



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“PRE-DISEÑO DE TANQUES ELEVADOS DE ACERO PARA
ALMACENAMIENTO DE AGUA CON SOPORTE
ESTRUCTURAL, PARA CAPACIDADES DE 25.000 A 500.000
GALONES, MEDIANTE UNA HOJA ELECTRÓNICA Y
VALIDACIÓN EN SOFTWARE SAP2000”**

INCHILEMA TAGUA WILLIAN DAVID

**TRABAJO DE TITULACIÓN
TIPO: PROYECTO TÉCNICO**

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA-ECUADOR

2018

ESPOCH

Facultad de Mecánica

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN**

2017-04-24

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

INCHILEMA TAGUA WILLIAN DAVID

Titulado:

“PRE-DISEÑO DE TANQUES ELEVADOS DE ACERO PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA CON SOPORTE ESTRUCTURAL, PARA CAPACIDADES DE 25.000 A 500.000 GALONES, MEDIANTE UNA HOJA ELECTRÓNICA Y VALIDACIÓN EN SOFTWARE SAP2000”

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Carlos José Santillán Mariño.
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Javier Enrique Orna Chávez
ASESOR DE TESIS

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: INCHILEMA TAGUA WILLIAN DAVID

TRABAJO DE TITULACIÓN: “PRE-DISEÑO DE TANQUES ELEVADOS DE ACERO PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA CON SOPORTE ESTRUCTURAL, PARA CAPACIDADES DE 25.000 A 500.000 GALONES, MEDIANTE UNA HOJA ELECTRÓNICA Y VALIDACIÓN EN SOFTWARE SAP2000”

Fecha de Examinación: 2018-11-08

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez. PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade. DIRECTOR			
Ing. Javier Enrique Orna Chávez. ASESOR			

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

RECOMENDACIONES: _____

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

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

DERECHOS DE AUTORÍA

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

Inchilema Tagua Willian David

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Yo, Inchilema Tagua Willian David, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Inchilema Tagua Willian David

Cédula de Identidad: 060462559-0

DEDICATORIA

El presente trabajo no solo refleja mi esfuerzo sino también la de mis padres, por ello quiero dedicar este trabajo a Margarita e Isidro quienes han sabido confiar en mis decisiones y me han brindado su apoyo tanto moral como económicamente para lograr llegar a cumplir mis objetivos como persona.

Inchilema Tagua Willian David

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, Isidro y Margarita, a mis hermanos Mayra, Paul y Oscar por todo el apoyo incondicional que me han brindado durante todo este trayecto en la lucha de llegar a ser profesional y a quienes amo con todo el corazón. Un agradecimiento muy enorme al Ing. Miguel Cedeño con quien fue que nació este proyecto, quien supo brindarme su apoyo y su valioso conocimiento, por ser una gran persona y una fuente de inspiración para mí. A mi director y asesor de tesis, Ing. Geovanny Novillo e Ing. Javier Orna, quienes me han brindado su valioso apoyo en la preparación del presente trabajo. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica donde mis compañeros y yo nos forjamos para llegar a ser excelentes profesionales y servir a la sociedad.

Inchilema Tagua Willian David

RESUMEN

El presente trabajo nació a partir de la necesidad de buscar una herramienta que facilite y agilice el proceso de pre-dimensionamiento de tanques elevados de acero, como solución a esta necesidad se desarrolló una hoja electrónica que permite realizar el diseño preliminar de tanques elevados de acero con soporte estructural de múltiples columnas para almacenamiento de agua con capacidades entre 25.000 y 500.000 galones. La hoja electrónica, en primera instancia, determina la geometría general del tanque elevado: el diámetro de tanque de acero se determina de acuerdo a las tablas que nos brinda la norma AWWA D100-05, las dimensiones de los casquetes de acuerdo a recomendaciones de la ASME Sección VIII Div. 1 y API 620-12. Los espesores de las planchas de acero que conforman la parte cilíndrica y fondo del tanque se determina de acuerdo al procedimiento de la API 620, mientras que los espesor requerido para el techo se determina de acuerdo a la norma API 650 y además se tomó en consideración las limitaciones que nos da la norma AWWA D100 en los espesores de las planchas de acero. Las cargas viva y de viento son aplicadas de acuerdo a las normas AWWA D100-05 y ASCE-7 mientras que la carga sísmica se aplica de acuerdo a la norma NEC-SE-DS. Para el análisis estructural, la hoja electrónica determina la capacidad de cada elemento estructural de acuerdo a la norma AISC 360-10 y propone la carga de demanda mediante un algoritmo, con esto se determina la relación Demanda/Capacidad con la que el usuario puede elegir las secciones más adecuadas. Adicionalmente se desarrolló otra aplicación que permite modelar automáticamente, en SolidWorks, los tanques elevados diseñados en la hoja electrónica. La validación de la hoja electrónica se realizó mediante la comparación de sus resultados con los emitidos por el software SAP2000, obteniendo resultados muy similares, dándonos porcentajes de error menores al 10% con lo que se concluyó que la hoja electrónica es totalmente confiable pero se recomienda no considerar a los resultados emitidos por la hoja electrónica como un diseño final.

PALABRAS CLAVES: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <PRE-DISEÑO>, <TANQUES ELEVADOS>, <HOJA ELECTRÓNICA>, <SOPORTE ESTRUCTURAL>, <CASQUETES>, <PLANCHAS DE ACERO>, <ANÁLISIS ESTRUCTURAL>, <ALGORITMO>, <ELEMENTOS ESTRUCTURALES>, <SAP2000 (SOFTWARE)>.

ABSTRACT

This work was born out of the need to find a tool to facilitate and streamline the process of pre-sizing of elevated steel tanks, as a solution to this need a spreadsheet was developed that allows the preliminary design of elevated steel tanks with structural support of multiple columns for water storage with capacities between 25.000 and 500.000 gallons. The spreadsheet, in the first instance, determines the general geometry of the elevated tank: the diameter of the steel tank is determined according to the tables provided by AWWA D100-05, the dimensions of the skullcaps according to the recommendations of the ASME Section VIII Div. 1 and API 620-12. The thicknesses of the steel plates that make up the cylindrical and bottom part of the tank are determined according to the procedure of API 620, while the thickness required for the roof is determined according to the API 650 standard and was also taken into consideration the limitations that the AWWA D100 standard gives us in the thicknesses of steel plates. The loads: live load and wind load are applied according to AWWA D100-05 and ASCE-7 standards while the seismic load is applied according to the NEC-SE-DS standard. For the structural analysis, the spreadsheet determines the capacity of each structural element according to the AISC 360-10 standard and proposes the demand load by means of an algorithm, with this the Demand / Capacity relation is determined with which the user can choose the more suitable sections. Additionally, another application that allows to automatically modeling, in SolidWorks, the elevated tanks designed in the spreadsheet was developed. The validation of the spreadsheet was made by comparing its results with those issued by the SAP2000 software, obtaining very similar results, giving error percentages less than 10%, which concluded that the spreadsheet is totally reliable but it is recommended do not consider the results issued by the spreadsheet as a final design.

KEYWORDS: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCE>, <PRE-DESIGN>, <ELEVATED TANKS>, <SPREADSHEET>, <STRUCTURAL SUPPORT>, <SKULLCAPS>, <STEEL SHEETS>, <STRUCTURAL ANALYSIS>, <ALGORITHM>, <STRUCTURAL ELEMENTS>, <SAP2000 (SOFTWARE)>.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una hoja electrónica que permita realizar el pre-diseño de tanques elevados de acero con soporte estructural para capacidades desde 25,000 hasta 500,000 galones y realizar su validación en el software SAP 2000, partiendo de la necesidad que tienen las industrias metalmeccánicas en buscar herramientas, que faciliten su trabajo y les ahorre tiempo, permitiéndoles ser competitivas en el mercado. Adicionalmente se presenta como objetivo específico desarrollar otra aplicación que permita la modelación automática de los tanques elevados en el software SolidWorks.

Para la elaboración de hoja electrónica se ha decidido usar el programa Excel de Microsoft debido a que cuenta con muchas ventajas de las cuales las más importantes para el presente trabajo son: tener una interface simple y efectiva; permite trabajar con cálculos y formulas complejas; permite grabar macros para realzar operaciones repetitivas y es una aplicación portátil.

La hoja electrónica propuesta en este trabajo está destinado específicamente para tanques de acero que tengan una geometría cilíndrica con fondo y techo toriesférico, sostenidos en una estructura la cual está formada por columnas verticales o inclinadas, arriostres horizontales y arriostres diagonales.

En el capítulo 1 se define el marco referencial del presente trabajo, describiendo los antecedentes, la formulación del problema y la justificación. En base a lo antes mencionado se propone los objetivos, tanto generales como específicos.

En el capítulo 2 se abordan los aspectos teóricos tales como describir los tipos de tanques de acero para almacenamiento de agua, la mejor geometría para taques elevados de acero, esfuerzos internos en los recipientes de pared delgada, el agua y sus efectos en el acero, diseño estructural, los códigos y especificaciones utilizados en el presente trabajo, y varios aspectos más.

En el capítulo 3 se desarrolla la formulación matemática y procedimientos utilizados para determinar la geometría del tanque y su estructura de soporte; los espesores del tanque de acero; las cargas de diseño como: cargas muertas, vivas, de viento y sísmicas; y el diseño de la estructura de soporte del tanque elevado de acero. Se propone la geometría del tanque y de su estructura de soporte en base a criterios y recomendaciones tomada de varias normas, estándares y manuales.

En el capítulo 4 se detalla la metodología, alcance, estructuración, logaritmos utilizados para el desarrollo de la hoja electrónica, adicionalmente se explica el desarrollo de la API que permite el

modelamiento automático de los tanques elevados en SolidWorks y finalmente se muestra la aplicación del programa.

Como toda herramienta propuesta para ser confiable debe ser validada de alguna manera, para el caso de nuestra hoja electrónica se realizó la validación de los resultados dados por la hoja de cálculo, realizando una comparación con el reporte emitido por el software SAP 2000. Todo esto se detalla en el capítulo 5.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones y las recomendaciones del presente trabajo.

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

	Pág.
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Formulación del problema	2
1.3 Justificación.....	3
1.3.1 Justificación teórica.....	3
1.3.2 Justificación metodológica.....	3
1.3.3 Justificación práctica	4
1.4 Alcance.....	4
1.5 Objetivos	4
1.5.1 Objetivo general	4
1.5.2 Objetivos específicos.....	4
2. MARCO TEÓRICO SOBRE TANQUES DE ACERO PARA EL ALMACENAMIENTO DE AGUA Y CRITERIOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL... 5	
2.1 Tanques de acero para almacenamiento de agua.....	5
2.2 Tanques elevados de acero.....	6
2.2.1 Tanque elevado de múltiples columnas.....	7
2.2.2 Tanques elevados de pedestal	11
2.2.3 Tanques elevados de un solo pedestal estriados.....	13
2.2.4 Tanques elevados compuestos	15
2.3 Geometría del tanque	16
2.3.1 Casquetes.....	16
2.4 Esfuerzos internos en recipientes de pared delgada	18
2.4.1 Recipientes cilíndricos sometidos a presión interna.....	21

2.5	El agua y sus efectos en el acero	22
2.5.1	El agua.....	22
2.5.2	Corrosión en el acero.....	23
2.6	Estructuras metálicas.....	24
2.6.1	Diseño estructural.....	25
2.6.2	Aceros estructurales	25
2.7	Cargas de diseño estructural.....	27
2.7.1	Carga muerta	28
2.7.2	Carga viva	28
2.7.3	Cargas climáticas.....	29
2.7.4	Cargas sísmicas	29
2.8	Métodos de diseño establecidos por la AISC	30
2.8.1	Método LRFD	31
2.8.2	Método ASD	32
2.9	Códigos y especificaciones aplicadas.....	33
2.9.1	Estándar ANSI/AWWA D-100-05.....	33
2.9.2	Especificación ANSI/AISC 360-10	34
2.9.3	Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)	34
2.9.4	Estándar API 620-12	35
2.9.5	Estándar API 650-12	35
2.9.6	Estándar ASCE 7-10	36
2.10	Hojas de cálculo	36
2.10.1	Microsoft Excel.....	36
2.11	API SolidWorks	37
3.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA EL DISEÑO DE TANQUES ELEVADOS DE ACERO	38
3.1	Geometría del tanque elevado	38
3.1.1	Dimensionamiento del tanque.....	38
3.1.2	Dimensiones de la estructura de soporte	43

3.2	Espeores del tanque de acero	46
3.2.1	Procedimiento para el cálculo de espesores según API 620 (API 620, 2012).....	48
3.2.2	Diseño de espesores del techo (API 650, 2012).....	54
3.2.3	Espesores mínimos.....	54
3.2.4	Tolerancia de corrosión.....	55
3.2.5	Esfuerzos actuantes	55
3.3	Cargas.....	56
3.3.1	Carga muerta	56
3.3.2	Carga viva:	59
3.3.3	Carga de viento (ASCE 7, 2010; AWWA D100, 2005)	59
3.3.4	Cargas por sismo (NEC-SE-DS, 2014).....	65
3.4	Viga horizontal de refuerzo, balcón y vigas intermedias.	77
3.4.1	Viga horizontal y balcón	77
3.4.2	Vigas intermedias (AWWA D100, 2005).....	79
3.5	Diseño de elementos estructurales	81
3.5.1	Diseño de elementos.....	81
3.5.2	Perfil tubular de forma circular	82
3.5.3	Materiales para los elementos estructurales	82
3.5.4	Miembros a compresión	84
3.5.5	Pre-dimensionamiento de la columna	87
3.5.6	Diseño de miembros a compresión (AISC 360, 2010).....	91
3.5.7	Miembros a tracción.....	93
3.5.8	Diseño de miembros a tracción (AISC 360, 2010)	95
3.5.9	Elementos a flexión.....	96
3.5.10	Diseño de elementos a flexión (AISC 360, 2010).....	97
3.5.11	Miembros solicitados a flexión y compresión (AISC 360, 2010).....	98
3.5.12	Placa base (AISC 360, 2010)	99
3.6	Determinación de las cargas en los elementos estructurales de los tanques elevados mediante el software sap2000.	103

4.	ANÁLISIS Y ESTRUCTURA DE LA HOJA ELECTRÓNICA	121
4.1	Metodología utilizada para la elaboración de la hoja electrónica	121
4.2	Alcance de la hoja electrónica	122
4.3	Estructuración de la hoja electrónica	123
4.3.1	Pestaña 1: GEOMETRÍA	123
4.3.2	Pestaña 2: ESPESORES DEL TANQUE	124
4.3.3	Pestaña 3: PESO TANQUE	124
4.3.4	Pestaña 4: PRE-DISEÑO COLUMNA	124
4.3.5	Pestaña 5: SECCIONES	125
4.3.6	Pestaña 6: PESO SOPORTE	125
4.3.7	Pestaña 7: CARGA DE VIENTO	125
4.3.8	Pestaña 8: BALCÓN Y RIGIDIZADOR INTERMEDIO	126
4.3.9	Pestaña 9: CARGA POR SISMO	126
4.3.10	Pestaña 10: DISEÑO DE COLUMNA	126
4.3.11	Pestaña 11: DISEÑO DE DIAGONAL	127
4.3.12	Pestaña 12: DISEÑO HORIZONTAL	127
4.3.13	Pestaña 13: PLACA BASE	127
4.3.14	Pestaña 14: RESUMEN	127
4.4	Algoritmos de la hoja electrónica	127
4.5	Cargas en los elementos estructurales	140
4.5.1	Cargas de compresión en la columna	140
4.5.2	Carga axial a compresión en arriostres diagonales	145
4.5.3	Carga axial a tracción en arriostres diagonales	152
4.5.4	Carga axial a compresión en arriostres horizontales	158
4.6	API SolidWorks	164
4.7	Aplicación de la hoja electrónica	165
5.	VALIDACIÓN DE LA HOJA ELECTRÓNICA	199
5.1	Validación del cálculo de las tensiones y esfuerzos en el tanque	199
5.2	Validación de la estructura de soporte	204

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	217
6.1	Conclusiones	217
6.2	Recomendaciones.....	218

BIBLIOGRAFÍA

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-2	Capacidades típicas para tanques de múltiples columnas de baja capacidad.....	8
Tabla 2-2	Capacidades típicas para tanques de múltiples columnas para media capacidad...	10
Tabla 3-2	Capacidades típicas de tanques de múltiples columnas para gran capacidad.....	11
Tabla 4-2	Capacidades típicas de tanques de pedestal para pequeña capacidad.....	13
Tabla 5-2	Capacidades típicas de tanques elevados de pedestal para grande capacidad.....	14
Tabla 1-3	Capacidades y dimensiones estándares para tanques elevados.....	40
Tabla 2-3	Dimensiones de un casquete toriesférico	41
Tabla 3-3	Volumen de un casquete toriesférico.....	42
Tabla 4-3	Número de columnas para tanques elevados.....	44
Tabla 5-3	Dimensiones de la torre vista en planta.....	46
Tabla 6-3	Número de arriostres horizontales y diagonales.....	47
Tabla 7-3	Longitud de arriostres horizontales.....	47
Tabla 8-3	Longitud de arriostres diagonales.....	48
Tabla 9-3	Clases de materiales.....	52
Tabla 10-3	Eficiencia de Soldadura.....	53
Tabla 11-3	Esfuerzos permisibles de diseño.....	53
Tabla 12-3	Espesores mínimos para las placas del tanque en contacto con el agua.....	55
Tabla 13-3	Peso de arriostres horizontales.....	58
Tabla 14-3	Peso de arriostres diagonales.....	59
Tabla 15-3	Categoría de ocupación.....	61
Tabla 16-3	Factor de importancia.....	62
Tabla 17-3	Coeficientes de exposición de presión de velocidad K_z	64
Tabla 18-3	Términos α y z_g	64
Tabla 19-3	Coeficiente de fuerza para el tanque de acero, C_f	65
Tabla 20-3	Valores del factor de zona Z.....	67
Tabla 21-3	Clasificación de los perfiles de suelo.....	67
Tabla 22-3	Factores de sitio F_a	68
Tabla 23-3	Factores de sitio F_d	69
Tabla 24-3	Factores de comportamiento inelástico del subsuelo F_s	69
Tabla 25-3	Coeficientes de importancia I.....	72
Tabla 26-3	Coeficientes C_t y α	75
Tabla 27-3	Factor de reducción de respuesta para estructuras diferentes a las edificaciones..	76
Tabla 28-3	Módulos de sección de perfiles de vigas de refuerzo para tanques de acero.....	78
Tabla 29-3	Propiedades geométricas del perfil tubular redondo.....	83

Tabla 30-3	Propiedades mecánicas de los materiales para tubería estructural.....	84
Tabla 31-3	Valores aproximados del factor de longitud efectiva, K.....	86
Tabla 32-3	Razones Ancho-Espesor de elementos a compresión.....	87
Tabla 33-3	Factor de corte diferido para conexiones de miembros en tracción.....	95
Tabla 34-3	Razones Ancho-Espesor: Elementos de Compresión de miembros a flexión.....	97
Tabla 1-4	Compresión en columna de estructura con un anillo de arriostre horizontal.....	140
Tabla 2-4	Compresión en columna de estructura con dos anillos de arriostres horizontal....	142
Tabla 3-4	Compresión en columna de estructura con tres anillos de arriostres horizontal... 142	
Tabla 4-4	Compresión en columna de estructura con un anillo de arriostres horizontales... 143	
Tabla 5-4	Compresión en columna de estructura con dos anillos de arriostres horizontal... 143	
Tabla 6-4	Compresión en columna de estructura con tres anillos de arriostres horizontal... 144	
Tabla 7-4	Compresión en columna de estructura con un anillo de arriostre horizontal..... 144	
Tabla 8-4	Compresión en columna de estructura con dos anillos de arriostre horizontal.... 145	
Tabla 9-4	Compresión en columna de estructura con tres anillos de arriostre horizontal..... 145	
Tabla 10-4	Compresión en diagonal de estructura con un anillo de arriostre horizontal..... 146	
Tabla 11-4	Compresión en diagonal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal.... 146	
Tabla 12-4	Compresión en diagonal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal.... 147	
Tabla 13-4	Compresión en diagonal de estructura con un anillo de arriostre horizontal..... 148	
Tabla 14-4	Compresión en diagonal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal.... 148	
Tabla 15-4	Compresión en diagonal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal.... 149	
Tabla 16-4	Compresión en diagonal de estructura con un anillo de arriostre horizontal..... 150	
Tabla 17-4	Compresión en diagonal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal.... 150	
Tabla 18-4	Compresión en diagonal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal.... 151	
Tabla 19-4	Tracción en diagonal de estructura con un anillo de arriostre horizontal..... 152	
Tabla 20-4	Tracción en diagonal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal..... 152	
Tabla 21-4	Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal..... 153	
Tabla 22-4	Tracción en diagonal de estructura con un anillo de arriostre horizontal..... 154	
Tabla 23-4	Tracción en diagonal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal..... 155	
Tabla 24-4	Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal..... 155	
Tabla 25-4	Tracción en diagonal de estructura con un anillo de arriostre horizontal..... 156	
Tabla 26-4	Tracción en diagonal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal..... 157	
Tabla 27-4	Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal..... 157	
Tabla 28-4	Compresión en horizontal de estructura con un anillo de arriostre horizontal.... 158	
Tabla 29-4	Compresión en horizontal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal.. 159	
Tabla 30-4	Compresión en horizontal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal.. 159	
Tabla 31-4	Compresión en horizontal de estructura con un anillo de arriostre horizontal.... 160	

Tabla 32-4	Compresión en horizontal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal..	161
Tabla 33-4	Compresión en horizontal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal..	161
Tabla 34-4	Compresión en horizontal de estructura con un anillo de arriostre horizontal....	162
Tabla 35-4	Compresión en horizontal de estructura con dos anillos de arriostre horizontal..	163
Tabla 36-4	Compresión en horizontal de estructura con tres anillos de arriostre horizontal..	163
Tabla 1-5	Tensiones y esfuerzos en el tanque de 25.000 galones.....	199
Tabla 2-5	Tensiones y esfuerzos en el tanque de 50.000 galones.....	200
Tabla 3-5	Tensiones y esfuerzos en el tanque de 100.000 galones.....	201
Tabla 4-5	Tensiones y esfuerzos en el tanque de 400.000 galones.....	202
Tabla 5-5	Tensiones y esfuerzos en el tanque de 500.000 galones.....	202
Tabla 6-5	Comparación de las cargas a compresión en la columna más crítica.....	205
Tabla 7-5	Comparación de las cargas a compresión en el arriostre diagonal 2.....	209
Tabla 8-5	Comparación de las cargas a compresión en el arriostre diagonal 3.....	212
Tabla 9-5	Comparación de las cargas a compresión en el arriostre diagonal 4.....	213
Tabla 10-5	Comparación de pesos de los tanques elevados de acero.....	214

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-2	Tanques: compuesto, pedestal, estriado y múltiples comunas, respectivamente...7	
Figura 2-2	Foto y vista de la sección transversal de un tanque de múltiples columnas.....	8
Figura 3-2	Tanque elevado de múltiples columnas para mediana capacidad.....	9
Figura 4-2	Tanque elevado de múltiples columnas para gran capacidad.....	11
Figura 5-2	Tanque elevado de pedestal para pequeña capacidad.....	12
Figura 6-2	Tanque elevado de pedestal para gran capacidad.....	14
Figura 7-2	Tanque elevado estriado y tanque compuesto.....	15
Figura 8-2	Tipos de casquetes más comunes.....	17
Figura 9-2	Dirección meridional y latitudinal en un casquete.....	18
Figura 10-2	Esfuerzos meridionales en un casquete.....	19
Figura 11-2	Parte diferencial de un casquete.....	20
Figura 12-2	Esfuerzos en un cilindro sometido a presión interna	22
Figura 13-2	Cargas de diseño	28
Figura 14-2	Fuerzas laterales en un edificio provocadas por un sismo	30
Figura 1-3	Componentes de un tanque elevado	39
Figura 2-3	Alturas correspondientes al tanque de acero	43
Figura 3-3	Dimensiones de la torre de soporte	45
Figura 4-3	Diagrama típico de cuerpo libre de un tanque esférico	49
Figura 5-3	Diagrama de cuerpo libre de un tanque con casquetes toriesféricos.....	50
Figura 6-3	Ecuador, Mapa de zonificación sísmica para diseño y valor del factor Z.....	66
Figura 7-3	Espectro elástico de diseño en aceleraciones	70
Figura 8-3	Distribución de la cortante en una estructura de 6 columnas	73
Figura 9-3	Deflexión en un panel arriostrad.....	74
Figura 10-3	Perfiles típicos de vigas de refuerzo para tanques de acero	78
Figura 11-3	Modos de pande en columnas: a) Flexionante, b) Local y c) Flexo-torsional.....	85
Figura 12-3	Sección transversal de la conexión de un perfil tubular	94
Figura 13-3	Carga en una placa base	100
Figura 14-3	Dimensiones de la placa base	102
Figura 15-3	Creación de la <i>Gird Only</i>	104
Figura 16-3	Edición de los valores de la cuadrícula.....	104
Figura 17-3	Perfil del tanque elevado elaborado en AutoCAD.....	105
Figura 18-3	Perfil del tanque.....	105
Figura 19-3	Materiales para el diseño.....	106
Figura 20-3	Espesores para las paredes del tanque.....	106

Figura 21-3	Espesores para las paredes del tanque.....	107
Figura 22-3	Extrusión de las paredes del tanque.....	107
Figura 23-3	Dimensiones de los perfiles tubulares.....	108
Figura 24-3	Dimensiones de los perfiles tubulares.....	108
Figura 25-3	Tanque con la estructura de soporte.....	109
Figura 26-3	Aplicación del empotramiento en la base de las columnas.....	109
Figura 27-3	Ventana: <i>Assig Frame Releases</i>	110
Figura 28-3	Balcón del tanque elevado en el software.....	110
Figura 29-3	Ejes locales de los elementos áreas.....	110
Figura 30-3	Nombre del patrón de nodos.....	111
Figura 31-3	Ingreso del patrón de nodos en el tanque.....	111
Figura 32-3	Ingreso de un <i>Load Patterns</i> : PRESION_AGUA.....	112
Figura 33-3	Aplicación de la carga por presión de agua.....	112
Figura 34-3	Ingreso de un <i>Load Patterns</i> : Carga Viva, CV.....	112
Figura 35-3	Aplicación de la carga viva.....	113
Figura 36-3	Aplicación de carga por viento.....	113
Figura 37-3	Presión de viento, casquetes.....	114
Figura 38-3	Presión de viento, cilindro.....	114
Figura 39-3	Coefficiente de cortante basal.....	114
Figura 40-3	Ingreso de <i>Joint Masses</i>	115
Figura 41-3	(Continúa) Ingreso de <i>Joint Masses</i>	115
Figura 42-3	(Continúa) Ingreso de <i>Joint Masses</i>	115
Figura 43-3	Masa en los nodos del tanque.....	116
Figura 44-3	Ventana: <i>Define Mass Source</i>	116
Figura 45-3	Ingreso de las combinaciones de diseño.....	116
Figura 46-3	(Continúa). Ingreso de las combinaciones de diseño.....	117
Figura 47-3	Ventana: <i>Analysis Options</i>	117
Figura 48-3	Ventana: <i>Steel Frame Design Preferences</i>	118
Figura 49-3	Combinaciones de carga.....	118
Figura 50-3	Ventana: Set Load Cases o Run.....	118
Figura 51-3	Verificación del diseño estructural.....	119
Figura 52-3	Esfuerzos en la columna.....	119
Figura 53-3	Esfuerzos en el arriostre diagonal 1.....	120
Figura 54-3	Esfuerzos en el arriostre diagonal 2.....	120
Figura 1-4	Formulario de la aplicación.....	164
Figura 2-4	Hoja de programación de la aplicación.....	164

Figura 3-4	Hoja 1, capacidad y diámetro.....	165
Figura 4-4	Hoja 1, casquete inferior.....	166
Figura 5-4	Hoja 1, cilindro.....	166
Figura 6-4	Hoja 1, casquete de techo.....	167
Figura 7-4	Hoja 1, estructura de soporte.....	167
Figura 8-4	Hoja 1, vista lateral del tanque elevado.....	168
Figura 9-4	Hoja 1, vista en planta del tanque elevado.....	168
Figura 10-4	Hoja 2, datos para determinar los espesores del tanque.....	169
Figura 11-4	Hoja 2, niveles a analizar en el tanque de acero.....	169
Figura 12-4	Hoja 2, Tensiones unitarias en la parte cilíndrica.....	170
Figura 13-4	Hoja 2, Tensiones unitarias en el casquete de fondo.....	170
Figura 14-4	Hoja 2, espesores y esfuerzos determinados para el tanque.....	171
Figura 15-4	Hoja 2, espesores de techo.....	172
Figura 16-4	Hoja 3, datos para calcular el peso.....	172
Figura 17-4	Hoja 3, peso del tanque.....	173
Figura 18-4	Hoja 3, peso del líquido.....	173
Figura 19-4	Hoja 3, peso total.....	174
Figura 20-4	Hoja 4, pre-diseño de la columna.....	174
Figura 21-4	Hoja 5, propiedades geométricas y mecánicas.....	175
Figura 22-4	Hoja 5, secciones de la estructura.....	175
Figura 23-4	Hoja 6, datos para el peso de la estructura.....	176
Figura 24-4	Hoja 6, peso de las columnas.....	176
Figura 25-4	Hoja 6, peso de los arriostres horizontales.....	177
Figura 26-4	Hoja 6, peso de los arriostres diagonales.....	177
Figura 27-4	Hoja 6, peso total.....	178
Figura 28-4	Hoja 6, vista de un panel de la estructura.....	178
Figura 29-4	Hoja 7, datos para cargas de viento.....	179
Figura 30-4	Hoja 7, Fuerzas por viento en el tanque.....	179
Figura 31-4	Hoja 7, fuerzas por viento en la estructura de soporte.....	180
Figura 32-4	Hoja 8, módulo de sección del balcón.....	180
Figura 33-4	Hoja 8, peso del balcón.....	181
Figura 34-4	Hoja 8, Rigidizadores intermedios.....	181
Figura 35-4	Hoja 9, carga sísmica.....	182
Figura 36-4	Hoja 9, espectro de diseño.....	183
Figura 37-4	Hoja 10, datos de la columna.....	183
Figura 38-4	Hoja 10, diseño a compresión.....	184

Figura 39-4	Hoja 11, datos del arriostre diagonal.	185
Figura 40-4	Hoja 11, diseño por compresión, arriostre diagonal 1.	185
Figura 41-4	Hoja 11, diseño a tracción, arriostre diagonal 1.	186
Figura 42-4	Hoja 11, datos del arriostre diagonal 2.	187
Figura 43-4	Hoja 11, diseño compresión, arriostre diagonal 2.	187
Figura 44-4	Hoja 11, diseño tensión, arriostre diagonal 2.	188
Figura 45-4	Hoja 12, datos arriostre horizontal.	189
Figura 46-4	Hoja 12, diseño a compresión del arriostre horizontal.....	189
Figura 47-4	Hoja 13, Placa base.	190
Figura 48-4	Hoja 13, dimensiones placa base.	190
Figura 49-4	Hoja 14, resumen.	191
Figura 50-4	Botón guardar datos.	193
Figura 51-4	Ventana “Guardar como”	193
Figura 52-4	Interfaz de la API.....	194
Figura 53-4	Buscar archivos.....	194
Figura 54-4	API, Pestaña: Tanque Elevado.....	194
Figura 55-4	API, Pestaña: Casquete fondo.....	195
Figura 56-4	API, Pestaña: Parte cilíndrica.....	195
Figura 57-4	API, Pestaña: Casquete techo.....	195
Figura 58-4	API, Pestaña: Estructura de Soporte.....	196
Figura 59-4	API, Pestaña: Elementos Estructurales.....	196
Figura 60-4	API, Pestaña: Balcón.....	196
Figura 61-4	API, Pestaña: Placa base.....	197
Figura 62-4	API, Pestaña: Bocas	197
Figura 63-4	API, ventana de aviso.....	198
Figura 64-4	Tanque elevado modelado en SolidWorks.	198
Figura 1-5	Gráficas de las tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 25k gal.....	200
Figura 2-5	Gráficas de las tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 50k gal.....	201
Figura 3-5	Gráficas de las tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 100k gal...	202
Figura 4-5	Gráficas de las tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 400k gal...	203
Figura 5-5	Gráficas de las tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 500k gal...	204

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1-5	Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 25k gal.....	200
Gráfica 2-5	Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 50k gal.....	201
Gráfica 3-5	Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 100k gal.....	202
Gráfica 4-5	Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 400k gal.....	203
Gráfica 5-5	Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 500k gal.....	204

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

Los primeros tanques elevados fueron construidos de madera, apoyados sobre columnas de piedra o de ladrillos y tenían como finalidad servir como estaciones de abastecimiento de agua para los trenes de vapor. La capacidad y la durabilidad de estos tanques eran muy limitados por lo que se decidió tomar el acero como material para la construcción de los mismos, este cambio fue importante ya que también ayudó a terminar con las preocupaciones de salud pública. La mayoría de los tanques elevados construidos en los Estados Unidos antes de 1950 fueron de construcción remachada, sus columnas consistían en canales opuestos conectados por refuerzos de celosía. El techo de los tanques elevados pequeños generalmente tenía una forma de cono, conocida como “sombrero de bruja”, en los tanques elevados más grandes el techo tenía una forma hemisférica o elipsoidal (MEIER Y AWWA, 2010, p.2).

La construcción soldada en los tanques de acero se convirtió en una normativa para las industrias a principios de los años cincuenta, y sigue siendo un estándar para la mayoría de los tanques elevados. Los primeros tanques elevados de un solo pedestal aparecieron en la década de 1940, pero a partir de los años cincuenta estos tanques se convirtieron en una alternativa para los tanques elevados de múltiples columnas gracias a una gran eficiencia de su estructura que permitió economizar en los costos de mantenimiento. Una década después apareció un nuevo diseño de tanques elevados de un solo pedestal con columna estriada, este nuevo diseño aportó un área dentro de la columna que puede ser utilizado para los equipos de bombeo, para almacenamiento, para oficinas y otros usos (MEIER Y AWWA, 2010, p.2).

Para finales de la década de los ochenta apareció una nueva estructura de tanque elevado, que tenían un parecido a los tanques elevados estriados con la diferencia que el pedestal era de hormigón y la geometría del tanque de acero era la misma que en los tanques elevados estriados, a este tipo de tanques se lo llamó como tanque compuesto. Este nuevo diseño disminuyó el costo de mantenimiento en comparación con los tanques estriados debido a que el pedestal es de hormigón, lo cual disminuye el área de pintado para protección del acero (MEIER Y AWWA, 2010, p.3). A través de los años se han ido desarrollando toda esta variedad de modelos de tanques elevados, y cada diseño se utilizará dependiendo la necesidad que se requiera cubrir y los

beneficios que proporcione cada diseño, la empresa contratista encargada de la fabricación de los tanques son lo que deberán recomendar el mejor diseño de tanques elevados.

En el Ecuador se han desarrollado varios tanques elevados para la distribución de agua potable, principalmente en la región costa donde no existen elevaciones pronunciadas que puedan utilizarse para la distribución de agua por gravedad, un ejemplo de ello es el tanque elevado ubicado en el sector de La Isla Trinitaria en la ciudad de Guayaquil, fabricado en el 2004, tiene una capacidad de 500.000 galones y con más de 30 metros de altura total, con el objetivo de abastecer agua potable a veinte mil familias del sector durante 24 horas. A pesar de esto en el Ecuador no existe una guía de diseño para tanques elevados por lo que para realizar su diseño se debe acudir a guías, estándares o manuales extranjeros e intentar aplicarlos en el país.

Los procedimientos de diseño han ido mejorando a través de la historia y esto gracias a la aparición de computadoras y el desarrollo de software. Esto ha permitido aprovechar al máximo las computadoras como herramientas de asistencia para los ingenieros que han ayudado a mejorar y realizar con mejor calidad los proyectos de ingeniería.

1.2 Formulación del problema

Los tanques elevados de acero con soporte estructural para almacenamiento de agua se usan normalmente cuando la elevación del terreno es insuficiente para asegurar la distribución de agua a presión adecuada por gravedad. En todo el mundo estos tanques son utilizados en su gran mayoría por los municipios o por las industrias para el abastecimiento de agua, para sistemas de extinción de incendios entre otros. Es por esto que los tanques de almacenamiento de agua desempeñan un papel importante para la utilidad pública.

En el país, principalmente en la región costa al no existir terrenos que tengan considerables elevaciones, ha sido necesaria la fabricación de tanques elevados, por esta razón varias industrias se dedican a la fabricación de este tipo de tanques, produciendo así un mercado muy competitivo, por ello que es indispensable para las industrias realizar procedimientos más rápidos y eficientes los cuales les permitan tomar decisiones de una forma ágil y rápida con la finalidad de cumplir los tiempos establecidos ya que una pérdida de tiempo representa un gran problema debido a que esto causa una pérdida de dinero en las industrias. Al iniciar el diseño de estos tanques las industrias se encuentran con otro gran problema, al no existir en el país una guía de diseño para tanques elevados de acero para almacenamiento de agua y mucho menos especificados para los tanques con soporte estructural, por lo que se requiere utilizar códigos, reglamentos, criterios y guías de otros países. Además que todas las guías necesarias para un correcto diseño de estos tanques no

se encuentran en un solo documento, por lo que el diseñador debe realizar una investigación de varios códigos o guías existentes y esto toma cierto tiempo considerable.

Ante tal situación las industrias buscan soluciones que le permitan ahorrar tiempo en el proceso de diseño de tanques elevados, por lo que la elaboración de una herramienta, tal como una hoja electrónica, que utilice una metodología de diseño adecuada, que sea de fácil utilización para el personal técnico y que permita rápidamente y de forma sencilla la introducción de datos, así como la lectura del reporte para el pre-diseño, sería una solución óptima ante tal situación.

1.3 Justificación

1.3.1 *Justificación teórica*

Para las industrias es importante cumplir con los tiempos propuestos para el desarrollo de sus proyectos, para ello es necesario buscar métodos o desarrollar técnicas que permitan disminuir tiempos en sus procesos ya que el diseño de tanques elevados de acero para almacenamiento de agua, es un proceso largo y complejo que se facilita cuando se tiene la información necesaria a su disposición. Por esta razón en el presente trabajo se recopila la información teórica suficiente para realizar un correcto pre-diseño de tanques de acero para el almacenamiento de agua con soporte estructural para capacidades entre 25.000 a 500.000 galones.

1.3.2 *Justificación metodológica*

Las hojas electrónicas han sido ampliamente utilizadas porque facilitan los cálculos numéricos a través del uso de fórmulas. De una manera muy sencilla y rápida se pueden hacer operaciones aritméticas sobre cientos de miles de datos numéricos, es por esta razón que se ha optado en utilizar una plantilla Excel para el pre-diseño de tanques elevados.

Para desarrollar la hoja electrónica es necesario implantar una metodología de diseño que sirva como manual o apoyo para los ingenieros dedicados a la elaboración de este tipo de tanques. La metodología se basará en criterios y requisitos de diseño que proponen ciertas normativas tanto extranjeras como nacionales tales como: la *Welded Carbon Steel Tanks for Water Storage* de la *American Water Works Association (AWWA)*, la *Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC)*, *The American Petroleum Institute (API)*, entre otras.

1.3.3 *Justificación práctica*

La aplicación de la hoja electrónica para el pre-diseño de tanques elevados proporcionará la información suficiente para realizar un correcto diseño. Este trabajo se desarrolla por petición de la Industria Acero de los Andes en desarrollar una herramienta que facilite el pre-diseño de los tanques elevados con el objetivo de que la industria pueda estimar el presupuesto de un proyecto en menor tiempo. Además esta herramienta pretende disminuir las horas hombre invertidas en el desarrollo de un proyecto debido a que el diseñador ya no tendrá la necesidad de comenzar desde cero en el diseño de cada tanque elevado.

1.4 Alcance

Se espera alcanzar a desarrollar una hoja electrónica, para el pre-diseño de tanques elevados de acero con soporte estructural para una capacidad de 25000 hasta 500000 galones y realizar su validación mediante el Software SAP 2000. La hoja electrónica se desarrollará basada en normas nacionales e internacionales, que facilite los cálculos.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo general*

Desarrollar una hoja electrónica para el pre-diseño de tanques elevados de acero con soporte estructural para capacidades desde 25,000 hasta 500,000 galones y realizar su validación en el software SAP 2000

1.5.2 *Objetivos específicos*

Elaborar un fundamento teórico para el diseño de tanques elevados de acero para almacenamiento de agua con soporte estructural de múltiples columnas.

Comparar los resultados aportados por la hoja de electrónica con el Software SAP 2000.

Elaborar una API (Application Programming Interface) que permita la modelación automática de los tanques elevados en el software SolidWorks.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO SOBRE TANQUES DE ACERO PARA EL ALMACENAMIENTO DE AGUA Y CRITERIOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL.

El presente capítulo tiene como objetivo desarrollar el estudio bibliográfico sobre los tipos tanque de acero para almacenamiento de agua, el efecto del agua en el acero, criterios de diseño estructural y estándares para un correcto diseño.

2.1 Tanques de acero para almacenamiento de agua

Los tanques de acero son utilizados principalmente para el almacenamiento de agua y para otro tipo de fluidos en la industria como el petróleo y sus derivados. Los tanques de almacenamiento de agua y de petróleo normalmente funcionan a presión atmosférica o a una presión manométrica que no sea mayor a $0,1 \text{ N/mm}^2$ (ARYA Y AJMANI, 2001, p.663). Los tanques de almacenamiento de agua son requeridos esencialmente para el suministro de agua en municipios o en industrias y son estructuras importantes en los sistemas de abastecimiento de agua para una población (SINGH Y ISHTIYAQUE, 2015, p.291). Estas estructuras se pueden construir de diferentes materiales aunque los tanques para almacenamiento de agua contruidos de acero superan con mucho el número de grandes recipientes para almacenamiento de agua de cualquier otro material y por lo general estos tanques tienen una geometría cilíndrica. Según el estándar American Water Works Association en su Manual de Prácticas de abastecimiento de agua (AWWA M42) los tanques de acero para almacenamiento de agua se clasifican como:

- Tanques elevados
- Depósitos
- Tanques cilíndricos verticales

El tipo de tanque de acero que se vaya a seleccionar dependerá del propósito para el cual se construya. Para seleccionar la configuración de tanque se deberá tomar en cuenta principalmente la capacidad y elevación requeridas, así como el costo, y también la apariencia que es una consideración muy importante.

Los tanques elevados son utilizados esencialmente en lugares donde la elevación del terreno es insuficiente para asegurar la distribución de agua a presión por gravedad. Estos tanques están compuestos por dos componentes principales, el propio tanque para el almacenamiento de agua

y su estructura de soporte aunque también es importante tener en cuenta la cimentación en la cual será levantada la estructura (American Water Works Association, 2013, pp.12 y 13).

Los Depósitos, por su parte, representan la configuración más común para el almacenamiento de agua y consiste en un tanque cilíndrico de fondo plano y que se encuentra soportado en tierra, se caracteriza por tener una altura menor o igual que su diámetro. Este tipo de tanque, en comparación con los demás tipos de tanques es el más económico para fabricar, levantar y mantener, debido a su baja altura. Estos tanques pueden tener una construcción soldada o atornillada (American Water Works Association, 2013, p.3).

Mientras que los **Tanques Cilíndricos Verticales**, se consideran tanques de almacenamiento de forma cilíndrica con fondo plano y que se encuentran soportados en tierra, se caracterizan por tener una altura mayor que su diámetro. Estos tanques generalmente se construyen donde hay ausencia de terrenos elevados y pueden tener una construcción soldada o empernada. Son más utilizadas para almacenamiento de hidrocarburos que para el abastecimiento de agua municipal. El proceso de diseño del cilindro y del fondo de este tipo de tanques es el mismo que para los Depósitos. Algo importante de estos tanques es que se diseñan de manera que el agua en el tanque mantenga la presión del sistema hasta un cierto nivel bajo, cuando se llega a este nivel bajo se activarán las bombas para la distribución del agua de la parte inferior del tanque al sistema (American Water Works Association, 2013, p.4).

2.2 Tanques elevados de acero

Los tanques elevados de acero se clasifican debido a la forma de su estructura de soporte y debido a la forma del tanque de almacenamiento. De acuerdo a la forma del soporte, las configuraciones más habituales son: Tanque elevado de múltiples columnas, Tanque elevado de pedestal, Tanque elevado con columna estriada y Tanque elevado compuesto (American Water Works Association, 2013, pp.21-32). Estos tipos de tanques se puede observar en la figura 1-2.

Debido a la forma del tanque de almacenamiento las configuraciones más habituales son los tanques de forma cilíndrica, rectangular y esférica o esferoide, de estos el más común para tanques elevados son los de forma cilíndrica, debido a su facilidad de fabricación. Otra clasificación va de acuerdo a la forma del fondo del tanque los cuales se pueden clasificar como tanques de fondo plano, de fondo curvado o de fondo cónico.

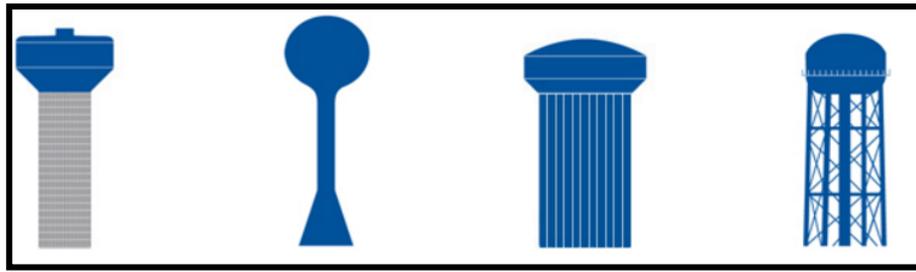


Figura 1-2. Tipos de tanques: compuesto, de pedestal, estriado y de múltiples columnas, respectivamente

Fuente: (LANDMARK, 2017)

El diseño de tanques elevados depende de la capacidad, la elevación requerida, el tamaño y forma de los miembros estructurales, estabilidad de la estructura y de la cimentación y tipo de accesorios para la operación. Según la American Water Works Association (2013), el comprador solo debe especificar la altura, así como las dimensiones entre la parte superior de la cimentación y el nivel superior de la capacidad del tanque, no se deben especificar otras dimensiones, que son una función del fabricante, esto con la finalidad de minimizar los costos. Las uniones de las placas de acero para la formación de estos tanques son típicamente soldada pero también pueden tener una unión de placas mediante tornillos.

2.2.1 Tanque elevado de múltiples columnas

Como su nombre lo indican estos tanques se encuentran apoyados sobre una estructura formada por varias columnas arriostradas, el número de columnas variará dependiendo de la capacidad del tanque, mientras más volumen de almacenamiento más número de columnas. La forma de los tanques que son apoyados en columnas comúnmente son de forma esferoidal o cilíndrica con fondo curvado, el manual M42 de la AWWA ha clasificado estos tanques de acuerdo a su capacidad como tanques de pequeña, mediana y gran capacidad.

2.1.1.1 Tanque elevado de múltiples columnas para pequeña capacidad

Para una pequeña capacidad se utiliza un tanque de diseño doble elipsoidal, que consiste en una pared lateral cilíndrica, un fondo y techo elipsoidal o toriesférico, y tiene un nivel de capacidad superior en el techo de varios pies por encima de la parte superior de la cubierta cilíndrica. En el pasado se construyeron hasta una capacidad de mil galones (3,8 mil litros), pero en la actualidad los tanques de doble elipsoidal se construyen solamente hasta capacidades de 200 mil galones (760 mil litros) o menos (American Water Works Association, 2013, p.13).

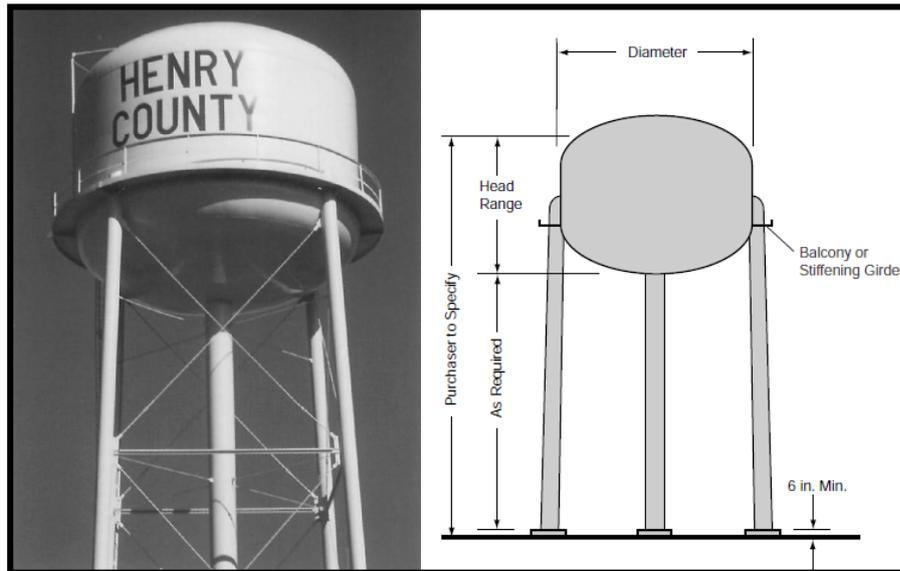


Figura 2-2 Foto y vista de la sección transversal de un tanque elevado de múltiples columnas.

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.14).

En la siguiente tabla se presentan las capacidades y dimensiones típicas usadas en tanques elevados de doble elipsoidal y de múltiples columnas, considerados como tanques de baja capacidad.

Tabla 1-2. Capacidades típicas para tanques de múltiples columnas para baja capacidad.

CAPACIDAD		RANGO Y DIMENSIONES			
<i>(Gal.)</i>	<i>(m³)</i>	<i>Diámetro (ft)</i>	<i>Rango de cabeza de agua (ft)</i>	<i>Diámetro (m)</i>	<i>Rango de cabeza de agua (ft)</i>
25,000	95	18 – 20	12.5 – 15.5	5.5 – 6.1	3.3 – 4.7
30,000	114	18 – 20	15.0 – 16.5	5.5 – 6.1	4.6 – 5.0
40,000	150	22 – 23	15.0 – 17.0	5.7 – 7.0	4.6 – 5.2
50,000	189	22 – 24	18.0 – 20.0	6.7 – 7.3	5.5 – 6.1
60,000	227	22 – 25	19.0 – 23.0	6.7 – 7.6	5.3 – 7.0
75,000	234	26 – 30	16.0 – 24.0	7.9 – 9.1	4.9 – 7.3
100,000	379	28 – 30	20.0 – 25.0	8.5 – 9.1	6.1 – 7.6

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.15)

Tabla 1-2 (Continúa). Capacidades y dimensiones típicas de tanques elevados de múltiples columnas para baja capacidad.

CAPACIDAD		RANGO Y DIMENSIONES			
(Gal.)	(m ³)	Diámetro (ft)	Rango de cabeza de agua (ft)	Diámetro (m)	Rango de cabeza de agua (ft)
125,000	473	30 – 32	23.0 – 28.0	9.1 – 9.7	7.0 – 8.5
150,000	568	32 – 34	24.5 – 29.5	9.7 – 10.4	7.5 – 9.0
200,000	757	36 – 38	28.0 – 29.5	11.0 – 11.6	8.5 – 9.0

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.15)

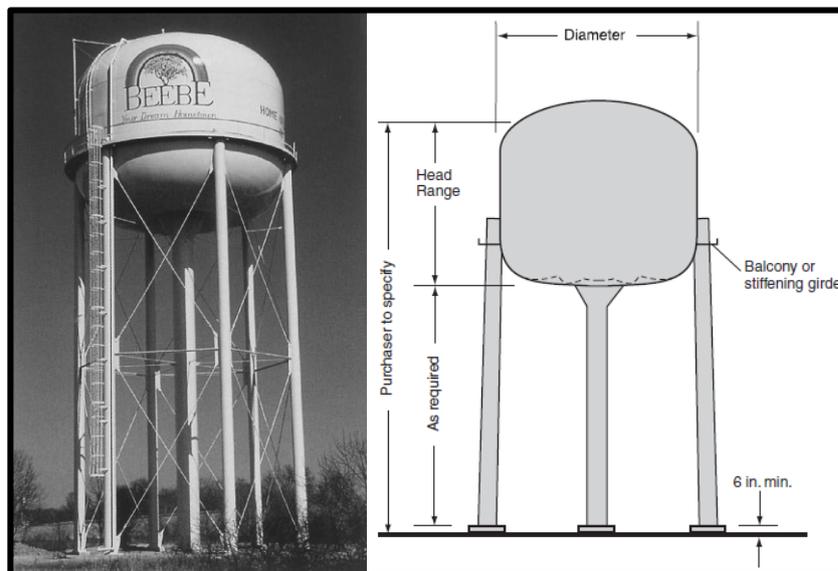


Figura 3-2. Tanque elevado de múltiples columnas para mediana capacidad.

Fuente: (American Water Works Association, 2013, pp.15-16)

2.1.1.2 Tanques elevados de múltiples columnas para media capacidad

Según la American Water Works Association (2013) para tanques elevados de múltiples columnas para capacidades medias se utiliza un diseño toro-elipsoidal, ya que éste proporciona un coste inicial más bajo debido al uso más eficiente de la resistencia del acero. Este diseño consiste en un piso de forma toroidal y un techo de forma elipsoidal como se observa en la figura 3-2, estas características hacen que el tubo central soporte y contenga una parte considerable de agua almacenada, mientras que la mayor parte del fondo actúa como una membrana de acero en

tensión, aunque usualmente también se utilizan diseño de doble elipsoidal o toriesférico. Estos tanques suelen tener una capacidad entre 200 mil galones (760 mil litros) y 500 mil galones (1,9 millones de litros).

En la tabla 2-2 se presentan las capacidades y dimensiones típicas usadas en tanques elevados de múltiples columnas considerados de mediana capacidad.

Tabla 2-2. Capacidades típicas de tanques elevados para múltiples columnas para media capacidad

CAPACIDAD		RANGO Y DIMENSIONES			
(Gal.)	(m ³)	Diámetro (ft)	Rango de cabeza de agua (ft)	Diámetro (m)	Rango de cabeza de agua (ft)
200,000	757	36 – 38	28 – 30	11.0 – 11.6	8.5 – 9.1
250,000	946	38 – 40	28 – 33	11.6 – 12.2	8.5 – 10.1
300,000	1,132	43 – 45	28 – 31	13.1 – 13.7	8.5 – 9.4
400,000	1,515	46 – 50	30 – 36	14.0 – 15.2	9.1 – 11.0
500,000	1,890	50 – 56	29 – 38	15.2 – 17.1	8.8 – 11.5
750,000	2,840	56 – 65	34 – 45	17.1 – 19.8	10.4 – 13.7
1,000,000	3,785	64 – 65	45 – 46	19.5 – 19.8	13.7 – 14.0

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.15)

2.1.1.3 Tanques elevados de múltiples columnas para gran capacidad

Los tanques elevados de gran capacidad, para más de 500 mil galones (1,890 m³), proporcionan un servicio económico a las comunidades que necesitan almacenar una gran cantidad de volumen de agua, en estos tanques se reducen los costos de funcionamiento y de bombeo debido a que tiene un rango de cabeza de agua (*head range*) bajo, esto permite que exista una mínima variación de presión de agua en el sistema.

En la tabla 3-2 se presentan las capacidades y dimensiones típicas usadas en tanques elevados de múltiples columnas, para grandes capacidades.

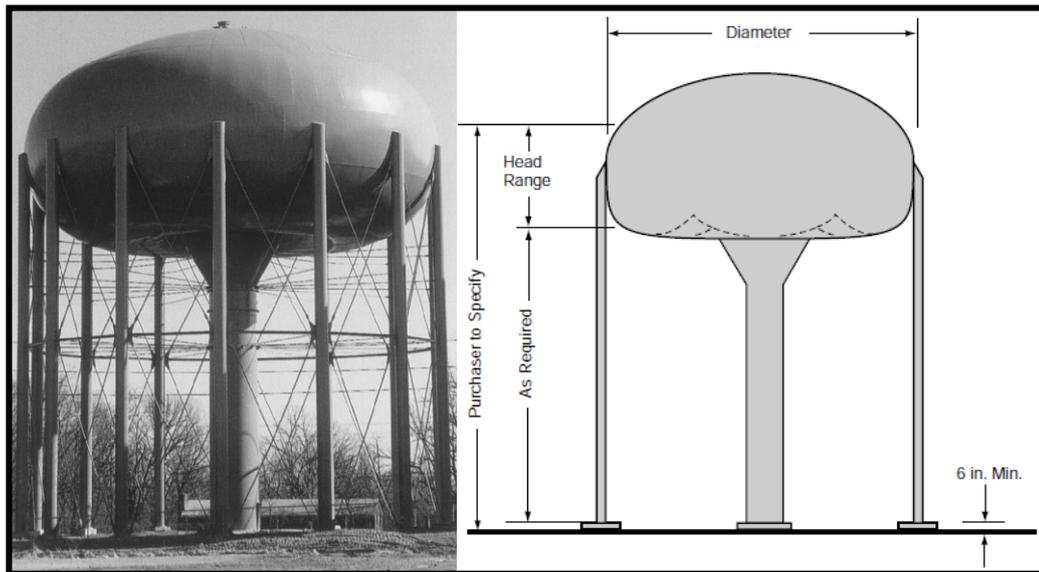


Figura 4-2. Tanque elevado de múltiples columnas para gran capacidad.

Fuente: (American Water Works Association, 2013, pp.16-17)

Tabla 3-2. Capacidades típicas de tanques elevados de múltiples columnas para gran capacidad

CAPACIDAD		RANGO Y DIMENSIONES			
(Gal.)	(m ³)	Diámetro (ft)	Rango de cabeza de agua (ft)	Diámetro (m)	Rango de cabeza de agua (ft)
500,000	1,890	60 – 65	24 – 25	18.3 – 19.8	7.3 – 7.9
600,000	2,270	65 – 70	24 – 25	19.8 – 21.3	7.3 – 7.9
750,000	2,840	70 – 76	25 – 30	21.3 – 23.2	7.6 – 9.1
1,000,000	3,735	75 – 87	25 – 35	22.9 – 25.5	7.6 – 10.7
1,500,000	5,680	91 – 98	30 – 35	27.7 – 29.9	9.1 – 10.7
2,000,000	7,570	105 – 106	34 – 36	32.0 – 32.3	10.4 – 11.0
2,500,000	9,465	108 – 117	39 – 41	32.9 – 35.7	11.9 – 12.5
3,000,000	11,360	119 – 127	35 – 40	36.3 – 38.7	10.7 – 12.2

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.16)

2.2.2 Tanques elevados de pedestal

Son tanques de acero apoyados por un solo pedestal, los cuales están constituidos por placas de acero. La geometría del tanque puede poseer varias formas, las más comunes son los tanques de

forma esférica, esferoide o cilíndrica, todos estos con un fondo cónico el cual va unido al pedestal. De la misma manera que en los tanques de múltiples columnas el manual M42 de la AWWA ha clasificado a estos tanques de acuerdo a su capacidad, teniendo tanques de pequeña y gran capacidad.

2.1.1.4 Tanques de pedestal para pequeñas capacidades

Para pequeñas capacidades es muy favorecido el tanque tipo esférico con un solo pedestal, estos tanques se construyen generalmente hasta capacidades de 200 mil galones (760 mil litros) y se utilizan a menudo cuando la apariencia es una preocupación ya que la base de forma abocinada le da una forma elegante al tanque y además este contiene suficiente espacio para las unidades de bombeo y otros equipos operativos, aunque estos tanques también se pueden construir con varias combinaciones de conos y cilindros. Las escaleras para acceder al contenedor se encuentran dentro del pedestal para protegerse contra el acceso no autorizado (American Water Works Association, 2013, p.18).

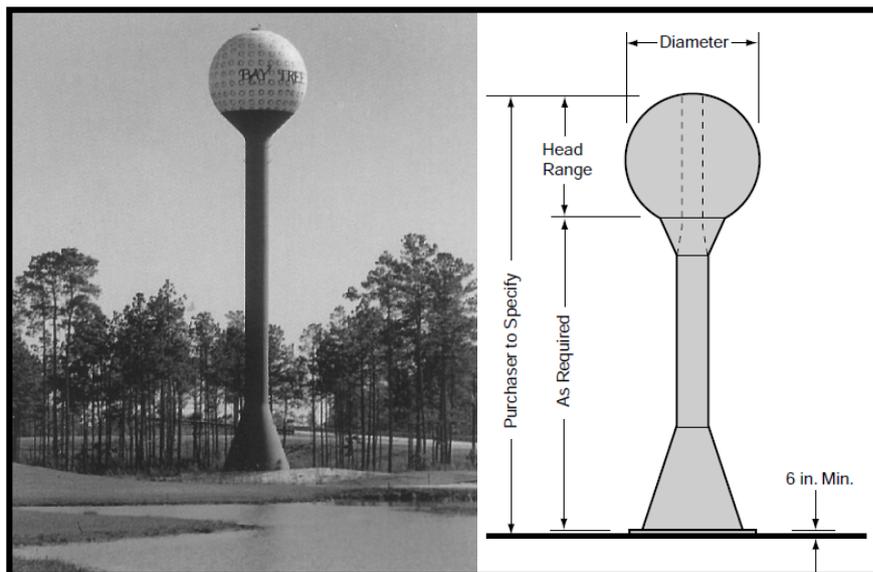


Figura 5-2. Tanque elevado de pedestal para pequeña capacidad.

Fuente: (American Water Works Association, 2013, pp.19).

En la siguiente tabla se presentan las capacidades y dimensiones típicas usadas en tanques elevados esféricos de un solo pedestal, considerados como tanques para pequeña capacidad.

Tabla 4-2. Capacidades típicas de tanques elevados de pedestal para pequeña capacidad.

CAPACIDAD		RANGO Y DIMENSIONES			
(Gal.)	(m ³)	Diámetro (ft)	Rango de cabeza de agua (ft)	Diámetro (m)	Rango de cabeza de agua (ft)
25,000	95	19 – 20	15.0 – 17.0	5.8 – 6.1	4.6 – 5.2
30,000	114	20 – 21	15.0 – 18.0	6.1 – 6.4	4.6 – 5.5
40,000	150	21 – 23	19.0 – 22.0	6.4 – 7.0	5.8 – 6.7
50,000	189	23 – 24	19.0 – 23.0	7.0 – 7.3	5.8 – 7.0
60,000	227	24 – 26	22.0 – 24.0	7.3 – 7.9	6.7 – 7.3
75,000	234	25 – 28	23.0 – 27.0	7.9 – 8.5	7.0 – 8.2
100,000	379	29 – 30	25.0 – 30.0	8.8 – 9.1	7.6 – 9.1
125,000	473	31 – 33	27.0 – 32.0	9.4 – 10.0	8.2 – 9.7
150,000	568	33 – 34	30.0 – 34.0	10.1 – 10.4	9.1 – 10.4
200,000	757	36 – 38	36.0 – 38.5	11.0 – 11.6	11.0 – 11.6

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.20)

2.1.1.5 Tanques de un solo pedestal de gran capacidad

Para grandes capacidades es muy favorecido el diseño de tanque esferoidal con un 'head-range' bajo, este tipo de tanque elevado de un solo pedestal se construye para capacidades entre 200 mil galones (760 mil litros) y 2 millones de galones (7,6 millones de litros) y además a estos tanques, el pedestal tubular le da un aspecto distintivo contemporáneo (American Water Works Association, 2013, p.18). Estos tipos de tanques se muestra en la figura 6-2, mientras que en la tabla 5-2 se presentan las capacidades y dimensiones típicas usadas en tanques elevados esféricos de un solo pedestal, considerados como tanques para gran capacidad.

2.2.3 Tanques elevados de un solo pedestal estriados

Estos tipos de tanques elevados tienen una columna de soporte central de acero estriado o acanalado que brinda rigidez estructural y que encierra el tubo ascendente, el tubo de desbordamiento y la escalera de acceso al techo del tanque. Estos tanques están disponibles para todas las capacidades, pero generalmente no se construyen en capacidades menores a 500 mil galones [1,9 millones de litros] (American Water Works Association, 2013, p.18). Además estos

tanques tienen una característica muy atractiva, ya que el espacio que se encuentra en el interior del pilar es amplio y se puede utilizar para oficinas, salas y almacenamiento de equipos o maquinaria. En la figura 7-2 en la imagen de la izquierda se muestra uno de estos tipos de tanques.

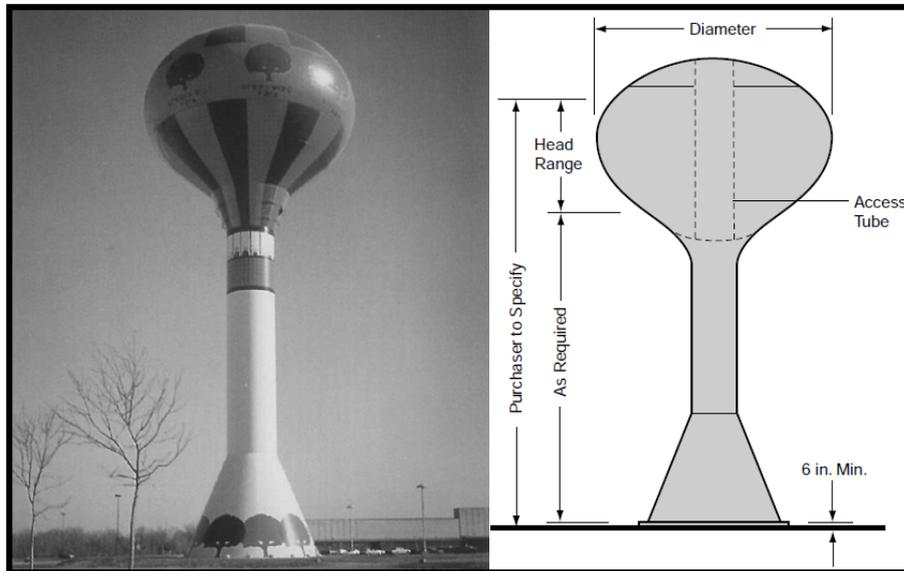


Figura 6-2. Tanque elevado de pedestal para gran capacidad (foto y vista de la sección transversal).

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.21)

Tabla 5-2. Capacidades típicas de tanques elevados de pedestal para grande capacidad.

CAPACIDAD		RANGO Y DIMENSIONES			
<i>(Gal.)</i>	<i>(m³)</i>	<i>Diámetro (ft)</i>	<i>Rango de cabeza de agua (ft)</i>	<i>Diámetro (m)</i>	<i>Rango de cabeza de agua (ft)</i>
200,000	757	40 – 42	27 – 30	12.2 – 12.8	8.2 – 9.1
250,000	946	43 – 47	25 – 32	13.1 – 14.3	7.6 – 9.7
300,000	1,132	46 – 48	30 – 33	14.0 – 14.6	9.1 – 10.1
400,000	1,515	50 – 53	30 – 40	15.2 – 16.1	9.1 – 12.2
500,000	1,890	55 – 60	30 – 40	16.3 – 18.3	9.1 – 12.2

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.22)

Tabla 5-2 (Continúa). Capacidades típicas de tanques elevados de pedestal para grandes capacidades.

CAPACIDAD		RANGO Y DIMENSIONES			
(Gal.)	(m ³)	Diámetro (ft)	Rango de cabeza de agua (ft)	Diámetro (m)	Rango de cabeza de agua (ft)
750,000	2,840	64 – 66	38 – 42	19.5 – 20.1	11.6 – 12.3
1,000,000	3,785	74 – 78	35 – 40	22.5 – 23.8	10.7 – 12.2
1,250,000	4,750	76 – 80	40 – 45	22.9 – 24.4	12.2 – 13.7
1,500,000	5,880	85 – 90	45 – 50	25.9 – 27.4	13.7 – 15.2
2,000,000	7,570	90 – 95	50 – 55	27.4 – 29.0	15.2 – 16.3

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Fuente: (American Water Works Association, 2013, p.22)

2.2.4 Tanques elevados compuestos

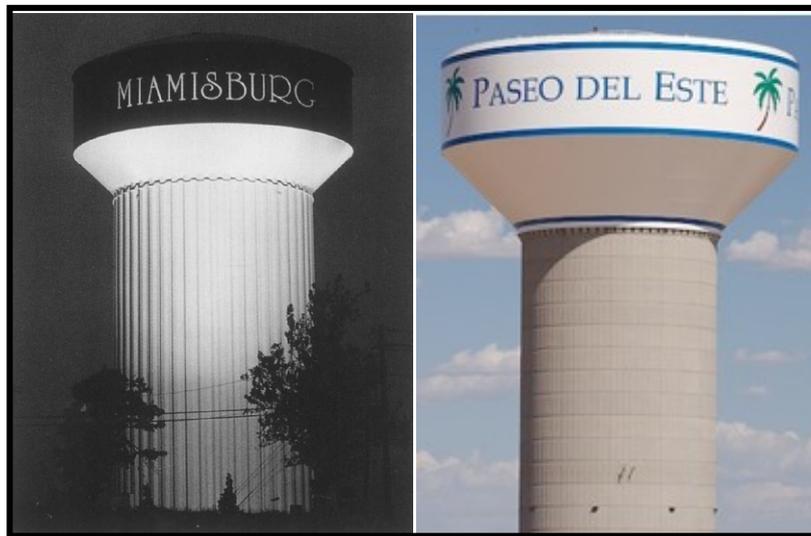


Figura 7-2. Tanque elevado estriado (izquierda) y tanque compuesto (derecha)

Fuente: (American Water Works Association, 2013; LANDMARK, 2017)

Estos tanques elevados compuestos son una combinación entre acero y el concreto, y aprovechan las mejores características de estos, teniendo una óptima combinación de materiales. El hormigón, que es excelente para soportar cargas a compresión, se utiliza como columna de soporte para el depósito de agua que es construida de acero, otra característica importante del hormigón es que

no requiere de pintura o revestimiento exterior, lo que da un ahorro económico en mantenimiento. Además que al igual que los tanques estriados en el interior del pedestal de hormigón se puede utilizar para almacenar tuberías o sistemas integrados, maquinarias o utilizarse como oficinas u otros usos (American Water Works Association, 2013; LANDMARK, 2017)

Este trabajo se concentra en los tanques de acero elevados con soporte estructural de múltiples columnas, específicamente tanques cilíndricos con fondo toriesférico, debido a que son muy utilizados para la distribución de agua potable sean en municipios o en industrias. Estos tanques suelen estar sometidos a cargas tanto verticales como horizontales que provocan esfuerzos críticos en sus elementos, por lo que es importante realizar un correcto diseño.

2.3 Geometría del tanque

Según RUANO (2011, p.3) la mejor geometría para un tanque es aquella que para un volumen dado me tome un perímetro mínimo, es por ello que se prefiere tanques cilindros o esféricos a un tanque rectangular. En los tanques esféricos o esferoides las tensiones son menores en comparación con los tanques cilíndricos, pero es común realizar tanques de forma cilíndrica debido a su facilidad de fabricación en comparación con los tanques de forma esférica, a los tanques cilíndricos se les adiciona un fondo curvo para minimizar los esfuerzos en estos (ARYA Y AJMANI, 2001, p.663). Los fondos curvos o casquetes del cilindro pueden ser de forma semiesférica, toriesférica, elíptica o cónica.

2.3.1 Casquetes

Con el objetivo de disminuir los esfuerzos que se producen en el fondo del tanque, se utilizan fondos de forma curva, y para cumplir con una buena estética se recomienda darle la misma forma al techo del tanque. Existen varios tipos de casquetes (conocidos en inglés como *Head*) que pueden ser utilizados como fondo y como cubierta de los tanques elevados. Los casquetes son superficies de revolución que se forman al girar una curva meridional alrededor de una recta conocida como un eje de revolución, en el caso de los casquetes semielípticos y toriesféricos la curva meridional se forman con dos radios, un radio de abombado (conocido en inglés como *dish radius*) y un radio de reborde (conocido en inglés como *knuckle radius*).

Las formas más comunes de casquetes son:

- *Casquete semisférico:*

Este tipo de casquete geoméricamente es la mitad de una esfera, donde el radio del casquete es igual al radio del tanque. La presión que se ejerce en este casquete se distribuye de igual manera por toda su superficie.

- *Casquete semielípticos 2:1*

Conocida también como casquete semielipsoidal, geoméricamente es la mitad de una elipse que tiene una relación entre el eje mayor y el eje menor de 2 a 1. El radio del abombado (*dish radius*) es igual al 90% del diámetro del cilindro, y el radio de reborde (*knuckle radius*) es igual al 17% del diámetro del cilindro (FONDEYUR, 2017).

- *Casquete toriesférico*

Los casquetes toriesféricos son los más usados en la industria debido a que su fabricación es más económica que los otros casquetes. Entre los casquetes toriesféricos más comunes tenemos:

- **Casquete toriesférico Klöpfer:** En los casquetes Klöpfer el radio del abombado (*dish radius*) es igual al diámetro del cilindro, y el radio de reborde (*knuckle radius*) es igual al 10% del diámetro del cilindro (FONDEYUR, 2017).
- **Casquete toriesférico Korbogen:** Este casquete también es conocida según la DIN 2813 como Semielipsoidal con radio del abombado (*dish radius*) igual al 80% diámetro del cilindro, y el radio de reborde (*knuckle radius*) es igual al 15,4% del diámetro del cilindro (FONDEYUR, 2017).

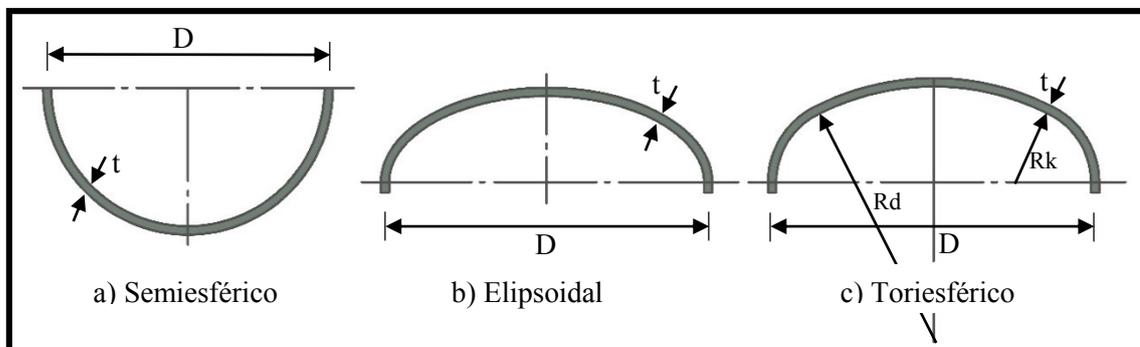


Figura 8-2. Tipos de casquetes más comunes

Elaborado por: Willian Inchilema, 2017

En la figura 8-2 se puede observar tres tipos de casquetes que suelen ser los más comunes, en ésta figura, D es el diámetro del cilindro al que van unidos los casquetes, t viene a ser el espesor de los casquetes. En el caso de los casquetes toriesféricos y semielípticos éstos son similares en el sentido que ambos están formados por dos radios de curvatura, en estos casquetes Rd es el radio de abombado (*dish radius*) y Rk es el radio de reborde (*knuckle radius*).

El presente trabajo se enfoca en los tanques con fondos toriesféricos debido a que como ya se mencionó anteriormente son muy utilizados en las industrias. Además estos casquetes se pueden construir de diferentes dimensiones, los radios de abombado y de nudillo pueden tener varios valores para formar un casquete, por lo que se puede decir que los casquetes semielípticos son un caso especial de los casquetes toriesféricos.

2.4 Esfuerzos internos en recipientes de pared delgada

Se define a una cáscara como una estructura laminar en donde una de sus dimensiones (espesor) es muy pequeño en comparación con las demás dimensiones. Las cáscaras se dividen en membranas (láminas) y en placas, los primeros se caracterizan por tener espesores muy pequeños mientras que los segundos tienen un mayor espesor en comparación con los primeros. En ese caso se analizarán las carcasas de espesor muy pequeño llamados membranas o láminas en los cuales se supone que no tienen rigidez a flexión ni a torsión y solamente se producen esfuerzos normales y en algunos casos se presentan esfuerzos tangenciales (BELLUZZI, 1973, p.479).

Se considera a un casquete como una cáscara de revolución que como ya se explicó anteriormente los casquetes se forman al girar una curva llamada generatriz o meridiano alrededor de un eje, denominado eje de revolución por lo que al cortar la superficie con un plano perpendicular al eje de revolución se forman círculos llamados paralelos o latitudinales del casquete, como se puede observar en la figura 9-2.

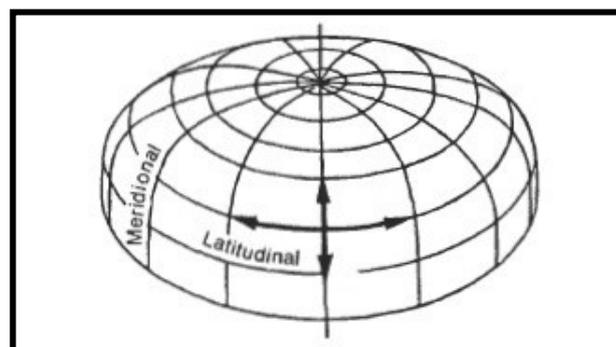


Figura 9-2. Dirección meridional y latitudinal en un casquete

Fuente: (MOSS, 2004, p 30)

Para determinar los esfuerzos en las carcasas de revolución de pared delgada se aplica la teoría de membrana, donde una de las aplicaciones más importantes de esta teoría son los depósitos de pared delgada sometidos a presión interna. Vamos a considerar la parte inferior de una carcasa de revolución, que lo llamaremos a partir de ahora solamente casquete, que se ha cortado por un plano perpendicular al eje de revolución, como se muestra en la figura 10-2 y analizaremos el equilibrio de dicha parte

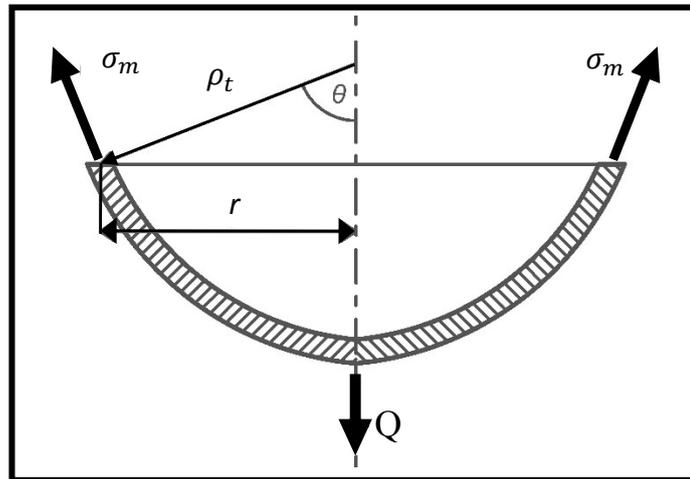


Figura 10-2. Esfuerzos meridionales en un casquete

Elaborado por: Willian Inchilema, 2017

En la Figura 10-2 se muestran las tensiones (σ_m) que se producen a lo largo del meridiano y la distancia (ρ_t) medida desde el punto de la superficie de revolución al eje de revolución a lo largo de la normal al plano tangente. Se considera que el casquete está sometido a una carga (Q) en la que se incluye el peso del líquido contenido por debajo del plano de corte, el peso de la carcasa y la fuerza resultante de la presión existente en el plano de corte, esta carga está dirigida hacia abajo siguiendo la línea de acción del eje de revolución.

Realizando sumatoria de fuerzas verticales, $\sum F_V = 0$, teniendo en cuenta que la tensión meridional, σ_m , está dado por unidad de longitud:

$$2\pi r \sigma_m \text{sen}\theta - Q = 0 \quad (1)$$

Despejando la tensión meridional:

$$\sigma_m = \frac{Q}{2\pi r \text{sen}\theta} \quad (2)$$

Como $r = \rho_t \text{sen}\theta$, reemplazando se tiene:

$$\sigma_m = \frac{Q}{2\pi\rho_t \text{sen}^2\theta} \quad (3)$$

En los casquetes se forman tanto tensiones meridionales como tensiones latitudinales, estas últimas actúan en una dirección normal al meridiano y tanqueta al paralelo. Para poder determinar las tensiones latitudinales, vamos analizar un elemento diferencial del casquete como se muestra en la figura 11-2.

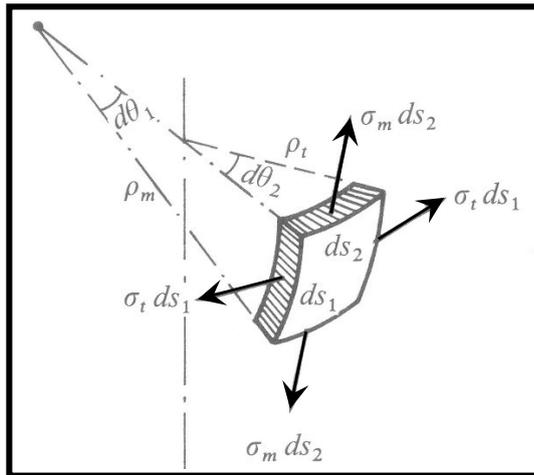


Figura 11-2. Parte diferencial de un casquete

Elaborado por: Willian Inchilema, 2017

En la figura 11-2 se muestra las tensiones meridionales (σ_m) y circunferenciales (σ_t), el radio de curvatura del meridiano (ρ_m), la longitud del elemento de arco meridiano (ds_1) y la longitud del elemento de arco perpendicular al arco meridiano (ds_2). Este elemento diferencial está sometido a varias fuerzas provocadas por la presión interna (p), por la tensión meridional y tensión latitudinal, estas fuerzas se proyectan a lo largo de la normal del casquete en el centro del elemento diferencial que se está considerando, esto para realizar un análisis de equilibrio.

Entonces, realizando el análisis de equilibrio nos resulta:

$$pds_1ds_2 - 2\sigma_m ds_2 \text{sen} \frac{d\theta_1}{2} - 2\sigma_t ds_1 \text{sen} \frac{d\theta_2}{2} = 0 \quad (4)$$

Y considerando que:

$$\text{sen } d\theta_1 \cong d\theta_1 ; \text{sen } d\theta_2 \cong d\theta_2$$

Reemplazando en la ecuación (4):

$$p ds_1 ds_2 - 2\sigma_m ds_2 \frac{d\theta_1}{2} - 2\sigma_t ds_1 \frac{d\theta_2}{2} = 0 \quad (5)$$

Y como: $ds_1 = \rho_m d\theta_1$ y $ds_2 = \rho_t d\theta_2$, por lo que sustituyendo nos queda:

$$p \rho_m d\theta_1 \rho_t d\theta_2 - 2\sigma_m \rho_t d\theta_2 \frac{d\theta_1}{2} - 2\sigma_t \rho_m d\theta_1 \frac{d\theta_2}{2} = 0 \quad (6)$$

Por ultimo despejando p la ecuación, nos queda:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = p \quad (7)$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de La place. Con las ecuaciones (2) y/o (3) calculamos los esfuerzos a lo largo del meridiano (σ_m) para luego introducirle en la ecuación (7) y de esa manera determinamos (σ_t).

Al no existir tensiones tangenciales sobre las caras del elemento considerado, en todo punto de la membrana se tiene un estado plano y por cuestiones de simetría las tensiones σ_m y σ_t son principales (BELLUZZI, 1973, p.479). A lo largo del espesor, entre las paredes interior y exterior de la envolvente, existe otra tensión principal que varía entre los valores de p y 0, Pero al tratarse de una envolvente de pared delgada, las tensiones meridiana y circunferencial son mucho mayores que p , por lo que se prescinde de esta última en comparación a las dos primeras, es decir, se considera igual a cero. Por lo tanto, el material de la envolvente se encuentra en un estado tensional plano. Así, si aplicamos el criterio de von Mises, se obtiene:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_m^2} - \sigma_t \sigma_m < \sigma_u \quad (8)$$

2.4.1 Recipientes cilíndricos sometidos a presión interna.

Si tenemos un recipiente cilíndrico sometido a una presión p , y con un radio r , como se muestra en la figura 12-2. En este caso en radio de meridiano tiene un valor infinito $\rho_m = \infty$, mientras que $\rho_t = r$ por lo que la ecuación de Laplace se reduce a:

$$\sigma_t = pr \quad (9)$$

$$p = \frac{\sigma_t}{r} \quad (10)$$

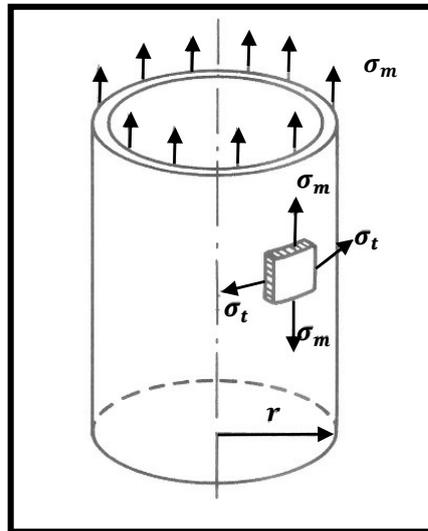


Figura 12-2. Esfuerzos en un cilindro sometido a presión interna

Elaborado por: Willian Inchilema, 2017

Para calcular la tensión meridional (σ_m) utilizamos la ecuación (2) o (3).

2.5 El agua y sus efectos en el acero

Los tanques de acero para almacenamiento de agua son muy importantes para el abastecimiento de agua pública o industrial, y el material más importante para la fabricación de tanques de almacenamiento es el acero, pero existe un problema que afecta a todos los aceros, la corrosión, que con el tiempo termina deteriorando a nuestro material disminuyendo así el espesor de nuestro tanque que a la larga producirá fallos como fracturas en la carcasa del tanque. Debido a que la corrosión del acero se da con facilidad en medios acuosos, es muy importante entender el efecto que provoca el agua en el acero.

2.5.1 El agua

Según la Real Academia Española (2014), agua es el nombre que se le da a la sustancia líquida transparente, incolora, inodora e insípida cuya molécula está formada por tres átomos pequeños, dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O), que se encuentran unidos por enlaces covalentes. Esta es una sustancia de vital importancia para la sostenibilidad de la vida ya que la

mayoría de los organismos vivos del planeta tiene agua en su composición sea en grandes o pequeñas porciones. En el ser humano el 70 % de su composición es agua.

En la superficie del globo terráqueo, el agua ocupa el 71%, mientras que el 29% restante esta forma por la masa continental. Los océanos tienen la porción más grande de agua, constituyendo el 96,5 % del agua del planeta.

2.1.1.6 Propiedades físicas del agua

Entre las propiedades físicas del agua se pueden mencionar que su estado físico está compuesto por sólido, líquido y gaseoso. No posee color, pero es de color azul cuando se mira a través de espesores de seis y ocho metros, porque absorbe las radiaciones rojas; a su vez no tiene sabor y no tiene olor, considerando al agua como un líquido inodoro e insípido; incoloro; la propiedad de más interés para el presente trabajo es su densidad de 1 g./c.c. a 4°C.

2.1.1.7 Propiedades químicas del agua

Algunas propiedades químicas del agua son las siguientes:

- Reacciona con los óxidos ácidos
- Reacciona con los óxidos básicos
- Reacciona con los metales
- Reacciona con los no metales
- Se une en las sales formando hidratos

2.5.2 Corrosión en el acero

2.1.1.8 La naturaleza de la corrosión

En su libro Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, SMITH (1998, p.595) menciona que “corrosión puede definirse como el deterioro de un material producido por el ataque químico de su ambiente”. Mientras que AVNER (1988, p.578) define a la corrosión “como la destrucción de un material por interacción química, electro-química o metalúrgica entre el medio y el material”. En otras palabras la corrosión puede definirse como una reacción química producto del contacto entre un metal y el ambiente (oxígeno), el cual produce un deterioro del objeto metálico. La corrosión del acero en soluciones acuosas es un proceso substancialmente

electroquímico, en el cual una parte de un metal está transformándose de un estado metálico a un estado iónico.

La corrosión ocurre cuando existe un flujo de corriente de una cierta parte de la superficie de un metal a otra parte del mismo metal por medio de una solución que contenga iones, esta solución es llamada electrolito, y los iones son átomos que se encuentran eléctricamente cargados, un ejemplo de electrolito puede ser el agua pura que contiene iones de hidrogeno (H^+) e hidróxilo (OH^-) con carga positiva y negativa respectivamente. Para que la corrosión ocurra debe completarse el circuito eléctrico, en el cual debe haber dos electrodos, un ánodo y un cátodo, estos electrodos deben estar conectados entre sí, sea por un puente metálico o por simple contacto, y además deben estar sumergidos en un electrolito (MEIER & AWWA, 2010, p.82). Los electrodos pueden ser diferentes metales e incluso pueden ser diferentes áreas de un mismo metal. Es importante que para que fluya la corriente debe haber una diferencia de potencial entre los electrodos.

2.1.1.9 *Métodos contra la corrosión*

Para reducir o detener la corrosión el diseñador puede disponer de lo siguiente:

- Aislar el ánodo respecto al cátodo.
- Aplicar un recubrimiento protector que interrumpa la corriente de la corrosión.
- Imponer una corriente eléctrica opuesta a la corriente de la corrosión (protección catódica).
- Eliminar el electrolito (manteniendo seco el metal).

2.6 Estructuras metálicas

Se entiende por estructura a un conjunto de elementos unidos entre si formando un cuerpo capaz de resistir los efectos de las fuerzas y agentes exteriores que actúan sobre dicho cuerpo manteniendo su forma y cualidad a lo largo del tiempo (NEXOMETAL, 2016). Las estructuras metálicas son, valga la redundancia, estructuras donde la mayoría de sus elementos son materiales metálicos, normalmente acero, estas estructuras son muy utilizados en la industria debido a que posee una gran capacidad de resistencia debido a uso del acero, además que permiten la ejecución de obras que implican grandes luces y grandes alturas brindando seguridad, economía y ahorro de tiempo.

Según la NEC-SE-DS (2014, p.9) las estructuras se clasifican en edificaciones y otras estructuras. Dentro de los edificios se incluyen estructuras de marco rígido, marco simplemente conectados, muros de carga, soportes por cables y en voladizo (PILLAJO Y SARMIENTO, 2009, p.4); mientras que las estructuras diferentes a las edificaciones pueden ser puentes, torres para transmisión, tanques, etc.

2.6.1 *Diseño estructural*

El diseño estructural se realiza después de que se haya realizado los estudios respectivos como el estudio de suelo, de alternativas, de sistemas estructurales, etc. El objetivo de realizar el diseño estructural es lograr establecer las dimensiones y características de los elementos que conforman la estructura para que sea capaz de resistir todas las cargas aplicadas sobre sí sin fallar en su vida útil, con un grado de seguridad aceptable y económica.

2.6.2 *Aceros estructurales*

El acero es una aleación de hierro con ciertas cantidades pequeñas de carbono, el contenido de carbono en el acero es común entre 0,2 y 0,3 por ciento en peso. Podemos cambiar las propiedades del acero al variar las cantidades de carbono y aumentando otros elementos como el silicio, níquel, manganeso y cobre. El acero como material estructural tiene muchas propiedades deseables como su gran resistencia, gran ductilidad, poco peso, tiene una facilidad de fabricación y entre otras propiedades convenientes.

Según la ASTM los aceros estructurales se clasifican como: aceros al carbono; aceros de baja aleación y altas resistencias; y los aceros de baja aleación, alta resistencia y resistencia a la corrosión.

Los aceros al carbono tiene un contenido máximo de 1.7 % de carbono, estos aceros se subdividen en aceros de bajo carbono (menores al 0,15%), acero dulce (entre 0,15 y 0,29%), acero de medio carbono (entre 0,3 y 0,59%) y aceros de alto carbono (entre 0,6 y 1,7%) , ejemplo: A36, A53, A500, A501 y A529.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación, son aceros que contienen además del carbono y el manganeso otros elementos como el columbio, vanadio, cromo, silicio, cobre y níquel, estos elementos de aleación no exceden el 5% de la composición total del acero y son los que le brindan la alta resistencia al acero. Estos aceros tienen límites de fluencia entre 40 y 70 Klb/plg², ejemplo: A572, A618, A913 y A992

Los aceros de alta resistencia, baja aleación y resistentes a la corrosión atmosférica son aceros aleados con bajas cantidades de cobre que le brindan alta resistencia a la corrosión, a estos aceros también se les conoce como aceros patinables debido a que “cuando se exponen estos aceros a la atmósfera, la superficie de estos aceros oxidan y se les forma una película adhesiva muy comprimida (conocida también como ‘patina bien adherida’ o ‘capa de óxido), que impide una mayor oxidación y se elimina así la necesidad de pintarlos” (MCCORMAC Y CSERNAK, 2013, p.21), ejemplo: A242, A588 y A847

2.1.1.10 *Ventajas del acero estructural*

- El acero tiene uniformidad en resistencia y sus propiedades no cambian apreciablemente con el tiempo.
- El acero tiene una gran resistencia por unidad de peso, esto significa que las estructuras de acero resultan de poco peso en comparación con estructuras de otro material.
- Los aceros estructurales tienen una gran ductilidad, según McCormac y Csernak (2013, p.2) ductilidad es la propiedad que tiene un material para soportar grandes deformaciones sin fallar bajo esfuerzos de tensión altos.
- Los aceros estructurales tienen la ventaja de durar indefinidamente si se le brinda un correcto mantenimiento.
- Los aceros estructurales tienen gran resistencia y ductilidad, los materiales que poseen estas dos propiedades se les conoce como materiales tenaces, McCormac y Csernak (2013, p.3) define la tenacidad como la propiedad de un material para absorber energía en grandes cantidades.
- El comportamiento del acero estructural es prácticamente lineal elástico (ley de Hook), es decir que después de aplicar la carga y ser descargado, este regresa a su forma original, esto se cumple hasta cierto punto donde los esfuerzos ya son considerables.
- El acero es el material que más se acerca a un comportamiento
- Las estructuras metálicas tienen la ventaja de ensamblarlas y desmantelarlas con facilidad.

- El acero es un material reciclable.

2.1.1.11 *Desventajas del acero estructural*

- El acero es susceptible a la corrosión ya que en muchas estructuras el acero está expuesto al aire, al agua y a ambientes químicos, producto de esto deben pintarse continuamente.
- El acero estructural pierde sus propiedades mecánicas considerablemente en presencia de altas temperaturas como las que pueden presentarse en incendios y la protección del acero contra el fuego es muy costosa.
- Ante la presencia de cargas cíclicas o inversiones de sentido de esfuerzos, el acero estructural se fatiga, reduciendo así su resistencia.
- El acero estructural en ciertas condiciones puede perder su ductilidad y tener una falla frágil la cual se presenta un poca o ninguna deformación plástica.
- Se requiere de una alta calidad de supervisión y tiene mucha importancia durante todo el proceso de fabricación, desde que se receipta la materia prima hasta que se realiza el montaje de la estructura.

2.7 Cargas de diseño estructural

El Código Internacional de la Edificación IBC (2009, p.303), en su capítulo 16, define a las cargas como fuerzas u otras acciones que resultan del peso de materiales de construcción, ocupantes y sus posesiones, efectos ambientales, movimientos diferenciales y cambios dimensionales restringidos. Las cargas de diseño se clasifican en cargas permanentes y cargas variables. Las cargas permanentes son aquellas cargas que actúan con una magnitud constante o que su variación con el tiempo es rara, estas permanecen en una posición constante durante toda la vida útil de la estructura, todas las demás cargas que no entren en esta categoría se consideran cargas variables.

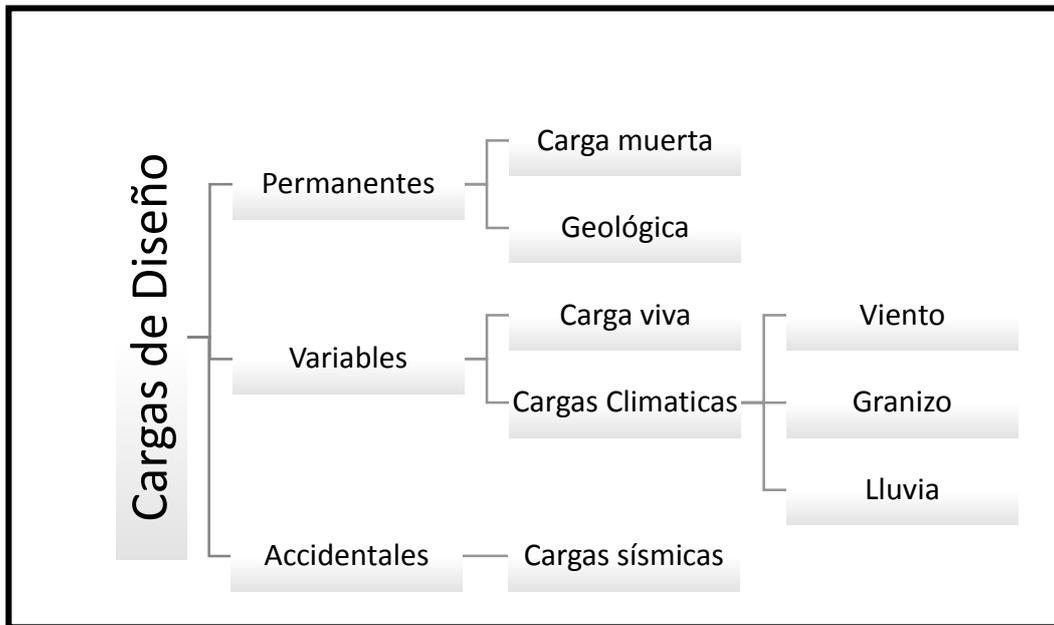


Figura 13-2. Cargas de diseño.

Elaborado por: Willian Inchilema, 2017

2.7.1 *Carga muerta*

La carga muerta se considera como una carga permanente y de magnitud constante que permanece fija en el mismo lugar. Estas cargas están constituidas por el peso propio de los materiales de construcción de la edificación o estructura, se incluye también el peso de accesorio, equipos o sistemas que permanezcan fijas dentro la edificación o estructura.

2.7.2 *Carga viva*

Las cargas vivas se consideran como cargas variables que pueden cambiar de lugar y magnitud y son aquellas cargas que son producidas por uso y por la ocupación de las edificaciones o estructuras.

La Norma ecuatoriana de la Construcción (NEC SE CG, 2014, p.) considera a las cargas vivas como sobrecargas de uso y dependen de la ocupación a la que están destinada la edificación o estructura, y están conformadas por los pesos de las personas, equipos y accesorios móviles o temporales, mercadería en transición, y otras.

2.7.3 Cargas climáticas

Las cargas climáticas también se encuentran dentro de las cargas llamadas variables y son aquellas causadas por la naturaleza, que tienen un origen climático, estas pueden ser cargas causadas por viento, granizo y lluvia.

El viento es el desplazamiento de masas de aire que se genera por la diferencia de presión atmosférica provocadas por la variación de temperatura que existen en diferentes partes de la superficie terrestre (OROZCO, 2011, p.22). Se le considera como cargas de viento a la fuerza que ejercen dichas masas de aire en movimiento. Cuando el movimiento del viento es fuerte pueden ser muy destructivas para la estructura debido a que generan una gran presión sobre la superficie de la estructura. Las magnitudes de las cargas de viento varían dependiendo de la ubicación geográfica de la estructura, las alturas sobre el nivel de terreno, de otras estructuras y del tipo de terreno que rodean a la estructura que se va a diseñar. Las cargas de viento generan presiones sobre las caras verticales a barlovento, como presiones o succiones en superficies inclinadas a barlovento y como succiones en superficies verticales o inclinadas a sotavento.

Las cargas de granizo y de lluvia son fuerzas provocadas por el peso de los mismos acumulados o estancados en las estructuras, es más crítico cuando las estructuras tienen techos horizontales, especialmente en estructuras que se encuentren en lugares con climas cálidos. En los techos horizontales ocurre un fenómeno el cual el acumulamiento del agua o granizo es más rápido que lo que se tarde en escurrirse, este fenómeno se llama encharcamiento, el cual debe ser controlado caso contrario puede causar grandes problemas incluso provocar el colapso de la estructura.

2.7.4 Cargas sísmicas

Las cargas de sismo son consideradas como cargas accidentales ya que como su nombre lo indica estas suceden accidentalmente en la vida de una estructura, estas cargas no son constantes y pueden llegar a tener una gran magnitud causando así grandes daños en las estructuras. En lugares cercanos al punto donde se origina el sismo, conocido como epicentro, se perciben movimientos de grandes intensidades tanto verticales como horizontales, mientras que en lugares lejanos, a cientos de kilómetros del epicentro, predomina el movimiento horizontal (ARQUIVOLTA, 2015).

Los movimientos del terreno, generados por el sismo, transmiten aceleraciones a las estructuras las cuales generan fuerzas laterales también llamadas fuerzas inerciales o sísmicas que dependerán de la masa y su distribución en la estructura.

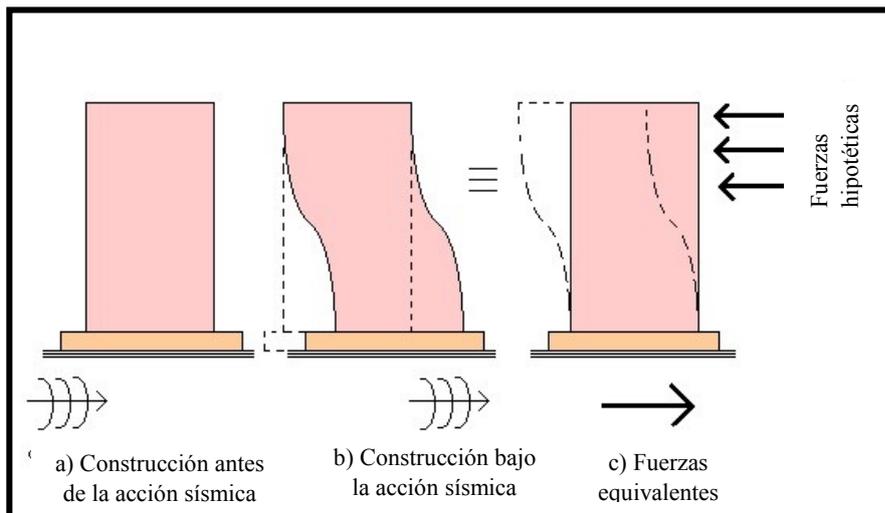


Figura 17-2. Fuerzas laterales en un edificio provocadas por un sismo

Fuente: (ARQUIVOLTA, 2015)

La respuesta de una estructura a los sismos depende de diversos factores tales como: la distribución de la masa en la estructura y su tamaño, la rigidez de la estructura, el tipo de suelo, la sismicidad de la zona, las características del sismo. La combinaciones de estos factores pueden llegar a causar grandes fallos en la estructura incluso llevarlos hasta el colapso.

2.8 Métodos de diseño establecidos por la AISC

Existen diversos métodos para el diseño de miembros estructurales y sus conexiones de las cuales la AISC 360 (2010) nos proporciona dos: El Diseño con factores de carga y resistencia (conocida como LRFD por sus siglas en inglés, Load and Resistance Factor Design) y el Diseño por esfuerzos permisibles (conocida como ASD, Allowable Strength Design), ambos métodos están basados en el criterio de diseño de estados límites.

Un estado límite define una condición en la que un elemento estructural cesa de cumplir su función prescrita. Estos estados límites se dividen en dos clases: de resistencia y de servicio. La primera clase tiene que ver con la seguridad estructural para prevenir daños y colapsos, está relacionada con el comportamiento para máxima resistencia dúctil, pandeos, fatiga, fractura, volteo o deslizamiento; el segundo está relacionada con las condiciones de funcionamiento y en la cual el incumplimiento de estas afecta al normal uso de la estructura, se puede decir que se vincula con la funcionalidad de la estructura, en situaciones tales como deflexiones, vibraciones, deformaciones permanentes y rajaduras (MCCORMAC Y CSERNAK, 2013; VERGARA, 2016; CRISAFULLI, 2014).

En ambos métodos se utiliza el término de Resistencia nominal (R_n), que viene a tener el mismo valor numérico en los dos métodos. La resistencia nominal de un miembro estructural es la resistencia teórica calculada de dicho miembro, sin tomar en cuenta el factor de resistencia (ϕ_s) en el caso del método LRFD y el factor de seguridad (Ω_s) en el caso del método ASD.

2.8.1 Método LRFD

El método LRFD también es llamado como diseño por estados límite o resistencia ultima. En este método las cargas de servicio (carga muerta, carga viva, carga de viento, carga por lluvia, etc.) se agrupan formando combinaciones que probablemente sucedan al mismo tiempo y cada carga se modifican multiplicándolas por un factor de carga, para producir una carga llamada carga factorizada (R_u). Esta carga factorizada del miembro debe ser menor o igual al producto entre la resistencia normal (R_n) por el factor de reducción (ϕ), normalmente menor que 1. Por lo tanto lo explicado puede describirse en forma de ecuación como:

$$R_u \leq \phi * R_n$$

Con el factor de reducción y con los factores de cargas que se aplican a la resistencia nominal y a cada carga de servicio respectivamente, se incorpora un margen de seguridad, con esto el diseño llega a ser más realista y manifiesta la diferencia de incertidumbres asociados con diferentes condiciones de carga.

2.1.1.12 Cargas combinadas para el método LRFD

Para este método la American Institute of Steel Construction (AISC 360, 2010) calcula los factores de carga que se multiplicaran a las cargas de servicio con la finalidad de incrementar estas cargas. Al incrementar estas cargas se está considerando las incertidumbres que se presentan al momento de realizar la estimación de las cargas de servicio. Las combinaciones de carga según la American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 7, 2010) para el método LRFD son:

1. $U = 1.4D$
2. $U = 1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
3. $U = 1.2D + 1.6(L_r \text{ o } S \text{ o } R) + (L \text{ o } 0.5W)$
4. $U = 1.2D + 1.0W + L + 0.5(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
5. $U = 1.2D + 1.0E + L + 0.2S$
6. $U = 0.9D + 1.0W$

$$7. U = 0.9D + 1.0E$$

Donde:

U = carga factorizada

D = carga muerta

L = carga viva debida a la ocupación

L_r = carga viva de techo

S = carga de nieve

R = carga nominal debida a la precipitación pluvial o el hielo iniciales, independiente de la contribución por encharcamiento

W = cargas de viento

E = cargas de sismo

2.8.2 *Método ASD*

Este método de diseño, también llamado como diseño elástico, tiene más de un siglo de aplicación. En este método las cargas de servicio no son multiplicadas por un factor de carga es decir que no son mayoradas, estas cargas son acumuladas en combinaciones factibles. La resultante de mayor valor de estas combinaciones se utilizara para calcular las fuerzas en los elementos estructurales y esta fuerza se la denomina como (R_a), el cual debe ser menor o igual a la resistencia nominal del elemento (R_n) dividido para un factor de seguridad (Ω), normalmente mayor que 1. Por lo tanto lo explicado puede describirse en forma de ecuación como:

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega}$$

El margen de seguridad en esta inecuación se manifiesta por medio del factor de seguridad que tiene que ser mayor que la unidad, este factor de seguridad no refleja las incertidumbres que existen al momento de estimar las cargas de servicio.

2.1.1.13 *Cargas combinadas para el método ASD*

Las combinaciones de carga según la American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 7, 2010) para el método ASD son:

1. D
2. $D + L$
3. $D + (L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
4. $D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
5. $D + (0.6W \text{ o } 0.7E)$
6. (a) $D + 0.75L + 0.75(0.6W) + 0.75(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
 (b) $D + 0.75L + 0.75(0.7E) + 0.75(S)$
7. $0.6D + 0.6W$
8. $0.6D + 0.7E$

2.9 Códigos y especificaciones aplicadas

Los estándares son documentos que contiene métodos y requisitos estandarizados, los cuales son aprobados por organismos reconocidos, en las que establecen reglas o normativas que consideren necesarias para un correcto diseño, fabricación, montaje, mantenimiento, etc., basadas en la experiencia y en el progreso tecnológico. Los estándares que se utilizaron para la realización de este trabajo se presentan a continuación:

- ANSI/AWWA D-100-05
- ANSI/AISC 360-10
- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)
- API 620-12
- API 650-12
- ASCE 7-10

2.9.1 Estándar ANSI/AWWA D-100-05

El propósito de este estándar es proporcionar una guía para facilitar el diseño, la fabricación, y la adquisición de tanques de acero al carbono con costura para el almacenamiento de agua. Esta norma no cubre todos los detalles del diseño y la construcción debido a la gran variedad de tamaños y formas de los tanques. Cuando no se dan detalles para cualquier diseño específico, se pretende que el constructor, sujeto a la aprobación del comprador, deberá proporcionar detalles que se han diseñado y fabricado para ser adecuada y tan seguros como los que normalmente se hubiera suministrado bajo esta norma (AWWA D100, 2005).

Esta norma no cubre la construcción de tanques compuestos (acero y hormigón), no cubre la pintura ni la desinfección de los tanques, en si esta norma no cubre los tanques construidos de otro material que no sea acero. A continuación se presenta un resumen de lo que cubre cada capítulo de la estándar:

Sección 1: Cubre temas generales tales como alcance, las definiciones, garantías, dibujos que se ha proporcionado, y referencias.

Sección 2: Discute las especificaciones de materiales.

Sección 3: Detalla el diseño general.

Sección 4: Aborda el dimensionamiento y diseño de tanques elevados.

Sección 5: Accesorios para tanques elevados.

Sección 6: Cubre el dimensionamiento de las tomas de agua y embalses de tierra-compatible.

Sección 7: Accesorios para tomas de agua y embalses de tierra con apoyo.

Las secciones 8 a 15 incluyen soldadura, taller de fabricación, montaje, inspección y pruebas, diseño de la cimentación, el diseño sísmico de los tanques de almacenamiento de agua, y la base de diseño alternativo para tomas de agua y embalses.

2.9.2 Especificación ANSI/AISC 360-10

Esta especificación está destinada para el diseño de sistemas estructurales de acero o estructuras de acero actuando en conjunto con estructuras de concreto, estableciendo criterios para el diseño, fabricación y el montaje de edificios de acero estructural y otras estructuras, donde otras estructuras se definen como aquellas estructuras diseñadas, fabricadas y montadas de manera similar al de edificios, indicando de esta manera que sus elementos resistentes a cargas verticales y laterales son similares a los sistemas resistentes de los edificios (AISC 360, 2010). Se utilizó esta norma para realizar un correcto diseño de los elementos de la estructura de soporte tales como: las columnas, los arriostres horizontales y diagonales.

2.9.3 Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) establece requisitos que se consideran obligatorio a nivel nacional, es por ello que todos los profesionales, empresas, industrias e instituciones sean públicas o privadas, tiene la obligación de cumplir y hacer cumplir todos los requisitos que se establecen en los capítulos que dicha norma presenta. De esta manera todos los

proyectos estructurales y los procesos de construcción deberán observar las condiciones o parámetros establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción [NEC] y las regulaciones locales, expedidas por los distintos Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales, deberán acogerse a dicha Norma, en ejercicio de las competencias asignadas por el Código Orgánico Organización territorial Autonomía Descentralización [COOTAD] (MIDUVI, 2014).

A continuación se presentan los capítulos dados por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC):

- 1.- NEC-SE-CG: Cargas (no sísmicas)
- 2.- NEC-SE-DS: Diseño Sismo resistente
- 3.- NEC-SE-HM: Estructuras de Hormigón Armado
- 4.- NEC-SE-GM: Geotecnia y Cimentaciones
- 5.- NEC-SE-MP: Mampostería Estructural
- 6.- NEC-SE-RE: Rehabilitación Sísmica de Estructuras
- 7.- NEC-SE-AC: Estructuras de Acero

2.9.4 Estándar API 620-12

La estándar API 620 recomienda criterios de diseño y construcción de tanques de acero al carbono de gran tamaño para almacenamiento de petróleo y sus derivados así como gases o vapores, a presiones bajas no más de 15 lbf / in² y a temperaturas no mayores de 250 °F. Se utilizó el capítulo cinco de la norma para determinar las tensiones meridionales y circunferenciales presentes en la cáscara del tanque, esta norma nos brinda un método para la determinación de estos esfuerzos y ecuaciones para determinar el espesor requerido por la cáscara para soportar las cargas a las que está sometido el recipiente.

2.9.5 Estándar API 650-12

Esta norma está destinada para el diseño de tanques de acero soldados para el almacenamiento de petróleo, estableciendo así criterios para el diseño, material, fabricación, montaje y pruebas para cilindros verticales apoyados en la tierra, cerrados y de tapa abierta, para tanques de varias dimensiones y capacidades con presiones internas igual o cercanas a la presión atmosférica, permitiendo así a la industria petrolera contar con tanques de adecuada seguridad y razonable economía (API 650, 2012). Se utilizó los criterios establecidos en la sección 5.10 de dicha estándar para realizar un adecuado diseño de los techos de los tanques elevados de acero.

2.9.6 Estándar ASCE 7-10

Este estándar establece requisitos mínimos de cargas para el diseño de edificaciones y otras estructuras diferentes a las edificaciones que están sujetas a los requisitos de código de construcción. Las cargas y las combinaciones de carga apropiadas, que se han desarrollado para usarse juntas, se establecen para el diseño de resistencia y el diseño de esfuerzos permisibles. Para las resistencias de diseño y los límites de esfuerzo permisible, se deben seguir las especificaciones de diseño para materiales estructurales convencionales usados en edificios y las modificaciones contenidas en este estándar (ASCE 7, 2010).

2.10 Hojas de cálculo

Se define a una hoja de cálculo como un documento o aplicación en el cual se puede manipular datos numéricos y alfanuméricos almacenados en tablas, por lo que la celda se le considera como la unidad básica de información de la hoja de cálculo en la cual se puede realizar cálculos automáticos y complejos utilizando una gran cantidad de parámetros. En las hojas de cálculo es posible realizar cálculos muy complejos con la utilización de fórmulas o funciones, además que se permite realizar varios tipos de gráficas. Es por esto las hoja de cálculo se han convertido en una gran herramienta multiuso.

Existen varias hojas de cálculo desarrolladas por varias empresas como Excel desarrollado por Microsoft, Quattro Pro y Lotus 1-2-3 desarrollado por Corel, Calc desarrollado por The Document Foundation, entre otros. Estas hojas de cálculo actualmente son muy fácil de usar por lo que se han convertido en una herramienta muy utilizada en muchos campos, como es en el caso de la ingeniería.

2.10.1 Microsoft Excel

Excel es un programa informático de hoja de cálculo de Microsoft office System y forma parte de Office (suite informática), este programa que permite trabajar con datos numéricos para realizar cálculos, elaborar tablas y gráficos, dispone de herramientas tan avanzadas como las tablas dinámicas. Excel tiene muchos usos en el ámbito laboral entre los ámbitos más comunes se tiene: Contabilidad, definición de presupuestos, facturación y ventas, informes, planeación, seguimiento, usos de calendarios, entre otros (MICROSOFT, 2015).

Una de las ventajas muy importantes que tiene Microsoft Excel es que tiene una interface muy simple y además que se pueden realizar aplicaciones en lenguaje VBA (Visual Basic para

Aplicaciones). En ocasiones se requiere realizar acciones repetitivas en Excel con funciones que no se encuentran en la aplicación de Microsoft Excel, es ahí que la utilización de VBA es muy útil y nos facilitara el trabajo.

2.11 API SolidWorks

Excel no es el único programa que puede controlarse mediante VBA, sino cualquier programa que contenga una librería de objetos, como es el caso de SolidWorks, que es un software de diseño asistido por computadora (CAD) con el que se puede crear geometría 3D usando sólidos paramétricos. La gran ventaja de SolidWorks es que se pueden automatizar y personalizar el software mediante una API (Application Programming Interface). La API cuenta con varias funciones que se las puede llamar desde VBA, estas funciones proporcionan acceso directo a la funcionalidad de SolidWorks con la que se puede como por ejemplo crear o modificar piezas de forma automática (SOLIDWORKS Corp., 2018).

La mejor manera de comenzar a trabajar con la API de SolidWorks es su capacidad de grabación de macros. Cuando graba una macro en SolidWorks se registra el código requerido para realizar varias tareas, la macro que se genera puede ser guardada en VBA (Visual Basic for Applications), aunque existe varias limitaciones al momento de grabar una macro debido a que algunas funciones no pueden ser grabadas sin embargo la mayoría de las funcionalidades básicas se graban (SPENS, 2013).

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA EL DISEÑO DE TANQUES ELEVADOS DE ACERO

En este capítulo se desarrolla la formulación matemática y procedimientos utilizados para determinar la geometría del tanque y su estructura de soporte; los espesores del tanque de acero; las cargas de diseño como: cargas muertas, vivas, de viento y sísmicas; y el diseño de la estructura de soporte del tanque elevado de acero. Se propone la geometría del tanque y de su estructura de soporte en base a criterios y recomendaciones tomada de varias normas, estándares y manuales. Los espesores del tanque de aceros son determinados de acuerdo al método que brinda la norma API 620-12 y API 650-12, para determinar las cargas de viento se hará uso de la norma AWWA D100-05, las cargas sísmicas se determinan usando la NEC-SE-DS y el diseño estructural se realiza de acuerdo a la norma AISC 360-10.

3.1 Geometría del tanque elevado

En este trabajo se hará hincapié a los tanques de acero que tengan una geometría cilíndrica con fondo y techo toriesférico, sostenidos en una estructura la cual está formada por columnas verticales o inclinadas, arriostres horizontales y arriostres diagonales como se muestra en la figura 1-3.

3.1.1 *Dimensionamiento del tanque*

Para determinar las dimensiones del tanque de acero se parte de la capacidad de almacenamiento que se requiera, que debe ser un dato dado, este trabajo se limita para capacidades de 25000 a 500000 galones. Luego de definir la capacidad o volumen que se requiera se determina el diámetro del cuerpo cilíndrico del tanque y posteriormente se define las dimensiones de los casquetes de techo y de fondo

3.1.1.1 *Capacidad*

El propósito primordial de los tanques de acero de almacenamiento, como su nombre lo indica, es almacenar cierta cantidad de agua para el suministro en municipios, industrias o en zonas donde se requiera. Para determinar la capacidad del tanque el ingeniero hidráulico debe tomar en cuenta, además de la demanda diaria requerida, también los requisitos de flujo contra incendios,

capacidad adicional para recompensar las pérdidas por mantenimiento o por rotura de tuberías y adicionar una capacidad extra para futuras demandas, entre otros requisitos.

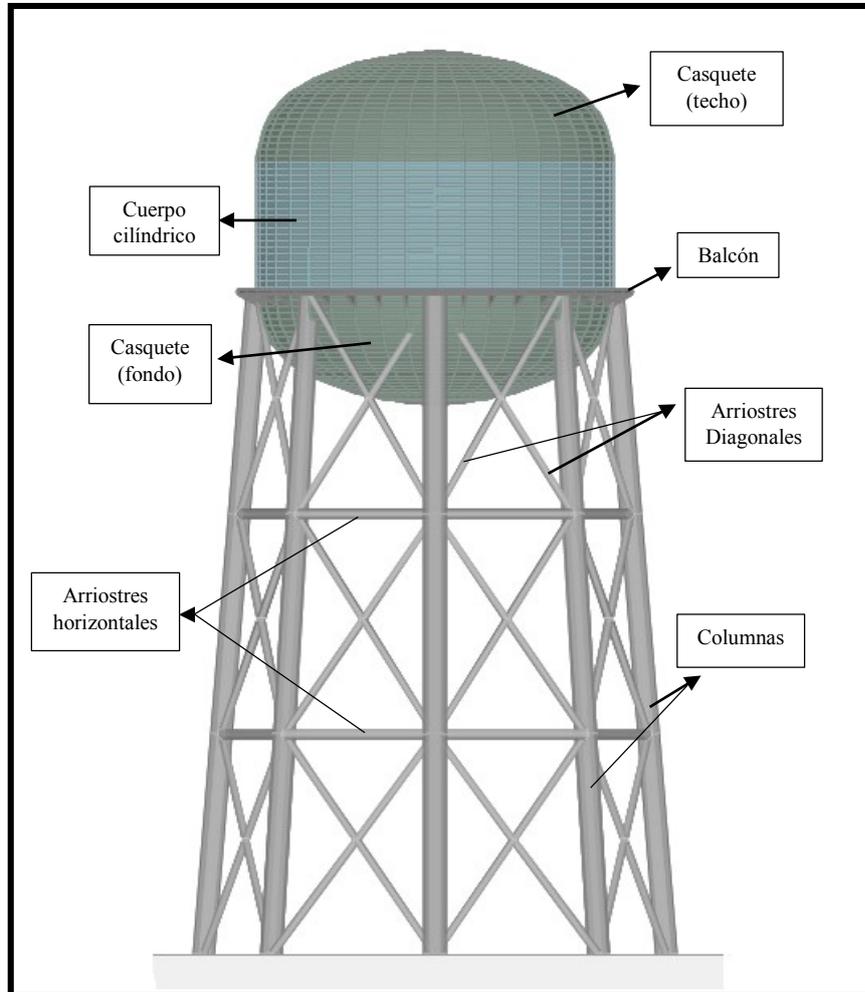


Figura 1-3. Componentes de un tanque elevado, SAP2000.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Como se expuso anteriormente el presente trabajo se limitó a un rango de capacidades entre 25000 a 500000 galones, en tabla 1-3 se recopiló las capacidades estándares, para este rango, dados por el Manual de prácticas de suministro de agua, M42 (American Water Works Association, 2013), en la tabla también se muestra las respectivas dimensiones recomendadas para el tanque como el diámetro y el rango de cabeza de agua (*head range*) aceptable. La hoja de cálculo desarrollada en este trabajo admite cualquier valor de capacidad que se encuentra dentro del rango recomendado, no se limita a las capacidades estándares dados en la tabla 1-3, es decir se puede tomar valores intermedios a las capacidades dadas en la tabla.

Tabla 1-3. Capacidades y dimensiones estándares para tanques elevados.

CAPACIDAD		RANGO Y DIMENSIONES			
(Gal.)	(m ³)	Diámetro (ft)	Rango de cabeza de agua (ft)	Diámetro (m)	Rango de cabeza de agua (ft)
25,000	95	18 – 20	12.5 – 15.5	5.5 – 6.1	3.3 – 4.7
30,000	114	18 – 20	15.0 – 16.5	5.5 – 6.1	4.6 – 5.0
40,000	150	22 – 23	15.0 – 17.0	5.7 – 7.0	4.6 – 5.2
50,000	189	22 – 24	18.0 – 20.0	6.7 – 7.3	5.5 – 6.1
60,000	227	22 – 25	19.0 – 23.0	6.7 – 7.6	5.3 – 7.0
75,000	234	26 – 30	16.0 – 24.0	7.9 – 9.1	4.9 – 7.3
100,000	379	28 – 30	20.0 – 25.0	8.5 – 9.1	6.1 – 7.6
125,000	473	30 – 32	23.0 – 28.0	9.1 – 9.7	7.0 – 8.5
150,000	568	32 – 34	24.5 – 29.5	9.7 – 10.4	7.5 – 9.0
200,000	757	36 – 38	28.0 – 29.5	11.0 – 11.6	8.5 – 9.0
250,000	946	38 – 40	28.0 – 33.0	11.6 – 12.2	8.5 – 10.1
300,000	1,132	43 – 45	28.0 – 31.0	13.1 – 13.7	8.5 – 9.4
400,000	1,515	46 – 50	30.0 – 36.0	14.0 – 15.2	9.1 – 11.0
500,000	1,890	50 – 56	29.0 – 38.0	15.2 – 17.1	8.8 – 11.5

Fuente: (American Water Works Association, 2013)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.1.1.2 Diámetro

Para una capacidad estándar dada, se indica un rango de diámetros como se muestra en la tabla 1-3, estos datos son recomendaciones que nos brinda el manual M42 de la American Water Works Association (2013), en el caso que se requiera recomendaciones de diámetro para una capacidad intermedia entre los valores estándares se realizara una interpolación entre los valores tabulados.

3.1.1.3 Fondo y techo toriesférico

Estos fondos son casquetes de revolución que se forman al girar una curva meridional alrededor de una recta conocida como un eje de revolución. La curva meridional está formada por dos radios, un radio de la sección del abombado (Rd) y otro radio de la sección conocida como reborde (Rk), la nomenclatura de las dimensiones de los casquetes toriesféricos se muestran en la tabla 2-3. Los radios de curvatura del meridiano se limitaran de la siguiente manera:

- El radio de abombado estará limitado entre el 80% y 100% del diámetro del cilindro (D):

$$0.8D \leq R_d \leq D \quad (11)$$

- La American Petroleum Institute (API 620, 2012) recomienda que los casquetes formados por dos regiones (como es el caso de los toriesféricos con una región llamada abombada y otra llamada reborde) el radio de reborde no deberá ser menor al 6% del diámetro del cilindro (D), pero preferiblemente no debe ser menor al 12%, debido a que un radio de reborde muy pequeño cerca al 6% requerirá un espesor exageradamente grande para esta región. Además este radio de reborde deberá ser menor que el 50% del diámetro del cilindro debido que al aplicar un valor igual a la mitad del diámetro ya no es considera como casquete toriesférico si no uno semiesférico, por lo que:

$$0.12D \leq R_k < 0.5D \quad (12)$$

Tabla 2-3. Dimensiones de un casquete toriesférico.

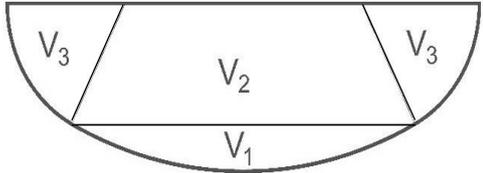
Dimensiones de un casquete	
	$c = R_d - R_d * \cos\alpha$
	$\alpha = \arcsen\left(\frac{a}{R_d - R_k}\right)$
	$a = \frac{D - 2R_k}{2}$
	$e = R_d * \sen\alpha$
	$b = R_k * \cos(\alpha)$
	$\beta = 90 - \alpha$
	$h_1 = b + c$

Fuente: (MOSS, 2004)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Para determinar el volumen de un casquete toriesférico, es necesario dividir el casquete en tres partes: en un segmento esférico (V_1), en un tronco cónico (V_2) y en un sólido de revolución (V_3), tales como se muestra en la tabla 3-3. El volumen total del casquete será la sumatoria de los volúmenes mencionados.

Tabla 3-3. Volumen de un casquete toriesférico.

Volumen de un casquete	
	$V_1 = \pi * c * (R_d - \frac{c}{3})$
	$V_2 = \frac{1}{3} * b * \pi (e^2 + e * a + a^2)$
	$V_3 = \frac{(120 * R_k^3 * \pi * \text{sen}\varphi) + (a * \varphi * \pi^2 * R_k^2)}{90}$
	$\varphi = \frac{\beta}{2}$
	$V_{\text{casquete}} = V_1 + V_2 + V_3$

Fuente: (MOSS, 2004)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Por simetría se recomienda que el techo toriesférico tenga las mismas dimensiones que el casquete de fondo, por lo que se utilizan las mismas ecuaciones para determinar las dimensiones del techo.

3.1.1.4 Cuerpo

Para determinar la altura de la parte cilíndrica (h_2), será necesario determinar la altura del agua contenida en el cilindro (h_n) y a ésta adicionarle una altura (h_m) para evitar el contacto del agua en la unión entre la parte cilíndrica y el casquete superior, por lo que:

$$h_2 = h_n + h_m \quad (13)$$

$$h_n = \frac{4 * V_{\text{cilindro}}}{\pi * D^2} \quad (14)$$

$$V_{\text{cilindro}} = \text{Capacidad} - V_{\text{casquete}} \quad (15)$$

La parte cilíndrica se construye por un número n de anillos, o llamados también virolas, cada una tiene una altura v . Estos anillos se forman a partir de planchas de acero, estas planchas se pueden conseguir en el mercado hasta de 2,4 metros de altura. La suma de las alturas de cada virola debe ser igual a la altura de la parte cilíndrica del tanque.

$$h_2 = v_1 + v_2 + v_3 + v_n \quad (16)$$

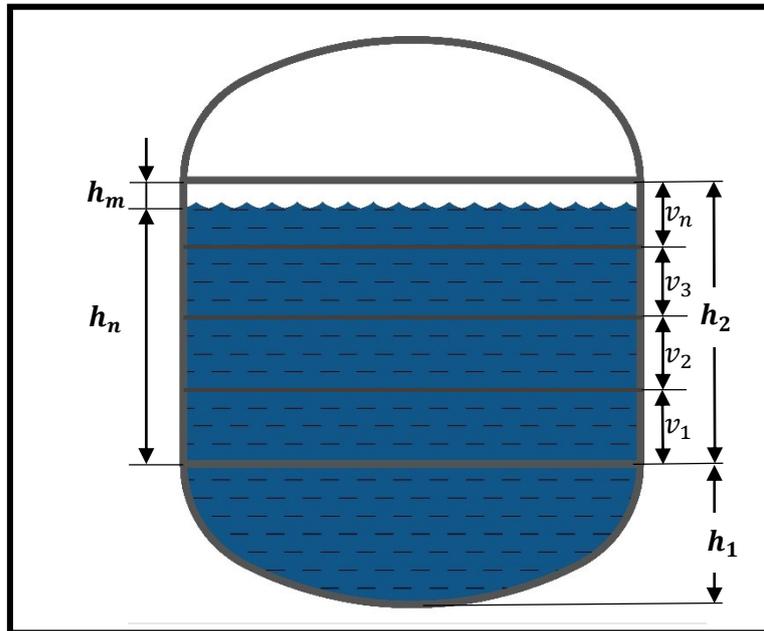


Figura 2-3. Alturas correspondientes al tanque de acero

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.1.2 Dimensiones de la estructura de soporte

La estructura de soporte es una torre estructural encargada de soportar el tanque y su contenido, esta torre se compone por columnas, arriostres horizontales y diagonales. La altura de la torre la proporcionará el ingeniero hidráulico dependiendo de la presión de agua que se requiera, en este trabajo se limita a una altura entre 10 y 30 metros. El número de columnas correspondiente para cada capacidad se muestra en la tabla 4-3.

Según (RUANO, 2011) la pendiente (m) de las columnas con respecto a la vertical no debe ser mayor a 0.15 con el objetivo de limitar la separación de las columnas en la base para evitar el uso extenso de terreno, por lo que tomaremos esta recomendación para el presente trabajo, entonces la inclinación de la columna se limita de la siguiente manera:

$$0 \leq m \leq 0,15 \quad (17)$$

Siendo m la pendiente de la columna con respecto a la vertical por lo que el ángulo de inclinación (θ) será:

$$\theta = \tan(m) \quad (18)$$

Tabla 4-3. Número de columnas para tanques elevados.

Capacidad (Galones)	Número de columnas
25.000	4
50.000	4
60.000	4
75.000	4
100.000	4
125.000	4
150.000	4
200.000	4
250.000	5 & 6
300.000	5 & 6
400.000	6
500.000	6 & 8

Fuente: (PARMLEY, 2001, p.245)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

En el caso de requerir columnas verticales la pendiente (m) será igual a cero, en este caso la longitud de cada columna será igual a la altura (H) de la torre, caso contrario cuando la columna sea inclinada la longitud de la columna (L_c) se determinara de la siguiente manera:

$$L_c = H/\cos(\theta) \quad (19)$$

Mientras que la distancia en la base entre dos columnas opuestas D_e se determina con la siguiente expresión:

$$D_e = D + 2L \quad (20)$$

Donde:

$$L = H * m \quad (21)$$

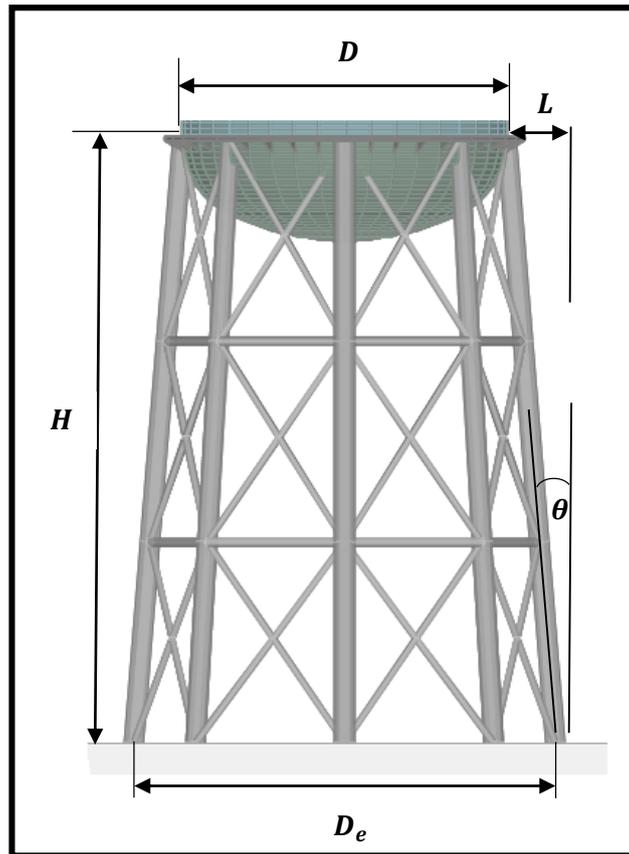


Figura 3-3. Dimensiones de la torre de soporte

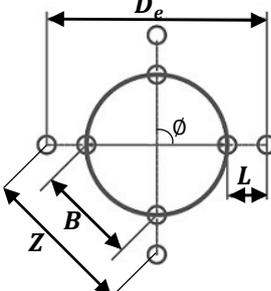
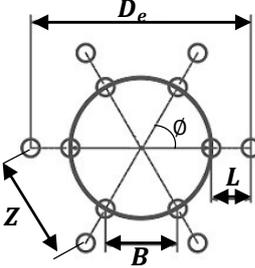
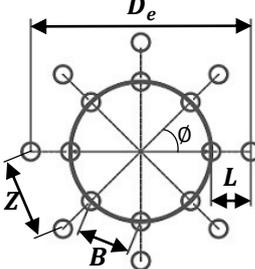
Realizado por: Inchilema William, 2017

Las columnas vistas en planta deben estar uniformemente distribuidas, separadas por un ángulo (θ), este ángulo dependerá del número de columnas que se vaya a utilizar para la torre, el ángulo correspondiente para diferentes números de columnas y otras dimensiones se muestran en la tabla 5-3.

3.1.2.1 Arriostres horizontales y diagonales

El número de arriostres diagonales y arriostres horizontales dependerá del número de columnas y de anillos de arriostres horizontales que se aplique en la estructura de soporte, quedando a criterio del diseñador cuantos anillos horizontales utilizar. En la hoja electrónica realizada en este trabajo tiene un alcance de hasta 3 anillos de arriostres horizontales, los cuales estarán espaciadas uniformemente a lo largo de las columnas. En la tabla 6-3 se muestra el número de diagonales y arriostres horizontales que se encuentra en función del número de anillos horizontales y columnas que se utilice para la estructura de soporte, en la tabla 7-3 se muestra como determinar la longitud de los arriostres horizontales y en la tabla 8-3 se muestra como determinar la longitud de los arriostres diagonales para diferentes condiciones.

Tabla 5-3. Dimensiones de la torre vista en planta

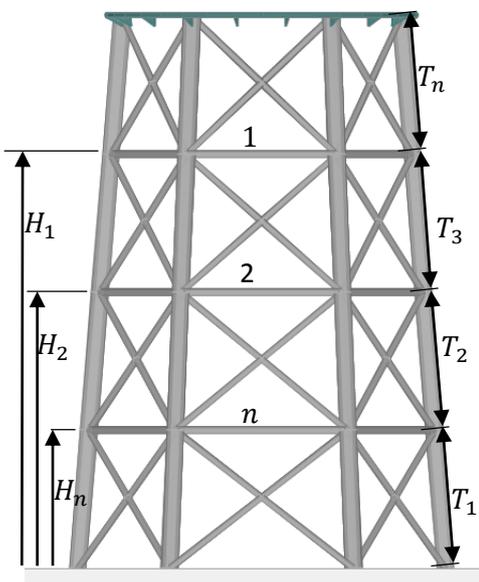
N° Columnas	Vista en planta	Dimensiones
4		$\phi = 90^\circ$ $B = \frac{D}{\sqrt{2}}$ $Z = \frac{D_e}{\sqrt{2}}$
6		$\phi = 60^\circ$ $B = D \cos 60$ $Z = D_e \cos 60$
8		$\phi = 45^\circ$ $B = D \cos 67.5$ $Z = D_e \cos 67.5$

Realizado por: Inchilema William, 2017

3.2 Espesores del tanque de acero

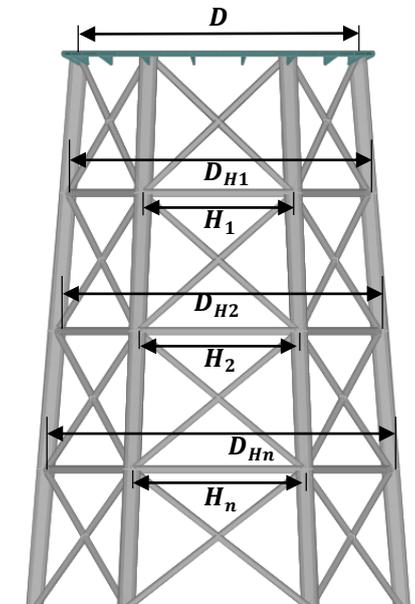
Las paredes del tanque se consideraran como carcasas de pared delgada debido a que el espesor de la pared es muy pequeño en comparación con las demás dimensiones del tanque, estas paredes están sometidas a una presión provocada por la columna de agua, produciéndose así esfuerzos longitudinales (meridionales) y esfuerzos circunferenciales (latitudinales) alrededor de las paredes del tanque como se indica en la sección 2.3. Los criterios para el diseño de los espesores del casquete de fondo y la parte cilíndrica del tanque se toman de la American Petroleum Institute, API 620-12, mientras que para determinar los espesores del casquete de techo se tomara como referencia la API 650-12.

Tabla 6-3. Número de arriostres horizontales y diagonales.

	N° de anillos horiz. (n)	Dimensiones	N° de Arriostres		
			N° columnas	N° Total horizion.	N° de diagon.
1	1	$T_1 = T_2 = T$ $T = L_c/2$ $H_1 = H/2$	4	4	16
			6	6	24
			8	8	32
2	2	$T_1 = T_2 = T_3 = T$ $T = L_c/3$ $H_2 = H/3$ $H_1 = 2H/3$	4	8	24
			6	12	36
			8	16	48
3	3	$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T$ $T = L_c/4$ $H_3 = H/4$ $H_2 = H/2$ $H_1 = 3H/4$	4	12	32
			6	18	48
			8	24	64

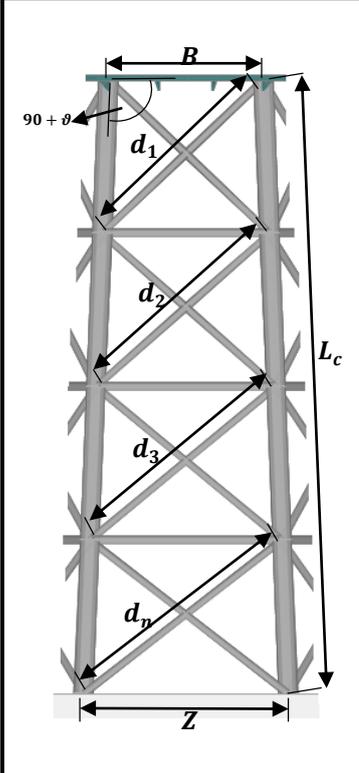
Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 7-3. Longitud de arriostres horizontales

	N° de anillos horizontales	Dimensiones	N° Columnas	Longitud de arriostres horizontales
1	1	$D_{H1} = D + L_c \text{sen } (\theta)$	4	$H_1 = D_{H1}/\sqrt{2}$
			6	$H_1 = D_{H1} \cos 60$
			8	$H_1 = D_{H1} \cos 67.5$
2	2	$D_{H2} = D + (4/3)L_c \text{sen } (\theta)$ $D_{H1} = D + (2/3)L_c \text{sen } \theta$	4	$H_1 = D_{H1}/\sqrt{2}$ $H_2 = D_{H2}/\sqrt{2}$
			6	$H_1 = D_{H1} \cos 60$ $H_2 = D_{H2} \cos 60$
			8	$H_1 = D_{H1} \cos 67.5$ $H_2 = D_{H2} \cos 67.5$
3	3	$D_{H3} = D + (3/2)L_c \text{sen } \theta$ $D_{H2} = D + L_c \text{sen } \theta$ $D_{H1} = D + (1/2)L_c \text{sen } \theta$	4	$H_1 = D_{H1}/\sqrt{2}$ $H_2 = D_{H2}/\sqrt{2}$ $H_3 = D_{H3}/\sqrt{2}$
			6	$H_1 = D_{H1} \cos 60$ $H_2 = D_{H2} \cos 60$ $H_3 = D_{H3} \cos 60$
			8	$H_1 = D_{H1} \cos 67.5$ $H_2 = D_{H2} \cos 67.5$ $H_3 = D_{H3} \cos 67.5$

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 8-3. Longitud de arriostres diagonales

	Nº de Anillos Longitud de arriostres diagonales	$\vartheta = \text{sen}^{-1} \frac{Z - B}{2L_c}$
1	$d_1 = \sqrt{B^2 + \frac{L_c^2}{4} - BL_c \cos(90 + \vartheta)}$ $d_2 = \sqrt{H_1^2 + \frac{L_c^2}{4} - H_1 L_c \cos(90 + \vartheta)}$	
2	$d_1 = \sqrt{B^2 + \left(\frac{L_c}{3}\right)^2 - \frac{2}{3}BL_c \cos(90 + \vartheta)}$ $d_2 = \sqrt{H_2^2 + \left(\frac{L_c}{3}\right)^2 - \frac{2}{3}H_2 L_c \cos(90 + \vartheta)}$ $d_3 = \sqrt{H_1^2 + \left(\frac{L_c}{3}\right)^2 - \frac{2}{3}H_1 L_c \cos(90 + \vartheta)}$	
3	$d_1 = \sqrt{B^2 + \left(\frac{L_c}{4}\right)^2 - \frac{2}{4}BL_c \cos(90 + \vartheta)}$ $d_2 = \sqrt{H_3^2 + \left(\frac{L_c}{4}\right)^2 - \frac{2}{4}H_3 L_c \cos(90 + \vartheta)}$ $d_3 = \sqrt{H_2^2 + \left(\frac{L_c}{4}\right)^2 - \frac{2}{4}H_2 L_c \cos(90 + \vartheta)}$ $d_4 = \sqrt{H_1^2 + \left(\frac{L_c}{4}\right)^2 - \frac{2}{4}H_1 L_c \cos(90 + \vartheta)}$	

Realizado por: Inchilema William, 2017

3.2.1 Procedimiento para el cálculo de espesores según API 620 (API 620, 2012).

Se aplica esta norma para determinar los espesores de los tanques considerados en este trabajo debido a que este procedimiento cubre los recipientes con geometría de revolución, esto incluye los fondos toriesféricos que se forman por dos radios de curvatura, uno longitudinal (meridional) y otro circunferencial (latitudinal). Este procedimiento se basa en la teoría de membrana la cual asume que todas las fuerzas actuantes se encuentran en el plano y que no existe transmisión de corte a través de las paredes del recipiente.

3.2.1.1 Análisis del cuerpo libre

Consideramos un punto de análisis en el tanque, en dicho punto se traza un plano horizontal el cual corta al tanque en dos porciones, se toma una porción como un cuerpo aislado (puede ser la porción por encima o debajo del nivel considerado, según corresponda), en dicha porción es necesario realizar un análisis de cuerpo libre para determinar la magnitud y la dirección de las fuerzas que actúan en las paredes del tanque para mantener en equilibrio estático la porción del

tanque y su contenido en dicho cuerpo libre. Como ejemplo a lo dicho en este párrafo se muestra la figura 4-3.

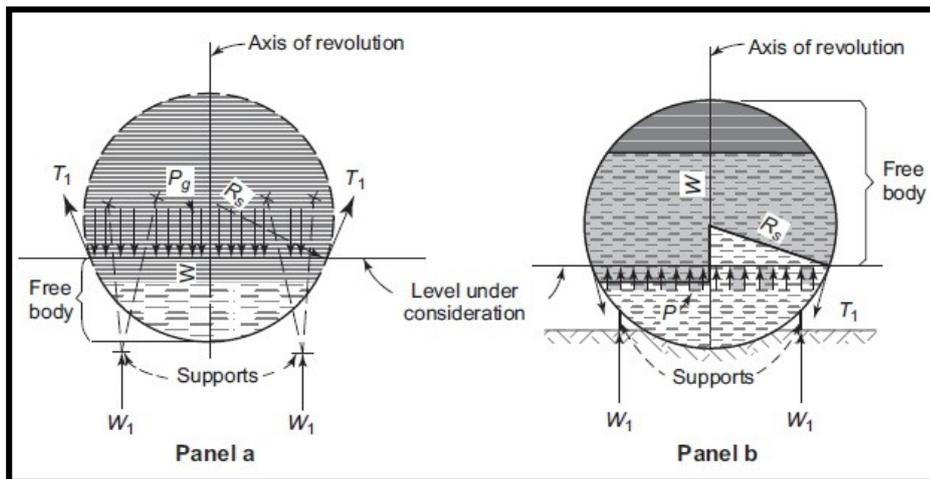


Figura 4-3. Diagrama típico de cuerpo libre de un tanque esférico.

Fuente: (API 620, 2012)

Se escoge un grupo de niveles críticos en el tanque, en los cuales se determina la magnitud y el carácter de las fuerzas meridionales y latitudinales que ese produce en las paredes del tanque debido a la presión provocada por la cabeza del líquido. La norma establece que se realice el análisis del cuerpo libre desde la parte superior hasta la parte inferior del tanque a cada nivel considerado para el análisis.

En el caso de los tanques con fondo toriesférico, el análisis de cuerpo libre se realiza en los puntos de unión entre el casquete de fondo con el cuerpo cilíndrico, en la porción cilíndrica se analiza los puntos de unión de cada virola y en el fondo toriesférico se analiza los siguientes puntos: en el fondo del casquete en el cual se presenta la mayor presión por columna de agua y en el punto de unión entre la sección del abombado y la de reborde ya que es un punto en el cual la curvatura cambia significativamente.

Para aplicar este procedimiento se asume que la parte cilíndrica se encuentra apoyada uniformemente en toda su circunferencia inferior, por ello en cada nivel considerado que se encuentre por encima de la línea de unión, entre el cilindro y el casquete inferior, se toma como cuerpo libre siempre la porción por encima del nivel considerado, mientras que para cada nivel considerado que se encuentre por debajo de dicha unión se toma como cuerpo libre siempre la porción que se encuentra por debajo del nivel considerado, véase la figura 5-3.

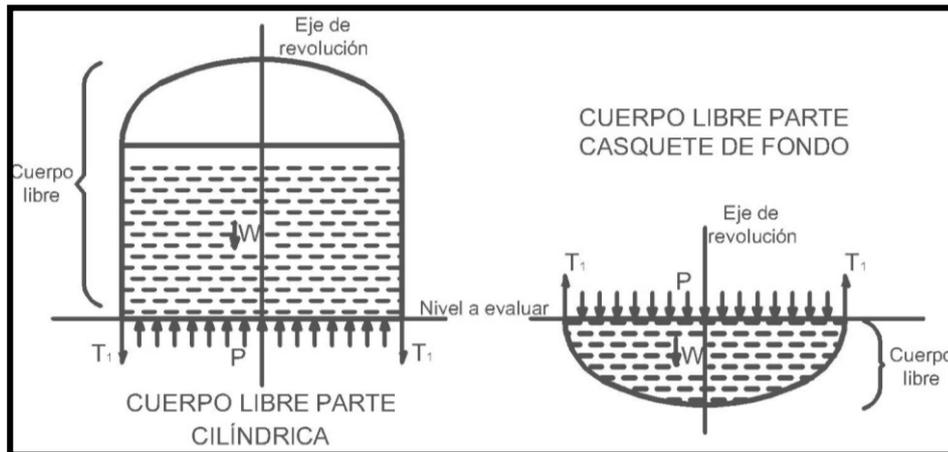


Figura 5-3. Diagrama de cuerpo libre de un tanque con casquetes toriesféricos.

Realizado por: Inchilema William

3.2.1.2 Cálculo de las fuerzas unitarias.

La American Petroleum Institute (API 620, 2012) establece tres ecuaciones para calcular las fuerzas unitarias meridionales y longitudinales, para cada nivel del tanque que se vaya a analizar y para cada condición de presión por columna de agua que se analice en cada nivel, dichas ecuaciones son las siguientes:

$$T_1 = \frac{R_2}{2} \left(P + \frac{W}{A_t} \right) \quad (22)$$

$$T_2 = R_2 \left(P - \frac{T_1}{R_1} \right) \quad (23)$$

$$T_2 = R_2 \left[P \left(1 - \frac{R_2}{2R_1} \right) - \frac{R_2}{2R_1} \left(\frac{W}{A_t} \right) \right] \quad (24)$$

Donde:

T_1 : Es la fuerza unitaria meridional, en N/m , en la pared del tanque al nivel considerado. T_1 es positivo cuando está en tensión

T_2 : Es la fuerza unitaria latitudinal, en N/m , en la pared del tanque al nivel considerado. T_2 es positivo cuando está en tensión.

R_1 : Es el radio de curvatura de la pared del tanque, en metros, en un plano meridional, al nivel considerado.

R_2 : Es la longitud, en metros, de la normal a la pared del tanque en el nivel considerado, medida desde la pared del tanque hasta su eje de revolución.

P : Es la presión provocada por la columna de agua, en N/m^2 , que actúa a un nivel dado del depósito.

W : Es el peso total, en N, de la porción del tanque tomada como cuerpo libre incluyendo su contenido.

A_t : Es el toda el área de la sección transversal del tanque en el nivel considerado, en m^2 .

En las ecuaciones anteriores el peso total (W) debería incluir todo el peso del material y del líquido que se encuentra en la porción tomada. Debido a que el peso del metal es muy insignificante en comparación con el peso del líquido éste se puede despreciar y tomar en cuenta solo el peso del líquido. Si W actúa en el mismo sentido que P se le dará el mismo signo que la presión en la cara horizontal del cuerpo libre, si W actúa en sentido contrario a P se le dará el signo opuesto.

Las ecuaciones (22) y (23) son generales y se pueden aplicar a cualquier tanque que tenga un solo eje vertical de revolución y a cualquier cuerpo libre que al ser cortado por plano horizontal, su intersección entre el tanque y el plano tenga una forma circular. En el caso de las paredes cilíndricas en donde $R_1 = infinito$ y $R_2 = R_c$ (radio del cilindro) las ecuaciones (22) y (23) se reducen a las siguientes expresiones:

$$T_1 = \frac{R_c}{2} \left(P + \frac{W}{A_t} \right) \quad (25)$$

$$T_2 = PR_c \quad (26)$$

Donde:

R_c : Es el radio del cilindro

Las demás expresiones ya fueron detalladas anteriormente

3.2.1.3 Espesores requeridos

Para determinar los espesores requeridos a cada nivel se aplica la ecuación 27, en esta ecuación se utiliza la mayor de las fuerzas unitarias calculadas entre T_1 y T_2 .

$$t = \frac{T}{S_a E} \quad (27)$$

Donde:

t : Espesor calculado para el nivel considerado.

T : Es la mayor de las fuerzas unitarias calculadas entre T_1 y T_2 . Para cada nivel considerado

S_a : Es el esfuerzo admisible de diseño.

E : Eficiencia de soldadura, dada en la tabla 10-3

3.2.1.4 Esfuerzos Admisibles

La AWWA D100-05 en su sección 4.5.2 divide a los materiales en tres clases basándose en su límite de fluencia (F_y) como se muestra en la tabla 9-3, esto para definir los esfuerzos admisibles en función de su clase, como se muestra en la tabla 11-3. Las partes del tanque de acero que no se encuentran unidas a las columnas que lo soportan se diseñan de modo que, durante la aplicación de la presión de agua, no se excedan los esfuerzos admisibles mostrados en la tabla 11-3.

Debido a que este procedimiento asume que la parte cilíndrica se encuentra apoyada uniformemente en toda su circunferencia inferior se debe aumentar los espesores del anillo de la carcasa cilíndrica y la parte del casquete tori esférico que se encuentran unidos a las columnas de la estructura de soporte de tal manera que los esfuerzos calculados en esos puntos no excedan los 75,8 MPa (11.000 psi), reducida por la eficiencia de la junta soldada. (AWWA D100, 2005, p.58).

Tabla 9-3. Clases de materiales

Clase	Esfuerzo de fluencia (F_y)	
	MPa	(Psi)
0	$F_y < 186.2$	$(F_y < 27000)$
1	$186.2 \leq F_y \leq 234.4$	$(27000 \leq F_y \leq 34000)$
2	$F_y > 234.4$	$(F_y > 34000)$

Fuente: (AWWA D100, 2005)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 10-3. Eficiencia de Soldadura

Tipo de junta	Eficiencia de la junta (%)	
	Tensión	compresión
Doble con penetración completa	85	100
Doble con penetración parcial	$85 \frac{Z}{T}$	$85 \frac{Z}{T} *$
Simple con penetración completa	85	100
A traslape con filete continuo en ambas caras de la junta	75	75
A traslape con filete continuo en un lado o discontinuo por los dos lados	$75 \frac{(1+X)}{2} +$	$75 \frac{(1+X)}{2} +$
A traslape soldado con filete, a puntos o discontinuo por un lado	$75 \frac{(XW_1+YW_2)}{2t} ++$	$75 \frac{(XW_1+YW_2)}{2t} ++$

* En la cual Z es la profundidad de penetración de la soldadura, (use la placa más delgada si tiene diferentes espesores) y T es el espesor de la placa más delgada.

+ En cual X es la relación entre la longitud del filete discontinuo con la longitud total de la junta, expresado como decimal.

++ En el que X & Y son las relaciones de las longitudes del filete discontinuo de cada lado con las longitudes totales de las juntas W_1 y W_2 respectivamente. Cuando está soldado por una cara, W_2 es cero, y están expresados como decimal. T y t son los espesores respectivos a analizar, use las placas más delgadas si tiene espesores diferentes.

Fuente: (AWWA D100, 2005)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 11-3. Esfuerzos permisibles de diseño

Ítem	Clase	Esfuerzo permisible de diseño	
		MPa	(Psi)
Placas de la pared del tanque	1,2	103.4	(15000)
Acero estructural, elementos ensamblados, detalles estructurales	0	82.7	(12000)
	1	103.4	(15000)
	2	124.1	(18000)
Anillos de tensión	1,2	103.4	(15000)

Fuente: (AWWA D100, 2005)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.2.2 *Diseño de espesores del techo* (API 650, 2012)

Los techos deben ser diseñados para soportar cargas muertas más una carga viva uniforme. La carga viva de techo según la American Water Works Association (AWWA D100, 2005) puede tomarse de 1.0 KPa (20 lb/pies²) o puede tomarse según los requerimientos de la ASCE-7-10, pero no debe ser menor que 0,72 KPa (15 lb/pies²).

El espesor nominal mínimo para el techo no debe ser menor que el mayor valor de:

$$t = \frac{r}{2.4} \sqrt{\frac{B}{2.2}} + C \quad \text{ó} \quad t = 4.76 \text{ mm} \quad (28)$$

Donde:

t : Espesor mínimo para techo.

r : Radio de techo, igual al radio de abombado (R_d) del casquete.

B : Carga muerta + carga viva de techo

C : Tolerancia de corrosión en el caso que se requiera, ver sección 3.2.4

3.2.3 *Espesores mínimos*

La normativa AWWA D100-05 en su sección 3.10 recomienda las siguientes limitaciones en los espesores para tanques de almacenamiento de agua:

- Elementos en contacto con el agua: Todas las partes de la estructura que estén en contacto con el agua cuando el tanque esté lleno deberá tener un espesor mínimo de 6,35 mm (1/4 pulg.), con algunas excepciones para las placas de los tanques de acero con dimensiones muy grandes donde los espesores mínimos se incrementan, como se muestra en la tabla 12-3.
- Elementos que no se encuentran en contacto con el agua: El espesor mínimo para todas las partes de la estructura que no estén en contacto con el agua será de 4.76 mm (3/16 pulg.)

Tabla 12-3. Espesores mínimos para las placas del tanque en contacto con el agua.

Diámetro nominal		Espesor mínimo	
Metros	Pies	Milímetros	Pulgadas
$D \leq 6.1$	$D \leq 20$	6.35	1/4
$6.1 < D \leq 15.2$	$20 < D \leq 50$	6.35	1/4
$15.2 < D \leq 36.6$	$50 < D \leq 120$	6.35	1/4
$36.6 < D \leq 61.0$	$120 < D \leq 200$	7.49	5/16
$D > 61$	$D > 200$	9.52	3/8

Fuente: (AWWA D100, 2005)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.2.4 Tolerancia de corrosión

La American Water Works Association (AWWA D100, 2005) establece que, si solo se desea, se determinara una tolerancia de corrosión, se especificara para las partes en contacto con el agua y las partes que no estén en contacto con el agua. Si se considera una tolerancia por corrosión, ésta tolerancia se adicionará al espesor calculado por el diseño. Cuando los efectos de la corrosión son indeterminadas, se proporcionara una tolerancia mínima a la corrosión de 1/16 pulgadas (1.6 mm).

3.2.5 Esfuerzos actuantes

Una vez determinado los espesores requeridos para cada nivel considerado, se calculan los esfuerzos actuantes para cada nivel con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_1 = \frac{T_1}{t} \quad (29)$$

$$\sigma_2 = \frac{T_2}{t} \quad (30)$$

Donde:

S_1 : Esfuerzo meridional actuante en el nivel considerado

S_2 : Esfuerzo latitudinal actuante en el nivel considerado

t : Espesor calculado en el nivel considerado.

La teoría de la membrana asume que no existe esfuerzos tangenciales sobre las caras del elemento considerado, por esta razón se toma a los esfuerzos meridionales y latitudinales como esfuerzos principales, además el material de la envolvente se encuentra en un estado tensional plano. De esta manera si aplicamos el criterio de Von Mises se obtiene:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (31)$$

$$\sigma_e < F_y \quad (32)$$

3.3 Cargas

3.3.1 Carga muerta

Se considera como carga muerta al peso propio de todos los elementos permanentes que conforman la estructura como el tanque, tanto la parte cilíndrica como el fondo y techo toriesférico, la estructura de soporte y cargas adicionales por tuberías que se encuentran conectadas al tanque. La American Water Works Association (AWWA D100, 2005) recomienda que puede usarse un peso unitario para el acero de 7850 Kg/m³ (490 lb/pie³). La hoja electrónica elaborada en este trabajo calcula un peso aproximado tanto del tanque como de la estructura de soporte.

3.3.1.1 Peso tanque de acero

El peso aproximado del casquete toriesférico se determina con la siguiente expresión:

$$W_{casquete} = 2\pi t \gamma_a (R_k^2 \text{sen}\beta + R_k a \beta + R_d c) \quad (33)$$

Donde:

t : Espesor del casquete toriesférico en (m)

γ_a : Peso específico del acero (76,930 N/m³)

El resto de términos ya fueron expuestos anteriormente.

Para determinar el peso aproximado de la parte cilíndrica primero se calcula el peso de cada virola con la siguiente expresión:

$$W_i = \pi D v_i t_i \gamma_a \quad (34)$$

Donde:

W_i : Peso de cada virola en (N)

D : Diámetro del cilindro en (m)

v_i : Altura de cada anillo o virola en (m)

t_i : Espesor de cada anillo en (m)

El peso de la parte cilíndrica del tanque será entonces:

$$W_{cilindro} = \sum_i^n W_i \quad (35)$$

Donde:

$W_{cilindro}$: Peso total de la parte cilíndrica del tanque

n = Número de anillos de la parte cilíndrica

Por lo tanto el peso total del tanque de acero será:

$$W_{tanque} = W_{c. fondo} + W_{c. techo} + W_{cilindro} \quad (36)$$

Donde:

W_{tanque} : Peso total del tanque de acero

$W_{c. fondo}$: Peso del casquete de fondo

$W_{c. techo}$: Peso del casquete de techo

$W_{cilindro}$: Peso de la parte cilíndrica del tanque

3.3.1.2 *Peso del agua*

También se toma como carga muerta al peso de toda el agua contenida en el tanque cuando este se encuentre lleno. La American Water Works Association (AWWA D100, 2005) recomienda utilizar un peso unitario de agua de 1000 kg/m^3 ($62,4 \text{ lb/pe}^3$). El peso total del agua se determina con la siguiente expresión:

$$W_{H_2O} = \gamma_{H_2O} V \quad (37)$$

Donde:

γ_{H_2O} : Peso específico del agua en N/m^3

V : Volumen del agua contenido en el tanque en m^3

3.3.1.3 Peso de la estructura de soporte:

Se calcula el peso total de las columnas (W_c) utilizando la siguiente expresión:

$$W_c = A_c L_c \gamma_a N \quad (38)$$

Donde:

A_c : Área de la sección transversal de la columna en m^2

L_c : Longitud total de la columna en m

γ_a : Peso específico del acero en N/m^3

N : Número de columnas

El peso de todos los arriostres horizontales (W_H) de la estructura de soporte se determina de acuerdo con la tabla 13-3.

Tabla 13-3. Peso de arriostres horizontales

Estructura con:	Peso de arriostres horizontales	
1 Anillo horz.	$W_{H1} = A_H H_1 \gamma_a N$	$W_H = W_{H1}$
2 Anillos horz.	$W_{H1} = A_H H_1 \gamma_a N$ $W_{H2} = A_H H_2 \gamma_a N$	$W_H = W_{H1} + W_{H2}$
3 Anillos horizontales	$W_{H1} = A_H H_1 \gamma_a N$ $W_{H2} = A_H H_2 \gamma_a N$ $W_{H3} = A_H H_3 \gamma_a N$	$W_H = W_{H1} + W_{H2} + W_{H3}$

Donde:

A_H : Área de la sección transversal de los arriostres horizontales en m^2

H_n : Longitud de cada arriostre horizontal en m

γ_a : Peso específico del acero en N/m^3

N : Número de columnas

W_H : Peso total de los arriostres horizontales en N

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Mientras que el peso de todos los arriostres diagonales (W_d) de la estructura se determina de acuerdo a la tabla 14-3.

Tabla 14-3. Peso de arriostres diagonales

Estructura con:	Peso de arriostres diagonales	
1 Anillo horizontal	$W_{d1} = A_d d_1 \gamma_a N$ $W_{d2} = A_d d_2 \gamma_a N$	$W_d = W_{d1} + W_{d2}$
2 Anillos horizontales	$W_{d1} = A_d d_1 \gamma_a N$ $W_{d2} = A_d d_2 \gamma_a N$ $W_{d3} = A_d d_3 \gamma_a N$	$W_d = W_{d1} + W_{d2} + W_{d3}$
3 Anillos horizontales	$W_{d1} = A_d d_1 \gamma_a N$ $W_{d2} = A_d d_2 \gamma_a N$ $W_{d3} = A_d d_3 \gamma_a N$ $W_{d4} = A_d d_4 \gamma_a N$	$W_d = W_{d1} + W_{d2} + W_{d3} + W_{d4}$

Donde:

A_d : Área de la sección transversal de los arriostres diagonales en m^2

d_n : Longitud de cada arriestre diagonal en m

γ_a : Peso específico del acero en N/m^3

N : Número de columnas

W_d : Peso total de los arriostres diagonales en N

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Por lo tanto el peso total de la estructura de soporte se determina con la siguiente expresión:

$$W_{Estructura} = W_c + W_H + W_d \quad (39)$$

3.3.2 Carga viva:

La carga viva de techo según la American Water Works Association (AWWA D100, 2005) puede tomarse de 1.0 KPa (20 lb/pies²) o puede tomarse según los requerimientos de la ASCE-7-10, pero no debe ser menor que 0,72 KPa (15 lb/pies²).

3.3.3 Carga de viento (ASCE 7, 2010; AWWA D100, 2005)

Los tanques elevados se encuentran afectados por las cargas de viento, por lo tanto en el diseño deberá prevenirse los esfuerzos causados por estas cargas, evitando así que el tanque sufra fallas en el momento del montaje o peor aún en funcionamiento. Para determinar la presión causada por

el viento en la estructura, tomaremos las ecuaciones propuestas por la estándar AWWA D100-05, en su sección 3.1.4, para cargas de viento:

$$P_w = q_z G C_f \geq 1,436 C_f \quad (40)$$

Donde:

P_w : Presión del viento aplicado al área proyectada a la normal al viento, en N/m^2

q_z : Presión de velocidad evaluada a la altura z del centroide del área proyectada, en N/m^2

G : Factor de efecto ráfaga. Según la AWWA D100-05 este factor puede tomarse como 1.0 o puede calcularse usando el procedimiento dado en la ASCE 7, el cual se basará en un coeficiente de amortiguamiento de 0.005, pero el factor de efecto ráfaga no debe ser menor que 0.85.

C_f : Coeficiente de fuerza

3.3.3.1 Presión de velocidad

La presión de velocidad (en N/m^2) evaluada a una altura z será calculada de la siguiente manera:

$$q_z = 0.613 K_z V^2 I \quad \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

Donde:

K_z : Coeficiente de exposición de presión de velocidad evaluada a una altura z del centroide del área proyectada.

I : Factor de importancia.

V : Velocidad básica del viento, en m/s

3.3.3.2 Categorías de ocupación

La categoría de ocupación en la que se encuentra los tanques elevados es la IV de las categorías que presenta la American Society of Civil Engineers (ASCE-7, 2005) en su tabla 1-1, esta tabla se replica en este trabajo en la tabla 15-3 solo para la categoría IV. Se toma esta categoría ya que los tanques elevados se consideran como una estructura esencial. Es necesario determinar la categoría de ocupación de la estructura para determinar el factor de importancia de la misma.

Tabla 15-3. Categoría de ocupación

Categoría de ocupación	
Naturaleza de ocupación	Categoría de ocupación
<p>Edificios y otras estructuras clasificadas como edificios gubernamentales, municipales, de servicios públicos o de utilidad pública, incluyendo pero no exclusivamente :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Cuarteles de política; – Centrales eléctricas y telefónicas; – Correos y telégrafos; – Radioemisoras; – Canales de televisión; – Plantas de agua potable y de bombeo. <p>Edificios y otras estructuras designadas como instalaciones esenciales, incluyendo, pero no limitado a:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Hospitales; – Postas de primeros auxilios; – Cuarteles de bomberos; – Garajes para vehículos de emergencia; – Estaciones terminales; – Refugios de emergencia. – Estructuras auxiliares (torres de comunicación, tanques de almacenamiento de combustible, torres de enfriamiento, estructuras de subestaciones eléctricas, tanques de almacenamiento de agua, apoyo de estructuras para tanques de agua o de extinción de incendios) necesarias para el funcionamiento de las estructuras de ocupación categoría IV durante una emergencia. 	IV

Fuente: (American Society Of Civil Engineers, 2005)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.3.3.3 *Factor de Importancia I*

Basado en la categoría de ocupación la American Society Of Civil Engineers (2005) en su tabla 6-1 determina un factor de importancia para cada categoría. Debido a que la categoría de ocupación en la que se encuentra los tanques elevados de almacenamiento es la IV, se ha replicado la tabla 6-1 de la AISC 7-10 que muestra el factor de importancia solo para dicha categoría en la tabla 16-3 del presente trabajo.

Tabla 16-3. Factor de importancia

Categoría	Factor de importancia
IV	1.15

Fuente: (American Society Of Civil Engineers, 2005)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.3.3.4 Categorías de exposición

La ASCE 7-10 en su sección 26.7 propone las categorías de exposición B, C y D, para determinar estas categorías es necesario definir primero las categorías de rugosidad superficial las cuales son:

- **Rugosidad superficial B:** áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas que tengan el tamaño de viviendas unifamiliares o mayores.
- **Rugosidad superficial C:** Terreno abierto con obstrucciones dispersas con alturas generalmente inferiores a 9,1 m. Esta categoría incluye campo abierto plano, pastizales, y todas las superficies de agua en las regiones propensas a huracanes.
- **Rugosidad superficial D:** Superficies planas, sin obstáculos y superficies de agua fuera de las regiones propensas a huracanes. Esta categoría incluye pisos de barro liso, salinas y hielo ininterrumpido.

En base a las categorías de rugosidad superficial se define las categorías de exposición de la siguiente manera:

- **Exposición B:** La exposición B se aplicará cuando la condición de rugosidad de la superficie del terreno, definida por la rugosidad de superficie B, prevalezca en dirección de viento a lo largo de una distancia de por lo menos 792 m (2,600 pies) o 20 veces la altura del edificio, lo que sea mayor .
- **Exposición C:** La exposición C se aplicará a todos los casos en los que las Exposiciones B o D no se apliquen.

- **Exposición D:** La exposición D se aplicará cuando la rugosidad de la superficie del terreno, definida por la rugosidad superficial D, prevalezca en la dirección contra el viento en una distancia superior a 1,524 m (5,000 pies) o 20 veces la altura del edificio, la que sea mayor. La exposición D se extenderá en las áreas a sotavento de la rugosidad de superficial B o C para una distancia de 200 m (600 pies) o 20 veces la altura del edificio, lo que sea mayor.

Sin embargo la AWWA D100-05 en la sección 3.1.4 nos define solo las categorías de exposición C y D, además recomienda utilizar solo la exposición C a menos que se especifique lo contrario.

3.3.3.5 Coeficiente de exposición de presión de velocidad K_z

El coeficiente de exposición de presión de viento será evaluado a la altura z del centroide del área proyectada. En la tabla 17-3 se proporcionan los coeficientes de exposición de presión de velocidad para las categorías de exposición B, C y D, se recomienda que para alturas intermedias a las que muestra en la tabla, se realizara una interpolación lineal o se puede utilizar el mayor de los coeficientes. Sin embargo estos coeficientes también pueden ser calculados por las siguientes ecuaciones:

Para: $z < 4.6 \text{ m}$

$$k_z = 2.01 \left(\frac{4.6}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (41)$$

Para: $4.6 \text{ m} \leq z \leq z_g$

$$k_z = 2.01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (42)$$

En donde los términos α y z_g se determinan de la tabla 18-3.

3.3.3.6 Coeficiente de fuerza C_f

Se determinara un coeficiente de fuerza C_f para el tanque mediante la tabla 19-3.

Tabla 17-3. Coeficientes de exposición de presión de velocidad K_z

Altura (m)	K_z		
	Exposición B	Exposición C	Exposición D
0 - 4.6	0.57	0.85	1.03
6.1	0.62	0.90	1.08
7.6	0.66	0.94	1.12
9.1	0.70	0.98	1.16
12.2	0.76	1.04	1.22
15.2	0.81	1.09	1.27
18	0.85	1.13	1.31
21.3	0.89	1.17	1.34
24.4	0.93	1.21	1.38
27.4	0.96	1.24	1.40
30.5	0.99	1.26	1.43
36.6	1.04	1.31	1.48
42.7	1.09	1.36	1.52
48.8	1.13	1.39	1.55
54.9	1.17	1.43	1.58
61.0	1.20	1.46	1.61
76.2	1.28	1.53	1.68
91.4	1.35	1.59	1.73
106.7	1.41	1.64	1.78
121.9	1.47	1.69	1.82
137.2	1.52	1.73	1.86
152.4	1.56	1.77	1.89

Fuente: (American Society of Civil Engineers, 2010)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 18-3. Términos α y z_g

Exposición	α	z_g (m)
B	7.0	365.76
C	9.5	274.32
D	11.5	213.36

Fuente: (American Society of Civil Engineers, 2010)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Para la torre de soporte el coeficiente de fuerza C_f se determinara mediante la siguiente ecuación:

$$C_f = 4.0 \epsilon^2 - 5.9 \epsilon + 4.0 \quad (43)$$

Para torres que contienen miembros redondeados, se debe multiplicar el coeficiente de fuerza C_f , calculado con la ecuación anterior, por el siguiente factor de reducción:

$$F_{reducción} = 0.51 \epsilon^2 + 0.57, \quad \text{pero no será } > 1 \quad (44)$$

Donde:

ϵ : Es la relación entre el área sólida y el área gruesa de todos los elementos expuestos proyectados a un plano normal a la dirección del viento.

Tabla 19-3. Coeficiente de fuerza para el tanque de acero, C_f

Tipo de superficie	C_f
Plano	1.0
Cilíndrico o cónico con ángulo de inclinación $< 15^\circ$	0.60
Doble curvatura o cónico con ángulo de inclinación $\geq 15^\circ$	0.50

Fuente: (American Water Works Association, 2005)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.3.4 Cargas por sismo (NEC-SE-DS, 2014)

Los tanques de almacenamiento de agua son estructuras importantes que deben mantenerse operando después de la ocurrencia de un sismo debido a las funciones que este cumple, la falla de este tipo de estructuras puede provocar, además de la pérdida de líquido, pérdida de vidas humanas y grandes daños económicos. Al ser el Ecuador un país con una actividad sísmica alta, debido a que se encuentra vulnerable a los efectos provocados por los movimientos de la placa de Nazca por debajo de la placa sudamericana (subducción) y a varias fallas locales que son los principales causantes de sismos, es indispensable incorporar el diseño sísmico en este tipo de estructuras, para ello se hace uso de la Norma Ecuatoriana de la construcción (NEC-SE-DS).

Esta norma muestra los requerimientos y metodologías que deben ser aplicadas al diseño sismo resistente de edificaciones y de estructuras diferentes a las edificaciones con el fin de reducir los riesgos sísmicos a puntos que se consideren aceptables en el suelo ecuatoriano.

3.3.4.1 Zonificación sísmica

La norma divide al Ecuador en seis zonas diferentes las cuales se muestran en el mapa ilustrado en la figura 6-3, en ella se puede observar que la mayor parte del territorio ecuatoriano se encuentra en zonas sísmicas altas, cada zona mostrada en el mapa se caracteriza por un factor de zona Z .

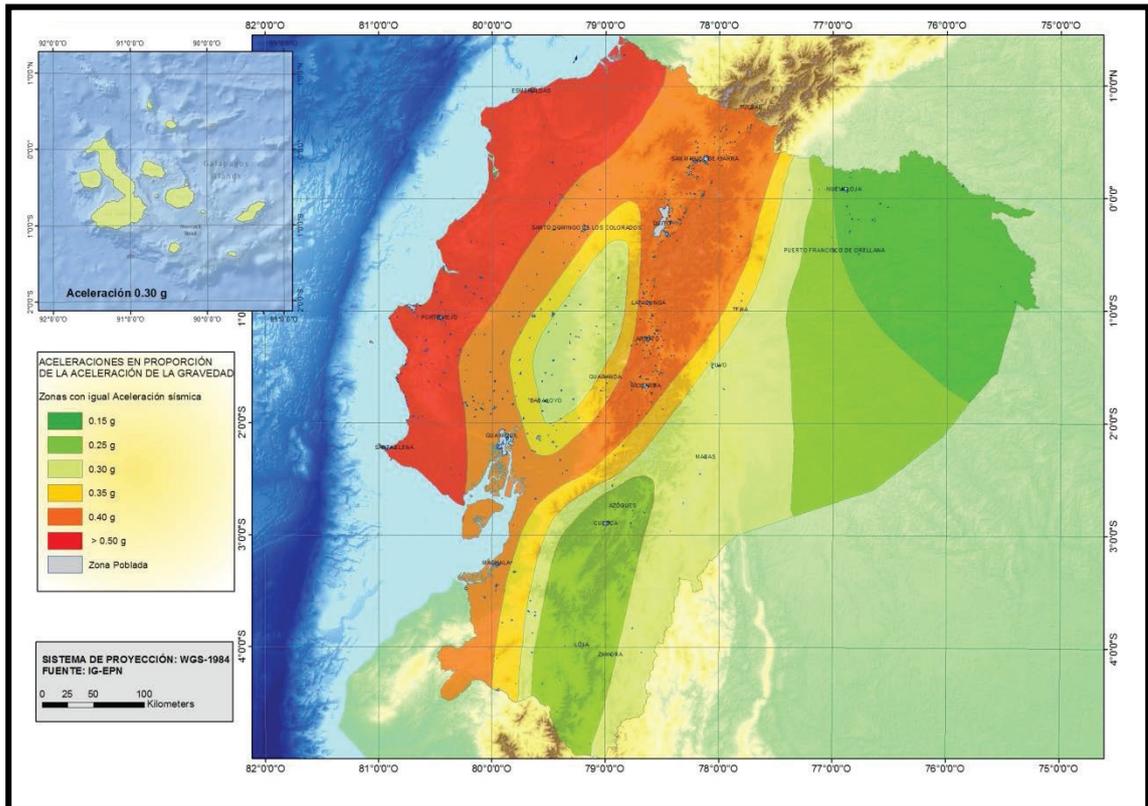


Figura 6-3. Ecuador, Mapa de zonificación sísmica para diseño y valor del factor Z .

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

El Factor de zona (Z) “representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad” (NEC-SE-DS, 2014, p.27). El valor de este factor para cada zona sísmica se muestra en la tabla 20-3

3.3.4.2 Perfiles de suelo para el diseño.

Los parámetros utilizados en la clasificación son los correspondientes a los 30 m superiores del perfil para los perfiles tipo A, B, C, D Y E. Aquellos perfiles que tengan estratos claramente diferenciables deben subdividirse, asignándoles un subíndice i que va desde 1 en la superficie, hasta n en la parte inferior de los 30 m superiores del perfil. Para perfiles tipo F se aplica otros

critérios y la respuesta no debe limitarse a los 30 m superiores del perfil en los casos de perfiles con espesor de suelo significativo (NEC-SE-DS, 2014, p.29).

Tabla 20-3. Valores del factor de zona Z.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Factor z	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	≥0,5
Caracterización de peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 21-3. Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelo muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50,0$ $S_u \geq 100 \text{ KPa}$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15,0$ $100 \text{ KPa} > S_u \geq 50 \text{ KPa}$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180 \text{ m/s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ KPa}$

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 21-3 (Continúa). Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 —Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 —Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H >3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3 —Arcillas de muy alta plasticidad (H >7.5 m con índice de Plasticidad IP >75)	
	F4 —Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H >30m)	
	F5 —Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
	F6 —Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.3.4.3 Coeficientes de perfil de suelo

- a) Coeficiente de amplificación de suelo de Período corto (F_a):

Tabla 22-3. Factores de sitio F_a

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	$\geq 0,5$
A	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
B	1	1	1	1	1	1
C	1,4	1,3	1,25	1,23	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

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- b) Factor de amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamiento para diseño en roca (F_d):

Tabla 23-3. Factores de sitio F_d

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	$\geq 0,5$
A	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
B	1	1	1	1	1	1
C	1,36	1,28	1,19	1,15	1,11	1,06
D	1,62	1,45	1,36	1,28	1,19	1,11
E	2,1	1,75	1,7	1,65	1,6	1,5

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- c) Factor de comportamiento inelástico del subsuelo (F_s):

Tabla 24-3. Factores de comportamiento inelástico del subsuelo F_s

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	$\geq 0,5$
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

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.3.4.4 Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones

El espectro de respuesta de aceleraciones S_a , expresado como fracción de la aceleración de la gravedad, que se muestra en la figura 7-3, obedece a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico de 5%. Este espectro se obtiene con las siguientes ecuaciones:

Para: $0 \leq T \leq T_c$

$$S_a = \eta Z F_a \quad (45)$$

Para: $T > T_c$

$$S_a = \eta Z F_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r \quad (46)$$

Donde:

η : Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0,1$) y el PGA (Peak Ground Acceleration) para el Período de retorno seleccionado.

S_a : Espectro de respuesta elástico de aceleración que depende del Período de vibración, expresado como fracción de aceleración).

T : Período fundamenta de vibración dela estructura

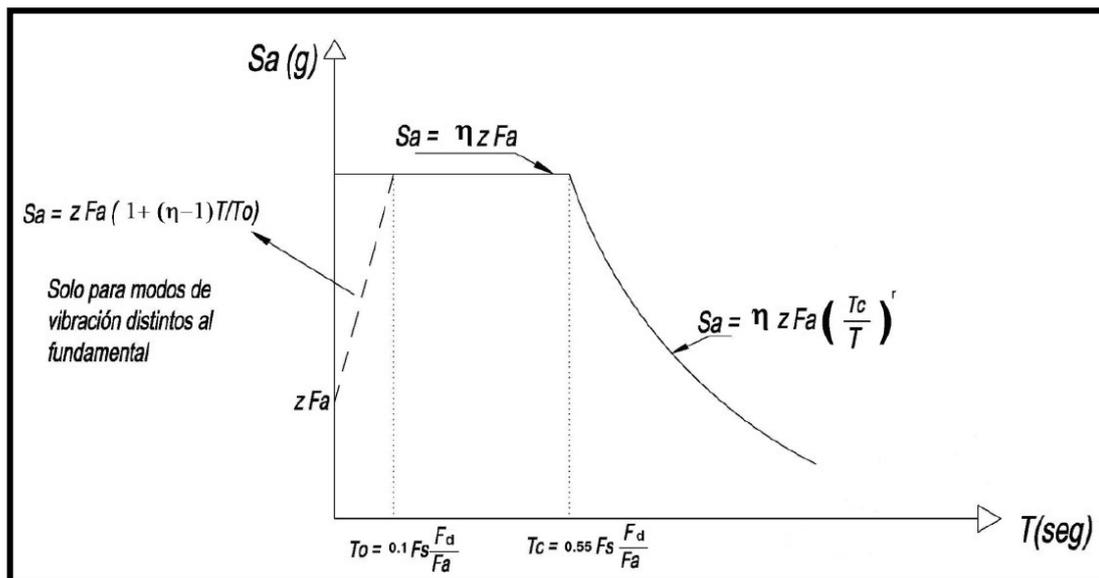


Figura 7-3. Espectro elástico de diseño en aceleraciones.

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

T_0 = Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

T_c = Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

F_a = Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de Período corto.

F_d = Coeficiente de amplificación de suelo.

F_s = Coeficientes de amplificación de suelo.

Z = Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada en fracción de la aceleración de la gravedad g .

r = Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto. Para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E se usa un $r = 1$ y para el suelo tipo E se utiliza $r = 1,5$.

Los valores de η dependen de las regiones del Ecuador, como se detalla a continuación:

- Para las provincias de la costa con excepción de Esmeraldas, toma un valor de 1,8
- Para las provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos, toma un valor de 2,48
- Y para las provincias del Oriente toma un valor de 2,6

Los Períodos límites se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$T_0 = 0,1F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (47)$$

$$T_C = 0,55F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (48)$$

$$T_L = 2,4F_d \quad (49)$$

Donde:

T_L = Período límite de vibración utilizado para la definición de espectro de respuesta en desplazamiento.

El resto de términos fueron expuestos anteriormente.

3.3.4.5 *Coeficientes de importancia I*

Los valores de los coeficientes de importancia dependen de la categoría en la que se encuentre la estructura como se muestra en la tabla 25-3, este coeficiente aumenta la demanda sísmica de diseño con el objetivo de que las estructuras, en función de su importancia, permanezcan operativas después de la ocurrencia del sismo.

Tabla 25-3. Coeficientes de importancia I

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coefficiente 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	1,0

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014).

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.3.4.6 Configuración estructural

Los tanques elevados tratados en este trabajo se consideran como estructuras regulares tanto en planta como en elevación, por lo que los coeficientes de regularidad en planta ϕ_p y en elevación ϕ_E tendrán un valor de 1,0.

3.3.4.7 Período de vibración (T)

El Período permite calcular el valor de S_a del espectro en aceleraciones mostrado en la figura 7-3. Según (CHOPRA, 2014) el Período natural T_n para una estructura con un grado de libertad puede determinarse con la siguiente expresión:

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{\delta_{st}}{g}} \quad (50)$$

Donde:

δ_{st} : Es el desplazamiento lateral de la masa debido a una fuerza lateral (W).

g : Es la aceleración debido a la gravedad.

W : Peso total de la estructura incluido su contenido.

Para determinar el desplazamiento lateral de la estructura nos basaremos en el procedimiento que nos brinda Arya en su libro “Design of Steel Structures”. Según (ARYA, 2001) se puede suponer que la fuerza horizontal W se distribuirá por igual en la parte superior de las columnas, por lo que la fuerza cortante para el panel vertical arriostrado (Figura 9-3) puede determinarse resolviendo las fuerzas horizontales en sus planos como se muestra en la Figura 8-3 a) y b).

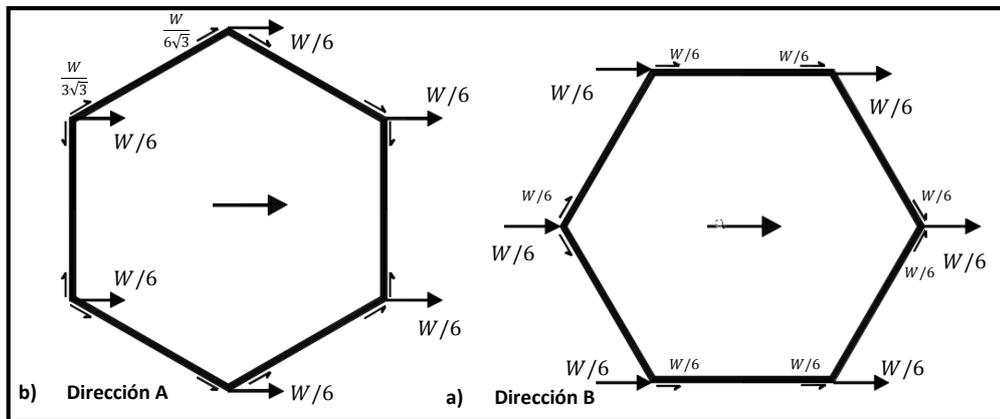


Figura 8-3. Distribución de la cortante en una estructura de 6 columnas.

Fuente: (ARYA, 2001).

(ARYA, 2001) aclara que la fuerza cortante máxima en el panel ocurre cuando la dirección de la fuerza horizontal es como se muestra en la Figura 8-3 b), por lo que la deflexión horizontal de un panel vertical arriostrado como se muestra en la Figura 9-3 puede calcularse aproximadamente considerando la elongación del arrioste diagonal que se encuentra a tensión cuando el panel se deforma según los puntos A'B'DC bajo la acción de la carga Q (para el caso de la Figura 8-3 b) con estructura de 6 columnas la carga Q es igual a $W/3$).

La longitud del arrioste diagonal que se muestra en la figura 9-3 se calculará de la siguiente manera:

$$l = \sqrt{a^2 + h^2} \quad (51)$$

La carga en el arrioste diagonal se determinara de la siguiente manera (ARYA, 2001):

$$F = Ql/a \quad (52)$$

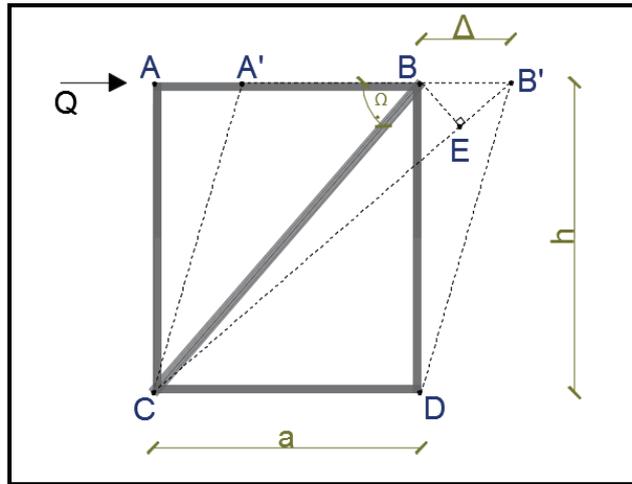


Figura 9-3. Deflexión en un panel arriostrado.

Fuente: (ARYA, 2001).

Por lo que la elongación EB' será (ARYA, 2001):

$$EB' = \frac{Fl}{AE} = \frac{Ql^2}{aAE} \quad (53)$$

Donde:

A : Área de la sección transversal del arrioste diagonal.

E : Módulo de elasticidad

Así la deflexión de cada panel será (ARYA, 2001):

$$\Delta = BB' = EB' * \frac{l}{a} = \frac{Ql^3}{a^2AE} \quad (54)$$

(ARYA, 2001) también menciona que si hay varios paneles uno encima de otro, cada panel tendrá la misma fuerza de corte y se deformará de la misma manera por lo que la deflexión total será la suma de todas las desviaciones:

$$\delta_{st} = Q \sum \frac{l^3}{a^2AE} \quad (55)$$

Ahora debemos tomar en cuenta que la NEC (2014, p.61) propone dos métodos para determinar un valor estimado del Período de vibración de una estructura, el cual resulta muy útil como una estimación inicial para realizar el dimensionamiento de la estructura. El primer método está

destinado para estructuras de edificaciones, este método depende de la altura de la estructura y de dos coeficientes que dependen del tipo de estructura. Mientras que el segundo es un método basado en la dinámica estructural el cual se está utilizando para determinar el Período de vibración de estructuras diferentes a las edificaciones, sin embargo la norma también recomienda que el valor del Período de vibración calculado por el segundo método no sea mayor al 30% del Período de vibración (T_1) calculado por el primero método, con esto se está estableciendo un límite para el Período de la estructura, por lo tanto el Período del tanque elevado no debe ser mayor a $1,3T_1$, por lo tanto:

$$T_n \leq 1,3T_1 \quad (56)$$

$$T_1 = C_t h_n^\alpha \quad (57)$$

Donde:

C_t : Coeficiente que depende del tipo de estructura

h_n : Altura máxima de la edificación de n pisos, medida desde la base de la estructura

Tabla 26-3. Coeficientes C_t y α

Tipo de estructura	C_t	α
Estructura de acero		
Sin arriostramientos	0,072	0,8
Con arriostramientos	0,073	0,75

Fuente: (NEC-SE-DS, 2014, p.62).

Realizado por: Willian Inchilema

3.3.4.8 Factor de reducción de resistencia sísmica (R)

El factor R permite una reducción de las fuerzas sísmicas de diseño, lo cual es permitido siempre que las estructuras y sus conexiones se diseñen para desarrollar un mecanismo de falla previsible y con adecuada ductilidad, donde el daño se concentre en secciones especialmente detalladas para funcionar como rotulas plásticas (NEC-SE-DS, 2104, p63).

Utilizar el factor de reducción significa reducir el espectro de respuesta, es decir que permite pasar del espectro elástico al espectro inelástico, debido a que no se puede construir una estructura para que no sufra daños tras la ocurrencia del sismo por lo que debe diseñarse para aceleraciones sísmicas menores con el objetivo de obtener un adecuado comportamiento inelástico de la

estructura durante el sismo de diseño, con esto se está aceptando daños en la estructura pero se logra obtener una disipación de energía adecuada que impiden el colapso de la estructura. La NEC nos brinda los factores de respuesta para estructuras diferentes a las edificaciones, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 27-3. Factores de reducción de respuesta para estructuras diferentes a las edificaciones

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-SE-DS, 2014, p.62).

Realizado por: Willian Inchilema

3.3.4.9 Carga reactiva (W)

Se considera como carga reactiva W el peso de la estructura incluido todas las cargas muertas.

3.3.4.10 Cortante basal de diseño (V)

El cortante basal es la fuerza total de diseño, aplicada en la base de la estructura, provocado por cargas laterales resultado de la acción sísmica. La NEC propone que el cortante basal total de

diseño, a nivel de cargas últimas, aplicado a una estructura en una dirección especificada, se determina mediante la siguiente expresión:

$$V = C_v W = \frac{I S_a(T)}{R \phi_P \phi_E} W \quad (58)$$

Donde:

V = Cortante basal total de diseño

C_v = Coeficiente de cortante basal.

$S_a(T)$ = Espectro de diseño en aceleración

ϕ_P y ϕ_E = Coeficientes de configuración en planta y en elevación, respectivamente.

I = Coeficiente de importancia

R = Factor de reducción de resistencia sísmica

T = Período de vibración

W = Carga sísmica reactiva

3.4 Viga horizontal de refuerzo, balcón y vigas intermedias.

3.4.1 Viga horizontal y balcón

La AWWA D100 (2005) en su sección 4.4.4 recomienda que para tanques elevados con columnas inclinadas que se conecten a las paredes del tanque, se debe proporcionar una viga horizontal para resistir el componente horizontal de las cargas de la columna. Esta viga debe ser proporcionada para resistir de forma segura como una viga de anillo la componente horizontal hacia dentro de la carga de la columna, si la viga horizontal se utiliza como balcón, este debe tener un ancho mínimo de 610 mm (24 pulgadas) y debe tener una barandilla de al menos (1.067 mm) de alto. Por su parte la API 650 (2012) en su sección 5.9 recomienda que el módulo de sección del perfil que se vaya a utilizar como viga de refuerzo debe basarse en las propiedades de los miembros aplicados y puede incluir una proporción de la cáscara del tanque a una distancia de 16 veces el espesor del tanque (t) por debajo y, si corresponde, por encima del anillo de refuerzo, como puede observarse en la figura 10-3.

En la figura 10-3 (a) se puede observar el perfil de un ángulo que puede ser utilizado como una viga de refuerzo, cuando se trate de un ángulo con los lados desiguales el lado más largo se colocará horizontalmente (perpendicular al tanque), mientras que en la figura 10-3 (b) se puede observar un perfil típico para cuando se requiera utilizar a la viga de refuerzo como un balcón,

este último puede tener una dimensión horizontal lo suficientemente larga para aprovechar su espacio como pasarela. La API 650 (2012) nos proporciona módulos de sección tabulados para varias configuraciones de perfiles de vigas de refuerzo en su tabla 5.20, la cual se replica en este trabajo en la tabla 28-3 solo para las configuraciones mostradas en la figura 10-3. Además el estándar también establece que las dimensiones mínimas de ángulos que forman parte de un anillo de refuerzo será de 65 x 65 x 6 mm (2 ½ x 2 ½ x ¼ plg.), mientras que el espesor nominal mínimo de la placa para uso en anillos de refuerzo formados o construidos será de 6 mm (0,236 plg.).

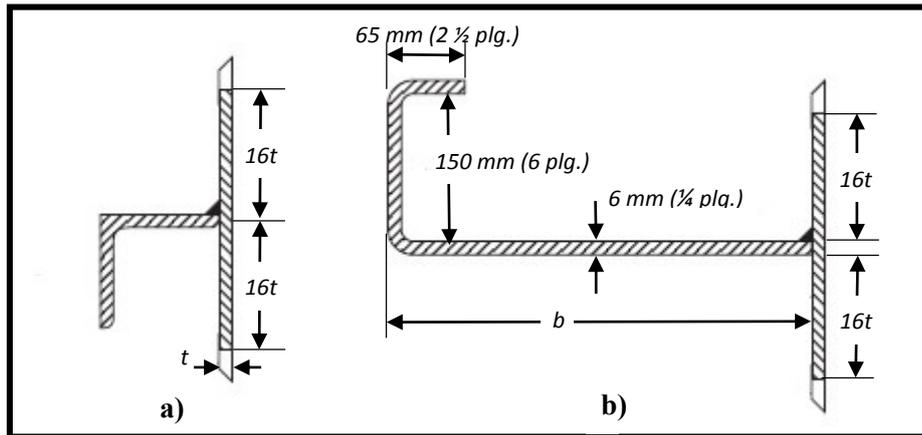


Figura 10-3. Perfiles típicos de vigas de refuerzo para tanques de acero

Fuente: (API 620, 2012, p.132)

Tabla 28-3. Módulos de sección de perfiles de vigas de refuerzo para tanques de acero

Módulo de sección (cm ³)					
Dimensiones de la viga (mm)	Espesor del tanque, t (mm)				
	5	6	8	10	11
a) Ángulo					
65x65x6	28,09	29,15	30,73	32,04	32,69
65x65x8	34,63	36,20	38,51	40,32	41,17
100x75x7	60,59	63,21	66,88	69,48	70,59
102x75x8	66,97	70,08	74,49	77,60	78,90
125x75x8	89,41	93,71	99,86	104,08	105,78
125x75x10	105,20	110,77	118,97	124,68	129,97
150x75x10	134,14	141,38	152,24	159,79	162,78
150x10x10	155,91	171,17	184,11	193,08	196,62

Fuente: (API 620, 2012, p.133)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 28-3 (Continúa). Módulos de sección de perfiles de vigas de refuerzo para tanques de acero

Módulo de sección (cm ³)					
Dimensiones de la viga (mm)	Espesor del tanque, t (mm)				
	5	6	8	10	11
b) Placa formada					
b = 250	-	341	375	392	399
b = 300	-	427	473	496	505
b = 350	-	519	577	606	618
b = 400	-	615	687	723	737
b = 450	-	717	802	846	864
b = 500	-	824	923	976	996
b = 550	-	937	1049	1111	1135
b = 600	-	1054	1181	1252	1280
b = 650	-	1176	1317	1399	1432
b = 700	-	1304	1459	1551	1589
b = 750	-	1436	1607	1709	1752
b = 800	-	1573	1759	1873	1921
b = 850	-	1716	1917	2043	2096
b = 900	-	1864	2080	2218	2276
b = 950	-	2016	2248	2398	2463
b = 1000	-	2174	2421	2584	2654

Fuente: (API 620, 2012, p.133)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.4.2 Vigas intermedias (AWWA D100, 2005)

Se usan vigas intermedias para que la carcasa cilíndrica tenga una mayor estabilidad contra la carga del viento. Para determinar si el tanque requiere una viga intermedia entre el fondo y el techo se aplica la siguiente fórmula:

$$h = \frac{8025t}{P_{aw} \left(\frac{D}{t}\right)^{1.5}} \quad (59)$$

Donde:

h : La altura de la carcasa cilíndrica entre la viga de viento intermedio requerido y el techo, en metros.

t : El espesor promedio de la carcasa cilíndrica menos la tolerancia de corrosión, en milímetros, para la distancia vertical h , a menos que se especifique lo contrario.

D : Es el diámetro nominal de la parte cilíndrica, en metros

P_{aw} : Presión del viento promedio ponderado que actúa sobre la altura de diseño, en N/m^2

3.4.2.1 Procedimiento

Para determinar la altura máxima de la parte cilíndrica que no va rigidizada se realiza un cálculo inicial utilizando el espesor de la virola superior de la parte cilíndrica. Los cálculos adicionales se basan en el espesor promedio obtenido al incluir una parte o la totalidad de la siguiente virola inferior, hasta que la altura h calculada sea igual o menor que la altura de la parte utilizada para determinar el espesor promedio. Si h continua calculando una altura mayor que la de la parte utilizada para determine el espesor promedio, no se requiere ninguna viga intermedia.

Después de establecer la ubicación de la primera viga intermedia, si es necesario, se repite el procedimiento anterior para los siguientes refuerzos intermedios adicionales, utilizando la viga intermedia anterior como la parte superior del tanque. La sección requerida para los refuerzos intermedios, debe ser proporcionada de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$S = 0.06713hD^2P_{aw} \quad (60)$$

Donde:

S : Módulo de sección mínimo requerido, en milímetros cúbicos, de la viga intermedia, incluida una porción de la cubierta del tanque a una distancia menor de $16t$ o $0,78(Rt)^{1/2}$ por arriba y debajo de la unión de la viga y el tanque (ver figura 10-3).

Los demás términos ya fueron definidos anteriormente.

Si se requiere utilizar ángulos como vigas intermedias, se puede determinar las dimensiones del ángulo mediante la tabla 28-3 de acuerdo al módulo de sección requerido calculado con la ecuación 53.

3.5 Diseño de elementos estructurales

La estructura de soporte está compuesta por columnas, arriostres horizontales y diagonales, estos elementos estructurales son los encargados de resistir las cargas muertas, cargas vivas y cargas accidentales. El presente trabajo se limita solo al uso de perfiles tubulares para los elementos que componen la estructura de soporte, se utilizan estos perfiles debido a sus grandes ventajas que tiene en estructuras espaciales y son los más adecuados para este tipo de estructuras. Para el diseño de estos elementos estructurales se toman los criterios dados por la AISC 360-10, utilizando el método de factores de carga y resistencia LRFD (Load and Resistance Factor Design) y las combinaciones de carga establecidas por la American Society Of Civil Engineer (ASCE 7, 2010).

3.5.1 *Diseño de elementos*

3.5.1.1 *Columnas*

Las columnas se diseñan para resistir cargas a flexo-compresión. Se determina la capacidad de la columna a compresión aplicando el capítulo E de la AISC 360-10, que en el presente trabajo se replica en la sección 3.5.6. Se determina la capacidad a flexión aplicando el capítulo F de la AISC 360, que en este trabajo se replica en la sección 3.5.9. Y por último se termina la relación demanda-capacidad a flexo-compresión aplicando el capítulo H de la AISC 360-10, el cual se replica en este trabajo en la sección 3.5.11, procurando que esta relación no sea mayor a la unidad.

3.5.1.2 *Arriostres diagonales*

Los arriostres diagonales, en presencia de cargas laterales trabajan a carga axial de tensión o compresión. Se realiza el diseño del elemento a compresión aplicando el capítulo E de la AISC 360-10, que en este trabajo se replica en la sección 3.5.6. Para el diseño del elemento a tensión se aplica el capítulo D de la AISC 360-10, que se replica en este trabajo en la sección 3.5.8.

3.5.1.3 *Arriostres horizontales*

Los arriostres horizontales se diseñan a compresión, para esto se aplica el capítulo E de la AISC 360-10 (sección 3.5.6 de este trabajo).

3.5.2 Perfil tubular de forma circular

Los perfiles tubulares de forma redonda son secciones con dos ejes de simetría y propiedades geométricas iguales alrededor de sus dos ejes principales. Estos perfiles son una parte importante en las estructuras de acero en la industria, y son diseñadas para construir sistemas estructurales metálicos de gran resistencia. Estos perfiles de forma circular presentan grandes ventajas, ya que presentan excelentes propiedades con respecto a los esfuerzos de compresión, torsión y flexión en todas las direcciones.

Otra ventaja importante y por la cuales estos perfiles son muy utilizados es debido a que brindan una apariencia estética muy apropiada, además que brindan una facilidad de mantenimiento debido que al ser una sección cerrada no permite la acumulación de polvo o agua y el área de su superficie es menor que otras secciones, lo que resulta en un menor uso de pintura o anticorrosivos. La desventaja de estas secciones es que tienen ciertas complicaciones para conectarse entre sí.

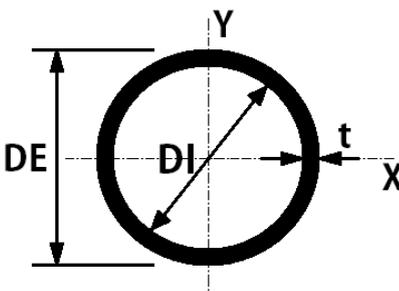
3.5.2.1 Propiedades geométricas del perfil tubular circular

En las ecuaciones utilizadas para el diseño de miembros estructurales se incluyen las propiedades del material y las propiedades geométricas del perfil a utilizarse, estos últimos son de gran importancia ya que determinan que tan eficiente se utilizará las propiedades del material (BLODGETT, 1991, p.27). Por ello es importante definir las fórmulas utilizadas para determinar las propiedades de las secciones a utilizarse. Las fórmulas de las propiedades de la sección tubular circular se presentan en la tabla 29-3.

3.5.3 Materiales para los elementos estructurales

La AWWA D100-05 en su sección 2.2.5 recomienda que puede usarse tuberías de acero como elementos estructurales siempre que cumplan con las normas: ASTM A139, grado B; ASTM A53 tipo E o S, grado B; o API 5L, grado B. La norma también permite que pueda utilizarse perfiles estructurales que se fabriquen a partir de placas que cumplan con la siguientes especificaciones: ASTM A36; A131 grados A y B; A283, grados A, B y C; o A573, grado 58. Los tubos formados en caliente deberán cumplir con la norma ASTM A501. En la tabla 30-3 se muestran las propiedades mecánicas de algunos de los materiales mencionados en este párrafo.

Tabla 29-3. Propiedades geométricas del perfil tubular redondo

Propiedades geométricas		
	Área:	$A = \frac{\pi(DE^2 - DI^2)}{4}$
	Momento de inercia	$I_x = I_y = \frac{\pi(DE^4 - DI^4)}{64}$
	Módulo de la sección	$S_x = S_y = \frac{\pi(DE^4 - DI^4)}{32DE}$
	Radio de giro	$r_x = r_y = \sqrt{\frac{I}{A}}$
	Módulo plástico	$Z_x = Z_y = \frac{A(DE - t)}{\pi}$
	Constante torsional	$J = \frac{\pi(DE^4 - DI^4)}{32}$

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.5.3.1 ASTM A53, Tubos de acero sin costura, negro o galvanizado por inmersión en caliente

Esta norma indica los requisitos que deben cumplir los tubos de acero con o sin costura, negros o galvanizados por proceso de inmersión en caliente en tamaños nominales [NPS] de 1/8 plg a 26 plg [de DN 6 a DN 650] (ASTM A53/A53M, 2012).

3.5.3.2 ASTM A139, Tubería de acero soldado con arco eléctrico

Esta norma abarca 5 grados de tubería de acero soldada con arco de fusión eléctrica con costura recta o helicoidal. Las tuberías se fabrican en diámetros nominales (NPS) de 4 plg y superiores (ASTM A539/A139M, 2016).

3.5.3.3 ASTM A36, Acero al carbono estructural

Esta especificación trata sobre perfiles, placa, y barras de acero al carbono de calidad estructural para usar en construcción remachada, atornillada o soldada, en puentes y edificios, y para propósitos estructurales generales (ASTM A36/A36M, 2012)

3.5.3.4 API 5L, Tubos de conducción

El objetivo de esta especificación es proporcionar estándares para tuberías adecuadas para su uso en el transporte de gas, agua y petróleo, tanto en la industria del petróleo como en la del gas natural. Esta especificación cubre tubos de acero sin costura y soldados. Incluye tubería de extremo liso, extremo roscado y extremo acodado, así como tubería y tubería a través de la línea (TFL) con extremos preparados para usar con acoplamientos especiales (API 5L, 2004). A estos tubos suelen darles muchos usos estructurales.

3.5.3.5 ASTM A501, Tubos de acero al carbono, sin costura o soldados, formados en caliente para usos estructurales:

Esta especificación indica los requisitos que deben cumplir los tubos sin costura o soldados de acero al carbono, formados en caliente, de sección cuadrada, rectangular, circular o de forma especial, para usos estructurales en construcciones soldadas, remachadas o atornilladas que se emplean en puentes, edificios o estructuras en general (ASTM A501/A501M, 2014).

Tabla 30-3. Propiedades mecánicas de los materiales para tubería estructural.

Propiedades Mecánicas						
Material	Esfuerzo de fluencia, Fy		Resistencia de ruptura a la tensión, Fu		Módulo de elasticidad, E	
	MPa	Psi	MPa	Psi	MPa	Ksi
ASTM A53 Gr B	240,00	35.000,00	415,00	60.000,00	200.000,00	29.000,00
ASTM A139 Gr B	240,00	35.000,00	415,00	60.000,00	200.000,00	29.000,00
ASTM A106 Gr B	240,00	35.000,00	415,00	60.000,00	200.000,00	29.000,00
ASTM A36	250,00	36.000,00	400,00	58.000,00	200.000,00	29.000,00
ASTM A501	250,00	36.000,00	400,00	58.000,00	200.000,00	29.000,00
API 5L Gr B	240,00	35.000,00	415,00	60.000,00	200.000,00	29.000,00

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.5.4 Miembros a compresión

Existen tres formas por las cuales los miembros cargados axialmente a compresión pueden fallar:

- a) Por pandeo flexionante, también conocido como pandeo general o pandeo de Euler, esto ocurre cuando los miembros a compresión se vuelven inestables y tienden a flexionarse, es decir se deforman lateralmente alrededor de los ejes principales y centroidales del elemento, véase en la figura 11-3(a).
- b) Por pandeo local, esto ocurre cuando alguna parte de la sección transversal de la columna es tan delgada que tienden a pandearse localmente, esto se puede medir mediante la relación ancho/espesor de las partes que forman la sección transversal, véase figura 11-3(b).
- c) Por flexo-torsión, esto ocurre en columnas que tienen baja rigidez a la torsión, como por ejemplo las columnas con secciones abiertas con pared delgada, estas columnas pueden fallar por torsión o por combinación de pandeo torsional y flexionante, véase figura 11-3(c).

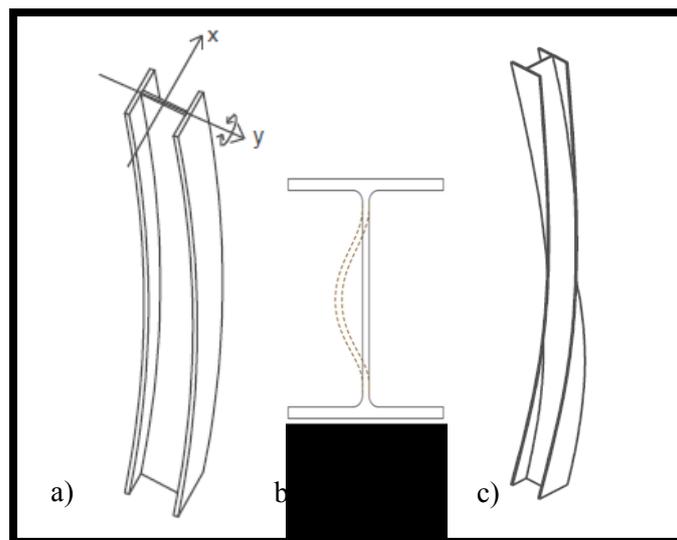


Figura 11-3. Modos de pandeo en columnas: a) Flexionante, b) Local y c) Flexo-torsional.

Fuente: (GERDAU CORSA, 2015)

4.5.4.1 Relación de esbeltez

La relación de esbeltez L_e/r es la relación entre la longitud efectiva del elemento y el radio de giro de su sección transversal, esta relación mide la tendencia que tiene el miembro a pandearse, mientras más largo es el elemento, a un radio de giro constante, más será propenso a pandearse y por lo tanto su capacidad se verá reducida.

La longitud efectiva L_e es igual a kL , por lo que la relación de esbeltes queda como (kL/r) , donde k es el factor de longitud efectiva y L es la longitud del elemento, el factor de longitud efectiva depende de las restricciones que existen en los extremos de la columna y de la resistencia al movimiento lateral de la columna, este factor puede ser determinado de acuerdo a las recomendaciones de la AISC para casos típicos, como puede observarse en la tabla 31-3.

Tabla 31-3. Valores aproximados del factor de longitud efectiva, K.

Valores aproximados del factor de longitud efectiva, K						
	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Las líneas punteadas muestran la forma pandeada de la columna						
Valor K teórico	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados de diseño cuando las condiciones reales son aproximadas	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
Símbolos para las condiciones de extremo						
		<i>Rotación y traslación impedidas</i>				
		<i>Rotación libre y traslación impedida</i>				
		<i>Rotación impedida y traslación libre.</i>				
		<i>Rotación y traslación libres</i>				

Fuente: (MCCORMAC Y CSERNAK, 2013)

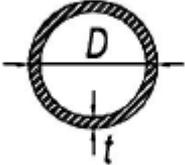
Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Las condiciones de conexiones en los extremos mostradas en la tabla 31-3 son idealizadas que pueden ser útiles en el caso de pre-dimensionamiento, en situaciones prácticas de diseño suelen ser muy diferentes, para este caso se puede determinar mediante monogramas u otros métodos.

3.5.4.2 Clasificación de las secciones en compresión.

La American Institute of Steel Construction (AISC 360, 2010) propone que un elemento se considera no esbelto cuando la relación ancho/espesor de sus elementos que se encuentran sometidos a compresión no superan el valor de λ_r , dado en la tabla B4.1 a de la AISC 360-10, mientras que si la relación ancho/espesor es mayor al valor λ_r se le considerara como un elemento esbelto. La razón límite de la relación ancho-espesor que divide los elementos esbeltos y no esbeltos para perfiles tubulares redondos de la tabla B4.1 de la AISC 360-10, se replica en este trabajo en la tabla 32-3.

Tabla 32-3. Razones Ancho-Espesor de elementos a compresión

Razones Ancho-Espesor: Elementos a Compresión					
Miembros Sujetos a Compresión Axial					
	Caso	Descripción del elemento	Razón Ancho-Espesor	Razón Límite Ancho-Espesor λ_r (Esbelto-No esbelto)	Ejemplo
Elem. Atiesado	9	Tubos circulares	D/t	$0,11 \frac{E}{F_y}$	

Fuente: (American Institute of Steel Construction, 2010)

Realizado por: Inchilema Willian, 2017

3.5.5 Pre-dimensionamiento de la columna

Es necesario realizar un pre-diseño para determinar una sección aproximada de la columna requerida, para ello partimos de las cargas verticales que van a soportar las columnas tales como cargas muertas (D) y cargas vivas (V). Debido a que aún no se tienen definidas las secciones de la estructura de soporte no se puede calcular el peso del mismo por lo que como carga muerta se utiliza solo el peso del tanque de acero y el peso total de agua que va a almacenar el tanque, aunque se puede incluir también un peso extra que considere el peso de la estructura, esto solo es opcional y queda a criterio del diseñador. Para realizar el pre-diseño de la columna nos basamos en el capítulo E de la AISC 360-10, en el cual tendremos que asumir una relación de esbeltez adecuada, con esto y con el procedimiento que se presenta en esta sección determinaremos el área y el radio de giro aproximado al requerido para la sección transversal de la columna.

3.5.5.1 Cargas para el pre-diseño

Las cargas que actúan axialmente en una columna son las siguientes:

- Carga axial en la columna debido al peso propio del tanque:

$$PP = W_{tanque}/(N * \cos\theta) \quad (61)$$

- Carga axial en la columna debido al peso del agua:

$$PA = W_{agua}/(N * \cos\theta) \quad (62)$$

- Carga axial en la columna debido a una carga muerta extra:

$$Di = CMi/(N * \cos\theta) \quad (63)$$

- Carga muerta en la columna:

$$D = PP + PA + Di \quad (64)$$

- Carga axial en la columna debido a la carga viva:

$$L = CV/(N * \cos\theta) \quad (65)$$

Donde:

W_{tanque} : Peso del tanque

W_{agua} : Peso del agua.

CMi : Carga muerta adicional

N : Número de columnas

θ : Ángulo de inclinación de la columna con respecto a la vertical.

Se determina la carga factorizada (Pu) con la segunda combinación de cargas propuestas por la ASCE 7-10.

$$Pu = 1.2D + 1.6L \quad (66)$$

La carga factorizada Pu debe incrementarse multiplicandola por un factor f con el objetivo de considerar la carga axial que recibe la columna debido al sismo, así tenemos una carga factorizada mayorada:

$$Pu_{mayorado} = f * Pu \quad (67)$$

Dicho factor se recomienda que puede considerarse alrededor de 1.5, es importante mayorar esta carga para obtener un valor de área de sección muy aproximada a la que se requiera para que soporte las cargas sísmicas o viento.

3.5.5.2 Relación de esbeltez

Para determinar el área y el radio de giro requerido es necesario asumir una relación de esbeltez adecuada y para ello nos podemos basar en lo que menciona McCormac y Csernak:

La relación de esbelte efectiva (KL/r) de una columna promedio de 10 a 15 pies (de 3 a 4,6 m) de longitud será aproximadamente de entre 40 y 60. Para una columna particular, se supone una KL/r en este intervalo aproximado y se sustituye en la ecuación apropiada de la columna para obtener el esfuerzo de diseño. (...) Para estimar la relación de esbeltez efectiva para una columna particular, el proyectista puede escoger un valor algo mayor que los límites 40 y 60 si la columna es mucho mayor de 10 a 15 pies (de 3 a 4,6 m) y viceversa. Una columna con una carga factorizada muy grande, digamos de 750 a 1000 Klb o más, requerirá un radio de giro grande y el proyectista escogerá entonces un menor valor de KL/r . (McCormac y CSERNAK, 2013, pp.166-164)

Con base al enunciado anterior el diseñador se puede dar una idea de que relación de esbeltez usar, dependiendo de la longitud de la columna y de la carga que vaya a soportar.

3.5.5.3 Área requerido

Para determinar el área requerida A_g de la sección transversal para la columna nos basamos en la sección E de la AISC 360-10, donde indica que la resistencia nominal (P_n) y la resistencia de diseño (ϕP_n) a compresión son:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (68)$$

$$\phi P_n = \phi F_{cr} A_g \quad (69)$$

De la ecuación 62 despejamos el área de la sección transversal (A_g) y reemplazamos la resistencia de diseño en compresión (ϕP_n) por la carga factorizada mayorada ($Pu_{mayorado}$) que actúa axialmente en la columna, entonces queda:

$$A_g = \frac{Pu_{mayorado}}{\phi F_{cr}} \quad (70)$$

Existen dos formas para determinar el esfuerzo crítico (ϕF_{cr}). La primera consiste en utilizar la tabla 4-22 del Manual de la AISC (American Institute of Steel Construction, 2015) en la cual ya nos proporciona los valores calculados de los esfuerzos críticos (ϕF_{cr}) para valores prácticos de relación de esbeltez (de 1 a 200) y para aceros con esfuerzos de fluencia de 35, 36, 42, 46 y 50 ksi. La segunda manera para determinar el esfuerzo crítico (ϕF_{cr}), es utilizando la sección E3 de la AISC 360-10, la cual proporciona ecuaciones para determinar el valor de F_{cr} para luego multiplicarlo por $\phi = 0,9$, dichas ecuaciones se replican en las ecuaciones 66 y 67 de la sección 3.5.6.1 del presente trabajo.

3.5.5.4 Radio de giro requerido

Para determinar el radio de giro requerido de la sección transversal de la columna se utiliza la siguiente ecuación:

$$r = \frac{KL}{\left(\frac{KL}{r}\right)_{Asumido}} \quad (71)$$

Donde:

r : Radio de giro requerido de la sección

K : Factor de longitud efectiva (tabla 31-3)

L : Longitud no arriostrada de la columna

$\left(\frac{KL}{r}\right)_{Asumido}$: Relación de esbeltez asumida

Con estas dos propiedades geométricas A_g y r se procede a seleccionar un perfil tubular para las columnas de la estructura de soporte, posteriormente a esto se procede a realizar el análisis

estructura y comprobar si esta sección es la adecuada para soportar las cargas que actuen sobre ella, en el caso que no cumplan se debe cambiar de secciones.

3.5.6 *Diseño de miembros a compresión (AISC 360, 2010)*

La capacidad a compresión del elemento es igual a la resistencia de diseño para compresión (ϕP_n) en el método LRFD, donde ϕ es igual a 0.9 y la resistencia nominal P_n para secciones sin elementos esbeltos se determinara de acuerdo al estado límite de pandeo por flexión, aplicando la sección E3 de la AISC360-10, mientras que para secciones con elementos esbeltos P_n será el menor valor obtenido de acuerdo a los estados límites de pandeo por flexión y pandeo local, aplicando la sección E7 de la AISC 360-10.

3.5.6.1 *Pandeo por flexión de miembros sin elementos esbeltos*

En esta sección se determina la resistencia de compresión nominal (P_n) para miembros con secciones compactas y no compactas. La resistencia (P_n) se determina de acuerdo al estado límite de pandeo por flexión de la siguiente manera:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (72)$$

Donde:

A_g : Área de la sección transversal del elemento

F_{cr} : Tensión de pandeo por flexión, se determina como sigue:

➤ Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (o $\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$)

$$F_{cr} = \left[0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (73)$$

➤ Cuando $\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (o $\frac{F_y}{F_e} > 2,25$)

$$F_{cr} = 0,877 F_e \quad (74)$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad del acero

F_y : Esfuerzo de fluencia del material

F_e = Tensión de pandeo elástico determinada con la siguiente expresión:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (75)$$

3.5.6.2 Miembros con elementos esbeltos

En esta sección se determinara la resistencia de compresión nominal (P_n) para miembros con elementos esbeltos. La resistencia (P_n) se determina de acuerdo al estado límite de pandeo por flexión torsional o flexo-torsional de la siguiente manera:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (76)$$

En donde F_{cr} se determina con las siguientes expresiones:

➤ Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ (o $\frac{QF_y}{F_e} \leq 2,25$)

$$F_{cr} = Q \left[0,658 \frac{QF_y}{F_e} \right] F_y \quad (77)$$

➤ Cuando $\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ (o $\frac{QF_y}{F_e} > 2,25$)

$$F_{cr} = 0,877 F_e \quad (78)$$

Donde:

F_e : Tensión crítica de pandeo elástico, calculado usando ecuación (68).

Q : Factor de reducción neto que toma en cuenta todos los elementos esbeltos en compresión.

Cuando se trata de miembros sin elementos esbeltos el factor de reducción (Q) será igual a 1.0, mientras que para miembros con secciones de elementos esbeltos este factor se determinara de la siguiente manera:

$$Q = Q_s Q_a \quad (79)$$

Para el caso de secciones conformadas solamente por elementos esbeltos atiesado, como es el caso de las tuberías, $Q_s = 1$, por lo que:

$$Q = Q_a \quad (80)$$

El factor Q_a para tubos circulares cargados axialmente, cuando $0,11 \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} < 0,45 \frac{E}{F_y}$, se determina de la siguiente manera:

$$Q_a = \frac{0,038E}{F_y \left(\frac{D}{t}\right)} + \frac{2}{3} \quad (81)$$

Donde:

D: Diámetro exterior, cm

t : Espesor de pared, cm

3.5.7 *Miembros a tracción*

Si se le somete a tensión a un elemento de acero estructural que no contenga agujeros, este elemento puede resistir, sin fracturarse, una carga que supere el valor del producto entre el área de su sección transversal por el esfuerzo de fluencia del material, esto posible debido al endurecimiento por deformación del elemento, esto no es muy útil debido a que si le carga hasta el endurecimiento el elemento se deformará considerablemente, algo que no es útil en las estructuras. Ahora si tenemos un elemento de acero estructural que contiene agujeros para sus conexiones atornillas, este puede fallar en la sección neta que pasa por los agujeros con una carga más pequeña que la requerida para plastificar la sección bruta sin considerar los agujeros (McCORMAC Y CSERNAK, 2013, p.65).

3.5.7.1 *Límites de esbeltez*

La American Institute Of Steel Construction (AISC 360, 2010) menciona que no existe un límite de esbeltez para elementos a tracción, pero sugiere que para elementos, que no sean barras o colganderos, preferiblemente no sea mayor a 300.

3.5.7.2 Área bruta (A_g)

Se considera como área bruta al área total, sin reducciones, de la sección transversal del miembro a tracción.

3.5.7.3 Área neta (A_n)

Se considera como área neta al área total de la sección transversal menos el material que necesita ser retirada (agujeros, ranuras o muescas) para realizar sus conexiones. En el caso de los perfiles tubulares que se encuentran soldadas a una placa gusset, el área neta será la sección transversal del elemento menos el producto del espesor por el ancho total del material que es retirado para realizar la ranura para la conexión de la tubería con la placa.

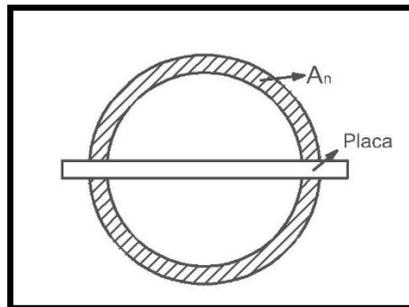


Figura 12-3. Sección transversal de la conexión de un perfil tubular

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

$$A_n = A_g - 2t_{placa}t \quad (82)$$

Donde:

t_{placa} : Espesor de la placa

t : Espesor de perfil tubular

3.5.7.4 Área neta efectiva (A_e)

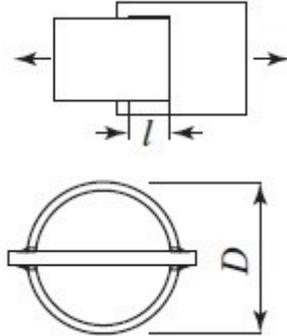
El área neta efectiva es el área neta modificada para considerar el efecto de corte diferido y la AISC 360-10 en su sección D3 nos dice que el área neta efectiva de un miembro es igual al producto del factor de corte diferido o factor de reducción, U , por el área neta A_n de la sección

transversal. Explicado de forma más sencilla este factor de reducción toma en cuenta la distribución no uniforme del esfuerzo en las conexiones del miembro.

$$A_e = UA_n \quad (83)$$

La AISCE 360-10 indica que cuando la fuerza de tracción se transmite a una placa por medio de soldaduras colocadas a lo largo de sus dos bordes longitudinales, en el extremo de la placa, se utilizan los valores de U dados en el caso 5 de la tabla D3.1 de dicha Norma, la cual se replica en este trabajo en la tabla 33-3.

Tabla 33-3. Factor de corte diferido para conexiones de miembros en tracción

Factor de corte diferido para conexiones de miembros en tracción			
Caso	Descripción del elemento	Factor de corte diferido, U	Ejemplo
5	Tubos redondos con solo una placa gusset concéntrica	$l \geq 1,3D \rightarrow U = 1,0$ $D \leq l < 1,3D \rightarrow U = 1 - \frac{x}{l}$ $x = \frac{D}{\pi}$	

Fuente: (American Institute of Steel Construction, 2010)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.5.8 Diseño de miembros a tracción (AISC 360, 2010)

La AISC 360-10 en su sección D2 estipula que la resistencia de diseño de un elemento a tracción será el menor valor calculado de acuerdo al estado límite de fluencia en tracción determinado en la sección bruta del elemento y en el estado límite de ruptura a tracción determinado en la sección neta del elemento.

3.5.8.1 Estado límite de fluencia en tracción

La resistencia de diseño (ϕP_n) para el estado límite de fluencia en tracción en la sección bruta se determinara con la siguiente expresión:

$$\phi P_n = \phi F_y A_g \quad (84)$$

Donde:

F_y = Esfuerzo de fluencia

A_g = Área bruta del elemento

ϕ : 0,9 (LRFD)

3.5.8.2 Estado límite de ruptura a tracción

La resistencia de diseño (ϕP_n) para el estado límite de ruptura a tracción en la sección neta se determinara con la siguiente expresión:

$$\phi P_n = \phi F_u A_e \quad (85)$$

Donde:

A_e = Área neta efectiva

F_u = Resistencia ultima

ϕ : 0,75 (LRFD)

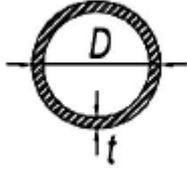
Nótese que el factor ϕ en el segundo caso es de 0,75 esto es debido a que existen graves consecuencias de este tipo de falla.

3.5.9 Elementos a flexión

3.5.9.1 Clasificación de las secciones a flexión

A las secciones se les clasifica de acuerdo al pandeo local como compactas, no compactas y esbeltas. Se considera como compacto cuando la relación ancho/espesor de sus elementos comprimidos no son mayor a λ_p dado en la tabla B4.1b de la AISC 360-10. Se considera como no compacto si la relación ancho/espesor de uno de sus elementos comprimidos es mayor a λ_p pero no mayor que λ_r y se considera como esbelta cuando su relación ancho/espesor de cualquier elemento comprimido es mayor a λ_r . El caso 20 de la tabla B4.1b de la AISC 360-10 se replica en este documento en la tabla 34-3, el cual corresponde para tubos redondos.

Tabla 34-3 Razones ancho-espesor: Elementos de compresión de miembros a flexión

Razones ancho-espesor: Elementos de compresión de miembros a flexión						
	Caso	Descripción del elemento	Razón Ancho-Espesor	Razones Ancho-Espesor Límite		Ejemplo
				λ_p (compacta - no compacta)	λ_r (esbelto - no esbelto)	
Elem. Atiesado	20	Tubos redondos	D/t	$0,07 \frac{E}{F_y}$	$0,31 \frac{E}{F_y}$	

Fuente: (American Institute of Steel Construction, 2010)

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.5.10 *Diseño de elementos a flexión (AISC 360, 2010)*

Según la AISC 360-10 en su capítulo F la resistencia de flexión nominal (M_n) para perfiles tubulares redondos será el menor valor calculado de acuerdo al estado límite de fluencia y al estado límite de pandeo local. Mientras que la resistencia de diseño en flexión será ϕM_n , donde ϕ es igual a 0,9 (LRFD).

3.5.10.1 *Estado límite de fluencia*

La resistencia de flexión nominal (M_n) de acuerdo al estado límite de fluencia es:

$$M_n = M_p = F_y Z \quad (86)$$

Donde:

F_y : Esfuerzo de fluencia

Z : Módulo plástico de la sección en torno al eje de flexión

3.5.10.2 Estado límite de pandeo local

El estado límite de pandeo local solo se aplica a secciones no compactas y secciones esbeltas:

- La resistencia de flexión nominal (M_n) de acuerdo al estado límite de pandeo local para secciones no compactas es:

$$M_n = \left(\frac{0,021E}{\frac{D}{t}} + F_y \right) S \quad (87)$$

Donde:

D : Diámetro exterior de la sección

t : Espesor de la pared

F_y : Esfuerzo de fluencia

S : Módulo de sección elástico

- La resistencia de flexión nominal (M_n) de acuerdo al estado límite de pandeo local para secciones esbeltas es:

$$M_n = F_{cr} S \quad (88)$$

Donde:

D : Diámetro exterior de la sección

t : Espesor de la pared

S : Módulo de sección elástico

F_{cr} : Se determina con la siguiente expresión:

$$F_{cr} = \frac{0,33E}{\frac{D}{t}} \quad (89)$$

3.5.11 Miembros solicitados a flexión y compresión (AISC 360, 2010)

La AISC 360-10 propone que los miembros solicitados a una combinación de flexión y compresión deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

Cuando $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (90)$$

Cuando $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (91)$$

Donde:

P_r : Es la resistencia de compresión requerida.

P_c : Es la resistencia de diseño a compresión.

M_r : Es la resistencia de flexión requerida.

M_c : Es la resistencia de flexión de diseño.

x : Indica flexión en torno al eje fuerte.

y : Indica flexión en torno al eje débil.

3.5.12 Placa base (AISC 360, 2010)

Las cargas de una estructura se transmiten a través de las columnas a unas zapatas aisladas o cimientos y por medio de estas zapatas se transmiten las cargas hacia el terreno. Para transmitir las cargas de la columna a la zapata es necesario el uso de una placa de base de acero para que las cargas se distribuyan en un área suficientemente grande del cimiento para evitar una sobrecarga en la zapata. Estas placas pueden ir soldadas directamente a la columna o unirse por medio de un ángulo remachado o soldado (McCORMAC y CSERNAK, 2013, p.218).

En la figura 13-3 se puede observar que la carga P_u se trasmite uniformemente de la columna a la cimentación por medio de la placa base de acero con una presión igual a P_u/A , siendo A el área de placa base, como resultado a esta carga la cimentación reaccionara con un presión igual, esto tiende a flexionar las partes de la placa base que quedan fuera de la columna.

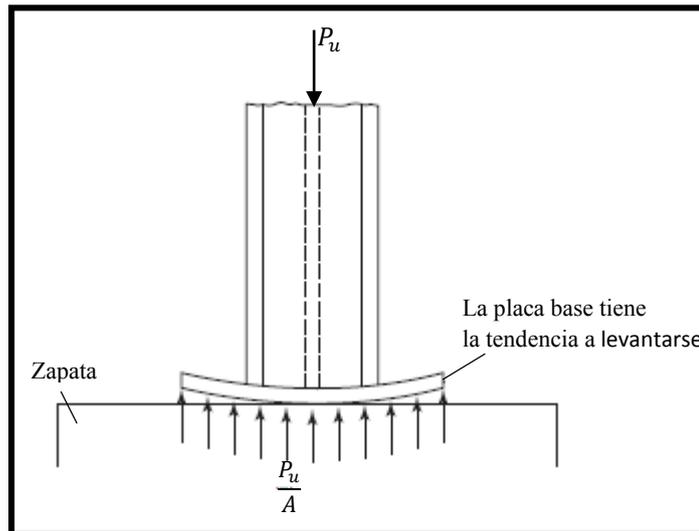


Figura 13-3. Carga en una placa base

Fuente: (MCCORMAC y CSERNAK, 2013, p.221)

Según la AISC 360 (2010) la resistencia de diseño ($\phi_c P_p$) se puede toma para el estado límite de aplastamiento del concreto, con $\phi_c = 0,65$ y donde la resistencia de aplastamiento nominal P_p se determina de acuerdo a dos condiciones:

- a) En el área total de apoyo del concreto

$$P_p = 0,85f'_c A_1 \quad (92)$$

- b) En una área menor a la total del apoyo de concreto

$$P_p = 0,85f'_c A_1 \sqrt{A_1/A_2} \leq 1,7f'_c A_1 \quad (93)$$

Donde:

A_1 : Área de apoyo concéntrico de acero en un soporte de concreto (área de la placa base)

A_2 : Máxima área de la porción de la superficie de apoyo que es geoméricamente similar y concéntrica con el área de carga.

f'_c : Resistencia a compresión especificada del concreto

La primera ecuación se utiliza para determinar la resistencia nominal de contacto del concreto cuando la placa base cubra toda el área del concreto, por lo tanto se puede decir que en dicha ecuación la expresión $\sqrt{A_1/A_2}$ es igual a 1 por lo que no se considera, mientras que en la segunda

ecuación el área del concreto es mayor al área de la placa por lo que de la el valor de $\sqrt{A_1/A_2}$ es mayor a la unidad lo que incrementa la resistencia nominal de contacto del concreto pero este valor está limitado a un valor máximo de 2 (McCORMAC y CSERNAK, 2013, P.218).

3.5.12.1 Área de la placa de acero

La resistencia de diseño de aplastamiento ($\phi_c P_p$) del concreto debe ser como mínimo igual a la carga que va a soportar (P_u), por lo que para determinar el área mínima requerida de la placa estos valores se remplazan, por lo tanto:

$$P_u = \phi_c P_p = \phi(0,85 f'_c A_1) \quad (94)$$

$$A_{1 \min} = \frac{P_u}{\phi_c(0,85 f'_c)} \quad (95)$$

Una vez calculada el área de la placa se procede a determinar las dimensiones de la placa, normalmente se utilizan placas base cuadradas. El valor mínimo del lado de la placa cuadrada (L_{\min}) se determina de la siguiente manera:

$$L_{\min} = \sqrt{A_{1 \min}} \quad (96)$$

En función a este valor se determina las dimensiones a utilizar de la placa (N y B), como se muestra en la figura 14-3, y se comprueba que:

$$A_1 = NB \geq A_{1 \min} \quad (97)$$

De acuerdo al Manual de la AISC las dimensiones de las placas base (N y B) generalmente se seleccionan en múltiplos de pares de pulgadas, mientras que los espesores hasta 1,25 pulgadas se seleccionen en múltiplos de 1/8 y para espesores mayores a 1,25 se seleccionan en múltiplos de 1/4.

3.5.12.2 Área de la zapata

Primero se propone las dimensiones iniciales para la zapata (N_z y B_z) y se comprueba que:

$$\phi P_p = \phi 0,85 f'_c A_1 \sqrt{A_1/A_2} \leq 1,7 f'_c A_1 \quad (98)$$

Y

$$\phi P_p > P_u \quad (99)$$

Donde:

$$A_2 = N_z B_z \quad (100)$$

Si con las dimensiones propuestas se cumplen las condiciones expuestas anteriormente entonces se concluye que las dimensiones son adecuadas.

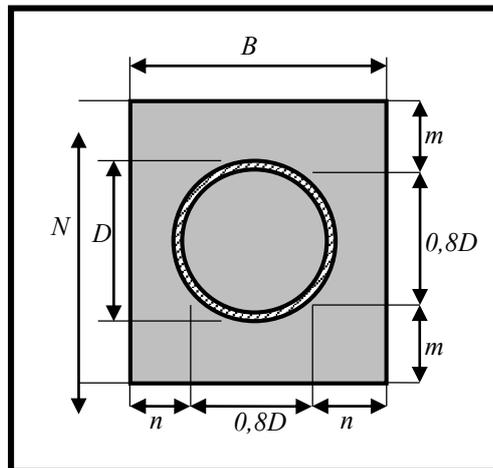


Figura 14-3. Dimensiones de la placa base

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3.5.12.3 Espesor de la placa

Para determinar el espesor mínimo (t_{min}) de la placa, el Manual de la AISC propone la siguiente ecuación:

$$t_{min} = \ell \sqrt{\frac{2P_u}{\phi_b F_y B N}} \quad (101)$$

Donde:

$$\phi_b = 0,9$$

F_y : Esfuerzo de fluencia de la placa base de acero

ℓ : es el mayor valor entre m, n o $\lambda n'$, los cuales se calculan de la siguiente manera:

$$m = \frac{N - 0,8D}{2} \quad (102)$$

$$n = \frac{B - 0,8D}{2} \quad (103)$$

$$\lambda n' = \frac{\lambda \sqrt{NB}}{4} \quad (104)$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{X}}{1 + \sqrt{1 - X}} \leq 1 \quad (105)$$

$$X = \left[\frac{4NB}{(N + B)^2} \right] \frac{P_u}{\phi_c P_p} \quad (106)$$

Con las ecuaciones proporcionadas anteriormente se determina el espesor mínimo de la placa y se procede a seleccionar la placa a usar.

3.6 Determinación de las cargas en los elementos estructurales de los tanques elevados mediante el software sap2000.

Para poder determinar las cargas en los elementos estructurales los tanques elevados se modelaron en el software SAP 2000 de la siguiente manera:

Nota: Como ejemplo se modela un tanque de 50.000 galones, 7 m de diámetro, con una altura de la estructura de soporte de 10 m y con un anillo de arriostres horizontales.

1. Se crea un nuevo modelo y se selecciona en *Grid Only* y en *Number of Gird Line* se coloca los siguientes valores para la dirección x, y & z .

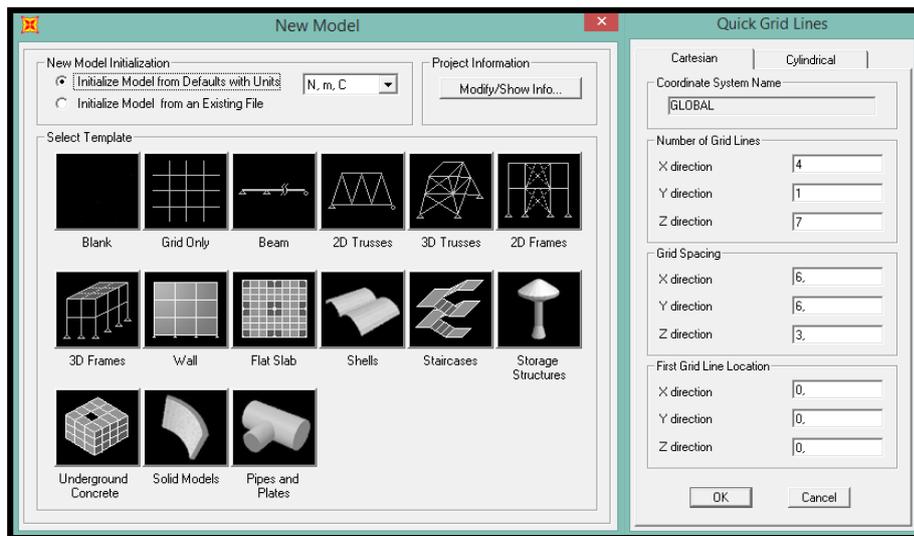


Figura 15-3. Creación de la *Grid Only*

Fuente: SAP2000

2. Se da doble click en la cuadrícula y se abre la ventana *Define Grid System Data*.

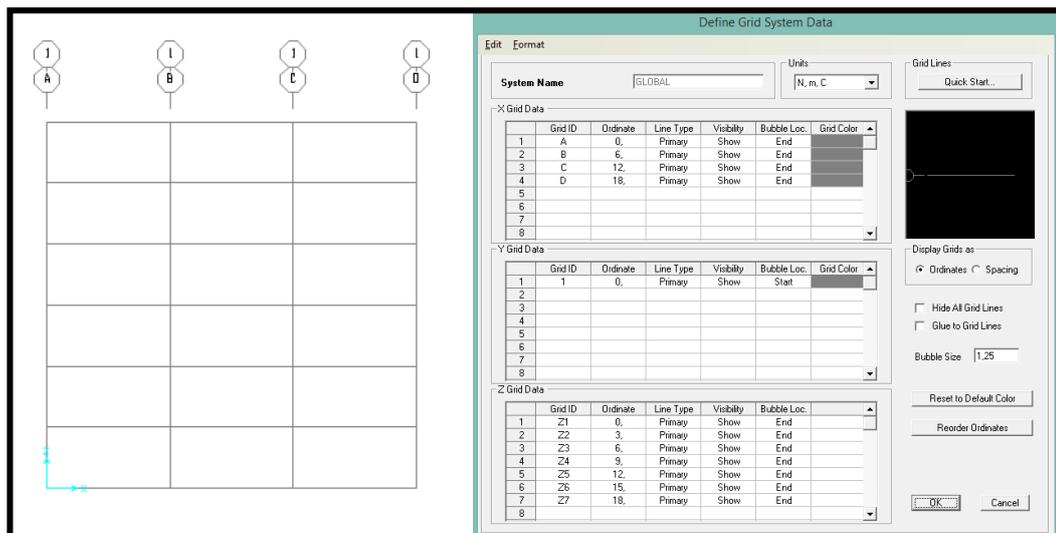


Figura 16-3. Edición de los valores de la cuadrícula.

Fuente: SAP2000

3. Se dibuja el perfil del tanque elevado en un software de dibujo para determinar las dimensiones correspondientes a la cuadrícula de sap2000 y se copias los valores en la ventana *Define Grid System Data*.

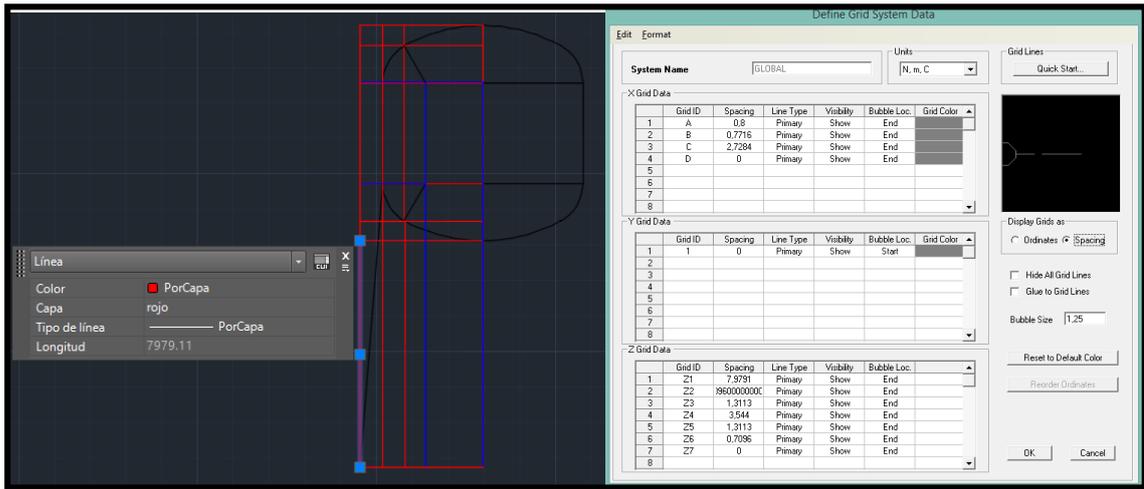


Figura 17-3. Perfil del tanque elevado elaborado en AutoCAD.

Fuente: SAP2000 y AutoCAD

- Se dibuja el perfil del tanque en la cuadrícula.

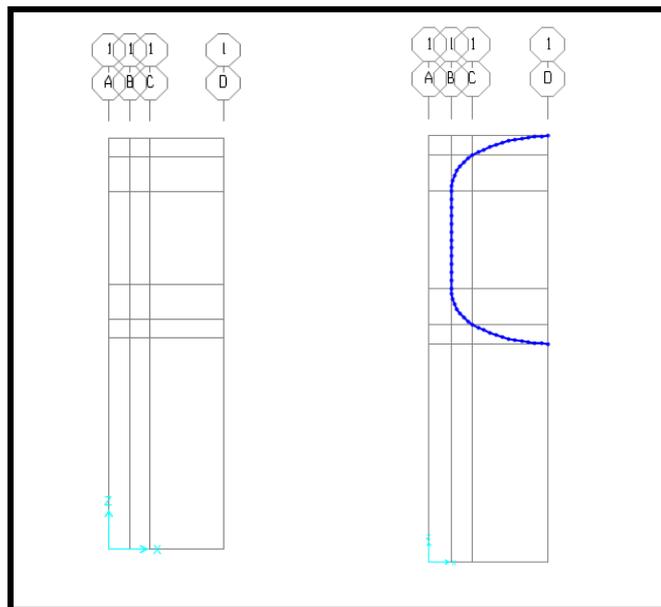


Figura 18-3. Perfil del tanque.

Fuente: SAP2000

- Se define los materiales: Acero A36 para las placas del tanque y A106 para los elementos estructurales.

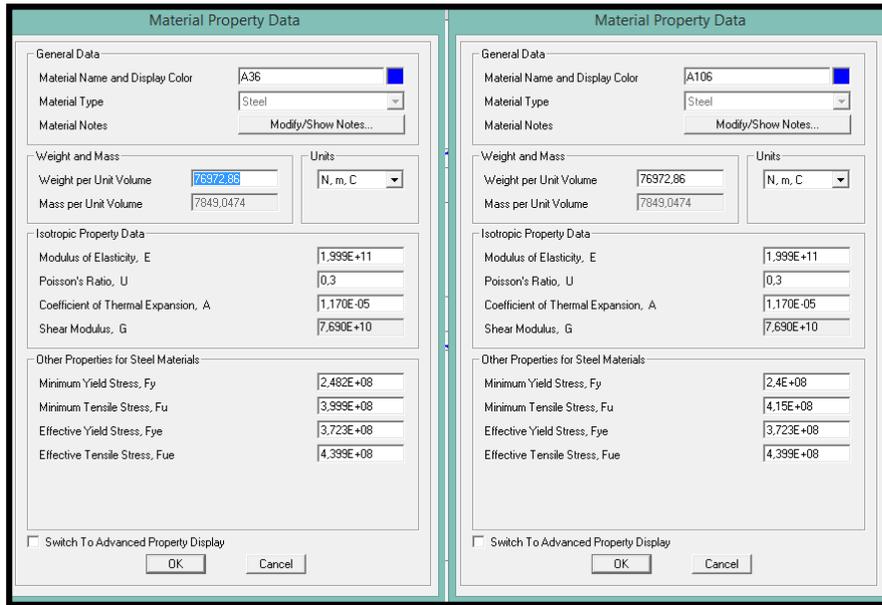


Figura 19-3. Materiales para el diseño

Fuente: SAP2000

6. Se define las *Área Section* para las paredes del tanque de acero

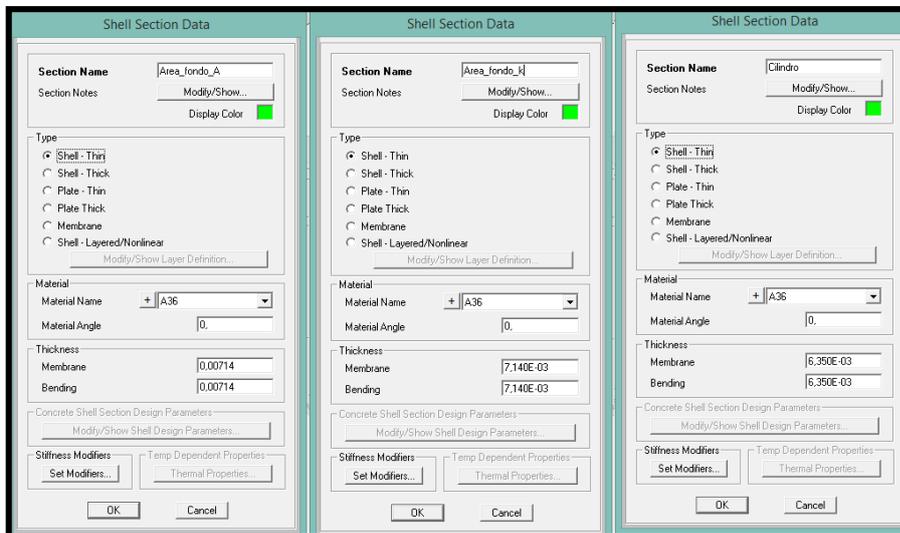


Figura 20-3. Espesores para las paredes del tanque.

Fuente: SAP2000

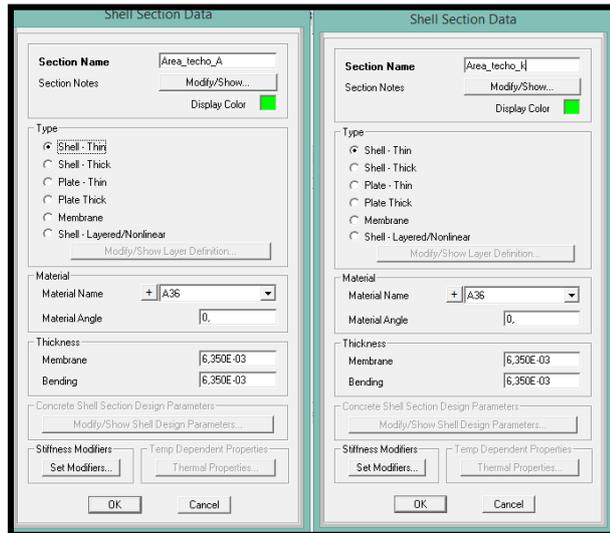


Figura 21-3 (Continúa). Espesores para las paredes del tanque.

Fuente: SAP2000

7. Se extruye el perfil del tanque con los espesores correspondientes

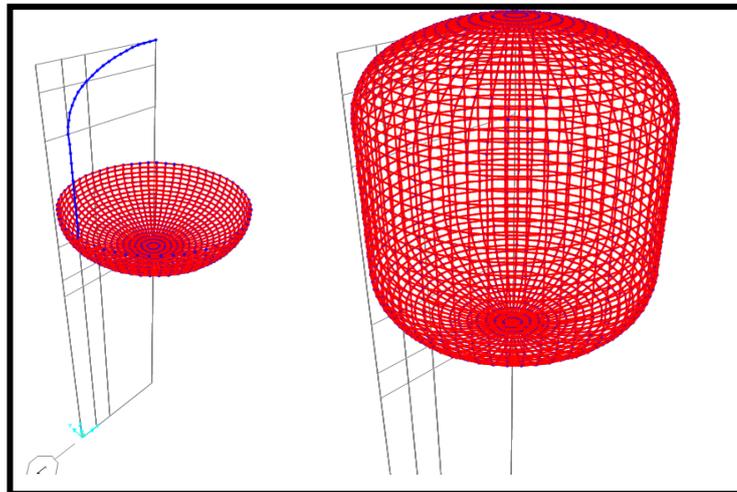


Figura 22-3. Extrucción de las paredes del tanque

Fuente: SAP2000

8. Se define las secciones para los elementos estructurales

- Columna: NPS 12 XS

- Arriostres horizontales: NPS 6 SCH 10
- Arriostres diagonales: NPS 5 STD

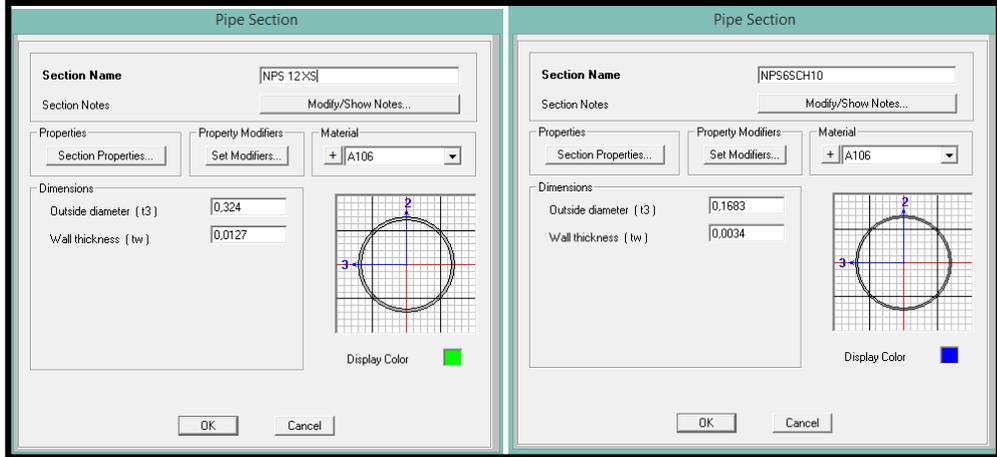


Figura 23-3. Dimensiones de los perfiles tubulares

Fuente: SAP2000

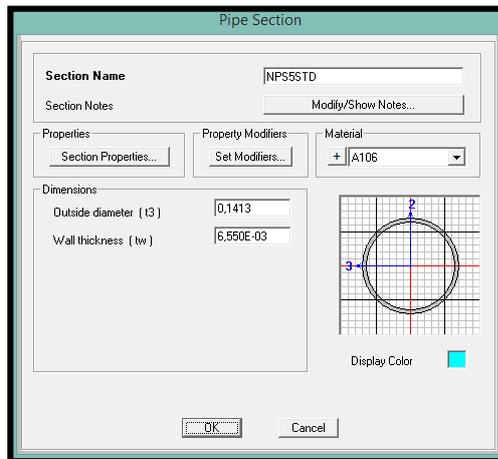


Figura 24-3 (Continuacion). Dimensiones de los perfiles tubulares

Fuente: SAP2000

9. Se dibuja la estructura de soporte con las secciones correspondientes

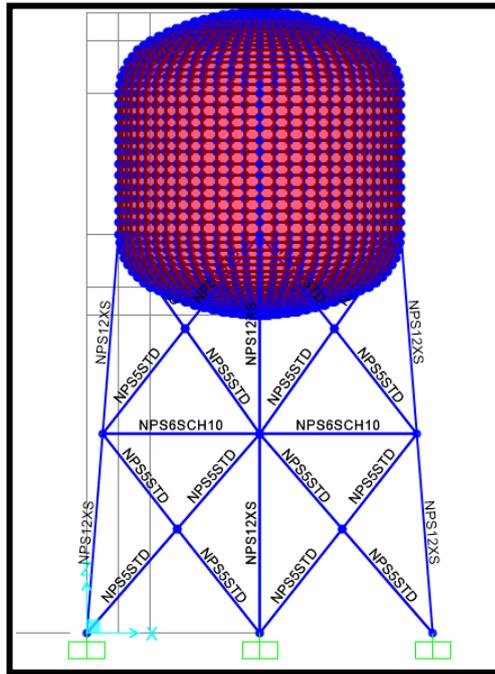


Figura 25-3. Tanque con la estructura de soporte.

Fuente: SAP2000

10. Aplicamos los *Joint Restraints* de empotramiento en los nodos de la base de las columnas

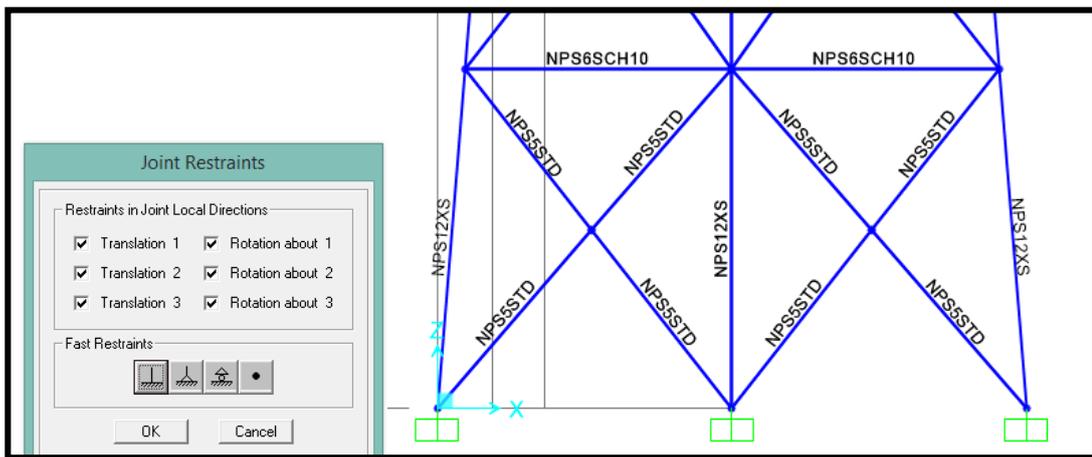


Figura 26-3. Aplicación del empotramiento en la base de las columnas.

Fuente: SAP2000

11. Se libera a momento y torsión los extremos de los elementos que forman los arriostres diagonales.

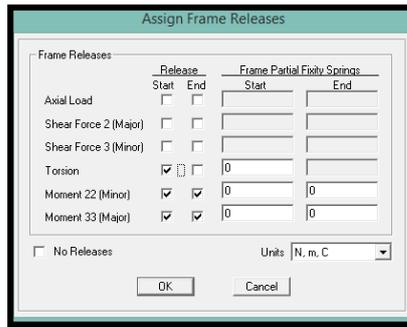


Figura 27-3. Ventana: *Assig Frame Releases*

Fuente: SAP2000

12. Definimos un *Área Section* para el balcón, dibujamos el perfil del balcón y lo extruimos

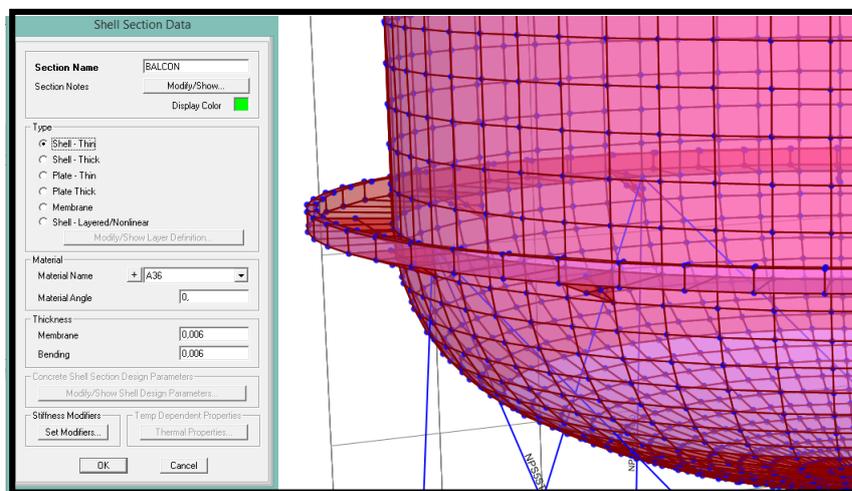


Figura 28-3. Balcón del tanque elevado en el software

Fuente: SAP2000

13. Invertimos los ejes locales de las áreas del tanque que se encuentran en sentido contrario.

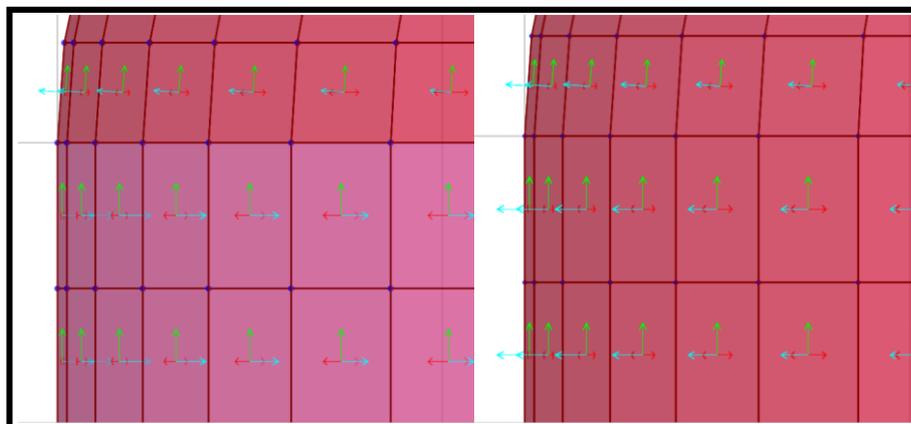


Figura 29-3. Ejes locales de los elementos áreas.

Fuente: SAP2000

14. Se define el nombre para un patrón de nodos que se utilizará para la presión de agua

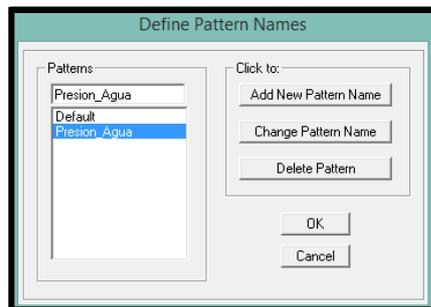


Figura 30-3. Nombre del patrón de nodos.

Fuente: SAP2000

15. Se calcula las constantes que definen el patrón de nodos y se ingresa el patrón en los nodos del tanque que van en contacto con el agua.

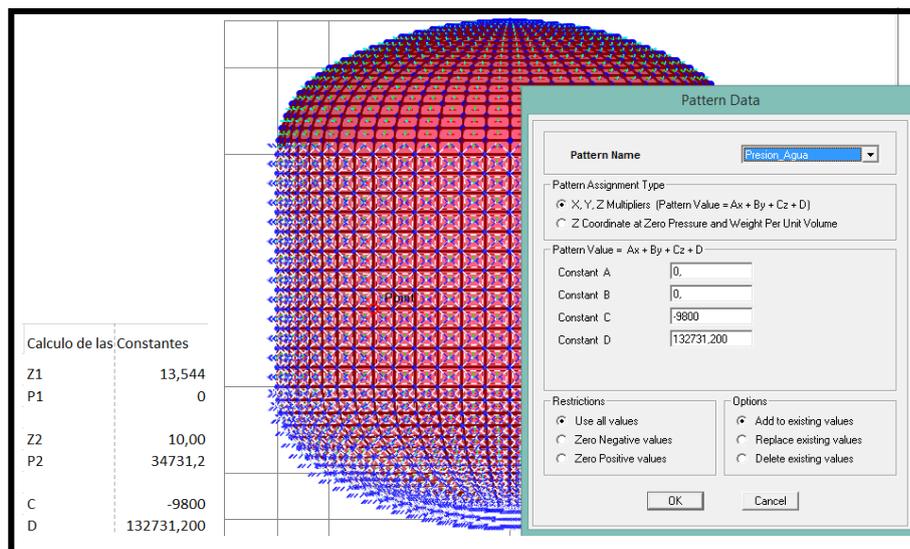


Figura 31-3. Ingreso del patrón de nodos en el tanque.

Fuente: SAP2000

16. Definimos un *Load Pattern* y lo nombramos como PRESION_AGUA y el tipo de carga denominado *OTHER*.

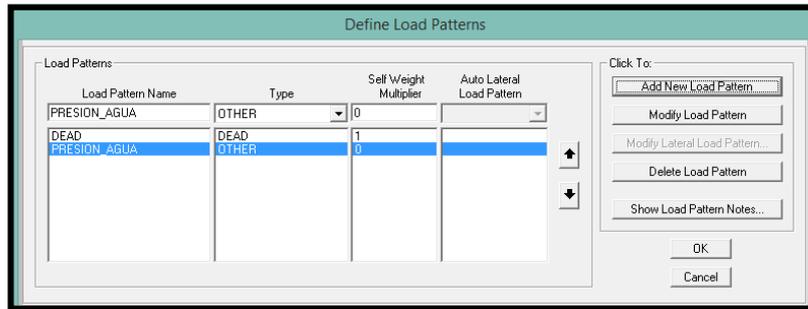


Figura 32-3. Ingreso de un *Load Patterns*: PRESION_AGUA

Fuente: SAP2000

17. Aplicamos la carga por presión de agua en las paredes del tanque con el patrón de nodos definido anteriormente.

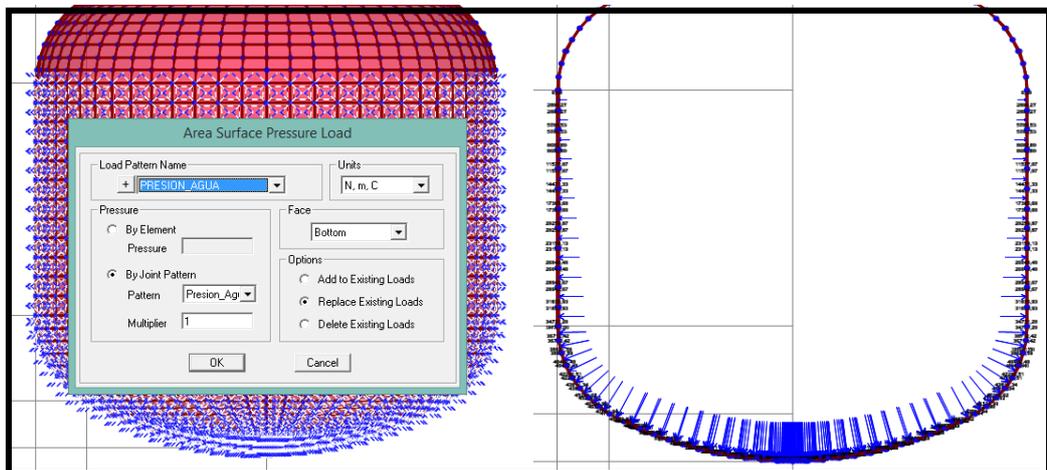


Figura 33-3. Aplicación de la carga por presión de agua.

Fuente: SAP2000

18. Definimos un nuevo *Load Pattern*, lo nombramos CV y será del tipo LIVE.

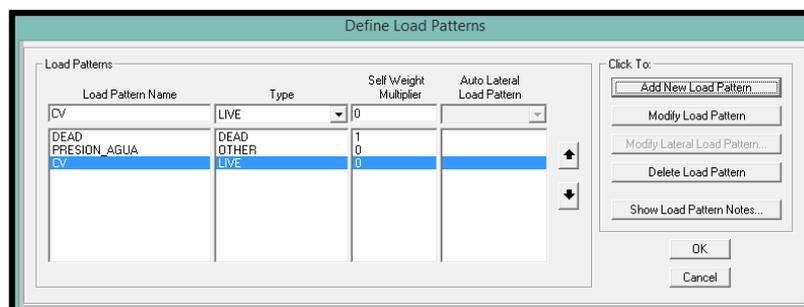


Figura 34-3. Ingreso de un *Load Patterns*: Carga Viva, CV

Fuente: SAP2000

19. Aplicamos la carga viva, CV, de 720 Pa en el techo del tanque

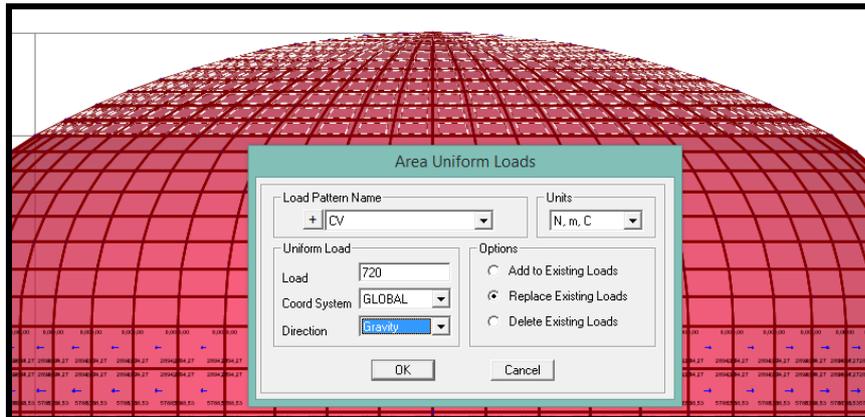


Figura 35-3. Aplicación de la carga viva

Fuente: SAP2000

20. Se define la carga por viento, VIENTO, del tipo WIND y se ingresa los factores de acuerdo a la ASCE 7-10

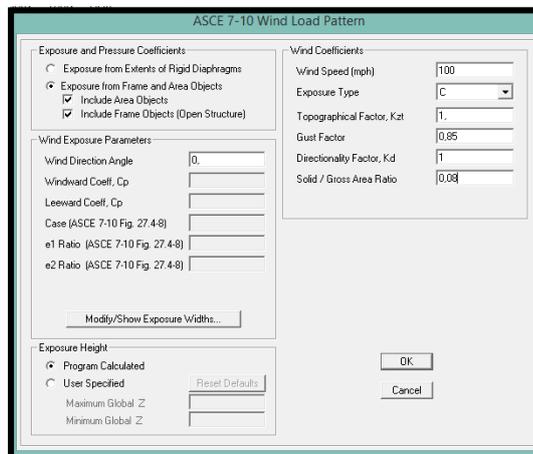


Figura 36-3. Aplicación de carga por viento

Fuente: SAP2000

21. Se asigna la presión de viento en el tanque ingresando el coeficiente de fuerza para la parte del casquete de techo y fondo y para la parte cilíndrica, en la dirección x.

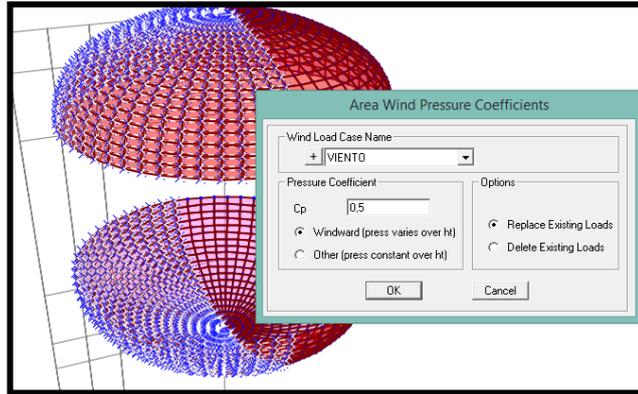


Figura 37-3. Presión de viento, casquetes.

Fuente: SAP2000

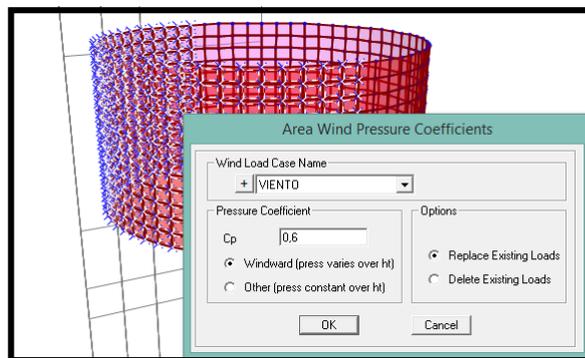


Figura 38-3. Presión de viento, cilindro

Fuente: SAP2000

22. Se define la carga por sismo en la dirección x llamada SISMOX del tipo QUAKE y se ingresa el coeficiente de cortante basal

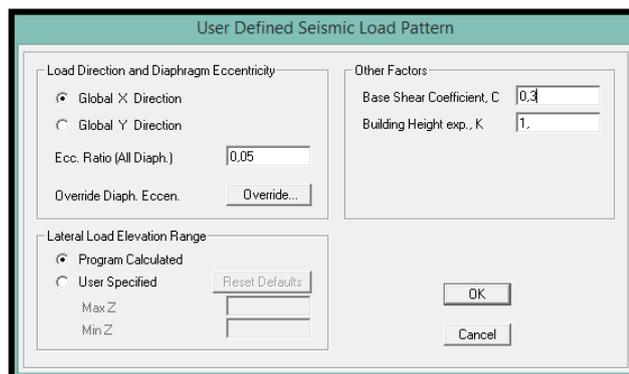


Figura 39-3. Coeficiente de cortante basal

Fuente: SAP2000

23. Se calcula la masa de agua para cada nodo de los elementos área del tanque y se aplica en cada nodo.

jointa	masa	masa/60
1	11363,36214	189,38937
2	22726,72428	378,77874
3	22726,72428	378,77874
4	22726,72428	378,77874
5	22726,72428	378,77874
6	22726,72428	378,77874
7	52286,97132	871,44952
8	11986,67187	199,77786

Figura 40-3. Ingreso de *Joint Masses*.

Fuente: SAP2000

Figura 41-3 (Continúa). Ingreso de *Joint Masses*.

Fuente: SAP2000

Figura 42-3 (Continúa). Ingreso de *Joint Masses*.

Fuente: SAP2000

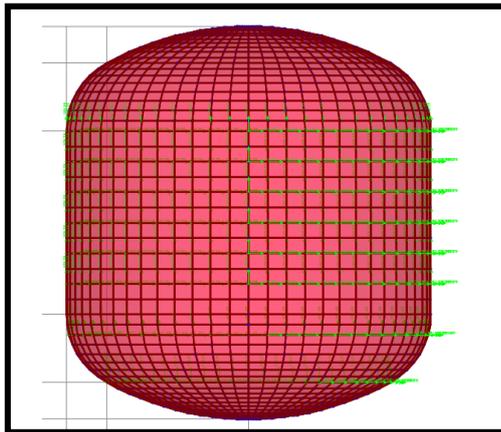


Figura 43-3. Masa en los nodos del tanque.

Fuente: SAP2000

24. Se verifica que la masa provenga de los elementos y masas adicionales (*From Element and Additional masses*).

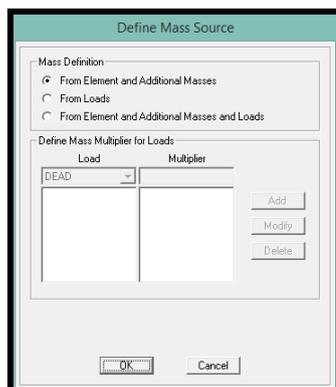


Figura 44-3. Ventana: *Define Mass Source*.

Fuente: SAP2000

25. Se define las combinaciones de carga de acuerdo al método LRFD

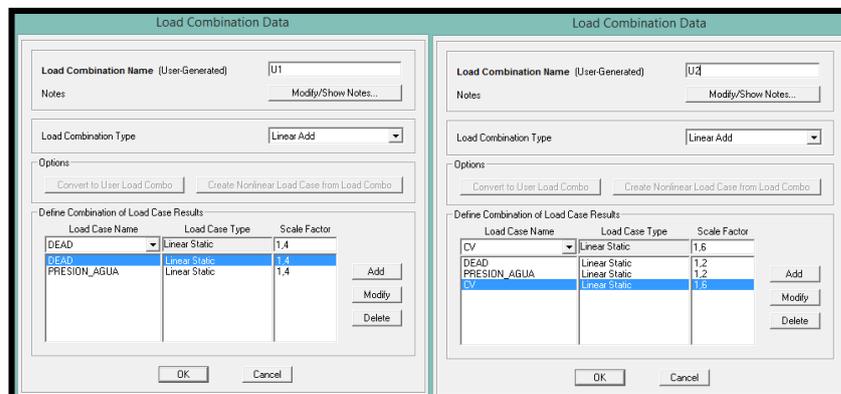


Figura 45-3. Ingreso de las combinaciones de diseño

Fuente: SAP2000

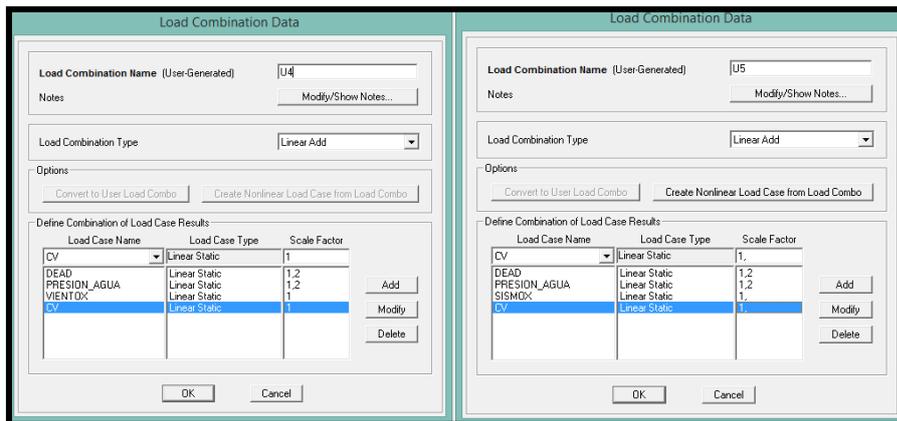


Figura 46-3 (Continúa). Ingreso de las combinaciones de diseño.

Fuente: SAP2000

26. Se define el tipo de análisis en *Space Truss*

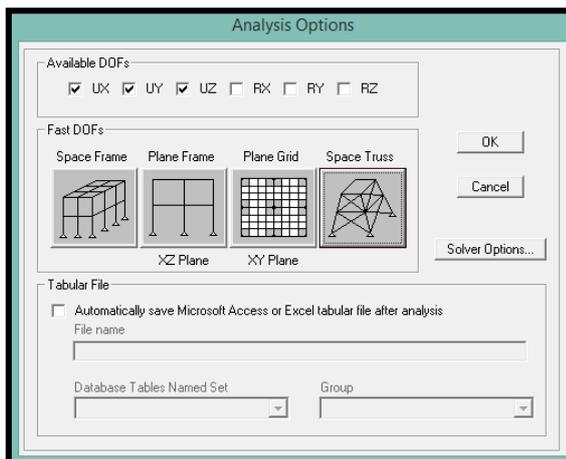


Figura 47-3. Ventana: *Analysis Options*

Fuente: SAP2000

27. Se verifica las preferencias de diseño, se define el código de diseño, AISC360-05/IBC2006, el tipo de sistema estructural, OCBF (Ordinary Concentrically Braced Frames) y el método de diseño, LRFD.

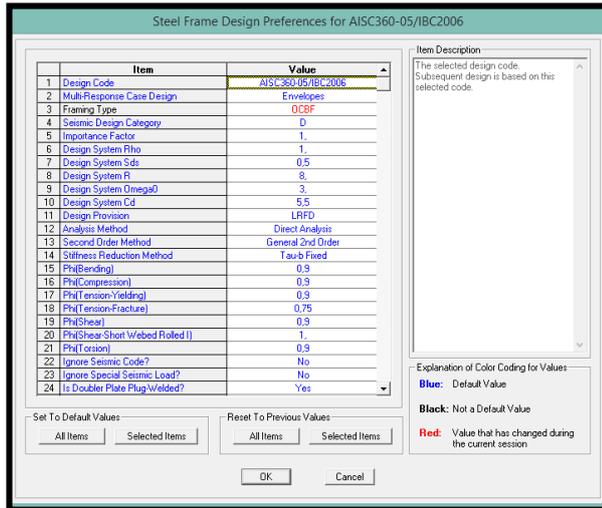


Figura 48-3. Ventana: *Steel Frame Design Preferences*

Fuente: SAP2000

28. Se seleccionan las combinaciones de carga para el diseño

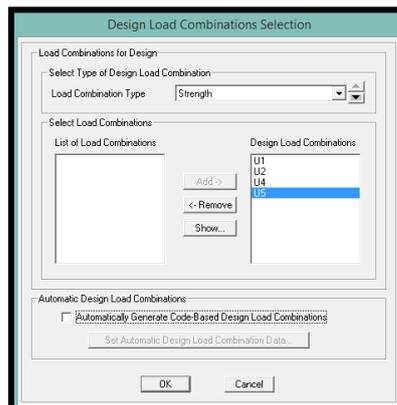


Figura 49-3. Combinaciones de carga

Fuente: SAP2000

29. Se corre el análisis estructural

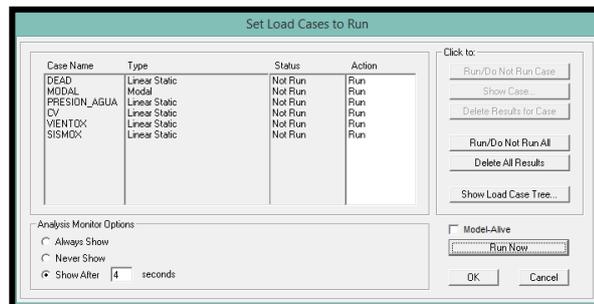


Figura 50-3. Ventana: Set Load Cases o Run

Fuente: SAP2000

30. Se verifica el diseño estructural

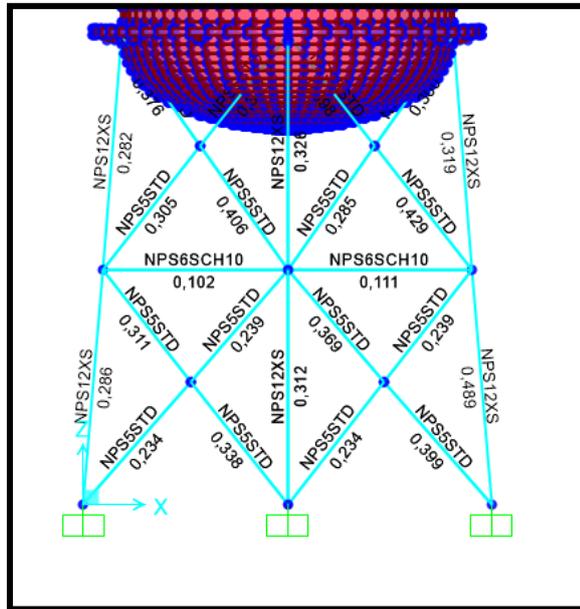


Figura 51-3. Verificación del diseño estructural

Fuente: SAP2000

31. Se verifica la demanda de la columna más crítica, bajo la combinación de carga $U5 = 1,2D+E$.

Steel Stress Check Data AISC360-05/IBC2006						
File						
HSS Welding: LRW Reduce HSS Thickness? No						
Units: N, m, C						
STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo U5)						
(ASCE 12.4.3.2(5): $(1.2+0.2*Sds)*D + 1.0*L + Omega*Qe$)						
Location	Pu	Mu33	Mu22	Uu2	Uu3	Tu
0,000	-970079,158	27440,142	0,000	0,000	0,000	0,000
PHM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)						
D/C Ratio: $0,519 = 0,519 + 0,000 + 0,000$						
$= (Pr/Pc) + (8/9)(Mr33/Mc33) + (8/9)(Mr22/Mc22)$						
AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)						
Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cn
Major Bending	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,206
Minor Bending	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
LTB	Lltb	Kltb	Cb			
	1,000	2,219	2,276			
	Pu	phi*Pnc	phi*Pnt			
	Force	Capacity	Capacity			
Axial	-1252810,80	2414049,937	2682788,682			
	Mu	phi*Mn	phi*Mn			
	Moment	Capacity	No LTB			
Major Moment	0,000	265984,659	265984,659			
Minor Moment	0,000	265984,659				
	Tu	Tn	phi*Tn			
	Moment	Capacity	Capacity			
Torsion	0,000	278384,839	250545,635			
SHEAR CHECK						
	Uu	phi*Un	Stress	Status		
	Force	Capacity	Ratio	Check		
Major Shear	10788,137	804836,605	0,013	OK		
Minor Shear	0,000	804836,605	0,000	OK		

Figura 52-3. Esfuerzos en la columna

Fuente: SAP2000

32. Se verifica la demanda del arrostre diagonal 1 más crítico, bajo la combinación de carga U5 = 1,2D+E.

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo U5)							
Location	Pu	Mu33	Mu22	Uu2	Uu3	Tu	
1,909	-182920,929	337,504	0,000	0,000	0,000	0,000	
PHM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)							
D/C Ratio: 0,435 = 0,423 + 0,012 + 0,000							
= (Pr/Pc) + (8/9)(Mr33/Mc33) + (8/9)(Mr22/Mc22)							
AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)							
Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cn	
Major Bending	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Minor Bending	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
LTB							
	L1tb	K1tb	Cb				
	1,000	1,000	1,316				
Axial							
	Pu	phi*Pnc	phi*Pnt				
	-182920,929	432299,937	598926,732				
Major Moment							
	Mu	phi*Mn	phi*Mn				
	337,504	25709,552	25709,552				
Minor Moment							
	0,000	25709,552					
Torsion							
	Tu	Tn	phi*Tn				
	0,000	26901,792	24211,613				
SHEAR CHECK							
	Uu	phi*Un	Stress	Status			
	Force	Capacity	Ratio	Check			
Major Shear	0,000	179678,020	0,000	OK			
Minor Shear	0,000	179678,020	0,000	OK			

Figura 53-3. Esfuerzos en el arrostre diagonal 1

Fuente: SAP2000

1. Se verifica la demanda del arrostre diagonal 2 más crítico, bajo la combinación de carga U5 = 1,2D+E.

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo U5)							
Location	Pu	Mu33	Mu22	Uu2	Uu3	Tu	
2,009	-163247,618	391,554	0,000	0,000	0,000	0,000	
PHM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)							
D/C Ratio: 0,405 = 0,391 + 0,014 + 0,000							
= (Pr/Pc) + (8/9)(Mr33/Mc33) + (8/9)(Mr22/Mc22)							
AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)							
Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cn	
Major Bending	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Minor Bending	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
LTB							
	L1tb	K1tb	Cb				
	1,000	1,000	1,316				
Axial							
	Pu	phi*Pnc	phi*Pnt				
	-163247,618	417373,488	598926,732				
Major Moment							
	Mu	phi*Mn	phi*Mn				
	391,554	25709,552	25709,552				
Minor Moment							
	0,000	25709,552					
Torsion							
	Tu	Tn	phi*Tn				
	0,000	26901,792	24211,613				
SHEAR CHECK							
	Uu	phi*Un	Stress	Status			
	Force	Capacity	Ratio	Check			
Major Shear	0,000	179678,020	0,000	OK			
Minor Shear	0,000	179678,020	0,000	OK			

Figura 54-3. Esfuerzos en el arrostre diagonal 2

Fuente: SAP2000

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS Y ESTRUCTURA DE LA HOJA ELECTRÓNICA

La hoja electrónica se realizó en Microsoft Excel y tiene como objetivo realizar el pre-diseño de los tanques elevados de acero con soporte estructural de múltiples columnas. Esta memoria de cálculo contiene las ecuaciones y criterios de diseño dados en el capítulo III para determinar las dimensiones adecuadas o muy próximas a las que requerirá el diseño final. En este capítulo se detalla la metodología, alcance, estructuración, logaritmos utilizados para el desarrollo de la hoja electrónica, adicionalmente se explica el desarrollo de la API que permite el modelamiento automático de los tanques elevados en SolidWorks y finalmente se muestra la aplicación del programa.

4.1 Metodología utilizada para la elaboración de la hoja electrónica

Para la elaboración de la aplicación de la hoja electrónica se siguió la metodología que se describe a continuación:

- **Recopilación de información y referencias:** Se realizó la revisión de bibliografía, normas, códigos, manuales y todo documento referente al correcto diseño y dimensionamiento de los tanques de acero y de su estructura de soporte, ya que se debe tener en cuenta que para el diseño de tanques elevados se debe cumplir completamente con los requisitos de Normas, Estándares o Códigos que rigen el diseño y fabricación de estas estructuras. Una vez realizada toda la investigación fue necesario recopilar los modelos matemáticos necesarios para el diseño del tanque y de su estructura con el objetivo de facilitar la programación de las fórmulas en la hoja electrónica, esta información se recopiló en el capítulo III del presente trabajo.
- **Desarrollo de la hoja electrónica:** La hoja electrónica se estructuró de manera que sea de fácil comprensión y utilización para el usuario. Esta hoja se desarrolló mediante las ecuaciones y criterios de diseño dados en el capítulo 3. Esta plantilla electrónica tiene como objetivo definir la geometría de acuerdo a recomendaciones de normativas y de la bibliografía, realizar el pre-diseño en función de las cargas aplicadas en la estructura. Varios de los datos que deben ingresarse a la hoja electrónica tienen su limitación, éstos son especificados en la misma plantilla.

- **Validación de la hoja electrónica:** Como toda herramienta propuesta para ser confiable debe ser validada de alguna manera, para el caso de nuestra hoja de cálculo se realizó la validación de los resultados dados por la hoja de cálculo, realizando una comparación con el reporte emitido por el software SAP 2000.
- **Elaboración de la API (Application Programming Interface):** Se elaboró una aplicación en el software SolidWorks, mediante el grabador de macros y una programación en Visual Basic, que permite modelar los tanques elevados de acuerdo a los datos puestos en la hoja electrónica. La hoja electrónica permite guardar un archivo que puede abrirse desde la aplicación y cargar dichos datos para que ocurra la modelación automática.

4.2 Alcance de la hoja electrónica

La aplicación elaborada en la hoja electrónica Excel no puede cubrir todo la gama de tanques elevados que se pueda realizar, por lo tanto la hoja de cálculo presenta un alcance o limitaciones, las cuales se presentan a continuación:

- La capacidad de almacenamiento del tanque de acero se limita a un rango de 25000 a 500000 galones
- Es aplicable solo para tanques de forma cilíndrica con fondo y techo toriesférico
- El número máximo de anillos o virolas que se puede aplicar a la parte cilíndrica del tanque es de 6.
- La altura máxima de cada anillo o virola es de 2.4 metros.
- La altura de la estructura de soporte se limita a un rango de 10 a 30 metros.
- La pendiente de la columna con respecto a la vertical se limita un rango de 0 a 0.15.
- El número máximo de anillos horizontales que se puede aplicar en la estructura a lo largo de las columnas es de 3.
- Los espesores del tanque de acero se determinan de acuerdo a la API 620-12 y API 650-12.

- Solo se permite el uso de perfiles tubulares circulares para la estructura de soporte.
- La carga de viento se determina de acuerdo a la AWWA D100-05 y ASCE 7-10.
- La carga sísmica se determina de acuerdo a la NEC-SE-DS.
- El diseño de los elementos estructurales se realiza de acuerdo a la AISC 360-10.

4.3 Estructuración de la hoja electrónica

La aplicación está formada por 14 pestañas las cuales están organizadas de acuerdo al procedimiento de diseño para tanques elevados de acero y se enumeran a continuación:

1. GEOMETRÍA
2. ESPESORES DEL TANQUE
3. PESO TANQUE
4. PRE-DISEÑO COLUMNA
5. SECCIONES
6. PESO SOPORTE
7. CARGA DE VIENTO
8. BALCÓN Y RIGIDIZADOR INTERMEDIO
9. CARGA POR SISMO
10. DISEÑO DE COLUMNA
11. DISEÑO DE DIAGONAL
12. DISEÑO HORIZONTAL
13. PLACA BASE
14. RESUMEN

4.3.1 Pestaña 1: GEOMETRÍA

En esta pestaña se determina la geometría de los tanques elevados siguiendo los fundamentos teóricos y ecuaciones dados en la sección 3.1 de este trabajo. Partiendo de la capacidad de almacenamiento de agua que se requiera se procede a dar recomendaciones para así establecer la mejor geometría para el tanque de acero, los casquetes de fondo y techo, y para la estructura de soporte. Esta pestaña se divide en 5 partes: en la primera se define la geometría del casquete de fondo, ingresando como datos los radios de abombado y de reborde se determina la altura, el

volumen y las demás dimensiones correspondientes del casquete; en la segunda se define la geometría de la parte cilíndrica, estableciendo su altura, el número de anillos o virolas y sus alturas correspondientes; la tercera parte se define la geometría del casquete de techo el cual usa los mismo criterios que para el casquete de fondo; en la cuarta parte se define la geometría de la estructura de soporte, ingresando como datos su altura, inclinación de la columna y arriostres horizontales se define la geometría vista en planta de la estructura; por último en la quinta parte se muestra una representación gráfica de la geometría del tanque elevado vista lateralmente y en planta.

4.3.2 Pestaña 2: ESPESORES DEL TANQUE.

En esta pestaña se determina los espesores del tanque de acero, siguiendo los fundamentos teóricos y ecuaciones dados en la sección 3.2 de este trabajo. En función de la geometría definida en la pestaña anterior, esta pestaña procede a calcular los espesores de cada parte de la que se compone el tanque. Esta pestaña se divide en dos partes: la primera se encarga en determinar los espesores del casquete de fondo y de la parte cilíndrica siguiendo el procedimiento que nos brinda la API 620-12, que se explica en este trabajo en la sección 3.2.1; en la segunda parte se determina el espesor para el casquete de techo usando las ecuaciones que nos brinda la API 650-12 y que se explican en este trabajo en la sección 3.2.2.

4.3.3 Pestaña 3: PESO TANQUE

En esta pestaña se determina el peso de la carcasa del tanque de acero según la sección 3.3.1.1 de este trabajo y el peso agua almacenado en el tanque según la sección 3.3.1.2. Esta pestaña se divide en dos parte una para determinar el peso del tanque, ingresando como dato el peso específico del acero se détermina el peso de los casquetes de fondo y de techo, y el peso de cada virola del tanque, mientras que la segunda parte se encarga en determinar el volumen y el peso de agua contenido en el casquete de fondo y en la parte cilíndrica del tanque.

4.3.4 Pestaña 4: PRE-DISEÑO COLUMNA

En esta pestaña se realiza el pre-diseño de la columna de la estructura de soporte siguiendo el procedimiento dado en la sección 3.5.5, que se basa en los criterios de diseño de la AISC 360-10, en el cual se ingresa como datos las propiedades del material que se pretenda utilizar y utilizando los datos de las pestañas anteriores, se determina las cargas que soporta la columna y se calcula el área y el radio de giro de la sección transversal que se requiere.

4.3.5 Pestaña 5: SECCIONES

Una vez obtenido el área y el radio de giro en la pestaña de “Pre-diseño Columna” se procede a seleccionar el perfil más adecuado para la columna y para los demás elementos estructurales como los arriostres horizontales y diagonales. En esta pestaña se presenta una base de datos con las propiedades geométricas de varios perfiles tubulares dados por la AISC y por la ASTM B36.10M, además en esta pestaña se puede calcular las propiedades geométricas como: el área, diámetro interior, momento de inercia, radio de giro, módulo sección, módulo plástico y la constante torsional; esto utilizando las ecuaciones que nos da la tabla 29-3 de este documento. Adicionalmente en esta pestaña también debe ingresarse las propiedades mecánicas del material que va a utilizarse en cada elemento estructural. También se presenta una tabla con las propiedades mecánicas de varios aceros estructurales usados para este tipo de estructuras.

4.3.6 Pestaña 6: PESO SOPORTE

En esta pestaña se determina el peso de la estructura de soporte en función de las secciones transversales que se ingresó en la pestaña de “SECCIONES” para cada elemento estructural, esta pestaña se divide en cuatro partes: en la primera se determina el peso de las columnas en función de su sección transversal, de su longitud y del número de columnas de la estructura; en la segunda parte se calcula el peso de los arriostres horizontales, para esto primero se calcula las longitudes de los arriostres usando las ecuaciones de la tabla 7-3 y posteriormente se determina el peso de los arriostres según la tabla 13-3; en la tercera parte se calcula el peso de los arriostres diagonales, para ello primero se determina la longitud de los arriostres usando las ecuaciones dadas en la tabla 8-3 para luego determinar el peso de los arriostres usando las ecuaciones de la tabla 14-3; en la cuarta parte se determina el peso total de la estructura de soporte. En esta pestaña también se muestra una gráfica que muestra la geometría de un panel de estructura.

4.3.7 Pestaña 7: CARGA DE VIENTO

En esta pestaña se determina la carga de viento que actúan en la estructura de acuerdo al procedimiento que se muestra en la sección 3.3.3, que está basada en las recomendaciones dadas por la AWWA D 100-05 complementada con la ASCE 7-10. Esta pestaña se divide en dos partes: en la primera se determina las cargas de viento en las partes del tanque mientras que en la segunda parte se determina las cargas de viento en la estructura de soporte, para finalmente determinar la fuerza provocada por la presión del viento y el momento total provocado por dicha fuerza en la base de la estructura.

4.3.8 Pestaña 8: BALCÓN Y RIGIDIZADOR INTERMEDIO

Esta pestaña se compone por dos partes. En la primera se debe ingresar las dimensiones del balcón a utilizar, la pestaña calcula el módulo de sección y el peso de la misma, en esta parte se recomienda las dimensiones mínimas que puede tener el balcón de acuerdo a recomendaciones de la AWWA D100-05 y de la API 650-12. En la segunda parte de esta pestaña se determina si el tanque requiere vigas rigidizadoras intermedias para una mayor estabilidad contra el viento de acuerdo a la sección 3.4.2, además se calcula la altura de la parte cilíndrica entre la viga intermedia y el borde superior del cilindro, si dicha altura es mayor que la altura total de la parte cilíndrica del tanque entonces no requiere rigidizador, en el caso de requerir un rigidizador intermedio la pestaña determina el módulo de sección mínimo requerido de la viga.

4.3.9 Pestaña 9: CARGA POR SISMO

En esta pestaña se determina la carga por sismo de acuerdo al procedimiento dado en la sección 3.3.4, este procedimiento se basa en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC SD DS). Como datos debe ingresarse coeficientes que dependen de la zona y del tipo de suelo en donde se levantará la estructura, estos coeficientes se encuentran tabulados en la NEC y se replican en este trabajo. La pestaña recomienda un valor para el período de vibración de la estructura que se determina de acuerdo a la sección 3.3.4.7, pero es criterio del usuario determinar si utiliza dicho valor u otro valor que considere más adecuado, con estos datos la pestaña determina el coeficiente de cortante basal y el cortante total en la base de la estructura, además determina el momento en la base producto de las cargas laterales por sismo. Adicionalmente la pestaña de cálculo proporciona la gráfica del espectro de diseño (elástico y reducido).

4.3.10 Pestaña 10: DISEÑO DE COLUMNA

En esta pestaña se realiza el diseño de la columna y se divide en tres partes, en la primera se determina la capacidad a compresión de la columna de acuerdo a la sección 3.5.6 de este trabajo (capítulo E de la AISC 360-10), en la segunda parte se determina la capacidad a flexión de acuerdo a la sección 3.5.10 de este trabajo (capítulo F de la AISC 360-10) y por último se determina la relación demanda-capacidad a flexo-compresión de acuerdo a la sección 3.5.11. (Capítulo H de la AISC 360-10). La hoja de cálculo propone un valor de demanda a compresión de acuerdo a la sección 4.5, es criterio del usuario usar la demanda propuesta o utilizar otra carga que considere adecuada. Si la relación demanda-capacidad a flexo-compresión es menor o igual que 1 se puede considerar que el perfil es el adecuado.

4.3.11 Pestaña 11: DISEÑO DE DIAGONAL

En esta pestaña se realiza el diseño de los arriostres diagonales y se divide en dos partes, en la prima se realiza en diseño de los arriostres que se encuentran a compresión de acuerdo a la sección 3.5.6 del presente trabajo (capítulo E de la AISC-10), mientras que en la segunda parte se realiza el diseño de los arriostres que se encuentran a tracción de acuerdo a sección 3.5.8 (capítulo D de la AISC 360). En esta pestaña también se recomienda las cargas de demanda para compresión y tracción para los arriostres, es criterio del usuario utilizar estas cargas o utilizar otras cargas que consideren adecuadas. Si la relación demanda-capacidad para cada condición de compresión y tracción es menor o igual que 1 se puede considerar que el perfil es el adecuado.

4.3.12 Pestaña 12: DISEÑO HORIZONTAL

En esta pestaña se realiza el diseño de los arriostres horizontales, este arriostre se diseña a compresión de acuerdo a la sección 3.5.6 de este trabajo (capítulo E de la AISC 360-10). Al igual que en las pestañas anteriores se recomienda una carga para la demanda del elemento, y es criterio de usuario si utiliza esta carga o no. Si la relación demanda-capacidad es menor o igual que 1 se puede considerar que el perfil es el adecuado.

4.3.13 Pestaña 13: PLACA BASE

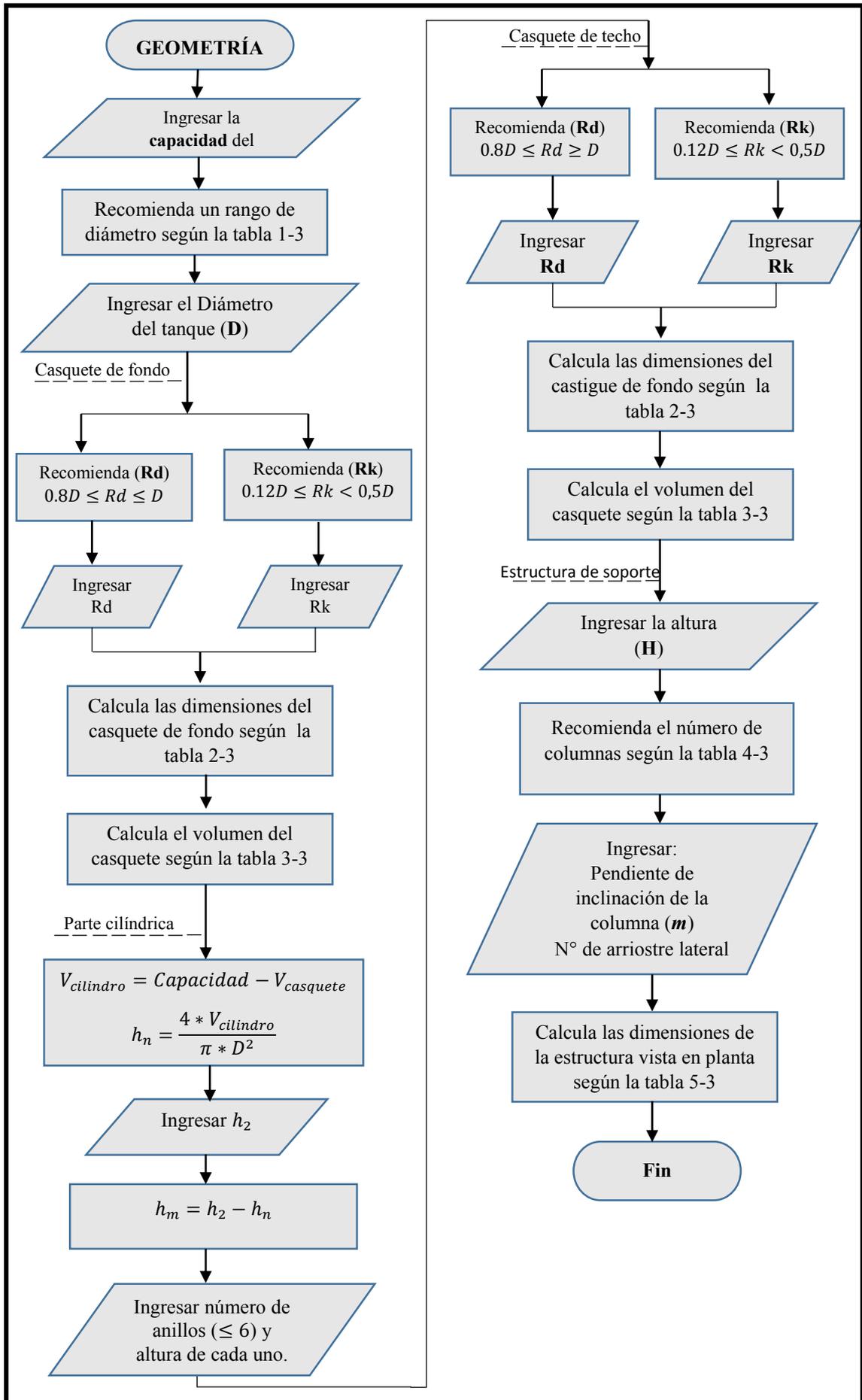
En esta pestaña se determina las dimensiones y el espesor requerido para la placa base de las columnas, de acuerdo al procedimiento dado por la sección 3.5.12 de este trabajo. Esta pestaña se divide en tres partes, en la primera se determina las dimensiones mínimas que se requiere para la placa de acero y en función a esto se debe establecer las dimensiones que se considere adecuado, en la segunda parte se define las dimensiones de la zapata de hormigón y se verifica que cumplan ciertas condiciones de su resistencia, si estas se cumplen, las dimensiones son las adecuadas, y por último en la tercera parte se define el espesor de la placa base.

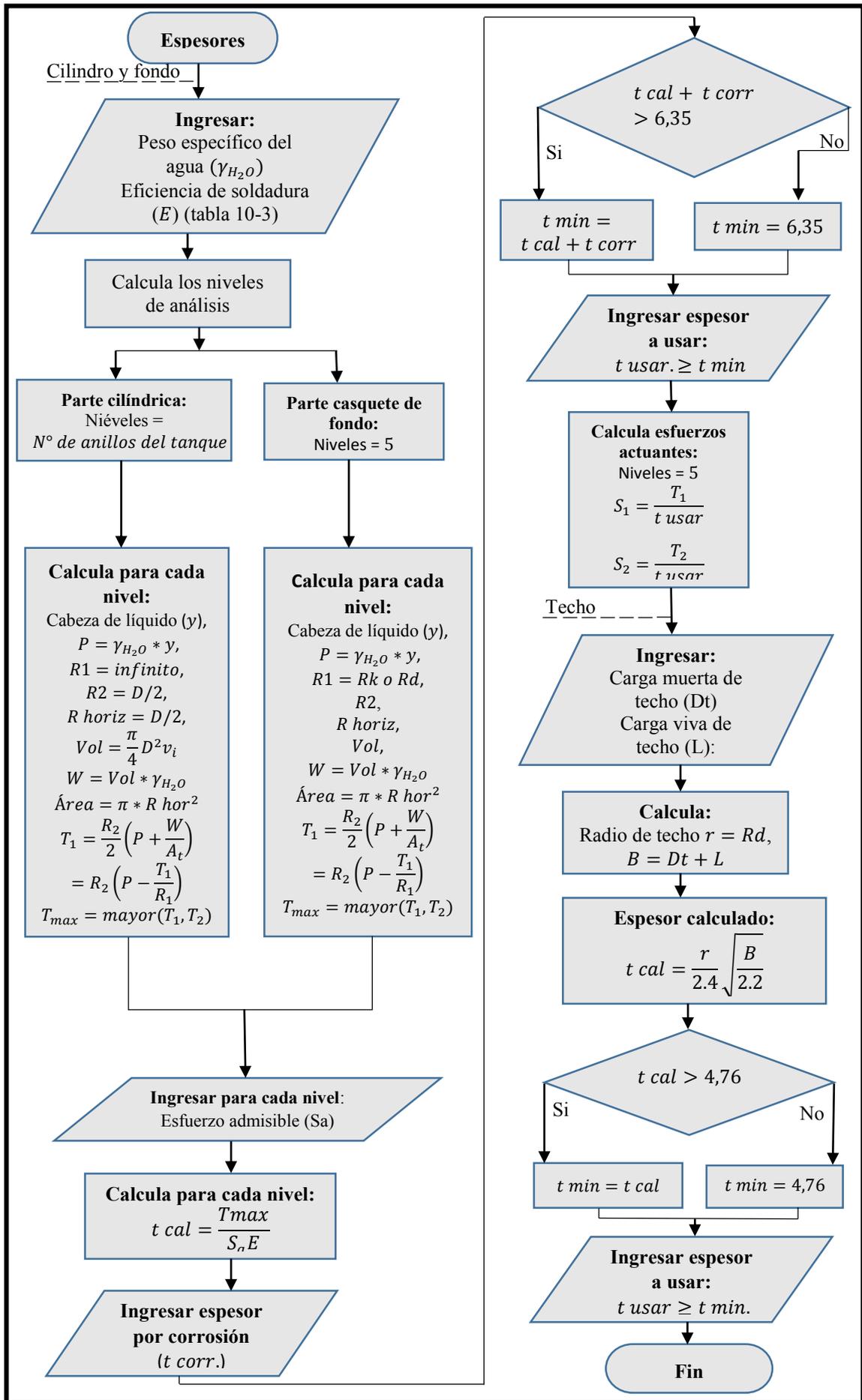
4.3.14 Pestaña 14: RESUMEN

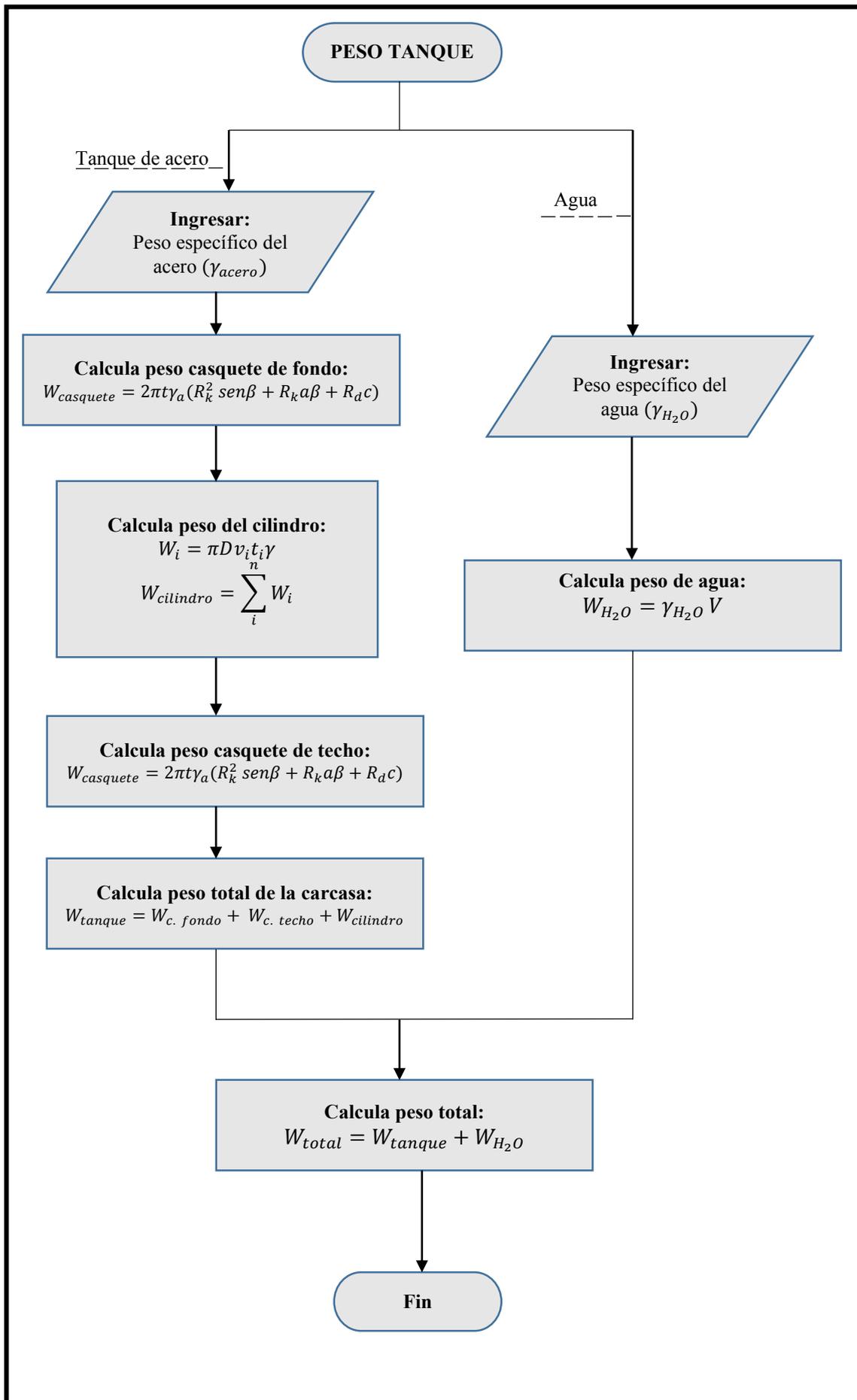
En esta pestaña se presenta un resumen de la información más relevante que se ha obtenido en toda la memoria de cálculo.

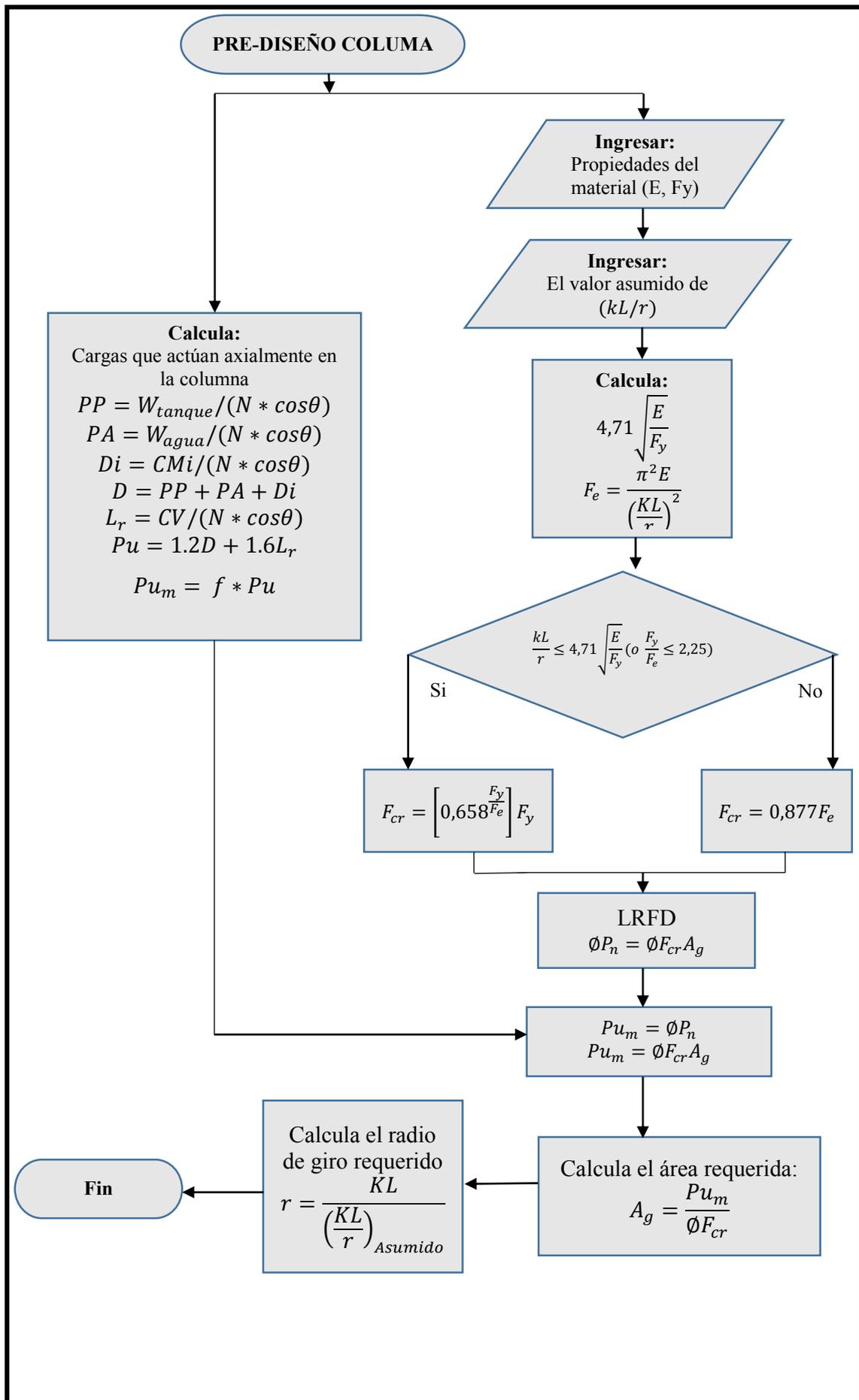
4.4 Algoritmos de la hoja electrónica.

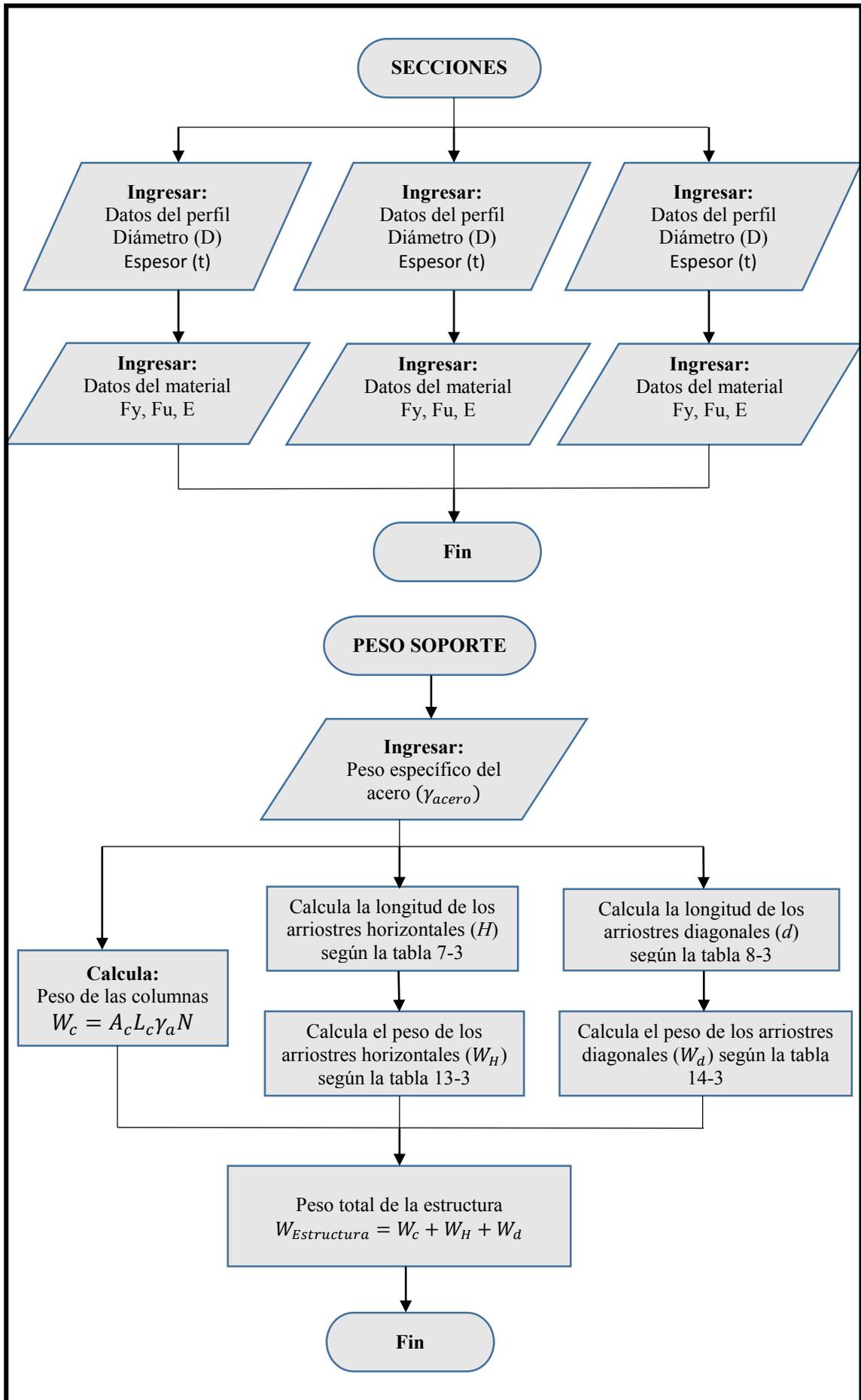
A continuación se presentan los algoritmos utilizados en la hoja electrónica:

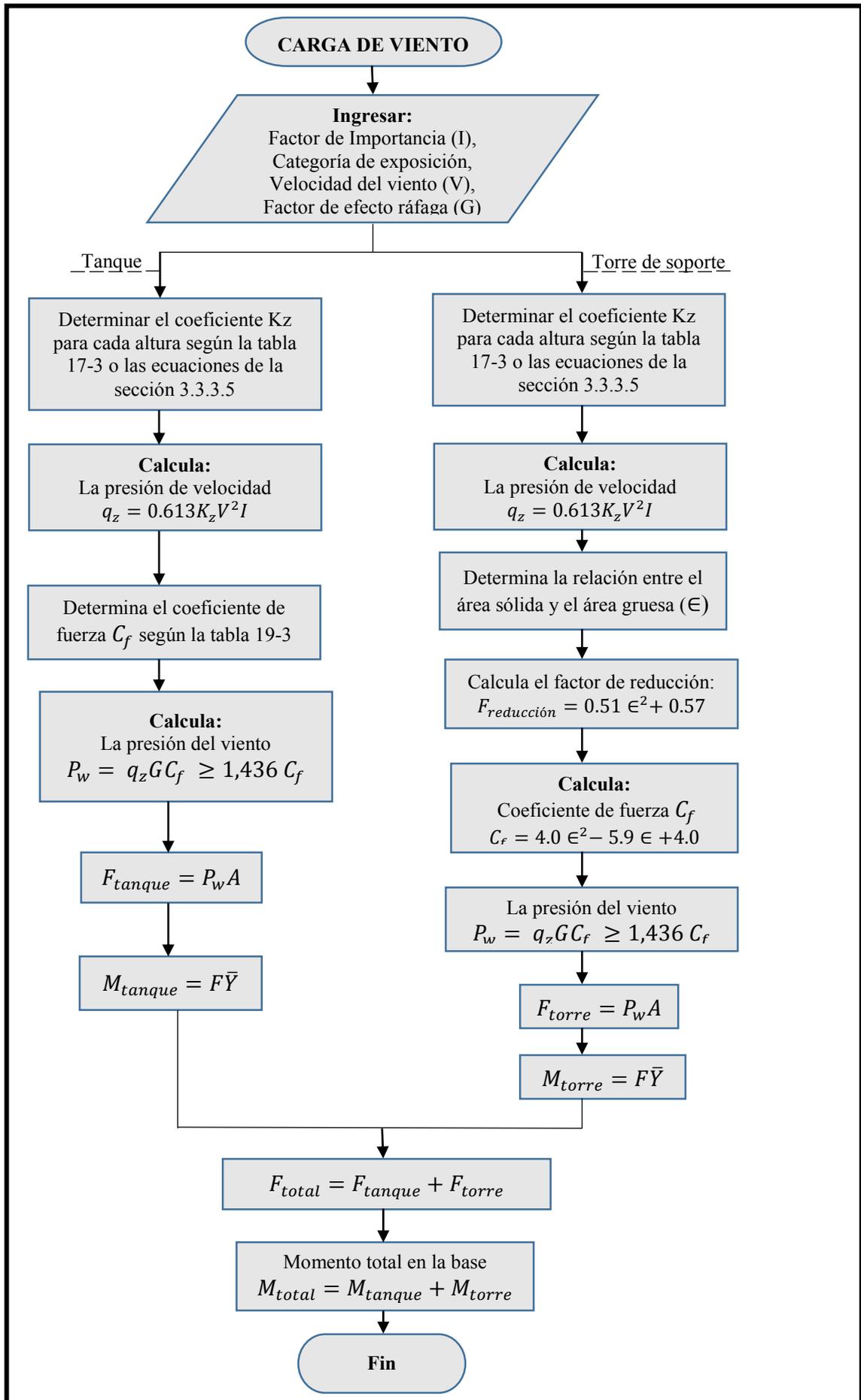


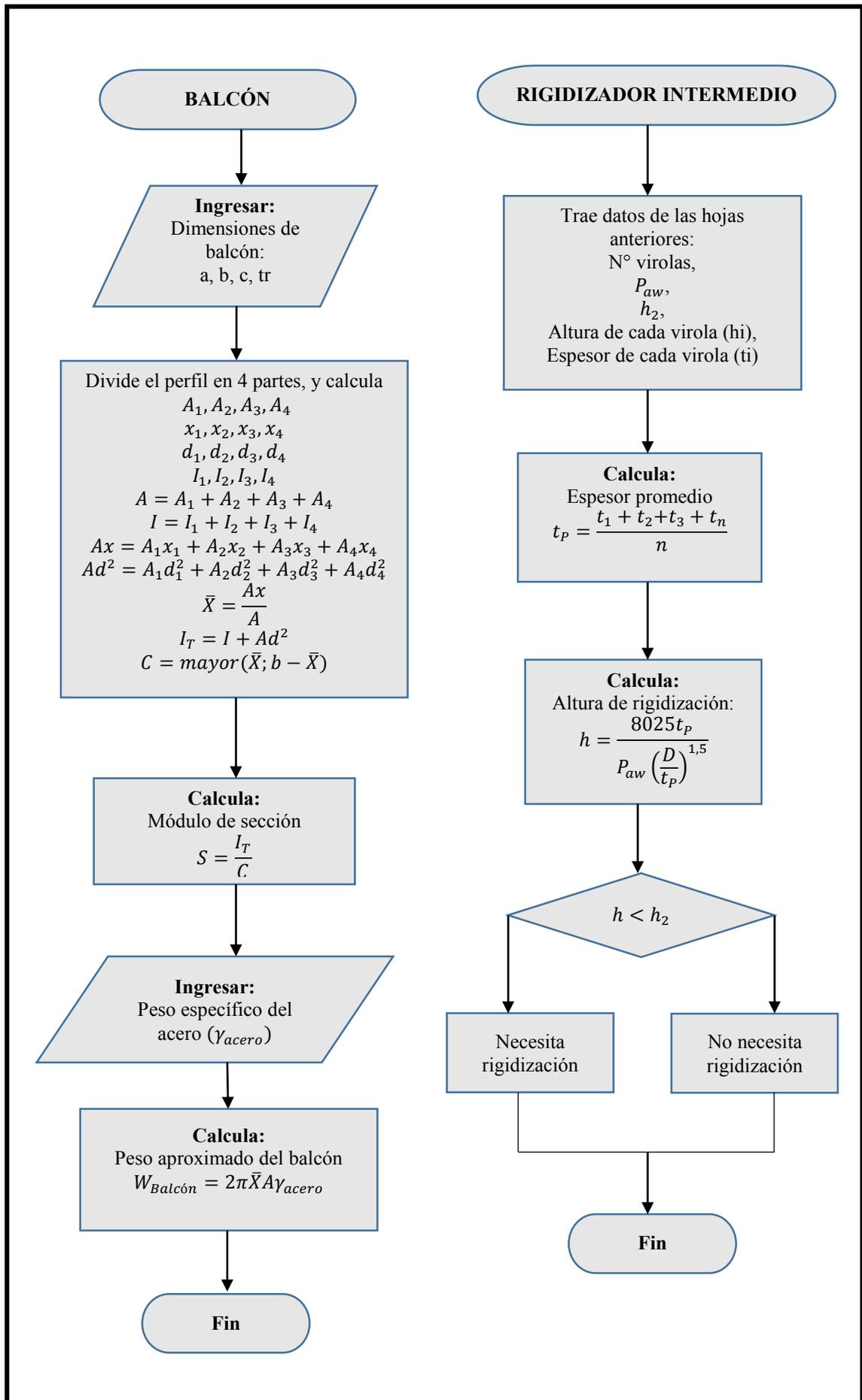


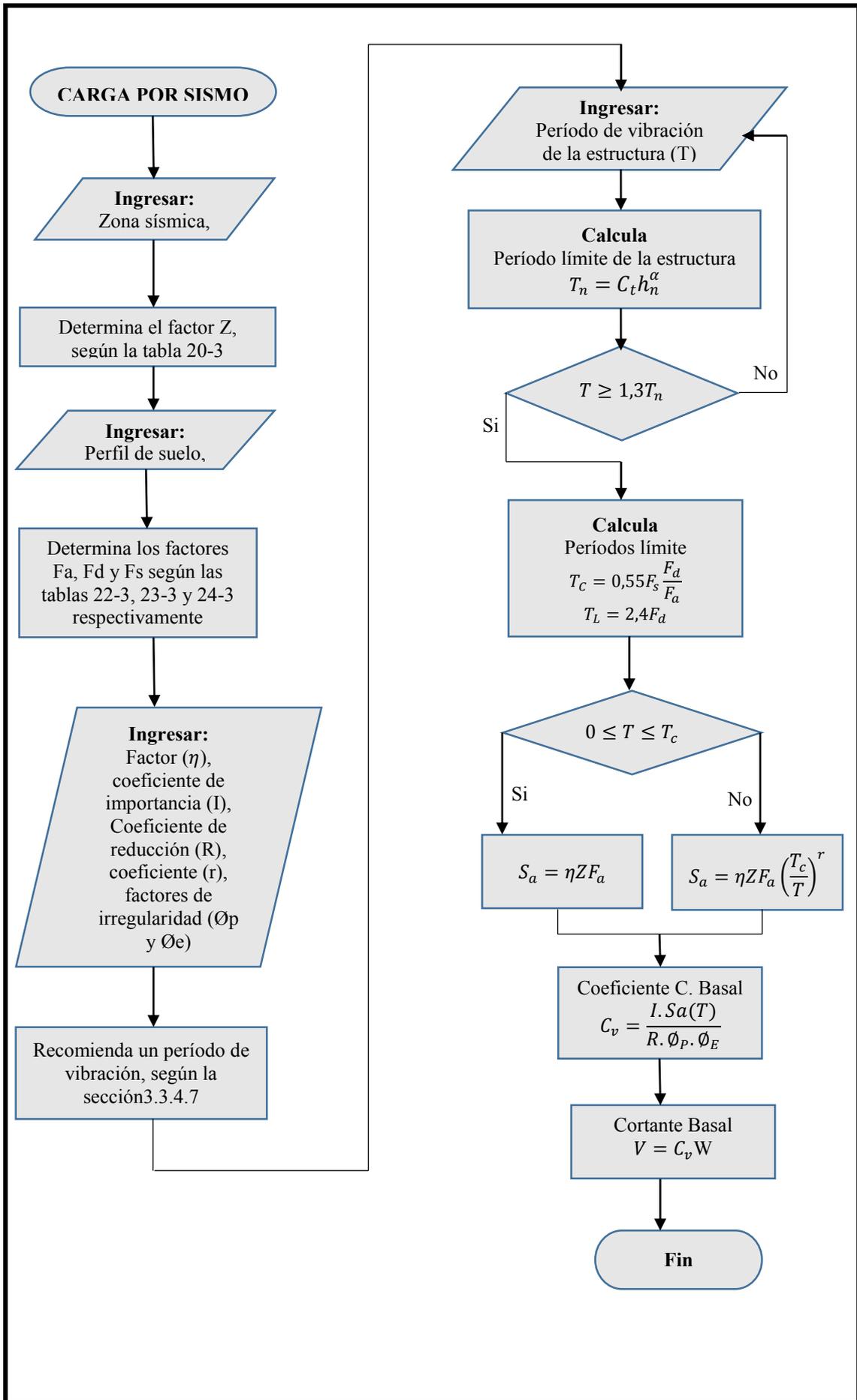


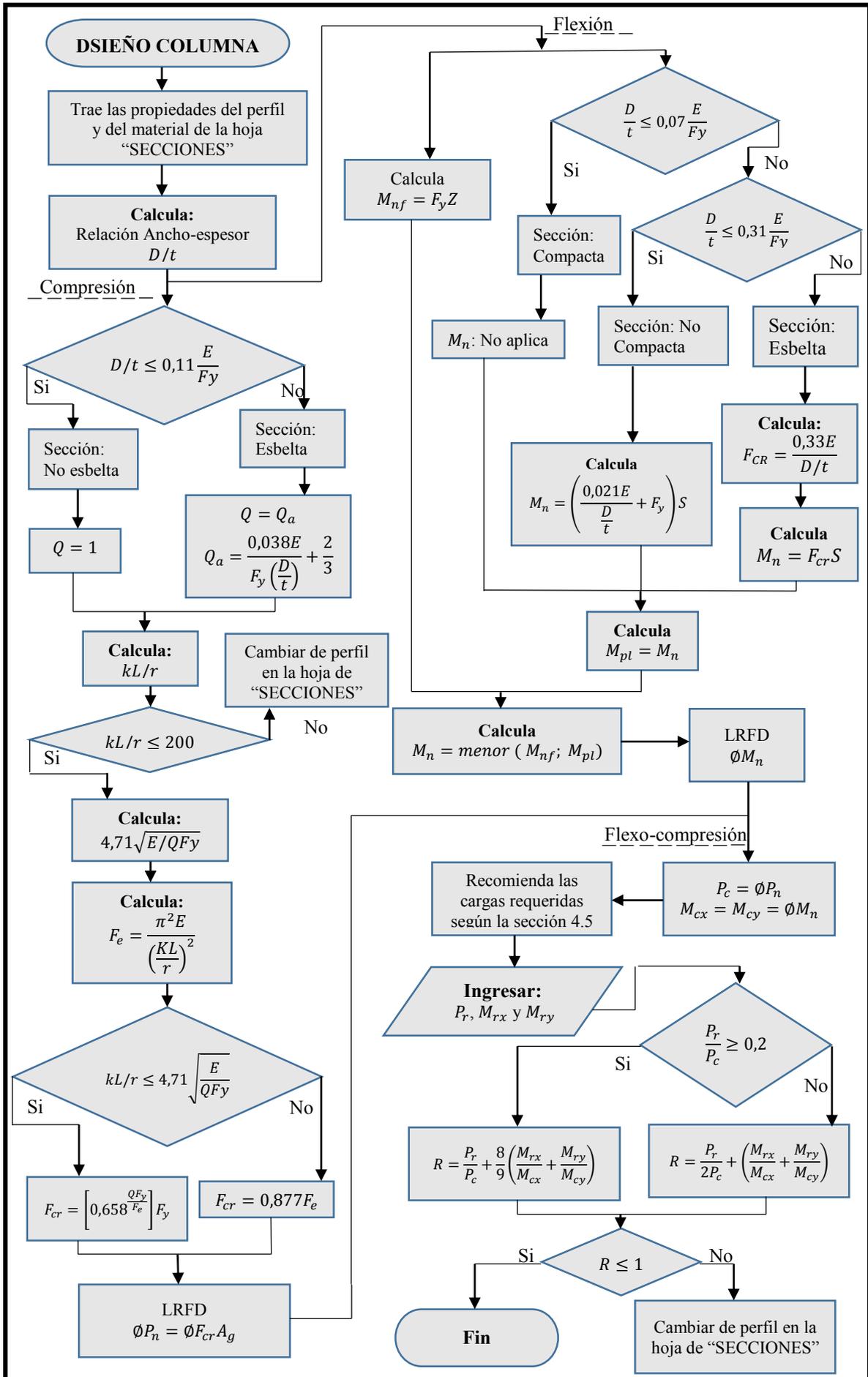


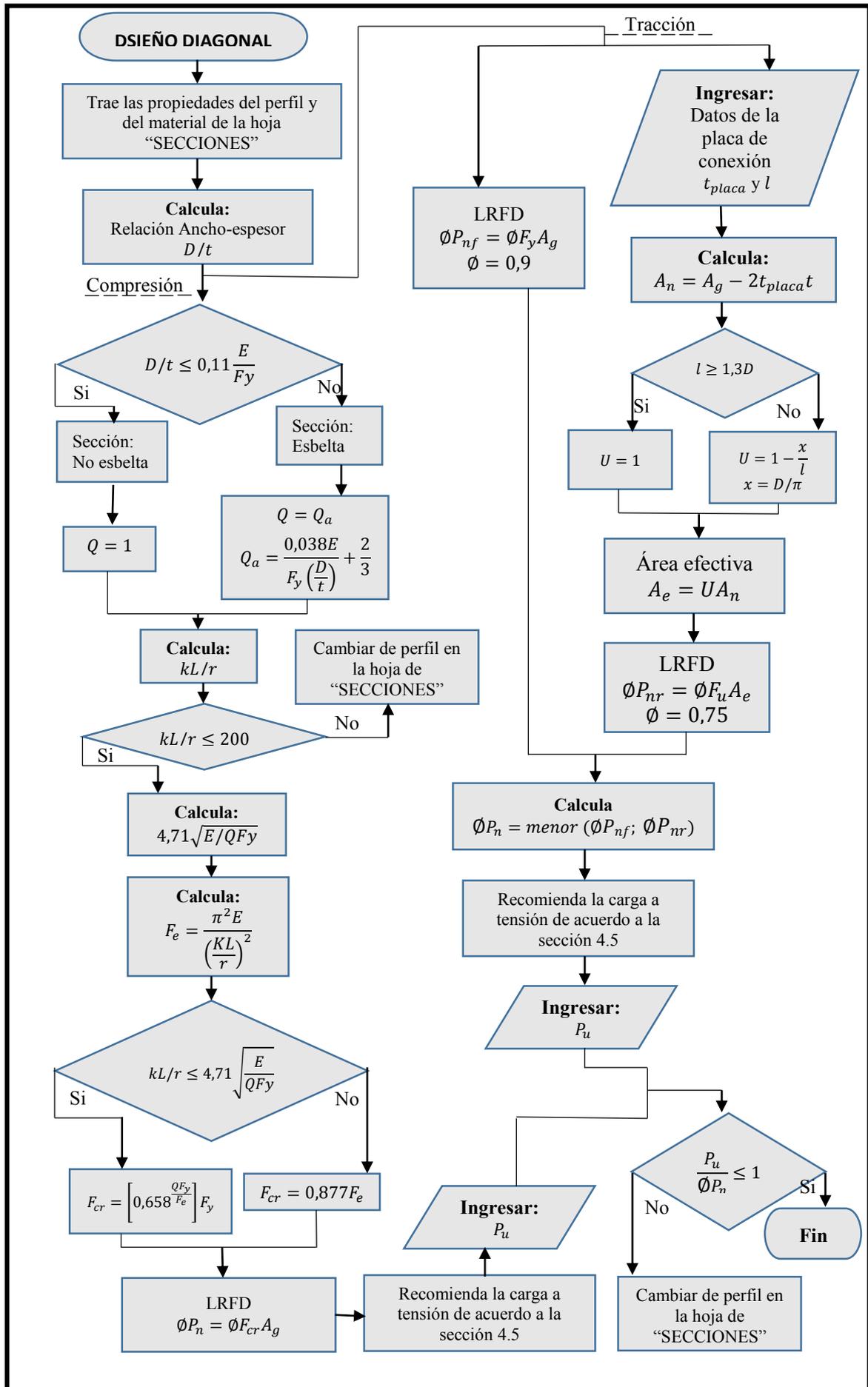


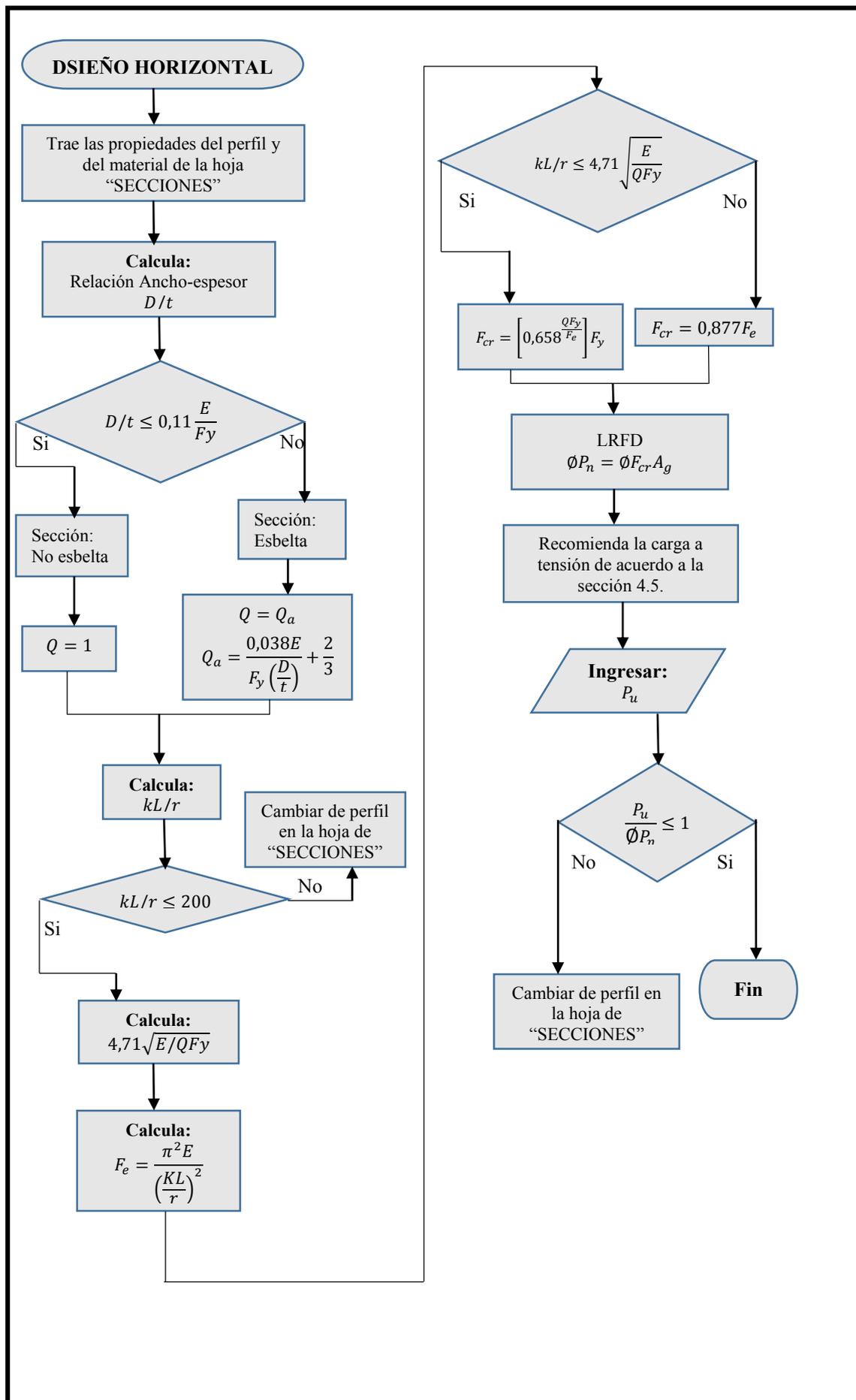


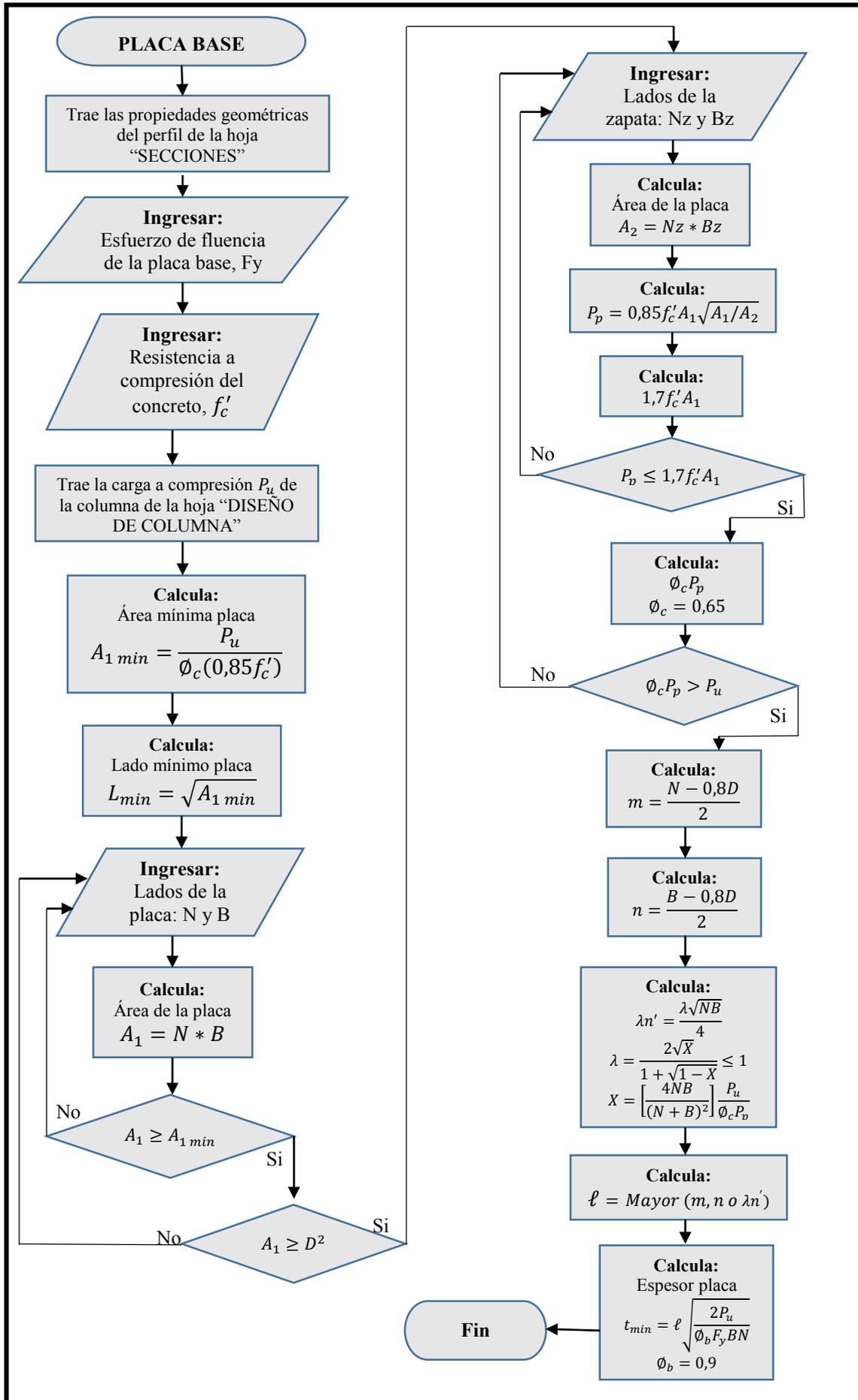












4.5 Cargas en los elementos estructurales

Para determinar las cargas que actúan en los elementos de la estructura es necesario realizar el análisis estructural en un software de diseño, pero el objetivo de realizar la hoja electrónica es evitar que el diseñador tenga que acudir al software ya que la modelación de la estructura toma un tiempo considerable y es eso lo que se quiere evitar, es por ello que en este trabajo se ha realizado la modelación de 54 tanques elevados con diferentes configuraciones y en cada uno se observó cómo varían las cargas axiales en los elementos estructurales al ir variando el coeficiente de cortante basal, de esta manera se pudo determinar de manera aproximada las cargas axiales que actúan en los elementos estructurales de cualquier tanque elevado que se encuentre dentro del alcance de la hoja electrónica. En la sección 3.6 puede verse como se modelaron los tanques elevados para determinar las cargas en los elementos estructurales.

4.5.1 Cargas de compresión en la columna.

4.5.1.1 Cargas de compresión para Tanques de entre 25.000 a 250.000 galones

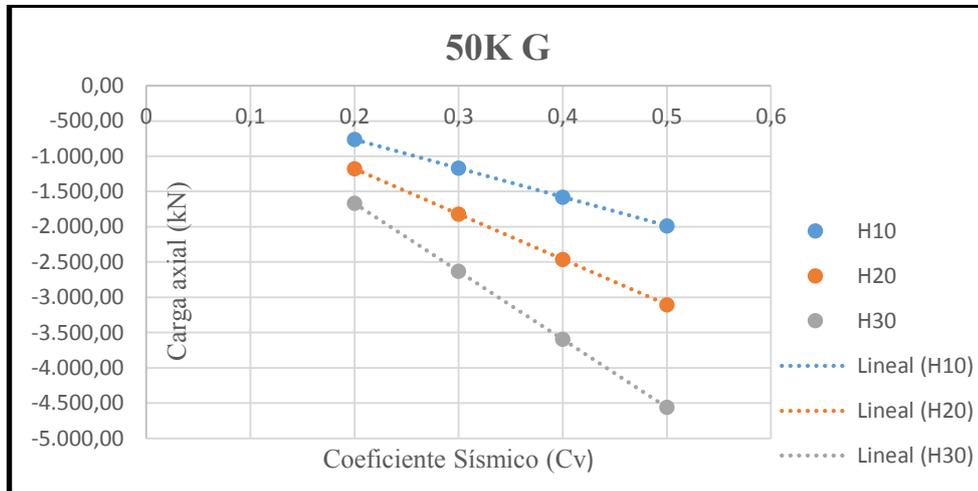
Para determinar la carga axial a compresión aproximada de la columna más crítica de los tanques elevados para capacidades entre 25.000 y 250.000 galones se realizó el análisis estructural de dos tanques elevados (50.000 y 100.000 galones) cada uno a diferentes alturas de estructura de soporte (10, 20 y 30 metros), la estructura de soporte de estos tanques cuenta con cuatro columnas debido a que es lo que recomienda la tabla 4-3. Además se realizó el análisis estructural con torres de 1, 2 y 3 anillos de arriostre horizontal. En la tabla 1-4 se muestra como varia las cargas a compresión con respecto al coeficiente de cortante basal (C_v) para tanques con un solo anillo de arriostre horizontal.

Tabla 1-4. Compresión en columna de estructura con un anillo de arriostre horizontal.

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
0,2	-761.868,67	-1.177.502,33	-1.666.811,90	-1.596.542,15	-2.226.152,88	-2.788.074,11
0,3	-1.169.776,97	-1.819.856,84	-2.631.135,82	-2.167.905,72	-3.143.473,77	-4.152.842,19
0,4	-1.577.685,27	-2.462.211,34	-3.595.459,74	-2.739.269,29	-4.060.794,66	-5.517.610,26
0,5	-1.985.593,58	-3.104.565,84	-4.559.783,67	-3.310.632,86	-4.978.115,55	-6.882.378,34

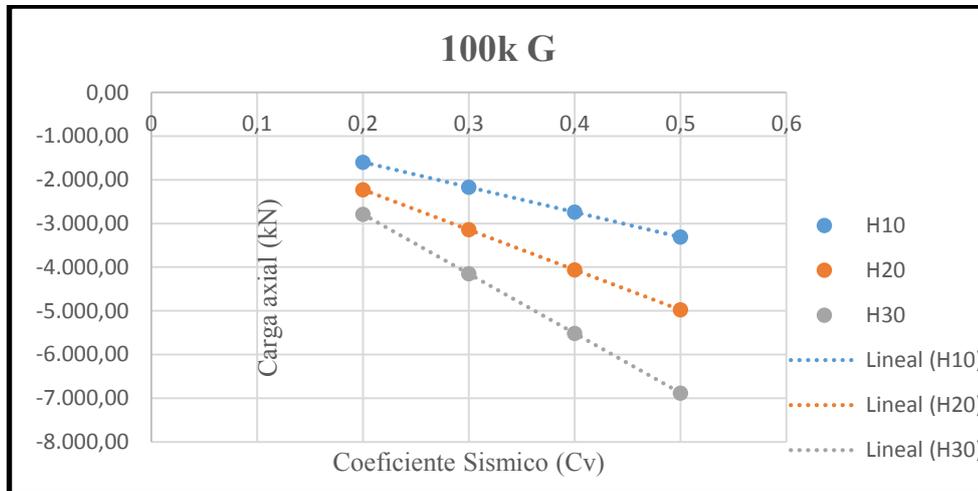
Realizado por: William Inchilema, 2017

En las gráficas 1-4 y 2-4 se puede observar la variación de las cargas a compresión en la columna con respecto al coeficiente de cortante basal (C_v), para tanques de 50.000 y 100.000 galones a diferentes alturas.



Gráfica 1-4. Carga a compresión vs Coeficiente cortante basal (50k galones)

Realizado por: William Inchilema, 2017



Gráfica 2-4. Carga a compresión vs Coeficiente cortante basal (100k galones)

Realizado por: William Inchilema, 2017

Como se puede observar en las dos gráficas anteriores, la relación entre las cargas axiales y el coeficiente de cortante basal es casi lineal por lo que resulta factible realizar interpolaciones o extrapolaciones en la tabla 4-1 para determinar la carga a compresión que actúa en la columna más crítica para cualquier tanque elevado con capacidad entre 25.000 y 250.000 galones y para alturas de la estructura de soporte entre 10 y 30 metros. Hay que recordar que la tabla 4-1 solo se aplica a tanques con soporte estructural con un anillo de arrioste horizontal. Para determinar las

cargas en torres con dos y tres anillos de arriostre horizontal se aplican las tablas que se presentan a continuación:

- Cargas para torre con cuatro columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 2-4. Compresión en columna de estructura con dos anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
0,2	-861.040,49	-1.476.642,23	-1.786.278,97	-1.630.359,89	-2.121.871,76	-3.087.590,08
0,3	-1.282.117,28	-2.163.812,64	-2.907.134,16	-2.184.083,77	-3.434.337,11	-4.874.516,51
0,4	-1.703.194,06	-2.850.983,04	-4.027.989,35	-2.737.807,65	-4.746.802,45	-6.661.442,94
0,5	-2.124.270,84	-3.538.153,45	-5.148.844,54	-3.291.531,53	-6.059.267,80	-8.448.369,37

Realizado por: William Inchilema, 2017

- Cargas para torre con cuatro columnas y tres anillos de arriostre horizontal

Tabla 3-4. Compresión en columna de estructura con tres anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
0,2	-820.172,95	-1.479.192,59	-1.928.756,31	-1.644.054,34	-2.402.146,74	-3.197.918,07
0,3	-1.243.415,22	-2.167.270,17	-2.985.035,15	-1.899.013,99	-3.630.804,68	-4.986.886,77
0,4	-1.666.657,50	-2.855.347,75	-4.041.313,98	-2.153.973,63	-4.859.462,61	-6.775.855,47
0,5	-2.089.899,78	-3.543.425,33	-5.097.592,82	-2.408.933,28	-6.088.120,55	-8.564.824,17

Realizado por: William Inchilema, 2017

4.5.1.2 Cargas para tanques de entre 250.000 a 450.000 galones

De la misma manera para determinar la carga a compresión de la columna más crítica de cualquier tanque elevado con una capacidad entre 250.000 y 450.000 galones se realizara una interpolación o extrapolación en las tablas 4-4, 5-4 y 6-4 que son para estructuras con 1, 2 y 3 anillos de arriostre horizontal respectivamente. En dichas tablas se muestra las cargas para tanques elevados de

300.000 y 400.000 galones cada uno a diferentes alturas de estructura de soporte (15, 20 y 30 metros), la estructura de soporte de estos tanques cuenta con 6 columnas, debido a que este es el número de columnas recomendado en la tabla 4-3.

- Cargas para torre con seis columnas y un anillo de arriostre horizontal.

Tabla 4-4. Compresión en columna de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA F11 Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000 galones			400.000 galones		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
0,2	-2.469.348,42	-3.053.659,85	-3.233.401,08	-3.112.187,17	-3.506.392,55	-3.950.721,97
0,3	-3.351.004,43	-4.365.320,72	-4.562.467,39	-4.202.544,71	-4.835.202,84	-5.699.147,32
0,4	-4.232.660,43	-5.676.981,59	-5.891.533,70	-5.292.902,25	-6.164.013,13	-7.447.572,68
0,5	-5.114.316,44	-6.988.642,46	-7.220.600,01	-6.383.259,79	-7.492.823,42	-9.195.998,03

Realizado por: William Inchilema, 2017

- Cargas para torre con seis columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 5-4. Compresión en columna de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
0,2	-3.093.380,83	-3.552.718,81	-4.522.067,35	-3.808.536,55	-4.454.728,35	-5.355.766,08
0,3	-4.174.645,42	-4.918.261,31	-6.422.414,06	-5.147.710,82	-6.148.305,58	-7.666.067,86
0,4	-5.255.910,02	-6.283.803,80	-8.322.760,77	-6.486.885,09	-7.841.882,80	-9.976.369,65
0,5	-6.337.174,61	-7.649.346,30	-10.223.107,49	-7.826.059,36	-9.535.460,03	-12.286.671,43

Realizado por: William Inchilema, 2017

- Cargas para torre con seis columnas y tres anillos de arriostre horizontal.

Tabla 6-4. Compresión en columna de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
0,2	-3.108.141,64	-3.682.712,91	-4.643.953,08	-3.830.188,52	-4.558.558,49	-5.676.270,33
0,3	-4.228.525,31	-5.112.575,59	-6.602.902,72	-5.184.012,20	-6.304.722,56	-8.120.540,60
0,4	-5.348.908,98	-6.542.438,28	-8.561.852,37	-6.537.835,89	-8.050.886,64	-10.564.810,87
0,5	-6.469.292,66	-7.972.300,96	-10.520.802,01	-7.891.659,58	-9.797.050,71	-13.009.081,14

Realizado por: William Inchilema, 2017

4.5.1.3 Cargas para tanques de entre 450.000 a 500.000 galones, con 8 columnas

Para determinar la carga axial en la columna más cargada de un tanque que para capacidades entre 450.000 y 500.000 galones se determinará realizando una interpolación o extrapolación de las tablas que se presentan a continuación. En dichas tablas se muestra las cargas para tanques elevados de 450.000 y 500.000 galones cada uno a diferentes alturas de estructura de soporte (15, 20 y 30 metros), la estructura de soporte de estos tanques cuenta con 8 columnas, debido a que este es el número de columnas recomendado en la tabla 4-3.

- Cargas para torre con ocho columnas y un anillo de arriostre horizontal.

Tabla 7-4. Compresión en columna de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
0,2	-3.038.472,87	-3.118.899,09	-3.458.642,23	-3.193.676,68	-3.374.203,71	-3.735.500,05
0,3	-4.077.266,92	-4.314.252,99	-4.964.357,06	-4.270.053,45	-4.615.762,44	-5.212.089,09
0,4	-5.116.060,98	-5.509.606,89	-6.470.071,90	-5.346.430,23	-5.857.321,17	-6.688.678,13
0,5	-6.154.855,03	-6.704.960,78	-7.975.786,73	-6.422.807,00	-7.098.879,90	-8.165.267,17

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con ocho columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 8-4. Compresión en columna de estructura con dos anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
0,2	-3.484.041,24	-3.810.409,36	-4.591.057,70	-3.686.226,88	-4.075.870,27	-5.024.498,82
0,3	-4.695.933,89	-5.263.238,73	-6.589.529,97	-4.945.727,80	-5.593.406,34	-7.232.673,90
0,4	-5.907.826,53	-6.716.068,09	-8.588.002,24	-6.205.228,72	-7.110.942,41	-9.440.848,99
0,5	-7.119.719,18	-8.168.897,45	-10.586.474,51	-7.464.729,64	-8.628.478,48	-11.649.024,07

Realizado por: William Inchilema, 2017

- Cargas para torre con ocho columnas y tres anillos de arriostre horizontal.

Tabla 9-4. Compresión en columna de estructura con tres anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL COLUMNA Pu (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
0,2	-6.408.292,45	-7.211.617,09	-9.112.226,50	-6.775.546,38	-7.631.654,58	-9.927.655,58
0,3	-8.670.813,30	-9.936.483,02	-12.944.761,20	-9.126.333,65	-10.508.317,74	-14.078.267,52
0,4	-10.933.334,15	-12.661.348,95	-16.777.295,90	-11.477.120,93	-13.384.980,91	-18.228.879,46
0,5	-13.195.855,00	-15.386.214,88	-20.609.830,60	-13.827.908,20	-16.261.644,08	-22.379.491,40

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.2 Carga axial a compresión en arriostres diagonales.

Para determinar las cargas a compresión axial que actúan en los arriostres diagonales de los tanques elevados que se encuentran dentro del alcance de este trabajo se realizara una interpolación o extrapolación en las tablas que se presentan a continuación.

4.5.2.1 Cargas para tanques de 25.000 a 250.000 galones.

- Cargas para torre con cuatro columnas y un anillo de arriostre horizontal

Tabla 10-4. Compresión en diagonal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 1.						
0,2	-102.828,312	-233.444,22	-311.424,74	-207.943,25	-377.742,88	-530.161,30
0,3	-152.736,688	-311.513,72	-417.942,57	-292.121,06	-512.718,78	-717.608,58
0,4	-202.645,064	-389.583,22	-524.460,39	-376.298,87	-647.694,68	-905.055,87
0,5	-252.553,44	-467.652,73	-630.978,22	-460.476,68	-782.670,59	-1.092.503,15
Diagonal 2						
0,2	-88.129,892	-225.201,36	-302.513,37	-174.874,50	-346.566,25	-512.550,11
0,3	-135.073,428	-304.548,95	-405.246,98	-249.431,74	-486.142,31	-713.323,31
0,4	-182.016,964	-383.896,54	-507.980,58	-323.988,99	-625.718,38	-914.096,51
0,5	-228.960,50	-463.244,13	-610.714,19	-398.546,23	-765.294,44	-1.114.869,71

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con cuatro columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 11-4. Compresión en diagonal de estructura con dos anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 1						
0,2	-80.989,38	-153.225,46	-256.801,95	-165.962,56	-331.874,91	-395.658,29
0,3	-118.061,22	-205.853,99	-314.670,69	-221.433,72	-410.866,33	-479.274,02
0,4	-155.133,06	-258.482,51	-372.539,43	-276.904,88	-489.857,76	-562.889,74
0,5	-192.204,90	-311.111,04	-430.408,17	-332.376,05	-568.849,18	-646.505,47
Diagonal 2						
0,2	-63.382,54	-125.194,86	-249.832,83	-101.405,18	-227.871,52	-261.090,39
0,3	-94.134,70	-171.127,18	-297.046,27	-142.392,35	-282.177,58	-354.634,34
0,4	-124.886,86	-217.059,50	-344.259,70	-183.379,52	-336.483,63	-448.178,30
0,5	-155.639,02	-262.991,82	-391.473,14	-224.366,69	-390.789,69	-541.722,25

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 11-4 (Continúa). Compresión en diagonal de estructura con dos anillo de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 3						
0,2	-67.758,64	-125.976,61	-262.172,34	-114.295,07	-257.091,86	-300.469,66
0,3	-98.527,66	-174.464,17	-304.211,97	-154.760,76	-311.553,96	-350.072,99
0,4	-129.296,67	-222.951,74	-346.251,60	-195.226,46	-366.016,06	-399.676,33
0,5	-160.065,69	-271.439,30	-388.291,23	-235.692,15	-420.478,16	-449.279,66

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con cuatro columnas y tres anillos de arriostre horizontal.

Tabla 12-4. Compresión en diagonal de estructura con tres anillo de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 1						
0,2	-62.178,58	-107.764,99	-186.505,39	-130.167,39	-251.419,85	-322.068,88
0,3	-92.568,26	-143.946,51	-233.778,31	-153.915,69	-315.896,86	-372.006,24
0,4	-122.957,95	-180.128,03	-281.051,23	-177.663,99	-380.373,88	-421.943,60
0,5	-153.347,64	-216.309,56	-328.324,16	-201.412,29	-444.850,89	-471.880,96
Diagonal 2						
0,2	-49.934,17	-86.504,48	-158.835,32	-92.328,37	-187.884,18	-275.488,27
0,3	-75.391,75	-118.861,43	-200.556,57	-113.425,31	-248.146,77	-312.978,23
0,4	-100.849,34	-151.218,38	-242.277,81	-134.522,25	-308.409,36	-350.468,18
0,5	-126.306,92	-183.575,33	-283.999,05	-155.619,19	-368.671,95	-387.958,14
Diagonal 3						
0,2	-48.284,60	-79.618,81	-140.756,23	-91.424,46	-168.396,27	-254.968,58
0,3	-73.185,32	-110.480,66	-178.264,31	-110.436,37	-225.691,84	-291.654,43
0,4	-98.086,04	-141.342,51	-215.772,38	-129.448,27	-282.987,40	-328.340,27
0,5	-122.986,77	-172.204,36	-253.280,45	-148.460,18	-340.282,96	-365.026,11
Diagonal 4						
0,2	-49.782,57	-82.987,60	-153.980,79	-86.776,46	-168.907,63	-244.198,78
0,3	-75.251,51	-113.915,85	-188.732,35	-104.020,56	-218.232,40	-276.255,06
0,4	-100.720,45	-144.844,09	-223.483,90	-121.264,65	-267.557,17	-308.311,35
0,5	-126.189,40	-175.772,34	-258.235,45	-138.508,75	-316.881,94	-340.367,64

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.2.2 Cargas para tanques de 250.000 a 450.000 galones.

- Cargas para torre con seis columnas y un anillo de arriostre horizontal.

Tabla 13-4. Compresión en diagonal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	-711.935,84	-860.488,48	-1.126.410,96	-878.510,80	-1.055.585,98	-1.460.429,58
0,3	-981.818,96	-1.262.781,85	-1.567.834,67	-1.223.181,10	-1.464.517,08	-1.983.089,76
0,4	-1.251.702,07	-1.665.075,22	-2.009.258,38	-1.567.851,40	-1.873.448,19	-2.505.749,93
0,5	-1.521.585,18	-2.067.368,59	-2.450.682,09	-1.912.521,70	-2.282.379,30	-3.028.410,11
Diagonal 2						
0,2	-620.478,91	-714.604,60	-934.571,04	-759.930,73	-904.081,73	-1.228.491,10
0,3	-849.710,85	-1.038.817,94	-1.272.085,39	-1.046.644,65	-1.243.404,45	-1.636.196,39
0,4	-1.078.942,79	-1.363.031,28	-1.609.599,74	-1.333.358,58	-1.582.727,17	-2.043.901,69
0,5	-1.308.174,73	-1.687.244,62	-1.947.114,10	-1.620.072,50	-1.922.049,90	-2.451.606,99

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con seis columnas y dos anillos de arriostre horizontales

Tabla 14-4. Compresión en diagonal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	-514.560,81	-623.785,87	-854.752,15	-679.532,05	-791.946,75	-1.098.755,18
0,3	-753.388,92	-892.861,56	-1.191.025,24	-978.546,63	-1.129.114,50	-1.498.316,46
0,4	-992.217,03	-1.161.937,25	-1.527.298,32	-1.277.561,20	-1.466.282,25	-1.897.877,73
0,5	-1.231.045,14	-1.431.012,95	-1.863.571,41	-1.576.575,78	-1.803.450,00	-2.297.439,01
Diagonal 2						
0,2	-462.964,58	-530.290,88	-699.657,39	-615.776,43	-692.757,43	-931.202,99
0,3	-691.179,59	-781.260,95	-1.004.035,37	-905.172,36	-1.013.025,26	-1.288.665,58
0,4	-919.394,61	-1.032.231,02	-1.308.413,35	-1.194.568,29	-1.333.293,08	-1.646.128,17
0,5	-1.147.609,63	-1.283.201,09	-1.612.791,34	-1.483.964,22	-1.653.560,91	-2.003.590,76

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 14-4 (Continúa). Compresión en diagonal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 3						
0,2	-412.419,25	-494.871,98	-647.908,60	-541.230,51	-632.726,88	-857.876,78
0,3	-599.527,27	-700.831,50	-894.194,51	-768.346,32	-895.458,26	-1.150.608,06
0,4	-786.635,30	-906.791,02	-1.140.480,42	-995.462,14	-1.158.189,63	-1.443.339,33
0,5	-973.743,32	-1.112.750,55	-1.386.766,33	-1.222.577,96	-1.420.921,01	-1.736.070,61

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con seis columnas y tres anillos de arriostre horizontales

Tabla 15-4. Compresión en diagonal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	-481.503,77	-528.474,81	-690.299,90	-604.329,76	-692.410,53	-945.263,83
0,3	-701.427,22	-772.223,35	-986.441,50	-886.302,53	-996.623,28	-1.274.661,32
0,4	-921.350,67	-1.015.971,89	-1.282.583,10	-1.168.275,29	-1.300.836,04	-1.604.058,81
0,5	-1.141.274,13	-1.259.720,43	-1.578.724,70	-1.450.248,06	-1.605.048,80	-1.933.456,31
Diagonal 2						
0,2	-347.374,69	-376.298,43	-463.965,00	-449.406,64	-493.370,08	-640.301,49
0,3	-516.762,59	-559.563,38	-680.690,24	-667.838,88	-726.541,36	-887.806,17
0,4	-686.150,49	-742.828,32	-897.415,48	-886.271,12	-959.712,64	-1.135.310,85
0,5	-855.538,39	-926.093,27	-1.114.140,72	-1.104.703,36	-1.192.883,92	-1.382.815,52
Diagonal 3						
0,2	-337.687,22	-360.332,62	-425.354,66	-434.836,10	-476.226,06	-593.200,92
0,3	-502.484,27	-536.673,34	-628.131,85	-644.503,32	-701.501,00	-826.600,08
0,4	-667.281,32	-713.014,07	-830.909,03	-854.170,54	-926.775,94	-1.059.999,24
0,5	-832.078,37	-889.354,80	-1.033.686,22	-1.063.837,76	-1.152.050,88	-1.293.398,40
Diagonal 4						
0,2	-368.189,41	-394.369,20	-497.779,87	-425.818,56	-518.571,88	-706.731,50
0,3	-533.836,67	-567.951,86	-709.652,98	-610.499,38	-734.736,46	-932.736,10
0,4	-699.483,92	-741.534,52	-921.526,08	-795.180,19	-950.901,03	-1.158.740,70
0,5	-865.131,17	-915.117,18	-1.133.399,19	-979.861,01	-1.167.065,61	-1.384.745,30

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.2.3 Cargas para tanques de 450.000 a 500.000 galones.

- Cargas para torre con ocho columnas y un anillo de arriostre horizontal

Tabla 16-4. Compresión en diagonal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	-814.483,12	-1.073.343,35	-1.483.075,43	-869.492,14	-1.124.566,97	-1.541.571,61
0,3	-1.138.613,39	-1.456.804,10	-2.027.169,26	-1.215.600,71	-1.547.900,03	-2.134.713,10
0,4	-1.462.743,66	-1.840.264,85	-2.571.263,08	-1.561.709,27	-1.971.233,09	-2.727.854,60
0,5	-1.786.873,93	-2.223.725,60	-3.115.356,91	-1.907.817,83	-2.394.566,15	-3.320.996,10
Diagonal 2						
0,2	-724.833,87	-987.695,83	-1.359.977,03	-782.726,14	-1.021.580,87	-1.417.324,66
0,3	-1.003.406,28	-1.325.449,74	-1.837.596,46	-1.090.330,33	-1.394.519,37	-1.951.663,35
0,4	-1.281.978,70	-1.663.203,65	-2.315.215,88	-1.397.934,51	-1.767.457,87	-2.486.002,03
0,5	-1.560.551,12	-2.000.957,56	-2.792.835,31	-1.705.538,69	-2.140.396,37	-3.020.340,72

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con ocho columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 17-4. Compresión en diagonal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	-582.400,26	-759.574,21	-1.036.048,90	-630.498,54	-795.244,41	-1.096.917,16
0,3	-844.839,51	-1.049.639,14	-1.412.009,24	-915.495,25	-1.121.850,77	-1.487.704,35
0,4	-1.107.278,77	-1.339.704,07	-1.787.969,57	-1.200.491,96	-1.448.457,13	-1.878.491,54
0,5	-1.369.718,03	-1.629.769,01	-2.163.929,91	-1.485.488,67	-1.775.063,49	-2.269.278,73
Diagonal 2						
0,2	-538.738,14	-676.791,20	-933.428,14	-577.464,47	-707.366,32	-972.236,84
0,3	-792.201,67	-959.971,00	-1.285.166,88	-852.320,82	-1.017.739,94	-1.347.853,86
0,4	-1.045.665,20	-1.243.150,80	-1.636.905,61	-1.127.177,17	-1.328.113,56	-1.723.470,88
0,5	-1.299.128,74	-1.526.330,60	-1.988.644,35	-1.402.033,52	-1.638.487,19	-2.099.087,90

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 17-4 (Continúa). Compresión en diagonal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 3						
0,2	-477.570,46	-645.922,59	-880.307,60	-528.163,88	-648.933,57	-923.884,97
0,3	-684.484,41	-877.932,40	-1.176.280,69	-759.718,43	-922.778,47	-1.228.258,87
0,4	-891.398,37	-1.109.942,20	-1.472.253,79	-991.272,99	-1.196.623,36	-1.532.632,77
0,5	-1.098.312,33	-1.341.952,01	-1.768.226,89	-1.222.827,55	-1.470.468,26	-1.837.006,68

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con ocho columnas y tres anillos de arriostre horizontales

Tabla 18-4. Compresión en diagonal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [1,2D+E]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	-495.196,95	-603.824,72	-804.401,12	-555.271,31	-658.091,07	-818.232,02
0,3	-738.248,50	-860.803,95	-1.125.702,95	-813.412,27	-941.794,78	-1.164.783,54
0,4	-981.300,05	-1.117.783,17	-1.447.004,77	-1.071.553,22	-1.225.498,50	-1.511.335,07
0,5	-1.224.351,60	-1.374.762,40	-1.768.306,60	-1.329.694,17	-1.509.202,21	-1.857.886,59
Diagonal 2						
0,2	-468.701,92	-539.755,18	-713.731,63	-513.244,92	-586.426,32	-716.599,65
0,3	-697.597,04	-785.878,97	-1.013.345,95	-759.736,24	-846.938,33	-1.046.003,90
0,4	-926.492,16	-1.032.002,75	-1.312.960,28	-1.006.227,56	-1.107.450,34	-1.375.408,15
0,5	-1.155.387,28	-1.278.126,54	-1.612.574,61	-1.252.718,89	-1.367.962,36	-1.704.812,40
Diagonal 3						
0,2	-457.235,20	-524.011,95	-674.493,23	-506.547,00	-557.956,04	-679.113,81
0,3	-682.555,20	-763.916,99	-962.028,05	-749.703,00	-808.803,15	-996.294,66
0,4	-907.875,20	-1.003.822,04	-1.249.562,87	-992.859,00	-1.059.650,25	-1.313.475,51
0,5	-1.133.195,21	-1.243.727,09	-1.537.097,69	-1.236.015,01	-1.310.497,36	-1.630.656,36
Diagonal 4						
0,2	-360.630,08	-469.201,92	-629.012,18	-429.149,69	-497.099,61	-622.561,67
0,3	-542.932,36	-654.273,35	-865.782,56	-623.607,88	-707.605,30	-872.349,36
0,4	-725.234,63	-839.344,77	-1.102.552,94	-818.066,06	-918.111,00	-1.122.137,04
0,5	-907.536,91	-1.024.416,20	-1.339.323,32	-1.012.524,25	-1.128.616,69	-1.371.924,73

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.3 Carga axial a tracción en arriostres diagonales.

Para determinar las cargas a tracción que actúan en los arriostres diagonales de los tanques elevados que se encuentran dentro del alcance de este trabajo se realizara una interpolación o extrapolación en las tablas que se presentan a continuación.

4.5.3.1 Cargas para tanques de 25.000 a 250.000 galones.

- Cargas para Torre con cuatro columnas y un anillo de arriostre horizontal

Tabla 19-4. Tracción en diagonal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 1.						
0,2	96.971,32	162.044,46	233.637,38	163.889,61	261.128,50	366.741,70
0,3	145.752,22	242.851,8	347.642,56	242.617,917	392.868,5	551.068,9
0,4	193.631,58	327.069,68	471.458,89	327.589,33	519.186,63	722.015,71
0,5	241.736,32	410.434,929	592.822,43	410.999,971	646.683,2	896.307,62
Diagonal 2						
0,2	95.451,23	163.916,67	235.138,00	157.688,12	270.083,54	377.364,50
0,3	145.445,7	242.866,522	346.459,3	228.710,67	408.384,1	567.213,1
0,4	184.992,81	327.617,67	460.605,00	311.940,03	525.473,86	715.369,31
0,5	227.151,759	410.918,5	574.044,6	392.117,69	647.066,49	873.948,62

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con cuatro columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 20-4. Tracción en diagonal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 1						
0,2	81.269,44	117.635,82	162.466,43	145.821,18	196.691,37	261.623,39
0,3	122.230,3	175.103,5	240.925,8	217.120,07	293.520,02	380.297,78
0,4	162.487,49	237.220,97	330.941,43	278.272,91	387.005,92	529.233,39
0,5	202.920,6	298.176	418.068	341.962,26	481.327,51	670.603,7

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 20-4 (Continúa). Tracción en diagonal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 2						
0,2	76.071,88	105.763,37	147.238,32	148.671,30	182.103,77	244.520,06
0,3	114.299,4	157.492	215.871,9	216.325,2	273.268,46	348.801,62
0,4	152.978,38	214.609,01	297.873,27	289.436,70	365.833,07	497.360,41
0,5	191.544,5	270.378,93	376.532,7	361.183,8	458.047,7	634.849,9
Diagonal 3						
0,2	71.181,88	105.522,05	144.527,99	125.040,07	184.472,55	246.541,91
0,3	108.798,095	154.211,2	207.722,3	195.903,3	272.353,817	336.960,5
0,4	137.095,38	210.543,95	289.470,14	246.965,70	353.454,17	493.856,99
0,5	167.722,4	264.965,8	366.579,6	302.978,3	436.249,75	634.134

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con cuatro columnas y tres anillos de arriostre horizontal.

Tabla 21-4. Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 1						
0,2	75.229,62	97.741,07	127.589,56	126.313,71	167.405,09	206.300,99
0,3	113.150,30	147.118,30	189.625,40	180.835,97	249.570,10	304.730,90
0,4	150.755,12	196.902,87	260.510,91	247.700,52	330.829,99	419.190,34
0,5	188.438,90	246.585,60	329.184,00	311.479,50	412.316,16	529.642,40
Diagonal 2						
0,2	71.486,37	89.638,24	113.920,99	136.107,14	162.220,83	194.647,50
0,3	107.618,25	135.108,60	167.967,50	202.540,90	242.664,45	287.470,90
0,4	143.247,27	180.265,06	233.411,14	271.622,76	326.032,48	402.333,50
0,5	179.002,00	225.500,00	296.005,50	340.042,60	408.669,40	511.686,30
Diagonal 3						
0,2	68.748,43	81.402,08	100.213,35	133.827,04	150.425,26	175.713,92
0,3	103.796,70	122.032,00	148.178,40	201.307,90	226.008,30	259.130,50
0,4	138.043,63	164.510,53	206.593,58	269.615,49	306.529,81	367.967,27
0,5	172.490,90	206.526,90	262.396,23	337.716,40	385.816,70	470.449,00

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 21-4 (Continúa). Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Diagonal 4						
0,2	59.142,34	79.773,95	99.861,51	108.654,62	145.212,60	168.478,89
0,3	90.462,30	122.534,30	140.974,00	150.687,50	213.717,50	242.071,80
0,4	109.834,59	155.720,55	198.501,82	207.834,52	279.866,46	347.669,83
0,5	132.193,80	191.300,33	251.925,80	261.203,00	346.604,40	445.266,58

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.3.2 Cargas para tanques de 250.000 a 450.000 galones.

- Cargas para torre con seis columnas y un anillo de arriostre horizontal.

Tabla 22-4. Tracción en diagonal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	551.496,13	708.032,35	858.840,32	700.637,11	816.720,35	1.062.128,46
0,3	823.336,34	974.894,50	1.291.410,89	1.054.046,81	1.231.310,70	1.605.266,64
0,4	1.109.827,00	1.505.314,98	1.729.656,43	1.407.456,52	1.645.901,05	2.148.404,82
0,5	1.393.046,31	1.976.033,49	2.166.936,35	1.760.866,22	2.060.491,40	2.691.543,00
Diagonal 2						
0,2	478.751,67	579.727,82	659.953,11	596.602,31	680.412,89	834.880,58
0,3	719.523,86	806.583,77	997.356,11	890.701,94	1.023.217,79	1.261.641,86
0,4	957.828,15	1.223.806,46	1.328.035,03	1.184.801,56	1.366.022,69	1.688.403,13
0,5	1.196.724,75	1.597.973,67	1.660.604,20	1.478.901,18	1.708.827,59	2.115.164,40

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con seis columnas y dos anillos de arriostre horizontales

Tabla 23-4. Tracción en diagonal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	465.416,30	523.194,53	657.371,83	600.210,80	667.016,40	821.517,80
0,3	698.787,30	782.633,70	985.493,60	902.247,99	1.004.677,70	1.239.401,10
0,4	934.014,35	1.051.777,49	1.332.740,37	1.204.285,18	1.342.339,00	1.657.284,40
0,5	1.168.916,40	1.318.787,34	1.675.205,89	1.506.322,37	1.680.000,30	2.075.167,70
Diagonal 2						
0,2	445.474,63	484.348,75	570.767,40	578.458,39	627.356,22	727.494,10
0,3	669.549,00	721.184,08	856.128,14	869.778,76	946.374,12	1.102.195,20
0,4	894.081,37	978.002,03	1.168.295,55	1.161.099,13	1.265.392,01	1.476.896,30
0,5	1.118.584,16	1.230.380,08	1.473.761,30	1.452.419,50	1.584.409,90	1.851.597,40
Diagonal 3						
0,2	370.931,29	410.665,72	475.585,60	470.307,93	523.461,35	609.709,20
0,3	553.822,12	622.658,50	711.883,10	699.690,76	785.301,40	918.198,90
0,4	739.492,80	816.260,24	963.932,26	929.073,58	1.047.141,45	1.226.688,60
0,5	924.583,45	1.014.058,48	1.212.043,50	1.158.456,40	1.308.981,50	1.535.178,30

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con seis columnas y tres anillos de arriostre horizontales

Tabla 24-4. Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	433.143,82	472.035,81	564.022,10	561.826,45	607.716,39	714.253,12
0,3	649.485,10	705.747,70	849.077,70	844.333,70	914.908,76	1.075.610,75
0,4	869.233,62	950.330,49	1.145.394,73	1.126.840,95	1.222.101,13	1.436.968,37
0,5	1.088.264,70	1.192.532,00	1.438.896,40	1.409.348,20	1.529.293,50	1.798.326,00
Diagonal 2						
0,2	415.729,94	443.869,50	507.546,64	543.445,58	576.660,43	650.543,90
0,3	623.707,09	662.062,10	764.832,06	816.330,71	868.838,56	981.153,20
0,4	834.242,55	895.159,21	1.036.123,14	1.089.215,84	1.161.016,68	1.311.762,50
0,5	1.044.240,50	1.124.965,00	1.303.912,80	1.362.100,97	1.453.194,80	1.642.371,80

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 24-4 (Continúa). Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 3						
0,2	404.165,76	424.621,77	466.993,17	524.208,99	555.529,05	606.199,57
0,3	606.120,30	632.811,02	706.139,60	785.945,79	837.451,70	917.155,58
0,4	811.871,34	858.460,09	960.306,57	1.047.682,59	1.119.374,35	1.228.111,59
0,5	1.016.782,98	1.080.270,00	1.210.718,40	1.309.419,39	1.401.297,00	1.539.067,60
Diagonal 4						
0,2	329.405,07	349.658,61	395.767,76	387.829,98	445.965,85	512.350,30
0,3	485.052,11	537.948,36	590.508,97	572.781,98	664.013,80	764.206,60
0,4	654.568,22	687.248,68	803.126,81	757.733,99	882.061,75	1.016.062,90
0,5	820.934,23	845.405,00	1.011.275,50	942.686,00	1.100.109,70	1.267.919,20

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.3.3 Cargas para tanques de 450.000 a 500.000 galones.

- Cargas para torre con ocho columnas y un anillo de arriostre horizontal

Tabla 25-4. Tracción en diagonal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	648.132,94	786.489,13	1.089.008,90	644.698,64	768.221,58	998.845,14
0,3	971.729,03	1.182.955,36	1.642.641,10	968.908,20	1.176.789,14	1.518.138,07
0,4	1.295.325,11	1.579.421,58	2.196.273,30	1.301.390,91	1.565.140,77	2.041.355,69
0,5	1.619.543,58	1.975.887,80	2.749.905,50	1.632.961,42	1.960.510,70	2.565.024,81
Diagonal 2						
0,2	563.617,31	709.141,23	964.472,70	521.204,78	559.402,28	671.116,61
0,3	842.163,37	1.058.392,08	1.448.495,20	775.218,53	863.280,96	1.028.626,23
0,4	1.120.709,42	1.407.642,94	1.932.517,70	1.033.414,83	1.143.774,32	1.352.435,59
0,5	1.398.701,83	1.756.893,80	2.416.540,20	1.292.174,83	1.433.872,51	1.685.065,11

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con ocho columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 26-4. Tracción en diagonal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	511.897,62	596.875,53	782.546,70	542.109,62	622.178,74	783.442,72
0,3	770.626,64	897.368,56	1.177.067,50	817.445,94	936.639,63	1.161.483,24
0,4	1.029.355,66	1.197.861,58	1.571.588,29	1.094.788,73	1.237.684,73	1.596.156,31
0,5	1.288.084,68	1.498.354,60	1.966.109,08	1.371.917,75	1.541.791,00	2.018.215,79
Diagonal 2						
0,2	498.515,16	570.516,91	724.566,64	515.687,50	562.064,30	668.597,75
0,3	749.767,11	859.490,01	1.090.657,60	775.174,78	844.401,38	982.760,43
0,4	1.001.019,06	1.148.463,11	1.456.748,55	1.035.870,25	1.126.929,93	1.384.102,31
0,5	1.252.271,01	1.437.436,21	1.822.839,50	1.296.412,86	1.409.485,81	1.766.046,05
Diagonal 3						
0,2	412.225,71	498.741,15	643.746,99	413.084,62	437.029,27	487.446,94
0,3	615.188,03	739.066,20	955.267,86	615.651,79	643.428,51	729.032,36
0,4	818.150,35	979.391,25	1.266.788,73	801.323,61	872.777,93	994.934,90
0,5	1.021.112,67	1.219.716,30	1.578.309,60	989.961,66	1.096.635,53	1.255.224,26

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con ocho columnas y tres anillos de arriostre horizontales

Tabla 27-4. Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 1						
0,2	460.205,10	516.790,04	646.584,70	499.733,58	547.985,41	670.690,70
0,3	695.230,70	777.739,68	974.988,89	750.717,70	847.930,77	995.042,936
0,4	930.256,30	1.038.689,32	1.303.393,09	1.003.340,59	1.113.451,05	1.358.560,80
0,5	1.165.281,90	1.299.638,96	1.631.797,29	1.255.635,63	1.387.747,22	1.713.416,366
Diagonal 2						
0,2	448.376,81	491.818,90	600.320,03	484.722,42	511.457,34	606.529,63
0,3	674.772,61	740.453,04	905.909,96	726.434,27	799.052,78	896.658,37
0,4	901.168,42	989.087,17	1.211.499,88	970.162,24	1.043.163,50	1.235.299,82
0,5	1.127.564,23	1.237.721,30	1.517.089,80	1.213.434,13	1.298.211,77	1.563.288,018

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 27-4 (Continúa). Tracción en diagonal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Diagonal 3						
0,2	436.426,05	477.272,53	568.700,20	462.412,32	476.617,48	553.531,45
0,3	658.552,60	719.199,78	860.210,10	688.549,30	769.839,60	817763,53
0,4	880.679,15	961.127,04	1.151.720,00	917.860,23	978.613,05	1.128.436,19
0,5	1.102.805,70	1.203.054,30	1.443.229,90	1.146.154,45	1.208.203,23	1.428.964,414
Diagonal 4						
0,2	328.564,32	392.540,04	492.388,42	354.140,92	370.495,00	407.253,28
0,3	502.612,67	579.873,88	732.905,84	508.828,80	638.430,50	610.361,61
0,4	676.661,03	767.207,72	973.423,26	676.055,73	755.711,96	808.424,20
0,5	850.709,39	954.541,56	1.213.940,67	838.789,92	909.268,20	1.007.615,76

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.4 Carga axial a compresión en arriostres horizontales.

Para determinar las cargas a tracción que actúan en los arriostres diagonales de los tanques elevados que se encuentran dentro del alcance de este trabajo se realizara una interpolación o extrapolación en las tablas que se presentan a continuación.

4.5.4.1 Cargas para tanques de 25.000 a 250.000 galones.

- Cargas para Torre con cuatro columnas y un anillo de arriostre horizontal

Tabla 28-4. Compresión en horizontal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Arriostre horizontal 1.						
0,2	-17.135,27	-49.240,44	-71.460,34	-21.473,68	-77.081,15	-117.461,62
0,3	-25.495,55	-71.689,80	-102.593,77	-30.236,70	-119.273,00	-177.074,70
0,4	-30.016,17	-93.379,89	-128.382,44	-41.421,96	-139.506,72	-197.342,37
0,5	-35.496,70	-115.259,80	-155.507,30	-52.001,66	-164.424,16	-227.446,40

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con cuatro columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 29-4. Compresión en horizontal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Arriostre horizontal 1						
0,2	-4.700,75	-18.800,05	-33.642,35	-9.181,38	-27.456,42	-54.214,03
0,3	-7.743,77	-26.498,30	-45.007,29	-11.473,40	-39.781,50	-78.676,87
0,4	-8.124,90	-35.618,21	-61.716,65	-17.889,17	-48.446,31	-103.139,71
0,5	-9.171,50	-44.382,70	-77.089,90	-23.274,00	-58.026,19	-135.629,77
Arriostre horizontal 2						
0,2	-6.709,08	-34.085,62	-59.967,50	-7.343,35	-49.152,42	-94.566,35
0,3	-10.338,80	-47.492,00	-80.143,80	-10.923,13	-69.771,73	-134.856,82
0,4	-12.709,98	-63.624,12	-110.072,33	-13.557,21	-77.568,10	-175.147,28
0,5	-15.395,80	-79.074,80	-137.562,80	-16.427,72	-88.570,20	-230.143,66

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con cuatro columnas y tres anillos de arriostre horizontal.

Tabla 30-4. Compresión en horizontal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales.

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Arriostre horizontal 1						
0,2	-1.853,63	-10.219,58	-17.509,00	-5.492,33	-15.330,00	-26.087,92
0,3	-2.443,84	-16.356,88	-22.723,80	-7.780,20	-21.674,80	-33.882,50
0,4	-3.034,06	-17.192,82	-32.352,66	-14.999,93	-29.503,37	-56.422,87
0,5	-3.263,30	-19.354,10	-40.878,00	-20.986,70	-36.961,00	-75.276,80

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 30-4 (Continúa). Compresión en horizontal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	50.000			100.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	10	20	30	10	20	30
Arriostre horizontal 2						
0,2	-2.621,02	-14.050,66	-25.040,70	-2.701,00	-17.020,93	-32.792,68
0,3	-3.771,60	-21.895,30	-33.216,40	-4.061,96	-24.136,10	-40.113,00
0,4	-4.922,17	-24.237,21	-47.409,70	-5.422,92	-30.401,48	-70.797,57
0,5	-5.964,80	-27.954,80	-60.098,60	-7.177,54	-36.879,30	-95.641,08
Arriostre horizontal 3						
0,2	-3.391,02	-20.662,41	-35.129,15	-5.437,41	-27.705,89	-47.902,27
0,3	-4.869,90	-33.102,70	-45.714,46	-7.080,37	-38.056,60	-74.439,00
0,4	-5.832,86	-34.631,46	-65.186,30	-9.879,55	-46.653,78	-100.975,72
0,5	-6.924,80	-38.888,10	-82.436,50	-12.389,67	-55.689,34	-135.359,70

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.4.2 Cargas para tanques de 250.000 a 450.000 galones.

- Cargas para torre con seis columnas y un anillo de arriostre horizontal

Tabla 31-4. Compresión en horizontal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Arriostre horizontal 1						
0,2	-67.496,88	-97.607,39	-191.902,83	-75.747,97	-131.465,25	-263.389,31
0,3	-100.275,33	-153.294,32	-308.916,08	-104.423,28	-190.463,89	-370.383,68
0,4	-121.244,54	-201.626,89	-384.585,30	-133.098,59	-249.462,53	-477.378,04
0,5	-144.839,91	-252.153,15	-470.461,60	-161.773,90	-308.461,17	-584.372,40

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con seis columnas y dos anillos de arriostre horizontales

Tabla 32-4. Compresión en horizontal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Arriostre horizontal 1						
0,2	-16.467,68	-35.919,98	-95.767,84	-24.451,10	-48.533,11	-127.152,13
0,3	-20.976,93	-60.252,18	-146.411,15	-34.794,90	-73.208,82	-175.458,66
0,4	-37.081,15	-73.667,59	-199.669,39	-45.138,70	-97.884,53	-223.765,18
0,5	-50.603,45	-89.707,29	-252.273,90	-55.482,50	-122.560,24	-272.071,70
Arriostre horizontal 2						
0,2	-19.748,60	-61.602,09	-177.184,10	-27.179,98	-69.941,40	-230.694,93
0,3	-25.091,77	-90.366,62	-263.696,03	-38.258,65	-101.959,50	-311.665,96
0,4	-43.995,26	-119.131,16	-351.398,35	-49.337,32	-133.977,60	-392.636,98
0,5	-56.118,59	-137.557,65	-438.803,07	-60.415,99	-165.995,70	-473.608,00

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con seis columnas y tres anillos de arriostre horizontales

Tabla 33-4. Compresión en horizontal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Arriostre horizontal 1						
0,2	-8.317,25	-16.650,53	-47.137,30	-10.122,88	-20.439,45	-77.521,47
0,3	-12.387,63	-24.135,98	-63.032,40	-15.964,35	-29.983,50	-100.322,04
0,4	-17.847,98	-36.558,47	-104.871,50	-21.805,83	-39.527,55	-123.122,60
0,5	-23.047,20	-47.896,90	-140.224,60	-27.647,31	-49.071,60	-145.923,16
Arriostre horizontal 2						
0,2	-15.676,31	-31.257,57	-78.595,73	-17.444,17	-39.254,25	-128.761,18
0,3	-19.391,00	-45.605,76	-106.858,30	-26.217,75	-56.992,30	-168.348,46
0,4	-32.262,35	-67.790,29	-182.209,07	-34.991,32	-74.730,35	-207.935,73
0,5	-43.118,48	-88.275,82	-245.787,80	-43.764,90	-92.468,40	-247.523,00

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 33-4 (Continúa). Compresión en horizontal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	300.000			400.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Arriostre horizontal 3						
0,2	-12.689,40	-29.534,10	-108.593,13	-13.015,19	-34.343,23	-177.192,91
0,3	-21.084,50	-43.871,62	-142.308,17	-22.265,93	-46.711,76	-218.406,38
0,4	-29.479,59	-58.209,13	-233.811,43	-31.516,66	-59.080,28	-259.619,84
0,5	-40.869,15	-70.041,63	-296.420,59	-40.767,40	-71.448,80	-300.833,30

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.5.4.3 Cargas para tanques de 450.000 a 500.000 galones.

- Cargas para torre con ocho columnas y un anillo de arriostre horizontal

Tabla 34-4. Compresión en horizontal de estructura con un anillo de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL DIAGONAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Arriostre horizontal 1						
0,2	-69.386,57	-149.979,43	-250.068,62	-87.118,49	-177.791,04	-253.800,18
0,3	-98.990,94	-211.403,92	-363.794,32	-142.103,00	-235.100,67	-405.501,29
0,4	-128.595,31	-272.828,41	-477.520,01	-157.339,61	-310.623,15	-546.365,55
0,5	-157.365,70	-334.252,90	-591.245,70	-181.321,52	-388.180,22	-716.394,97

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con ocho columnas y dos anillos de arriostre horizontal.

Tabla 35-4. Compresión en horizontal de estructura con dos anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Arriostre horizontal 1						
0,2	-32.540,81	-74.253,29	-127.081,52	-36.991,42	-78.605,65	-133.610,70
0,3	-49.579,65	-106.523,32	-178.307,44	-57.347,34	-115.242,57	-197.073,00
0,4	-66.618,49	-138.793,36	-229.533,35	-69.296,26	-157.934,17	-247.135,75
0,5	-83.657,33	-171.063,40	-280.759,26	-82.901,18	-201.564,40	-300.016,20
Arriostre horizontal 2						
0,2	-16.979,38	-82.870,25	-182.670,10	-26.310,11	-83.935,80	-189.331,84
0,3	-25.213,88	-110.048,50	-241.738,30	-38.965,53	-122.271,81	-293.941,13
0,4	-33.448,39	-137.226,75	-300.806,50	-40.578,26	-174.807,53	-314.576,36
0,5	-41.682,90	-164.405,00	-359.874,70	-49.738,47	-224.419,48	-377.198,63

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Cargas para torre con ocho columnas y tres anillos de arriostre horizontales

Tabla 36-4. Compresión en horizontal de estructura con tres anillos de arriostres horizontales

Cv	CARGA AXIAL A. HORIZONTAL (N) [Sx]					
	Capacidad (Galones)					
	450.000			500.000		
	Altura (m)			Altura (m)		
	15	20	30	15	20	30
Arriostre horizontal 1						
0,2	-14.442,35	-28.647,24	-64.056,32	-16.518,28	-34.535,17	-62.490,29
0,3	-24.117,59	-41.345,77	-93.116,12	-25.509,12	-45.406,88	-90550,49
0,4	-33.792,83	-54.044,31	-122.175,91	-34.499,96	-65.876,23	-122.956,05
0,5	-43.468,08	-66.742,85	-151.235,70	-45.993,00	-84.098,85	-154070,635
Arriostre horizontal 2						
0,2	-18.049,69	-46.745,15	-118.748,48	-22.455,75	-59.632,40	-87.900,66
0,3	-30.637,23	-64.929,30	-170.921,66	-34.037,61	-74.751,09	-127366,092
0,4	-43.224,76	-83.113,45	-223.094,83	-45.619,48	-109.215,24	-173.061,98
0,5	-55.812,30	-101.297,60	-275.268,00	-61.558,70	-138.958,72	-216773,712
Arriostre horizontal 3						
0,2	-7.633,50	-28.758,31	-102.763,55	-8.333,83	-41.020,37	-102.527,40
0,3	-9.250,19	-33.960,64	-135.333,40	-10.887,25	-57.716,12	-137.845,46
0,4	-10.866,89	-39.162,97	-167.903,25	-11.346,32	-74.411,88	-168.955,32
0,5	-12.483,59	-44.365,30	-200.473,10	-13.008,69	-95.864,27	-200.758,61

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.6 API SolidWorks

La aplicación elaborada en SolidWorks permite modelar automáticamente los tanques elevados que se han diseñado en la hoja de cálculo. Se ha elaborado esta aplicación con la ayuda del grabador de macros de SolidWorks y utilizando las funciones de *Visual Basic for Applications* (VBA) en la que se realizó la programación. Esta aplicación llamada “Generador de Tanques Elevados (SOLIDWORKS)” permite cargar los datos obtenidos del pre-diseño en la hoja electrónica y posteriormente generar automáticamente la modelación de los tanques elevados de acero.

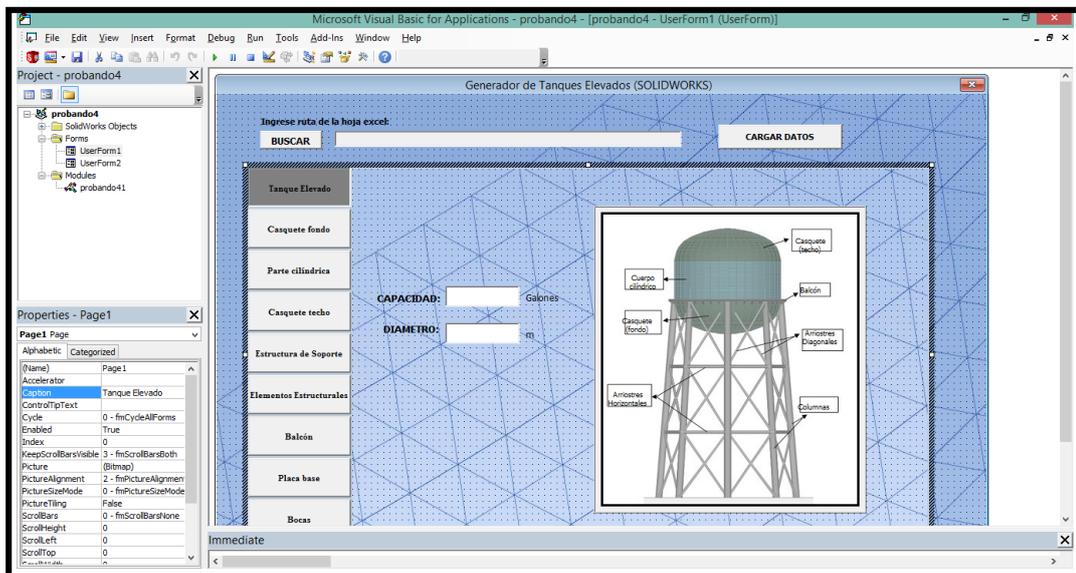


Figura 1-4. Formulario de la aplicación

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

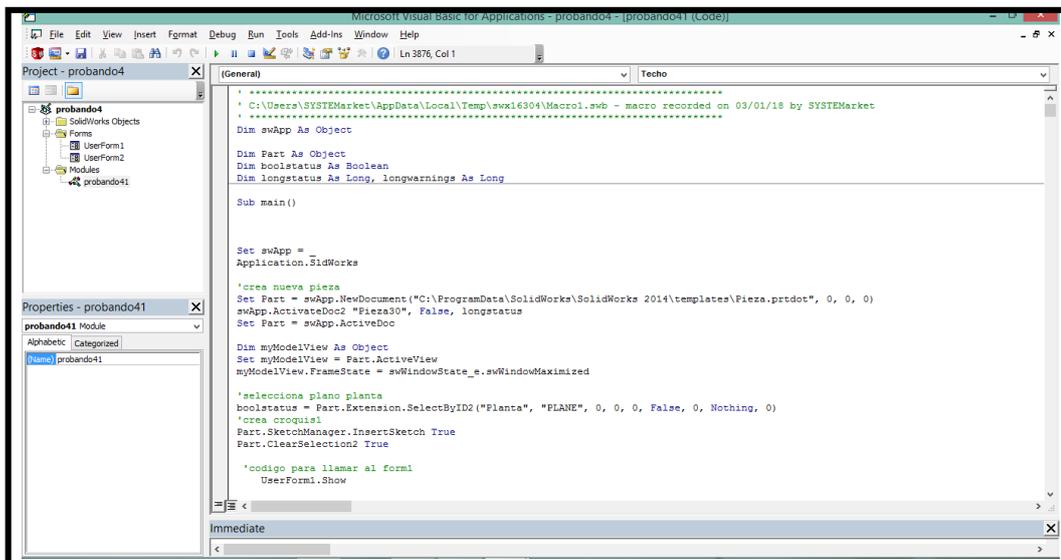


Figura 1-4. Parte del código generado al grabar la macro

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4.7 Aplicación de la hoja electrónica

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación de la hoja electrónica con los siguientes datos:

Capacidad: 500.000 galones

Altura de la estructura de soporte: 21.17 m

Ubicación: Guayaquil

Perfil de suelo: C

Se determina la geometría del tanque elevado en la primera pestaña llamada “GEOMETRA” de la siguiente manera:

1. Se ingresa la capacidad de almacenamiento del tanque, en esta caso 500.000 galones, la pestaña recomienda un diámetro mínimo de 15,2 m y un máximo de 17,1 m correspondientes a la capacidad ingresada, posteriormente el usuario ingresa el valor del diámetro que considere adecuado, para este caso se aplica un diámetro de 16 metros que se encuentra dentro del rango recomendado.

The image shows a screenshot of a spreadsheet interface with a light green background. It contains two tables and a text input field. The first table is titled 'CAPACIDAD NOMINAL' and has two rows: 'CAPACIDAD:' with '500.000,00 US gal.' and '1.892,71 m3'. The second table is titled 'DIÁMETROS RECOMENDADOS (AWWA)' and has two columns: 'Mínimo' with '15,2 m' and 'Máximo' with '17,1 m'. Below the tables, the text 'Diámetro (D) =' is followed by a yellow input box containing the number '16' and the unit 'm'.

CAPACIDAD NOMINAL	
CAPACIDAD:	500.000,00 US gal.
	1.892,71 m3

DIÁMETROS RECOMENDADOS (AWWA)	
Mínimo	Máximo
15,2 m	17,1 m

Diámetro (D) = 16 m

Figura 3-4. Pestaña 1, capacidad y diámetro.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

2. Ahora se determina las dimensiones del casquete inferior, la hoja electrónica recomienda rangos para los radios de abombado R_d (entre 12,8 y 16 m) y de reborde R_k (entre 1,92 y 8 m) el usuario debe ingresar los valores que considere adecuado para dichos radios, para este caso se aplicó un radio de abombado de 12,8 m y de reborde de 4 m. La pestaña calcula todas las dimensiones requeridas para el casquete de fondo.

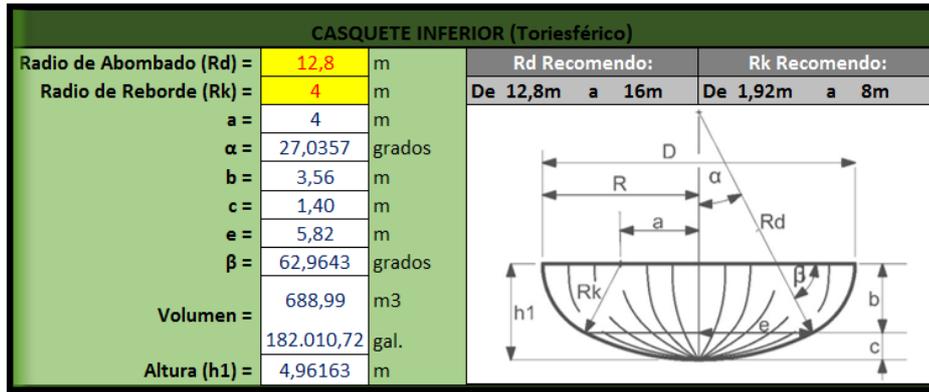


Figura 4-4. Pestaña 1, casquete inferior.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- La hoja electrónica calcula la altura de agua contenida en la parte cilíndrica del tanque h_n , el usuario debe ingresar la altura total de la parte cilíndrica h_2 que como se puede observar en la figura 3-4 se aplicó el mismo valor que la altura del agua (5,987 m). Además debe ingresarse en número de anillos o virolas que se requiera para la parte cilíndrica del tanque, la cual se aplica 3 anillos para este tanque, adicionalmente debe ingresarse la altura de cada virola, hay que recordar que la altura máxima de las planchas que se puede conseguir en el mercado es de 2,4 metros y la suma de todas las alturas de los anillos debe ser igual a la altura de la parte cilíndrica del tanque, como se puede observar en la imagen se colocó dos virolas de 2 metros y una de 1,987 metros que sumados nos da 5,987 metros igual a la altura h_2 .

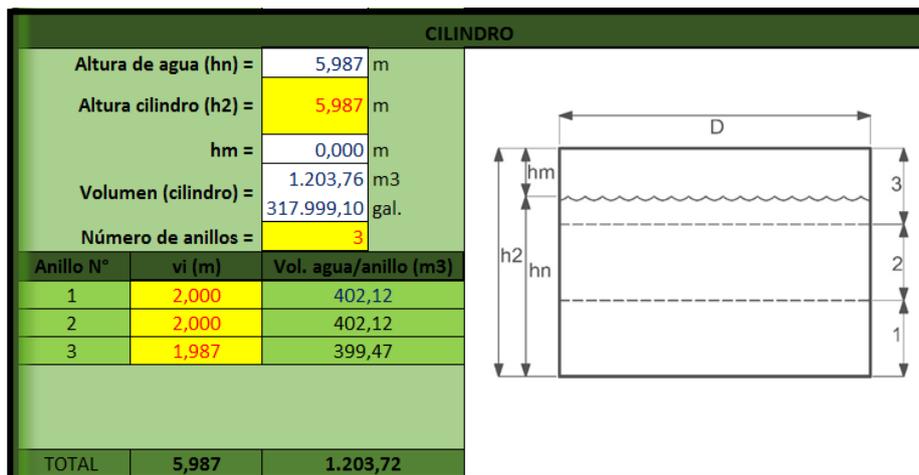


Figura 5-4. Pestaña 1, cilindro.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Para determinar las dimensiones del casquete de techo se utiliza el mismo procedimiento que para el casquete de fondo, en este caso se utiliza los mismos radios de abombado y

de reborde (12,8 y 4 m respectivamente), debido a que por estética es recomendable usar las mismas dimensiones en los casquetes de techo y fondo.

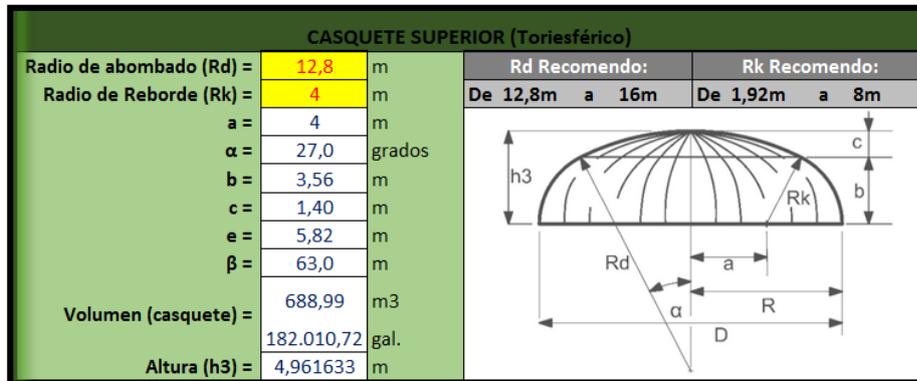


Figura 6-4. Pestaña 1, casquete de techo.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Ahora para determinar las dimensiones de la estructura, se debe ingresar la altura de la estructura de soporte, la inclinación de las columnas y el número de anillos de arriostre horizontal que se requiera, en este caso se ingresa una altura de 21,17 metros con una inclinación de las columnas de 0,08 y un anillo de arriostre horizontal. La hoja electrónica determina que se requiere 8 columnas para la estructura y determina las dimensiones de la estructura de soporte vista en planta.

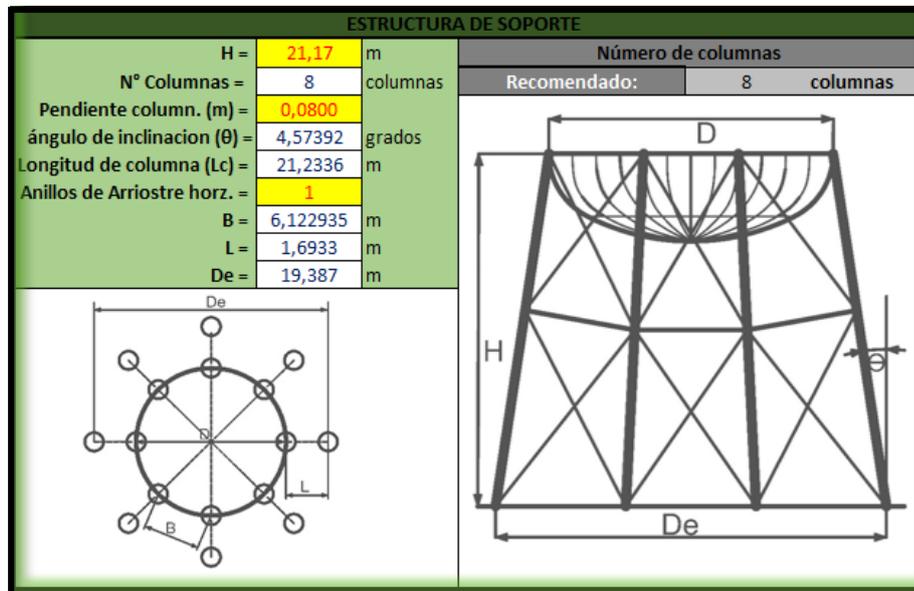


Figura 7-4. Pestaña 1, estructura de soporte.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

6. Mientras se va definiendo las dimensiones del tanque elevado, la pestaña muestra dos graficas a escala del tanque elevado, una de la vista lateral y otra de la vista en planta de tanque, esto para que el usuario pueda darse una idea de las proporciones con las que va quedando el tanque.

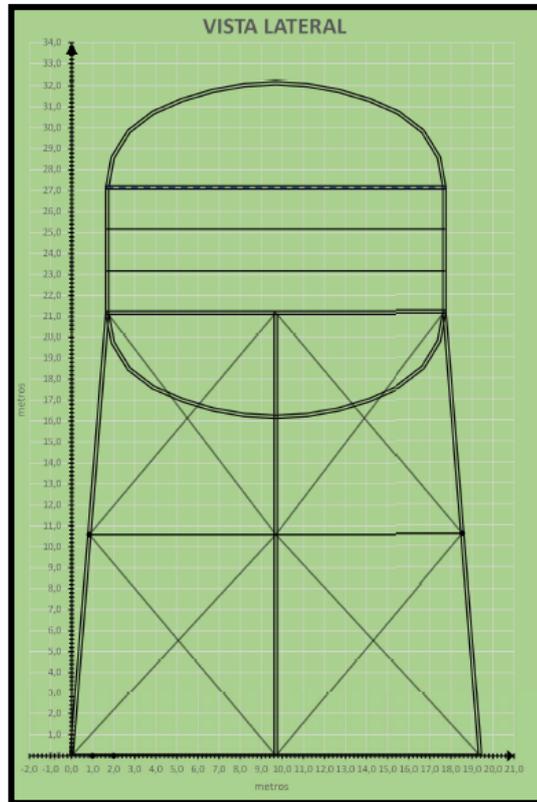


Figura 8-4. Pestaña 1, vista lateral del tanque elevado.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

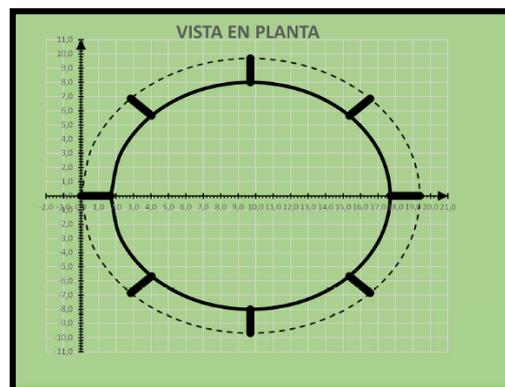


Figura 9-4. Pestaña 1, vista en planta del tanque elevado.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Para determinar los espesores del tanque de acero se hace uso de la segunda pestaña llamada “ESPESORES TANQUE” y se determina de la siguiente manera:

1. Algunos datos determinados en la pestaña anterior son necesarios en esta pestaña y se muestran en las casillas con fondo blanco, mientras que como datos se debe ingresar la eficiencia de soldadura, que en este caso se aplica 0,85 para juntas de doble ranura con penetración completa, este dato se puede obtener de la tabla 10-3. Adicionalmente se ingresa el peso específico del agua (9.800 N/m^3), este dato es útil para determinar el peso del agua.

CAPACIDAD =	500000	Gal.
DIÁMETRO (D) =	16	m
ALTURA CILINDRO (h2) =	5,987	m
ALTURA DE LA CARCASA =	15,910	m
N° DE ANILLOS =	3	
EFIC. SOLDADURA (E) =	0,85	
PESO ESPECÍFICO LIQ. =	9800	N/m3

Figura10-4. Pestaña 2, datos para determinar los espesores del tanque.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

2. Se propone diferentes niveles a analizar como se puede observar en la figura 9-4, el número de niveles depende del número de anillos o virolas que se utilice en el tanque de acero.

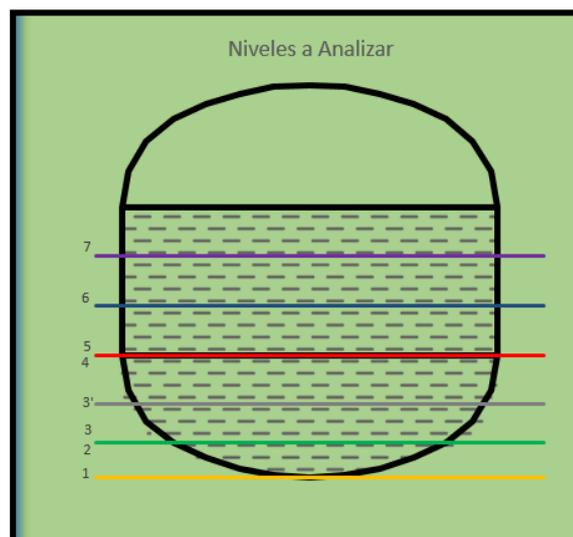


Figura 11-4. Pestaña 2, niveles a analizar en el tanque de acero.

3. Para cada nivel se calcula las tensiones unitarias tanto para la parte cilíndrica como en el casquete de fondo, en la parte cilíndrica se analizan tres puntos correspondientes a las tres virolas del tanque, mientras que en casquete de fondo se analizan cinco puntos.

TENSIONES UNITARIAS (PARTE CILÍNDRICA)								
Nivel	Cabeza de líquido (m)	P(kPa)	R1(m)	R2(m)	R horz.(m)	Vol.(m3)	W (kN)	Area (m2)
7	1,99	19,47	Infinito	8,00	8,00	399,47	-3.914,83	201,06
6	3,99	39,07	Infinito	8,00	8,00	801,60	-7.855,65	201,06
5	5,99	58,67	nfinito	8,00	8,00	1.203,72	-11.796,46	201,06
Nivel	T1(kN/m)	T1(lb/in)	T2(kN/m)	T2(lb/in)	T max (kN/m)			
7	0,00	0,00	155,77	889,44	155,77			
6	0,00	0,00	312,57	1.784,79	312,57			
5	0,00	0,00	469,37	2.680,14	469,37			

Figura 12-4. Pestaña 2, Tensiones unitarias en la parte cilíndrica

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

TENSIONES UNITARIAS (CASQUETE DE FONDO)								
Nivel	Cabeza de líquido (m)	P(KPa)	R1(m)	R2(m)	R horz.(m)	Vol. (m3)	W(kN)	Area (m2)
4	5,99	58,67	4,00	8,00	8,00	688,99	6.752,06	201,06
3'	7,42	72,76	4,00	8,29	7,73	406,25	3.981,23	187,85
3	9,55	93,59	4,00	12,80	5,82	75,81	742,92	106,35
2	9,55	93,59	12,80	12,80	5,82	75,81	742,92	106,35
1	10,95	107,29	12,80	12,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Nivel	T1(kN/m)	T1(lb/in)	T2(kN/m)	T2(lb/in)	T max (kN/m)			
4	369,01	2.107,10	-268,66	-1.534,06	369,01			
3'	389,26	2.222,70	-203,48	-1.161,89	389,26			
3	643,67	3.675,42	-861,82	-4.921,09	861,82			
2	643,67	3.675,42	554,25	3.164,82	643,67			
1	686,69	3.921,06	686,69	3.921,06	686,69			

Figura 13-4. Pestaña 2, Tensiones unitarias en el casquete de fondo.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4. Debe ingresarse los esfuerzos admisibles para cada nivel. Se recomienda que en los puntos en donde se unen las columnas con el tanque de acero se utilice un esfuerzo admisible máximo de 75,8 MPa, mientras que para el resto del tanque se puede tomar el esfuerzo admisible de la tabla 11-3 que depende del esfuerzo de fluencia del material que se vaya a utilizar para el taque. En este caso se colocara el esfuerzo admisible de 75,8 MPa en todos los niveles para ser más conservadores. No se agrega un espesor de corrosión por lo que se deja en cero las casillas y el programa determina los espesores mínimo que se puede aplicar a cada nivel, el usuario debe ingresar un valor igual o mayor al espesor mínimo que determina la hoja electrónica, que en este caso se aplica un espesor de 15 mm para la parte abombada del casquete de fondo, el mismo espesor se aplica para la parte de reborde o nudillo del casquete de fondo debido que se recomienda que el espesor sea uniforme en todo el casquete, en el primer anillo se aplica un espesor de 12 mm para no tener cambios drásticos en los espesores del tanque, en los anillos 2 y 3 se aplica un espesor de 6,35 mm.

Espesores y Esfuerzos												
	Niveles	Sa (Mpa)	S.a*E	t cal (mm)	t cal (in)	t corr. (mm)	t min (mm)	t usar (mm)	S1 (Mpa)	S2 (Mpa)	SVM (Mpa)	SVM (Psi)
Abombado Fondo	1	75,80	64,43	10,66	0,42	0,00	10,66	15,00	45,779	45,779	45,78	6.639,70
	2	75,80	64,43	9,99	0,39				42,911	36,950	40,26	5.839,63
Nudillo Fondo	3	75,80	64,43	13,38	0,53				42,911	-57,455	87,22	12.650,62
	3'	75,80	64,43	6,04	0,24	0,00	13,38	15,00	25,950	-13,565	34,78	5.044,03
	4	75,80	64,43	5,73	0,23				24,601	-17,910	36,97	5.361,66
Anillo 1	5	75,80	64,43	7,28	0,29	0,00	7,28	12,00	0,000	39,114	39,11	5.672,98
Anillo 2	6	75,80	64,43	4,85	0,19	0,00	6,35	6,35	0,000	49,223	49,22	7.139,20
Anillo 3	7	75,80	64,43	2,42	0,10	0,00	6,35	6,35	0,000	24,530	24,53	3.557,79
		75,80										
		75,80										
		75,80										

Figura 14-4. Pestaña 2, espesores y esfuerzos determinados para el tanque.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

5. En la segunda parte de esta pestaña se determina el espesor del casquete de techo, en este caso se debe ingresar una carga muerta y una carga viva de techo, se aplica una carga muerta de $0,47 \text{ kN/m}^2$ y una carga viva mínima de $0,72 \text{ kN/m}^2$, la pestaña calcula un espesor mínimo de 3,92 mm pero el espesor mínimo permitido es de 4,76 mm sin embargo se aplica un espesor de 6,35 mm para mantener el mismo espesor que los últimos anillos del tanque.

ESPESOR DE TECHO (REF. API 650)	
Radio techo (r) =	12,8 m
carga muerta de techo =	0,47 kN/m ²
carga viva de techo =	0,72 kN/m ²
Combinación de carga (B) =	1,19 kN/m ²
Esesor calculado (t min) =	3,922 mm
Esesor mínimo permitido (t) =	4,76 mm
Esesor a usar (t usar) =	6,35 mm
$t_{min} = \frac{r}{2,4} \sqrt{\frac{B}{2,2}}$	

Figura 15-4. Pestaña 2, espesores de techo.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Una vez definida los espesores del tanque se ingresa a la pestaña “PESO TANQUE” en la que se determina el peso del tanque de acero y del agua, de la siguiente manera:

1. En la primera parte de esta pestaña se ingresa como dato el peso específico del acero (76.972,86 N/m³), el resto de datos son extraídos de las pestañas anteriores. La pestaña se encarga de calcular el peso de cada parte del tanque metálico y el peso total de mismo, el cual da un valor de 704.391,80 N.

PESO CARCASA	
Capacidad =	1.892,71 m ³
Diámetro tanque (D) =	16 m
N° Anillos =	3
Peso específico acero =	76.972,86 N/m ³

Figura 16-4. Pestaña 3, datos para calcular el peso.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

	Espesor (mm)	Área (m2)	Peso (N)	Peso (Lb)
Abombado Fondo	15	112,49	129.883,89	29.199,06
Reborde Fondo	15	200,02	230.944,26	51.918,34
Anillo 1	12	100,53	92.857,87	20.875,28
Anillo 2	6,35	100,53	49.137,29	11.046,50
Anillo 3	6,35	99,88	48.817,90	10.974,70
Nudillo techo Abombado techo	6,35	200,02	97.766,40	21.978,76
	6,35	112,49	54.984,18	12.360,94
TOTAL =			925,97	704.391,80
PESO TANQUE =			704.391,80 N	158.353,58 Lb

Figura 17-4. Pestaña 3, peso del tanque.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- En la segunda parte de esta pestaña se determina el peso del agua almacenada en el tanque de acero, que resulta valor de 18.548.521,42 N.

	Volumen de agua (m3)	Peso de agua	
		N	lb
Abombado fondo	54,20	531.138,52	119.404,69
Reborde fondo	634,79	6.220.920,96	1.398.518,67
Anillo1	402,12	3.940.813,82	885.930,19
Anillo 2	402,12	3.940.813,82	885.930,19
Anillo 3	399,47	3.914.834,29	880.089,76
Total	1.892,71	18.548.521,42	4.169.873,50
PESO AGUA =		18.548.521,42 N	4.169.873,50 Lb

Figura 18-4. Pestaña 3, peso del líquido.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Finalmente esta pestaña calcula la sumatoria de los pesos del tanque y del agua, dando un valor de 19.252.913,21 N

PESO TOTAL (TANQ.+AG.) =	19.252.913,21	N
	4.328.227,07	Lb

Figura 19-4. Pestaña 3, peso total.
 Realizado por: Willian Inchilema, 2017

En la pestaña “PRE-DISEÑO COLUMNA” se determina el área y el radio de giro requerido para la columna de la estructura de soporte, se utilizara un acero con un esfuerzo de fluencia de 250 MPa y se asume una relación de esbeltez de 50. La hoja electrónica propone una sección transversal de 206,97 cm² y un radio de giro de la sección de 31,85 cm.

COLUMNA (PRE-DISEÑO) REF. AISC 360 cap. E

Datos:		Nomenclatura					
N° columnas =	8	Lc:	longitud de la columna completa.				
Inclinación columna =	4,57	Lc tramo:	longitud de la columna no arriostrada				
Lc =	21,23	Fy:	Tensión mínimo de fluencia del materia.				
Anillos arriostre horz. =	1	E:	Módulo de elasticidad de acero (200000 MPa).				
Lc tramo =	10,62	KL/r:	Relación de esbeltez.				
PROPIEDADES DEL MATERIAL		Fe:	Tensión de pandeo elástico.				
Fy =	250,00	Mpa	36,26	kpsi			
E =	200.000,00	Mpa	29.007,54	Kpsi			
RELACION DE ESBELTEZ:		Fcr:	Tensión crítico.				
KL/r (Asumir) =	50	Pu:	Carga factorizada				
CARGAS:		Pu/columna:	carga axial aplicada en cada columna.				
Peso tanque (PP) =	88.330,28	N/col.	19,86	Klb/col.			
Peso agua (PA) =	2.325.972,75	N/col.	522,899476	Klb/col.			
C.M.adicional (Di) =	0,00	N/col.	0	Klb/col.			
Carga viva (L) =	10.156,74	N/col.	2,28	Klb/col.			
		Pu =	2.913.414,42	N/col.	654,96	Klb/col.	$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 133,218918$
F.mayr. (sismo) =	1,40						
CARGA AXIAL EN LA COLUMNA:							
Pu mayorado =	4.078.780,19	N/col.	916,95	klb/col.			
ÁREA REQUERIDA (A req.)							
Fe =	789,57	Mpa	114,52	Kpsi			
Fcr =	218,97	Mpa	31,76	kpsi			
A req. =	206,97	cm ²	32,08	in ²			
RADIO DE GIRO REQUERIDO (r gir.)							
Lc tramo =	10,62	m	417,9849	in			
k =	1,50						
r gir. =	31,850	cm	12,540	in			

Figura 20-4. Pestaña 4, pre-diseño de la columna.
 Realizado por: Willian Inchilema, 2017

En la pestaña “SECCIONES” se ingresa los perfiles y el material de los elementos que conforman la estructura de soporte de la siguiente manera:

1. En esta pestaña se proporciona propiedades geométricas de varios perfiles tubulares circulares y propiedades mecánicas de varios aceros estructurales, de las cuales el usuario puede escoger.

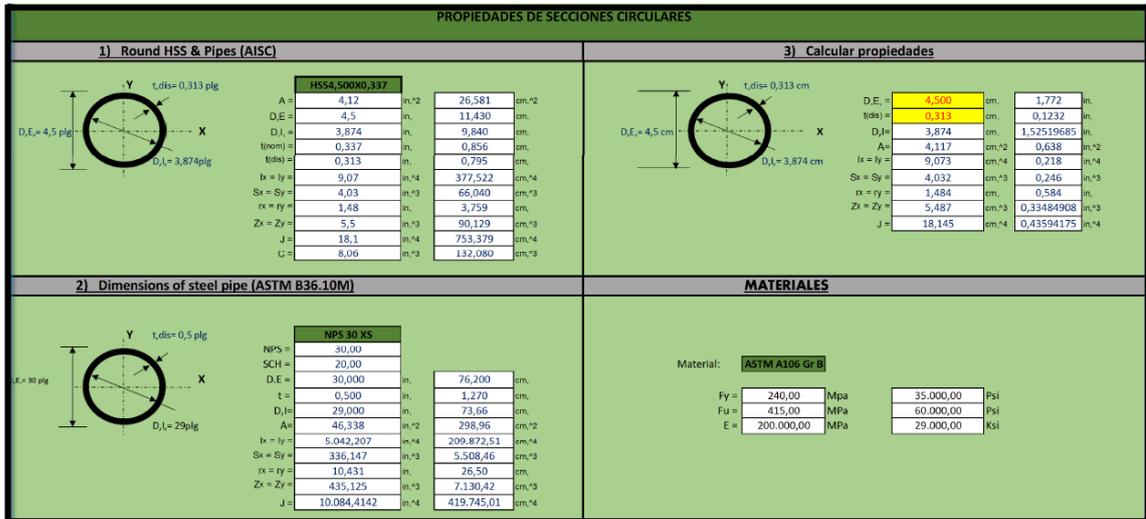


Figura 21-4. Pestaña 5, propiedades geométricas y mecánicas.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

2. Se escoge para la columna un perfil NPS 30 XS con diámetro de 75 cm, espesor de 1,27 cm, con área 298,96 cm² y un radio de giro de 26,5 cm que son valores cercanos a los determinados en el pre-diseño de la columna, para los arriostres horizontales se aplica un perfil NPS 12 SCH 30 con diámetro de 32,38 cm y un espesor de 0,838 cm, ya para los arriostres diagonales se aplica un perfil NPS 10 STD con diámetro de 27,3 cm y espesor de 0,927 cm. Con respecto al material, se aplica el acero estructural A106 grado B para todos los elementos estructurales.

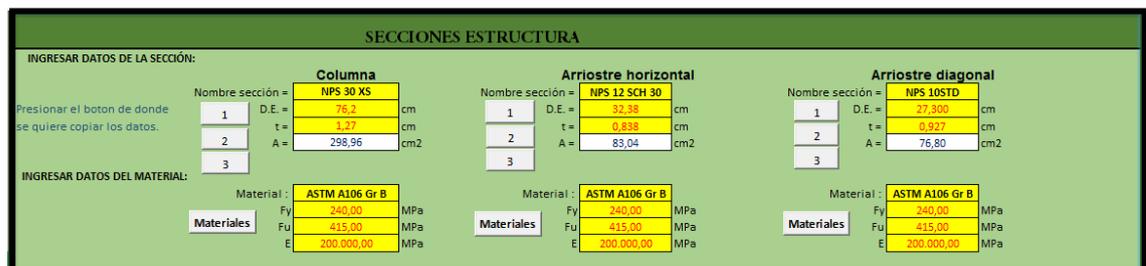


Figura 22-4. Pestaña 5, secciones de la estructura.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Ahora se procede a determinar el peso de la estructura para ello se ingresa a la pestaña “PESO SOPORTE” y se sigue el siguiente procedimiento:

1. Para determinar el peso de los elementos estructurales es necesario ingresar el peso específico del acero ($76.972,86 \text{ N/m}^3$).

Capacidad =	1.892,71	m ³
Diámetro tanque =	16,00	m
Peso específico acero =	76.972,86	N/m ³

Figura 23-4. Pestaña 6, datos para el peso de la estructura.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

2. En esta pestaña se calcula el peso de cada columna ($48.861,98 \text{ N}$) y el peso total de las 8 columnas con las que está compuesta la estructura, resultando un valor de $390.895,83 \text{ N}$.

COLUMNAS		
N° Columnas =	8,00	
Inclinación columna (θ) =	4,57	grados
Long. Columna (L_c) =	21,23	m
Diámetro Columna (D.E.) =	76,20	cm
Espesor Columna (t) =	1,27	cm
Área sección (A) =	298,96	cm ²
Peso/columna =	48.861,98	N
	390.895,83	N
Peso Columnas =	87.876,88	Lbf

Figura 24-4. Pestaña 6, peso de las columnas.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3. Se utilizó un anillo de arriostres horizontales en la estructura, ese anillo está compuesto por 8 arriostres horizontales, para determinar el peso de los arriostres la pestaña determina primero la longitud de cada elemento ($6,77 \text{ m}$), calcula el peso de cada uno ($4.327,82 \text{ N}$) y finalmente calcula el peso de todos los arriostres horizontales dando un valor de $34.622,53 \text{ N}$.

ARRIOSTRE HORIZONTAL				
Anillos de arriostres horiz. =		1,00		
Diámetro Arriostre (D.E.) =		32,38	cm	
Espesor arriostre (t) =		0,84	cm	
Área sección (A) =		83,04	cm ²	
Peso arriostres				
N° horizont.	Longitud (m)	Peso/arriost. (N)	Cantidad	Peso (N)
1	6,77	4.327,82	8,00	34.622,53
Peso total de arriostres =				34.622,53 N 7.783,45 Lb

Figura 25-4. Pestaña 6, peso de los arriostres horizontales.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- De la misma manera que con los arriostres horizontales, esta pestaña determina primero la longitud de cada arriostre diagonal, en este caso existen dos grupos de arriostres diagonales con diferentes longitudes, uno de 12,42 m y otro de 12,77 m. Se calcula el peso individual de cada arriostre y finalmente se determina el peso de todos los arriostres diagonales que contiene la estructura de soporte dando un valor de 238.196.23 N.

ARRIOSTRE DIAGONAL				
Anillos de arriostres horiz. =		1		
Diámetro Arriostres Diag. (D.E.) =		27,30	cm	
espesor de Arriostres (t) =		0,93	cm	
Área de sección =		76,80	cm ²	
Peso arriostres				
N° Diagonal	Longitud (m)	Peso/arriost. (N)	Cantidad	Peso (N)
1	12,42	7.340,63	16,00	117.450,05
2	12,77	7.546,64	16,00	120.746,18
peso tot. arrios. Horizon				238.196,23 N 53.548,64 Lb

Figura 26-4. Pestaña 6, peso de los arriostres diagonales.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- Finalmente en la última parte de la pestaña se calcula el peso total de la estructura de soporte y también la suma del peso del tanque y la del soporte. Adicionalmente esta pestaña proporciona una gráfica en la que muestra un panel de la estructura vista lateralmente como se muestra en la figura 26-4.

PESO TOTAL SOPORTE =	663.714,59 N
	149.208,98 Lb
PESO SOPRT. + TANQUE =	1.368.106,38 N
	307.562,55 Lb

Figura 27-4. Pestaña 6, peso total.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

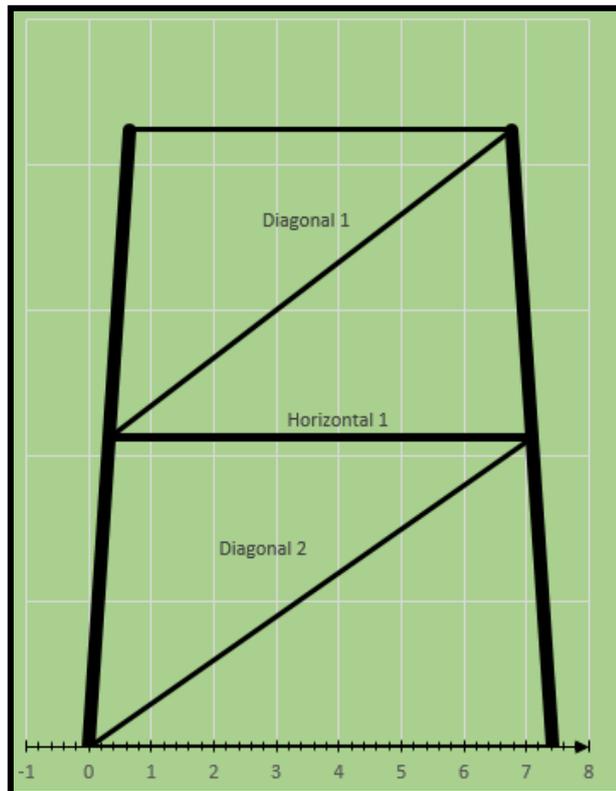


Figura 28-4. Pestaña 6, vista de un panel de la estructura

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Ahora se procede a determinar la carga de viento, para ello se ingresa a la siguiente pestaña llamada “CARGA DE VIENTO” y se determina de la siguiente manera:

1. En la primera casilla de esta pestaña se ingresa los datos requeridos, se aplica un factor de importancia de 1,15, una categoría de exposición C, el factor de ráfaga será de 1 y se ingresa una velocidad de viento de 45 m/s.

CARGAS DE VIENTO REF. AWWA D 100-05 Y ASCE 7-10	
Capacidad =	1892,71 m ³
Diámetro =	16 m
N° Columnas =	8
$P_w = q_z G C_f$ $q_z = 0,613 K_z I V^2$	
Factor de importancia (I) =	1,15
Categoría de exposición =	C
α =	9,5
z_g =	274,32 m
Velocidad de viento (V) =	45 m/s
Factor de efecto ráfaga (G) =	1
Nomenclatura P_w : Presión de viento. ver AWWA D100-05 seccion 3.1.4 q_z : Presión de velocidad evaluada a la altura z. z: Altura a la que se evalúa cada elemento. K_z : Coeficiente de exposición de presión de velocidad. C_f : Coeficiente de fuerza. Ver ASCE 7-10, tabla 29.3-1. Área : Área proyectada de los elementos. \bar{Y} : Distancia desde la base hasta el centro de gravedad de cada elemento. ϵ : Relación entre Área sólida y Área gruesa. Ver ASCE 7-10, tabla 29.5-3.	

Figura 29-4. Pestaña 7, datos para cargas de viento.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- En la primera parte se determina las fuerzas que actúan en cada parte del tanque metálico, dando una fuerza total de 207.767,91 N y calcula también el momento que estas fuerzas producen en la base del tanque.

Tanque					
	z (m)	Kz	qz (N/m ²)	Cf	Pw (N/m ²)
Abombado (techo)	31,28	1,27	1.816,56	0,50	908,28
Nudillo (techo)	28,85	1,25	1.785,97	0,50	892,99
Cilindro	24,16	1,21	1.720,44	0,60	1.032,26
Nudillo (fondo)	19,46	1,15	1.643,92	0,50	821,96
Abombado (fondo)	17,04	1,12	1.598,54	0,50	799,27
	Pw (N/m ²)	Area (m ²)	Fuerza (N)	\bar{Y} (m)	Momento (N-m)
Abombado (techo)	908,28	10,98	9.968,58	31,28	311.798,11
Nudillo (techo)	892,99	52,56	46.939,08	28,85	1.354.402,40
Cilindro	1.032,26	95,79	98.882,39	24,16	2.388.949,00
Nudillo (fondo)	821,96	52,56	43.205,69	19,46	840.978,28
Abombado (fondo)	799,27	10,98	8.772,18	17,04	149.485,82
TOTAL =			207.767,91	TOTAL =	
				5.045.613,62	

Figura 30-4. Pestaña 7, Fuerzas por viento en el tanque.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- En la segunda parte se determina las fuerzas que actúan en la estructura de soporte (348.403,54 N) y el momento en la base, adicional a esto también se calcula la fuerza y momento total provocado por el viento en el tanque elevado.

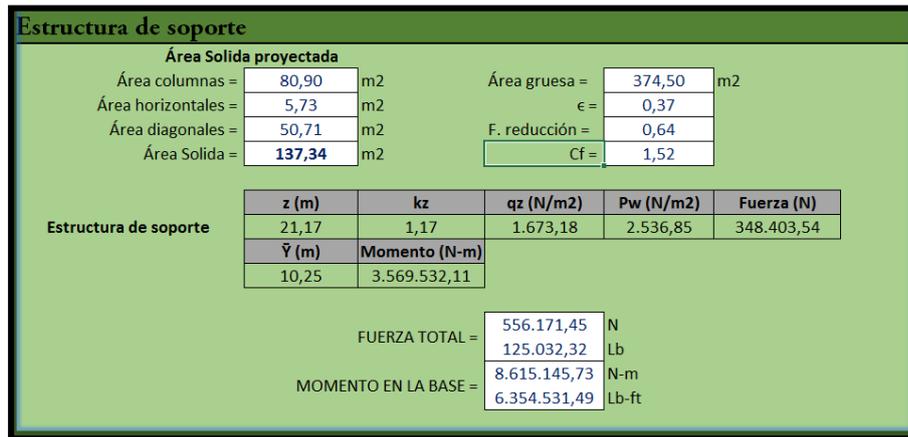


Figura 31-4. Pestaña 7, fuerzas por viento en la estructura de soporte.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

En la pestaña 8 llamada “BALCON Y RIGIDIZADOR INTERMEDIO” se determinara si el tanque de acero requiere rigidizadores intermedios y se ingresara las dimensiones del perfil del balcón de la siguiente manera:

1. En la primera parte de esta pestaña se calcula el peso y el módulo de sección del perfil a utilizar para el balcón, esta pestaña recomienda las dimensiones mínimas, para este caso se ingresa un balcón de 95 cm de ancho y las demás dimensiones se puede ver en la figura 30-4, dando así un módulo de sección de 2619,07 cm³ y un peso de 1.965,36 N.

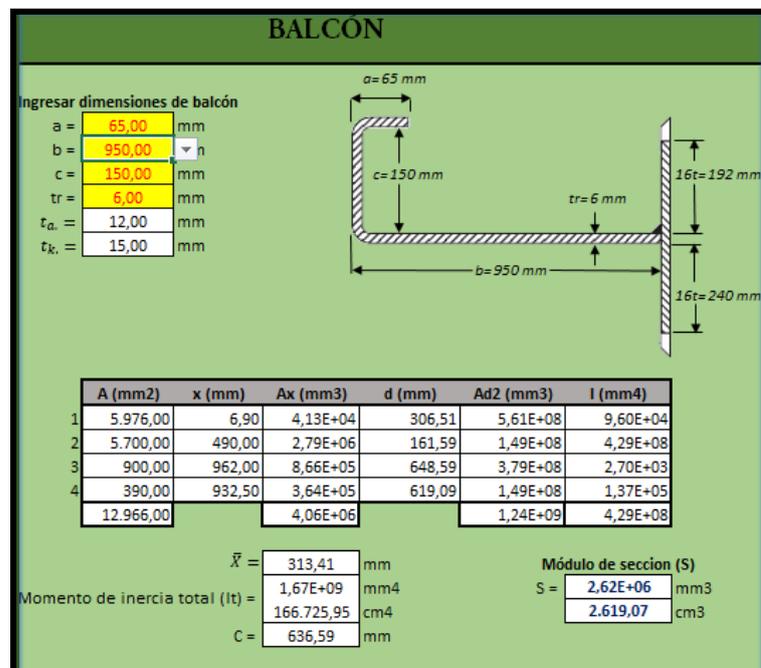


Figura 32-4. Pestaña 8, módulo de sección del balcón.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

PESO DEL BalcÓN

Peso específico acero = 76972,86 N/m³

Peso Balcón = 1.965,36 N

Figura 33-4. Pestaña 8, peso del balcón.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

2. En la segunda parte de esta pestaña se puede observar que el tanque no necesita rigidizadores intermedios, por lo que el tanque tiene suficiente estabilidad contra las cargas de viento.

RIGIDIZADORES INTERMEDIOS

Capacidad = 1.892,71 m³

D = 16 m

h2 = 5,987 m

N° Anillos = 3

Paw = 1.032,26 N/m²

N° Anillo	hi (m)	t (mm)
1	2,000	12,00
2	2,000	6,35
3	1,987	6,35

Espesor promedio = 8,23 mm

Altura de rigidización: $h = 23,627$ m $h = \frac{8025 \tau}{P_{aw} \left(\frac{D}{\tau}\right)^{1,5}}$

NO NECESITA RIGIDIZACIÓN

Módulo de sección mínimo requerido (S):

S = 419.141,75 mm³

Figura 34-4. Pestaña 8, Rigidizadores intermedios.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Ahora se define la carga sísmica, para ello se ingresa a la pestaña “CARGA POR SISMO” y se determina de la siguiente manera:

1. El tanque elevado se ubica en la ciudad de Guayaquil, la cual tiene una zona sísmica “V”, y un perfil de suelo tipo “C”, en función de esto se determina los demás coeficientes a ingresar. La hoja electrónica recomienda un Período de 0,763 segundos, mientras que el Período límite según las ecuaciones que nos da la NEC es de 0,936 segundos, en función a esto se ingresa un Período de 0,9 segundos que se encuentra dentro de los dos Períodos, con esto nos resulta un coeficiente de cortante basal de 0,271. Adicionalmente en esta parte de la pestaña se calcula el cortante y el momento en la base del tanque elevado que nos da un valor de 5.424.609,66 N y 117.937.893,33 N-m respectivamente.

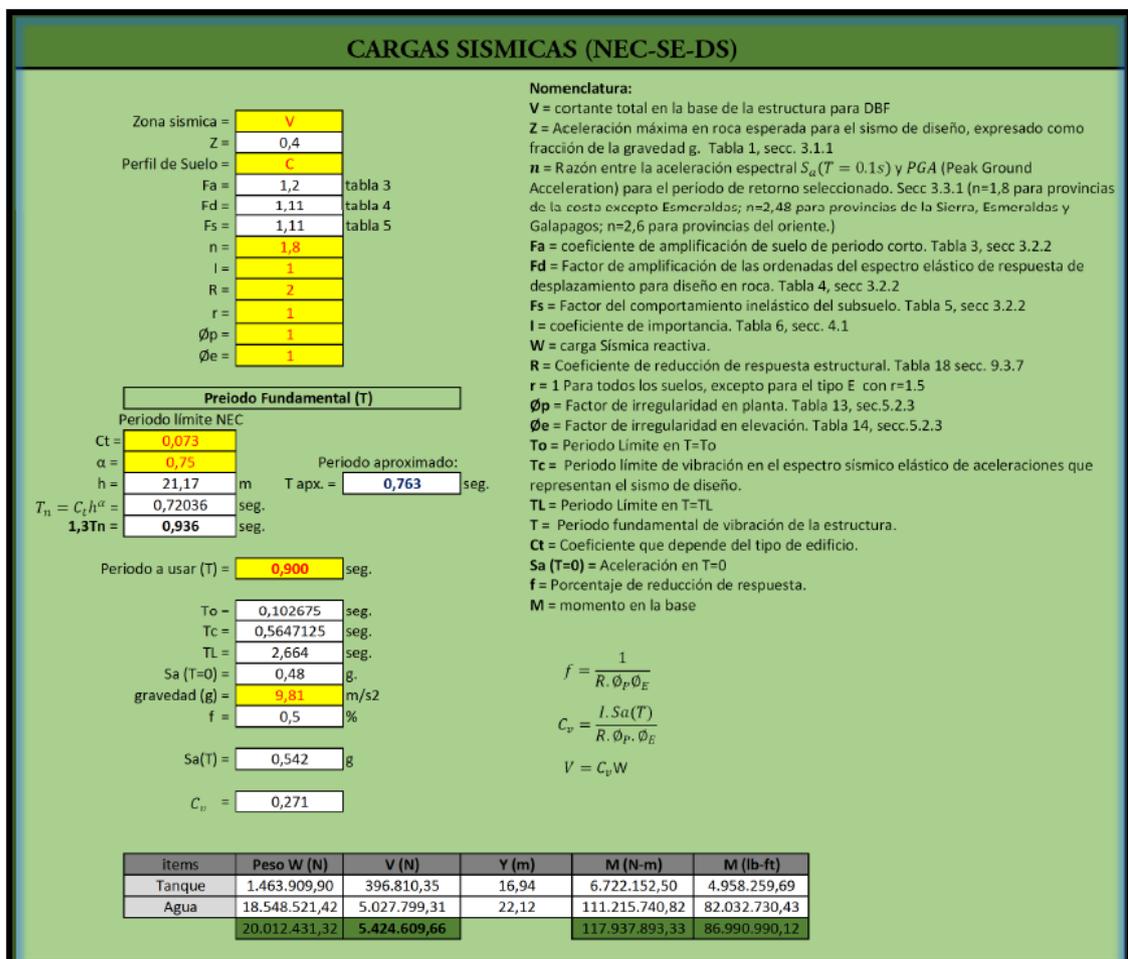


Figura 35-4. Pestaña 9, carga sísmica.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

2. En esta pestaña se presenta como información adicional el espectro de diseño y una tabla con los valores necesarios para graficar el espectro.

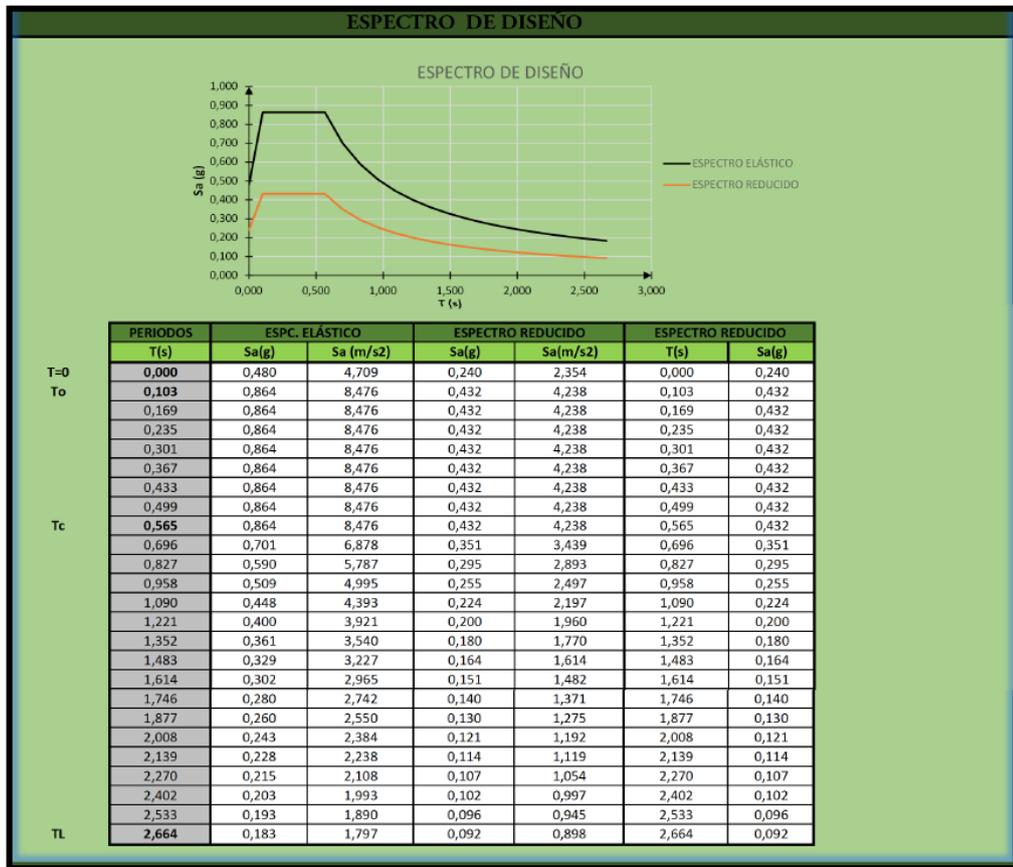


Figura 36-4. Pestaña 9, espectro de diseño.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Para comprobar si el perfil ingresado para la columna es el adecuado se ingresa a la siguiente pestaña llamada “DISEÑO COLUMNA” donde se determina la capacidad de la misma y la relación demanda–capacidad de la siguiente manera:

1. En la primera casilla de esta pestaña se muestra los datos del perfil de la columna y las propiedades mecánicas del material a usar.

DISEÑO COLUMNA AISC-360 (LRFD)

Elemento : **Columna**

Propiedades Sección:		Propiedades Material:	
Sección =	NPS 30 XS	Material =	ASTM A106 Gr B
D =	76,20 cm	Fy =	240,00 Mpa 34,81 kpsi
t =	1,27 cm	E =	200.000,00 Mpa 29.007,54 Kpsi
A =	298,96 cm ²		
I =	209.872,51 cm ⁴		
rx=ry =	26,50 cm		
Z =	7.130,42 cm ³		
S =	5.508,46 cm ³		

Figura 37-4. Pestaña 10, datos de la columna.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

- En la primera parte se determina la relación demanda-capacidad a compresión de la columna, se clasifica al perfil como una sección no esbelta y se determina la capacidad a compresión de la misma, esta sección tiene una capacidad de 7.404.227,03 N, la hoja de cálculo proporciona una demanda aproximada de 7.589.390,29 N la cual se usará para determinar la relación demanda-capacidad de la columna dando un valor de 1,03 la cual resulta ser aceptable, por lo que se mantiene la sección establecida.

DISEÑO COMPRESIÓN			
Longitud efectiva (Le)			
L =	10,62	m	
k =	1,00		
Le =	10,62	m	417,985 in
Clasificación de sección:			
sección:	No Esbelta	Q =	1
D/t =	60,00		
$\lambda r =$	91,67		
Relación de esbeltez:			
$kL/r =$	40,07		
Tensión crítica (Fcr):			
Fcr =	221,17	Mpa	32,08 kpsi
Fe =	1.229,38	Mpa	178,31 Kpsi
			$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 135,97$
CAPACIDAD (ϕP_n)			
$P_n =$	6.612.028,14	N	
$\phi P_n =$	5.950.825,32	N	1.337.798,75 Lb
DEMANDA (P_u)			
Aproximadamente:			A usar:
$P_u =$	4.325.952,47	N	4.325.952,47 N
	972.512,80	Lb	972.512,80 Lb
RELACIÓN DEMANDA/CAPACIDAD			
$D/C =$	0,73		

Figura 38-4. Pestaña 10, diseño a compresión.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Ahora se ingresa a la pestaña “DISEÑO DE DIAGONAL” en la que se determinara si la sección elegida para los arriostres diagonales es el adecuado. Debido a que la estructura de soporte está compuesta con un anillo de arriostres horizontales, la estructura cuenta con dos grupos de arriostres diagonales de diferentes longitudes. Por lo que hay que verificar la relación demanda-capacidad a compresión y a tracción de dos arriostres diagonales.

- En la primera casilla se muestra los datos del arriostre diagonal 1, como el nombre del perfil, sus propiedades geométricas y las propiedades mecánicas del material a utilizar.

DISEÑO ARRIOSTRE DIAGONAL AISC-360 (LRFD)					
Elemento : Diagonal 1					
PROPIEDADES DE SECCIÓN			PROPIEDADES MATERIAL		
SECCIÓN =	NPS 10STD		Material =	STM A106 Gr B	
D =	27,30	cm	Fy =	240,00	Mpa
t =	0,93	cm	Fu =	415,00	Mpa
A =	76,80	cm ²	E =	200.000,00	Mpa
I =	6.685,82	CM ⁴		34,81	kpsi
rx=ry =	9,33	cm		60,19	kpsi
Z =	644,76	cm ³		29.007,54	kpsi
S =	489,80	cm ³			

Figura 39-4. Pestaña 11, datos del arriostre diagonal.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

2. Ahora se comprueba si el arriostre diagonal 1 es el adecuado para soportar la demanda a compresión. La pestaña clasifica al perfil ingresado como una sección no esbelta, y determina la capacidad a compresión del arriostre diagonal, dando una capacidad de 1.324.292,19 N. Se utiliza la demanda recomendada por la pestaña de 1.488.088,68 N, con la que finalmente da una relación demanda capacidad de 1,12. Esta relación se puede considerar aceptable debido a que las cargas que recomienda la pestaña son solo aproximaciones, por lo que no se cambia el perfil asignado.

DISEÑO POR COMPRESIÓN					
Longitud efectiva (Le):					
L =	6,52	m			
k =	1,00				
Le =	6,52	m	256,707	in	
Clasificación de sección:					
sección: No Esbelta			Q = 1		
D/t =	29,45				
λ_r =	91,67				
Relación de esbeltez:					
kL/r =	69,89				
Tensión crítica (Fcr):					
Fcr =	187,18	Mpa	27,15	kpsi	$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 135,97$
Fe =	404,16	Mpa	58,62	kpsi	
CAPACIDAD (ϕP_n)					
Pn =	1.437.666,64	N			
ϕP_n =	1.293.899,98	N	290.880,29	Lb	
DEMANDA (Pu)					
Aproximadamente:			A usar:		
Pu =	1.488.088,68	N			
	334.535,64	Lb	Copiar --->	1.488.088,68	N
				334.535,64	Lb
RELACIÓN DEMANDA/CAPACIDAD					
D/C =	1,15				

Figura 40-4. Pestaña 11, diseño por compresión, arriostre diagonal 1.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3. También se comprueba la relación demanda-capacidad del arriestre diagonal 1 a tracción, resultando una capacidad a tracción del arriestre diagonal de 2.303.995,06 N y utilizando la demanda que recomienda la pestaña de 1.096.778,66 N resulta una relación demanda-capacidad de 0,48 por lo que se mantiene el perfil seleccionado

DISEÑO POR TENSIÓN

ESTADOS LÍMITE:

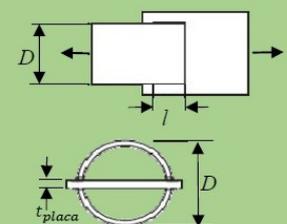
a) Fluencia en tracción

$P_n = 3.187.404,92$ N
 $\phi P_n = 2.868.664,43$ N $644.901,42$ Lb

$P_n = F_y * A_g$
 $\phi = 0,9$

b) Ruptura en tracción

Placa de conexión:	
Material:	A36
Fy =	250 Mpa
Fu =	400 Mpa
tplaca =	1,5 cm
l =	36 cm



$l \geq 1,3D \rightarrow U = 1,0$
 $D \leq l < 1,3D \rightarrow U = 1 - \frac{x}{l}$
 $x = \frac{D}{\pi}$

Factor de corte (U):

$U = 1,00$
 $1,3D = 35,49$ cm $13,9724409$ in
 $x = 8,69$ cm $3,421$ in

Área neta efectiva (Ae):

Area bruta (Ag) = 76,80 cm²
 Area neta (An) = 74,024 cm²
 $A_e = 74,024$ cm² $11,474$ in²

$A_n = A_g - 2t_{placa}t_{tub}$
 $A_e = A_n U$

$P_n = 3.071.993,42$ N
 $\phi P_n = 2.303.995,06$ N $517.958,70$ Lb

$P_n = F_u * A_e$
 $\phi = 0,75$

CAPACIDAD (ϕP_n):

$\phi P_n = 2.303.995,06$ N $517.958,70$ Lb

DEMANDA (Pu):

Aproximadamente:
 $P_u = 1.096.778,66$ N
 $246.565,65$ Lb

Copiar ---->

A usar:
 $1.096.778,66$ N
 $246.565,65$ Lb

RELACIÓN DEMANDA/CAPACIDAD

D/C = $0,48$

Figura 41-4. Pestaña 11, diseño a tracción, arriestre diagonal 1.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4. De la misma manera se comprueba que el arriestre diagonal 2 es el adecuado para soportar la demanda a compresión y a tracción. En la figura 40-4 se muestra las propiedades de la sección, en la figura 41-4 se muestra la capacidad a compresión del arriestre diagonal 2 de 1.307.416,86 N y la pestaña propone una demanda a compresión de 1.346.115,5 N lo

que resulta una relación demanda capacidad de 1,03 lo que se considera aceptable, por último en la figura 42-4 se determina la capacidad a tracción del arriostre diagonal 2 dando un valor de 2.303.995,06 N y una demanda de 795.184,69 N que resulta una relación demanda capacidad de 0,35 por lo que se concluye que el perfil es adecuado.

DISEÑO ARRIOSTRE DIAGONAL AISC-360 (LRFD)			
Elemento :	Diagonal 2		
PROPIEDADES DE SECCIÓN		PROPIEDADES MATERIAL	
SECCIÓN =	NPS 10STD	Material =	STM A106 Gr B
D =	27,30 cm	Fy =	240,00 Mpa 34,81 kpsi
t =	0,93 cm	Fu =	415,00 Mpa 60,19 kpsi
A =	76,80 cm ²	E =	200.000,00 Mpa 29.007,54 kpsi
I =	6.685,82 CM ⁴		
rx=ry =	9,33 cm		
Z =	644,76 cm ³		
S =	489,80 cm ³		

Figura 42-4. Pestaña 11, datos del arriostre diagonal 2.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

DISEÑO POR COMPRESIÓN			
Longitud efectiva (Le):			
L =	6,67 m		
k =	1,00		
Le =	6,67 m	262,758 in	
Clasificación de sección:			
sección:	No Esbelta	Q =	1
D/t =	29,45		
λ_r =	91,67		
Relación de esbeltez:			
kL/r =	71,53		
Tensión crítica (Fcr):			
Fcr =	184,98 Mpa	26,83 kpsi	$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 135,97$
Fe =	385,76 Mpa	55,95 kpsi	
CAPACIDAD (ϕP_n)			
Pn =	1.420.723,52 N		
ϕP_n =	1.278.651,17 N	287.452,22 Lb	
DEMANDA (Pu)			
Aproximadamente:		A usar:	
Pu =	1.346.115,50 N	Copiar --->	1.346.115,50 N
	302.618,80 Lb		302.618,80 Lb
RELACIÓN DEMANDA/CAPACIDAD			
D/C =	1,05		

Figura 43-4. Pestaña 11, diseño compresión, arriostre diagonal 2.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

DISEÑO POR TENSION

ESTADOS LIMITE:

a) Fluencia en tracción

$P_n = 3.187.404,92$ N
 $\phi P_n = 2.868.664,43$ N $644.901,42$ Lb

$P_n = F_y * A_g$
 $\phi = 0,9$

b) Ruptura en tracción

Placa de conexión:	
Material:	A36
Fy =	250 Mpa
Fu =	400 Mpa
tplaca =	1,5 cm
l =	36 cm

Factor de corte (U):

$U = 1,00$
 $1,3D = 35,49$ cm $13,9724409$ in
 $x = 8,69$ cm $3,421$ in

$l \geq 1,3D \rightarrow U = 1,0$
 $D \leq l < 1,3D \rightarrow U = 1 - \frac{x}{l}$
 $x = \frac{D}{\pi}$

Área neta efectiva (Ae):

Area bruta (Ag) = 76,80 cm²
 Area neta (An) = 74,024 cm²
 Ae = 74,024 cm² $11,474$ in²

$A_n = A_g - 2t_{placa}t_{tub.}$
 $A_e = A_n U$

$P_n = 3.071.993,42$ N
 $\phi P_n = 2.303.995,06$ N $517.958,70$ Lb

$P_n = F_u * A_e$
 $\phi = 0,75$

CAPACIDAD (ϕP_n):

$\phi P_n = 2.303.995,06$ N $517.958,70$ Lb

DEMANDA (P_u):

Aproximadamente:
 $P_u = 795.184,69$ N
 $178.764,63$ Lb

A usar:
 $795.184,69$ N
 $178.764,63$ Lb

RELACIÓN DEMANDA/CAPACIDAD

D/C = $0,35$

Figura 44-4. Pestaña 11, diseño tensión, arriostre diagonal 2.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Para determinar la relación demanda-capacidad de los arriostres horizontales se ingresa a la pestaña “DISEÑO HORIZONTAL” en la que primero se muestra los datos del perfil utilizado (figura 43-4), mientras que en la figura 44-4 se puede observar que se calcula una capacidad a compresión de los arriostres horizontales dando un valor de 1.487.030,77 y se recomienda una demanda de 230.909,94, utilizando este valor se determina una relación demanda capacidad de 0,16 por lo que el perfil seleccionado es adecuado.

DISEÑO ARRIOSTRE HORIZONTAL AISC-360 (LRFD)			
Elemento :	Horizontal 1		
PROPIEDADES DE SECCIÓN		PROPIEDADES MATERIAL	
SECCIÓN =	NPS 12 SCH 30	Material =	STM A106 Gr B
D =	32,38 cm	Fy =	240,00 Mpa 34,81 kpsi
t =	0,84 cm	Fu =	415,00 Mpa 60,19 kpsi
A =	83,04 cm ²	E =	200.000,00 Mpa 29.007,54 kpsi
I =	10.334,23 CM ⁴		
rx=ry =	11,16 cm		
Z =	833,72 cm ³		
S =	638,31 cm ³		

Figura 45-4. Pestaña 12, datos arriostre horizontal.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

DISEÑO POR COMPRESIÓN			
Longitud efectiva (Le):			
L =	6,77 m		
k =	1,00		
Le =	6,77 m	266,572 in	
Clasificación de sección:			
seccion:	No Esbelta	Q =	1
D/t =	38,64		
$\lambda_r =$	91,67		
Relación de esbeltez:			
kL/r =	60,69		
Tensión crítica (Fcr):			
Fcr =	198,97 Mpa	28,86 kpsi	$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 135,97$
Fe =	535,83 Mpa	77,72 kpsi	
CAPACIDAD (ϕP_n)			
Pn =	1.652.256,41 N		
$\phi P_n =$	1.487.030,77 N	334.297,82 Lb	
DEMANDA (Pu)			
Aproximadamente:		A usar:	
Pu =	230.909,94 N		230.909,94 N
	51.910,62 Lb	Copiar --->	51.910,62 Lb
RELACIÓN DEMANDA/CAPACIDAD			
D/C =	0,16		

Figura 46-4. Pestaña 12, diseño a compresión del arriostre horizontal

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

En la pestaña “PLACA BASE” se termina las dimensiones de la placa base de las columnas, se utiliza un placa de acero A36, la pestaña calcula una longitud mínima para el lado de la placa de 74,13 cm y un espesor de 5,38 cm, por lo que se utilizara una placa de 100x100x6 cm y las dimensiones de la zapata serán de 110x110 cm.

PLACA BASE	
Propiedades de la columna: Sección = NPS 30 XS D = 76,2 cm t = 1,27 cm Fy = 240,00 Mpa	
Propiedades de la placa base: Material = A36 Fy = 250,00 Mpa	
Carga de la columna Pu = 4.325,95 kN	
Propiedades de la zapata de hormigón: f'c = 25.000,00 KPa	
ÁREA DE LA PLACA BASE	
Área mínima de la placa base: $A_{1\ min} = 0,31\ m^2$ $A_{1\ min} = 3.131,91\ cm^2$	
Dimensiones de la placa a utilizar N = 100,00 cm B = 100,00 cm A1 = 10.000,00 cm ² $A_1 \geq A_{1\ min}$ OK $D^2 = 5.806,44\ cm^2$ $A_1 \geq D^2$ OK	
Lado mínimo de la placa: $L_{min} = 0,56\ m$ $L_{min} = 55,96\ cm$	
ÁREA DE LA ZAPATA	
Dimensiones de la zapata propuesta: Nz = 110,00 cm Bz = 110,00 cm Az = 12.100,00 cm ²	
Resistencia de aplastamiento nominal: $P_p = 23.375,00\ kN$ $1,7f'_c A_1 = 42.500,00\ kN$ $P_p \leq 1,7f'_c A_1$ OK	
Resistencia de aplastamiento de diseño: $\phi_c P_p = 15.193,75\ kN$ $\phi_c P_p > P_u$ OK	
ESPESOR DE LA PLACA BASE	
m = 19,52 cm n = 19,52 cm $\lambda n' = 14,45\ cm$ $\ell = 19,52\ cm$ t = 3,83 cm	
X = 0,28 $\lambda = 0,58$ $\lambda_{usar} = 0,58$	

Figura 47-4. Pestaña 13, Placa base.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

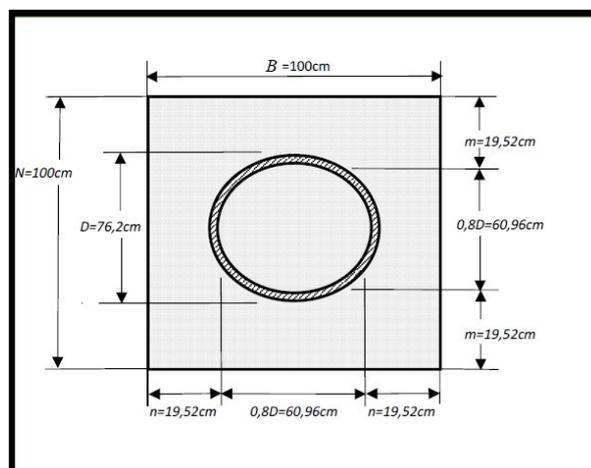


Figura 48-4. Pestaña 13, dimensiones placa base.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Finalmente en la pestaña “RESUMEN” se detallan la información más relevante de todas las pestañas anteriores:

RESUMEN				
Capacidad del tanque		500.000,00	Galones	
Diámetro del tanque	D	16,00	metros	
N° de anillos del tanque	N° anillos	3		
Altura del casquete inferior	h1	4,96	metros	
Altura del cilindro	h2	5,99	metros	
Altura del casquete de techo	h3	4,96	metros	
Altura de la estructura de soporte	H	21,17	metros	
Altura total del tanque	Ht	32,11	metros	
Tanque requiere rigidizador?	NO NECESITA RIGIDIZACIÓN			
Anillos de arriostre horizontal		1		
Número de columnas	N	8		
Ángulo de inclinación columnas	?	4,57	grados	
Espesores tanque	Abombado Fondo	15,08	milímetros	
	Reborde Fondo	15,08	milímetros	
	Anillo 1	12,30	milímetros	
	Anillo 2	6,35	milímetros	
	Anillo 3	6,35	milímetros	
	Reborde techo	6,35	milímetros	
	Abombado techo	6,35	milímetros	
secciones:	Columna:	Perfil	NPS 30 XS	
		Material	ASTM A106 Gr B	
		Fy	240,00	Megapascales
		Fu	415,00	Megapascales
		D.E	76,2	centímetros
		t	1,27	centímetros
	Arriostre horizontal:	Perfil	NPS 12 SCH 30	
		Material	ASTM A106 Gr B	
		Fy	240,00	Megapascales
		Fu	415,00	Megapascales
		D.E	32,38	centímetros
		t	0,838	centímetros
	Arriostre diagonal:	Perfil	NPS 10STD	
		Material	ASTM A106 Gr B	
		Fy	240,00	Megapascales
Fu		415,00	Megapascales	
D.E		27,3	centímetros	
	t	0,927	centímetros	
Peso:	Peso del tanque	708.637,66	Newton	
	Peso del balcón	1.966,37	Newton	
	Peso de la estructura de soporte	663.714,59	Newton	
	Peso total	1.374.318,62	Newton	
	Peso de agua	18.548.521,42	Newton	
	Peso tanque elevado + agua	19.922.840,03	Newton	
Carga de viento:	Fuerza total	556.171,45	Newton	
	Momento en la base	8.615.145,73	Newton-metro	
Cargas por sismo:	Coefficiente Cv	0,27		
	Cortante basal	5.399.791,86	Newton	
	Momento en la base	117.699.638,77	Newton-metro	

Figura 49-4. Pestaña 14, resumen.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Diseño columna		Compresión	Capacidad	5.950.825,32	Newton		
			Demanda	4.325.952,47	Newton		
			D/C	0,73			
		Flexión	Capacidad	1.536.861,66	Newton-metro		
			Demanda Mx	0,00	Newton-metro		
			Demanda My	0,00	Newton-metro		
		Flexo-compresión	D/C	0,73			
Diseño diagonal		1	Compresión	Capacidad	1.293.899,98	Newton	
				Demanda	1.488.088,68	Newton	
				D/C	1,15		
		Tracción	Capacidad	2.303.995,06	Newton		
			Demanda	1.096.778,66	Newton		
			D/c	0,48			
		2	Compresión	Capacidad	1.278.651,17	Newton	
				Demanda	1.346.115,50	Newton	
				D/C	1,05		
		Tracción	Capacidad	2.303.995,06	Newton		
			Demanda	795.184,69	Newton		
			D/c	0,35			
		3	Compresión	Capacidad		Newton	
				Demanda	355.244,42	Newton	
				D/C		NO APLICA	
		Tracción	Capacidad		Newton		
			Demanda	71.348,07	Newton		
			D/c		NO APLICA		
		4	Compresión	Capacidad		Newton	
				Demanda	266.478,77	Newton	
				D/C		NO APLICA	
Tracción	Capacidad		Newton				
	Demanda	71.503,06	Newton				
	D/c		NO APLICA				
Diseño horizontal		1	Compresión	Capacidad	1.487.030,77	Newton	
				Demanda	230.909,94	Newton	
				D/C	0,16		
		2	Compresión	Capacidad		Newton	
				Demanda	202.969,72	Newton	
				D/C		NO APLICA	
		3	Compresión	Capacidad		Newton	
				Demanda	136.113,48	Newton	
				D/C		NO APLICA	
Placa Base		Placa de acero			Material	A36	
					Fy	250,00	Megapascales
					N	100,00	centimetros
					B	100,00	centimetros
					A ₁	10.000,00	centimetros2
					espesor t	3,83	centimetros
		Zapata de hormigón			f'c	25.000,00	Kilopascales
					N _z	110,00	centimetros
					B _z	110,00	centimetros
					A _z	12.100,00	centimetros2

Figura 49-4 (Continúa). Pestaña 14, resumen.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

En la pestaña de “RESUMEN” se presionara en el botón *Guardar datos para SOLIDWORK*.

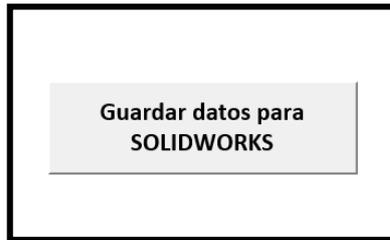


Figura 50-4. Botón guardar datos.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Una vez que se presiona el botón, se crea automáticamente una hoja con los datos necesarios para la generación automática del tanque elevado en SolidWorks, y seguidamente se muestra una ventana en la que se pide guardar dicha hoja.

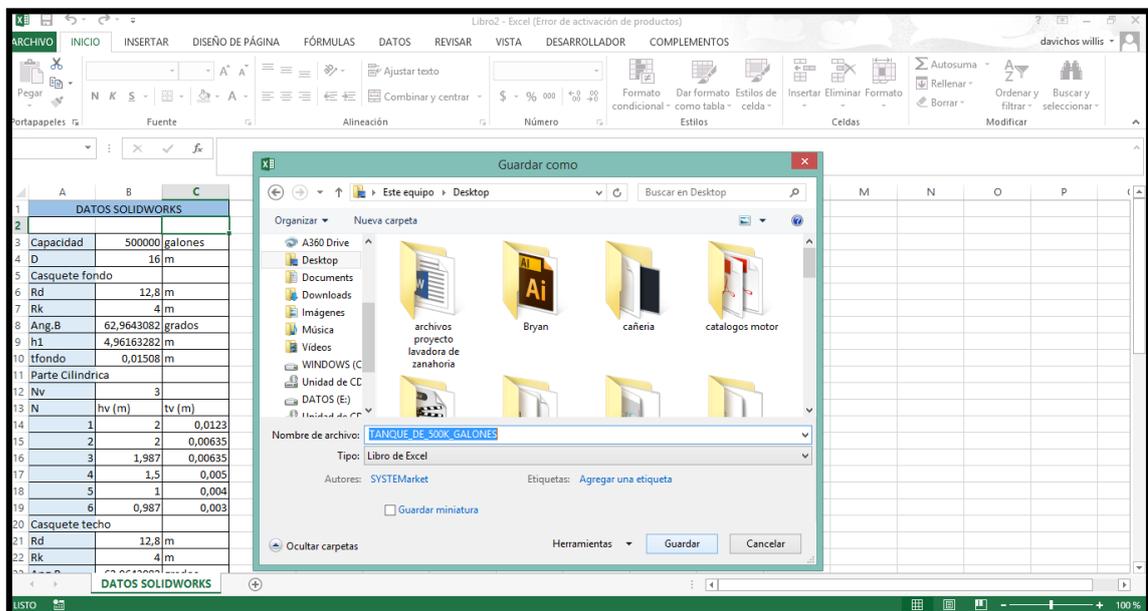


Figura 51-4. Ventana “Guardar como”

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Como se puede observar en la Figura 48-4, la hoja con los datos se guardó con el nombre de “TANQUE_DE_500K_GALONES”, ahora se procede abrir el software SolidWorks y en este se abrirá la aplicación “Generador de Tanques Elevados (SOLIDWORKS)”.

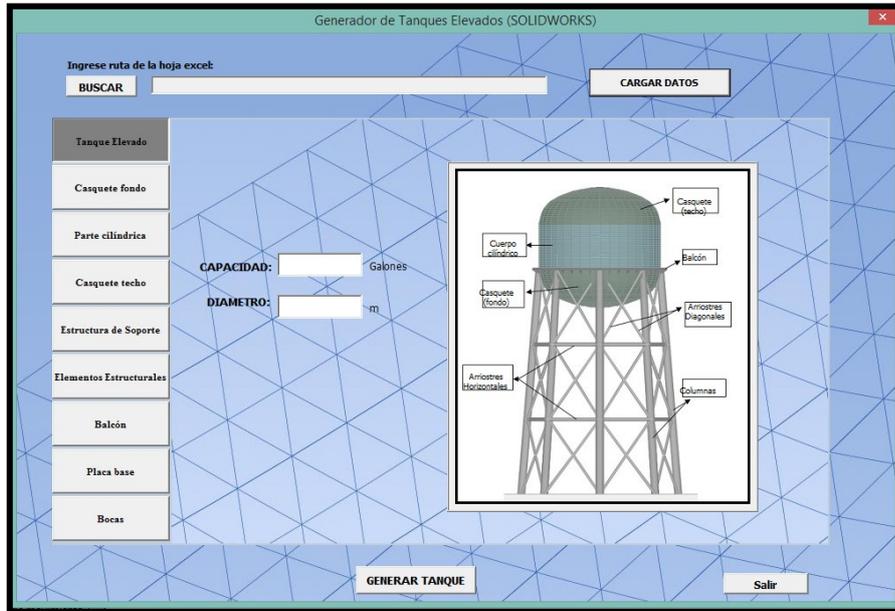


Figura 52-4. Interfaz de la API

En la ventana principal de la aplicación se presiona en el botón buscar y se procede a abrir el archivo guardado anteriormente (“TANQUE_DE_500K_GALONES.xlsx”).



Figura 53-4. Buscar archivos

Al presionar el botón CARGAR DATOS se copia automáticamente los valores obtenidos en el pre-diseño del tanque de 500.000 galones a la aplicación:

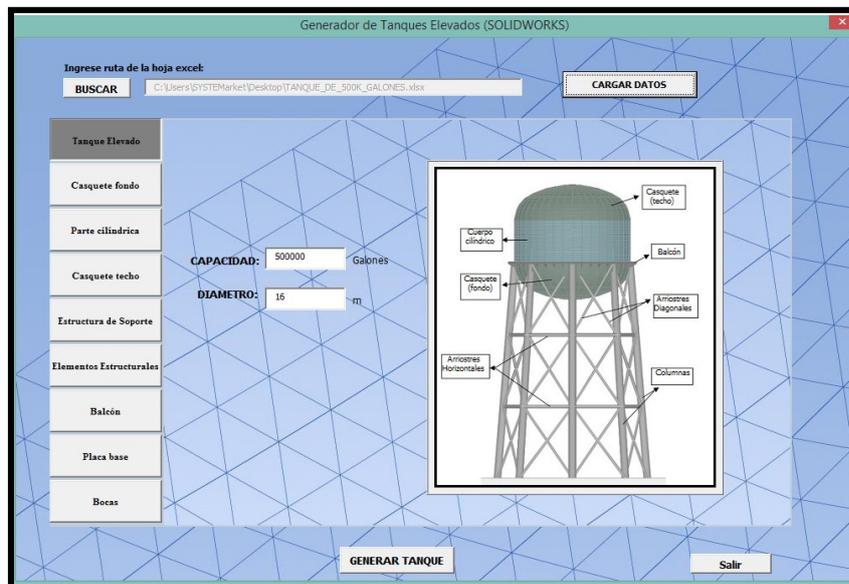


Figura 54-4. API, Pestaña: Tanque Elevado

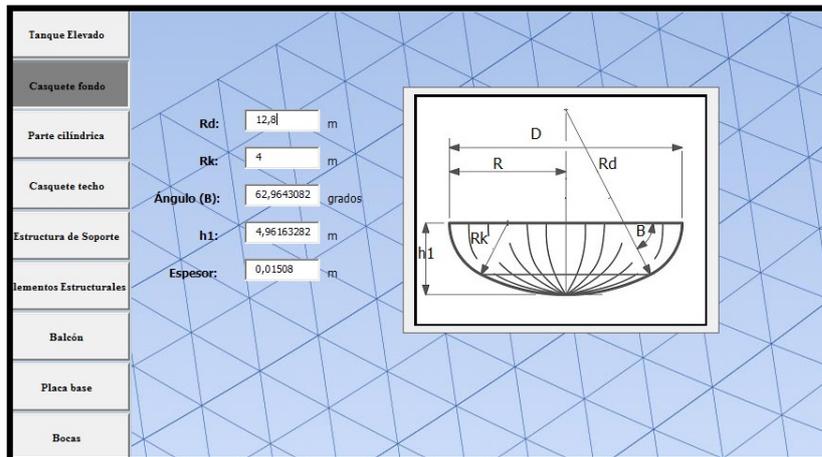


Figura 55-4. API, Pestaña: Casquete fondo

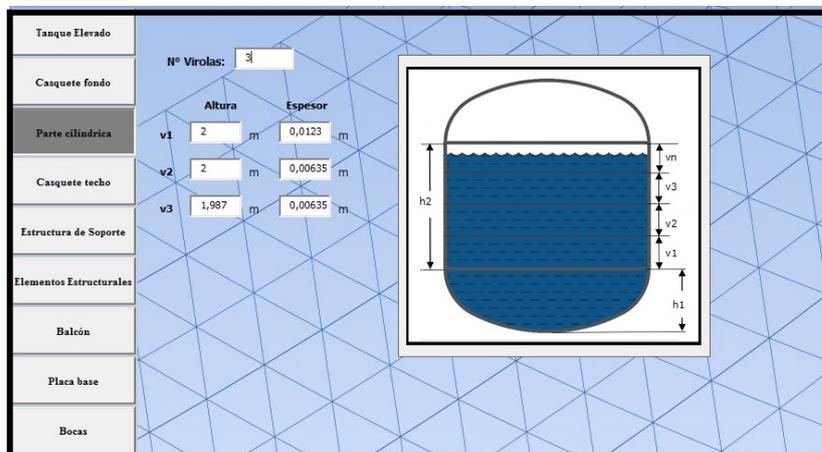


Figura 56-4. API, Pestaña: Parte cilíndrica

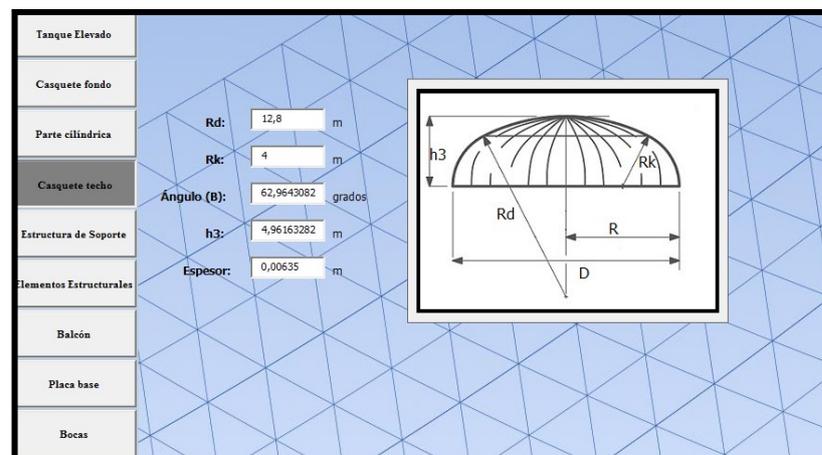


Figura 57-4. API, Pestaña: Casquete techo

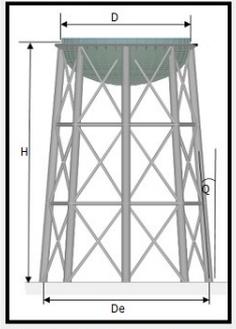
Tanque Elevado	H:	21,166	m	
Casquete fondo	N° Columnas:	8		
Parte cilíndrica	Pendinete (m):	0,08		
Casquete techo	Ángulo de inclinación (Q):	4,57392126	grados	
Estructura de Soporte	N° de Anillos de arriostres horiz.:	1		
Elementos Estructurales	De:	19,38656	m	
Balcón				
Placa base				
Bocas				

Figura 58-4. API, Pestaña: Estructura de Soporte

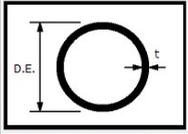
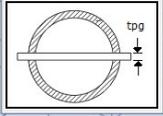
Tanque Elevado	Columna	Diametro Exterior (D.E.):	0,762	m	
Casquete fondo		Espesor (t):	0,0127	m	
Parte cilíndrica	Arrioste Horizontal	Diametro Exterior (D.E.):	0,3238	m	
Casquete techo		Espesor (t):	0,00838	m	
Estructura de Soporte	Arrioste Diagonal	Diametro Exterior (D.E.):	0,273	m	
Elementos Estructurales		Espesor (t):	0,00927	m	
Balcón		Espesor placa (tpg):	0,015	m	
Placa base					
Bocas					

Figura 59-4. API, Pestaña: Elementos Estructurales

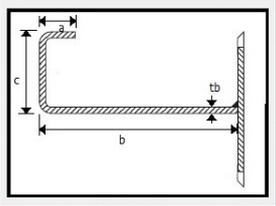
Tanque Elevado				
Casquete fondo				
Parte cilíndrica	b:	0,95	m	
Casquete techo	c:	0,15	m	
Estructura de Soporte	a:	0,065	m	
Elementos Estructurales	Espesor (tb):	0,006	m	
Balcón				
Placa base				
Bocas				

Figura 60-4. API, Pestaña: Balcón

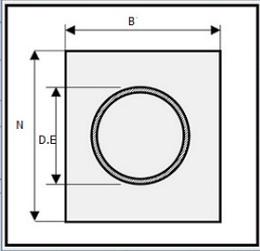
Tanque Elevado	Placa Base		
Casquete fondo	N:	1 m	
Parte cilíndrica	B:	1 m	
Casquete techo	Espesor placa (tpl):	0,03827758 m	
Estructura de Soporte	Zapata		
Elementos Estructurales	Nz:	1,1 m	
Balcón	Bz:	1,1 m	
Placa base			
Bocas			

Figura 61-4. API, Pestaña: Placa base

En la última pestaña llamada *Bocas* se debe ingresarse datos que no se consideraron en el pre-diseño, aquí debe ingresarse las dimensiones de las aberturas o bocas que existen en el tanque, tal como las bocas de inspección o manhole de cuerpo y de techo, las bocas de drenaje y de venteo, se debe ingresar dimensiones que se considere aceptable de acuerdo al tamaño del tanque.

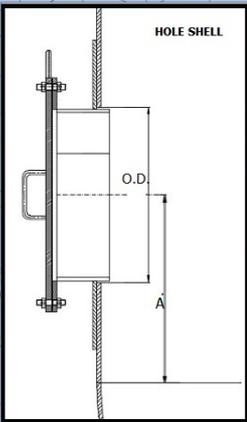
Tanque Elevado	MANHOLE CUERPO:			
Casquete fondo	Nº MANHOLE =	1		
Parte cilíndrica	O.D. =	900 mm		A = 1050 mm
Casquete techo	MANHOLE TECHO:			
Estructura de Soporte	O.D. =	750 mm		
Elementos Estructurales	BOCAS:			
Balcón	DRENAJE:	NPS = 18		O.D. = 457,2
Placa base	VENTEO:	NPS = 16	O.D. = 406,4	
Bocas				

Figura 62-4. API, Pestaña: Bocas

Luego de verificar que estén completados todos los datos, se presiona en el botón “GENERAR TANQUE” para que se genere automáticamente el modelado del tanque elevado en el software SolidWorks, una vez que se haya completado con la modelación se muestra una ventana de aviso que se ha generado correctamente el tanque elevado.

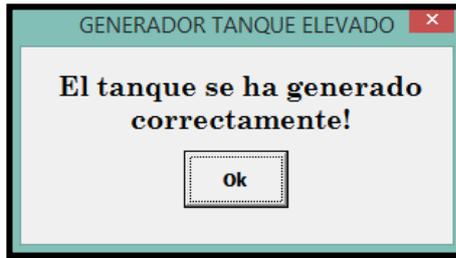


Figura 63-4. API, ventana de aviso

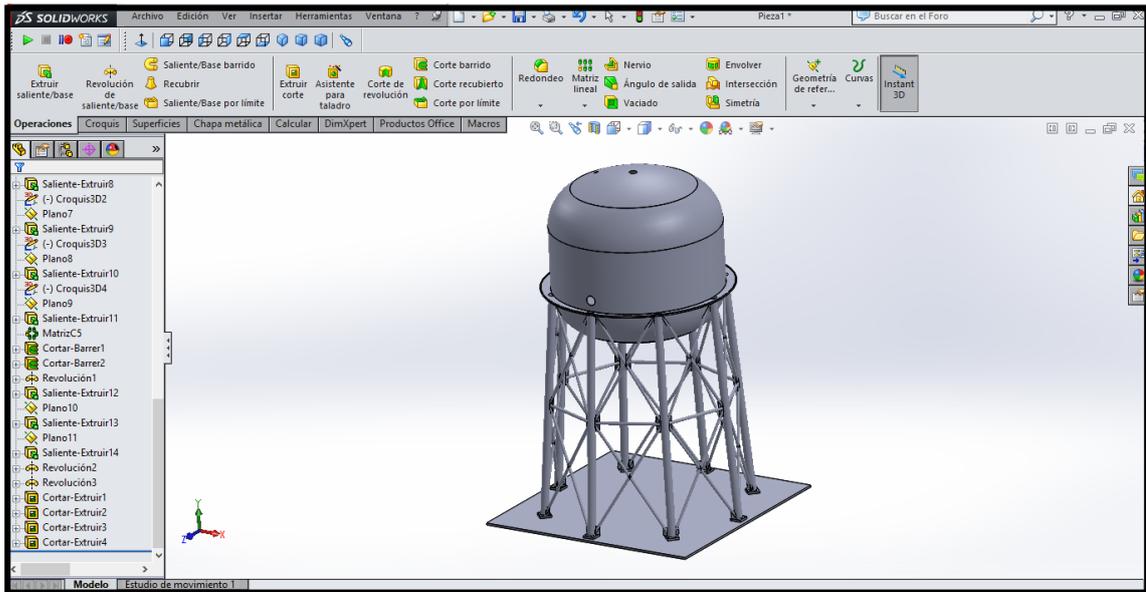


Figura 64-4. Tanque elevado modelado en SolidWorks.

CAPÍTULO V

5. VALIDACIÓN DE LA HOJA ELECTRÓNICA

Como toda herramienta propuesta para ser confiable debe ser validada de alguna manera, para el caso de nuestra hoja electrónica se realizó la validación de los resultados dados por la hoja de cálculo, realizando una comparación con el reporte emitido por el software SAP 2000.

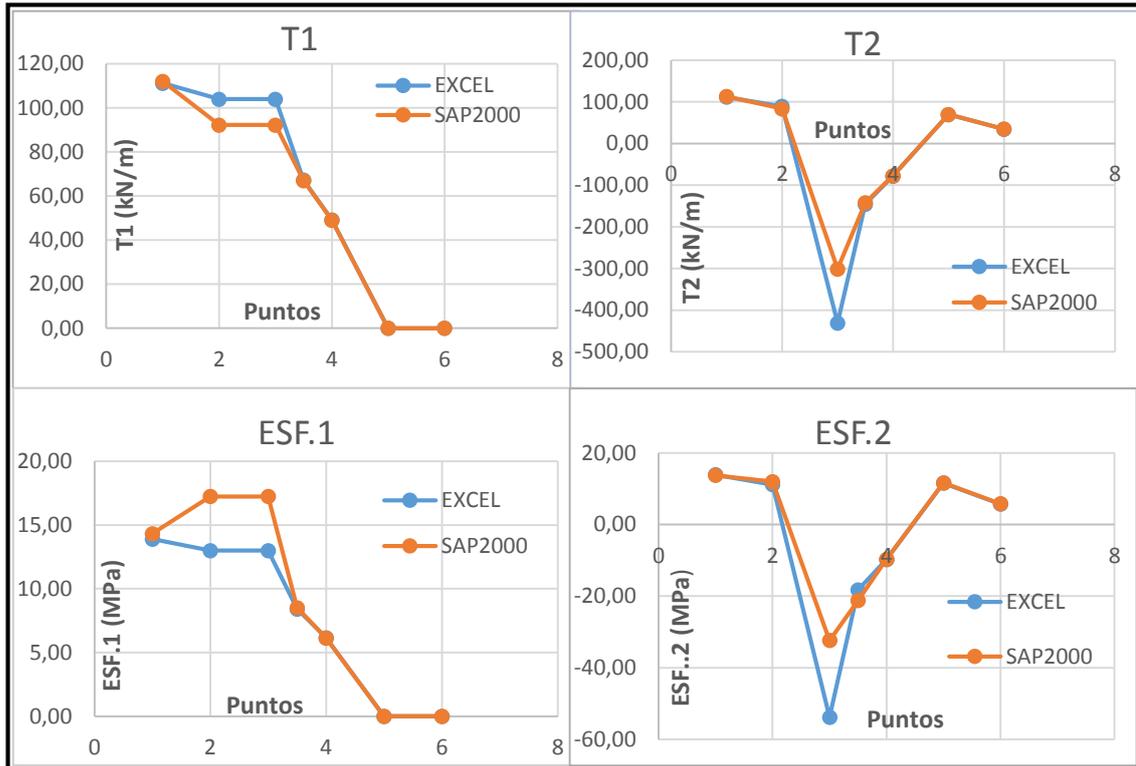
5.1 Validación del cálculo de las tensiones y esfuerzos en el tanque.

Para determinar las tensiones (longitudinales y circunferenciales) que se ejercen en las paredes del tanque metálico provocado por la carga hidrostática, la hoja electrónica utiliza el procedimiento dado por la API 620, para garantizar que este procedimiento se encuentra correctamente aplicada se procedió a determinar dichas tensiones en el software SAP2000 y comparar sus resultados. Vale recalcar que este procedimiento asume que el tanque se encuentra apoyada uniformemente en toda la circunferencia inferior de la parte cilíndrica, es decir no considera la concentración de esfuerzos que se producen en el tanque en los puntos de unión con las columnas de la estructura de soporte, por lo que en el momento de modelar el tanque en el software hay que tomar en cuenta dicha condición para que los resultados sean coherentes. Se modelaron 5 tanques en el software, se determinó las tensiones y esfuerzos en diferentes puntos de la pared de cada tanque y se comparó con los resultados dados por la hoja electrónica dándonos los siguientes resultados:

1. Tanque de 25.000 galones con diámetro de 6 metros.

Tabla 1-5. Tensiones y esfuerzos en el tanque de 25.000 galones.

PNT	T1 (kN/m)			T2 (kN/m)			Esf1 (MPa)			Esf2 (MPa)		
	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E
1	111,19	112,05	0,77	111,19	112,99	1,59	13,90	14,32	2,91	13,90	13,71	1,38
2	103,94	92,22	12,70	89,00	83,26	6,89	12,99	17,23	24,61	11,12	11,99	7,20
3	103,94	92,22	12,70	-430,69	-301,27	42,96	12,99	17,23	24,61	-53,84	-38,36	40,34
3,5	67,25	67,02	0,34	-145,80	-142,03	2,65	8,41	8,50	1,15	-18,23	-21,18	13,96
4	49,20	49,01	0,39	-78,08	-77,63	0,58	6,15	6,13	0,38	-9,76	-9,70	0,58
5	0,00	0,00	0,00	69,52	69,67	0,21	0,00	0,00	0,00	11,59	11,61	0,18
6	0,00	0,00	0,00	34,24	34,75	1,47	0,00	0,00	0,00	5,71	5,79	1,47
	Promedio:		3,84	Promedio:		8,05	Promedio:		7,67	Promedio:		9,3



Gráfica 1-5. Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 25k gal.

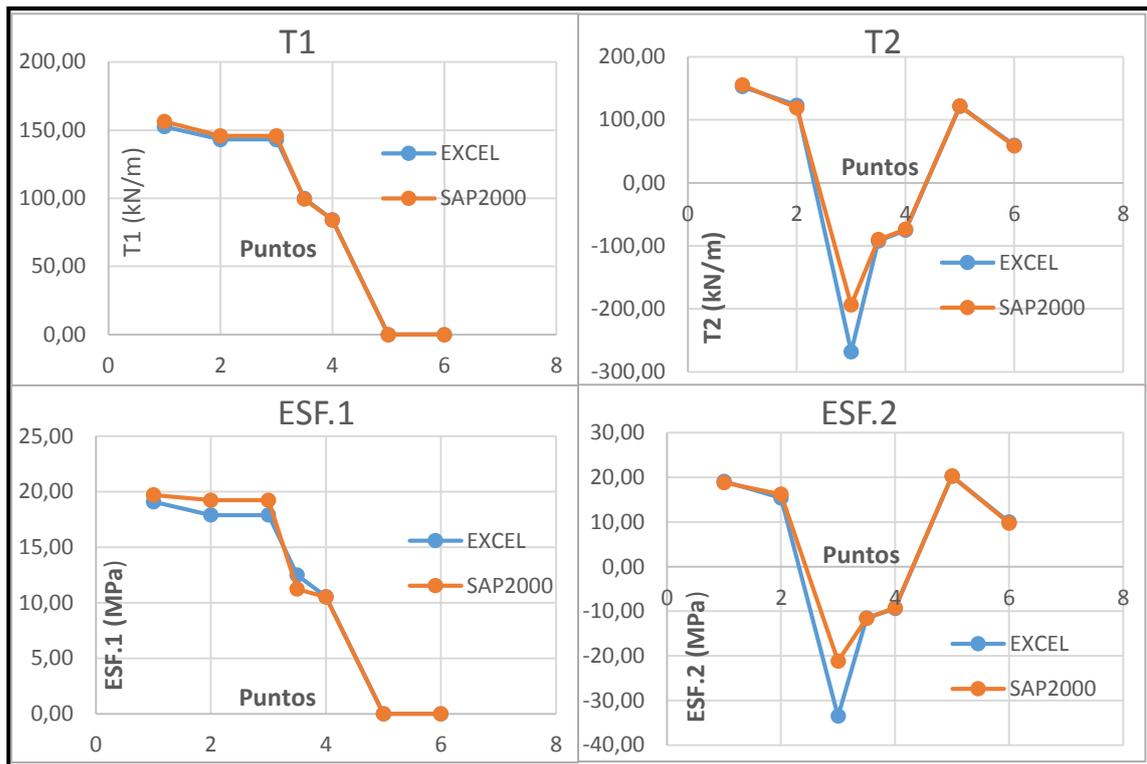
Realizado por: Willian Inchilema, 2017

2. Tanque de 50.000 galones, con diámetro de 7 metros.

Tabla 2-5. Tensiones y esfuerzos en el tanque de 50.000 galones.

PUNTO	T1 (kN/m)			T2 (kN/m)			Esf1 (MPa)			Esf2 (MPa)		
	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E
1	152,68	156,36	2,35	152,68	155,13	1,58	19,09	19,70	3,10	19,09	18,81	1,46
2	143,14	145,85	1,86	123,18	118,97	3,53	17,89	19,23	6,97	15,40	16,22	5,07
3	143,14	145,85	1,86	-268,07	-193,97	38,20	17,89	19,23	6,97	-33,51	-21,20	58,09
3,5	99,90	99,40	0,51	-92,19	-90,00	2,43	12,49	11,22	11,31	-11,52	-11,58	0,51
4	84,35	84,11	0,29	-75,27	-73,90	1,85	10,54	10,52	0,25	-9,41	-9,24	1,86
5	0,00	0,00	0,00	121,53	121,74	0,17	0,00	0,00	0,00	20,26	20,30	0,19
6	0,00	0,00	0,00	59,79	58,33	2,51	0,00	0,00	0,00	9,97	9,72	2,51
	Promedio:		0,98	Promedio:		7,18	Promedio:		4,09	Promedio:		9,96

Realizado por: Willian Inchilema, 2017



Gráfica 2-5. Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 50k gal.

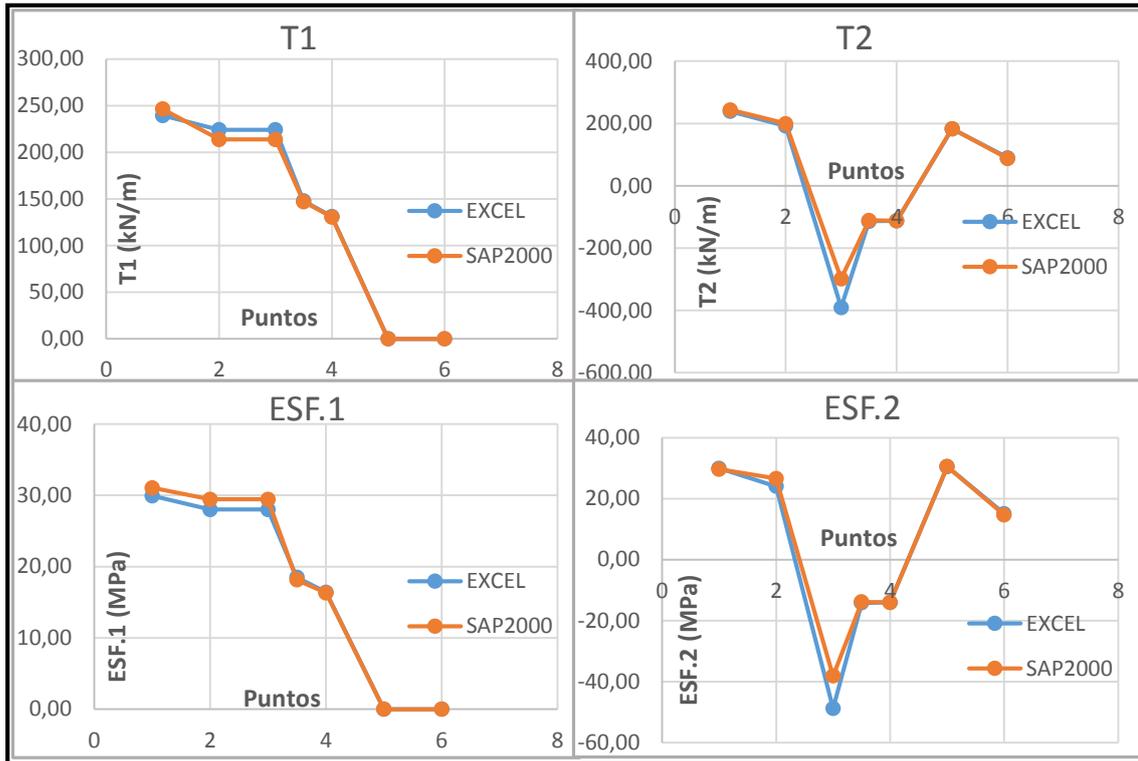
Realizado por: Willian Inchilema, 2017

3. Tanque de 100.000 galones, con diámetro de 10 metros.

Tabla 3-5. Tensiones y esfuerzos en el tanque de 100.000 galones.

PUNTOS	T1 (kN/m)			T2 (kN/m)			Esf1 (MPa)			Esf2 (MPa)		
	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E
1	239,46	246,38	2,81	239,46	243,78	1,77	29,93	31,06	3,63	29,93	29,61	1,10
2	224,16	213,75	4,87	192,20	199,81	3,81	28,02	29,45	4,85	24,02	26,61	9,72
3	224,16	213,75	4,87	-390,63	-298,23	30,98	28,02	29,45	4,85	-48,83	-38,17	27,91
3,5	147,87	147,02	0,58	-113,57	-110,74	2,56	18,48	18,14	1,88	-14,20	-13,91	2,08
4	131,20	130,53	0,52	-112,32	-112,30	0,02	16,40	16,32	0,49	-14,04	-14,04	0,02
5	0,00	0,00	0,00	182,89	183,27	0,21	0,00	0,00	0,00	30,48	30,54	0,18
6	0,00	0,00	0,00	90,28	87,81	2,81	0,00	0,00	0,00	15,05	14,64	2,81
	Promedio:		1,95	Promedio:		6,02	Promedio:		2,24	Promedio:		6,26

Realizado por: Willian Inchilema, 2017



Gráfica 3-5. Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 100k gal.

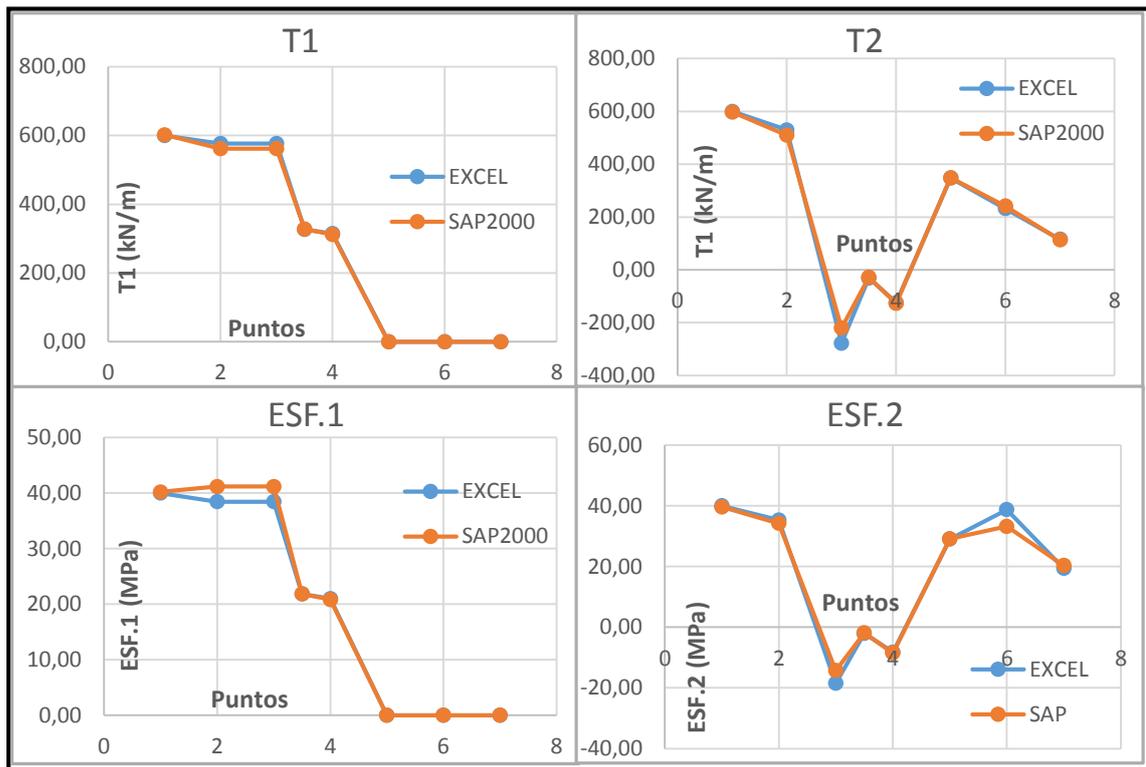
Realizado por: Willian Inchilema, 2017

4. Tanque de 400.000 galones, con diámetro de 15 metros.

Tabla 4-5. Tensiones y esfuerzos en el tanque de 400.000 galones.

PUNTO	T1 (kN/m)			T2 (kN/m)			Esf1 (MPa)			Esf2 (MPa)		
	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E
1	599,66	601,99	0,39	599,66	597,27	0,40	39,98	40,17	0,48	39,98	39,61	0,92
2	576,65	561,96	2,62	529,59	509,59	3,93	38,44	41,16	6,60	35,31	34,16	3,36
3	576,65	561,96	2,62	-277,73	-220,07	26,20	38,44	41,16	6,60	-18,52	-14,29	29,60
3,5	327,16	327,97	0,25	-30,97	-28,31	9,39	21,81	21,83	0,09	-2,06	-1,91	8,31
4	314,89	312,14	0,88	-124,19	-127,40	2,51	20,99	20,81	0,88	-8,28	-8,49	2,49
5	0,00	0,00	0,00	348,14	348,61	0,13	0,00	0,00	0,00	29,01	29,05	0,13
6	0,00	0,00	0,00	232,08	241,24	3,79	0,00	0,00	0,00	38,68	33,20	16,51
7	0,00	0,00	0,00	116,03	113,14	2,55	0,00	0,00	0,00	19,34	20,31	4,78
	Promedio:		0,91	Promedio:		6,93	Promedio:		2,02	Promedio:		9,31

Realizado por: Willian Inchilema, 2017



Gráfica 4-5. Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 400k gal.

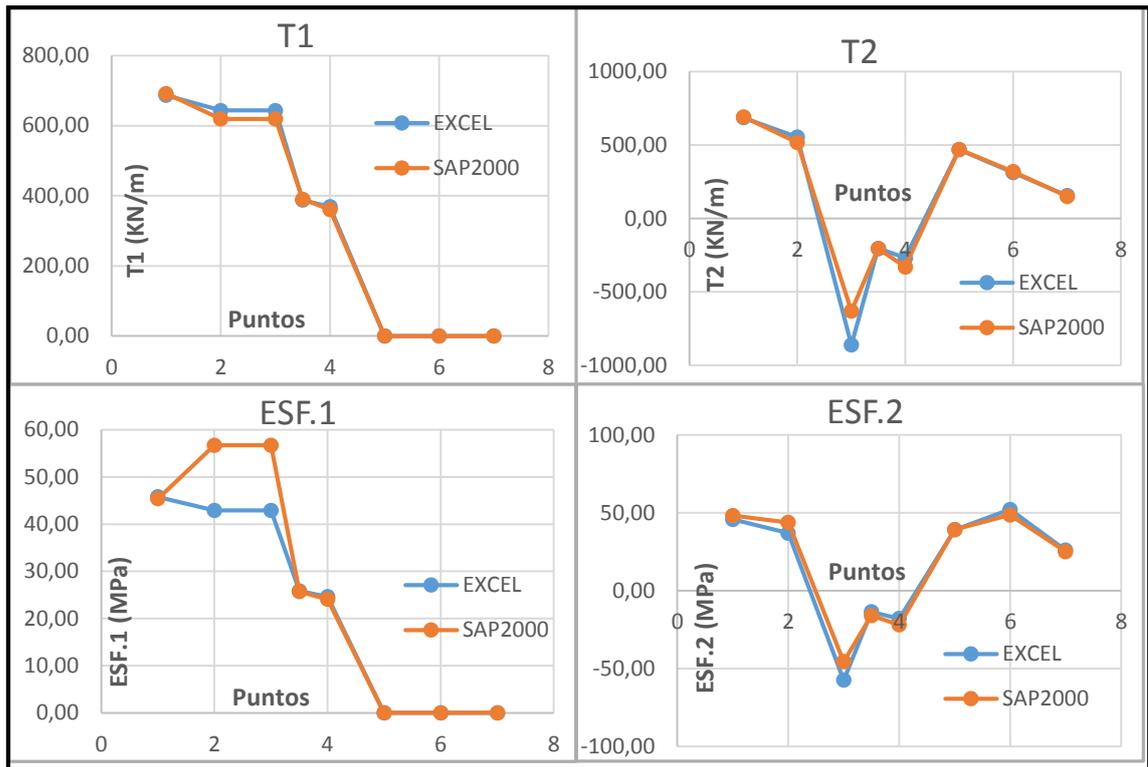
Realizado por: Willian Inchilema, 2017

5. Tanque de 500.000 galones, con diámetro de 16 metros

Tabla 5-5. Tensiones y esfuerzos en el tanque de 500.000 galones.

PUNTOS	T1 (kN/m)			T2 (kN/m)			Esf1 (MPa)			Esf2 (MPa)		
	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E	EXCEL	SAP2000	%E
1	686,69	691,67	0,72	686,69	692,20	0,80	45,78	45,38	0,88	45,78	48,23	5,08
2	643,67	619,23	3,95	554,25	516,86	7,23	42,91	56,71	24,33	36,95	43,79	15,61
3	643,67	619,24	3,94	-861,82	-631,04	36,57	42,91	56,71	24,33	-57,45	-48,57	18,30
3,5	388,01	390,55	0,65	-203,93	-204,82	0,43	25,87	25,72	0,58	-13,60	-15,95	14,77
4	369,01	360,69	2,31	-268,66	-330,12	18,62	24,60	24,04	2,32	-17,91	-20,00	10,45
5	0,00	0,00	0,00	469,37	469,68	0,07	0,00	0,00	0,00	39,11	39,14	0,07
6	0,00	0,00	0,00	312,57	318,59	1,89	0,00	0,00	0,00	52,09	48,62	7,15
7	0,00	0,00	0,00	155,77	150,18	3,72	0,00	0,00	0,00	25,96	25,03	3,72
	Promedio:		1,45	Promedio:		8,67	Promedio:		6,55	Promedio:		9,39

Realizado por: Willian Inchilema, 2017



Gráfica 5-5. Tensiones y esfuerzos en varios puntos del tanque de 500k gal.

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Como puede observarse en las tablas anteriores, los valores dados por el software SAP2000 y la hoja de cálculo son muy similares en la mayoría de los casos, con excepción de las tensiones y esfuerzos circunferenciales (T2 y ESF.2 respectivamente) en el punto 3 de cada tanque analizado, donde puede observarse que existe una diferencia notable entre los valores dados por el software y la hoja electrónica. Este punto se encuentra en el cambio de curvatura de la parte abombada a la parte de reborde del casquete de fondo por lo que resulta un poco difícil calcular con exactitud las tensiones provocadas en ese punto, pero debido a que los valores que proporciona la hoja de cálculo resultan ser conservadores se le considera aceptable.

5.2 Validación de la estructura de soporte

Para la validación de la hoja electrónica con respecto a la estructura de soporte se realizó el análisis de 65 tanques elevados en el software SAP2000 y se compararon con los valores dados por la hoja electrónica en la determinación de la demanda y capacidad de los elementos estructurales.

Se determinó la capacidad y la demanda de la columna más crítica en software Sap2000 bajo la combinación: $u = 1,2D + E$ y se realizó la comparación con los resultados emitidos por la hoja de cálculo, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 6-5.

Tabla 6-5. Comparación de las cargas a compresión en la columna más crítica.

Elemento: Columna					Demanda (N)			Capacidad (N)			
Ítem	Capacidad (Gal.)	Nº Anillos de arriostres horz.	Altura estructura de soporte (m)	Coeficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error
2	15,00	0,34	NPS 16STD	637.873,05	648.354,53	1,64	2.217.262,71	2.217.347,07	0,00		
3	20,00	0,27	NPS 18STD	626.523,45	603.952,19	3,60	2.358.356,46	2.358.481,96	0,01		
4	25,00	0,23	NPS 18STD	593.047,87	642.014,94	8,26	2.101.990,56	2.102.165,34	0,01		
5	30,00	0,20	NPS 20STD	1.046.243,67	1.106.180,80	5,73	1.428.953,26	1.429.882,39	0,07		
6	2	10,00	0,43	NPS 20STD	590.740,37	597.727,82	1,18	3.165.040,79	3.165.055,87	0,00	
7		15,00	0,35	NPS 20STD	673.768,35	624.916,84	7,25	3.093.385,26	3.093.418,43	0,00	
8		20,00	0,31	NPS 20STD	726.056,29	711.747,21	1,97	2.995.784,66	2.995.841,76	0,00	
9		25,00	0,31	NPS 22 STD	809.810,85	807.325,42	0,31	3.233.805,36	3.233.884,63	0,00	
10		30,00	0,27	NPS 24 STD	837.376,65	776.064,67	7,32	3.466.066,86	3.466.169,31	0,00	
11	3	10,00	0,43	NPS 24 STD	534.024,50	634.144,88	18,75	3.851.107,66	3.852.743,66	0,04	
12		15,00	0,35	NPS 12 STD	700.395,28	560.890,51	19,92	1.919.097,40	1.917.287,09	0,09	
13		20,00	0,31	NPS 12 STD	1.367.034,04	1.456.161,46	6,52	1.833.831,05	1.832.313,59	0,08	
14		25,00	0,24	NPS 12 STD	1.241.727,15	1.371.951,13	10,49	1.729.745,80	1.728.572,10	0,07	
15		30,00	0,20	NPS 12 STD	1.221.196,99	1.316.919,10	7,84	1.610.519,21	1.609.719,64	0,05	
16	50.000,00	1	10,00	0,43	NPS 16STD	1.746.168,15	1.708.215,93	2,17	2.403.745,87	2.405.014,13	0,05
17			15,00	0,34	NPS 16STD	1.805.407,84	1.691.329,35	6,32	2.216.135,35	2.217.347,07	0,05
18			20,00	0,27	NPS 16STD	1.659.409,28	1.637.850,19	1,30	1.977.821,55	1.978.956,00	0,06
19			25,00	0,23	NPS 18STD	1.767.943,72	1.662.597,07	5,96	2.102.464,91	2.102.165,34	0,01
20			30,00	0,19	NPS 20STD	1.600.310,28	1.547.798,01	3,28	2.223.316,67	2.224.659,82	0,06
21		2	10,00	0,43	NPS 16STD	1.744.844,52	1.837.938,63	5,34	2.492.149,00	2.493.442,68	0,05
22			15,00	0,31	NPS 18STD	2.019.102,48	1.991.760,81	1,35	2.403.745,87	2.405.014,13	0,05
23			20,00	0,31	NPS 18STD	2.189.662,93	2.197.791,50	0,37	2.642.276,34	2.642.295,51	0,00
24			25,00	0,27	NPS 18STD	2.306.404,54	2.273.870,17	1,41	2.510.647,87	2.510.582,02	0,00
25			30,00	0,24	NPS 18STD	2.258.219,90	2.278.959,83	0,92	2.358.640,35	2.358.481,96	0,01
26		3	10,00	0,43	NPS 16STD	1.534.485,88	1.802.095,03	17,44	2.523.852,17	2.525.154,79	0,05
27			15,00	0,41	NPS 16STD	2.260.351,04	2.297.637,28	1,65	2.473.095,27	2.474.383,53	0,05
28			20,00	0,31	NPS 16STD	2.194.170,67	2.201.293,88	0,32	2.403.745,87	2.405.014,13	0,05
29			25,00	0,27	NPS 18STD	2.350.794,86	2.323.761,73	1,15	2.671.503,66	2.671.542,30	0,00
30			30,00	0,22	NPS 18STD	2.163.882,58	2.158.792,71	0,24	2.579.279,92	2.579.257,85	0,00

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 6-5. (Continúa) Comparación de las cargas a compresión en la columna más crítica.

Elemento: Columna					Demanda			Capacidad				
Ítem	Capacidad	Nº Anillos de arriostres horz.	Altura	Coeficiente de corante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
												31
32	15,00	0,34	NPS 20STD	2.947.957,10	2.934.234,34	0,47	2.936.529,27	2.938.106,71	0,05			
33	20,00	0,32	NPS 20STD	3.404.242,10	3.320.643,97	2,46	3.612.194,72	3.612.351,66	0,00			
34	25,00	0,49	NPS 20XS	3.149.310,08	3.008.668,73	4,47	3.288.420,65	3.288.643,86	0,01			
35	30,00	0,20	NPS 20XS	2.771.474,16	2.796.556,77	0,91	2.931.841,71	2.932.128,23	0,01			
36	2	NPS 20SCH30	10,00	0,43	NPS 20SCH30	2.711.196,55	2.914.999,29	7,52	4.190.053,84	4.190.074,18	0,00	
37			15,00	0,35	NPS 20XS	3.318.626,50	3.261.838,64	1,71	4.094.015,00	4.094.060,54	0,00	
38			20,00	0,29	NPS 20XS	3.459.635,30	3.263.806,17	5,66	3.963.249,70	3.963.326,29	0,00	
39			25,00	0,24	NPS 20XS	3.581.667,00	3.285.912,14	8,26	3.801.240,15	3.801.354,88	0,00	
40			30,00	0,20	NPS 20XS	3.237.382,70	3.146.496,11	2,81	3.612.194,72	3.612.351,66	0,00	
41	3	NPS 18STD	10,00	0,43	NPS 18STD	2.368.550,45	2.235.560,72	5,61	2.856.823,45	2.856.989,90	0,01	
42			15,00	0,38	NPS 20XS	3.387.139,60	3.323.614,60	1,88	4.169.459,06	4.169.484,64	0,00	
43			20,00	0,35	NPS 22 XS	3.960.609,20	4.214.606,22	6,41	4.547.441,42	4.549.261,68	0,04	
44			25,00	0,30	NPS 22 XS	4.227.575,30	4.315.457,00	2,08	4.460.452,10	4.462.323,00	0,04	
45			30,00	0,26	NPS 24 XS	4.242.999,10	4.262.845,46	0,47	4.821.938,26	4.825.668,11	0,08	
46	300,000,00	1	15,00	0,35	NPS 28 STD	4.070.773,10	3.783.015,87	7,07	4.327.864,68	4.328.805,69	0,02	
47			20,00	0,25	NPS 28 XS	3.175.475,40	3.670.140,46	15,58	5.534.850,04	5.533.120,05	0,03	
48			25,00	0,23	NPS 28 XS	4.150.560,80	3.539.639,54	14,72	5.279.498,42	5.277.770,36	0,03	
49			30,00	0,20	NPS 28 XS	3.879.182,20	3.246.691,74	16,30	4.983.345,32	4.981.624,35	0,03	
50		2	NPS 30 STD	15,00	0,38	NPS 30 STD	4.498.196,00	4.985.593,87	10,84	4.776.429,59	4.778.926,53	0,05
51				20,00	0,31	NPS 30 XS	5.025.240,10	4.986.538,43	0,77	6.251.406,19	6.251.458,71	0,00
52				25,00	0,27	NPS 30 XS	5.351.013,20	5.196.783,75	2,88	6.138.393,08	6.138.473,78	0,00
53				30,00	0,24	NPS 30 XS	5.536.820,40	5.358.219,90	3,23	6.003.036,72	6.003.150,47	0,00
54		3	NPS 30 XS	15,00	0,41	NPS 30 XS	3.914.131,00	5.427.335,84	38,66	6.391.552,97	6.391.569,80	0,00
55				20,00	0,35	NPS 30 XS	5.646.180,00	5.813.208,31	2,96	6.340.741,81	6.340.771,68	0,00
56				25,00	0,29	NPS 30 XS	5.684.447,70	5.637.466,36	0,83	6.276.006,27	6.276.052,59	0,00
57				30,00	0,24	NPS 30 XS	5.678.755,60	5.505.890,92	3,04	6.197.781,92	6.197.847,88	0,00
58	500,000,00	1	15,00	0,34	NPS 30 XS	4.445.048,90	4.668.312,86	5,02	6.197.781,92	6.197.847,88	0,00	
59			20,00	0,27	NPS 30 XS	3.757.445,70	4.268.126,00	13,59	6.003.036,72	6.003.150,47	0,00	
60			25,00	0,23	NPS 30 XS	4.426.781,30	3.964.445,52	10,44	5.761.614,51	5.761.785,21	0,00	
61			30,00	0,20	NPS 30 XS	4.233.234,50	3.750.265,95	11,41	5.479.688,65	5.479.922,53	0,00	
62		2	NPS 30 XS	15,00	0,41	NPS 30 XS	6.036.583,40	6.293.393,78	4,25	6.340.741,82	6.340.771,68	0,00
63				20,00	0,31	NPS 30 XS	5.706.045,30	5.669.283,14	0,64	6.251.406,19	6.251.458,71	0,00
64				25,00	0,26	NPS 30 XS	5.680.058,90	5.594.269,73	1,51	6.138.393,07	6.138.473,78	0,00
65				30,00	0,22	NPS 30 XS	5.621.336,50	5.510.297,34	1,98	6.003.036,72	6.003.150,47	0,00
						promedio		6,00	promedio		0,02	

Como puede observarse en la tabla 6-5 al compararse los valores dados por el software y por la hoja electrónica se determina que dicha hoja es muy confiable al momento de calcular la capacidad y la demanda de la columna más crítica bajo la combinación de carga $u = 1,2D + E$, teniendo un porcentaje de error promedio aproximadamente a cero por ciento en el cálculo de la capacidad y un error promedio del 6% en la determinación de la carga de demanda de la columna.

De la misma manera se obtuvo la capacidad y demanda de los arriostres diagonales bajo la combinación de carga: $u = 1,2D + E$. Al comparar estos datos con los emitidos por la hoja electrónica se obtuvieron los resultados mostrados en las siguientes tablas:

Tabla 6-5. Comparación de las cargas a compresión en el arriostre diagonal 1.

Elemento: Diagonal 1					Demanda:			Capacidad			
Capacidad	N° Arillos de arriostres horz.	Altura	Coeficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
1	25.000,00	10,00	0,43	NPS 3XS	136.991,54	113.675,16	17,02	191.569,14	191.608,29	0,02	
2		15,00	0,34	NPS 4STD	135.252,30	145.997,99	7,94	197.622,40	197.663,82	0,02	
3		20,00	0,27	NPS 5STD	147.606,04	177.316,77	20,13	252.812,34	252.869,06	0,02	
4		25,00	0,23	NPS 5XS	168.551,99	179.123,48	6,27	226.529,66	226.588,60	0,03	
5		30,00	0,20	NPS 6XS	176.967,70	182.220,31	2,97	212.758,44	213.180,03	0,20	
6		2	10,00	0,43	NPS 2 1/2 (tkns 0,25)	63.900,46	77.374,68	21,09	135.145,87	134.354,58	0,59
7			15,00	0,35	NPS 3 STD	79.719,80	76.015,96	4,65	146.873,67	146.902,30	0,02
8			20,00	0,31	NPS 3 1/2 XS	106.345,68	78.990,13	25,72	210.320,71	210.369,47	0,02
9		3	25,00	0,31	NPS 4XS	128.520,55	127.477,11	0,81	224.160,40	224.218,72	0,03
10			30,00	0,27	NPS 5STD	129.931,69	164.511,22	26,61	252.812,34	252.869,06	0,02
11			10,00	0,43	NPS 5STD	42.674,27	42.556,90	0,28	514.953,21	514.528,73	0,08
12		50.000,00	15,00	0,35	NPS 2 1/2 STD	79.103,96	73.453,21	7,14	104.686,68	104.690,46	0,00
13			20,00	0,31	NPS 2 1/2 STD	87.683,26	82.702,24	5,68	77.144,25	77.101,47	0,06
14			25,00	0,24	NPS 3 STD	91.227,52	90.485,13	0,81	111.965,43	111.948,72	0,01
15			30,00	0,20	NPS 3 1/2 STD	97.600,03	96.081,49	1,56	133.459,60	133.423,05	0,03
16	1	10,00	0,43	NPS 4STD	223.884,93	218.615,74	2,35	266.849,37	267.109,63	0,10	
17		15,00	0,34	NPS 5STD	258.584,01	256.070,88	0,97	344.285,15	343.702,33	0,17	
18		20,00	0,27	NPS 5STD	287.941,88	289.393,28	0,50	417.248,66	417.783,04	0,13	
19		25,00	0,23	NPS 6STD	288.919,82	300.058,04	3,86	305.061,85	305.629,47	0,19	
20		30,00	0,19	NPS 8CH30	297.254,35	298.278,64	0,34	468.344,47	468.835,25	0,10	

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 6-5 (Continúa). Comparación de las cargas a compresión en el arrioste diagonal 1.

Elemento: Diagonal 1				Demanda:			Capacidad			
Capacidad	Nº Anillos de arriostres horz.	Altura	Coeficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error
21	50.000,00	10,00	0,43	NPS 3 1/2 STD	161.902,38	166.996,05	3,15	239.241,71	239.181,04	0,03
22		15,00	0,31	NPS 4STD	179.998,32	183.713,66	2,06	196.292,44	196.241,24	0,03
23		20,00	0,31	NPS 4STD	195.107,58	208.456,34	6,84	214.270,22	214.448,13	0,08
24		25,00	0,27	NPS 5STD	227.091,28	244.274,49	7,57	311.871,72	311.277,28	0,19
25		30,00	0,24	NPS 6STD	255.322,75	282.238,62	10,54	417.248,66	417.783,04	0,13
26		10,00	0,43	NPS 3 STD	116.832,67	132.682,65	13,57	189.381,66	189.360,63	0,01
27		15,00	0,41	NPS 3 1/2 STD	164.748,36	153.737,51	6,68	229.376,83	229.318,31	0,03
28		20,00	0,31	NPS 3 1/2 STD	158.877,68	145.735,60	8,27	196.292,44	196.241,24	0,03
29		25,00	0,27	NPS 4STD	169.993,30	176.787,39	4,00	227.784,73	227.983,06	0,09
30		30,00	0,22	NPS 5SCH40	181.010,88	196.800,48	8,72	344.285,15	343.702,33	0,17
31	100.000,00	10,00	0,46	NPS 6STD	416.691,51	403.235,77	3,23	579.025,42	579.415,83	0,07
32		15,00	0,34	NPS 6STD	442.321,58	443.425,31	0,25	494.194,94	494.673,03	0,10
33		20,00	0,32	NPS 8STD	531.187,58	538.787,86	1,43	787.319,24	787.586,91	0,03
34		25,00	0,49	NPS 8STD	513.786,71	524.813,94	2,15	660.851,06	661.125,06	0,04
35		30,00	0,20	NPS 8STD	534.787,08	531.326,37	0,65	650.891,52	651.099,02	0,03
36		10,00	0,43	NPS 4SCH80	277.535,50	294.655,66	6,17	366.053,75	366.017,46	0,01
37		15,00	0,35	NPS 5SCH40	304.946,06	348.762,77	14,37	393.692,26	393.139,66	0,14
38		20,00	0,29	NPS 6STD	341.315,90	400.602,84	17,37	524.799,74	525.249,08	0,09
39		25,00	0,24	NPS 6STD	352.820,52	399.504,24	13,23	461.867,31	462.371,96	0,11
40		30,00	0,20	NPS 6XS	384.144,36	398.414,68	3,71	575.509,41	575.717,31	0,04
41		10,00	0,43	NPS 3 1/2 STD	206.232,08	185.263,44	10,17	213.370,02	213.315,02	0,03
42		15,00	0,38	NPS 4XS	273.704,84	268.130,43	2,04	353.444,26	353.420,24	0,01
43		20,00	0,35	NPS 5STD	284.222,55	346.533,36	21,92	393.692,26	393.139,66	0,14
44		25,00	0,30	NPS 5STD	294.419,32	344.202,22	16,91	355.789,94	355.212,87	0,16
45		30,00	0,26	NPS 6STD	311.409,75	351.795,32	12,97	494.194,93	494.673,03	0,10
46	300.000,00	15,00	0,35	NPS 8 SCH 60	1.128.765,55	1.112.734,63	1,42	1.116.277,82	1.116.320,86	0,00
47		20,00	0,25	NPS 10STD	1.048.107,86	1.048.235,42	0,01	1.296.096,81	1.295.831,87	0,02
48		25,00	0,23	NPS 10STD	1.159.400,88	1.119.712,26	3,42	1.169.624,67	1.169.089,98	0,05
49		30,00	0,20	NPS 10XS	1.286.055,84	1.129.154,61	12,20	1.373.275,41	1.372.798,84	0,03
50		15,00	0,38	NPS 10STD	927.565,73	933.266,17	0,61	1.480.693,29	1.480.876,07	0,01
51		20,00	0,31	NPS 10STD	903.995,85	906.166,68	0,24	1.430.916,78	1.430.972,92	0,00
52		25,00	0,27	NPS 10STD	972.059,98	954.355,48	1,82	1.368.995,92	1.368.900,51	0,01
53		30,00	0,24	NPS 10STD	1.027.965,32	1.002.563,67	2,47	1.296.096,80	1.295.831,87	0,02

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 6-5 (Continúa). Comparación de las cargas a compresión en el arriostre diagonal 1.

Elemento: Diagonal 1					Demanda:			Capacidad			
Capacidad	Nº Anillos de arriostres horz.	Altura	Coefficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
54	300.000,00	3	15,00	0,41	NPS 10STD	747.198,48	935.850,23	25,25	1.509.586,87	1.509.845,06	0,02
55			20,00	0,35	NPS 10STD	813.911,62	890.461,59	9,41	1.480.693,29	1.480.876,07	0,01
56			25,00	0,29	NPS 10 SCH 30	776.687,18	844.257,99	8,70	1.224.045,47	1.224.127,66	0,01
57			30,00	0,24	NPS 8STD	752.033,28	820.471,31	9,10	899.101,48	899.356,29	0,03
58	500.000,00	1	15,00	0,34	NPS 10 SCH 80	1.467.397,82	1.345.119,99	8,33	2.253.650,30	2.253.499,54	0,01
59			20,00	0,27	NPS 10XS	1.489.797,94	1.427.951,57	4,15	1.776.829,47	1.776.395,71	0,02
60			25,00	0,23	NPS 10XS	1.547.749,26	1.485.185,04	4,04	1.605.074,41	1.604.617,39	0,03
61			30,00	0,20	NPS 10 SCH 80	1.665.281,62	1.545.258,25	7,21	1.650.134,91	1.649.950,61	0,01
62		2	15,00	0,41	NPS 10STD	1.144.401,85	1.219.281,79	6,54	1.502.435,06	1.502.674,46	0,02
63			20,00	0,31	NPS 10STD	1.120.162,70	1.138.000,64	1,59	1.453.819,03	1.453.932,92	0,01
64			25,00	0,26	NPS 10STD	1.160.937,20	1.149.804,70	0,96	1.393.129,13	1.393.091,98	0,00
65			30,00	0,22	NPS 10STD	1.194.206,28	1.182.022,79	1,02	1.321.524,18	1.321.317,26	0,02
							promedio	7,13	promedio		0,06

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 7-5. Comparación de las cargas a compresión en el arriostre diagonal 2.

Elemento: Diagonal 2					Demanda:			Capacidad			
Capacidad	Nº Anillos de arriostres horz.	Altura	Coefficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
1	25.000,00	1	10,00	0,43	NPS 3XS	116.019,96	97.307,75	16,13	176.424,89	176.464,73	0,02
2			15,00	0,34	NPS 4STD	124.507,82	128.849,38	3,49	184.960,99	185.002,94	0,02
3			20,00	0,27	NPS 5STD	137.687,10	159.973,54	16,19	241.120,37	241.177,43	0,02
4			25,00	0,23	NPS 5XS	163.182,36	157.159,23	3,69	220.219,11	220.276,40	0,03
5			30,00	0,20	NPS 6XS	169.553,25	157.996,00	6,82	211.838,82	212.258,59	0,20
6		2	10,00	0,43	NPS 2 1/2 (tkns 0,25)	52.084,03	61.707,79	18,48	124.665,96	123.952,07	0,57
7			15,00	0,35	NPS 3 STD	66.731,87	62.587,52	6,21	135.778,47	135.807,71	0,02
8			20,00	0,31	NPS 3 1/2 XS	86.825,64	64.815,39	25,35	193.612,39	193.662,77	0,03
9			25,00	0,31	NPS 4XS	109.707,07	118664,449	8,16	208.883,66	208.938,00	0,03
10			30,00	0,27	NPS 5STD	113.226,91	123857,031	9,39	241.120,37	241.177,43	0,02

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 7-5 (Continúa). Comparación de las cargas a compresión en el arrioste diagonal 2.

Elemento: Diagonal 2				Demanda:			Capacidad				
Capacidad	Nº Anillos de arriostres hnrz.	Altura	Coeficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
					25.000,00	3	10,00	0,43	NPS 5STD	33.950,76	36921,7009
12		15,00	0,35	NPS 2 1/2 STD	66.508,09	66577,1654	0,10	95.862,47	95.838,48	0,03	
13		20,00	0,31	NPS 2 1/2 STD	73.237,45	77194,5531	5,40	69.825,30	69.786,57	0,06	
14		25,00	0,24	NPS 3 STD	76.846,80	80298,7379	4,49	102.260,40	102.245,13	0,01	
15		30,00	0,20	NPS 3 1/2 STD	83.833,98	81459,1652	2,83	123.324,69	123.290,91	0,03	
16	50.000,00	10,00	0,43	NPS 4STD	202.628,15	197.038,90	2,76	252.738,70	252.976,12	0,09	
17			15,00	0,34	NPS 5STD	240.198,53	243.441,25	1,35	326.955,23	326.365,33	0,18
18		1	20,00	0,27	NPS 5STD	279.674,74	282.066,36	0,86	399.326,49	399.870,38	0,14
19			25,00	0,23	NPS 6STD	272.902,92	291.869,61	6,95	291.292,41	291.105,88	0,06
20			30,00	0,19	NPS 8CH30	287.757,57	289.834,31	0,72	459.383,79	459.869,24	0,11
21			10,00	0,43	NPS 3 1/2 STD	131.205,77	134.727,55	2,68	228.652,54	228.594,19	0,03
22			15,00	0,31	NPS 4STD	148.258,78	151.230,10	2,00	183.145,05	183.096,81	0,03
23		2	20,00	0,31	NPS 4STD	160.534,24	173.398,42	8,01	199.362,52	199.518,55	0,08
24			25,00	0,27	NPS 5STD	188.816,39	220.609,46	16,84	294.846,10	294.248,43	0,20
25			30,00	0,24	NPS 6STD	225.253,24	270.585,88	20,13	399.326,49	399.870,38	0,14
26		10,00	0,43	NPS 3 STD	92.144,58	108.995,76	18,29	181.228,89	181.208,15	0,01	
27		15,00	0,41	NPS 3 1/2 STD	134.530,87	127.939,71	4,90	217.906,39	217.850,39	0,03	
28	3	20,00	0,31	NPS 3 1/2 STD	129.745,34	120.461,40	7,16	183.145,05	183.096,81	0,03	
29		25,00	0,27	NPS 4STD	139.257,92	148.990,62	6,99	212.839,72	213.015,50	0,08	
30		30,00	0,22	NPS 5SCH40	151.545,75	167.921,38	10,81	326.955,23	326.365,33	0,18	
31	100.000,00	10,00	0,46	NPS 6STD	362.459,51	347.847,30	4,03	561.194,19	561.605,06	0,07	
32			15,00	0,34	NPS 6STD	399.655,68	407.853,06	2,05	471.263,83	471.761,18	0,11
33		1	20,00	0,32	NPS 8STD	500.286,86	513.099,86	2,56	759.454,96	759.724,82	0,04
34			25,00	0,49	NPS 8STD	482.816,69	504.359,80	4,46	633.788,51	634.062,58	0,04
35			30,00	0,20	NPS 8STD	520.370,19	513.798,01	1,26	622.633,25	622.846,58	0,03
36			10,00	0,43	NPS 4SCH80	204.605,62	196.495,42	3,96	349.252,39	349.232,36	0,01
37			15,00	0,35	NPS 5SCH40	218.406,47	235.631,80	7,89	376.534,06	375.969,35	0,15
38		2	20,00	0,29	NPS 6STD	264.783,89	275.117,79	3,90	503.105,77	503.575,84	0,09
39			25,00	0,24	NPS 6STD	276.076,86	277.007,96	0,34	438.205,30	438.726,76	0,12
40			30,00	0,20	NPS 6XS	301.303,86	263.896,70	12,42	539.559,16	539.746,80	0,03

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 7-5 (Continúa). Comparación de las cargas a compresión en el arrioste diagonal 2.

Elemento: Diagonal 2				Demanda:			Capacidad				
Capacidad	Nº Anillos de arriostres hnrz.	Altura	Coeficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
					41	3	10,00	0,43	NPS 3 1/2 STD	157.273,08	141.273,27
42	15,00	0,38	NPS 4XS	197.490,96	211.424,66		7,06	335.114,96	335.108,04	0,00	
43	20,00	0,35	NPS 5STD	219.726,55	276.780,77		25,97	376.534,06	375.969,35	0,15	
44	25,00	0,30	NPS 5STD	231.867,04	280.776,66		21,09	336.316,22	335.729,91	0,17	
45	30,00	0,26	NPS 6STD	247.680,73	297.805,09		20,24	471.263,83	471.761,18	0,11	
46	300.000,00	1	15,00	0,35	NPS 8 SCH 60	1.000.801,90	960.907,33	3,99	1.093.652,37	1.093.706,20	0,00
47			20,00	0,25	NPS 10STD	915.916,28	865.912,24	5,46	1.274.494,31	1.274.181,05	0,02
48			25,00	0,23	NPS 10STD	990.905,43	923.615,58	6,79	1.146.486,33	1.145.905,84	0,05
49			30,00	0,20	NPS 10XS	1.088.112,58	936.668,84	13,92	1.342.870,55	1.342.392,52	0,04
50		2	15,00	0,38	NPS 10STD	780.448,87	863.063,42	10,59	1.468.227,26	1.468.377,93	0,01
51			20,00	0,31	NPS 10STD	749.409,83	793.670,79	5,91	1.414.726,99	1.414.742,86	0,00
52			25,00	0,27	NPS 10STD	804.314,30	812.294,85	0,99	1.349.687,44	1.349.546,17	0,01
53			30,00	0,24	NPS 10STD	848.597,22	833.449,16	1,79	1.274.494,31	1.274.181,05	0,02
54		3	15,00	0,41	NPS 10STD	621.638,90	698.007,64	12,29	1.500.166,17	1.500.399,63	0,02
55			20,00	0,35	NPS 10STD	676.422,32	649.363,20	4,00	1.468.227,26	1.468.377,93	0,01
56			25,00	0,29	NPS 10 SCH 30	637.793,54	594.127,447	6,85	1.211.183,64	1.211.263,27	0,01
57			30,00	0,24	NPS 8STD	625.976,97	559.324,11	10,65	881.225,63	881.482,91	0,03
58	500.000,00	1	15,00	0,34	NPS 10 SCH 80	1.399.563,10	1.205.440,66	13,87	2.233.226,80	2.233.074,47	0,01
59			20,00	0,27	NPS 10XS	1.407.073,74	1.288.849,86	8,40	1.756.315,28	1.755.878,38	0,02
60			25,00	0,23	NPS 10XS	1.452.119,01	1.355.227,10	6,67	1.583.400,16	1.582.940,72	0,03
61			30,00	0,20	NPS 10 SCH 80	1.561.224,27	1.420.645,82	9,00	1.626.011,27	1.625.826,21	0,01
62		2	15,00	0,41	NPS 10STD	989.652,55	1.145.298,45	15,73	1.493.760,17	1.493.976,88	0,01
63			20,00	0,31	NPS 10STD	966.549,30	1.033.087,14	6,88	1.442.589,90	1.442.675,43	0,01
64			25,00	0,26	NPS 10STD	1.014.252,35	1.034.607,76	2,01	1.379.788,83	1.379.719,35	0,01
65			30,00	0,22	NPS 10STD	1.053.017,36	1.054.038,72	0,10	1.306.672,28	1.306.431,32	0,02
							promedio	7,99	promedio		0,06

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 8-5. Comparación de las cargas a compresión en el arriostre diagonal 3.

Elemento: Diagonal 3				Demanda:			Capacidad				
Capacidad	N° Anillos de arriostres horz.	Altura	Coeficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
1	25.000,00	10,00	0,43	NPS 2 1/2 (tkns 0,25)	54.503,20	60.380,58	10,78	114.227,42	113.589,23	0,56	
2		15,00	0,35	NPS 3 STD	68.862,02	58.126,95	15,59	124.219,64	124.249,27	0,02	
3		20,00	0,31	NPS 3 1/2 XS	91.738,94	80.463,96	12,29	175.993,06	176.038,84	0,03	
4		25,00	0,31	NPS 4XS	113.289,51	116392,738	2,74	191.756,08	191.805,97	0,03	
5		30,00	0,27	NPS 5STD	113.774,07	132323,5	16,30	224.164,60	224.222,92	0,03	
6		3	10,00	0,43	NPS 5STD	33.663,91	34699,8406	3,08	499.689,18	499.244,84	0,09
7			15,00	0,35	NPS 2 1/2 STD	62.367,25	64862,5159	4,00	86.862,37	86.814,20	0,06
8			20,00	0,31	NPS 2 1/2 STD	66.548,36	69884,5199	5,01	63.049,64	63.014,67	0,06
9			25,00	0,24	NPS 3 STD	68.262,31	70275,0859	2,95	92.756,94	92.743,09	0,01
10			30,00	0,20	NPS 3 1/2 STD	74.639,80	72069,4894	3,44	112.635,06	112.604,20	0,03
11	50.000,00	10,00	0,43	NPS 3 1/2 STD	137.709,04	139.142,75	1,04	217.829,05	217.773,06	0,03	
12		2	15,00	0,31	NPS 4STD	152.801,51	155.718,92	1,91	169.581,05	169.535,91	0,03
13			20,00	0,31	NPS 4STD	163.863,53	176.861,76	7,93	183.375,68	183.509,07	0,07
14			25,00	0,27	NPS 5STD	193.949,17	226.239,69	16,65	275.205,67	274.606,92	0,22
15			30,00	0,24	NPS 6STD	231.342,97	280.651,20	21,31	376.658,23	377.212,00	0,15
16			3	10,00	0,43	NPS 3 STD	89.716,01	106.054,27	18,21	173.018,59	172.998,19
17		15,00		0,41	NPS 3 1/2 STD	128.494,01	121.552,49	5,40	206.158,84	206.105,44	0,03
18		20,00		0,31	NPS 3 1/2 STD	119.694,72	112.006,70	6,42	169.581,05	169.535,91	0,03
19		25,00		0,27	NPS 4STD	126.752,23	134.480,04	6,10	196.922,55	197.075,07	0,08
20		30,00		0,22	NPS 5SCH40	135.016,80	148.924,74	10,30	307.460,08	306.864,61	0,19
21	100.000,00	10,00	0,43	NPS 4SCH80	218.565,53	208.175,48	4,75	332.354,07	332.349,65	0,00	
22		2	15,00	0,35	NPS 5SCH40	249.996,68	256.414,67	2,57	358.788,23	358.212,79	0,16
23			20,00	0,29	NPS 6STD	283.922,96	304.473,89	7,24	479.978,19	480.468,47	0,10
24			25,00	0,24	NPS 6STD	289.717,24	301.675,15	4,13	412.426,11	412.963,18	0,13
25			30,00	0,20	NPS 6XS	330.109,90	301.957,76	8,53	499.303,54	499.469,08	0,03
26			3	10,00	0,43	NPS 3 1/2 STD	152.661,18	135.532,08	11,22	195.732,87	195.681,80
27		15,00		0,38	NPS 4XS	195.837,56	196.800,20	0,49	316.683,61	316.693,00	0,00
28		20,00		0,35	NPS 5STD	211.611,50	252.916,04	19,52	358.788,23	358.212,79	0,16
29		25,00		0,30	NPS 5STD	217.347,12	258.879,03	19,11	316.010,19	315.416,84	0,19
30		30,00		0,26	NPS 6STD	228.654,03	276.806,73	21,06	446.571,81	447.087,60	0,12
31	300.000,00	15,00	0,38	NPS 10STD	809.856,31	740.450,70	8,57	1.455.169,19	1.455.286,51	0,01	
32		2	20,00	0,31	NPS 10STD	758.568,85	711.015,69	6,27	1.397.492,86	1.397.466,36	0,00
33			25,00	0,27	NPS 10STD	792.746,37	732.077,62	7,65	1.328.743,34	1.328.553,11	0,01
34			30,00	0,24	NPS 10STD	814.800,07	756.165,54	7,20	1.250.509,41	1.250.143,56	0,03

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 8-5 (Continuacion). Comparación de las cargas a compresión en el arrioste diagonal 3.

Elemento: Diagonal 3				Demanda:			Capacidad				
Capacidad	N° Anillos de arriostres horz.	Altura	Coeficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
					35	3	15,00	0,41	NPS 10STD	607.620,63	678.817,11
36	20,00	0,35	NPS 10STD	653.590,20	623.080,30		4,67	1.455.169,19	1.455.286,51	0,01	
37	25,00	0,29	NPS 10 SCH 30	604.597,45	557759,931		7,75	1.197.548,49	1.197.625,42	0,01	
38	30,00	0,24	NPS 8STD	582.201,13	514.576,62		11,62	862.170,63	862.430,38	0,03	
39	500.000,00	2	15,00	0,41	NPS 10STD	1.025.329,90	1.006.539,38	1,83	1.484.718,18	1.484.911,38	0,01
40			20,00	0,31	NPS 10STD	1.009.597,30	936.319,41	7,26	1.430.708,79	1.430.764,41	0,00
41			25,00	0,26	NPS 10STD	1.041.704,92	950.610,63	8,74	1.365.419,29	1.365.315,34	0,01
42			30,00	0,22	NPS 10STD	1.062.106,98	990.171,52	6,77	1.290.308,62	1.290.030,65	0,02
					promedio		8,57	promedio		0,07	

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 9-5. Comparación de las cargas a compresión en el arrioste diagonal 4.

Elemento: Diagonal 4					Demanda:			Capacidad			
Capacidad	N° Anillos de arriostres horz.	Altura	Coeficiente de cortante basal	Sección	SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error	
					1	25.000,00	3	10,00	0,43	NPS 5STD	47.297,40
2	15,00	0,35	NPS 2 1/2 STD	64.244,97	66049,9201			2,81	78.644,44	78.600,83	0,06
3	20,00	0,31	NPS 2 1/2 STD	67.846,17	69223,0166			2,03	56.900,25	56.868,69	0,06
4	25,00	0,24	NPS 3 STD	70.262,41	75975,5708			8,13	83.833,17	83.820,66	0,01
5	30,00	0,20	NPS 3 1/2 STD	76.629,58	79436,5024			3,66	102.167,44	102.139,46	0,03
6	50.000,00	3	10,00	0,43	NPS 3 STD	93.544,78	108.870,52	16,38	164.791,85	164.771,80	0,01
7			15,00	0,41	NPS 3 1/2 STD	135.077,89	124.641,41	7,73	194.248,72	194.197,98	0,03
8			20,00	0,31	NPS 3 1/2 STD	126.221,25	115.445,17	8,54	155.851,29	155.809,33	0,03
9			25,00	0,27	NPS 4STD	133.574,52	141.820,89	6,17	180.471,02	180.600,39	0,07
10			30,00	0,22	NPS 5SCH40	145.391,89	161.548,99	11,11	286.468,20	285.869,71	0,21

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 9-5 (Continuacion). Comparación de las cargas a compresión en el arriostre diagonal 4.

Elemento: Diagonal 4					Demanda (N)			Capacidad (N)			
Item	Capacidad Gal.	N° Anillos de arriostres horz.	Altura m.	Sección	Coficiente de cortante basal	Demanda (N)			Capacidad (N)		
						SAP2000	Excel	% Error	SAP2000	Excel	% Error
11	100.000,00	3	10,00	0,43	NPS 3 1/2 STD	157.077,90	126.782,76	19,29	186.970,22	186.921,12	0,03
12			15,00	0,38	NPS 4XS	206.931,80	186.089,80	10,07	298.277,52	298.302,23	0,01
13			20,00	0,35	NPS 5STD	223.436,45	241.908,29	8,27	340.621,11	340.036,64	0,17
14			25,00	0,30	NPS 5STD	229.131,93	247.243,73	7,90	295.186,75	294.589,13	0,20
15			30,00	0,26	NPS 6STD	243.942,87	263.432,55	7,99	420.591,38	421.123,83	0,13
16	300.000,00	3	15,00	0,41	NPS 10STD	629.420,70	710.405,04	12,87	1.480.321,75	1.480.503,57	0,01
17			20,00	0,35	NPS 10STD	676.399,76	652.153,83	3,58	1.441.539,44	1.441.622,25	0,01
18			25,00	0,29	NPS 10 SCH 30	621.496,84	613760,944	1,24	1.183.176,79	1.183.250,90	0,01
19			30,00	0,24	NPS 8STD	582.678,97	590.910,39	1,41	842.052,07	842.314,23	0,03
						promedio			promedio		
						7,34			0,06		

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 10-5. Comparación de pesos de los tanques elevados de acero.

Comparación de Pesos									
Item	Capacidad Gal.	N° Anillos de arriostres horz.	Altura m.	Secciones			Peso (N)		
				columna	Diagonal	Horizontal	SAP2000	Excel	% Error
1	25.000,00	1	10,00	NPS 12XS	NPS 3XS	NPS 4 SCH 10	127.053,56	119.997,28	5,55
2			15,00	NPS 16STD	NPS 4STD	NPS 5 SCH 10	150.926,32	143.700,36	4,79
3			20,00	NPS 18STD	NPS 5STD	NPS 6 SCH 10	195.253,88	187.963,91	3,73
4			25,00	NPS 18STD	NPS 5XS	NPS 6 SCH 10	244.122,64	236.778,93	3,01
5			30,00	NPS 20STD	NPS 6XS	NPS 8 SCH 10	321.783,28	314.386,75	2,30
6		2	10,00	NPS 20STD	NPS 2 1/2 (tkns 0,25)	NPS 3 SCH 10	133.447,16	126.353,16	5,32
7			15,00	NPS 20STD	NPS 3 STD	NPS 4 SCH 10	162.060,44	154.921,31	4,41
8			20,00	NPS 20STD	NPS 3 1/2 XS	NPS 4 SCH 10	204.122,24	196.804,34	3,59
9			25,00	NPS 22 STD	NPS 4XS	NPS 5 SCH 10	256.023,00	248.670,86	2,87
10			30,00	NPS 24 STD	NPS 5STD	NPS 6 SCH 10	303.581,40	296.252,10	2,41

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 10-5 (Continúa). Comparación de pesos de los tanques elevados de acero.

Comparación de Pesos									
Item	Capacidad Gal.	N° Anillos de arriostres horz.	Altura m.	Secciones			Peso (N)		
				columna	Diagonal	Horizontal	SAP2000	Excel	% Error
11	25.000,00	3	10,00	NPS 24 STD	NPS 5STD	NPS 6 SCH 10	303.581,40	296.252,10	2,41
12			15,00	NPS 12 STD	NPS 2 1/2 STD	NPS 3 SCH 10	135.268,68	125.666,33	7,10
13			20,00	NPS 12 STD	NPS 2 1/2 STD	NPS 3 SCH 10	152.855,48	143.190,03	6,32
14			25,00	NPS 12 STD	NPS 3 STD	NPS 4 SCH 10	179.029,36	169.245,01	5,47
15			30,00	NPS 12 STD	NPS 3 1/2 STD	NPS 5 SCH 10	207.074,96	197.216,42	4,76
16	50.000,00	1	10,00	NPS 16STD	NPS 4STD	NPS 6 SCH 10	169.128,16	160.627,99	5,03
17			15,00	NPS 16STD	NPS 5STD	NPS 6 SCH 10	201.294,28	192.762,66	4,24
18			20,00	NPS 16STD	NPS 6STD	NPS 8 SCH 10	240.802,40	232.307,28	3,53
19			25,00	NPS 18STD	NPS 6STD	NPS 8 SCH 10	281.438,84	272.914,40	3,03
20			30,00	NPS 20STD	NPS 8CH30	NPS 10 SCH 10	351.078,40	342.671,36	2,39
21		2	10,00	NPS 16STD	NPS 3 1/2 STD	NPS 5 SCH 10	172.971,44	164.439,28	4,93
22			15,00	NPS 18STD	NPS 4STD	NPS 5 SCH 10	195.460,76	186.936,82	4,36
23			20,00	NPS 18STD	NPS 4STD	NPS 5 SCH 10	233.123,24	224.626,88	3,64
24			25,00	NPS 18STD	NPS 5STD	NPS 6 SCH 10	274.916,40	266.349,49	3,12
25			30,00	NPS 18STD	NPS 6STD	NPS 8 SCH 10	325.329,44	316.810,47	2,62
26		3	10,00	NPS 16STD	NPS 3 STD	NPS 4 SCH 5	172.619,76	164.099,24	4,94
27			15,00	NPS 16STD	NPS 3 1/2 STD	NPS 4 SCH 10	200.853,24	192.337,19	4,24
28			20,00	NPS 16STD	NPS 3 1/2 STD	NPS 4 SCH 10	223.623,92	215.116,47	3,80
29			25,00	NPS 18STD	NPS 4STD	NPS 5 SCH 10	267.848,28	259.364,28	3,17
30			30,00	NPS 18STD	NPS 5SCH40	NPS 6 SCH 10	314.349,84	305.773,49	2,73
31	100.000,00	1	10,00	NPS 20STD	NPS 6STD	NPS 8 SCH 10	263.932,12	251.954,09	4,54
32			15,00	NPS 20STD	NPS 6STD	NPS 8 SCH 10	295.467,24	283.502,21	4,05
33			20,00	NPS 20STD	NPS 8STD	NPS 10 SCH 10	388.316,80	376.319,19	3,09
34			25,00	NPS 20XS	NPS 8STD	NPS 10 SCH 10	434.051,08	422.055,84	2,76
35			30,00	NPS 20XS	NPS 8STD	NPS 10 SCH 10	509.181,28	496.549,73	2,48
36		2	10,00	NPS 20SCH30	NPS 4SCH80	NPS 5 SCH 10	282.286,00	270.248,46	4,26
37			15,00	NPS 20XS	NPS 5SCH40	NPS 6 SCH 10	318.928,24	306.890,53	3,77
38			20,00	NPS 20XS	NPS 6STD	NPS 8 SCH 10	375.148,74	363.152,74	3,20
39			25,00	NPS 20XS	NPS 6STD	NPS 8 SCH 10	415.264,28	403.269,62	2,89
40			30,00	NPS 20XS	NPS 6XS	NPS 8 SCH 10	499.176,44	487.237,81	2,39

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

Tabla 10-5 (Continúa). Comparación de pesos de los tanques elevados de acero.

Comparación de Pesos									
Item	Capacidad Gal.	N° Anillos de arriostres horz.	Altura m.	Secciones			Peso (N)		
				columna	Diagonal	Horizontal	SAP2000	Excel	% Error
41		3	10,00	NPS 18STD	NPS 3 1/2 STD	NPS 4 SCH 10	254.099,32	242.090,57	4,73
42			15,00	NPS 20XS	NPS 4XS	NPS 5 SCH 10	332.910,24	320.859,80	3,62
43			20,00	NPS 22 XS	NPS 5STD	NPS 6 SCH 10	382.967,90	370.967,31	3,13
44			25,00	NPS 22 XS	NPS 5STD	NPS 6 SCH 10	423.743,16	411.751,20	2,83
45			30,00	NPS 24 XS	NPS 6STD	NPS 8 SCH 10	512.006,08	500.164,28	2,31
46	300.000,00	1	15,00	NPS 28 STD	NPS 8 SCH 60	NPS 10 SCH 10	771.862,62	751.427,53	2,65
47			20,00	NPS 28 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	940.785,06	920.445,06	2,16
48			25,00	NPS 28 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.036.723,26	1.016.586,47	1,94
49			30,00	NPS 28 XS	NPS 10XS	NPS 12 SCH 20	1.218.851,52	1.199.059,66	1,62
50		2	15,00	NPS 30 STD	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	871.427,04	851.020,74	2,34
51			20,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.018.323,36	997.944,99	2,00
52			25,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.116.587,76	1.096.355,78	1,81
53			30,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.216.633,68	1.196.627,01	1,64
54		3	15,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	989.095,86	968.646,77	2,07
55			20,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.083.034,08	1.062.604,48	1,89
56			25,00	NPS 30 XS	NPS 10 SCH 30	NPS 12 SCH 10	1.117.447,10	1.096.999,16	1,83
57			30,00	NPS 30 XS	NPS 8STD	NPS 10 SCH 20	1.175.783,64	1.155.526,66	1,72
58	500.000,00	1	15,00	NPS 30 XS	NPS 10 SCH 80	NPS 12 SCH 20	1.339.867,60	1.313.692,52	1,95
59			20,00	NPS 30 XS	NPS 10XS	NPS 12 SCH 20	1.440.226,64	1.414.671,83	1,77
60			25,00	NPS 30 XS	NPS 10XS	NPS 12 SCH 20	1.589.983,68	1.565.131,34	1,56
61			30,00	NPS 30 XS	NPS 10 SCH 80	NPS 12 SCH 20	1.816.540,00	1.792.412,50	1,33
62		2	15,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.298.935,68	1.273.797,22	1,94
63			20,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.427.063,04	1.401.863,08	1,77
64			25,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.558.407,76	1.533.468,59	1,60
65			30,00	NPS 30 XS	NPS 10STD	NPS 12 SCH 20	1.692.322,40	1.667.453,34	1,47
							promedio	3,18	

Realizado por: Willian Inchilema, 2017

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La hoja electrónica elaborada facilita y agiliza el proceso de pre-dimensionamiento de tanques elevados de acero para almacenamiento de agua, reduciéndole así al área de ingeniería los tiempos en el proceso de diseño, convirtiéndose en una herramienta muy útil.

La hoja electrónica no puede hacerse uso para tanques elevados que tengan dimensiones que se encuentren fuera de las siguientes limitaciones: La capacidad de almacenamiento entre 25.000 a 500.000 galones y altura de la estructura de soporte de entre 10 a 30 metros.

Los resultados de la validación de la hoja electrónica con respecto al cálculo de tensiones y esfuerzos en el tanque resultaron muy satisfactorios dando porcentajes de error menores al 10% en la mayoría de los casos como puede observarse desde la tabla 1-5 a la tabla 5-5, sin embargo también puede observarse en estas tablas que existe una diferencia notable en los valores de tensiones y esfuerzos circunferenciales en el punto 3 de cada tanque. Esta diferencia entre los valores se da debido a que el punto 3 se encuentre entre el cambio de curvatura de la parte abombada a la parte de reborde del casquete de fondo por lo que resulta un poco difícil calcular con exactitud las tensiones provocadas en ese punto, pero debido a que los valores que proporciona la hoja de cálculo resultan ser conservadores se le considera aceptable.

En la validación de la hoja electrónica con respecto al análisis estructural se pudo observar que en el cálculo de la capacidad de cada elemento estructural, la hoja electrónica es cien por ciento confiable ya que existe un error aproximadamente del cero por ciento al comparar los valores dados por el software y la hoja electrónica, mientras que al determinar la demanda para cada elemento estructural existe un error promedio del 6% en el caso de las columnas; 7.13% , 7.99%, 8.57% y 7.34% en el caso de los arriostres diagonales, este error se produce debido a que la hoja de cálculo estima las cargas aproximadas para cada condición del tanque elevado, pero al ser este un error pequeño se concluye que la hoja de cálculo es confiable.

La API generada en SolidWorks resulta ser una herramienta muy útil, debido a que una vez generado el pre-dimensionamiento en la hoja electrónica, estos datos pueden ingresarse en la API

llamada “GENERADOR DE TANQUES ELEVADOS”, en el que se generara automáticamente el modelamiento del tanque elevado en SolidWorks, gracias a esto se podrá observarse si el tanque puede ser fabricado o no, además a partir de este archivo el ingeniero puede completarlo con los accesorios y detalles y posteriormente generar los planos del tanque elevado ahorrando así las horas hombre.

6.2 Recomendaciones

Se recuerda que la hoja electrónica se elaboró con el objetivo de ayudar al ingeniero a tener una idea más pronta de las dimensiones que requiere el diseño final de un tanque elevado de acero para almacenamiento de agua, por lo que se recomienda que los resultados de la hoja electrónica no se tomen como dimensiones finales o como un diseño final.

Se recomienda en un futuro ampliar el rango de aplicación de la hoja electrónica: Ampliar el rango de capacidad de almacenamiento del tanque de acero a cantidades mayores a 500.000 galones, ampliar el rango de altura de la estructura de soporte a mayores de 30 metros y ampliar el número de anillos de arriostres horizontales que pueda contener la estructura de soporte a más de tres anillos.

Se recomienda a futuro implantar a este proyecto un sistema que permita realizar cotizaciones de manera automática a partir del pre-diseño realizado en la hoja electrónica.

BIBLIOGRAFÍA

American Institute of Steel Construction. *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago-USA: AISC, 2010

American Institute of Steel Construction. *Steel Construction Manual*, 14^{va} ed. Chicago-USA: AISC, 2015, ISBN: 1-56424-060-6

American Petroleum Institute. *Specification for Line Pipe*, 43^a ed. Washington-USA: API, 2004.

American Petroleum Institute. *Welded Steel Tanks for Oil Storage, (API 650)*, 12^a ed. Washington-USA: API, 2012a

American Petroleum Institute. *Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tank (API 620)*, 12^a ed. Washington-USA: API, 2012a

American Society of Civil Engineers. *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*. Virginia-USA: ASCE, 2010. ISBN: 978-0-7844-10851-1

American Society of Civil Engineers. *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*. Virginia-USA: ASCE, 2005. ISBN: 0-7844-0831-9

American Society of Mechanical Engineers. *Boiler & Pressure Vessel Code. Section VIII, Div. 1*. USA: ASME, 2017

American Society of Testing Materials. *Standard Specification for Electric-Fusion (Arc)-Welded Steel Pipe (NPS 4 and over)*. USA: ASTM international, 2016

American Society of Testing Materials. *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. USA: ASTM international, 2012

American Society of Testing Materials. *Standard Specification for Hot-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing*. USA: ASTM international, 2014

American Society of Testing Materials. *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*. USA: ASTM international, 2012

American Water Works Association. *Steel Water-Storage Tanks, M42*. Denver-USA: AWWA, 2013

American Water Works Association. *Welded Carbon Steel Tank for Water Storage*. Denver-USA: AWWA, 2005

ARQUIVOLTA. *Terremotos, ¿Cómo afecta el sismo a los edificios?* [en línea] [Consultado: 20 de noviembre 2017]. Disponible en: <https://estudioarquivolta.wordpress.com/2016/04/20/terremotos-como-afecta-el-sismo-a-los-edificios/>

ARYA, Anand S.; AJMANI, J. *Design of steel structures*. 5^a ed. Roorkee-India: NEM CHAND & BROS, 2001, ISBN 81-85240-62-0, p.900.

AVNER, Sydney H. *Introducción a la metalurgia física, versión en español*. 2ª ed. Mexico: McGraw-Hill, 1988, ISBN 0-07-002499-5

BELLUZZI, Adone. *Ciencia de la construcción, versión española*. Madrid-España: Aguilar S.A. de ediciones, 1973, ISBN 84-03-20992-4

BLODGETT, Omer W. *Design of Welded Structures*, 14ª ed. Cleveland-USA: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1991.

CRISAFULLI, Francisco J. *Diseño Sismoresistente de construcciones de acero*, 4ª ed. Santiago de Chile-Chile: Alacero, 2014, ISBN: 978-956-8181-16-1

FONDEYUR. *Fondos laminados en caliente* [en línea]. España: FONDEYUR S.L., 2017 [Consultado 15 de Junio 2017]. Disponible en: <http://www.fondeyur.com/fondos-elipticos-2-1.aspx>

GERDAU CORSA. *El Acero Hoy, Miembros en Compresión* [en línea]. Mexico: GERDAU S.A., 2015 [Consultado: 14 de noviembre del 2017] Disponible en: <https://www.gerdau.com/gerdaucorsa/es/productos/catalogos-y-articulos-tecnicos#k=#s=41>

IBC. *Código Internacional de Construcción*. USA: International Code Council INC., 2009

LANDMARK. *Almacenamiento de agua* [en línea]. USA: Landmark Structures, 2017 [Consultado 16 Agosto 2017]. Disponible en: http://www.teamlandmark.com/water_storage/composite_elevated_tank/cost_advantage

McCORMAC, Jack C.; CSERNAK, Stephen F. *Diseño de Estructuras de Acero*. 5ª ed. Mexico: Alfaomega Grupo Editor, 2013, ISBN 978-0-12-607948-4

MEIER, Stephen; AWWA. *Steel water storage tanks: Design, Construction, Maintenance, and Repair*. USA: McGraw-Hill, 2010, ISBN 978-07-164103-6

MICROSOFT, *Introducción a Excel 2010* [en línea], 2015 [Consultado: 15 de noviembre del 2017] Disponible en: <https://support.office.com/es-es/article/introducci%C3%B3n-a-excel-2010-d8708ff8-2fbd-4d1e-8bbb-5de3556210f7>

MIDUVI. *Norma Ecuatoriana de la Construcción* [en línea]. Ecuador, 2014 [Consultado: 16 agosto del 2017] Disponible en: <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

MOSS, Dennis R. *Pressure vessels design manual: illustrated procedures for solving major pressure vessel design problems*. 3ª ed. Boston-USA: Elsevier, 2004, ISBN 0-7506-7740-6

NEC-SE-CG. *Cargas (No Sísmicas)*. Ecuador: MIDUVI, 2014. ISBN: 00000000000

NEC-SE-DS. *Peligro Sísmico, Diseño sismo Resistente*. Ecuador: MIDUVI, 2014. ISBN: 00000000000

NEXOMETAL, *Estructuras metálicas* [en línea]. España, 2016 [Consultado: 18 noviembre 2017] Disponible en: <https://nexometal.com/hacemos/estructuras-metalicas/>

OLIVARES, Simón. *Aplicación del programa Excel en la elaboración de un proyecto de alcantarillado sanitario*. [En línea] (Tesis) (Ingeniería) Escuela Superior de Ingeniería y

Arquitectura Unidad Zacatenco, Mexico. 2006 [consultado 12 de diciembre del 2017] Disponible en: https://www.academia.edu/8924882/TESIS_ALCANTARILLADO_EN_EXCEL

OROZCO, Diego E. Diseño de edificaciones resistentes al viento para facilidades petroleras [en línea] (trabajo de titulación) (ingeniería) Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador. 2011. P.22. [Consultado: 18 de noviembre del 2017] Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2888>

PARMLEY, Robert O. *Hydraulics Field Manual*. 2ª ed. USA: McGraw-Hill, 2001, ISBN 0-07-134832-8

PILLAJO, Jorge V.; SARMIENTO, Edgar F. Diseño de la estructura de acero para un edificio de apartamento para ser utilizado en la región litoral del Ecuador [en línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. 2009. p.4. [Consultado: 18 noviembre 2017] Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1357>

Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española* [en línea]. 23ª ed. Madrid: ASALE, 2014 [Consultado 15 agosto 2017] Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=1BKpQj3>

RUANO PAZ, Marco A. *Manual para diseño estructural de tanques metálicos elevados en la república de Guatemala*. [En línea] (Tesis). (Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 2011. [Consultado 12 de Junio 2017] Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3803_C.pdf

SANBER, *La corrosión inducida por contaminación de agua* [en línea]. Mexico: San-Ver S.A., 2017 [Consultado 15 noviembre 2017]. Disponible en: <http://www.sanber.com.mx/boletines-sanber.html>

SINGH, Nitesh J.; ISHTIYAQUE, Mohammad. “Design analysis & comparison of intze type water tank for different wind speed and seismic zones as per Indian codes”. *International Journal of Research in Engineering and Technology* [en línea], 2015 (India) 4(9), pp. 291-300. [Consulta: 14 de Agosto 2017]. ISSN 2319-1163. Disponible en: <http://esatjournals.net/ijret/2015v04/i09/IJRET20150409054.pdf>

SMITH, William F. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, versión española*. 3ª ed. Madrid-España: McGraw-Hill, 1998, ISBN 0-07-059241-1

VERGARA, Nelva A. Reforzamiento de Losa Maciza Considerando la Edad de la Estructura del Edificio de la Gobernación del Guayas Bloque Sur Este [en línea] (trabajo de titulación) (Maestría) Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador. 2016. [Consultado: 20 de noviembre del 2017] Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/5161/1/T-UCSG-POS-MIC-14.pdf>