de seguridad

Es responsabilidad del operario verificar que el área de trabajo este despejada, es decir solo se encuentre el personal autorizado, además debe mantener limpia y ordenada el área durante la operación.

5.2.1.1 Seguridad de mantenimiento

- Al reemplazar un perno o tuerca se debe hacer por un elemento de las mismas características del original.
- Realice un registro de la inspección y el mantenimiento regulares y anuales.

- Las calcomanías de seguridad deben mantenerse limpias y legibles siempre, caso contrario deben ser reemplazadas.
- Las calcomanías de seguridad reemplazadas deben tener la misma señalética que la original.
- Realice el mantenimiento en horas de mañana.

5.2.1.2 Seguridad operacional

- Inspeccione regularmente la calidad del grano, en caso de que el almacenamiento sea por un periodo prolongado.
- Luego de cada inspección, cierre la tapa, para impedir que otras personas ingresen al silo.
- Trabaje con al menos otra persona cuando realice el mantenimiento del silo.
- No llene el silo en exceso, a fin de evitar el contacto con el techo.
- No utilice la escalera si esta dañada, mojada o grasosa, verifique siempre que los pernos estén bien apretados.

5.2.2 Manual de operación

5.2.2.1 Previo a la utilización del silo

Es necesario considerar lo siguiente:

- Que el silo cuente con todos los pernos y que estos tengan el apriete necesario.
- Que los accesorios estén asegurados en su lugar.
- Que las zonas alrededor del silo estén despejadas y limpias.

5.2.2.2 Llenado del silo

Es importante verificar:

- Que el interior del silo este completamente desocupado, es decir no haya nadie antes de iniciar el ensilado.
- Que la compuerta de descarga este cerrada.

- La carga del material a almacenar debe realizarse por la abertura central, es decir concéntrico al eje vertical del silo.



Figura 11-5: Llenado recomendado de un silo

Fuente: (STORMOR-mfs, 2015)

- El llenado del silo se debe realizar por debajo del alero del techo.



Figura 12-5: Carga excesiva del silo

Fuente: (STORMOR-mfs, 2015)

5.2.2.3 *Uso y almacenamiento*

- El operador debe ser capacitado para el uso del silo.
- Debe existir salidas de aire que permitan reducir la cantidad de condensación que ocurre en el interior del silo (techo).

- Se debe verificar periódicamente las salidas de aire, a fin de que no se tapen por partículas durante el llenado.
- El silo está diseñado para almacenar granos con un peso específico de $7 \frac{kN}{m^3}$, por lo que no puede ensilar materiales con un peso específico superior o pulverizados debido que producirán fallas en la estructura.
- Se puede almacenar solo granos secos con una humedad que no exceda el 15%, ya que un grano con una humedad superior no fluirá con facilidad y puede ser el causante de otros problemas.
- Por ningún motivo ingrese al silo durante el llenado o la descarga.

5.2.2.4 *Descarga del silo*

- Abrir primero la compuerta de descarga, el producto descenderá por gravedad.
- Verificar que el silo cuente con salidas de aire a fin de evitar daños en techo a consecuencia del vacío que se genera al iniciar la descarga.
- Si ocurre un bloqueo en la descarga, evitar dar golpes en la estructura o peor aún ingresar al interior del silo, en ese caso consulte con INNOMECC.

5.2.3 *Manual de mantenimiento*

(STORMOR-mfs, 2015), indica que la oxidación limita la vida útil de un silo, por consiguiente, se considera la utilización de planchas galvanizadas para su construcción. Dentro de los aspectos a considerar en el mantenimiento, se considera los siguientes:

- No permita el almacenamiento de granos con una humedad elevada, o la acumulación en determinado sector del silo, puesto que conforme estos materiales orgánicos se deterioren, producen ácidos que pueden deteriorar el recubrimiento galvanizado.
- En épocas de lluvia, controle que no exista acumulación de agua lluvia en las superficies horizontales.
- Cuando por falta de inspección, en algún momento detecta corrosión en la estructura, realice una preparación de superficie de la parte afectada para luego aplicar un primer, posterior a ello un esmalte a fin de detener la corrosión.
- Luego de cada descarga y antes de la carga revise que no exista acumulación de material en el interior del silo.

Además, se debe controlar periódicamente:

- El deterioro o flojedad de cualquier perno que forma parte de la estructura.
- El funcionamiento correcto de las aberturas del silo, tales como tapa del techo y compuerta de descarga.
- La fijación de la escalera interna y externa.
- El estado interno y externo de las paredes, fondo y techo del silo, así como también de la soportaría.
- La limpieza de los filtros de las salidas de aire en el techo.

Es importante usar calcomanías de advertencia, deben estar ubicadas correctamente y ser reemplazadas cuando estén ilegibles.

CONCLUSIONES

- Con la aplicación de las normas EN 1991-4:2011, (AS-3774, 1996), (ASCE-7, 2010), (ANSI/AISC-360, 2010), (NEC, 2014) se elaboró una metodología de diseño de silos de esbeltez media, la cual toma en consideración los requerimientos establecidos por el cliente mediante la casa de la calidad QFD, permitiendo tener una estructura funcional al dimensionar la estructura de acuerdo a las especificaciones técnicas mediante un diseño de materialización mismo que permitió la obtención de planos del conjunto.
- Al aplicar el método de elementos finitos para la validación del diseño se determinó que la combinación descarga + sismo + viento es la más crítica, obteniendo un esfuerzo de von Mises máximo de 272 MPa, pero se da en la conexión donde la resistencia elástica del perno es de 896 MPa con lo cual se garantiza el óptimo funcionamiento de la estructura, además se halló que la deformación máxima es de 0.026 m y se da en el ingreso del silo.
- Durante el análisis de pandeo de la estructura se verifica que el factor load multiplier es 1.4007 con lo cual quiere decir que puede resistir 40% más del peso total de la estructura para empezar a pandearse.
- La aplicación informática permitió realizar el prediseño de un silo de esbeltez media considerando las especificaciones de acuerdo a la norma EN-1991-4:2011, dando como resultado la cantidad de material necesario para la construcción, así como también un costo aproximado que permite al usuario tener una idea del costo.
- Se logró una optimización del material durante la construcción al utilizar los planos de conjunto los cuales permiten dimensionar de manera correcta los trazos para el corte de las planchas a utilizarse en la tolva y tapa del silo, además el dimensionamiento permitió evitar cortes en las planchas durante el ensamble de cada anillo ya que el diámetro está seleccionado para emplear 6 planchas completas.

RECOMENDACIONES

- La aplicación informática está programada para el prediseño de silos con entrada y descarga concéntrica, mediante una tolva cónica contemplando el uso de planchas de acero galvanizado completas para evitar el desperdicio de material, por lo que se recomienda utilizar dimensiones de materiales que se encuentren en el mercado, así como también revisar la información para silos excéntricos y poder completar esta aplicación.
- Para garantizar el análisis por elementos finitos con ANSYS se recomienda realizar un estudio de convergencia para obtener un refinamiento de la malla.
- Para prolongar la vida útil de los silos al ser instalados en zonas costeras o expuestas a lluvia ácida se recomienda realizar enjuagues periódicos de las superficies externas con agua dulce, mientras que para la cimentación se recomienda realizar un estudio de suelos para verificar las condiciones que tiene y conforme a los datos obtenidos poder hacer un diseño de la cimentación.

GLOSARIO

Carga muerta. - están constituidas por el peso de todos los elementos fijos de la parte estructural, escaleras, máquinas o equipos integrados de forma permanente a la estructura

Cargas vivas. - son cargas variables, debido a todos los materiales, equipos y todos los elementos móviles soportados por la estructura.

Ductilidad. – es la capacidad de sobrellevar sin FALLA grandes deformaciones, como la fuente mayoritaria de liberación de energía de un conjunto estructural. (Reyes, 2013)

Flujo de canal. - se forma un canal o cono en el centro de la masa que se desplaza hacia la salida, mientras el resto del material permanece inmóvil junto a la pared, provocando un flujo variable con el paso del tiempo.

Flujo másico. – se da cuando todo el material almacenado se pone en movimiento simultáneamente, bajo el principio “first in – first out”; alrededor de la salida aumenta la velocidad del material.

Silo. - estructura cilíndrica o prismática, de paredes verticales que pueden utilizarse para almacenar materia granular o pulverizada en cantidades variables, para evitar el contacto directo con el ambiente.

Tolva. – es un depósito con paredes inclinadas situado en la parte inferior del cuerpo del silo, de forma tronco cónicas o tronco piramidal, su dimensionamiento depende del método de descarga y la capacidad de almacenamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- ACESCO. (2019). *Ficha Técnica Acero Recubierto Galvanizado y Pre Pintado* .
- ANSI/AISC-360. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- AS-3774. (1996). *Loads on bulk solids containers*. Australia: Standards Association of Australia.
- ASCE-7. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*. Virginia.
- Ayuga, F. (1995). *Los empujes del material almacenado en silos*. Madrid: Informe de la Construcción, Vol. 46.
- Carson, J. (2000). *Silo Failures: Case Histories and Lessons Learned*.
- Carson, J. (2015). Silo design codes: Their limits and inconsistencies. *Procedia Engineering*, 647-656.
- Ccarita, F. (2011). *Diseño de silo*. Pontifica Universidad Catolica del Peru.
- Cigarruista, H. (marzo de 2016). *El Capital Financiero.com*. Obtenido de <https://elcapitalfinanciero.com/ima-invertira-en-silos-de-almacenamiento/>
- CPE-INEN-008. (2013). *Código de practica para silos cilíndricos de metal para almacenamiento de granos forrajeros*. Quito.
- CRIBA. (2018). Obtenido de <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo13.pdf>
- ESSS. (2020). *ESSS*. Obtenido de <https://www.esss.co/es/>
- Estrual. (2017). *Diseño y cálculo de silos metálicos*. Madrid: Ediciones Tecnicas.
- Fellet, J. (30 de 08 de 2018). *BBC News Brasil*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-45343727>

- Fernández, P. (30 de Julio de 2013). *Silos Cordoba*. <https://siloscordoba.com/es/blog-es/almacenaje-de-grano/ventajas-de-silo-metalico-frente-al-silo-de-hormingon-para-almacenar-grano/>
- Gallego, E. (2006). *Simulación de empujes del material almacenado en silos con modelos de comportamiento del material no elásticos*. Madrid.
- Gonzalez, M. (s.f.). *Academia*. [https://www.academia.edu/20014612/INFORMACION DE PROPIEDADES DE ACERO GALVANIZADO](https://www.academia.edu/20014612/INFORMACION_DE_PROPIEDADES_DE_ACERO_GALVANIZADO)
- Ismail BOGREKCI, H. S. (2018). *Structural analysis of corn silo by computing vertical and lateral forces*. Issue III.
- Llano_Tv, N. (23 de Septiembre de 2020). Nuestro Llano Tv.
- MAG. (julio de 2020). *Ministerio de agricultura y ganadería*. <https://www.agricultura.gob.ec/sistema-silos-bolsa-se-implemento-en-planta-de-portoviejo/>
- Mahmound. (1975). Finite Element Anlysis of Deformation and Stress. *ASAE Paper*, 451.
- NEC. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Ravenet, J. (1977). *silos*. Barcelona: Editores Tecnicos asociados, S.A.
- Reyes, C. (2013). *Analisis de falla en cimentaciones para silos*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Riba, C. (2002). *Diseño Concurrente*. Barcelona: EDICIONS UPC.
- Rotter, J. M. (2009). *Silos and tanks in research and practice: state of the art and current challenges*. Valencia: Alberto DOMINGO and Carlos LAZARO (eds.).
- Rotter, M. (2008). *Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation*. McGlinchey.

- Saez, E. (26 de 10 de 2017). *Construcción Pan-Americana*. <https://www.construccion-pa.com/noticias/america-latina-la-mayor-cantidad-fallas-infraestructura-se-vinculan-al-diseno/>
- Sharhan, H. (2012). Stress Concentrations in Elevated Steel Storage Tanks and Silos. *Structures Congress ASCE 2012*.
- STORMOR-mfs. (2015). *Hopper Bin - Construction, Owner's, and Operator's Manual*. Nebraska: Global Industries, INC.
- UNE-EN-1991-4. (2011). *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos*. Madrid: AENOR.
- UNE-EN-1993-1-1. (2005). *Eurocódigo 3: Diseño de estructuras de acero - Parte 1-1: Reglas generales*. MADRID: AENOR.
- UNE-EN-1993-4-1. (2007). *Eurocódigo 3 - Diseño de estructuras de acero - Parte 4-1: Silos*. MADRID: AENOR.
- Yáñez, Á. C. (2001). ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES ESTÁTICAS EN SILOS CILÍNDRICOS CON TOLVA EXCÉNTRICA MEDIANTE EL M. E. F. INFLUENCIA DE LA EXCENTRICIDAD Y COMPARACIÓN CON EL EUROCÓDIGO 1. *Informes de Construcción*.

ANEXOS

ANEXO A. Encuesta

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
ESCUELA DE POSGRADO
ENCUESTA

Dirigido a propietarios de almacenes de.

Fecha:

Empresa:

Cargo:

En las siguientes preguntas, seleccione la opción que a su criterio sea la adecuada.

1. ¿Qué grano va a almacenar?

Trigo Maíz Semita

2. ¿Qué geometría debe tener el cuerpo del silo?

Circular Cuadrada Hexagonal

3. ¿Qué posición debe tener el silo?

Horizontal Vertical

4. ¿La base del silo debe ser?

Cónica Piramidal

5. ¿La altura del silo debe ser?

Baja Mediana Alta

6. ¿El silo debe ser?

Empernado Soldado

7. ¿De qué material debe ser el silo?

Hormigón Acero Madera

8. ¿La capacidad de almacenamiento del silo es?

25-50 toneladas 50-75 toneladas 75-100 toneladas

9. ¿Qué costo debe tener el silo?

Accesible Costoso Muy costoso

10. ¿La cubierta del silo debe ser?

Cónica Semi esférica Semi elíptica Toricónica

11. ¿Cuál es el mantenimiento correcto para elevar la vida útil del silo?

Diario Semanal Mensual Anual

12. ¿Cree que el silo debe reunir características que indican normas internacionales?

Si No

13. ¿Cómo cree que es la calidad de un silo fabricado en Ecuador en comparación con los del exterior?

Inferior Igual Superior

14. ¿Qué criterio tiene de la tecnología ecuatoriana para fabricar silos?

Mala Regular Buena Excelente

En las siguientes características para adquirir o comprar un equipo, califique según su grado de importancia del 1 al 5 las siguientes características.

- Tamaño
- Fácil descarga
- Resistente
- Fácil de construir
- Ocupe poco espacio

- Costo
- Mantenimiento
- Capacidad
- Seguridad
- Estético

ANEXO B. Tablas utilizadas en el diseño

Tabla 1-A: Definiciones de las superficies de pared

Categoría	Título descriptivo	Materiales de la pared típicos
D1	Rozamiento bajo clasificado como "Deslizante"	Acero inoxidable laminado en frío Acero inoxidable pulido Superficie con un revestimiento para bajo rozamiento Aluminio pulido Poliétileno de peso molecular ultraelevado ^a
D2	Rozamiento moderado clasificado como "Liso"	Acero dulce liso (construcción soldada o atornillada) Acero inoxidable terminado con fresa Acero al carbono galvanizado Aluminio oxidado Superficie con un revestimiento para resistencia frente a la corrosión o el desgaste abrasivo
D3	Rozamiento elevado clasificado como "Rugoso"	Hormigón encofrado, hormigón enfoscado u hormigón envejecido Acero al carbono envejecido (oxidado) Acero resistente a la abrasión Piezas cerámicas
D4	Irregular	Paredes onduladas horizontalmente Chapa nervada con nervios horizontales Paredes especiales con grandes anomalías
NOTA Los títulos descriptivos de esta tabla se dan en términos de rozamiento más que de rugosidad porque hay una mala correlación entre las medidas de la rugosidad y la medida del rozamiento con la pared entre un sólido granular deslizante y la superficie.		
^a Se debería considerar cuidadosamente en estos casos el efecto de la rugosidad de las partículas que se incrustan dentro de la superficie.		

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

Tabla 2-A: Propiedades de los materiales a ensilar

Tipo de sólido disgregado ^{d,e}	Peso específico ^b		Ángulo de talud natural		Ángulo de rozamiento interno			Coeficiente de presiones laterales		Coeficiente de rozamiento con la pared ^c				Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas C_{op}
	γ		ϕ		ϕ			K		μ ($\mu = \tan \phi_w$)				
	γ_i	γ_s	ϕ	ϕ_m	a_ϕ	K_m	a_K	Tipo de pared D1	Tipo de pared D2	Tipo de pared D3	a_μ			
	Inferior	Superior		Medio	Coeficiente	Medio	Coeficiente	Medio	Medio	Medio	Coeficiente			
	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		
Pensos 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 †.

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

Tabla 3-A: Característica de los materiales a ensilar

Material	Rango de cada propiedad				
	Tamaño	Fluidez	Abrasión	Corrosión	Rango de explosión
Aluminio	S2	F2	A3	C1	E2
Cebada	S3	F1	A3	C1	E2
Cemento	S1	F2	A2		
Clinker de cemento	S4	F2	A3		
Carbon	S3/S4	F2/F3	A1/A2	C2	
Harina de trigo	S1	F3	A1/A2	C1	E2
Pallet de mineral de hierro	S3	F1	A3	C1	-
Cal (bien hidratada)	S2	F2	A1		-
Maiz	S3	F2	A2	C1	E2
Fosfatos	S2/S4	F2	A2/A3	-	-
Arena gruesa seca	S2	F1/F2	A3	-	-
Cuarzo	S2	F1/F2	A3	-	-
Azúcar	S2	F2/F3	A1	-	E2
Trigo	S3	F1	A2	C1	E2

Fuente: (AS-3774, 1996)

Tabla 4-A: Propiedades típicas de los materiales a ensilar

Propiedad del material	Descripción de rango de cada propiedad	Número de rango existente en cada propiedad
Tamaño	Polvo (partículas con diámetro inferior a 0,150 mm, $\varnothing < 150 \mu\text{m}$ - micrómetros)	S1
	Granular fino ($\varnothing < 3 \text{ mm}$)	S2
	Granular gruesa ($\varnothing < 12 \text{ mm}$)	S3
	Aterronato ($\varnothing > 12 \text{ mm}$)	S4
	Irregular	S5
Fluidez	Fluye de forma excelente	F1
	Fluye libremente	F2
	Fluye lento	F3
	Fluye muy lento	F4
Abrasión	No abrasivo	A1
	Medianamente abrasivo	A2
	Muy Abrasivo	A3
Corrosión	No corrosivo	C1
	Mediante corrosivo	C2
	Altamente corrosivo	C3
Riesgo de explosión de polvo	No es susceptible a explosión	E1
	Susceptible a la explosión	E2

Fuente: (AS-3774, 1996)

Tabla 5-A: Valores de “m” donde se presentan problemas durante la descarga

Valores de "m"	Flujo de vaciado
$m \geq 5$	Flujo estable, no se presentan problemas de formación de arcos o bóvedas
$5 > m \geq 4,21$	Flujo de vaciado libre y estable, no deben presentarse problemas de vaciado
$m < 4,21$	Formación de arcos y bóvedas frecuentes. El caudal de salida no es contante y puede interrumpirse frecuentemente. Además, también se pueden formar bóvedas en las paredes rectas verticales del silo, pero se rompen porque no pueden soportar el peso del material que gravita sobre estas bóvedas o arcos. Aparecen presiones laterales oscilaciones en las paredes del silo.

Fuente: (Jua16)

Tabla 6-A: Valores de las propiedades a usar en las evaluaciones de diferentes cargas en paredes

Objetivo:	Valor característico a adoptar		
	Coefficiente de rozamiento con la pared μ	Coefficiente de presiones laterales K	Ángulo de rozamiento interno ϕ
Para la pared vertical			
Presión normal máxima en la pared vertical	Menor	Mayor	Menor
Presión de tracción por rozamiento máxima en la pared vertical	Mayor	Mayor	Menor
Carga vertical máxima en la tolva o en el fondo del silo	Menor	Menor	Mayor

Fuente: (UNE-EN-1991-4, 2011)

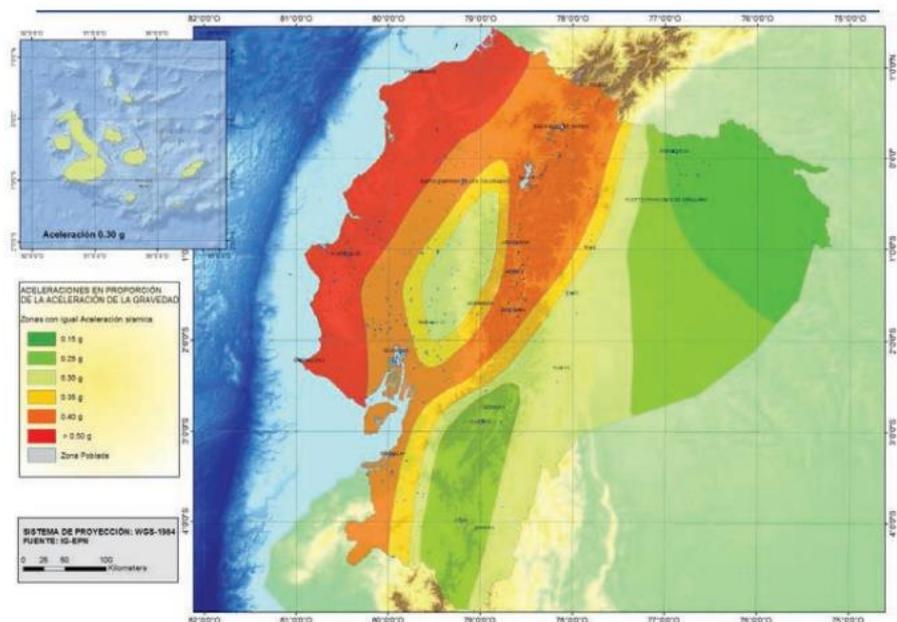


Figura 1-A1: Zonas sísmicas para para propósitos de diseño y valor z en Ecuador

Fuente: (NEC, 2014)

Tabla 7-A: Valores del factor z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor z	0.15	0.25	0.3	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: (NEC, 2014)

Tabla 8-A: Clasificación de los perfiles del suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50.0$ $\bar{S}_u \geq 100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{S}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$\bar{V}_s < 180 \text{ m/s}$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $\bar{S}_u < 50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2)$

Fuente: (NEC, 2014)

Tabla 9-A: Tipo de suelo y factor de sitio Fa

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1	0.85
F	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

Fuente: (NEC, 2014)

Tabla 10-A: Tipo de suelo y factor de sitio Fd

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

Fuente: (NEC, 2014)

Tabla 11-A: Tipo de suelo y factor del comportamiento inelástico del subsuelo Fs

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.4
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

Fuente: (NEC, 2014)

Tabla 12-A: Tipo de uso, destino e importancia de la estructura

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coeficiente I
Edificaciones esenciales	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1

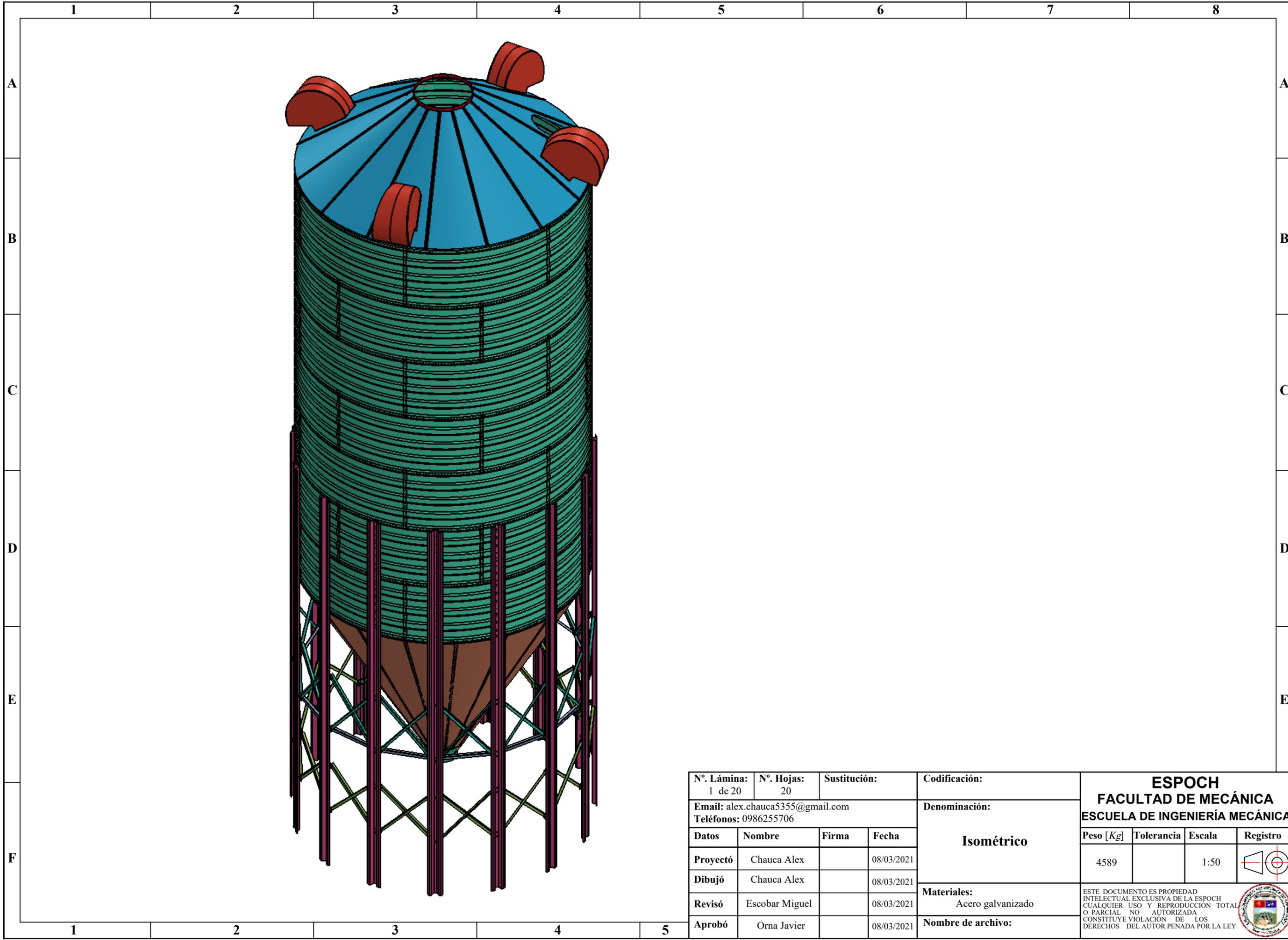
Fuente: (NEC, 2014)

Tabla 13-A: Valores del coeficiente de reducción de respuesta estructural R

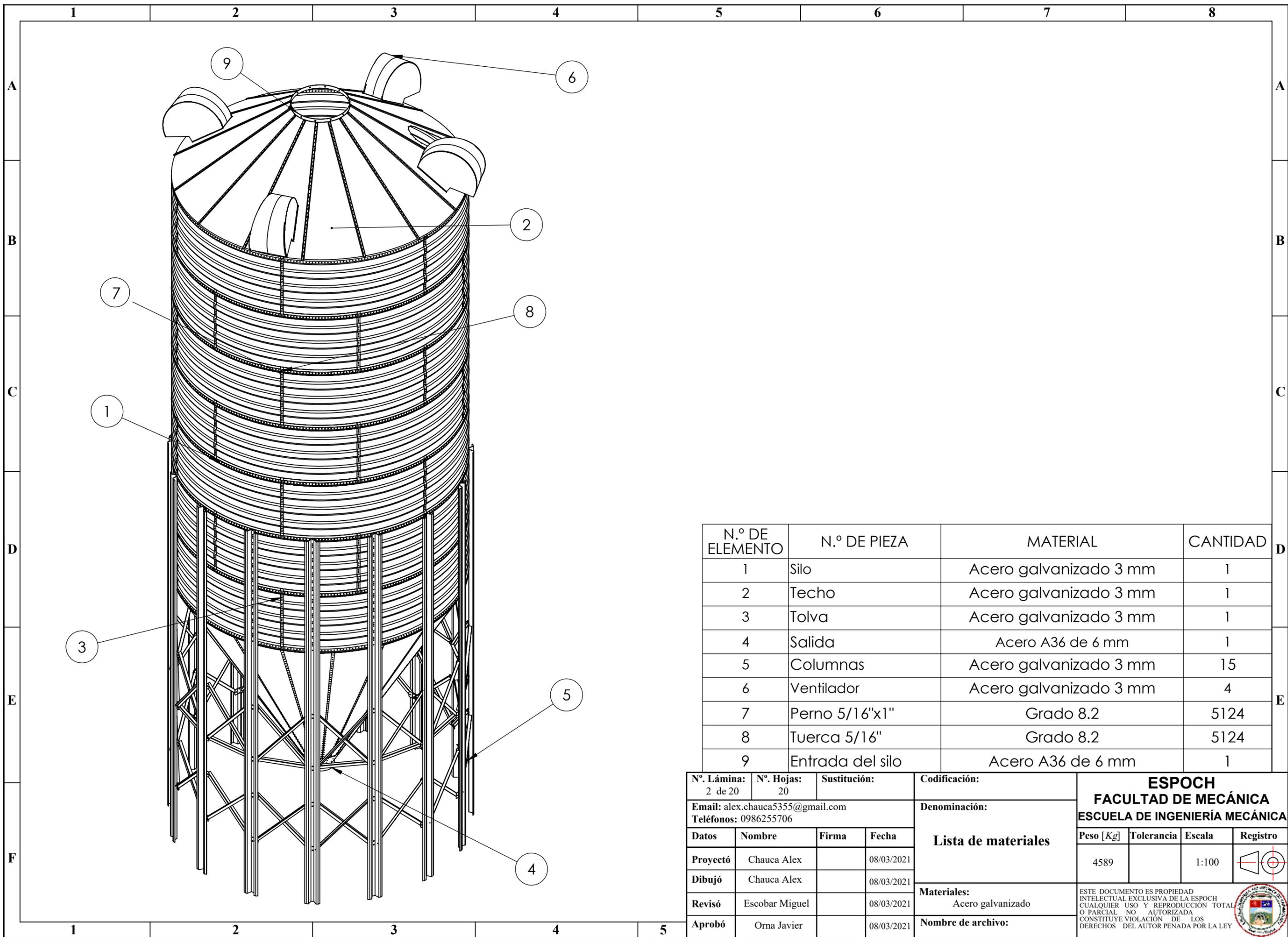
Reservorios y depósitos, incluidos tanques y esferas presurizadas, soportados mediante columnas o soportes arriostrados o no arriostrados.	2
Silos de hormigón fundido en sitio y chimeneas que poseen paredes continuas desde la cimentación	3.5
Estructuras tipo cantiléver tales como chimeneas, silos y depósitos apoyados en sus bordes	3
Naves industriales con perfiles de acero	3
Torres en armadura (auto-portantes o atirantadas)	3
Estructuras en forma de péndulo invertido	2
Torres de enfriamiento	3.5
Depósitos elevados soportados por una pila o por apoyos no arriostrados	3
Letreros y carteleras	3.5
Estructuras para vallas publicitarias y monumentos	2
Otras estructuras no descritas en este documento	2

Fuente: (NEC, 2014)

ANEXO C. Planos de construcción del silo

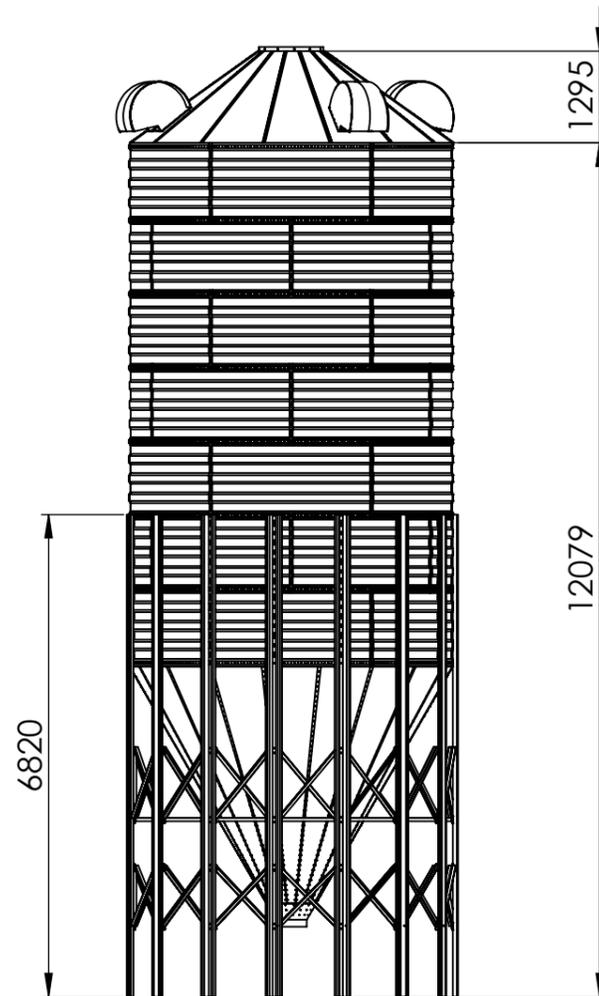
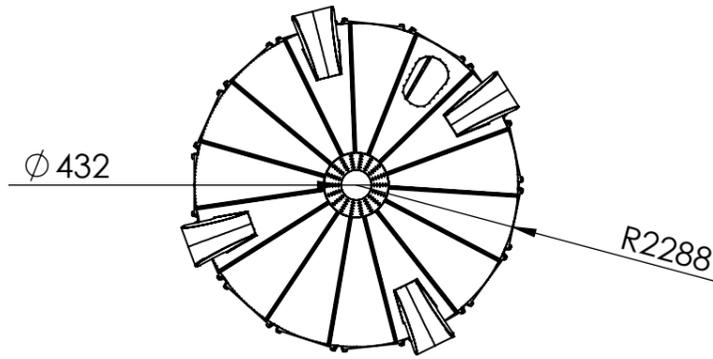


N°. Lámina: 1 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:					
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Isométrico				4589		1:50	
Proyectó	Chauca Alex		08/03/2021								
Dibujó	Chauca Alex		08/03/2021								
Revisó	Escobar Miguel		08/03/2021								
Aprobó	Orna Javier		08/03/2021								
Materiales: Acero galvanizado						ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY					
Nombre de archivo:											

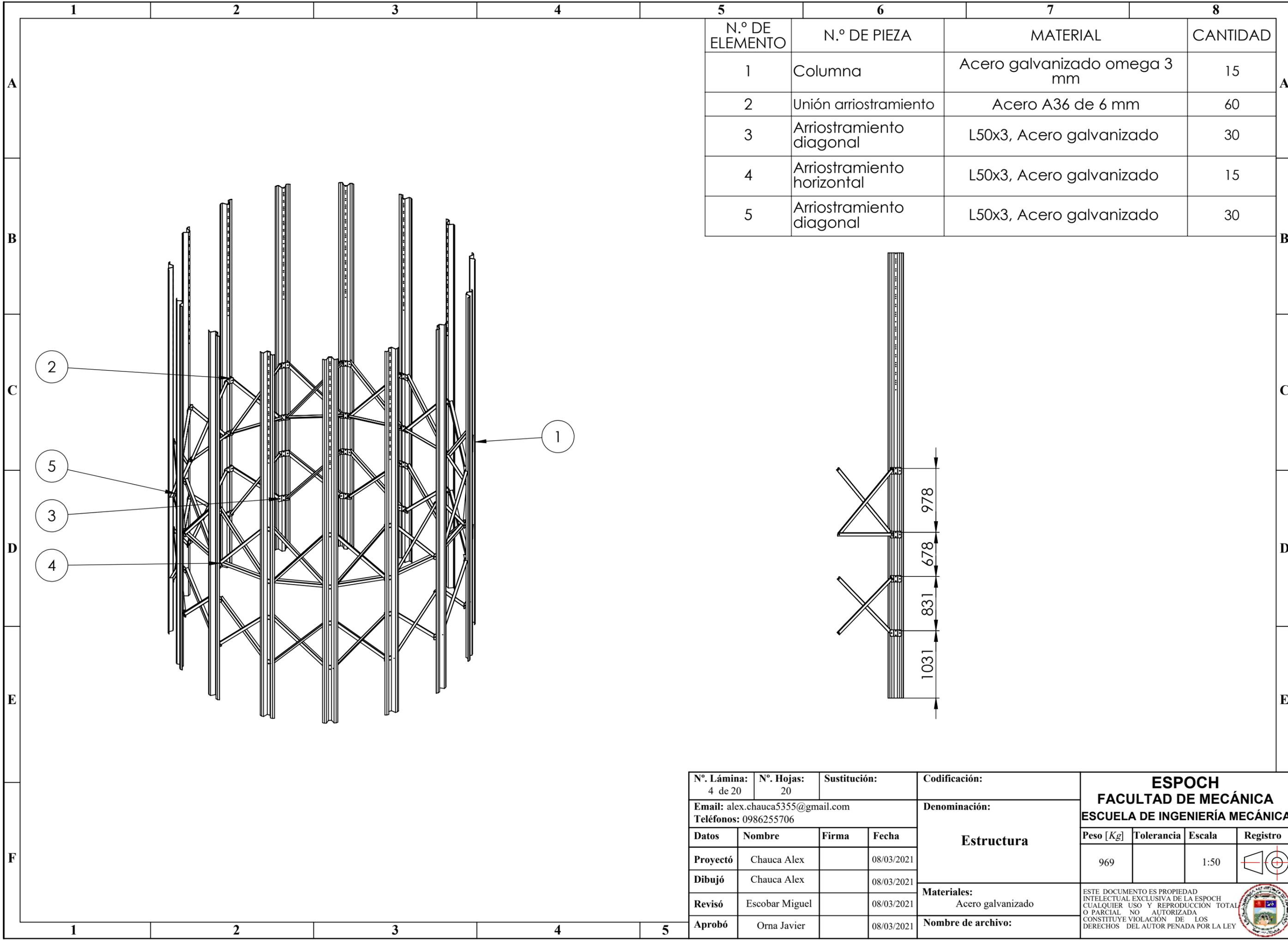


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	Silo	Acero galvanizado 3 mm	1
2	Techo	Acero galvanizado 3 mm	1
3	Tolva	Acero galvanizado 3 mm	1
4	Salida	Acero A36 de 6 mm	1
5	Columnas	Acero galvanizado 3 mm	15
6	Ventilador	Acero galvanizado 3 mm	4
7	Perno 5/16"x1"	Grado 8.2	5124
8	Tuerca 5/16"	Grado 8.2	5124
9	Entrada del silo	Acero A36 de 6 mm	1

N.º. Lámina: 2 de 20	N.º. Hojas: 20	Sustitución:	Codificación:	ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706			Denominación:				
Lista de materiales				4589		1:100	
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: Acero galvanizado		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY	
Proyectó	Chauca Alex		08/03/2021	Nombre de archivo:			
Dibujó	Chauca Alex		08/03/2021				
Revisó	Escobar Miguel		08/03/2021				
Aprobó	Orna Javier		08/03/2021				



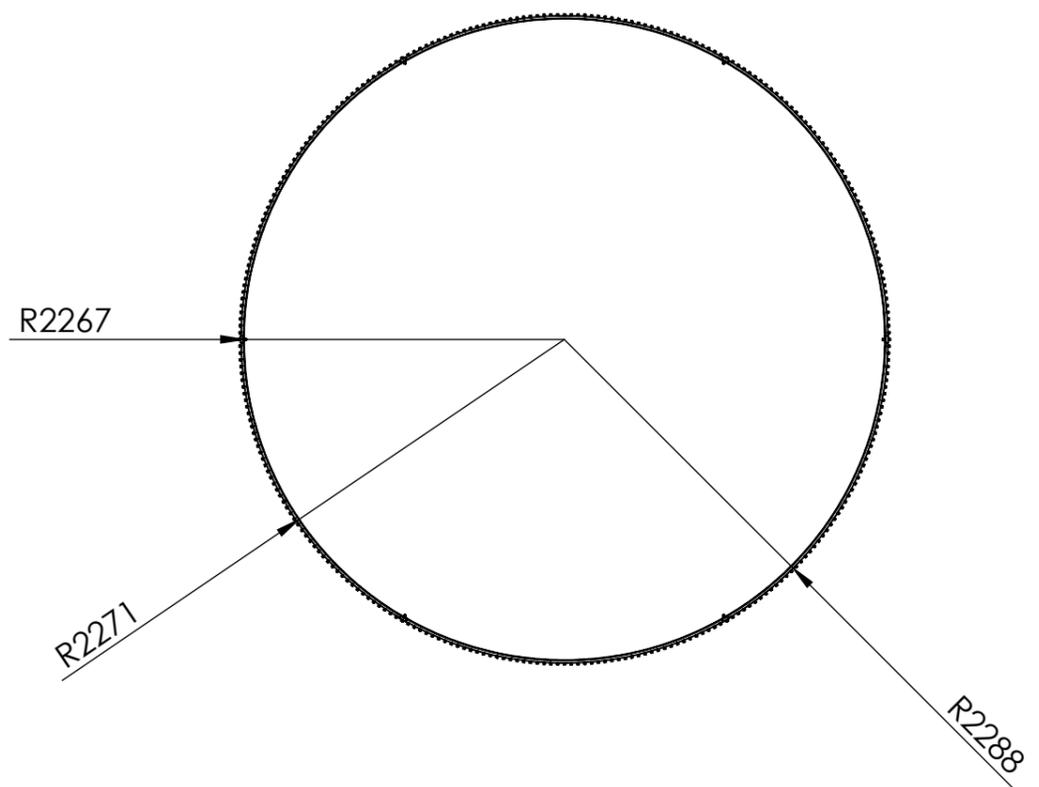
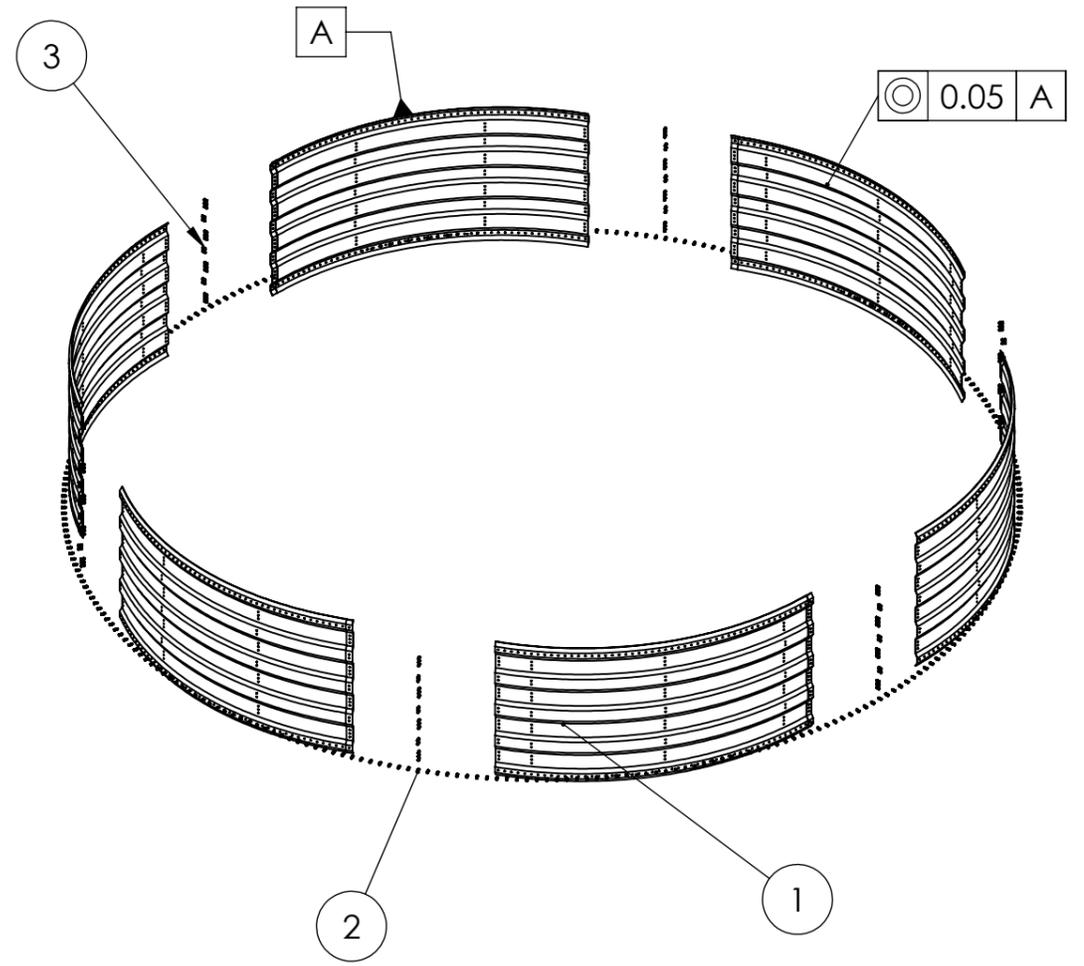
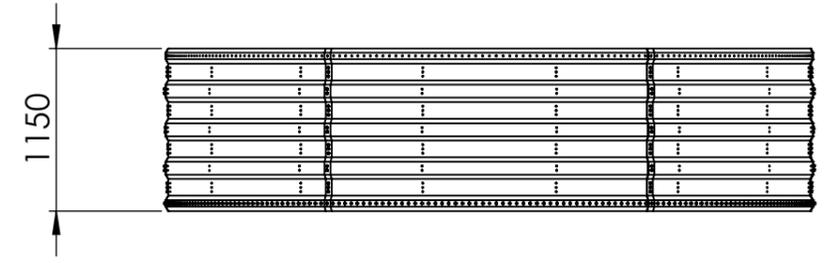
N°. Lámina: 3 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA											
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Ensamblaje				4589				1:100			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021													
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021													
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021													
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021													
						Materiales: Acero galvanizado		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY											
						Nombre de archivo:													



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	Columna	Acero galvanizado omega 3 mm	15
2	Unión arriostramiento	Acero A36 de 6 mm	60
3	Arriostramiento diagonal	L50x3, Acero galvanizado	30
4	Arriostramiento horizontal	L50x3, Acero galvanizado	15
5	Arriostramiento diagonal	L50x3, Acero galvanizado	30

Nº. Lámina: 4 de 20	Nº. Hojas: 20	Sustitución:	Codificación:	ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706			Denominación:					Peso [Kg]
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Estructura	969		1:50	
Proyectó	Chauca Alex		08/03/2021					
Dibujó	Chauca Alex		08/03/2021					
Revisó	Escobar Miguel		08/03/2021					
Aprobó	Orna Javier		08/03/2021	Materiales: Acero galvanizado	ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY			

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Lamina doblada	Acero galvanizado 3 mm	6
2	Tuerca 5/16"	Grado 8.2	408
3	Tuerca 5 16	Grado 8.2	408

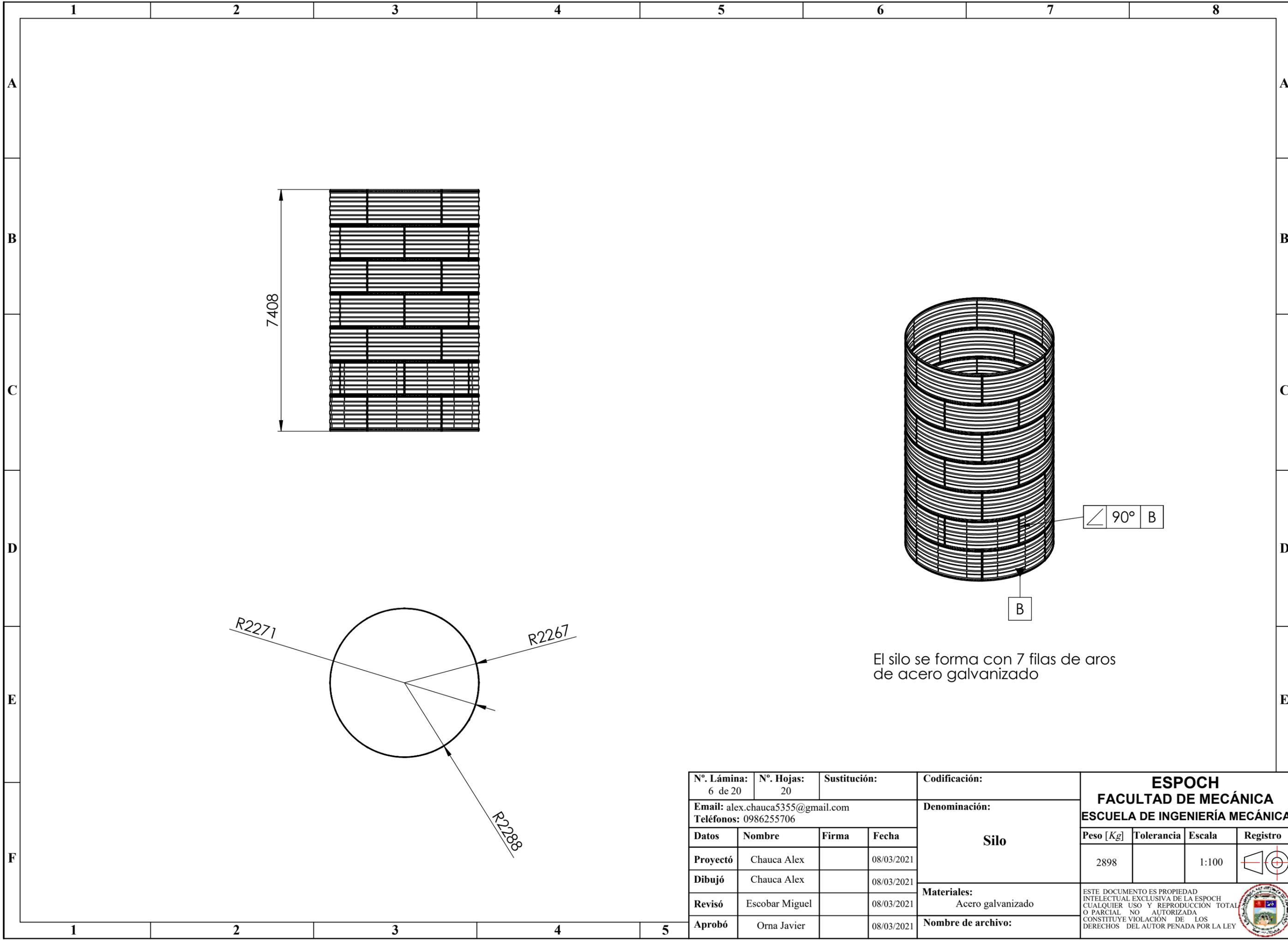


A
B
C
D
E
F

A
B
C
D
E
F

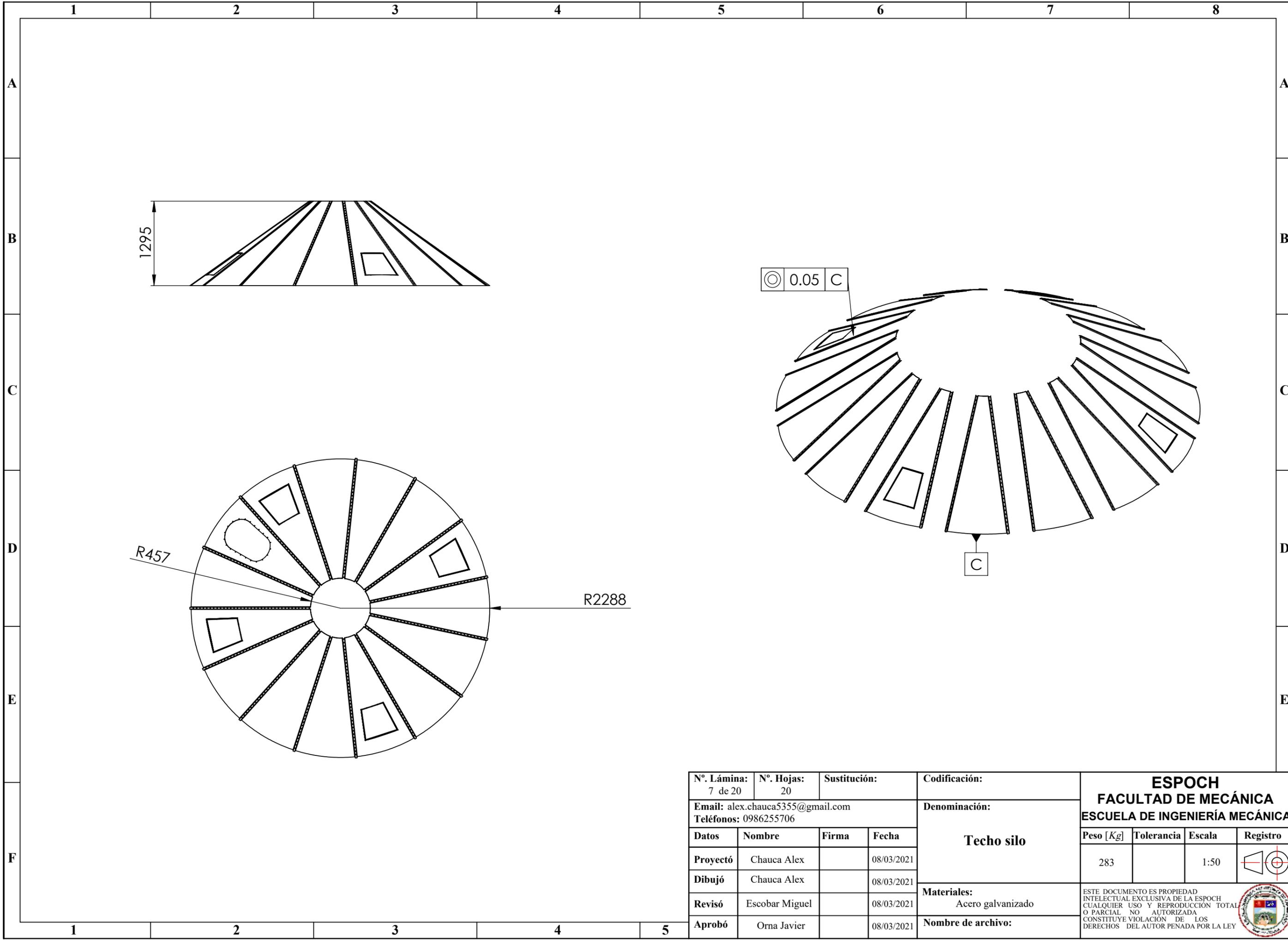
Nº. Lámina: 5 de 20		Nº. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA											
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Base silo				414				1:50			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021													
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021													
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021													
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021		Materiales: Acero galvanizado				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.							



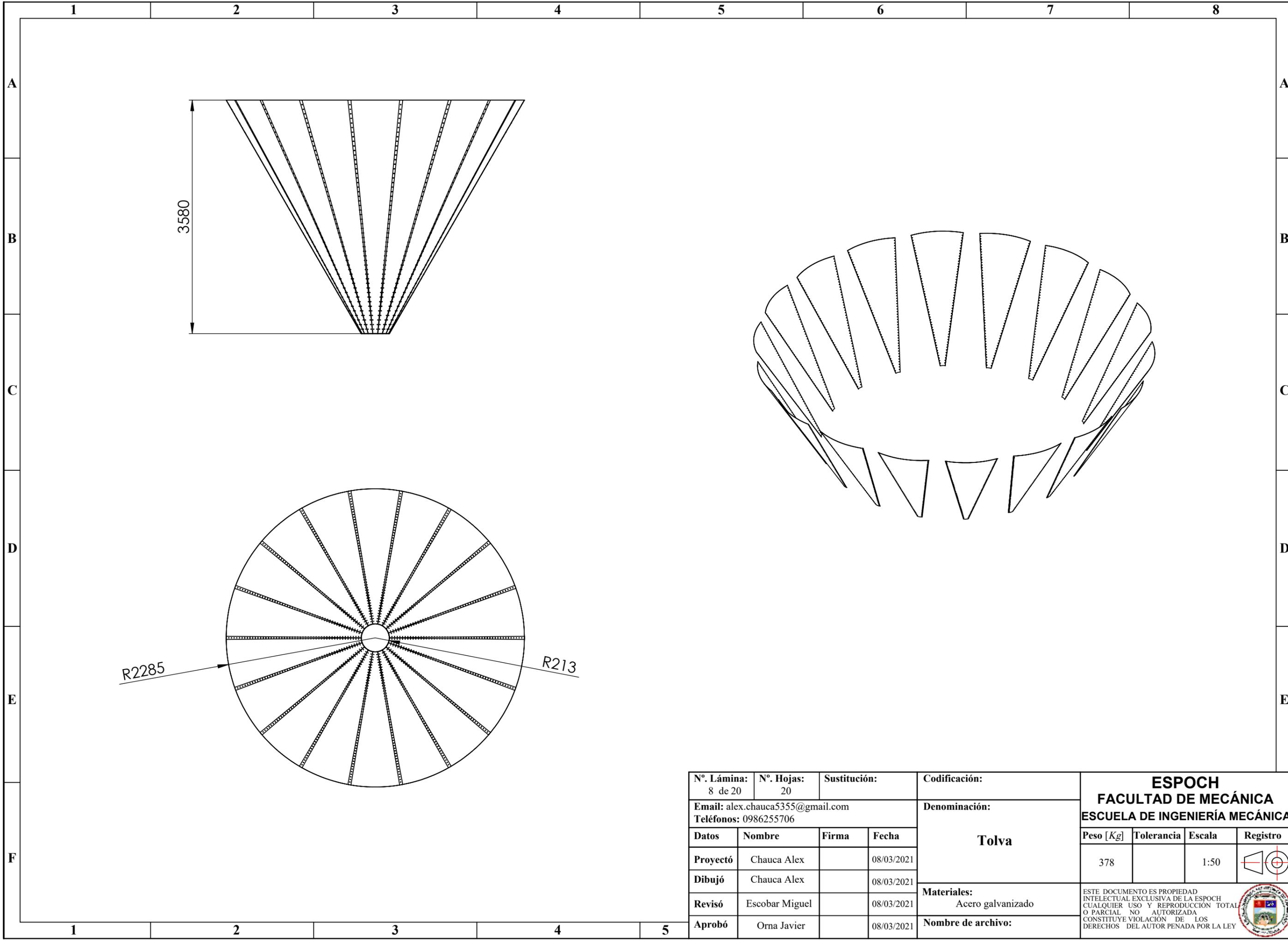


El silo se forma con 7 filas de aros de acero galvanizado

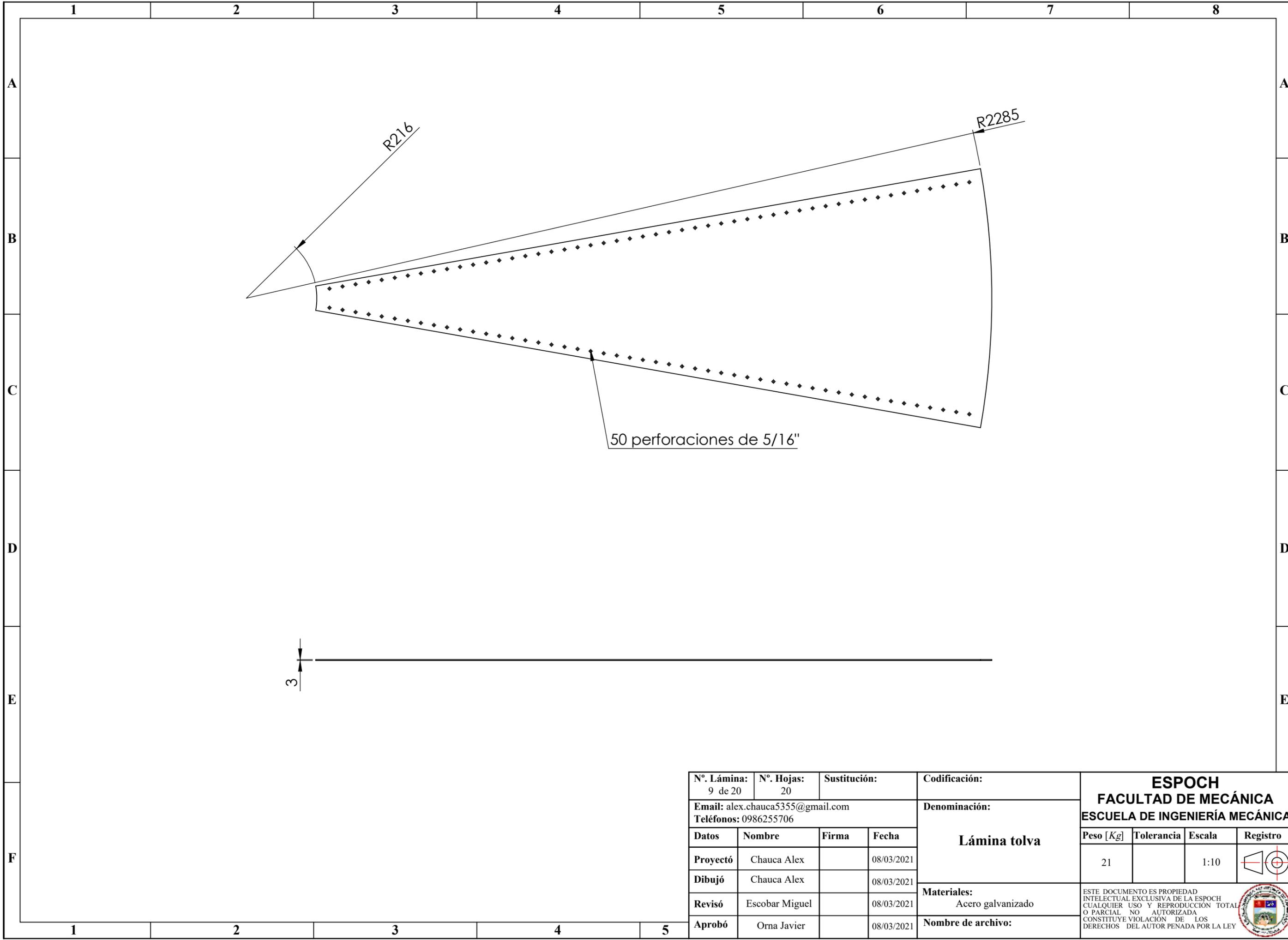
N°. Lámina: 6 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA									
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Silo				2898		1:100			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021						Materiales: Acero galvanizado		<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY</small>			
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021		Nombre de archivo:									
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021											
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021											



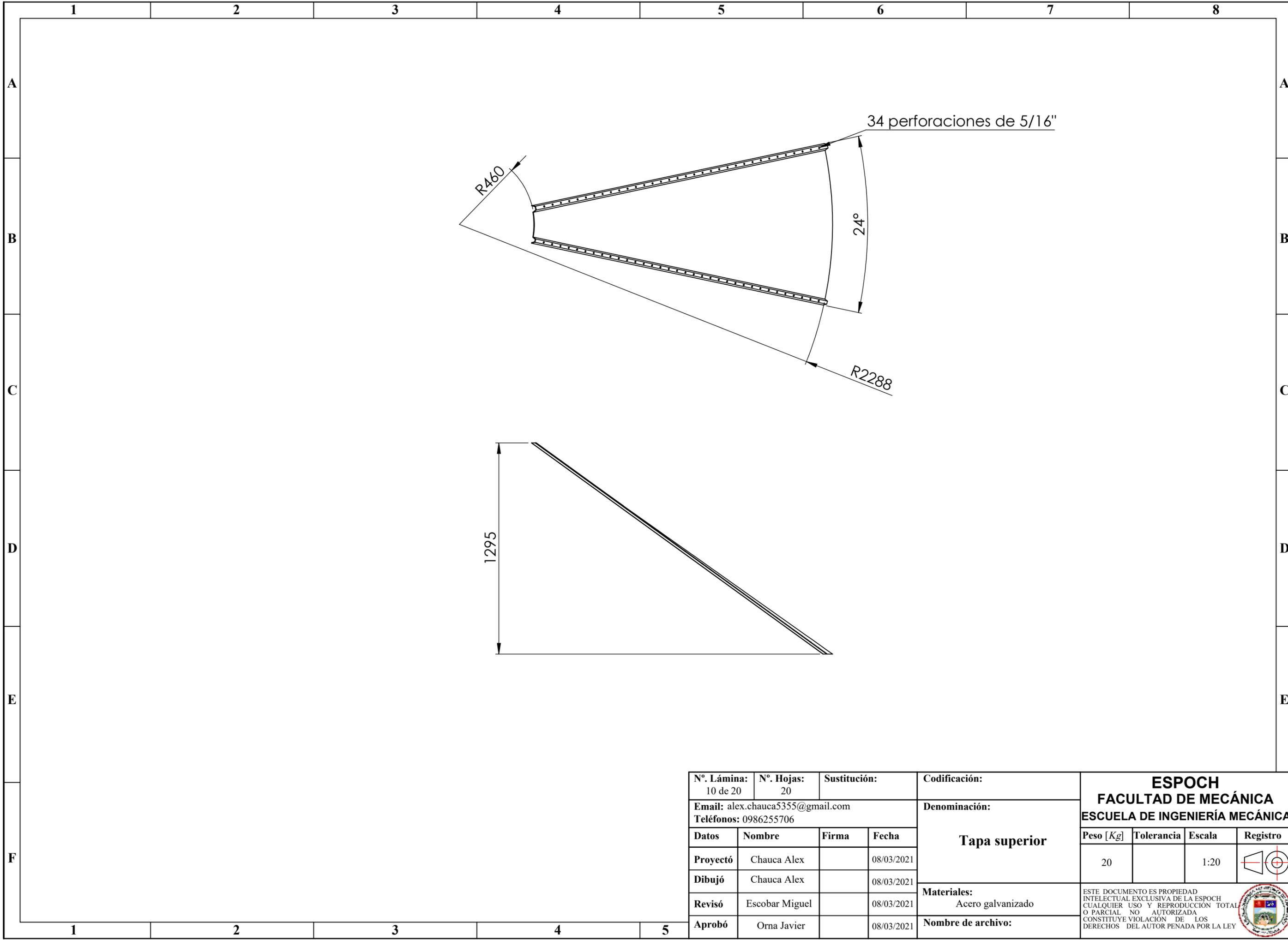
Nº. Lámina: 7 de 20		Nº. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA											
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Techo silo				283				1:50			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021						Materiales:		Acero galvanizado		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY			
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021		Nombre de archivo:											
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021													
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021													

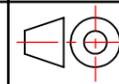


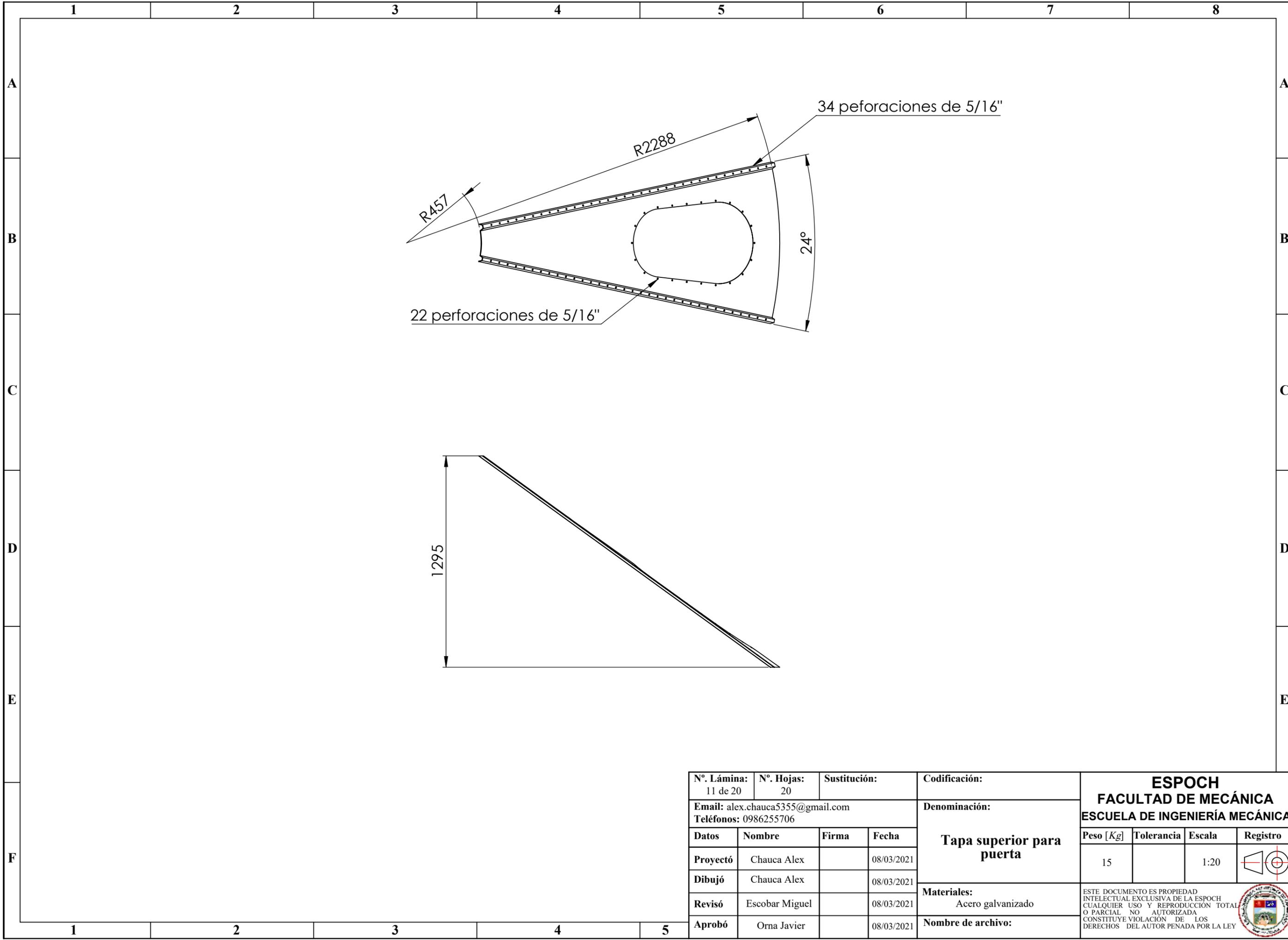
Nº. Lámina: 8 de 20		Nº. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706				Denominación: Tolva							
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: Acero galvanizado				378		1:50	
Proyectó	Chauca Alex		08/03/2021								
Dibujó	Chauca Alex		08/03/2021								
Revisó	Escobar Miguel		08/03/2021								
Aprobó	Orna Javier		08/03/2021	Nombre de archivo:				<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY</small>			



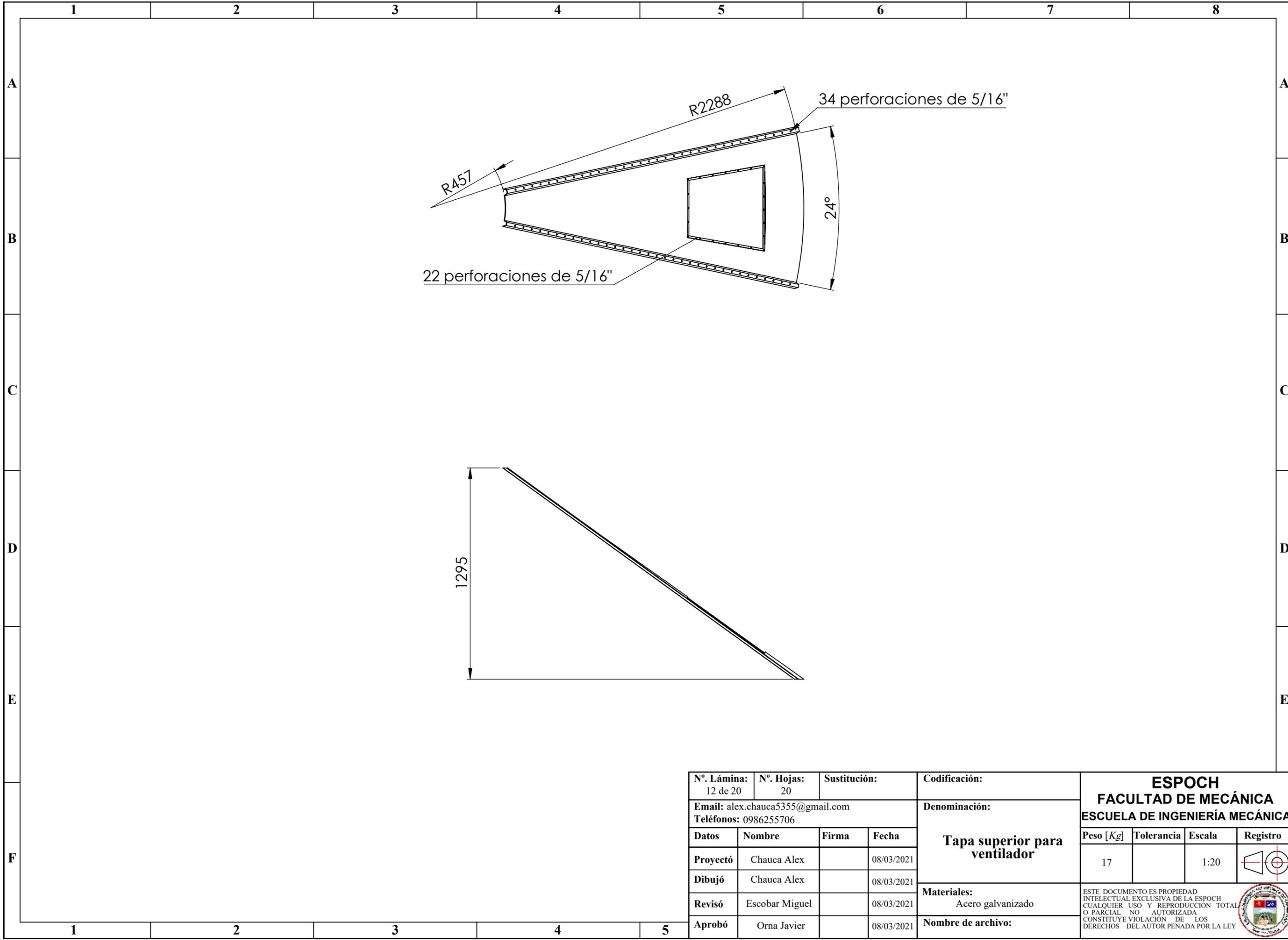
N°. Lámina: 9 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706				Denominación:							
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Lámina tolva Peso [Kg] Tolerancia Escala Registro 21 1:10			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021					
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY			
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021					
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021					
Materiales:				Nombre de archivo:							
Acero galvanizado											



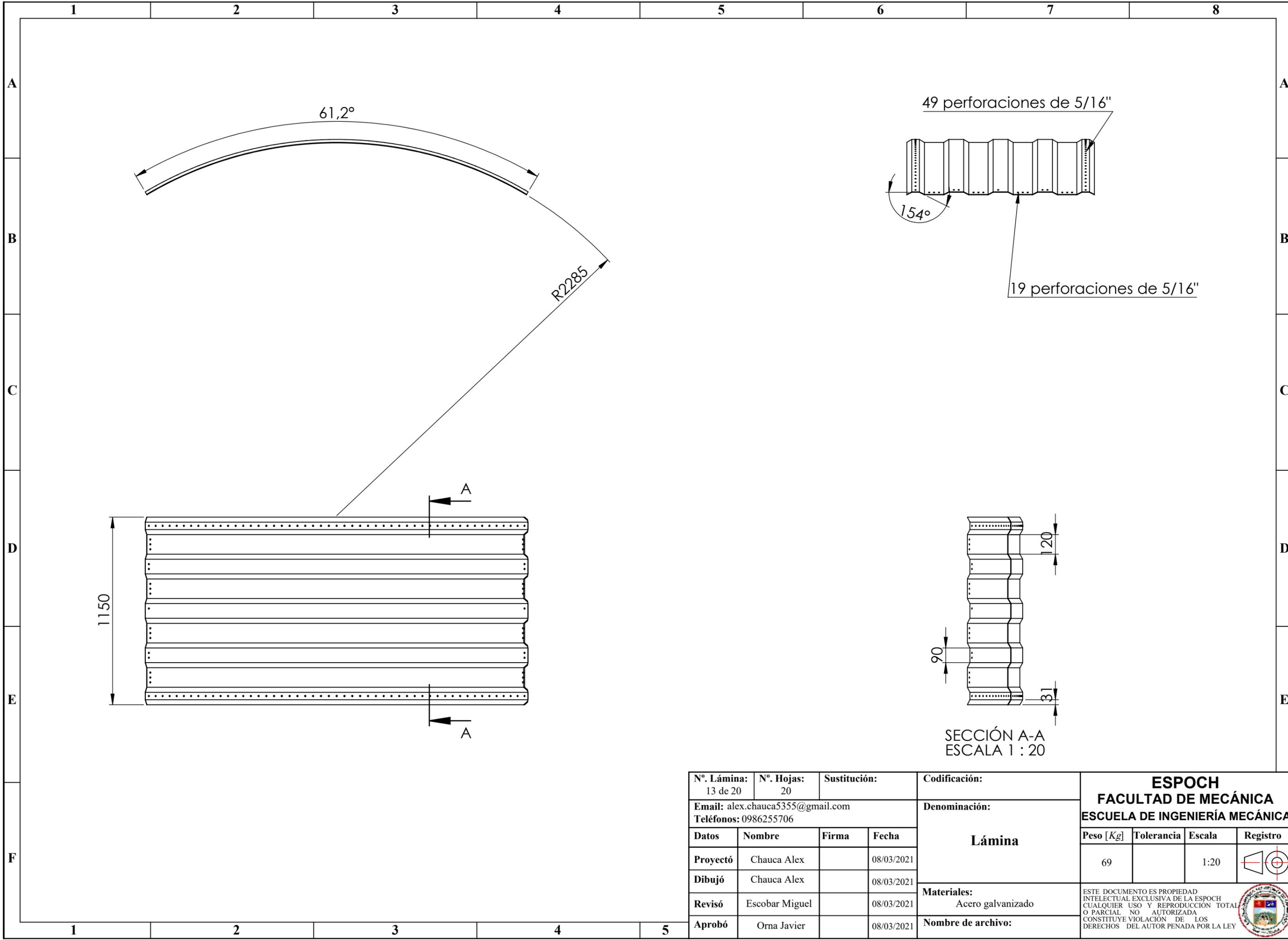
N°. Lámina: 10 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA											
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Tapa superior				20				1:20			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021													
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021													
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021													
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021		Materiales: Acero galvanizado				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY							
Nombre de archivo:																			



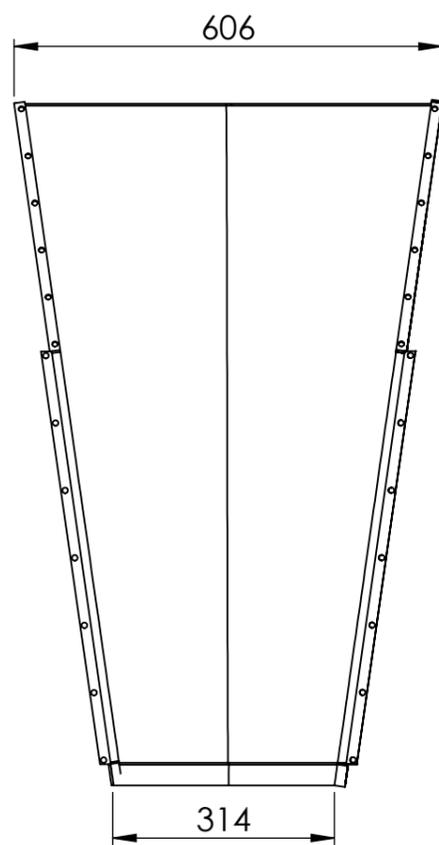
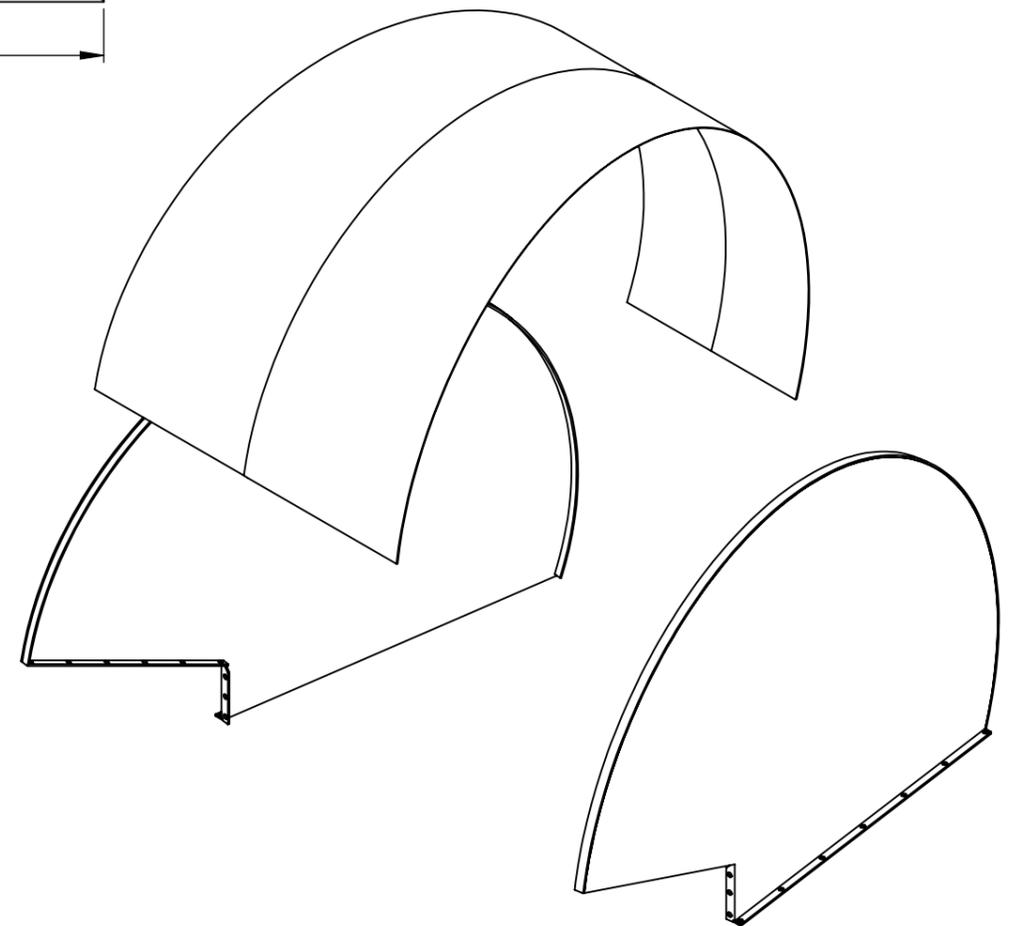
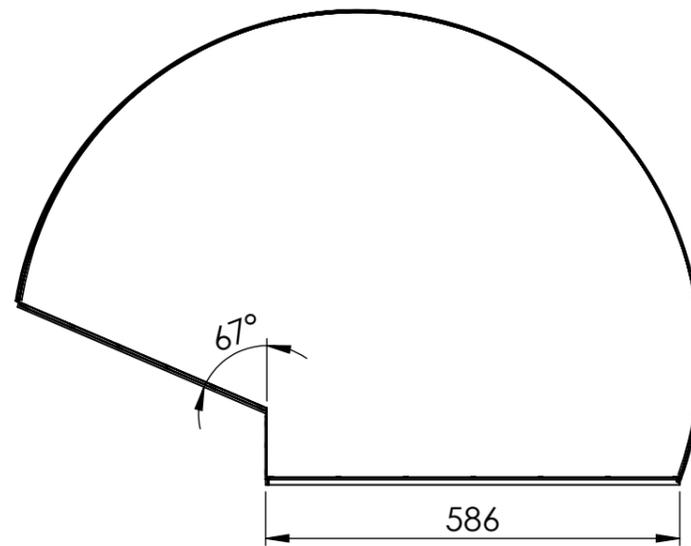
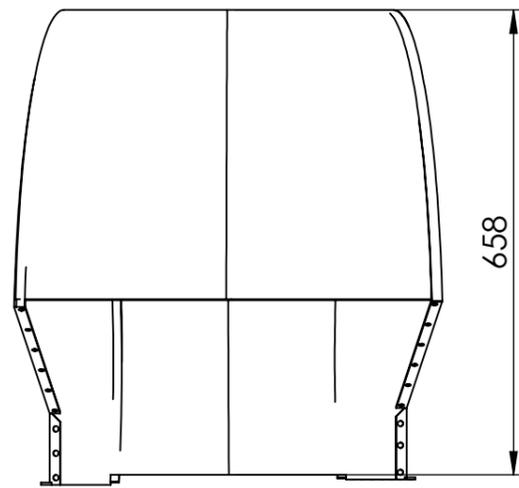
N°. Lámina: 11 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA											
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Tapa superior para puerta				15				1:20			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021													
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021													
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021													
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021													
Materiales: Acero galvanizado						Nombre de archivo:		<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELCTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY</small> 											



N°. Lámina: 12 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:					
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Tapa superior para ventilador				17		1:20	
Proyectó	Chauca Alex		08/03/2021								
Dibujó	Chauca Alex		08/03/2021								
Revisó	Escobar Miguel		08/03/2021								
Aprobó	Orna Javier		08/03/2021	Materiales: Acero galvanizado		<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY</small> 					
						Nombre de archivo:					

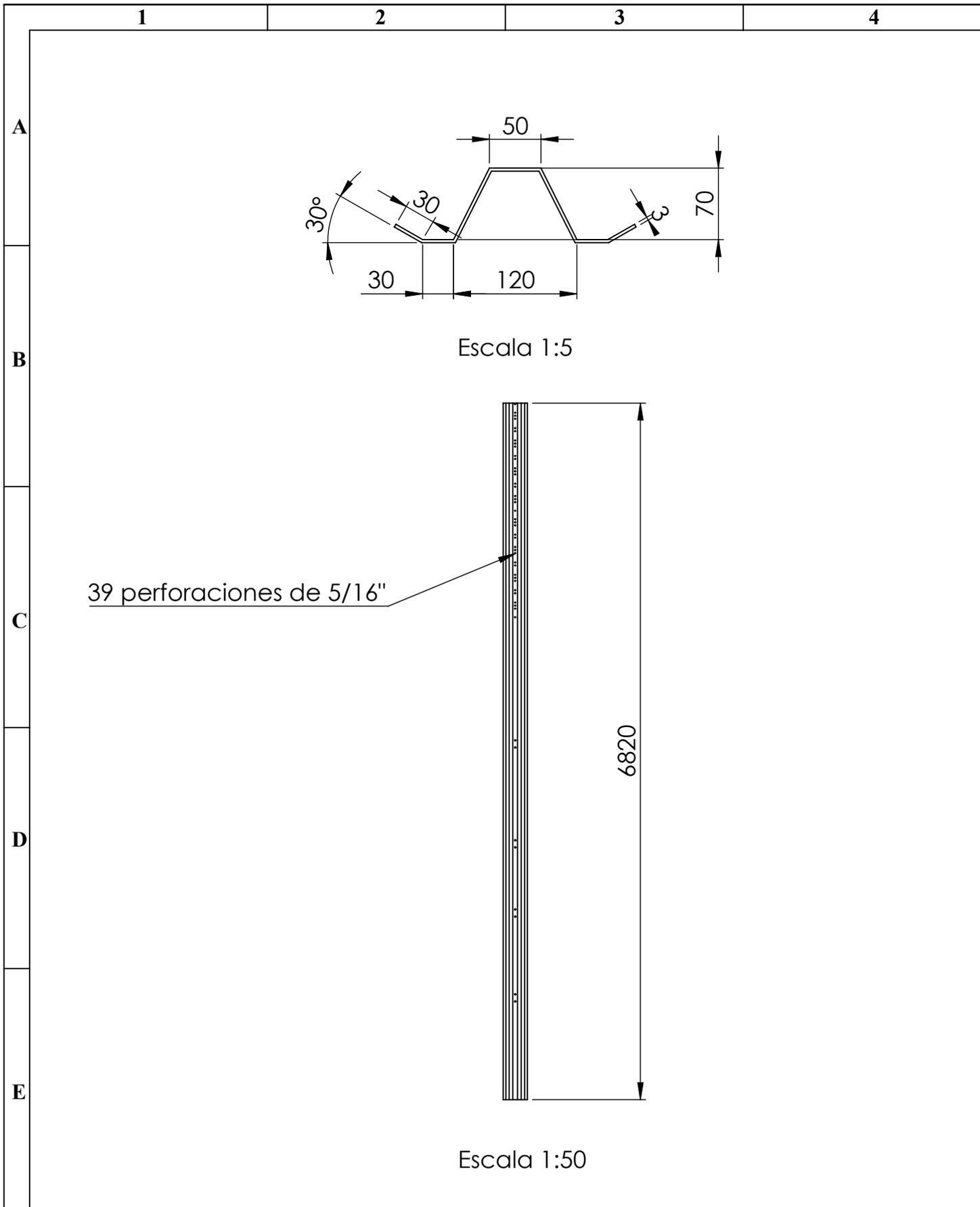


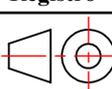
N°. Lámina: 13 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA											
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Lámina				69				1:20			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021													
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021													
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021													
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021		Materiales: Acero galvanizado				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY							
Nombre de archivo:																			

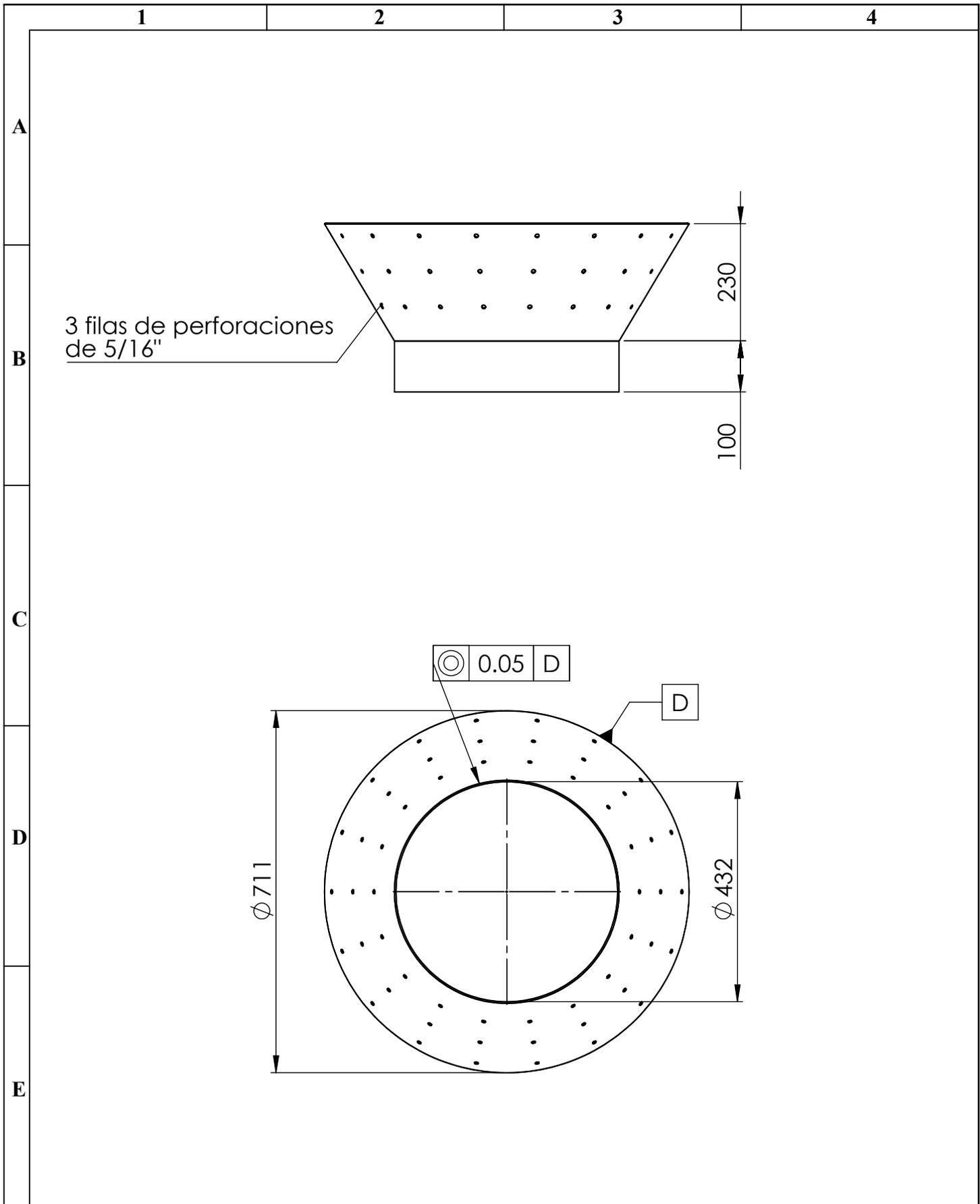


N°. Lámina: 14 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación:		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA											
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Ventilador				33				1:10			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021													
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021													
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021													
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021		Materiales: Acero galvanizado				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY							

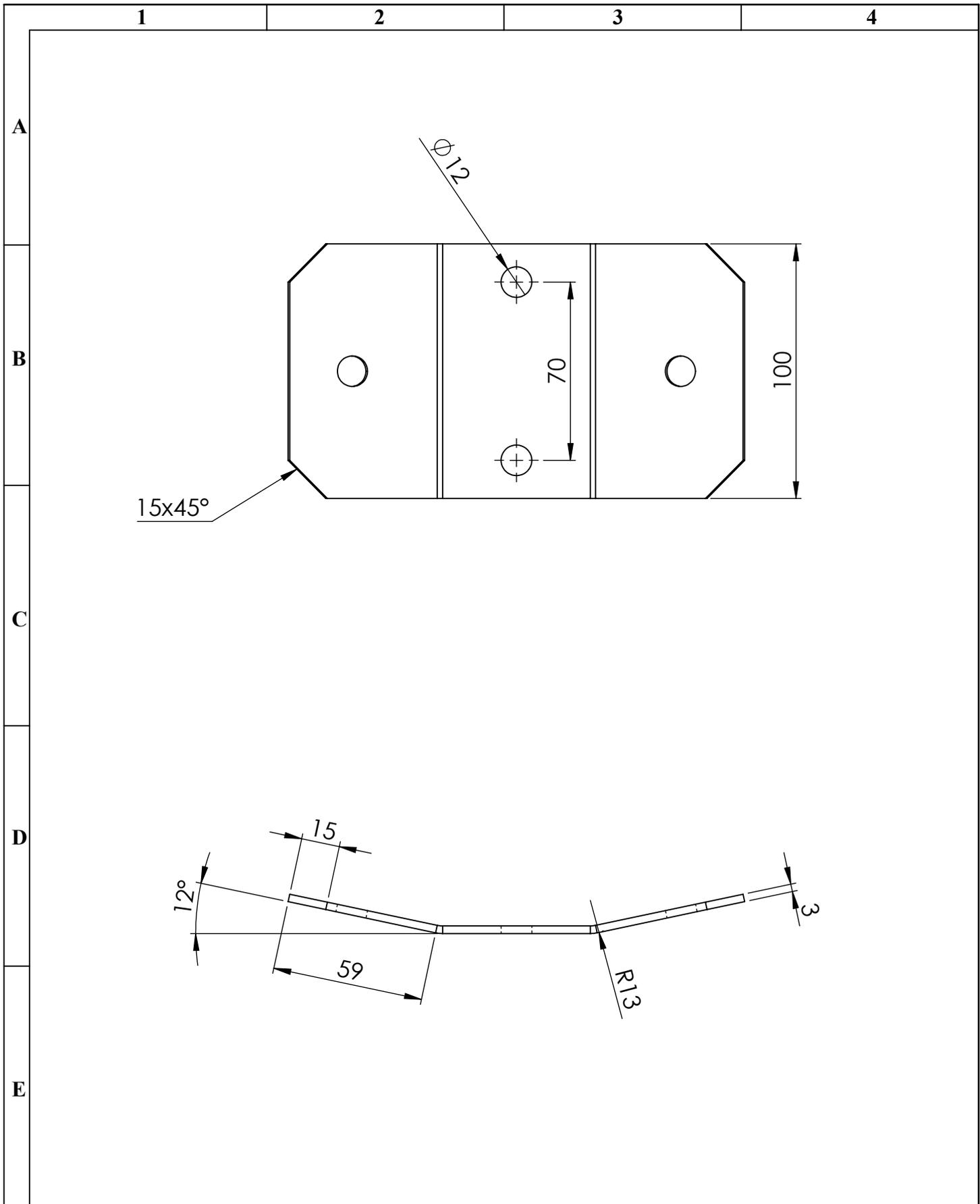




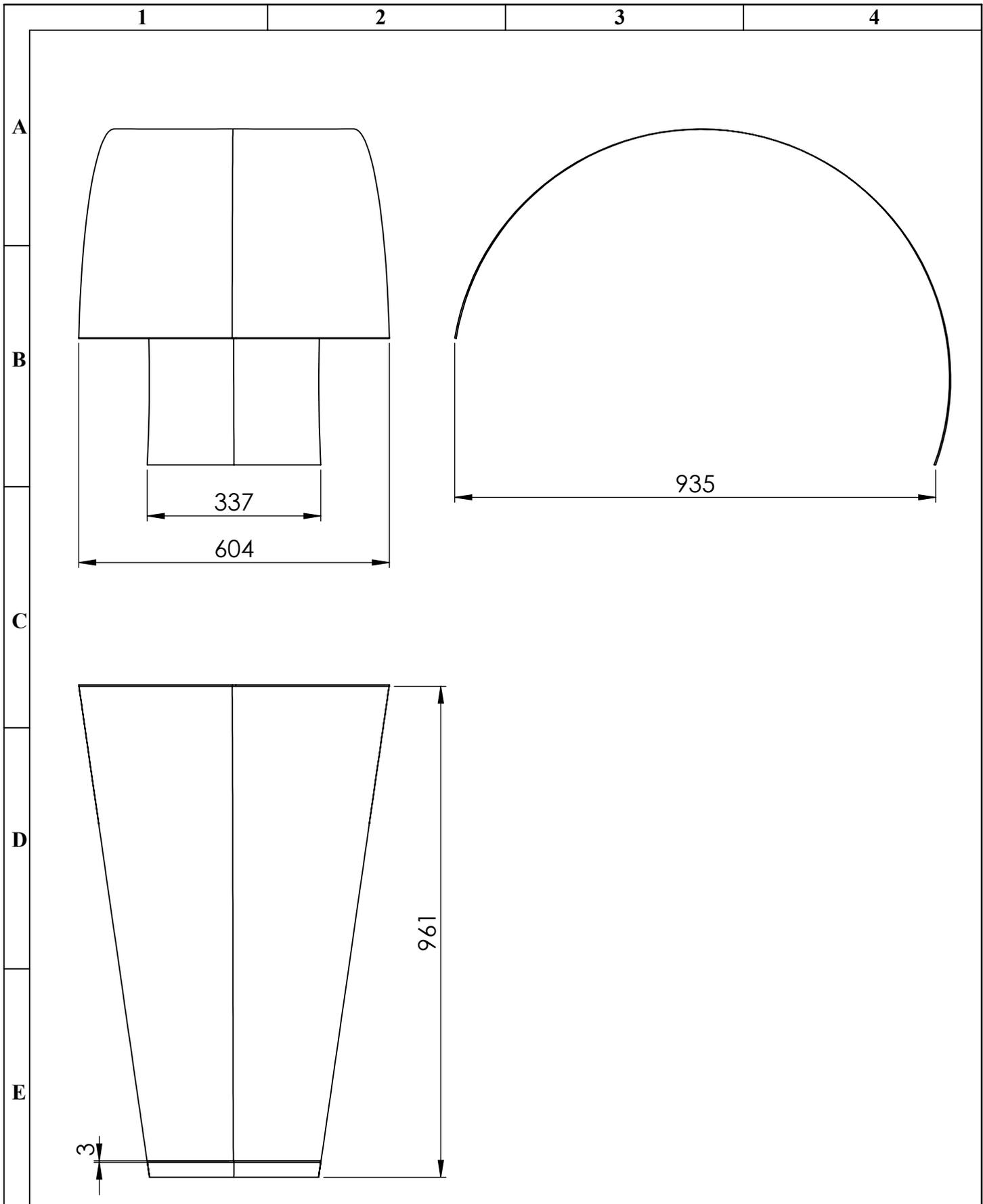
N°. Lámina: 15 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación: FM-EIM-MER-D-001-01-2015		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Omega		Denominación:					
Datos		Nombre		Firma				Fecha		Peso [Kg]		Tolerancia	
Proyectó		Chauca Alex						08/03/2021		53		1:50	
Dibujó		Chauca Alex						08/03/2021					
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021		Materiales: Acero galvanizado		<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY</small> 			
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021		Nombre de archivo:					

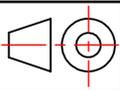


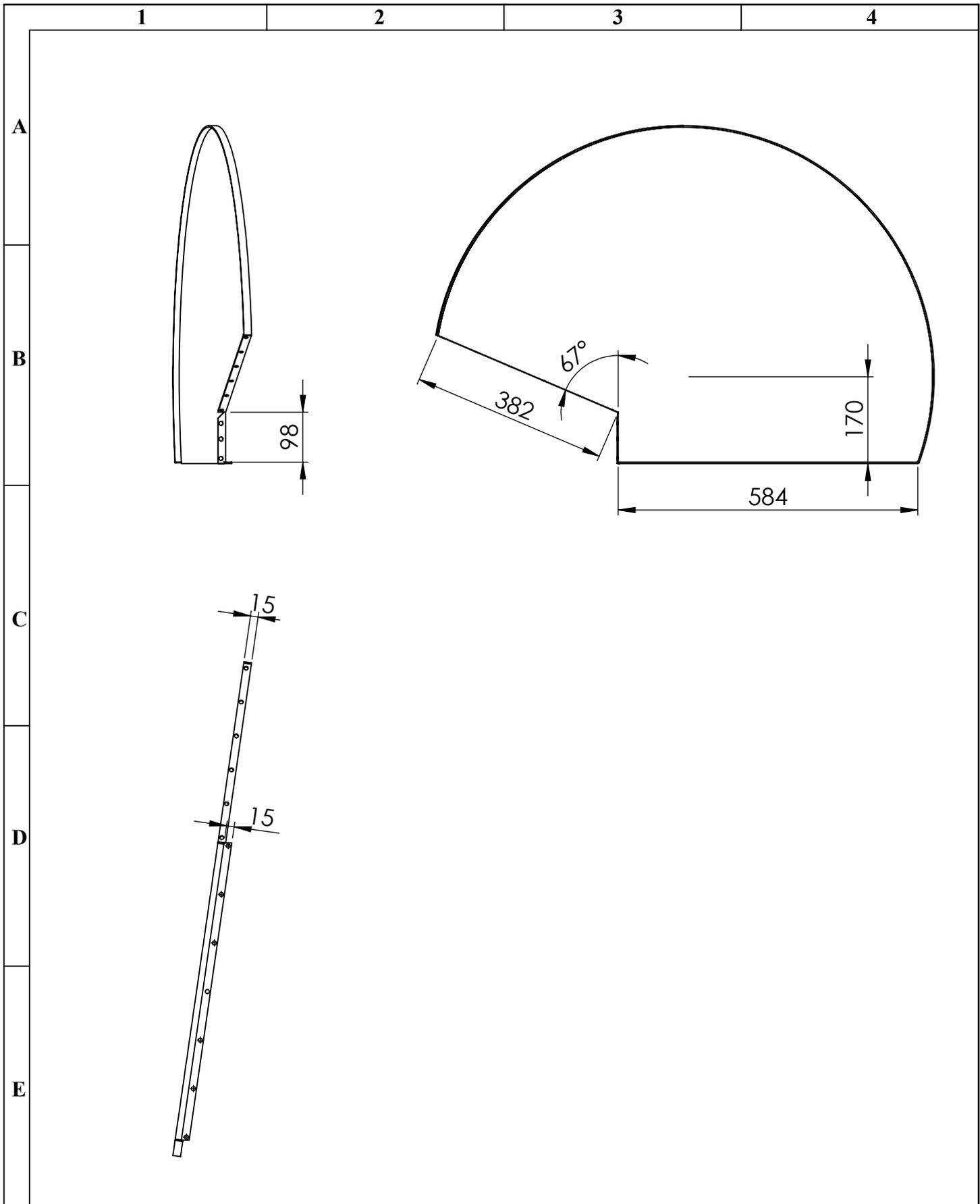
N°. Lámina: 16 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación: FM-EIM-MER-D-001-01-2015		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación: Salida de la tolva				Peso [Kg]		Tolerancia	Escala	Registro
Datos	Nombre	Firma	Fecha					13		1:10				
Proyectó	Chauca Alex		08/03/2021											
Dibujó	Chauca Alex		08/03/2021											
Revisó	Escobar Miguel		08/03/2021			Materiales: Acero galvanizado					ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.			
Aprobó	Orna Javier		08/03/2021			Nombre de archivo:								



N°. Lámina: 17 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación: FM-EIM-MER-D-001-01-2015		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA													
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación:						Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro			
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Unión arriostramiento								0.4		1:2			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021										Materiales:		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY			
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021		Acero galvanizado													
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021		Nombre de archivo:													
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021															

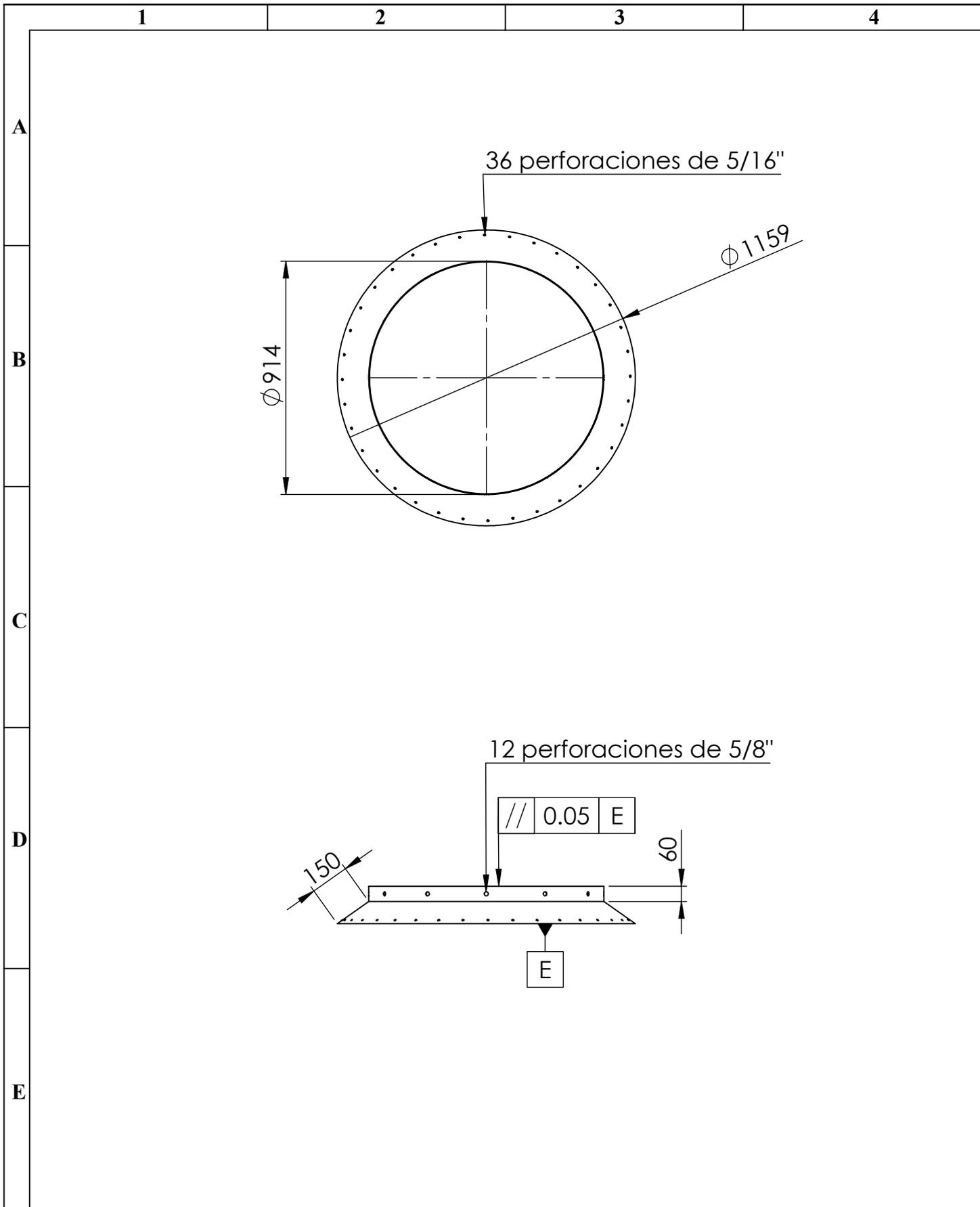


N°. Lámina: 18 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación: FM-EIM-MER-D-001-01-2015		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA							
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Denominación: Techo ventilador						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		9				1:10			
Proyectó		Chauca Alex				08/03/2021		Materiales: Acero galvanizado		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.					
Dibujó		Chauca Alex				08/03/2021									
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021		Nombre de archivo:							
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021									



N°. Lámina: 19 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación: FM-EIM-MER-D-001-01-2015		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA									
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Cuerpo ventilador		Denominación:		Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma				Fecha		12				1:10			
Proyectó		Chauca Alex						08/03/2021									
Dibujó		Chauca Alex						08/03/2021									
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021		Materiales: Acero galvanizado									
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021		Nombre de archivo:									

ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY



N°. Lámina: 20 de 20		N°. Hojas: 20		Sustitución:		Codificación: FM-EIM-MER-D-001-01-2015		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA									
Email: alex.chauca5355@gmail.com Teléfonos: 0986255706						Entrada del silo		Denominación:									
Datos		Nombre		Firma				Fecha		Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Proyectó		Chauca Alex						08/03/2021		15				1:20			
Dibujó		Chauca Alex						08/03/2021									
Revisó		Escobar Miguel				08/03/2021		Materiales: Acero galvanizado		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE LA ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.							
Aprobó		Orna Javier				08/03/2021		Nombre de archivo:									

ANEXO D. Construcción del silo

A continuación, se muestra el proceso de construcción del silo, mediante fotografías.



Figura 1-A: Planchas de 3 mm baroladas

Realizado por: Alex Chauca, 2020



Figura 2-A: Planchas lisas de 3 mm para aramar el techo y la tolva

Realizado por: Alex Chauca, 2020



Figura 3-A: Interior del silo

Realizado por: Alex Chauca, 2020



Figura 4-A: Armado del silo con capacidad de 100 toneladas

Realizado por: Alex Chauca, 2020



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje 0

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 23 / 03 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Alex Fernando Chauca Chicaiza</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
<i>Instituto de Posgrado y Educación Continua</i>
Título a optar: <i>Magíster en Diseño Mecánico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.



0080-DBRA-UTP-IPEC-2021