



UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ

Programa Académico de Ingeniería Civil

TESIS:

**“ANÁLISIS DINÁMICO MODAL ESPECTRAL Y ESTÁTICO
EQUIVALENTE DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE
PETRÓLEO”**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

AUTORES:

**JOSE LUIS HIDALGO PIÑA
JORGE ALBERTO RIOS HELLER**

ASESOR:

ING. M SC. IRIGOIN CABRERA ULISES OCTAVIO

**Iquitos - Perú
2019**

DEDICATORIA:

Dedicado a mi mamá, hermanos, hija y amigos
más cercanos por el apoyo moral e
incondicional.

J.L.H.P.

A Dios, por guiar cada momento de mi vida, fortalecerme en lo
momento difíciles y darme fuerzas para salir adelante y así lograr
mi metas personales y profesionales.

A mis adorados padres: Jorge Rios y Isabel Heller, que me
educaron con buenos principios como ser responsable,
respetuoso, honrado, honesto y sobre todo valorar la familia.
Gracias Mama por cuidarme en vida y ahora como un ángel que
me cuidas desde el cielo. Gracias Papa por tus consejos y apoyo.

A mi familia: Daniela Petit e hijos Andrey Gerard, Massiel Isabel y
Ariana Alexandra por ser la fuente de mi fortaleza para salir
adelante y lograr mis metas profesionales y como familia.

A todos mis hermanos, por ser una familia unida a pesar de las
dificultades de la vida ¡Gracias a ustedes!

Jorge Alberto Rios Heller.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestra gratitud y agradecimiento a la Universidad Científica del Perú y sus docentes por las enseñanzas brindadas en nuestra formación profesional en la carrera de Ingeniería Civil.

De igual manera nuestros más sinceros agradecimientos a nuestro Asesor el Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera Mg., por los conocimientos transferidos y el tiempo dado para la finalización de este trabajo.

De igual manera nuestros más sinceros agradecimientos a nuestro Co-asesor el Ing. Leonardo Flores Gonzales Mg., por los conocimientos brindados y el tiempo para apoyarnos en la parte estructural de nuestra tesis.

Los Autores



UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP

"Año de la lucha contra la corrupción e impunidad"

FACULTAD
CIENCIAS E
INGENIERÍA

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Con Resolución Decanal N°172-2016-UCP-FCEI-D del 23 de mayo de 2016, la FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP designa como Jurado Evaluador y Dictaminador de la Sustentación de Tesis a los Señores:

- | | |
|--|------------|
| • Ing. Carol Begoña García Langer, Mg. | Presidente |
| • Ing. Liliana Bautista Serpa | Miembro |
| • Ing. Mario Amador Vela Rodríguez | Miembro |

En la ciudad de Iquitos, siendo las 18:00 horas del día viernes 23 de agosto de 2019, en las instalaciones de la UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP, se constituyó el Jurado para escuchar la sustentación y defensa de la Tesis: **"ANÁLISIS DINÁMICO MODAL ESPECTRAL Y ESTÁTICO EQUIVALENTE DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO, IQUITOS - PERÚ 2016"**

Presentada por los sustentantes:

JORGE ALBERTO RIOS HELLER y JOSE LUIS HIDALGO PIÑA

Asesor: Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera, M. Sc.

Co-asesor: Ing. Leonardo Flores Gonzales

Como requisito para optar al título profesional de: **Ingeniero Civil**

Luego de escuchar la Sustentación y formuladas las preguntas las que fueron: Absueltas

El jurado después de la deliberación en privado llegó a la siguiente conclusión:

La Sustentación es: Aprobada por Unanimidad

En fe de lo cual los miembros del jurado firman el acta.

 Miembro	 Presidente	 Miembro
--	---	--

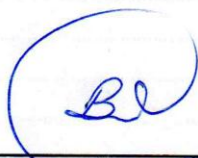
CALIFICACIÓN:	Aprobado (a) Excelencia	: 19 - 20
	Aprobado (a) Unanimidad	: 16 - 18
	Aprobado (a) Mayoría	: 13 - 15
	Desaprobado (a)	: 00 - 12

Av. Abelardo Quiñones Km. 2.5. San Juan Bautista

Teléf. (065) 261092 - 261088

APROBACIÓN

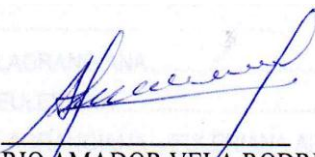
Tesis sustentada en acto público el día 23 de agosto a las 18:00 horas del 2019.



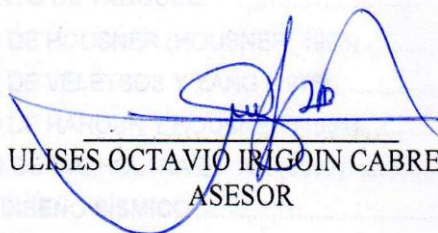
ING. CAROL BEGONA GARCIA LANGER, MG.
PRESIDENTE DE JURADO



ING. LILINA BAUTISTA SERPA
MIEMBRO DE JURADO



ING. MARIO AMADOR VELA RODRIGUEZ
MIEMBRO DE JURADO



ING. ULISES OCTAVIO IRIGOIN CABRERA MG.
ASESOR

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ACTA DE SUSTENTACIÓN	iv
PAGINA DEL JURADO Y ASESOR	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1 PROBLEMÁTICA	2
1.2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4 HIPÓTESIS	4
1.5 JUSTIFICACIÓN	5
CAPÍTULO II: MARCO TEORICO	6
2.1 ANTECEDENTES	6
2.2 INTERACCIÓN FLUIDO – ESTRUCTURA	17
2.2.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS NUMÉRICOS DE INTERACCIÓN FLUIDO - ESTRUCTURA	17
2.2.2 FORMULACIÓN LAGRANGIANA	18
2.2.3 FORMULACIÓN EULERIANA	19
2.2.4 FORMULACIÓN LAGRANGIANA – EULERIANA ARBITRARIA (ALE)	19
2.2.5 HIDRODINÁMICA SUAVIZADA DE PARTÍCULAS (SPH)	19
2.3 PRESIONES HIDRODINÁMICAS	20
2.3.1 ANÁLISIS DE LA CONDUCTA DE TANQUES SOMETIDOS A SISMOS	21
2.3.2 EXTENSIÓN DEL ESTUDIO A TANQUES CILÍNDRICOS	22
2.4 MODELAMIENTO DE TANQUES	12
2.4.1 MODELO DE HOUSNER (HOUSNER, 1963)	12
2.4.2 MODELO DE VELETSOS Y YANG (1976)	24
2.4.3 MODELO DE HAROUN Y HOUSNER (1981)	27
2.4.4 MODELO DE MALHOLTRA ET. AL. (2000)	30
2.5 NORMAS DE DISEÑO SÍSMICO	32
2.5.1 NORMA AMERICANA API 650	35
2.5.2 NORMA NEOZELANDESA	35
2.5.3 PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DE DISEÑO	36

2.5.4	COMPORTAMIENTO Y MODELAMIENTO SÍSMICO DE TANQUES CIRCULARES APOYADOS SOBRE EL SUELO	37
CAPÍTULO III MATERIALES Y METODOS		65
3.1	MATERIALES	65
3.2	METODOLOGÍA.....	65
3.2.1	MODELAMIENTO DEL TANQUE DE 40MB EN SAP 2000	66
3.3	METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE MODELO	80
CAPITULO IV: RESULTADOS		81
DISEÑO MECANICO API-650.....		81
4.1	PESOS EFECTIVOS DEL PRODUCTO	82
4.2	CENTROS DE ACCION DE LAS FUERZAS LATERALES EFECTIVAS	82
4.3	PERIODO CONVECTIVO - T_c	83
4.4	PERIODO IMPULSIVO - T_i	83
4.5	CALCULO DEL PARAMETRO DE ACELERACION IMPULSIVA ESPECTRAL - A_i	84
4.6	CALCULO DEL PARAMETRO DE ACELERACION CONVECTIVA ESPECTRAL - A_c	85
GUIDELINES FOR SEISMIC DESIGN OF LIQUID STORAGE TANKS.....		85
4.7	PARAMETROS DEL RESORTE MASA MODELO	85
4.8	PERIODOS NATURALES IMPULSIVO	86
4.9	PERIODOS NATURALES CONVECTIVO	87
4.10	COEFICIENTE HORIZONTAL DE DISEÑO SISMICO	87
4.11	CORTANTE DE LA BASE	89
4.12	MOMENTO EN LA PARTE INFERIOR DE LA PARED	90
4.13	MOMENTO DE VOLTEO	90
4.14	PRESION HIDRODINAMICA IMPULSIVA	91
NORMA PERUNA E.030.....		92
4.15	RESULTADO DEL PERIODO DEL MODELAMIENTO	92
4.16	DISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN IMPULSIVA Y CONVECTIVA	93
4.17	ESPECTROS: E-30 ANTIGUA, E-30 2016, API650 Y IITK-GSDMA	102
4.17.1	EARTHQUAKE RESPONSE SPECTRUM (Según: API650 del 2007)	102
4.17.2	EARTHQUAKE RESPONSE SPECTRUM (Según: IITK-GSDMA)	105
4.17.3	ACELERACIÓN ESPECTRAL (Según: Norma Técnica E-030)	107
4.17.4	EARTHQUAKE RESPONSE SPECTRUM RESUMEN.....	111
4.18	GRAFICA DE ESPECTROS DE LAS NORMAS	114
4.19	CÁLCULO DEL VIENTO.....	115
4.19.1	CARGA DE VIENTO EN ESTANQUES (Según: API650 del 2007)	115
4.19.2	CARGA DE VIENTO EN ESTANQUES (Según: Norma Técnica E-020, Cargas).....	115
4.20	PRESIÓN INTERNA.....	116
CAPITULO V: DISCUSIÓN		119
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		120
6.1	CONCLUSIONES.....	120
6.2	RECOMENDACIONES	124
CAPITULO VII: BIBLIOGRAFÍA.....		125

LISTA DE ANEXO.....	130
ANEXO N°01. MAPA EOLICO DEL PERU	130
ANEXO N°02: DISEÑO MECANICO API 650	130
ANEXO N°03: COEFICIENTE C_i	132
ANEXO N°04: CALCULO DE PESO	132
ANEXO N°05: EXPRESSION FOR PARAMETERS OF A SPRING MASS MODEL.....	133
ANEXO N°06: COEFICIENTE IMPULSIVA C_i Y CONVECTIVA C_c	134
ANEXO N°07: TABLA VALUE OF F_A Y F_V AS A FUNCTION OF SITE CLASS.....	135
GLOSARIO	136

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla N° 1 Relación de países que poseen normativa para diseño tanques</i>	<i>33</i>
<i>Tabla N° 2 DISEÑO MECANICO API-650</i>	<i>81</i>
<i>Tabla N° 3 Relacion altura/diametro del tanque impulsivo</i>	<i>83</i>
<i>Tabla N° 4 Guidelines For Seismic Design Of Liquid Storage Tanks.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla N° 5 Parámetro del modelo de masa elástica</i>	<i>85</i>
<i>Tabla N° 6 Período de tiempo del modo de coeficiente impulsivo (Ci) y convectivo (Cc) para circular</i>	<i>86</i>
<i>Tabla N° 7 Período de tiempo del modo de coeficiente impulsivo (Ci) y convectivo (Cc) para circular</i>	<i>87</i>
<i>Tabla N° 8 Importance Factor, I</i>	<i>88</i>
<i>Tabla N° 9 Response Reduction factor, R.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla N° 10 Acceleration coefficient (Sa/g).....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla N° 11 Resultado del Periodo del Modelamiento</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 12 Resumen de cálculos</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 13 Presión impulsiva en tanque</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 14 Presión convectiva en tanque</i>	<i>98</i>
<i>Tabla N° 15 Value of Fa as a Function of Site Class</i>	<i>102</i>
<i>Tabla N° 16 Value of Fa as a Function of Site Class</i>	<i>102</i>
<i>Tabla N° 17 Espectros: API650.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla N° 18 Espectros: IITK-GSDMA</i>	<i>106</i>
<i>Tabla N° 19 Espectros: Norma Tècnica E-030.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla N° 20 Earthquake Response Spectrum RESUMEN</i>	<i>111</i>
<i>Tabla N° 21 Carga de viento en Estanques a cada altura</i>	<i>115</i>
<i>Tabla N° 22 Factores de Forma (C)</i>	<i>116</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1 Deformada del modo vibración 48 de un tanque cilíndrico Fuente: Guillen y Rojas (2007).....	12
FIGURA N° 2 Modo 1 de vibración para depósito $H/D = 1$ y elevado 5m de altura. Fuente: Penalba 2010	12
FIGURA N° 3 Equilibrio dinámico de fuerzas Horizontales y oscilación del fluido en el Tanque. Fuente: Sánchez y Vargas (2011)	13
FIGURA N° 4 Modo convectivo de tanque cilíndrico de 0.325 m de radio y 0.2 m de altura. Fuente: Compagnoni, Cuaradelli y Martínez 2012.....	14
FIGURA N° 5. Modelo Masa-Resorte para tanque cilíndrico, Fuente: (Compagnoni y Martínez, 2013)	15
FIGURA N° 6. Modelo hidrodinámico y resultados calculados por el programa SISMODEP, Fuente: (Díaz del Valle, 2013).....	15
FIGURA N° 7. Modelo de tanque cilíndrico para análisis dinámico y deformada del segundo modo impulsivo de vibración. Fuente: Pereira 2013.....	16
FIGURA N° 8. Modelo mecánico equivalente según Housner (1954).....	22
FIGURA N° 9 Modelo mecánico equivalente según Housner (1954) Fuente: Tesis Huamaní (2015).....	23
FIGURA N° 10. Configuración de los tres modos de deformación considerados.....	25

FIGURA N° 11. Modelo Mecánico Equivalente según Veletsos y Yang (1976)	
Fuente: Navarro (2018).....	26
FIGURA N° 12. Modelo Mecánico Equivalente según Haroun y Housner (1981)	30
FIGURA N° 13. Modelo Mecánico Equivalente según Malholtra et. al. (2000)	
Fuente: Navarro (2018).....	31
FIGURA N° 14. Peek, R. y Jennings, P.C. “Simplified Analysis of Unanchored Tanks”.....	37
FIGURA N° 15. Instituto Nacional de Normalización – INN. “Norma Chilena Oficial NCh 2369.Of2003.....	43
FIGURA N° 16. Veletsos, A.S. “Seismic response and design of liquid storage tanks”, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, ASCE.	47
FIGURA N° 17. Presiones impulsivas y resultantes, Fuente: Diaz del Valle 2013.....	47
FIGURA N° 18. Presiones convectivas y resultantes, Fuente: Diaz del Valle 2013.....	47
FIGURA N° 19. Modos de vibración dirección vertical tanques cilíndricos., Fuente: Gaylord, Jr. Edwin y Gaylord, Charles, “Structural Engineering Handbook”.....	48
FIGURA N° 20. Modos de vibración de la cáscara o cilindro.....	49
FIGURA N° 21. Modos convectivos o de oleaje en tanques rígidos.....	50
FIGURA N° 22. Housner, George y Haroun, Medhat. “Seismic Design of Liquid Storage Tanks”. Journal of Technical Councils ASCE. Vol. 107, N°1.....	51

FIGURA N° 23. Housner, George y Haroun, Medhat. “Seismic Design of Liquid Storage Tanks”. Journal of Technical Councils ASCE. Vol. 107, N°1.....	52
FIGURA N° 24. Participación de masa efectiva impulsiva y convectiva.	56
FIGURA N° 25. Crisafulli, Francisco y Villafañe, Elbio. “Espectros de Respuesta y de Diseño”.	58
FIGURA N° 26. American Petroleum Institute. “API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage”.	59
FIGURA N° 27 American Petroleum Institute. “API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage”.	60
FIGURA N° 28 Ríos, Ana. “Diseño de Tanques Metálicos para Almacenamiento de Petróleo”.....	63
FIGURA N° 29 Pandeo de pared de tanque. Fuente de origen: Ríos, Ana. “Diseño de Tanques Metálicos para Almacenamiento de Petróleo”.	64
FIGURA N° 30 Pandeo de pared “pata de elefante”, Fuente: Diaz del Valle 2013.....	64
FIGURA N° 31 La siguiente imagen muestra el inicio de la ejecución del procedimiento del Tanque,	66
FIGURA N° 32. El siguiente pantallazo muestra las grillas por defecto	66
FIGURA N° 33. Y nos aparecerá dos ventanas en diferentes vistas de nuestras grillas.....	67
FIGURA N° 34. La ventana que se muestra es donde se editará las grillas para modelar el tipo de estructura a trabajar.....	67
FIGURA N° 35 La imagen muestra la pestaña donde se definirá los materiales que serán utilizados en el diseño de la estructura.	68
FIGURA N° 36 Luego de añadir una nueva propiedad de la estructura	68
FIGURA N° 37 La siguiente imagen nos muestra las características físicas del material.....	69

FIGURA N° 38 Y así añadiremos las características de nuestros materiales	69
FIGURA N° 39 Una vez culminado la ventana de definición de materiales nos mostrará todos los materiales creados o modificados.	70
FIGURA N° 40 En la siguiente ventana pasaremos a modificar las grillas con la que se dibujará la estructura	70
FIGURA N° 41 En la pestaña Define pasaremos a diseñar nuestras propiedades de sección de los materiales a utilizar	71
FIGURA N° 42 El siguiente pantallazo nos muestra los tipos de secciones de metal que hay, elegimos nuestra sección para nuestro diseño.	71
FIGURA N° 43 En la siguiente ventana se modificará los datos para definir los espesores y las dimensiones de nuestro material.	72
FIGURA N° 44 Y de la misma manera se modificará a todas las secciones a utilizar.....	72
FIGURA N° 45 Una vez finalizado y definido las características de nuestro material, la siguiente ventana nos mostrará todos los materiales creados	73
FIGURA N° 46 Definido las características de nuestro material, la siguiente ventana nos mostrará todos los materiales creados.....	73
FIGURA N° 47 Ahora nos dirigimos a definir nuestras secciones de área, como serán las paredes, la base y el techo del tanque.	74
FIGURA N° 48 Ensayo a los 14 días La ventana siguiente es donde se modificarán los Shell y que material se utilizará	74
FIGURA N° 49 En la siguiente ventana se diseñará las dimensiones de nuestras secciones de área. Tanto como el espesor y el tipo de material.	75
FIGURA N° 50 E La venta de las secciones de área nos mostrará todas las que fueron creadas para proceder a su asignación	75
FIGURA N° 51 Después de haber definido el material y las secciones pasamos a dibujar nuestra estructura	76

FIGURA N° 52 La siguiente imagen nos muestra el tanque dibujado, ya con sus secciones de áreas, tubos y otros elementos.....	76
FIGURA N° 53 La siguiente ventana nos muestra la asignación de nuestras restricciones que tendrá el tanque en cuanto a su análisis.	77
FIGURA N° 54 Se le asignó un apoyo simple, la cual se verá reflejado en el Análisis de Estructura.	77
FIGURA N° 55 En la siguiente pestaña que se desplaza, se definirá nuestros patrones de cargas.	78
FIGURA N° 56 La ventana emergente es donde se añadirá los patrones de cargas a utilizar.	78
FIGURA N° 57 La siguiente imagen nos muestra los casos de cargas que tendrá el análisis de la estructura.	79
FIGURA N° 58 La siguiente imagen nos muestra las combinaciones de carga asignadas para nuestro análisis estructural.	79
FIGURA N° 60 Grafica de Espectros de las Normas	114

RESUMEN

Para validar el modelo de análisis para la adaptación a la norma peruana E.030 (Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente, 2016), considerando el modelo Housner (1954), la interacción fluido-estructura la cual se desarrolló el cálculo y modelamiento dinámico/estático del tanque de almacenamiento, entre las normas más conocidas para la elaboración de diseño y construcción, como son **API 650** - 2007 (American Petroleum Institute) y **IITK-GSDMA** (Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks) y software **SAP2000** (Structural Analysis Program,)

Por lo que se realizó el modelamiento con el software SAP2000, dando como resultado los datos generales del modelo calibrado, como lo siguientes: Altura Total=12.191 m, Altura Líquido=11.324 m, Diámetro=26.74 m, Peso de la Pared=662.07 KN., Peso de la placa base=2541 KN., Peso del Techo=31.55 KN., Peso del Producto=54276.36 KN., Área de Techo=564.16 m², Área de Pared=1024.11 m², Área base=561.58 m², etc. para luego realizar el desarrollo de los cálculos.

Con la norma API650, se calculó el peso específico del producto, centros de acción de las fuerzas laterales efectivas, periodo convectivo, periodo impulsivo, cálculo del parámetro de aceleración impulsiva espectral, cálculo del parámetro de aceleración convectiva espectral.

Con la norma IITK-GSDMA, se calculó los pesos de la estructura, parámetros del resorte masa modelo, periodos naturales impulsivo, periodos naturales convectivo, coeficiente horizontal de diseño sísmico, cortante de la base, momento en la parte inferior de la pared, momento de volteo, presión hidrodinámica impulsiva; norma peruana E.030, se calculó con el modelamiento el periodo convectivo, periodo impulsivo, presión impulsiva, presión convectiva, aceleración espectral y complementando con la norma peruana E.020 se calculó la carga del viento.

Dando como resultados, aplicando la norma API650 para un mismo espectro arrojó un periodo convectivo T_c de 5.66 seg y un periodo impulsivo T_i de 0.04 seg,; con la norma peruana E.030 se determinó un Periodo Convectivo T_c de 5.613 seg. Y un periodo impulsivo T_i de 0.104 y al considerar la normativa propuesta por el Instituto tecnológico Kanpur de la India (IITK) se determinan un periodo convectivo T_c de 5.61 seg y un periodo impulsivo de 0.19 seg; asimismo, los coeficientes sísmico horizontal para el modo impulsivo y modo convectivo según API fue de 0.18 y 0.01085 seg y para IITK fue de 0.11 y 0.01 seg, y respectivamente.

Por lo que se concluye El periodo convectivo e impulsivo según las normas IITK-GSDMA, API650 y el modelo (E-30), son del mismo orden de magnitud; Los valores de carga de viento según las normas API650 y el modelo (E-30), son coincidentes, la cual se recomienda, aplicar específicamente el modelo IITK.

Palabras Clave: Fluido-Estructura, Periodo convectivo e impulsivo, Espectros

ABSTRACT

For validity, the analysis model for the adaptation to the Peruvian norm E.030 (Peruvian Standard of Resistant Earthquake Design, 2016), considering the Housner model (1954), the fluid-structure interaction which developed the calculation and dynamic modeling / static storage tank, among the best known standards for design and construction, such as API 650 - 2007 (American Petroleum Institute) and IITK-GSDMA (Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks) and SAP2000 software (Structural Analysis Program,)

Therefore, modeling was performed with the SAP2000 software, resulting in the general data of the calibrated model, such as the following Total Height = 12,191 m, Liquid Height = 11,324 m, Diameter = 26.74 m, Wall Weight = 662.07 KN. , Base plate weight = 2541 KN., Roof weight = 31.55 KN., Product weight = 54276.36 KN., Roof area = 564.16 m², Wall area = 1024.11 m², Base area = 561.58 m², etc. and then perform the development of the calculations.

With the API650 standard, the specific weight of the product, centers of action of the effective lateral forces, convective period, impulse period, calculation of the spectral impulse acceleration parameter, calculation of the spectral convective acceleration parameter were calculated.

With the IITK-GSDMA standard, the weights of the structure, spring mass model parameters, impulsive natural periods, convective natural periods, horizontal coefficient of seismic design, base shear, moment at the bottom of the wall, moment were calculated. flip, impulse hydrodynamic pressure; Peruvian standard E.030, the convective period, impulse period, impulsive pressure, convective pressure, spectral acceleration were calculated with modeling and, in addition to the Peruvian standard E.0.20, the wind load was calculated.

Giving as results, applying the API650 standard for the same spectrum yielded a convective period T_c of 5.66 sec and an impulsive period T_i of 0.04 sec; with the Peruvian standard E.030, a Convective Period T_c of 5,613 sec was determined. And a T_i impulsive period of 0.104 and considering the regulations proposed by the Kanpur Institute of Technology of India (IITK), a T_c convective period of 5.61 sec and an impulse period of 0.19 sec are determined; also, the horizontal seismic coefficients for the impulsive mode and convective mode according to API was 0.18 and 0.01085 sec and for IITK it was 0.11 and 0.01 sec, and respectively.

Therefore, the convective and impulsive period according to IITK-GSDMA, API650 and the model (E-30) are concluded, they are of the same order of magnitude; The wind load values according to API650 standards and the model (E-30) are coincident, which is recommended, specifically apply the IITK model.

Keywords: Fluid-Structure, Convective and impulsive period, Spectra.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El presente trabajo de investigación bajo el título “Análisis dinámico modal espectral y estático equivalente de tanques de almacenamiento de petróleo” formula un modelo de análisis de tanques de almacenamiento cilíndrico de acero a partir de una adaptación a la norma peruana E.030 (Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente, 2016) del modelo de Housner (1954), considerando la interacción fluido-estructura producida por deformaciones a consecuencia de efectos sísmicos.

En el Perú no existe una norma específica que regule el análisis y construcción de este tipo de estructuras que se emplean principalmente en la industria del petróleo y para el almacenamiento de agua; no obstante, su uso, la norma peruana de diseño sismorresistente para edificaciones les considera ya un factor de importancia alto y los códigos como el del API 650 (2007), establecen un factor de reducción de fuerzas bajo que va en contra de su ductilidad estructural.

Esta problemática conllevó a formular la siguiente pregunta de investigación: “¿Cómo hacer un modelo dinámico modal espectral y un modelo estático equivalente con los que se pueda considerar los periodos convectivo e impulsivo calculados de acuerdo al modelo de Housner (1954) y se incluya el espectro de la norma peruana E.030 (Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente, 2016) de enero 2016 ?”; y, en razón a esta pregunta el objetivo general fue: “Hacer un modelo numérico para un análisis dinámico modal espectral y otro estático equivalente que se puedan emplear para calcular las sollicitaciones sísmicas en tanques de almacenamiento de petróleo de acuerdo a parámetros de la norma peruana E.030”.

La Hipótesis que orientó la investigación fue: “La adaptación de los modelos que consideran la masa convectiva, impulsiva y sólo el tanque de almacenamiento, produce un estado de vibración de la estructura con un porcentaje superior al 80 % de participación de masas, por tanto, puede ser empleado en el análisis sismo resistente de tanques de almacenamiento de petróleo”.

El informe de la presente tesis consta de siete (07) capítulos: El capítulo I corresponde a la introducción, el II al fundamento teórico, que incluye antecedentes y definición de términos básicos, el III a materiales y métodos, el IV a resultados, el V a discusión, el VI a conclusiones y recomendaciones y el VII corresponde a bibliografía; también se incluye los anexos.

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMÁTICA

En Perú, los tanques de almacenamiento se emplean en la industria del petróleo, en el almacenamiento de agua; es decir, constituyen una línea vital para la economía y la vida; sin embargo, no existe una norma peruana dedicada al análisis y construcción de estructuras importantes como éstas, por lo que en la práctica se debe adaptar códigos internacionales para el análisis y diseño de este tipo de estructuras no previstas en nuestra norma E.030 (Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente, 2016).

La norma E.030, sin embargo, les considera ya un factor de importancia alto. Códigos como el API 650 (2007), establecen un factor de reducción de fuerzas bajo, lo que se entiende que no disipan energía suficiente para ser consideradas dúctiles, por lo que diseños no adecuados sísmicamente provocan fallas de estos tanques, lo que indica que es urgente la propuesta de una norma de diseño de los mismos con un factor de reducción R apropiado.

En Perú existen lotes de petróleo sobre todo en la Amazonia y en el proceso de su explotación se requiere de tanques de almacenamiento; por tanto, al ser ésta una zona importante desde el punto de vista ambiental, se requiere de diseños funcionales y estructurales óptimos que puedan tener respuestas satisfactorias frente a eventos sísmicos. Esto plantea que el análisis de tanques de almacenamiento debe realizarse de acuerdo a las demandas sísmicas propias de cada región del país, es decir, urge comparar los coeficientes de zona y suelo frente a los calculados con normas extranjeras.

Existen diversas normas, así por ejemplo, es muy popular API 650 (2007) por sus procedimientos simplificados de uso, pero ésta difiere de nuestros parámetros de diseño normados en la norma E.030 (Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente, 2016); por ejemplo, en API 650 (2007) se emplea otro espectro de demanda, por lo que es necesario compatibilizar estos parámetros con los de nuestra norma peruana y sobre todo revisar las diferencias de órdenes de magnitud sísmicas producidas, de lo contrario el ingeniero peruano estaría incurriendo en diseños inseguros.

1.2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo hacer un modelo dinámico modal espectral y un modelo estático equivalente con los que se pueda considerar los períodos convectivo e impulsivo calculados de acuerdo al modelo de Housner (1954) y se incluya el espectro de la norma peruana E.030 (Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente, 2016) de enero de 2016?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Hacer un modelo numérico para un análisis dinámico modal espectral y otro estático equivalente que se puedan emplear para calcular las solicitaciones sísmicas en tanques de almacenamiento de petróleo de acuerdo a la norma peruana E.030. (Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente, 2016).

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar información actualizada en revistas científicas y tesis acerca de modelos numéricos de tanques de almacenamiento de petróleo.
- Calibrar los modelos numéricos propuestos a partir de los períodos convectivo e impulsivo, calculados de acuerdo a normas internacionales para tanques de almacenamiento.
- Proponer un modelo numérico estático equivalente que pueda ser aplicado con la norma peruana E.030
- Proponer un modelo numérico dinámico modal espectral que pueda ser aplicado con el espectro de la norma peruana E.030.
- Diseñar los principales elementos de la superestructura del tanque de almacenamiento de petróleo.

1.4 HIPÓTESIS

La superposición de los modelos que consideran la masa convectiva, impulsiva y sólo el tanque de almacenamiento, produce el estado de vibración de la estructura con un porcentaje superior al 80% de participación de masas, por tanto, puede ser empleado en

el análisis sismo resistente de tanque de almacenamiento de petróleo.

1.5 JUSTIFICACIÓN

La presente tesis beneficiará a la población peruana en general, porque es la directamente afectada por el buen o mal funcionamiento de estructuras de almacenamiento; a todos los entes locales y nacionales encargados de los estudios de análisis y diseño, tales como el Ministerio de Energía y Minas, Gobiernos Regionales, Municipalidades y a los ingenieros civiles encargados del diseño de estas estructuras que no aplican o desconocen la metodología propuesta en el presente trabajo.

En las estructuras vitales, como el caso de tanques de almacenamiento de petróleo existe el interés por un comportamiento seguro bajo cargas sísmicas, lo cual radica no solo en el costo de reposición en caso de falla, sino también en los desastres ambientales que un accidente puede provocar. Como, los tanques deben seguir operando después de un evento sísmico, se hace extremadamente importante el estudio de su comportamiento (Compagnoni, Curadelli y Martinez 2012:2)

La propuesta considera la adaptación del modelo de Housner (1954) para analizar la interacción fluido – estructura producida por efectos sísmicos sobre tanques de almacenamiento de acero, a nuestra norma E.030 (Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente, 2016). En la presente investigación se evalúan las diferencias resultantes de aplicar API 650 y la adaptación propuesta en los objetivos del presente trabajo, para tener una metodología de análisis de acuerdo a la realidad de Perú.

Este trabajo es importante porque con la formulación de la propuesta, se abren nuevas líneas de investigación.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

El Perú no cuenta con una norma dedicada al análisis sismo resistente de tanques de almacenamiento ni normas específicas para su construcción, la norma peruana E.030 señala específicamente el diseño sísmico en edificaciones, sin embargo, el nuevo espectro propuesto en ella se asemeja al de tanques de almacenamiento como los utilizados en API 650. Por esta razón los ingenieros peruanos diseñan con normas extranjeras.

Existen modelos simplificados para la interacción hidrodinámica de presiones, para tanques de almacenamiento cilíndricos, que consideran el acoplamiento entre las masas del agua y la estructura, éstos emplean como herramienta numérica principal el método de elementos finitos (Zeniny, 2004).

Sánchez, H. et al (2004), realiza un modelo basado en elementos finitos para simular tanques de gran capacidad con un registro sísmico de México; considera al tanque en vacío y lleno, compara los resultados numéricos y analíticos del tanque vacío con resultados satisfactorios para el modelo propuesto; debido a la viga collarín en la parte alta los resultados de los efectos convectivos no son significativos y predominan las presiones hidrostáticas.

Sánchez H. y Vargas O. (2011) realiza una revisión de los criterios básicos de diseño para estructuras cilíndricas de acero en diferentes condiciones de carga de servicio y sismo considerando los efectos hidrodinámicos sobre la estructura. En este artículo se comenta sobre los daños producidos por efecto sísmico, como resultado se concluye que los cortantes basales y momentos de volteo aplicados a tanques

de diferentes capacidades por los métodos API 650, ASCE, Haroum Housner y CFE 93 producen resultados del mismo orden de magnitud cuando las relaciones altura/radio tienden a uno, y presentan comportamientos diferentes cuando la relación anterior es menor que 0.55, aumentando las diferencias de manera importante cuando la relación tiende a cero.

El API 650 es una norma pensada para tanques con volúmenes de capacidad de almacenamiento mayores a los 10,000 barriles (aproximadamente 1,590 m³), que operan desde presiones atmosféricas hasta un máximo de 2.5 psi (lb/pulg² manométricas)¹¹, que equivalen a 1,758 kg/m², lo cual para lo que estamos acostumbrados en el diseño común de edificios es una carga tremenda (Aranda, 2011).

Sísmicamente los tanques de acero apoyados sobre el suelo para almacenamiento de petróleo y sus derivados han tenido un buen comportamiento, ya que por su forma son bastante estables. Si embargo, pudo advertirse que, en el gran sismo de Alaska, de fecha 28 de marzo de 1964 de Magnitud Momento $M_w = 9.213$, éstos tuvieron la falla conocida como “Pata de Elefante”. Se trata de una deformación periférica de pandeo que se produce en el primer anillo del tanque, debido a esfuerzos verticales de compresión axial muy elevados en uno de los lados producto del levantamiento del tanque en el lado opuesto debido a la carga lateral impuesta por el sismo y que deforman permanentemente el anillo al deformarse inelásticamente (Aranda, 2011).

Sísmicamente los tanques de acero apoyados sobre el suelo para almacenamiento de petróleo y sus derivados han tenido un buen comportamiento, ya que por su forma son bastante estables. Si

embargo, pudo advertirse que, en el gran sismo de Alaska, de fecha 28 de marzo de 1964 de Magnitud Momento $M_w = 9.213$, éstos tuvieron la falla conocida como “Pata de Elefante”. Se trata de una deformación periférica de pandeo que se produce en el primer anillo del tanque, debido a esfuerzos verticales de compresión axial muy elevados en uno de los lados producto del levantamiento del tanque en el lado opuesto debido a la carga lateral impuesta por el sismo y que deforman permanentemente el anillo al deformarse inelásticamente (Aranda, 2011). Antes de esta falla ya se habían presentado fallas menores en este tipo de estructuras, pero se consideraba a los tanques como estructuras estables y capaces de absorber gran capacidad de energía producto del movimiento de un sismo sin fallar. Otras fallas se pueden producir en los techos de estos tanques producto del oleaje del fluido interior, o puede haber problemas de deslizamiento si es que la carga lateral supera la fuerza de fricción opuesta en la base, generando un desplazamiento en el tanque. Asimismo, levantamientos del tanque pueden generar fallas en las conexiones de las tuberías de las líneas de recepción y despacho de los productos al no poder acompañar los desplazamientos verticales, fallas en la unión del fondo con la pared del tanque y asentamientos diferenciales en la cimentación. Por último, el anclaje de estos tanques como mitigación de estos problemas puede conllevar a problemas serios si es que no son hechos adecuadamente, al generar esfuerzos elevados en la vecindad de los anclajes (Aranda, 2011).

Han habido otros terremotos donde estos tanques han fallado, como por ejemplo en el terremoto de Lima del 3 de octubre de 1974 ($M_w = 8.1$), en donde de acuerdo Morán et al. (1975), en la Refinería La Pampilla un tanque tuvo una falla de “Pata de Elefante” y en un tanque de la Refinería de Conchán se desprendió el fondo al levantarse el

tanque, dejando escapar el hidrocarburo contaminando el dique que lo contenía así como derramándose por la parte superior de un tanque de techo flotante parte del contenido de hidrocarburo (Aranda, 2011). También en el sismo de Valparaíso, Chile, de fecha 3 de marzo de 1985 ($M_w = 7.8$) de acuerdo al trabajo de Ríos (1989), se reportaron daños en la Refinería de Concón, ubicada a aproximadamente 50 km del epicentro pero cuyo plano de ruptura se llegó a desarrollar debajo de Concón, a aproximadamente 40 km de profundidad, sufriendo un tanque la falla de la “Pata de Elefante” y en otro, al parecer por una falla localizada de fábrica en la plancha de acero, se produjo una abertura en la plancha de acero conjuntamente con el pandeo de la plancha por el efecto de “Pata de Elefante”, escapándose todo el hidrocarburo contaminante al dique de contención del tanque (Aranda, 2011).

Entre los años ‘40 y ‘60 se realizaron una serie de investigaciones básicamente a cargo del ingeniero civil George Housner y del físico e ingeniero mecánico Lydik Jacobsen. Producto de estos trabajos de investigación se publicaron los trabajos pioneros de Jacobsen titulado “Impulsive Hydrodynamics of Fluid Inside a Cylindrical Tank and of Fluid Surrounding a Cylindrical Pier” publicado en 1949 en la “Seismological Society of America” y “Hydrodynamics Experiments with Rigid Cylindrical Tanks Subjected to Transient Motions” publicado junto con R. Ayres (1951); luego Housner publica 2 grandes trabajos, uno titulado “Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers” (1957) y el otro “The Dynamic Behaviour of Water Tanks”, publicado en un boletín de la “Seismological Society of America” en 1963 (Aranda, 2011).

Los tanques de acero soldado para almacenamiento de petróleo y sus derivados son los recipientes para almacenar estos productos más

usados en el Perú y en el mundo por la relativa simpleza en su construcción y diseño y la gran durabilidad que tienen si es que se fabrican y montan de acuerdo a las normas, siendo una de las más usadas y reconocidas la del API 650. Asimismo, un adecuado mantenimiento les asegura una larga vida a estos tanques, siendo por ello, junto con los considerandos ya mencionados, recipientes de almacenamiento económicos si se analiza la gran capacidad de almacenamiento de los mismos (Aranda, 2011).

El correcto almacenamiento del petróleo y sus derivados es muy importante, dada la gran dependencia que aún tiene nuestra sociedad moderna de los hidrocarburos como fuente de energía y al ser la sustitución de los mismos algo aún, relativamente lejano. Las normas para el diseño, fabricación y montaje de estos tanques, como la norma API 650, tienen hoy en día una serie de pautas y consideraciones si son diseñados para una zona de alta sismicidad, como lo es la costa peruana y en general el Perú, además lógicamente de la costa chilena. En general la gran sismicidad de nuestras costas debido a la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana tiene su mayor zona de sismicidad entre el límite de los departamentos de La Libertad y Ancash por el norte, hasta la zona de Valdivia en Chile, por el sur, siendo esta distancia de aproximadamente 3,375 km en línea recta y de 3,800 km siguiendo el contorno de la falla (Aranda, 2011).

Hoy en día el API 650 en su Apéndice E “Seismic Design of Storage Tanks” (Diseño Sísmico de Tanques de Almacenamiento) referido al diseño sísmico, es un sofisticado aparato de diseño el cual es relativamente nuevo, ya que recién en los años ‘80 aparecieron las primeras reglamentaciones para el diseño sísmico de estos tanques,

habiendo evolucionado mucho hasta la actualidad. En la novena edición, cuarta Adenda del API 650 del año 1997, el Apéndice E referido al diseño sísmico contaba con apenas 7 páginas. La décima edición, tercera Adenda de noviembre del 2003 contaba con 8 páginas. La última edición (undécima), segunda Adenda de noviembre del año 2009, cuenta con 24 páginas, además de 24 páginas adicionales como comentario que se encuentran en el Apéndice EC “Commentary on Appendix E” (Comentario al Apéndice E). A eso hay que añadirle que en caso de que los tanques requieran anclajes, estos se diseñan con una norma aparte que es del “American Iron and Steel Institute” (AISI) o “Instituto Americano del Hierro y del Acero”, que es la norma AISI T – 192 y a la que hace referencia el API 650. El AISI T – 192 a su vez da una bibliografía adicional para reorientar el diseño propuesto con fines de optimización, de ser necesario y de acuerdo al criterio del diseñador (Aranda, 2011).

Los antecedentes hasta aquí vistos, nos muestra claramente que el diseño sísmico de tanques verticales de acero soldados apoyados sobre el suelo se ha vuelto un tópico de suma importancia tanto como para la protección del medio ambiente así como para mantener las reservas de combustible que la sociedad necesita para su funcionamiento, evitando que los tanques fallen ante un sismo importante, y esto solamente es posible lograrlo siguiendo las reglamentaciones actuales sobre el tema, las cuales necesitan ser comprendidas claramente para su correcta aplicación (Aranda, 2011).

Hernández (2007) en Guillen y Rojas (2017), al estudiar el comportamiento dinámico de tanques cilíndricos de acero de diferentes alturas apoyados en el suelo, bajo normativas americanas, neozelandesas y chilenas (ver figura siguiente), señala que los resultados desde el punto de vista de la componente impulsiva arrojan

que la norma API 650 es la menos conservadora, en segundo lugar, la NCh 2369 (Chilena) y por último la SDST NZ; y desde el punto de vista de la componente convectiva los valores obtenidos bajo la norma NCh 2369 son aproximadamente 3 veces menores a los de API 650 y 4 veces menores a la SDST NZ. Por último, encuentra que la norma neozelandesa arroja mayor cortante basal y momento que la norma americana (Hernández, 2007).

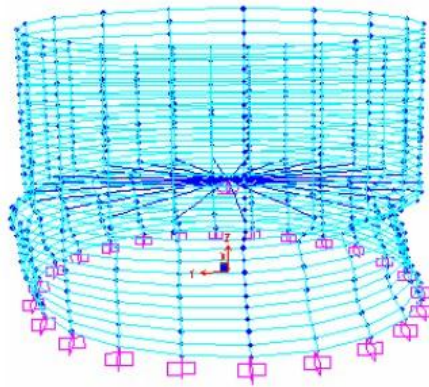


Figura N° 1. Deformada del modo vibración 48 de un tanque cilíndrico
Fuente: Guillen y Rojas (2007)

Penalba (2010), en su estudio, compara el comportamiento hidrodinámico de tanques circulares metálicos con el modelo de Housner y un modelo numérico de elementos finitos, según la normativa API-650 y con el apoyo del software ANSYS como se muestra en la figura siguiente. Estudió diversas dimensiones de tanques con distintas configuraciones altura/diámetro (H/D), y encontró que depósitos apoyados sobre el terreno tienen una configuración óptima $H/D=0.4$.

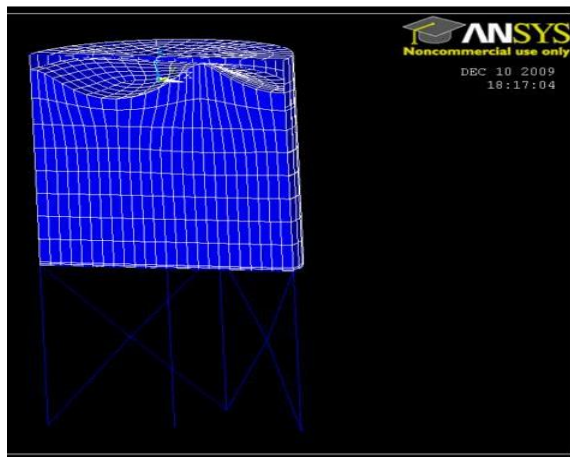
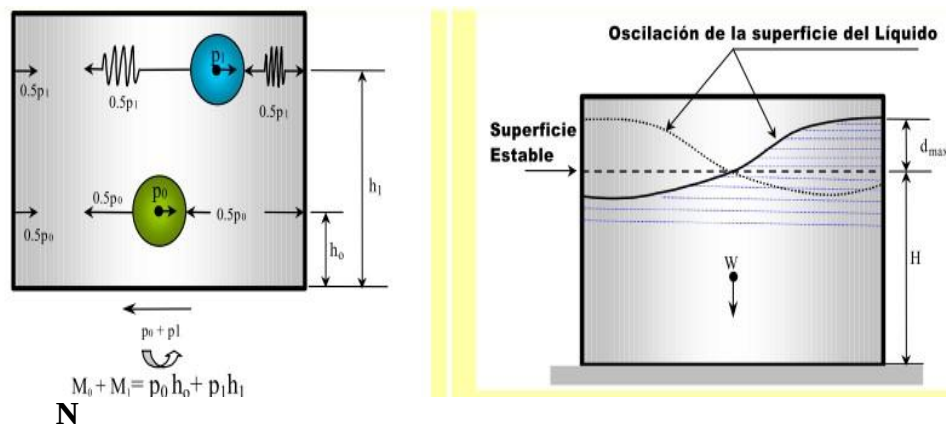


Figura N° 2. Modo 1 de vibración para depósito $H/D = 1$ y elevado 5m de altura. Fuente: Penalba 2010

Sánchez y Vargas (2011), usando el modelo dinámico ilustrado en la figura siguiente, estudia el comportamiento y respuesta de tanques cilíndricos de pared delgada para condiciones de servicio, operación y de sismo, considerando los efectos hidrodinámicos sobre las paredes y fondo de los tanques usando 4 métodos distintos. Encuentran que la respuesta sísmica es similar cuando relación altura/radio del tanque (H/R) tiende a 1 y comportamiento totalmente diferente cuando H/R es menor a 0.55 (Sánchez y Vargas 2011).



° 3. Equilibrio dinámico de fuerzas Horizontales y oscilación del fluido en el Tanque. Fuente: Sánchez y Vargas (2011)

Compagnoni, Cuaradelli y Martínez (2012), hacen un análisis comparativo de la respuesta sísmica de dos tanques cilíndricos con diferentes relaciones de esbeltez siguiendo el modelo mecánico simplificado de masa- resorte (Housner) y un modelo - complejo basado en una aproximación Lagrangiana en código de elementos finitos (ver figura siguiente). Sus resultados muestran que las frecuencias del movimiento de la superficie del líquido usando ambos

modelos eran menores al 1%, los desplazamientos verticales dentro de un error promedio de 15%. Asimismo, señalan que la constante basal crece a medida que aumenta la relación de aspecto de los tanques con el modelo simplificado y a que, a diferencia del otro modelo, llega a sobreestimar y es más conservador. Por último, recomiendan que el modelo masa-resorte solo se use para diseños preliminares (Compagnoni, Cuaradelli y Martínez, 2012).

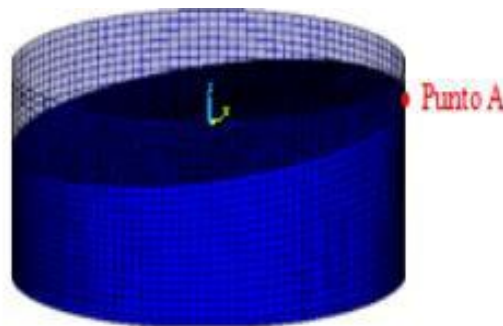


Figura N° 4. Modo convectivo de tanque cilíndrico de 0.325 m de radio y 0.2 m de altura.

Fuente: Compagnoni, Cuaradelli y Martínez 2012

Compagnoni y Martínez (2013), usando el modelo dinámico ilustrado en la figura siguiente, desarrollan un diseño sismorresistente de tanques cilíndricos flexibles de acero con optimización de material. Hacen uso del modelo Housner, modificado por Malhotra, y determinan la respuesta sísmica para varios volúmenes bajo un análisis dinámico modal espectral. El método propuesto proporciona las dimensiones más económicas para un tanque con un volumen de líquido predefinido. De esta manera, observaron que los parámetros de diseño quedan determinados por criterios de estabilidad cuando los volúmenes son pequeños, mientras que los tanques de grandes volúmenes quedan definidos por criterios de resistencia. Finalmente recomiendan altos valores de relación de esbeltez para demandas bajo de volúmenes (Compagnoni y Martínez, 2013).

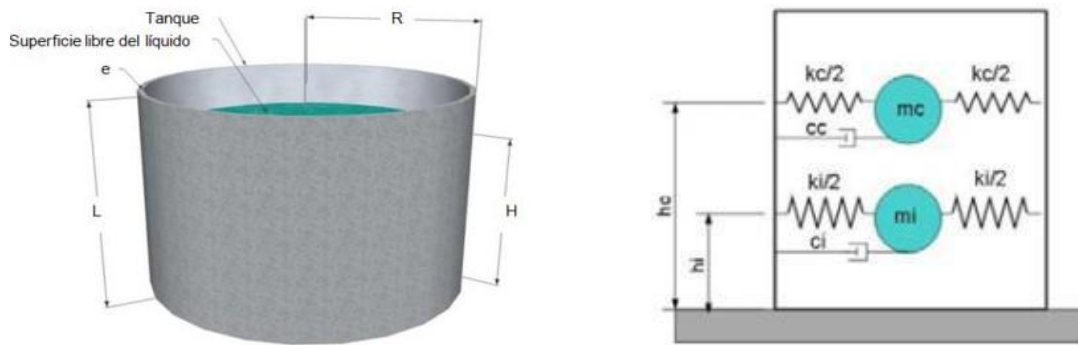


Figura N° 5. Modelo Masa-Resorte para tanque cilíndrico
Fuente: (Compagnoni y Martínez, 2013)

Díaz del Valle (2013), publica un programa para análisis sísmico de depósitos, denominado SISMODEP que puede abarcar el análisis de tanques de cualquier forma elevados y apoyados bajo las normas NCSE-02, NCSP-07, Eurocode-8, ACI-350 y de manera libre considera el modelo Housner de 1963, (ver figura siguiente), para caso de depósitos de concreto armado y el método Malhotra para tanques de acero, acorde a la normativa que recoja dichos modelos. Usando el programa en mención, arribó a resultados sobre cortantes y momentos basales, presiones hidrodinámicas, altura de ola, entre otros parámetros (Díaz del Valle, 2013).

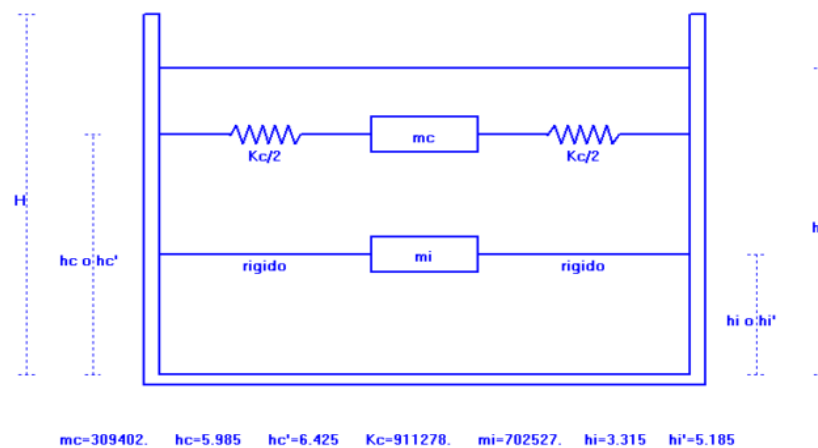


Figura N° 6. Modelo hidrodinámico y resultados calculados por el programa SISMODEP

Fuente: (Díaz del Valle, 2013)

Molina (2013), como parte de su trabajo de investigación, desarrolla un algoritmo de cálculo para el diseño de tanques cilíndricos de acero de baja y media presión bajo el uso de la norma API 650 y la norma PDVSA (Venezolana) en hojas Excel, encontrando que la Norma Venezolana última es más crítica, rigurosa y conservadora que la primera (Molina, 2013).

Finalmente, Pupiliales (2013), desarrolla un análisis comparativo en el diseño sísmico de tanques cilíndricos de acero bajo las normas americanas, neozelandesas, ecuatorianas y métodos simplificados con ayuda del software SAP2000 como lo ilustra la figura siguiente; encontrando resultados aceptables desde el punto de vista del diseño, hallando diferencias mínimas entre 2% y 27% entre los resultados analíticos y computacionales (Pupiliales, 2013).

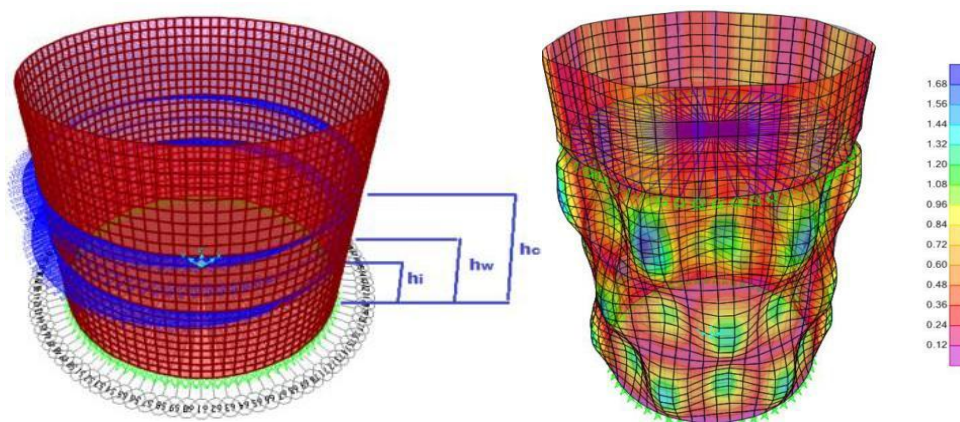


Figura N° 7. Modelo de tanque cilíndrico para análisis dinámico y deformada del segundo modo impulsivo de vibración.

Fuente: Pereira 2013

2.2 INTERACCIÓN FLUIDO – ESTRUCTURA

El análisis de la interacción fluido – estructura es un fenómeno de alta importancia para muchas aplicaciones en la ingeniería entre las cuales destacan la acústica, la aerodinámica, la ingeniería sísmica, etc. Este fenómeno ocurre cuando un fluido interactúa con una estructura sólida mediante presiones que pueden deformar la estructura y por tanto alterar la configuración del flujo. De acuerdo a sus efectos, se pueden clasificar en tres grupos de interacciones:

- Deformación nula: el movimiento de sólidos suspendidos en una matriz líquida.
- Deformación constante en flujo continuo: la fuerza constante ejercida por un fluido dentro de una tubería debido a la fricción viscosa entre las paredes y el líquido transportado.
- Oscilatorias: la deformación inducida en la estructura sólida la hace moverse de tal forma que el origen de la deformación es reducido y la estructura regresa a su estado original para que el proceso se repita.

En general, la interacción, fluido – estructura, es un fenómeno complejo de resolver analíticamente por lo cual su estudio suele ser resuelto mediante métodos de análisis de simulación numérica y experimental; con esta finalidad, se utilizan diferentes métodos de simulación de interacción asistida de software especializado basado en elementos finitos.

2.2.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS NUMÉRICOS DE INTERACCIÓN FLUIDO – ESTRUCTURA

La respuesta sísmica de los tanques de acero depende de la interacción fluido – estructura que resultan en momentos de volteo y cortantes basales producidos por las fuerzas inerciales horizontales.

La naturaleza de esta interacción es asociada a un gran número de variables tales como la aceleración del suelo, los modos de vibración de los tanques, la flexibilidad de las paredes, el tiempo de acción sísmica.

Debido a la cantidad de variables a tomar en cuenta en la interacción de un tanque y su contenido, las simulaciones numéricas representan una eficaz herramienta para resolver este tipo de problemas considerando todos los sistemas que interactúan acopladamente (Vesenjak, et. al. 2005), más aún el análisis numérico para estudiar este tipo de interacción es del tipo no – lineal, tridimensional, dinámico y de desplazamientos considerables (Guillen y Rojas, 2017). A continuación, se presentan algunos métodos de análisis de la interacción bajo el enfoque de diferentes formulaciones adecuadas al movimiento del fluido utilizadas conjuntamente con programas basados en elementos finitos.

2.2.2 FORMULACIÓN LAGRANGIANA

En esta formulación un elemento finito representa la misma parte del material durante todo el análisis donde el fenómeno se plantea mediante un gran número de elementos – masas, en el cual el movimiento de cada masa se analiza en el espacio y tiempo; por tanto, el problema es definido cuando el movimiento de cada partícula es conocido. Pese a que resulta ser un método directo y fácil de usar para un número reducido de elementos, puede convertirse en un método complicado para la descripción de un gran número de masas.

2.2.3 FORMULACIÓN EULERIANA

A diferencia del método Lagrangiano, en el cual se observa el movimiento de cada partícula, en la formulación Euleriana el flujo del fluido es analizado desde un punto fijo en el espacio. En cada periodo de tiempo Δt algunos elementos masa pueden pasar por este punto fijo de observación, de esta forma su movimiento es determinado y, por tanto, en el punto de observación las variables del campo del flujo son dependientes del tiempo.

2.2.4 FORMULACIÓN LAGRANGIANA – EULERIANA ARBITRARIA (ALE)

En esta formulación la malla se deforma parcialmente debido a que sigue el movimiento del material de la misma forma que la formulación Lagrangiana y al mismo tiempo puede comportarse con las características de un flujo a través de un espacio de malla fijo como en la Formulación Euleriana.

De hecho, el procedimiento de solución de la Formulación Lagrangiana – Euleriana es más parecida a la Euleriana, la diferencia radica en la suavización de malla, donde los nodos no regresan a su posición inicial, sino que sus ubicaciones son calculadas de acuerdo a un promedio de distancia entre nodos vecinos.

2.2.5 HIDRODINÁMICA SUAVIZADA DE PARTÍCULAS (SPH)

Este método difiere del resto debido a que no necesita de una malla, sin embargo, es un método basado en la formulación Lagrangiana para evitar las restricciones de la malla cuando existen deformaciones considerables, como lo es el estudio del oleaje de la superficie libre en tanques.

2.3 PRESIONES HIDRODINÁMICAS

El estudio del comportamiento de los líquidos en movimiento, dinámica de los fluidos o hidrodinámica, considera algunas variables tales como velocidad, densidad, temperatura y presión como funciones de tiempo y espacio. Particularmente, las presiones hidrodinámicas gobiernan la definición de la respuesta de un tanque de almacenamiento sometido a excitación dinámica debido a que, durante un sismo, el líquido contenido ejerce presiones hidrodinámicas en las paredes y fondo del tanque.

La respuesta sísmica de un tanque es un fenómeno complejo dado que la interacción paredes – líquido y las fuerzas inerciales del líquido deben ser consideradas, sin embargo, esta interacción puede ser simplificada con el concepto generalizado de sistemas de un grado de libertad representando sus modos de vibración principales.

El movimiento del líquido dentro de los tanques de almacenamiento provoca una sobrecarga en las paredes debido a las presiones hidrodinámicas, simplificadamente un modelo mecánico equivalente, masa – resorte, simula los efectos de la respuesta mediante dos componentes hidrodinámicas asociadas a dos modos principales de vibración: convectivo e impulsivo.

- **Impulsivo:** componente hidrodinámica asociada a la suposición que una porción del líquido se mueve rígidamente con el tanque.
- **Convectivo:** componente hidrodinámica asociada al oleaje de la superficie libre del líquido.

2.3.1 ANÁLISIS DE LA CONDUCTA DE TANQUES SOMETIDOS A SISMOS

Las presiones dinámicas del fluido desarrolladas durante un sismo son de importancia para el diseño de estructuras como represas y tanques de almacenamiento de cualquier geometría. Las primeras aproximaciones de solución a este fenómeno fueron propuestas por diversos autores como Westergaard que en 1933 determinó las presiones en una represa vertical rectangular sometida a aceleración horizontal, Jacobsen en 1949 resolvió el problema correspondiente para tanques cilíndricos, en 1952 Graham y Rodríguez realizaron un completo análisis de las presiones impulsivas y convectivas sobre contenedores rectangulares, etc. Las bases de las soluciones propuestas fueron tratadas similarmente pues requerían encontrar una solución a la ecuación de Laplace que satisfaga las condiciones de borde.

En 1954 George W. Housner desarrolló uno de los estudios más reconocidos sobre la teoría de presiones hidrodinámicas en tanques de almacenamiento y la idealización de un modelo mecánico masa – resorte capaz de simplificar su respuesta. En primera instancia, el estudio y formulación analítica se aplica al comportamiento de tanques rectangulares y desde ahí se hace extensiva a tanques circulares.

Para representar el movimiento del fluido contenido Housner (1954) en su modelo mecánico equivalente efectuó la siguiente simplificación: Una porción del líquido denominada masa impulsiva, permanece rígidamente fija a las paredes del contenedor, y una serie de masas denominadas convectivas permanecen unidas a las paredes del contenedor mediante resortes de rigidez K , que representan el movimiento oscilatorio del agua durante la excitación sísmica (Huamaní, 2015). Las suposiciones de respuesta, según refiere Huamaní (2015) eran:

- El líquido contenido es incompresible, irrotacional, posee viscosidad despreciable y está inicialmente en reposo.

- Las paredes del tanque se consideran infinitamente rígidas.
- Los desplazamientos son pequeños por lo tanto se aproxima a un sistema lineal.
- El fluido se encuentra siempre en contacto con las paredes (no existe cavitación).

Para lo cual, Housner (1954) consideró en su postulación lo siguiente: el efecto del fluido es similar al que se obtendría si la componente horizontal de la velocidad del fluido fuera independiente de la coordenada “y”. Bajo estas condiciones el líquido actúa como si estuviera limitado entre membranas delgadas verticales sin masa espaciadas a una distancia entre sí. Cuando las paredes son sometidas a una aceleración, las membranas también serán aceleradas de igual forma con el fluido haciendo que el fluido se presione verticalmente con respecto a las membranas. Esta teoría se encuentra demostrada por Housner.

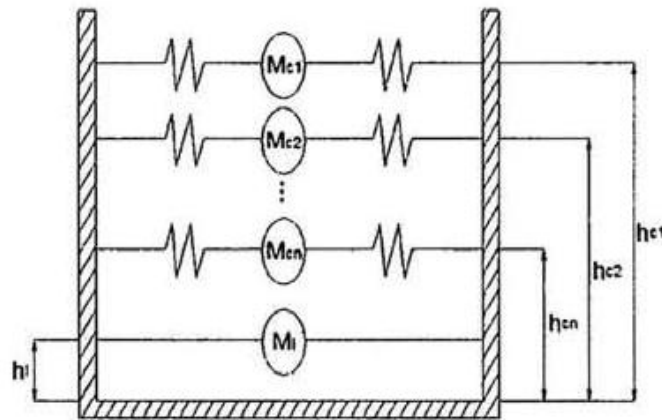


Figura N° 8. Modelo mecánico equivalente según Housner (1954).

2.3.2 EXTENSIÓN DEL ESTUDIO A TANQUES CILÍNDRICOS

En el tanque cilíndrico el líquido está limitado entre membranas fijas paralelas al eje “x”, cada porción de líquido de espesor unitario puede ser abordada como si fuera una sección de un tanque rectangular esbelto. Entonces, las expresiones derivadas para tanques rectangulares pueden ser aplicadas apropiadamente para el caso de los tanques cilíndricos, en la

que la presión ejercida contra la pared del tanque está asociada al modo impulsivo.

La fuerza ejercida tiene el mismo efecto que tendría una masa equivalente, que se moviese solidariamente con el tanque (esta aproximación constituye base de la formulación de los modelos equivalentes).

2.4 MODELAMIENTO DE TANQUES

2.4.1 MODELO DE HOUSNER (HOUSNER, 1963)

Este modelo mecánico, fue una adecuación al anterior modelo de 1954; muestra una simplificación en la que se considera una sola masa para representar el movimiento convectivo debido al oleaje de la superficie libre, sin embargo, en esta aproximación aún se considera un tanque de paredes rígidas para los efectos de cálculo (Huamaní, 2015).

Según el modelo de Housner (1963) para representar el comportamiento dinámico de un líquido contenido en un tanque, basta con considerar una sola masa fija (masa impulsiva) y una sola masa oscilante asociada al primer modo convectivo de vibración. En este modelo, M_i y h_i , representan la masa y altura impulsiva efectiva del líquido respectivamente, y M_c y h_c representan lo mismo para la componente convectiva. Los estudios llevados a cabo conjuntamente con este modelo mecánico constituyen la base de la conceptualización de la gran mayoría de normas internacionales de diseño sísmico y de los modelos mecánicos simplificados (Huamaní, 2015).

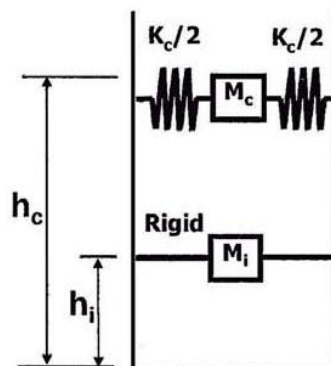


Figura N° 9. Modelo mecánico equivalente según Housner (1954)
Fuente: Tesis Huamaní (2015)

2.4.2 MODELO DE VELETSOS Y YANG (1976)

El sistema tanque – fluido es analizado como un sistema de un grado de libertad, asumiendo que vibra en una configuración fija a lo largo de su altura y que su sección transversal permanece perfectamente circular. Para aproximar los efectos de la flexibilidad de los tanques, se consideran tres configuraciones de deformación entre la base y la superficie libre del tanque (Navarro, 2018).

En este modelo, existe una analogía implícita en la conceptualización de las presiones hidrodinámicas ejercidas sobre la pared para los casos de tanque rígido y tanque flexible. La presión hidrodinámica $p(z, \theta, t)$, ejercida en la pared de un tanque rígido, como se presenta a continuación, está definida por una ecuación en la que el primer término representa la componente impulsiva y el segundo término la convectiva (Navarro, 2018).

$$p(z, \theta, t) = \left[C_0(z)\ddot{x}(t) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k(z)A_k(t) \right] \rho H \cos \theta$$

Donde:

$C_0(z)$, función adimensional de la distribución de la presión impulsiva

$\ddot{x}(t)$, aceleración del suelo

$C_k(z)$, función adimensional de la distribución de la presión convectiva

$A_k(t)$, aceleración de espectro de respuesta para el modo convectivo

ρ , densidad del líquido

H , altura del nivel del líquido

Por otro lado, la componente impulsiva de la presión hidrodinámica ejercida sobre la pared del tanque flexible muestra algunas diferencias con respecto a la del tanque rígido (Navarro, 2018).

$$p_0(z, \theta, t) = C b_0(z) \rho H A_0(t) \cos \theta$$

donde:

$p_0(z, \theta, t)$, componente impulsiva de presión hidrodinámica

C , coeficiente adimensional

$b_0(z)$, función adimensional de distribución de presión

$A_0(t)$, pseudo aceleración

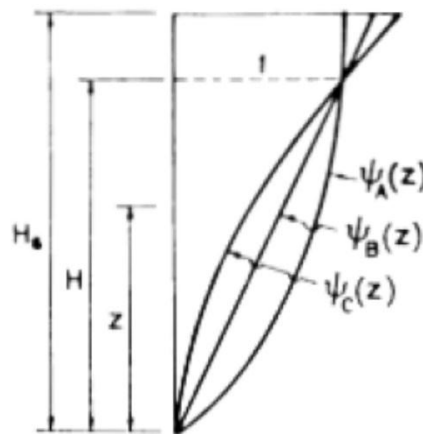


Figura N° 10. Configuración de los tres modos de deformación considerados

Navarro (2018), precisa, sin embargo, las principales diferencias de las aproximaciones de cálculo de las presiones impulsivas para los casos de tanque rígido y flexible:

- Diferentes coeficientes y funciones de distribución de la presión hidrodinámica.
- La aceleración horizontal de cada caso, el uso de la pseudo aceleración $A_0(t)$ que puede tener mayor magnitud que la aceleración máxima del suelo $\ddot{x}_0(t)$.
- $A_0(t)$ como la aceleración espectral correspondiente al modo fundamental de vibración del sistema tanque – líquido.

Por tanto, se reconoce que los efectos hidrodinámicos en los tanques flexibles deben ser de mayor consideración que los inducidos en los tanques asumidos como rígidos (Navarro, 2018).

Nótese que este modelo es una aproximación a la solución de los efectos de la flexibilidad de las paredes investigada solamente para la respuesta impulsiva y no se considera los efectos de flexibilidad en el modo convectivo debido a que estas oscilaciones están dominadas por oscilaciones de periodos muchos más grandes que las impulsivas y por tanto se espera que sus efectos sean similares a los considerados en las de tanque rígido (Navarro, 2018).

A continuación, se presenta una idealización del modelo mecánico de Veletsos y Yang debido a que dentro de la investigación de los autores no se presenta una figura con el modelo como tal (Navarro, 2018).

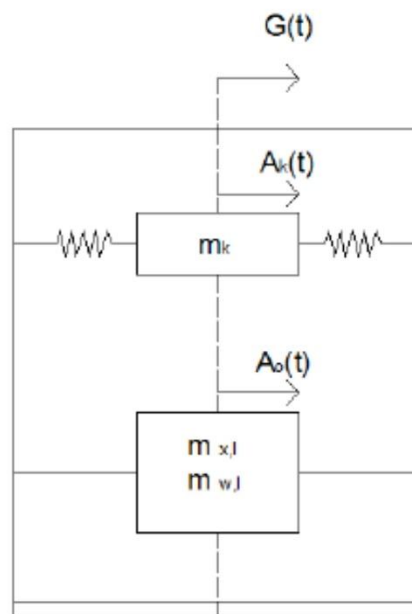


Figura N° 11. Modelo Mecánico Equivalente según Veletsos y Yang (1976)
Fuente: Navarro (2018)

Donde:

$M_{x, l}$, masa efectiva del líquido para el movimiento de cuerpo rígido del tanque

$M_{w, l}$, masa efectiva del líquido que oscila flexible en una de las configuraciones de vibración especificadas por las funciones del tipo $\varphi(z)$.

2.4.3 MODELO DE HAROUN Y HOUSNER (1981)

Navarro (2018), señala: Si bien los estudios realizados por Veletsos y Yang estimaron las fuerzas impulsivas sobre una pared deformable, éstos se basaron en la respuesta hidrodinámica de un tanque rígido con la diferencia del tipo de aceleración horizontal considerada en cada caso, lo cual se tenía que optimizar.

El modelo de Haroun y Housner (1981) nace de la necesidad de mejorar la forma en que se abordaba el problema de la deformación de las paredes del tanque, por tanto, este nuevo modelo se origina como una extensión de estudios anteriores realizados por Housner (1954, 1963) en los que se asumía que las paredes son rígidas (Navarro, 2018).

Según Navarro (2018), la base conceptual del estudio considerada al tanque de almacenamiento mediante un sistema de coordenadas cilíndricas dentro de las cuales, entre otros parámetros, se definen componentes de desplazamiento en la membrana para representar la deformación de las paredes. Adicionalmente, se reconoce que los efectos de la respuesta hidrodinámica están dados por la superposición de oscilaciones de estos tipos:

- Componente convectiva asociada a periodos largos.
- Componente impulsiva “rígida” que se mueve en sincronía con la aceleración horizontal Y del tanque.

- Componente impulsiva “flexible” asociada a periodos cortos representando las vibraciones de la pared deformable.

La componente de presión hidrodinámica convectiva puede ser evaluada con precisión considerando el mismo análisis de tanques rígidos, lo que se justifica debido a que existe un acoplamiento débil entre los modos asociados al oleaje del líquido y los modos de vibración de la pared deformable. Las demás componentes de presión se evalúan a partir de una función potencial de velocidad, que satisface la ecuación de Laplace, resueltas con las condiciones de borde adecuadas para la superficie libre del líquido y la superficie de contacto pared – líquido.

Según la literatura, en general, presión hidrodinámica asociada a los modos impulsivos rígido y flexible se expresa como:

$$p_d(R, \theta, z, t) = p_f(R, \theta, z, t) + p_r(R, \theta, z, t)$$

Donde:

$p_f(R, \theta, z, t)$, presión hidrodinámica causada por la flexibilidad de la pared del tanque

$p_r(R, \theta, z, t)$, presión hidrodinámica ejercida en la pared del tanque rígido.

Para poder obtener la presión hidrodinámica “flexible”, se necesita primero determinar la deformación de la pared mediante un análisis del sistema acoplado fluido – estructura. Con este objetivo, este estudio utiliza un análisis de elementos finitos considerando que la respuesta sísmica del sistema está gobernada por la ecuación matricial obtenida mediante el Principio de Hamilton el cual permite derivar ecuaciones de desplazamiento para varios sistemas (Navarro, 2018).

Navarro (2018), señala: Dentro de la formulación de esta matriz se consideran el trabajo realizado por la presión hidrodinámica, la energía

cinética y la deformación de la membrana. Con la ayuda de la modelación de elementos finitos de la pared y la expresión de la presión hidrodinámica, el Principio de Hamilton lleva a la ecuación matricial de movimiento de esta forma:

$$[M] \{ \ddot{x} \} + [C] \{ \dot{x} \} + [K] \{ x \} = \{ P_{eff} \}$$

Donde:

$[M]$, matriz de masa

$[C]$, matriz de amortiguamiento

$[K]$, matriz de rigidez

$\{ x \}$, vector de desplazamiento nodal de la membrana

$\{ P_{eff} \}$, vector de carga sísmica efectiva.

Para analizar los efectos de la flexibilidad de las paredes en la respuesta sísmica del tanque, a continuación, se muestran las masas efectivas m_s , m_f y m_r asociadas a los efectos del oleaje de la superficie libre del líquido, de la deformación de la pared relativa a la base, y del movimiento rígido tanque-líquido respectivamente, así mismo, las alturas efectivas tienen una nomenclatura similar a la usada para las masas y su definición se realiza como fracciones de la altura total del nivel líquido.

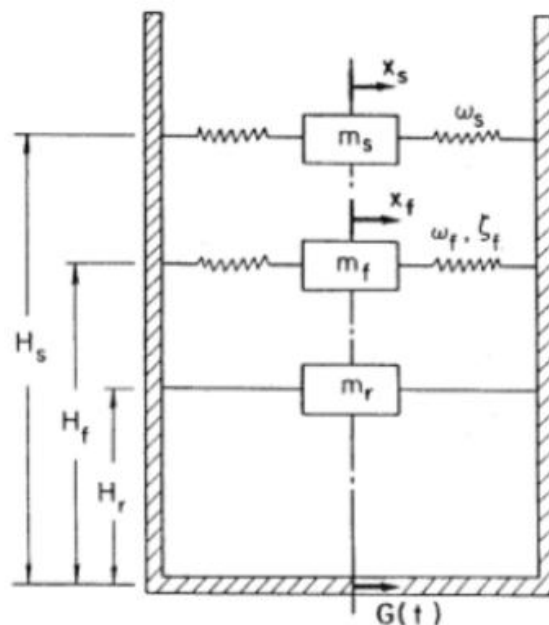


Figura N° 12. Modelo Mecánico Equivalente según Haroun y Housner (1981)
Fuente: Navarro (2018)

2.4.4 MODELO DE MALHOLTRA ET. AL. (2000)

Según Navarro (2018), el modelo de Malholtra et. al. (2000) es parte de un estudio para simplificar el procedimiento de diseño sísmico de tanques cilíndricos apoyados en la base. El procedimiento propuesto toma en cuenta las acciones impulsivas y convectivas del líquido contenido sobre tanques de acero u hormigón fijados sobre cimentaciones rígidas. El alcance de este estudio aborda únicamente el análisis elástico de tanques totalmente anclados y rígidamente soportados.

Navarro (2018), presenta el procedimiento que está basado en estudios anteriores principalmente a los realizados por Veletsos con ciertas modificaciones para simplificar su aplicación, haciendo que el procedimiento sea simple, preciso, y aplicable a una cantidad amplia de tanques de diferentes relaciones altura – radio (H/R).

A continuación, se presentan algunas de las modificaciones realizadas:

- Representar la respuesta dinámica del sistema tanque – líquido solamente con los primeros modos impulsivos y convectivos.
- Combinar la masa modal impulsiva mayor con el primer modo impulsivo. Lo mismo sucede para el modo convectivo.
- Ajustar las alturas de los modos para tomar en cuenta los efectos volcantes de los modos más altos.
- Generalizar la expresión del periodo impulsivo para que pueda ser usada para tanques de acero y hormigón de diferentes espesores.

El modelo mecánico simplificado, en cuestión, se presenta a continuación; en la figura, obsérvese que no existe una masa asociada a la vibración de las paredes flexibles como en algunos de los modelos mecánicos presentados anteriormente, sin embargo, se puede observar la diferenciación de amortiguamiento para los espectros de respuesta elástica relacionada a cada masa. El estudio señala que el amortiguamiento adecuado para los espectros de respuesta debe ser de 0.5% para el modo convectivo y 2% para el modo impulsivo en el caso de tanques de acero. Con las observaciones mencionadas anteriormente, el modelo mecánico representado por un sistema de un grado de libertad se muestra a continuación:

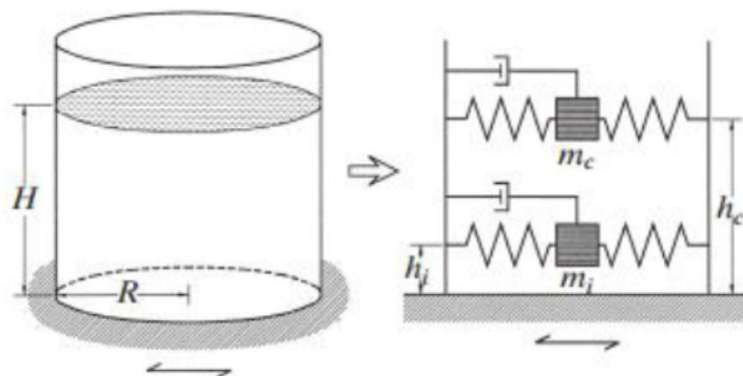


Figura N° 13. Modelo Mecánico Equivalente según Malholtra et. al. (2000)
Fuente: Navarro (2018)

2.5 NORMAS DE DISEÑO SÍSMICO

La literatura especializada, señala que la respuesta sísmica de los depósitos y tanques de almacenamiento de líquidos está muy influenciada por la interacción existente entre el fluido y la estructura que le contiene y soporta; razón por la cual, se requiere, el desarrollo de modelos mecánicos que simulen, de manera adecuada, dicha interacción, así como el uso de herramientas matemáticas y de cálculo computacional que permitan resolver ecuaciones matriciales.

En la actualidad, existen poderosas herramientas de cálculo computacional, basadas en el Método de los Elementos Finitos (MEF) que permiten

resolver con éxito el problema anterior. Como contrapartida, son necesarias entradas de datos muy exhaustivas, que exigen el conocimiento de las ecuaciones que definen el problema, para así introducir correctamente los parámetros hidrodinámicos adecuados. Así mismo, la salida de los resultados que se obtiene con estas potentes aplicaciones, exige un análisis muy detallado de los mismos, para poder extraer los resultados “esenciales” que interesan en el proyecto del depósito (Navarro, 2018).

Además, se ha comprobado que los resultados obtenidos con estos potentes programas son debidos fundamentalmente a los primeros modos de vibración, pudiéndose asegurar que el factor de participación modal del primer modo llega a ser superior al 90% en la mayoría de los casos; sin embargo, desde los años 1960, ante las dificultades de cálculo que entonces existían, se han desarrollado modelos mecánicos simplificados (1 ó 2 grados de libertad) que reproducen con bastante fidelidad el comportamiento del depósito y el líquido que contiene, frente a las acciones dinámicas. Además, los valores de los parámetros hidrodinámicos del modelo simplificado, se han ido ajustando sucesivamente para que proporcionen una respuesta muy parecida a la que se obtiene con las poderosas aplicaciones de elementos finitos.

Por todo esto, los modelos mecánicos simplificados (Mass Spring Model MSM-) siguen utilizándose en la actualidad con preferencia a modelos más sofisticados, prueba de ello es que son los que recomiendan las principales normas sismorresistentes de depósitos (Eurocode 8, ACI 350, API 650, CFE, etc.) (Navarro, 2018).

En la actualidad son pocos los países, instituciones, asociaciones y empresas que poseen una normativa o código de análisis sísmico de depósitos de almacenamiento de líquido. La recopilación efectuada, por Navarro (2018) es la siguiente:

Tabla N° 1. Relación de países que poseen normativa para diseño tanques

Código	Denominación	País	Organismo
--------	--------------	------	-----------

ACI 350.3R-06	Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary	USA	American Concrete Institute
API-650	Welded Steel Tanks for Oil Storage	USA	American Petroleum Institute
API 12D	Specifications for Field Welded Tanks for Storage of Production Liquids	USA	American Petroleum Institute
API 12F	Specifications for Shop Welded Tanks for Storage of Production Liquids	USA	American Petroleum Institute
API 620	Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks	USA	American Petroleum Institute
API 650, 1998	Welded storage tanks for oil storage	USA	American Petroleum Institute
ASCE, 1980	Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems	USA	American Society of Civil Engineers
ASME B96.1	Welded Aluminium-Alloy Storage Tanks	USA	American Society of Mechanical Engineers
AWWA D100-84	Standard for Welded Steel Elevated Tanks, Stand-Pipes and Reservoirs for Water Storage	USA	American Water Works Association
AWWA D100-05	Welded Carbon Steel Tanks for Water Storage	USA	American Water Works Association
AWWA D102-06	Standard for Coating Steel Water Storage Tanks	USA	American Water Works Association
AWWA D103-09	Standard for Factory-Coated Bolted Steel Tanks for Water Storage.	USA	American Water Works Association
AWWA D115	Circular prestressed concrete water tanks with circumferential tendons	USA	American Water Works Association
CNA, 2007	Diseño Estructural de Recipientes	México	Comisión Nacional del Agua
Eurocódigo 8. UNE-ENV1998-4. 2004	Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 4: Silos, Depósitos y Tuberías.	UE	Comité Europeo de Normalización
FEMA- 368, 2000	NEHRP Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures	USA	Federal Emergency Management Agency
IITK-GSDMA	Guidelines For Seismic Design Of Liquid Storage Tanks	India	Gujarat State Disaster Management Authority
MDOC C. 2.5	Manual de diseño de Obras Civiles.	México	Comisión Federal de Electricidad
NCh 2369 Of. 2003	Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales	Chile	Instituto Nacional de Normalización
PDVSA-FJ-251	Diseño Sismorresistente De Tanques Metálicos	Venezuela	Petróleos de Venezuela

NZS 3106, 1986	Code of practice for concrete structures for the storage of liquids, Wellington	Nueva Zelanda	Standards Association of New Zealand
SDST NZ (Directrices NZSEE)	Seismic Design of Storage Tanks	Nueva Zelanda	Study Group of the new Zealand National Society for Earthquake Engineering
OPS/CEPIS/05.160	Guías Para El Diseño De Reservorios Elevados De Agua Potable	OPS	Organización Panamericana de la Salud
MCT-2013	Guía para el diseño y proyecto de depósitos	España	Mancomunidad de los Canales del Taibilla
AIJ-2010	Design recommendation for storage tanks and their supports with emphasis on seismic design	Japón	Architectural Institute of Japan

Fuente: Navarro (2018)

2.5.1 NORMA AMERICANA API 650

La norma API 650(American Petroleum Institute) es un compendio de uso general basado en el conocimiento y experiencia acumulada por fabricantes y clientes de la industria petrolera dirigida a tanques de almacenamiento de acero soldado. El alcance de esta norma recoge información acerca de materiales, diseño, fabricación, construcción, inspección, soldadura e inspección de actividades relacionadas a este tipo de tanques.

Esta norma limita su accionar a tanques de fondo plano apoyados en su base sobre tierra, temperatura de operación no mayor a los 90° C y presiones internas cercanas a la atmosférica. Las reglas de diseño en este estándar deben tomarse como requerimientos mínimos y se recomienda la utilización de otras herramientas si el cliente o fabricante lo consideran necesario. Adicionalmente, el estándar no presenta limitaciones a las dimensiones de los tanques de almacenamiento por tanto es el diseñador quien adecúa estas variables a las necesidades requeridas siguiendo las recomendaciones dadas por la norma.

La norma API 650 fue creada por la necesidad de la industria petrolera de unificar el diseño de tanques de almacenamiento ofreciendo niveles de seguridad aceptables a costos razonables. Los contenidos de almacenamiento son en primera instancia petróleo y sus derivados, pero

también pueden servir para almacenar productos de uso extensivo en otras industrias tales como químicos, aceites, alcohol.

2.5.2 NORMA NEOZELANDESA

En el año de 1983 la Sociedad Neozelandesa para la Ingeniería Sísmica (NZSEE) organizó un Grupo de Estudio para elaborar un compendio de recomendaciones para el diseño sísmico de tanques de almacenamiento. Estas recomendaciones reconocían la necesidad de unificar las formas de diseño sísmico dado que los códigos existentes en ese momento se basaban en diferentes principios e incluían diferencias considerables a los requerimientos básicos. Además, el rango de dimensiones de los tanques abordados por los códigos no eran los adecuados para Nueva Zelanda y no existía compatibilidad con los códigos relevantes de este país (Navarro, 2018). La intención del Grupo de Estudio fue cotejar la literatura existente de códigos e informes de investigación para producir las recomendaciones de tal forma que cubran la mayor cantidad de diseños de tanques y materiales como fuera posible; de esta forma en 1986 la Sociedad (NZSEE) publicó un documento titulado Recomendaciones para el Diseño Sísmico de Tanques de Almacenamiento, el cual ha sido utilizado extensivamente en Nueva Zelanda y también ha sido reconocido internacionalmente (Navarro, 2018). Adicionalmente, se utiliza la Revisión del 2008 al documento original, la cual actualiza los parámetros de diseño sísmico de acuerdo a la norma sísmica más reciente (NZS 1170.5).

La información técnica de estas recomendaciones está preparada en forma de un Código que consta de 6 secciones y cada una de las secciones posee una explicación más detallada en la forma de Comentarios de la Sección.

2.5.3 PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DE DISEÑO

El Procedimiento Simplificado de Diseño es el resultado de un trabajo de investigación que propone un método rápido y sencillo para el diseño de tanques cilíndricos apoyados en su base (15). El procedimiento se adapta al comportamiento dinámico del líquido en tanques flexibles de acero o tanques de concreto, ambos, fijados a una cimentación rígida, el mismo ha sido adoptado por el Eurocode 8 en su Parte 4, Anexo B: Procedimientos de Análisis Sísmico para Tanques. Este procedimiento está basado en un análisis elástico, es decir, no se acepta daño alguno en la estructura, lo que conlleva a que los resultados sean significativamente más grandes que las de otros procedimientos en los que los resultados elásticos se dividen por factores de 3 o más para obtener las fuerzas de diseño. En general la filosofía de este estudio está basada en ASCE.

2.5.4 COMPORTAMIENTO Y MODELAMIENTO SÍSMICO DE TANQUES CIRCULARES APOYADOS SOBRE EL SUELO

- Cuando un tanque cilíndrico es sometido a cargas sísmicas laterales, se produce un momento de volteo el cual tiene que ser resistido por los esfuerzos verticales de tensión y compresión en la pared del tanque, llamada cilindro o cáscara o también cáscara cilíndrica. Si la fuerza sísmica de volteo produce una fuerza vertical en la base mayor a la fuerza generada por el peso del cilindro, el contenido (fluido) o mejor dicho la parte colaborante del contenido¹⁸ y el techo, el tanque tenderá a levantarse como se muestra en la siguiente figura (Aranda, 2011).

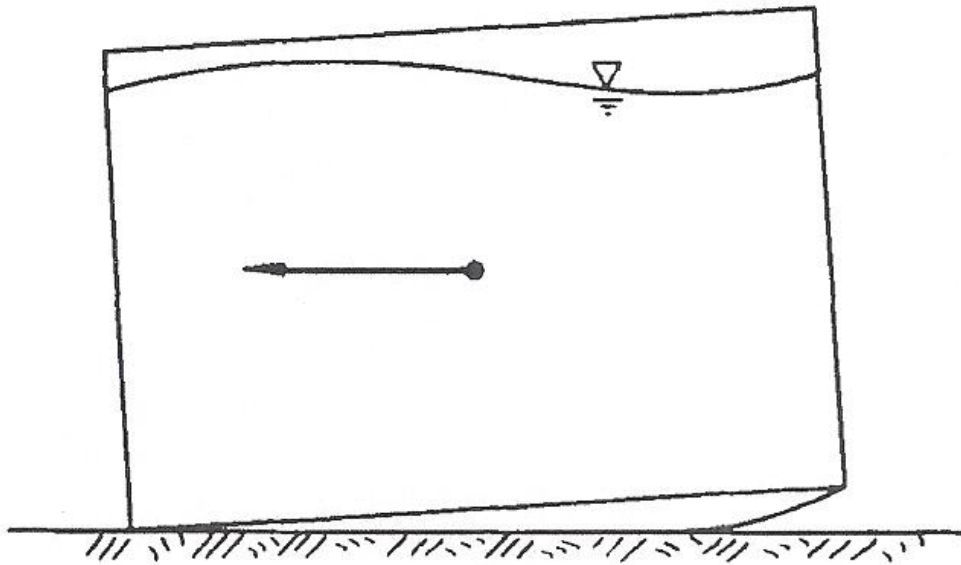


Figura N° 14. Peek, R. y Jennings, P.C. “Simplified Analysis of Unanchored Tanks”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, 1073-1085. John Wiley & Sons, Ltd. Estados Unidos de Norteamérica. 1988.

- Esto ocurre ya que está demostrado que la parte estabilizante del peso del líquido que contrarresta el volteo es menor que la parte del peso del líquido que contribuye al volteo del tanque. Por otro lado, para los típicos tanques de acero que almacenan hidrocarburos¹⁹ el peso del tanque es de alrededor del 2 al 3% respecto al peso del fluido (Aranda, 2011).
- Cuando uno de los bordes de un tanque se separa del terreno, el levantamiento no es constante ya que se trata de un cuerpo circular, por lo que el levantamiento depende de la distancia al eje de rotación que genera ese levantamiento. Así en el caso de un tanque cilíndrico, según se muestra en la siguiente figura, los esfuerzos que se generan en la unión cilindro – fondo del tanque durante el levantamiento debido al peso del fluido actúan sobre una región de forma de luna en etapa creciente o decreciente según como se le mire. Dentro de esa región el peso del fluido por unidad de longitud de arco es proporcional a su ancho y decrece a cero en dirección de los vértices que forman la luna.

En el lado opuesto a este levantamiento se generarán las compresiones axiales que pueden llevar al pandeo y la consiguiente deformación inelástica del cilindro (Aranda, 2011).

- Para tanques anclados, si es que están correctamente diseñados, anclados y contruidos, la pared del tanque (cilindro) va a estar fijada a la cimentación la cual tendrá que ser lo suficientemente pesada para prevenir el levantamiento del tanque debido a un sismo. Esto significa que los anclajes, comúnmente en forma de pernos de anclaje, tienen que ser capaces de transmitir la fuerza vertical de la pared del tanque inducida por la carga sísmica a la cimentación. (Aranda, 2011).
- Si bien los trabajos iniciales en el estudio sísmico de estos tanques supusieron a los mismos anclados a su base, en la práctica esto no es tan sencillo. Se requiere, en primer lugar, una gran cantidad de estos pernos así como, accesorios adecuados que transmitan las fuerzas de tracción de la pared del tanque al perno y estos a su vez la reacción de manera lo más uniforme posible a la pared del tanque. Anclajes mal diseñados o cargas excesivas soportadas por los anclajes pueden resultar en fallas en la pared del tanque o en el anclaje. Asimismo, se necesitarán cimentaciones muy pesadas para soportar estas fuerzas de tracción, especialmente en tanques grandes. Por ello anclar un tanque es caro. (Aranda, 2011).

Por ejemplo, en una figura de la literatura se muestra un perno de anclaje donde la tuerca está 14" (35.5 cm) elevada respecto a su posición original sobre la silla de anclaje, debido al estiramiento del perno por una carga excesiva, por lo que el anclaje no pudo finalmente evitar el levantamiento del tanque. Esto ocurrió en el famoso sismo de San Fernando en California en 1971 (MW = 6.6) y el cual fue un hito en la historia del desarrollo de la ingeniería sismorresistente

norteamericana y mundial por los cambios que generó en las normas de diseño sismorresistente norteamericanas y mundiales. Nótese el tamaño del antebrazo de la persona y el estiramiento de la tuerca, medida desde la punta de los dedos de la mano. (Aranda, 2011).

Según Aranda (2011): El levantamiento de un tanque produce grandes deformaciones y cambios en los esfuerzos en el tanque. Debido a estos levantamientos suceden como consecuencia:

- Daño y rompimientos en las tuberías conectadas al tanque. En el caso de hidrocarburos esto tiene consecuencias muy negativas para el medio ambiente, además de grandes pérdidas económicas.
- Pandeo de la pared del tanque o cilindro debido al aumento de los esfuerzos verticales de compresión en la parte de la pared que se mantiene en contacto con la superficie mientras el otro lado del tanque se levanta y que es la famosa falla conocida como “Pata de Elefante” que ya mencionamos en el Capítulo I.
- Fractura en la unión del fondo del tanque con la pared del tanque debido a rotaciones plásticas excesivas.

Los estudios iniciales se debieron, como se ha indicado en el Capítulo I, a Lydik Jacobsen y George Housner. Los trabajos de estos autores, “Impulsive Hydrodynamics of Fluid Inside a Cylindrical Tank and of Fluid Surrounding a Cylindrical Pier” de Jacobsen (1949), “Hydrodynamics Experiments with Rigid Cylindrical Tanks Subjected to Transient Motions” junto con R. Ayres (1951) y “Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers” (1957) y “The Dynamic Behaviour of Water Tanks” (1963), ambos de Housner, trataron con la hidrodinámica de

líquidos en tanques de paredes o cilindros rígidos apoyados sobre cimentaciones rígidas. Se demostró en esos trabajos que la parte superior del volumen del fluido se mueve en un periodo largo de oleaje y es conocido como líquido convectivo y asociado al período convectivo, mientras que el resto del líquido, que es la parte inferior del contenido, se considera que se mueve rígidamente con la pared del tanque como si se tratara de una masa anclada al mismo. Esa parte del líquido, conocido como líquido impulsivo y asociado al llamado período impulsivo, se puede decir que experimenta la misma aceleración que el tanque y el suelo sobre el que se apoya el tanque y es el que básicamente contribuye con el cortante basal y el momento de volteo del tanque. El líquido superior que se encuentra moviéndose formando olas determina la altura necesaria que tiene que tener el tanque entre la superficie del líquido y el techo del tanque y se mueve con un periodo mucho mayor y por ende diferente que el periodo impulsivo. (Aranda, 2011).

Más tarde se demostró, a través de los trabajos de N. Edwards “A Procedure for Dynamic Analysis of Thin Walled Cylindrical Liquid Storage Tanks Subjected to Lateral Ground Motions” (1969); J. Yang “Dynamic Behavior of Fluid-Tank Systems” (1976); Anestis Veletsos y J. Yang “Earthquake Response of Liquid Storage Tanks” (1977); Medhat Haroun y G. Housner “Seismic Design of Liquid – Storage Tanks” (1981) y A. Veletsos “Seismic Response of Liquid Storage Tanks” (1984); que la flexibilidad de la pared del tanque puede generar que la parte impulsiva del líquido experimente aceleraciones bastante mayores a las aceleraciones del terreno, demostrando que la respuesta sísmica de un tanque flexible, como son estos tanques de acero soldado, puede ser sustancialmente mayor a la de un tanque rígido para una excitación sísmica similar. (Aranda, 2011).

Por ello el cortante basal y el momento de volteo calculado bajo el supuesto de que el tanque es rígido pueden no ser conservadores. Por otro lado, esta flexibilidad no genera mayores cambios en el oleaje y la respuesta convectiva del tanque. Sin embargo, las suposiciones de geometría y condiciones de borde ideales y la falta de más experimentación han hecho que aún haya dudas sobre la aplicabilidad de estos métodos en la etapa de diseño. (Aranda, 2011).

Los trabajos de A. Veletsos e Y. Tang “Soil – Structure Interaction Effects for Laterally Excited Liquid – Storage Tanks” (1990) y de A. Veletsos et al. “Seismic Response of Anchored Steel Tanks” (1990), mostraron que tanques apoyados sobre suelos flexibles a través de plateas rígidas, experimentan traslaciones de la base y un mayor movimiento oscilante, con el resultado de periodos impulsivos mayores y por lo general mayor amortiguamiento efectivo, por lo que estos cambios pueden afectar la respuesta impulsiva de manera significativa. (Aranda, 2011).

La respuesta convectiva es, como ya se ha dicho, prácticamente insensible a la rigidez de la pared del tanque, así como a la flexibilidad del suelo que lo sustenta debido a su periodo largo de oscilación (Aranda, 2011).

Todos los tanques analizados en los estudios mencionados se supusieron completamente anclados en su base, ya que como se mencionó al inicio del capítulo, desde un inicio los estudios se hicieron sobre la base de tanques anclados y posteriores estudios como los mencionados también hicieron sus análisis y pruebas de laboratorio con elementos a escala bajo este considerando. También como ya se ha visto al inicio del capítulo, en la práctica un anclaje completo no siempre

es posible o lo suficientemente económico. Debido a ello, muchos tanques son o no anclados o solamente parcialmente anclados en su base. Es por esto que hay un efecto de levantamiento en la base al momento de la respuesta sísmica de tanques parcialmente anclados y no anclados soportados por una base rígida. (Aranda, 2011).

De acuerdo al trabajo de Praveen Malhotra y A. Veletsos “Seismic Response of Unanchored and Partially Anchored Liquid – Storage Tanks” (1995), se demostró que el levantamiento de la base del tanque reduce las fuerzas hidrodinámicas en el tanque pero aumenta de manera significativa los esfuerzos axiales de compresión en la pared del tanque que está en el lado opuesto a donde ocurre el levantamiento, lo cual es obvio, y que son los esfuerzos responsables de que se produzca la famosa falla de “Pata de Elefante”. (Aranda, 2011).

Esta falla se muestra en las siguientes 2 figuras, siendo una de ellas el esquema de falla mostrado en el Capítulo I y el otro una foto de un tanque que presentó dicha falla después de un sismo (Aranda, 2011).

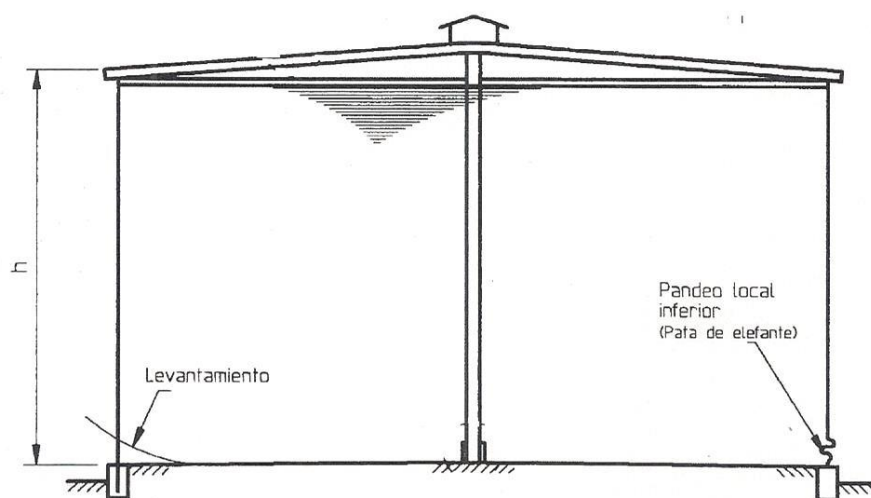


Figura N° 15. Instituto Nacional de Normalización – INN. “Norma Chilena Oficial NCh 2369.Of2003. Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales”. Primera Edición. Chile. 2003.

Estudios adicionales de P. Malhotra “Base Uplifting Analysis of Flexibly Supported Liquid – Storage Tanks” (1995) y “Seismic Response of Soil – Supported Unanchored Liquid – Storage Tanks” (1997) han mostrado que el levantamiento de la base de tanques soportados directamente sobre un suelo flexible lleva a un mayor levantamiento de los tanques, pero no lleva, como es de esperarse, a un aumento de esfuerzos compresivos axiales en la pared opuesta del tanque, aunque lógicamente conlleva a mayores penetraciones en el suelo de sustentación que pueden conllevar a problemas en las conexiones del sistema de tuberías con el tanque. (Aranda, 2011).

En tanques apoyados sobre bases rígidas (plateas de cimentación o anillos de concreto, siendo esto último lo típico) a medida que el momento de volteo y el levantamiento del tanque se incrementan, la longitud de arco de apoyo en el lado opuesto se reduce. Debido a ello los esfuerzos axiales de compresión aumentan, lo que es lógico y por ende generando mayores esfuerzos axiales de compresión en el primer anillo. Para tanques apoyados sobre una cimentación flexible (como puede ser el suelo directamente o una plancha de neopreno) cuando el momento de volteo y el levantamiento se incrementan, la longitud de arco de apoyo no se reduce como en el caso de estar el tanque apoyado sobre una sustentación rígida, sino que la reducción es mucho menor, y por ende, hay considerablemente menores esfuerzos axiales de compresión en comparación con la cimentación rígida. (Aranda, 2011).

Asimismo, para un mismo momento de volteo los tanques apoyados sobre cimentaciones flexibles experimentan mayores rotaciones en la base (lo cual es obvio), mayor levantamiento, y, por lo tanto, mayores penetraciones en el suelo de sustentación o lo que fuere la sustentación flexible. Asimismo, hay mayores rotaciones plásticas en el borde de la

plancha de base o fondo. Por ello tanques no anclados apoyados sobre bases flexibles son menos propensos a la falla de “Pata de Elefante” pero más propensos a asentamientos diferenciales y a roturas de fatiga en la unión del cilindro o pared del tanque con el fondo del tanque. (Aranda, 2011).

Finalmente se han hecho otros estudios y reportes importantes a los nombrados entre los que podemos citar los de R. Hanson “Behaviour of Liquid Storage Tanks” (1973); M. Haroun y G. Housner “Seismic Design of Liquid Storage Tanks” (1981); G. Manos y R. Clough “Further Study of the Earthquake Response of a Broad Cylindrical Liquid – Storage Tank Model” (1982); P. Malhotra, T. Wenk y M. Wieland “Simplified Procedure for Seismic Analysis of Liquid – Storage Tanks” (2000); R. Peek y P. Jennings “Simplified Analysis of Unanchored Tanks” (1988); y R. Wozniak y W. Mitchell “Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks” (1978); así como un documento muy importante publicado por la Lockheed Aircraft Corporation bajo el auspicio de la Comisión de Energía Atómica de los EE.UU.20 “Nuclear Reactors and Earthquakes” (1963) y que dentro del equipo de trabajo tuvo justamente también al ya mencionado G. Housner. Como se puede ver, estos tanques han sido sometidos a muchos estudios. (Aranda, 2011).

Los tanques circulares apoyados sobre el suelo tienen, al igual que cualquier otra estructura, un período fundamental de vibración; sin embargo, por ser la carga lateral sísmica que soportan debido principalmente a la inercia que genera el peso del fluido líquido que contienen en su interior, tienen sus modos de vibración particularidades en relación a los de estructuras comunes como pueden ser edificios. En edificios por lo general el primer modo o modo fundamental es el que

tiene la mayor participación o importancia en la respuesta total del edificio contribuyendo con la mayor masa traslacional equivalente, así como ser el modo de más alto período (más baja frecuencia). Los subsiguientes modos o modos superiores van teniendo cada vez menor participación en la masa traslacional y menor periodo. (Aranda, 2011).

En el caso de tanques, ya sean circulares o de forma rectangular (que no serán tratados acá), las teorías y sus normas derivadas de ellas consideran que un tanque conteniendo fluido líquido en su interior tiene 2 modos de vibración fundamentales. Por un lado, tenemos, como ya se ha mencionado, el Modo Impulsivo de Vibración, asociado al líquido impulsivo y en la cual una porción del líquido vibra al unísono con la estructura, es decir, una parte que se mueve rígidamente con el tanque y que es la parte de la carga lateral sísmica que se considera debido a la inercia del tanque y una porción del líquido. Por el otro lado tenemos el Modo Convectivo de Vibración asociado al líquido convectivo que es debido al oleaje en la superficie libre del líquido contenido en el tanque. (Aranda, 2011).

Estos modos generan a su vez una presión adicional del fluido sobre las paredes del tanque llamada Presión Hidrodinámica debido a la acción lateral de la carga sísmica y que dependen del radio r del tanque, la altura h del líquido en el tanque y finalmente de la relación de esbeltez h/r . Esta relación de esbeltez también se presenta en la diversa literatura técnica como la relación diámetro/altura D/H , donde H es también la altura del líquido en el tanque. Usaremos en este trabajo la relación de esbeltez D/H en mayúsculas, por ser la manera como lo presenta el API 650. (Aranda, 2011).

Según Aranda (2011) Estas fuerzas hidrodinámicas que se generan en la parte interior del cilindro o paredes del tanque tienen una forma

parabólica en vez de la forma triangular como es lo típico bajo condiciones estáticas según se muestra en la siguiente figura para diferentes relaciones de esbeltez de un tanque:

Para la mayoría de tanques con relaciones de esbeltez de $3 < H/R < 0.3$ o $0.67 < D/H < 6.67$, el primer modo impulsivo y el primer modo convectivo son juntos responsables para el 85% al 98% de toda la carga sísmica que genera el fluido líquido en el tanque. El resto de la masa del líquido del tanque vibra básicamente en modos impulsivos superiores para tanques altos o esbeltos ($H/R > 1$ o $D/H < 2$) o modos convectivos superiores para tanques anchos o poco esbeltos ($H/R \leq 1$ o $D/H \geq 2$). Es por ello que las normas dan fórmulas con las que se calcula solamente el primer modo impulsivo y el primer modo convectivo y que incluyen algunos pequeños ajustes para tomar en cuenta toda la masa del líquido. (Aranda, 2011).

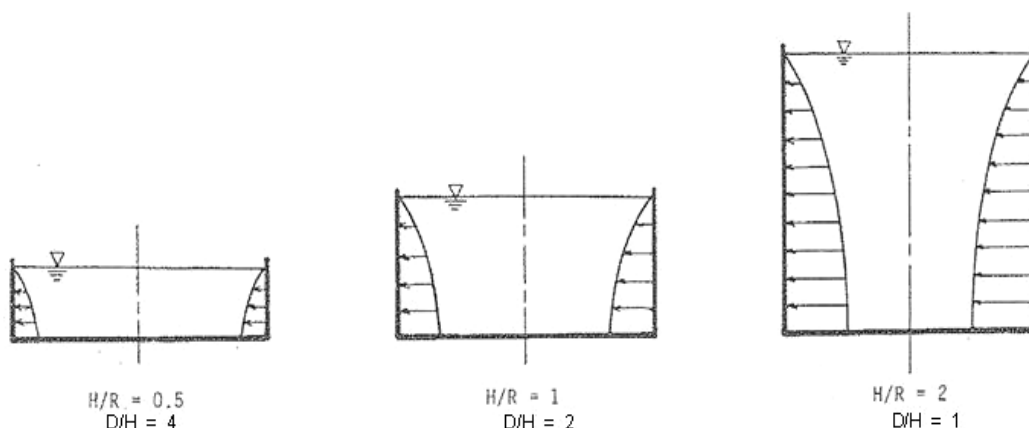


Figura N° 16. Veletsos, A.S. “Seismic response and design of liquid storage tanks”, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, ASCE. New York. Pp. 255-370. Estados Unidos de Norteamérica. 1984.

En la Figura 17 y 18 se representa la distribución presiones impulsivas y convectivas respectivamente, incluyendo la resultante de éstas:

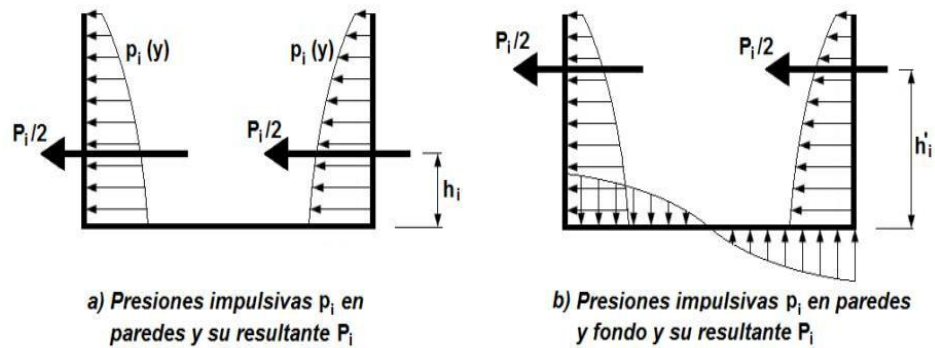


Figura N° 17. Presiones impulsivas y resultantes
Fuente: Diaz del Valle 2013

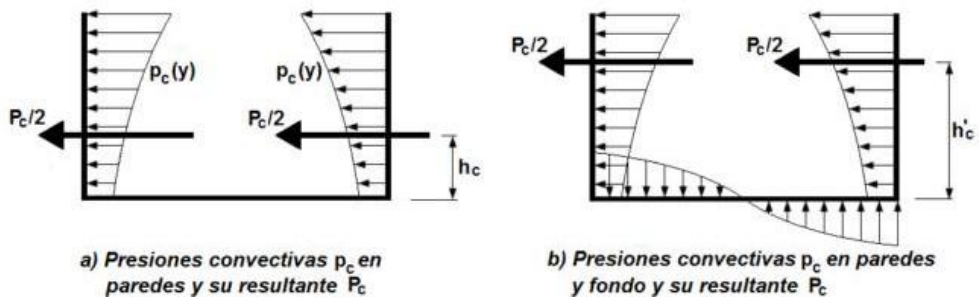


Figura N° 18. Presiones convectivas y resultantes
Fuente: Diaz del Valle 2013

Así como en el caso de un edificio que tiene sus modos de vibración a través de su altura vertical, un tanque también tiene los mismos modos en la dirección vertical a través de la pared del tanque, además de los mencionados modos impulsivo y convectivo. Por ejemplo, en la siguiente figura se muestra un edificio de 5 pisos ya idealizado con sus 5 puntos de masa concentrada y considerando solamente en cada masa concentrada un grado de libertad en la dirección de traslación horizontal. Esta estructura así idealizada tiene los siguientes modos de vibración, donde solo se muestran, los 3 primeros (los otros 2 para completar los 5 modos de vibración, uno por cada grado de libertad, no se muestran). (Aranda, 2011).

Según Aranda (2011), El cilindro de un tanque tiene los mismos 3 primeros modos en la dirección vertical de su cilindro o pared del tanque

como los mostrados en la siguiente figura. Además de estos modos, tiene también como se muestra en la misma figura otros modos de vibración en planta, mostrándose los 4 primeros modos. Los 3 modos verticales mostrados corresponden al patrón nodal vertical y los 4 modos en planta mostrados corresponden al patrón nodal circunferencial y son llamados genéricamente Modos de Vibración de la Cáscara. Se ha comprobado que solamente el primer modo en cada caso es excitado de manera relevante y son los responsables para el modo y vibración impulsiva del tanque y es con estos modos en que la parte impulsiva del líquido del tanque se considera que se mueve rígidamente como una sola masa.

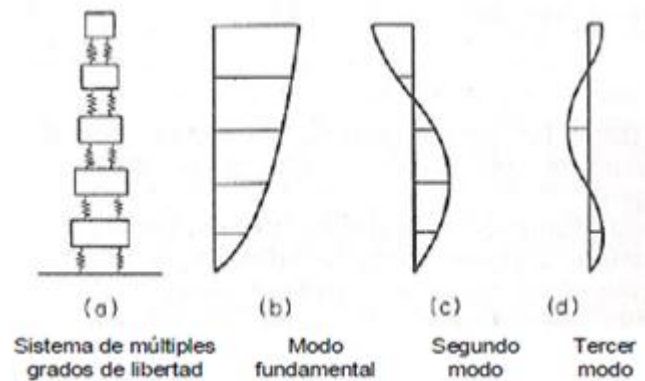
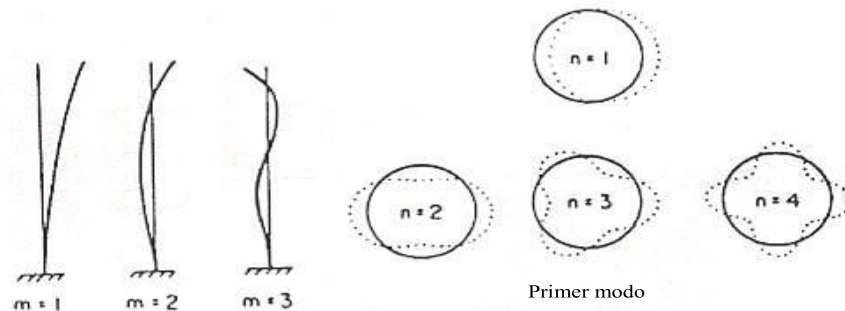


Figura N° 19. Modos de vibración dirección vertical tanques cilíndricos.
Fuente: Gaylord, Jr. Edwin y Gaylord, Charles, “Structural Engineering Handbook”. McGraw – Hill Book Company. Segunda Edición. Estados Unidos de Norteamérica. 1979

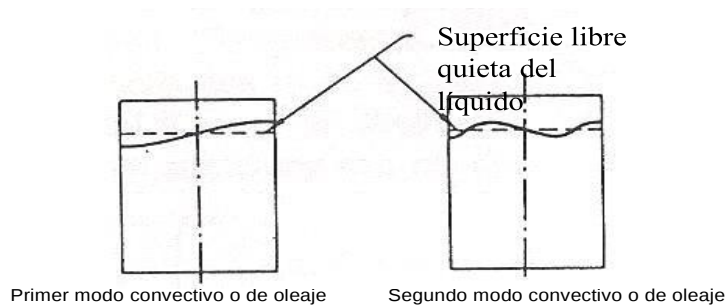


Modos superiores

Figura N° 20. Modos de vibración de la cáscara o cilindro

Fuente: Housner, George y Haroun, Medhat. "Dynamic Characteristics of Liquid Storage Tanks". Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 108, N° EM5. Estados Unidos de Norteamérica. Octubre 1982.

En la figura que sigue se muestran los 2 primeros modos de vibración del modo convectivo o formas de oleaje que son modos de vibración de baja frecuencia o alto periodo. También como ya se ha manifestado, es el primer modo el que tiene una mucha mayor participación respecto a los otros, que es el único que se considera. (Aranda, 2011)

**Figura N° 21.** Modos convectivos o de oleaje en tanques rígidos

Fuente: Housner, George y Haroun, Medhat. "Dynamic Characteristics of Liquid Storage Tanks". Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 108, N° EM5. Estados Unidos de Norteamérica. Octubre 1982.

Según Aranda (2011) Hoy en día las normas sobre el tema como el API 650 consideran básicamente lo siguiente en sus ecuaciones para el cálculo sísmico de estos tanques:

Se supone las paredes del tanque rígidas y su base fija al suelo que lo apoya, por lo que la velocidad del fluido, la velocidad de la pared del

tanque y la velocidad del fondo del tanque se suponen iguales; es decir, hay compatibilidad de aceleraciones, velocidades y desplazamientos para la parte impulsiva del líquido. Si bien en el cálculo del modo convectivo también se parte de los mismos supuestos, es decir, rigidez de las paredes y el empotramiento de la base, las diferencias en cuanto a rigidez o flexibilidad como hemos visto de estos supuestos no son relevantes para el modo convectivo como si lo son para el modo impulsivo (Aranda, 2011).

Como ya se ha indicado, la respuesta impulsiva a la excitación sísmica puede ser bastante mayor para tanques de paredes flexibles como son estos tanques de acero para almacenamiento de hidrocarburos; sin embargo, se ha concluido que las fuerzas impulsivas en un tanque deformable pueden ser estimadas razonablemente de la solución para un tanque similar rígido aplicando ciertas correcciones que vienen implícitas en las ecuaciones que presenta el API 650 y otros códigos de diseño similares como el AWWA D100 para el diseño de tanques de acero iguales a éstos, solamente que para almacenamiento de agua. (Aranda, 2011).

La aplicación de las actuales teorías, hacen el cálculo de tanques de paredes flexibles mediante estas teorías un asunto complicado y que va contra el principio fundamental de la ingeniería que es el de desarrollar herramientas que nos permitan hacer diseños prácticos, simples, rápidos y con la suficiente precisión. (Aranda, 2011).

El modelo de amortiguamiento de un tanque de paredes flexibles o deformables tiene la forma de:

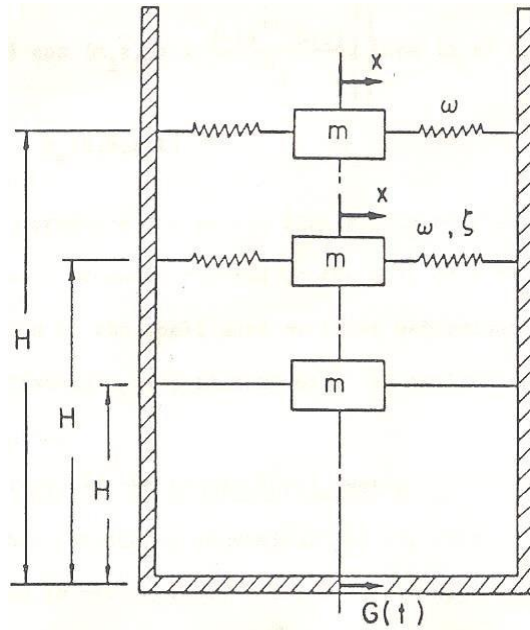


Figura N° 22. Housner, George y Haroun, Medhat. “Seismic Design of Liquid Storage Tanks”. Journal of Technical Councils ASCE. Vol. 107, N°1, pp. 191 – 207. Estados Unidos de Norteamérica. 1981.

El modelo de amortiguamiento de un tanque de paredes flexibles o deformables tiene la forma de:

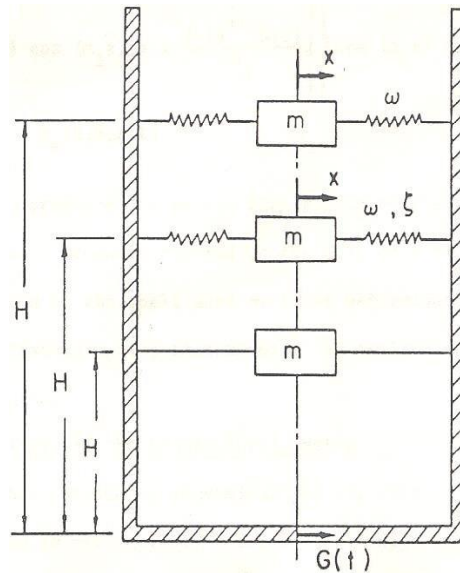


Figura N° 23. Housner, George y Haroun, Medhat. “Seismic Design of Liquid Storage Tanks”. Journal of Technical Councils ASCE. Vol. 107, N°1, pp. 191 – 207. Estados Unidos de Norteamérica. 1981.

En este modelo se ve a las masas y sus puntos de aplicación que contribuyen a la presión hidrodinámica debido a un movimiento del terreno como son la Masa Convectiva m_c que genera el oleaje en la superficie del tanque y la cual tiene un componente de periodo largo; la Masa Impulsiva m_i que varía de manera sincronizada con la aceleración horizontal y que corresponde a la fuerza asociada a movimiento del terreno y la cual tiene un componente de periodo corto; y la masa de la pared o cilindro del tanque m_p que contribuye con la vibración de la pared del tanque y que corresponde a la fuerza de la deformación del cilindro en relación al terreno. (Aranda, 2011)

En un tanque rígido, solamente se consideran las 2 primeras masas de tal manera que la respuesta dinámica depende básicamente del líquido contenido en el tanque. Por otro lado, se considera que toda la estructura del tanque se mueve finalmente rígidamente con la parte impulsiva del líquido del tanque, experimentando la misma aceleración y el mismo amortiguamiento, pero considerando el punto de aplicación de la carga lateral sísmica debido a la inercia del mismo de acuerdo a los principios fundamentales de la estática. Por ello es distinto al punto de aplicación de la carga lateral del líquido impulsivo. Es decir, salvo por el punto de aplicación, el cilindro y en general la estructura de acero del tanque es parte de la respuesta impulsiva, aunque, como ya se ha manifestado, esta carga es mínima ya que el peso de la estructura del tanque en el caso de los tanques de acero es de alrededor del 2 a 3% respecto al peso total del fluido y de alrededor de 3 a 5% respecto a la parte del peso impulsivo del fluido. Estos valores son variables y dependen del peso de la parte impulsiva y que es variable de acuerdo a la esbeltez D/H del tanque, así como del tamaño del tanque. Tanques grandes en relación a la cantidad de fluido que almacenan no pesan tanto porcentualmente hablando. (Aranda, 2011)

El modo impulsivo es de periodo corto y de acuerdo a la norma norteamericana API 650 se le considera con un amortiguamiento del 5% del crítico. La norma chilena NCh 2369, en Chile a raíz de los grandes terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960; siendo el del 22 de mayo el famoso terremoto de $MW = 9.5$, el sismo más fuerte registrado hasta ahora en el mundo. (Aranda, 2011)

La práctica chilena de diseño sísmico de industrias, como lo es este tipo de tanques, se basa en el espectro empírico de respuesta elástica propuesto por Blume en 1963 en su trabajo “A Structural Dynamic Analysis of Steel Plant Structures Subjected to the May 1960 Chilean Earthquakes”, después de analizar 16 estructuras de la Planta de Acero de Huachipato. Las estructuras eran en general chimeneas de acero, tanques de péndulo invertido y recipientes de proceso. Siete de las estructuras no tuvieron daños en los terremotos y, los nueve restantes experimentaron fallas simples como por ejemplo estiramiento de pernos de anclaje y pandeo del cilindro. La Planta de Acero de Huachipato, principal siderúrgica de Chile, está ubicada en Talcahuano, distrito de la costera ciudad de Concepción, es decir que estuvo a unos 80 km al norte de los epicentros de los 2 sismos de $M = 7.2$ del 21 y 22 de mayo de 1960 y a unos 325 km al norte del epicentro del Gran Sismo de Chile de $M = 9.5$ del 22 de mayo de 1960, pero cuya ruptura llegó aproximadamente hasta Lebu, a unos 100 km al sur de Concepción (Aranda, 2011).

Sin embargo, la misma norma chilena NCh 2369 indica los valores máximos a tomar para la aceleración del modo impulsivo para este tipo de tanques, ya que, si se hace el cálculo con la fórmula que describe el espectro chileno para un amortiguamiento de 2% del crítico, se tendría un aumento de la carga sísmica de 44% respecto a un amortiguamiento del 5%, lo cual puede arrojar aceleraciones excesivas. (Aranda, 2011)

Por otro lado, el modo convectivo que genera el oleaje (“sloshing”) en la superficie libre del líquido en el tanque, es de un periodo bastante largo, sobre todo si se le compara con el período impulsivo, y de acuerdo a la práctica norteamericana se le considera con un amortiguamiento del 0.5%. En este caso la norma NCh 2369 toma el mismo valor.

Mediante el modelo presentado del tanque las respuestas sísmicas del tanque como son el cortante basal, el momento de volteo y la altura del oleaje en la superficie libre del líquido, son calculados usando el espectro de respuesta con su respectivo amortiguamiento. Usando los mismos conceptos de sistemas de oscilación de un grado de libertad como el usado para edificios u otro tipo de estructura, en estos tanques el modo impulsivo y el modo convectivo representa cada uno un sistema de oscilación con su respectivo período de oscilación independiente como si se tratara de un sistema de un grado de libertad, los cuales son calculados de manera separada y luego combinados convenientemente para obtener el cortante basal total y el momento de volteo total. (Aranda, 2011)

Tradicionalmente los códigos de diseño norteamericanos de tanques de acero apoyados sobre el suelo consideraban la suma directa de las fuerzas sísmicas generadas por el modo impulsivo y el convectivo; sin embargo, hoy en día han tomado el método, usado también en edificios para sumar la participación de los distintos modos representativos, de la “Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados” (RCSC), para combinar los componentes impulsivo y convectivo. Un modelo para este cambio fue la norma neozelandesa NZS 3106 y su experiencia, ya que esa norma lo viene haciendo de esa manera desde hace varios años. (Aranda, 2011)

La razón para este cambio en la normativa norteamericana, es que los períodos impulsivos y convectivos están por lo general sumamente

separados, siendo el período impulsivo mucho más corto que el convectivo (alrededor de 0.10 a 0.3 segundos contra 4 a 8 segundos, dependiendo de la relación de esbeltez D/H del tanque). (Aranda, 2011)

Al estar las respuestas sumamente separadas, la ocurrencia de simultaneidad cercana de valores pico podría ocurrir. Sin embargo, la respuesta convectiva se demora mucho más en desarrollarse que la respuesta impulsiva, por lo que el componente impulsivo ya se encuentra por lo general en su fase de decaimiento para cuando el componente convectivo alcanza su máximo. Si bien con la combinación modal de la RCSC no se obtiene la carga más crítica, si se obtiene la carga más probable en relación a la suma directa de los modos. Además, debemos tomar en cuenta que diferentes partes del espectro de respuesta no son controlados por el mismo evento sísmico. Los valores espectrales de período corto, que determinan la respuesta impulsiva, son controlados por sismos de fuente cercana, los valores espectrales de periodo largo, que determinan la respuesta convectiva, son controlados por grandes sismos de fuente lejana. Por ello hay ya un cierto grado de conservadurismo inherente al supuesto de que las respuestas impulsivas y convectivas ocurrirán simultáneamente. (Aranda, 2011)

Aranda (2011), presenta las siguientes gráficas que permiten visualizar mejor algunos conceptos:

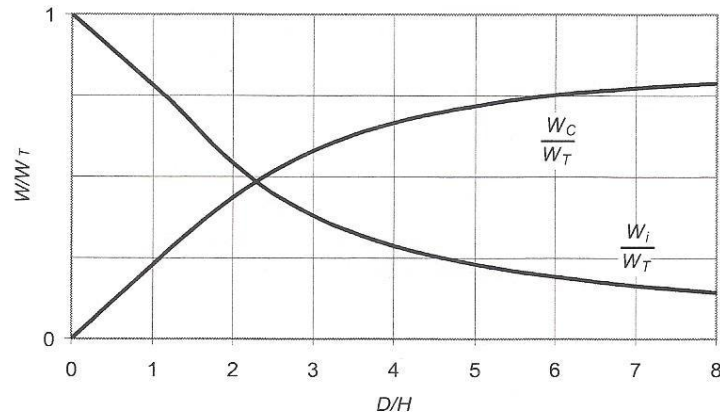


Figura N° 24. Participación de masa efectiva impulsiva y convectiva.

Fuente: American Petroleum Institute. “API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage”. American Petroleum Institute. Decimoprimer edición, Adenda 2. Estados Unidos de Norteamérica. Noviembre 2009.

En la figura anterior se observa que mientras más esbelto es un tanque (D/H menor), la participación de la masa efectiva impulsiva W_i , crece en relación a la masa total W_T y la masa efectiva convectiva W_C decrece. Por otro lado, mientras menos esbelto el tanque (D/H mayor), ocurre lo contrario, la masa impulsiva W_i decrece y la masa convectiva W_C crece.

Es por ello que mientras menos esbelto un tanque (D/H mayor), más estable va a ser ante una acción lateral, no solamente por lo que se pueda intuitivamente y racionalmente suponer por la forma más baja y ancha del tanque, por ende más estable ante cargas laterales, sino debido a que el modo convectivo, que adquiere mayor relevancia mientras menos esbelto es el tanque, no tiene mayor fuerza lateral debido a su poca excitación durante un sismo debido a su gran periodo natural.

Este periodo convectivo largo no es excitado por las ondas de periodo corto típicas asociadas a las grandes aceleraciones del terreno, donde por el espectro de respuesta de aceleraciones típico la carga sísmica es mucho menor para periodos largos que para periodos cortos.

El espectro que se muestra en la figura a continuación, es típico en las costas de nuestro país, Chile y otros países sudamericanos, debido a la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana (Aranda, 2011).

Un diagrama genérico de distintos espectros de respuesta de aceleraciones y su envolvente, conocida como Espectro de Diseño, es mostrada en la siguiente figura y que es válida para el Perú, California o Chile, salvo condiciones extraordinarias de geología y suelos, observándose en la misma lo que se acaba de manifestar, que para periodos largos la respuesta sísmica de una masa con ese periodo natural es pequeña (Aranda, 2011).

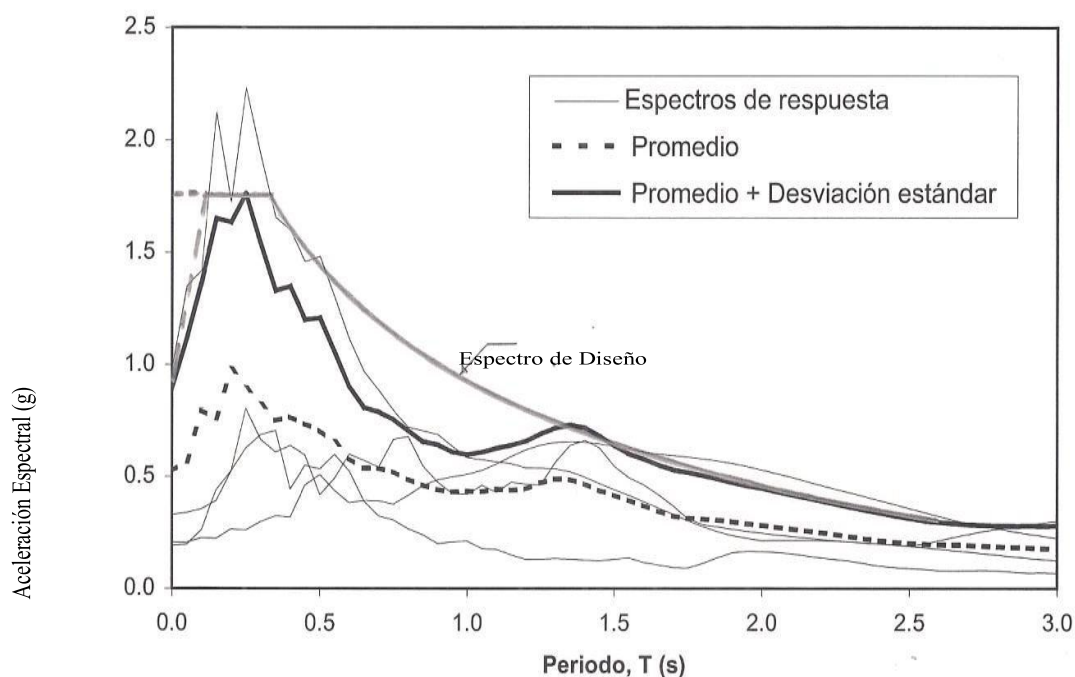


Figura N° 25. Crisafulli, Francisco y Villafañe, Elbio. “Espectros de Respuesta y de Diseño”. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Argentina. 2002.

Fuente: (Aranda, 2011)

Es por ello que a pesar de invertirse las masas relativas (la convectiva pasa a ser el doble de la impulsiva lo que para relaciones de esbeltez D/H bajas es al revés), por la baja aceleración que experimenta la masa convectiva la aceleración global lateral que experimenta el fluido del tanque cae.

A partir de $D/H = 3$, la caída de la participación de la masa impulsiva comienza a decrecer más lentamente, al igual que la convectiva sigue creciendo, pero a un menor ritmo. A medida que la relación D/H aumenta, la probabilidad de que un tanque sufra problemas producidos por el levantamiento de uno de sus lados es cada vez menor ya que la participación de la masa impulsiva en la respuesta sísmica del tanque se va reduciendo.

Esquemáticamente el volteo de un tanque es de según lo mostrado en la siguiente figura (Aranda, 2011).

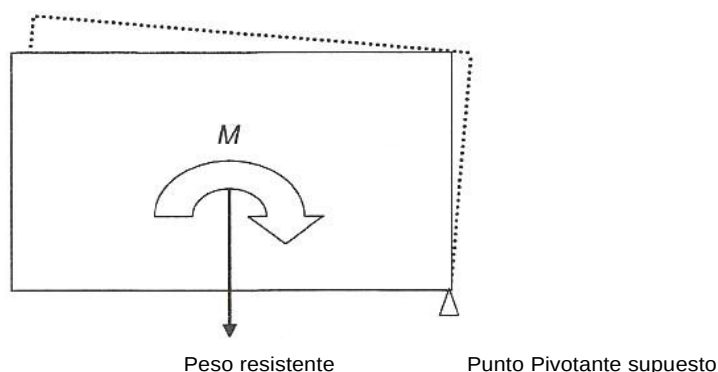


Figura N° 26. American Petroleum Institute. “API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage”. American Petroleum Institute. Decimoprimer edición, Adenda 2. Estados Unidos de Norteamérica. Noviembre 2009.

De este esquema se ve que el brazo de palanca del momento resistente al volteo es debido al ancho o diámetro D del tanque, por ello un tanque “ancho” presenta una mayor estabilidad.

Sin embargo, hay una variable que falta considerar en nuestro análisis previo, que es el punto de aplicación de la aceleración lateral de las masas impulsivas y convectivas los que son finalmente el brazo de palanca en el momento de volteo.

En la siguiente figura se puede apreciar los puntos de aplicación que experimenta la masa de fluido convectiva e impulsiva en función al grado de esbeltez del tanque. X_2 representa la altura de aplicación de la fuerza convectiva y X_1 representa la altura de aplicación de la fuerza impulsiva; en ambos casos en relación a la altura total del fluido H dentro del tanque.

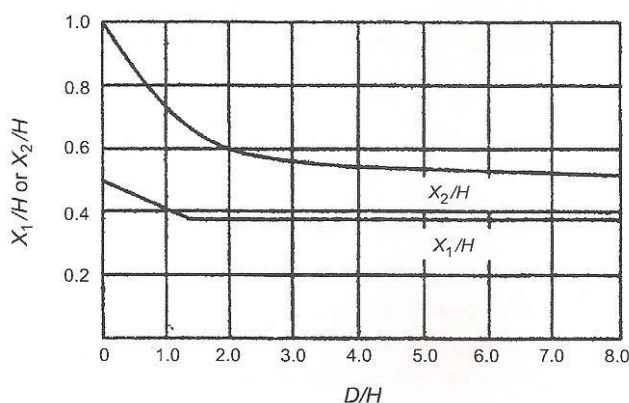


Figura N° 27. American Petroleum Institute. “API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage”. American Petroleum Institute. Decimoprimer edición, Adenda 2. Estados Unidos de Norteamérica. Noviembre 2009.
Fuente: Arana (2011)

Obviamente el punto de aplicación de la carga lateral es más arriba en el caso convectivo que en el impulsivo; sin embargo, a medida que la relación de esbeltez D/H crece (es decir el tanque se vuelve menos esbelto o más “ancho”), los puntos de aplicación también decrecen haciendo el tanque más estable. A partir de una relación $D/H > 1.5$, el punto de aplicación de la carga lateral de la masa impulsiva se mantiene

constante, mientras que para el caso de la carga convectiva asociada al modo convectivo, el punto de aplicación de esa carga sigue en descenso, aminorándose el mismo a partir de $D/H = 2$ y a partir de una relación $D/H > 3$, el punto de aplicación sigue cayendo, pero de manera más lenta todavía.

De las figuras anteriores que relacionan W/W_T y X_i/H con D/H , se puede apreciar que a medida que el tanque se vuelve menos esbelto (D/H mayor) hay 2 factores que contribuyen a su estabilidad: la masa efectiva impulsiva contribuyente decrece y al mismo tiempo el centro de gravedad donde esa carga impulsiva actúa debido a la inercia del fluido contenido en el tanque también decrece, haciendo en ambos casos un tanque mucho más estable. Si bien por otro lado la masa efectiva convectiva contribuyente al volteo crece, la cual a su vez también tiene un mayor brazo de palanca contribuyente al momento de volteo, la aceleración sísmica que sufre la misma es bastante menor a la excitación sísmica que sufre la masa impulsiva, por lo que globalmente la acción sísmica con la generación de cargas laterales inerciales sobre el tanque que generan el momento de volteo decrece (Aranda, 2011).

Sin embargo, esto que es evidente al analizar un espectro de respuesta no es necesariamente tan cierto, ya que depende de la aceleración impulsiva y convectiva que le asigne un determinado código de diseño a un tanque de estas características. Así por ejemplo la normativa norteamericana le asigna un valor mayor a la aceleración convectiva AC que la normativa chilena por lo que en el caso de aplicar la normativa norteamericana sobre el tema, las cargas convectivas pueden ser muy importantes, cosa que no ocurre con la normativa chilena. Por otro lado, los chilenos le asignan en general una mayor aceleración impulsiva a estos tanques que la normativa norteamericana. Esto lo veremos en detalle en los capítulos VII, VIII y en las Conclusiones y

Recomendaciones. Por ello tanques con relaciones de esbeltez $D/H = 4$ pueden presentar problemas de levantamiento en caso la aceleración convectiva asignada por el respectivo código de diseño sea no tan despreciable (Aranda, 2011).

Para relaciones de esbeltez $D/H > 3.5$, el producto del brazo de palanca convectivo por la masa convectiva (es decir, el momento de volteo convectivo) es aproximadamente 3 veces mayor momento impulsivo; es acá donde la asignación de las aceleraciones impulsivas y convectivas son determinantes. Mientras la normativa norteamericana considera en promedio la aceleración impulsiva 3 veces mayor a la aceleración convectiva (por lo que la diferencia entre el momento de volteo convectivo e impulsivo desaparecen), la normativa chilena considera la aceleración impulsiva 7 veces mayor (Aranda, 2011).

Además, hay otro punto muy importante e interesante que ha sido tangencialmente tocado al inicio de este capítulo y que nos lleva a una observación muy interesante. Para relaciones de esbeltez D/H similares, pueden presentarse problemas mayores o menores en volteos o levantamientos de un tanque. Esto debido a que relaciones de esbeltez similares no implican masas similares que se aceleran. Si bien la relación entre las masas convectivas e impulsivas que se aceleran se mantienen similares, finalmente en un caso se puede tratar de masas mucho más grandes (tanque de mayores dimensiones) y debido a ello hay un mayor momento de volteo que es en parte contrarrestado mas no compensado en su totalidad por un mayor peso estabilizante y un mayor brazo de palanca “D” debido al diámetro del tanque que contrarresta ese volteo. Esto también se verá en detalle al final de este trabajo. (Aranda, 2011)

Según Aranda (2011), como corolario presenta los casos reales de 2 tanques que fallaron en la Refinería de Concón en el sismo del 3 de marzo de 1985 en Valparaíso, Chile ($MW = 7.8$). De acuerdo a la investigación de Ríos (1989), los tanques más afectados fueron en

general tanques chicos, y los que fallaron fueron 2 tanques que tenían un diámetro de 10 metros por una altura de 10 metros. Si suponemos esa altura como la altura de llenado del líquido, entonces estamos hablando de una relación de esbeltez $D/H = 131$, lo cual los hace ser considerados como tanques sumamente esbeltos. Además, esa relación de esbeltez hace que la masa efectiva impulsiva sea aproximadamente 75% de toda la masa del tanque de acuerdo a la figura 28, por lo que las cargas laterales a las que estuvieron sometidos esos tanques fueron muy fuertes. Así lo que se reportó en ese terremoto de acuerdo a Ríos (1989) fue lo siguiente:

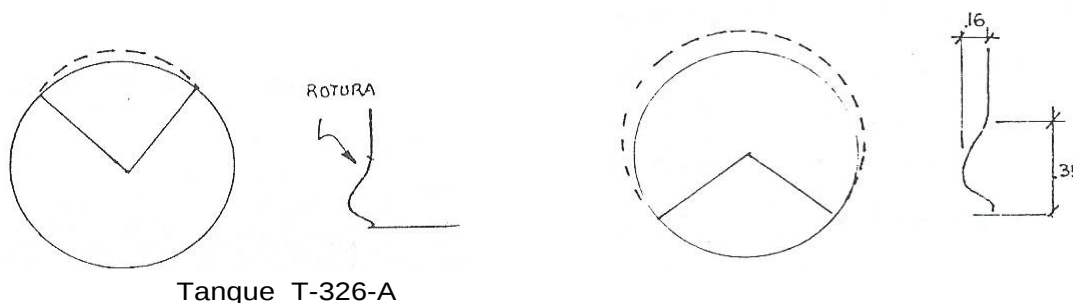


Figura N° 28. Ríos, Ana. “Diseño de Tanques Metálicos para Almacenamiento de Petróleo”. Tesis para Optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. 1989. Perú.

Fuente: Aranda (2011)

El tanque signado como T-326-A, vemos que tuvo un pandeo en el primer anillo o “pata de elefante” de aproximadamente 1/4 de circunferencia, mientras que el otro tanque tuvo la formación de la “pata de elefante” en 3/4 de circunferencia. Debido a ello es que seguramente el tanque T-326-A estuvo sometido a mayores esfuerzos de compresión, generando hasta una rotura en la plancha, falla que no llegó a ocurrir en el otro tanque donde la deformación plástica del anillo

no llegó hasta la rotura. Sin embargo, si se ve la foto que se muestra a continuación que es precisamente el tanque T-326-A, la rotura es muy extraña, como que algo hubiese punzonado a la plancha desde el interior del tanque. Tal vez pueda haberse debido a una falla en sí en la fabricación de la plancha de acero. Asimismo, se ve en la otra vista que el pandeo del primer anillo ha sido tal que hasta ha doblado los pasos de la escalera que se usa para subir a los techos de los tanques. Como muestra adicional de la dimensión del pandeo se ve claramente la pierna de una persona apoyada sobre el primer escalón.

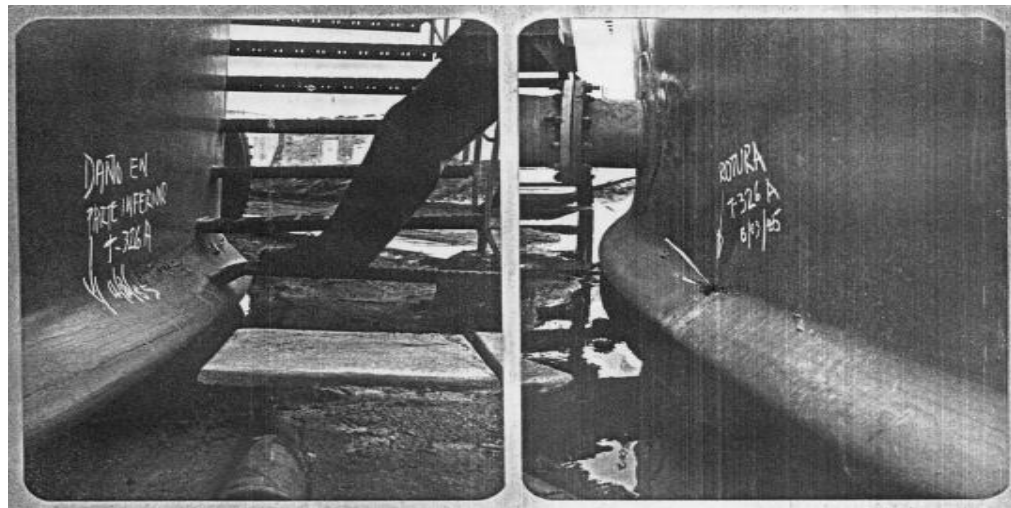


Figura N° 29. Pandeo de pared de tanque. Fuente de origen: Ríos, Ana. “Diseño de Tanques Metálicos para Almacenamiento de Petróleo”. Tesis para Optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. 1989. Perú.

Fuente: Aranda (2011)



Figura N° 30. Pandeo de pared “pata de elefante”
Fuente: Diaz del Valle 2013

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

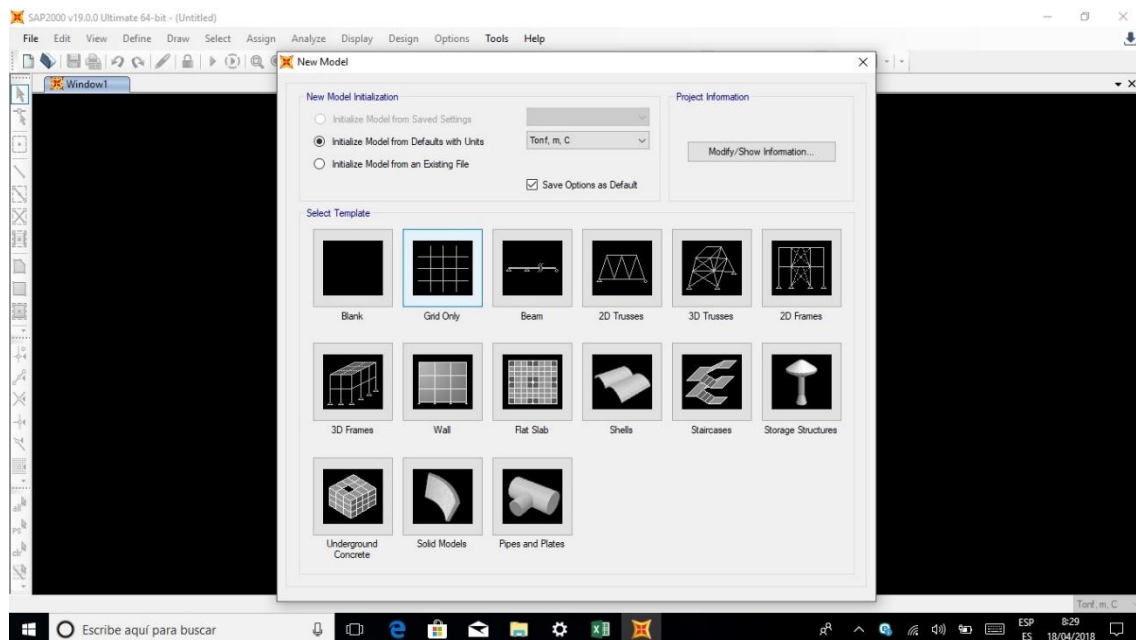
- La geometría del tanque, propiedades físicas y mecánicas de las planchas de acero y otros elementos estructurales se obtuvieron del expediente técnico: “Montaje e interconexión de 2 tanques de 40MB en refinería de Iquitos” que son tanques apoyados en su base, fijada a una cimentación rígida.
- Como densidad del fluido se utilizó el valor de 870 kg/m³, equivalente a la densidad del petróleo que ocupara el tanque.
- Para el modelamiento se utilizó el programa SAP 2000 Versión v19.00 ultimate 64-bit bajo la filosofía del ASCE, utilizando como herramienta numérica principal el método de elementos finitos.

3.2 METODOLOGÍA

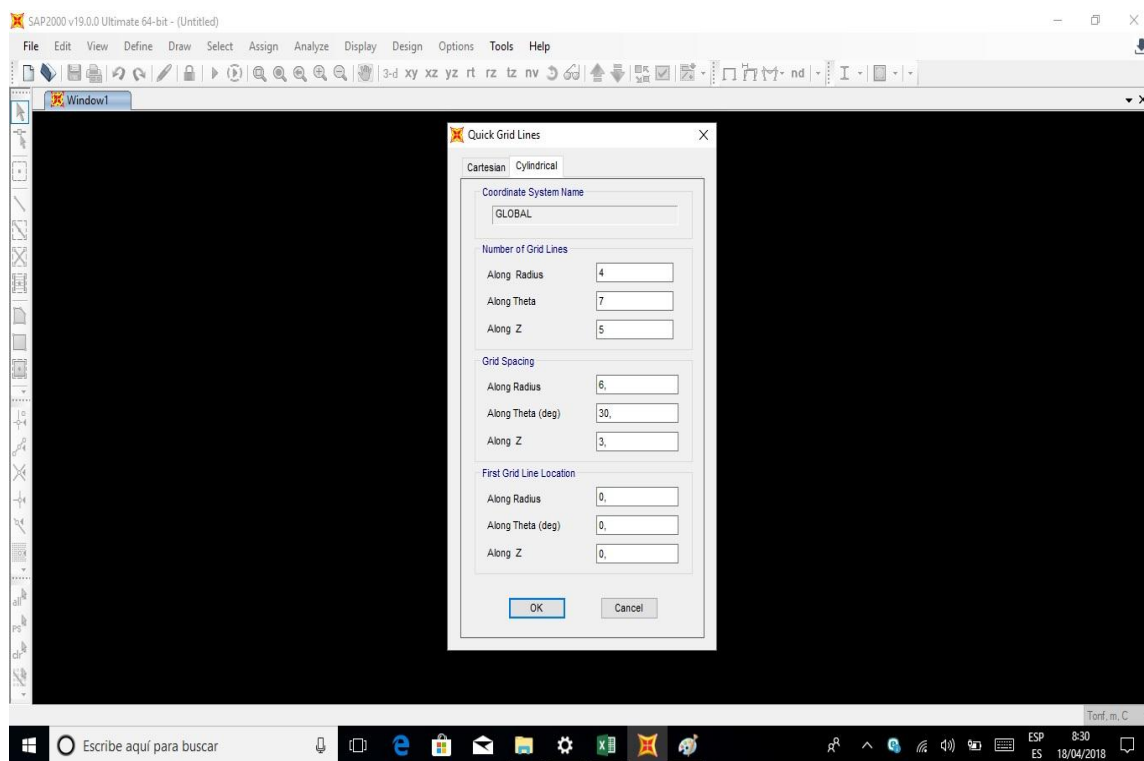
La metodología de investigación de esta tesis para alcanzar los objetivos y probar la hipótesis planteada tiene la secuencia indicada a continuación:

- Revisión de artículos de revistas científicas, tesis adecuadas para el desarrollo del fundamento teórico de la tesis.
- Medición en campo para generación de base de datos.
- Procesamiento de datos, mediante algoritmos desarrollados para la presente tesis.
- Validación del modelo.

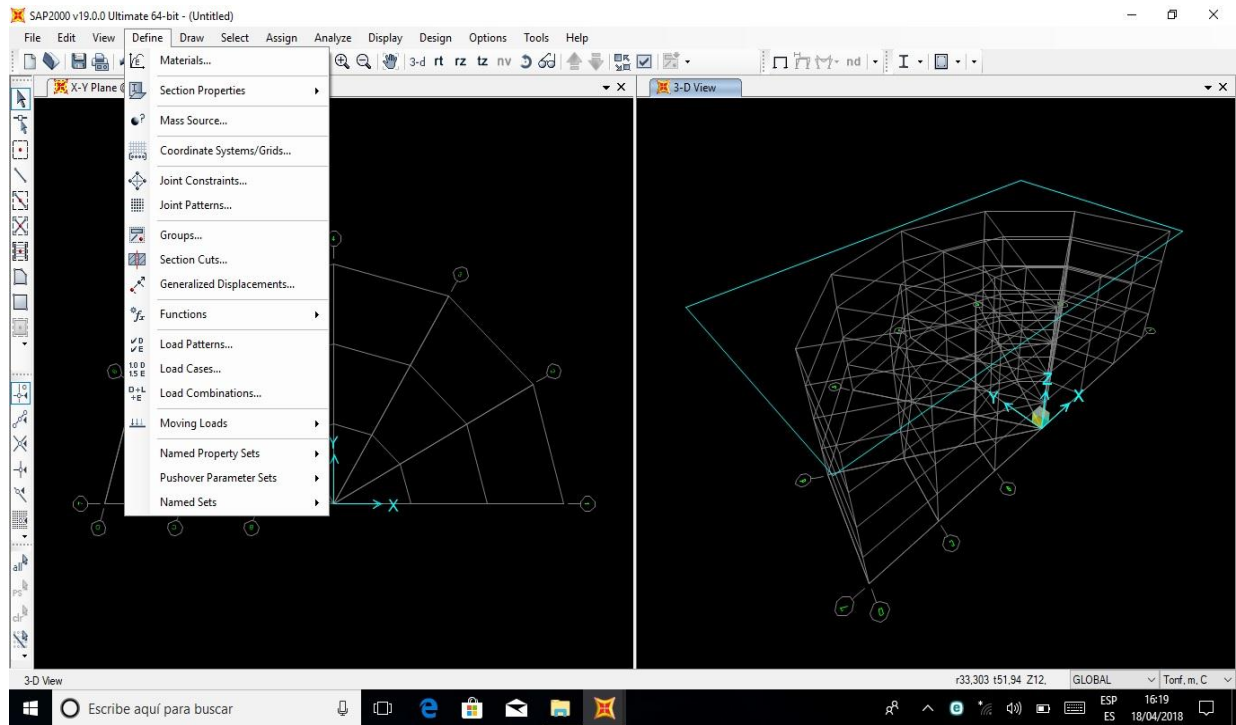
3.2.1 MODELAMIENTO DEL TANQUE DE 40MB EN SAP 2000



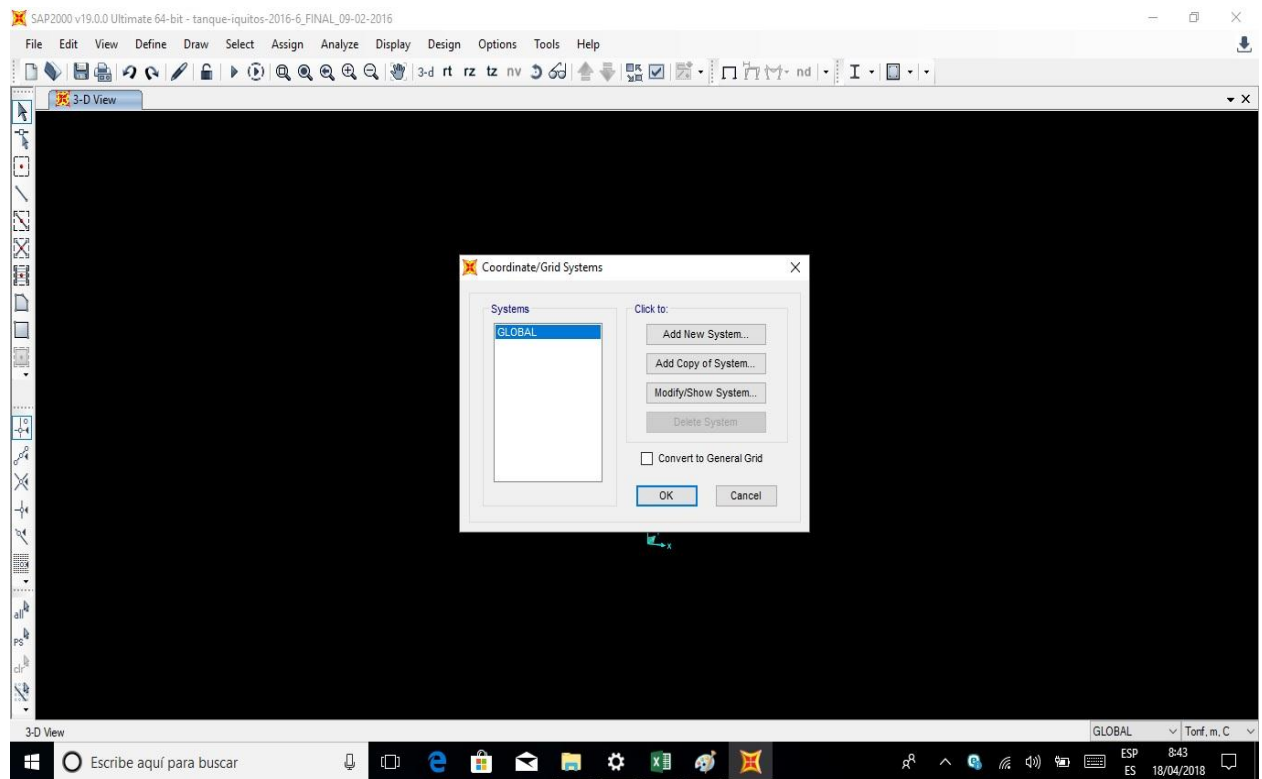
- **Figura N° 31.** La siguiente imagen muestra el inicio de la ejecución del procedimiento del Tanque, en el cual se elegirá el modelo deseado para el diseño del mismo.



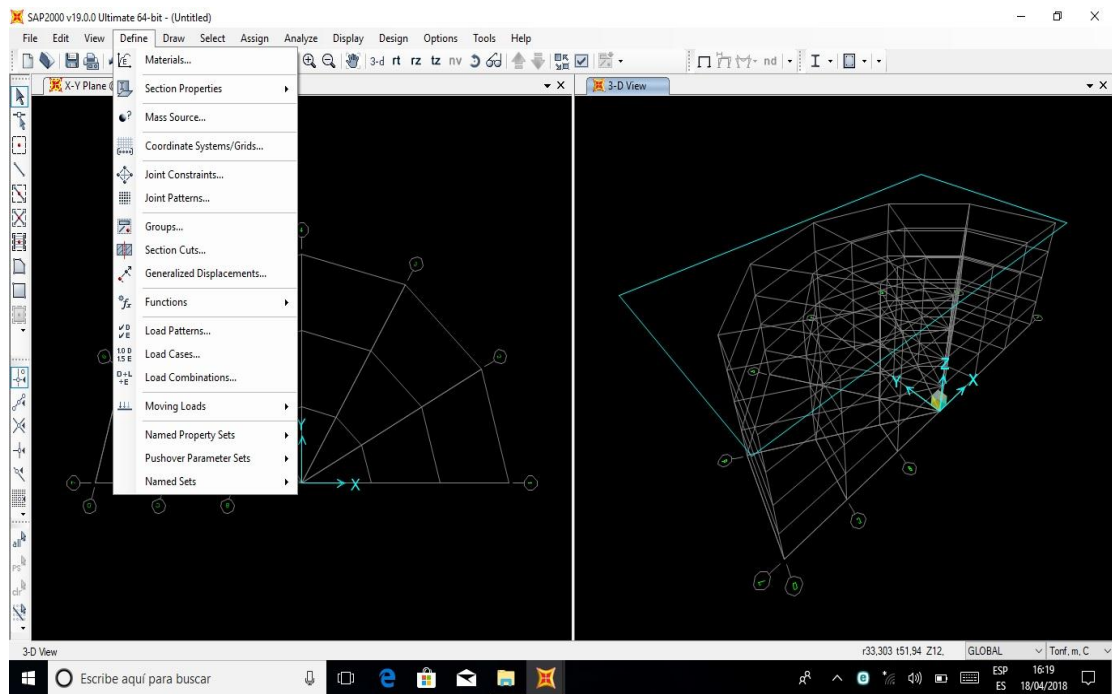
- **Figura N° 32.** El siguiente pantallazo muestra las grillas por defecto, las cuales se modificarán posteriormente.



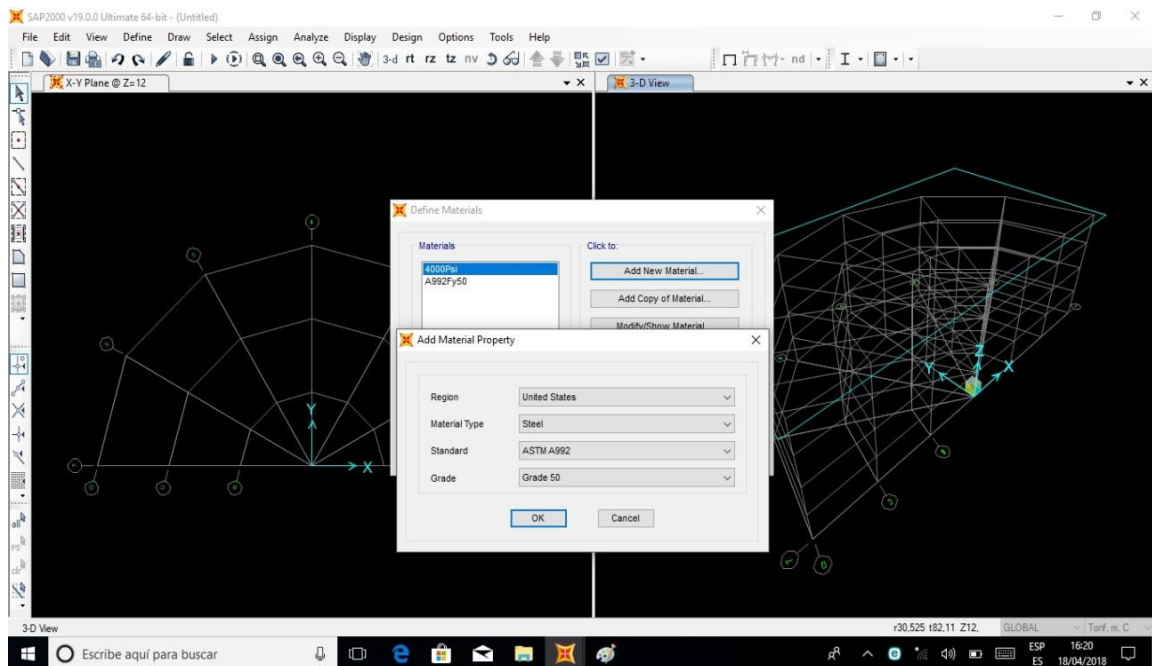
- **Figura N° 33.** Y nos aparecerá dos ventanas en diferentes vistas de nuestras grillas:



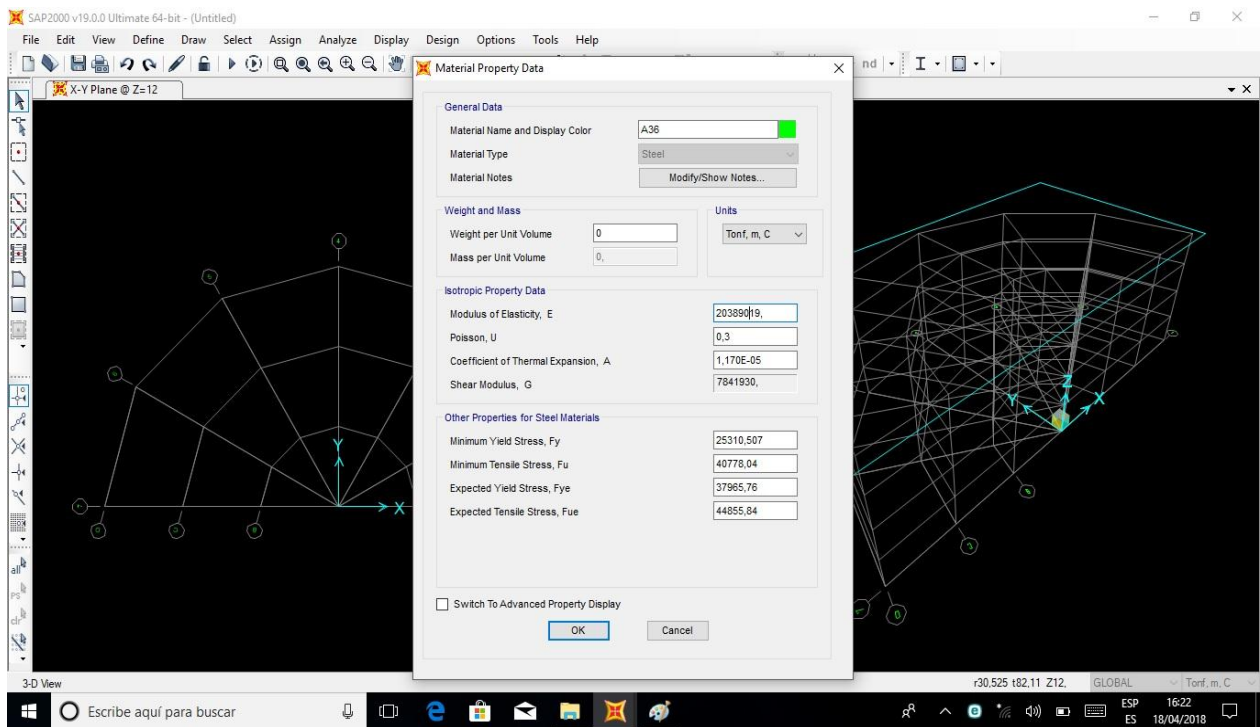
- **Figura N° 34.** La ventana que se muestra es donde se editará las grillas para modelar el tipo de estructura a trabajar.



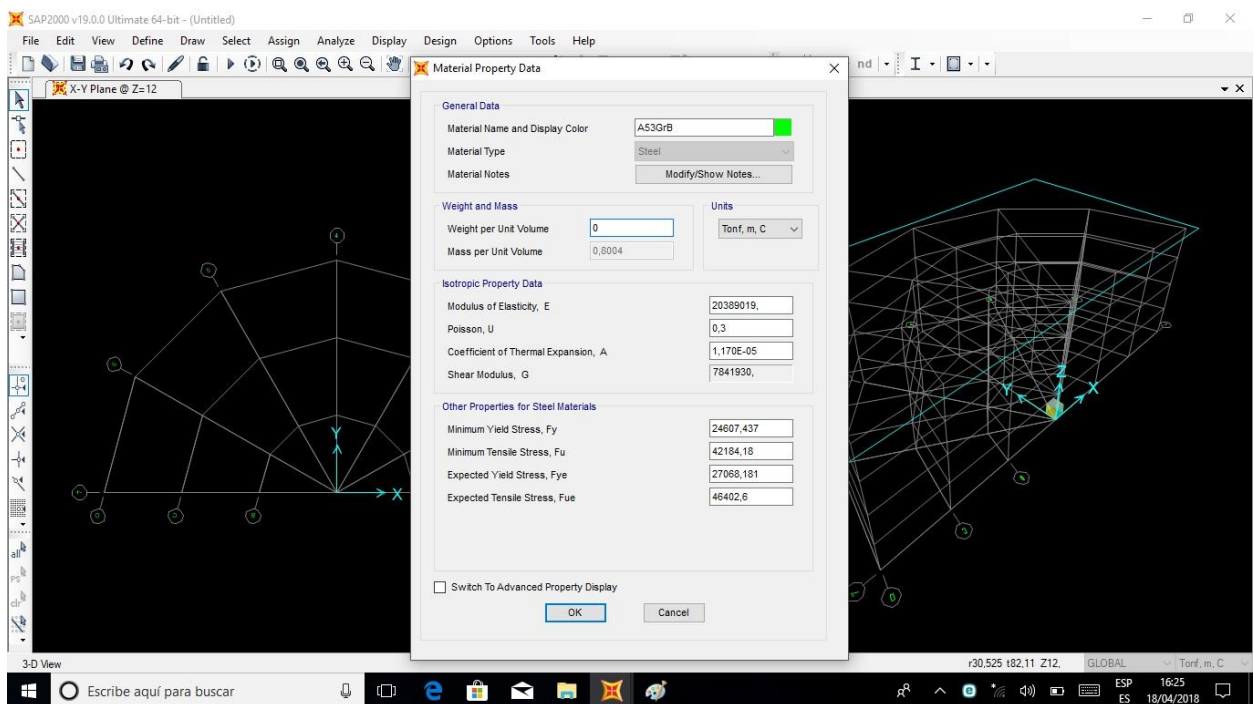
- **Figura N° 35.** La imagen muestra la pestaña donde se definirá los materiales que serán utilizados en el diseño de la estructura.
- La ventana emergente será donde se modifique o añadan nuevas propiedades para la estructura.



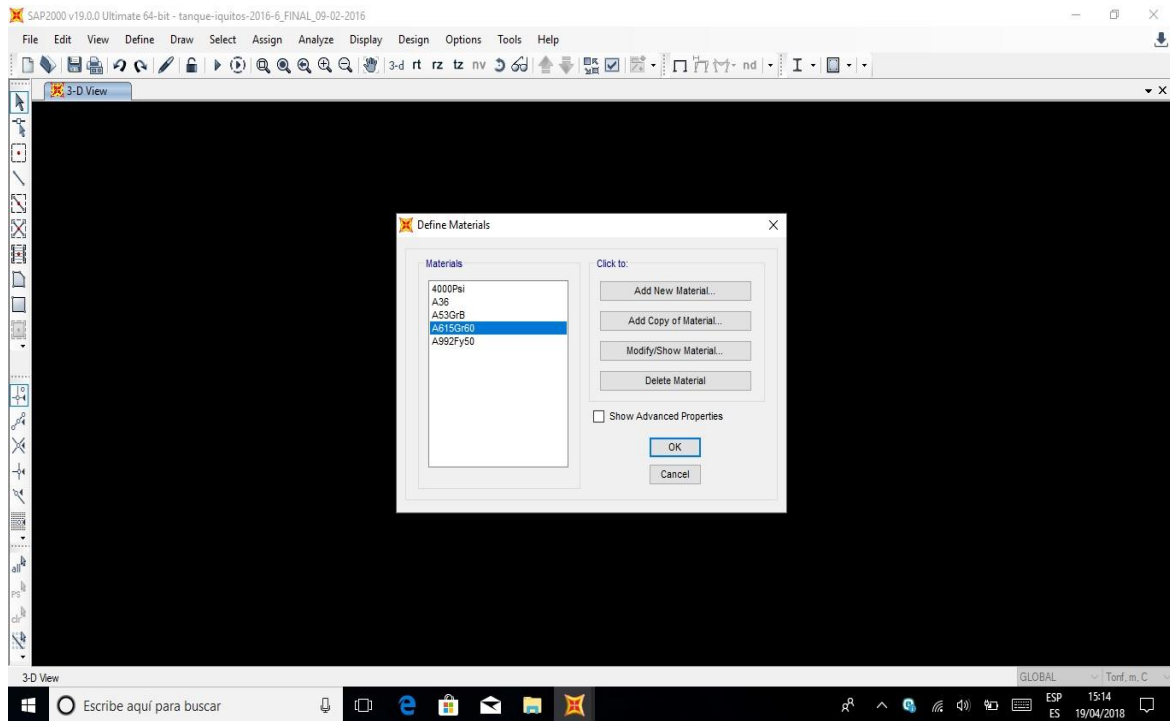
- **Figura N° 36.** Luego de añadir una nueva propiedad de la estructura, se elegirá el tipo de material a utilizar con sus características, como qué tipo de material se utilizará.



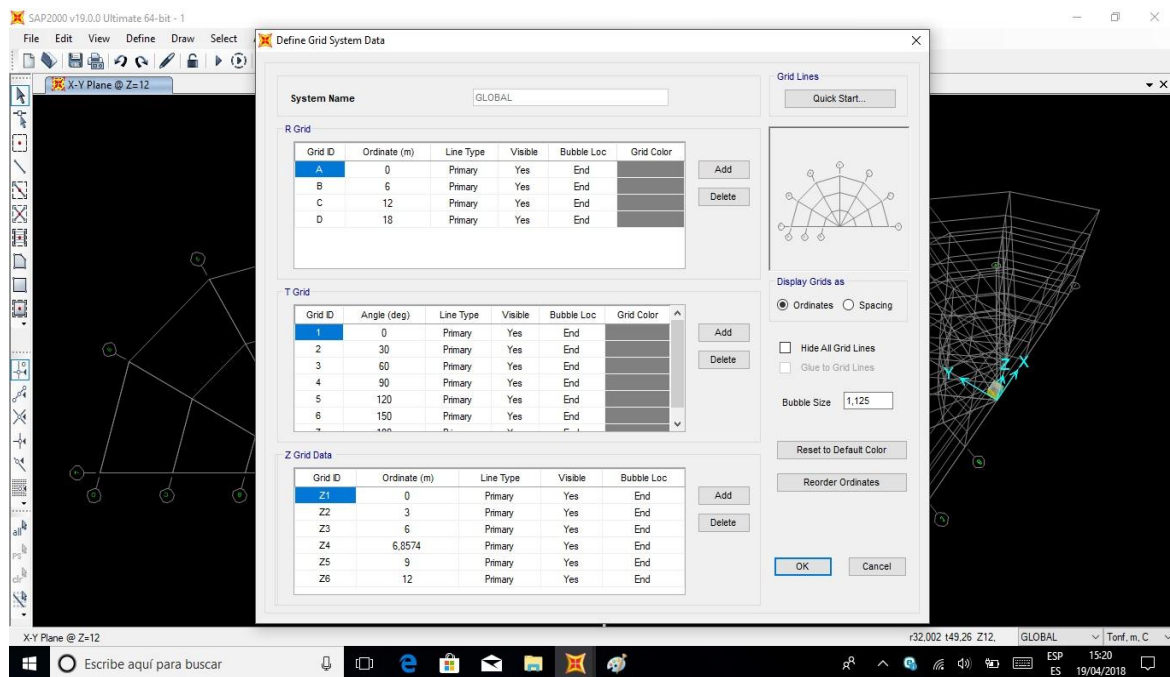
- **Figura N° 37.** La siguiente imagen nos muestra las características físicas del material, el módulo de elasticidad, las unidades a trabajar.



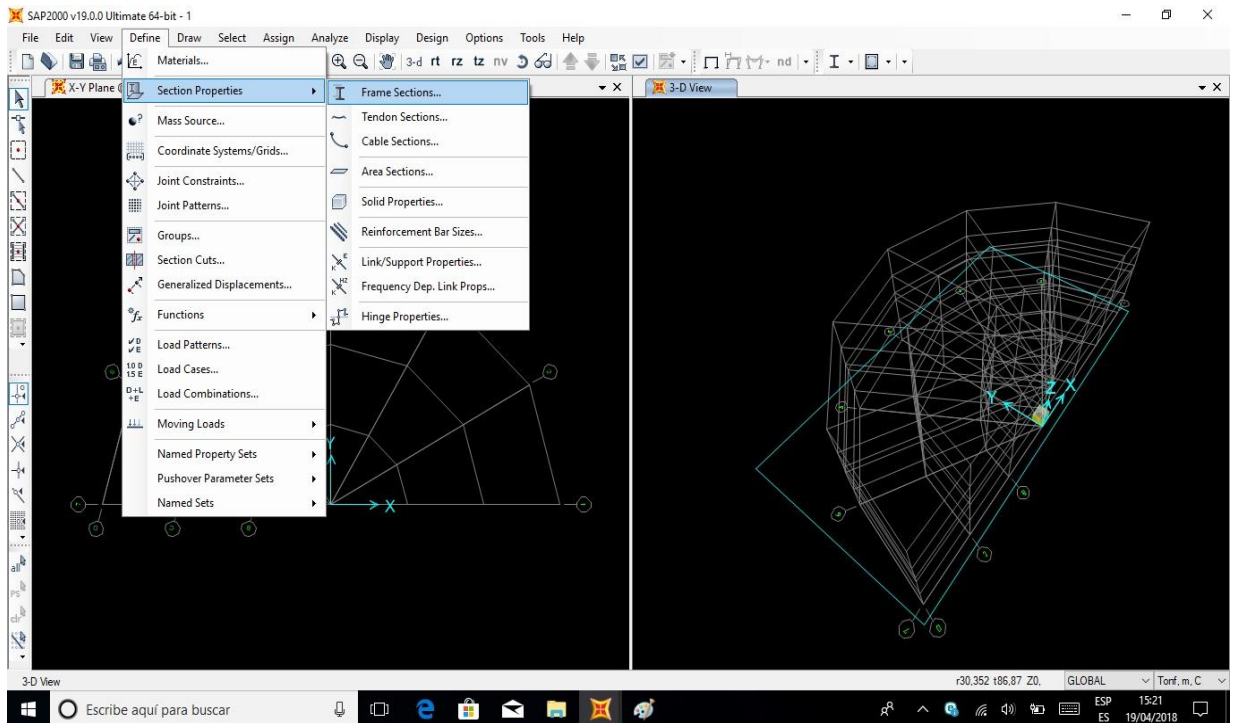
- **Figura N° 38.** Y así añadiremos las características de nuestros materiales, ya que estas modificaciones afectarán el diseño estructural de acuerdo a los datos ingresados para nuestra estructura.



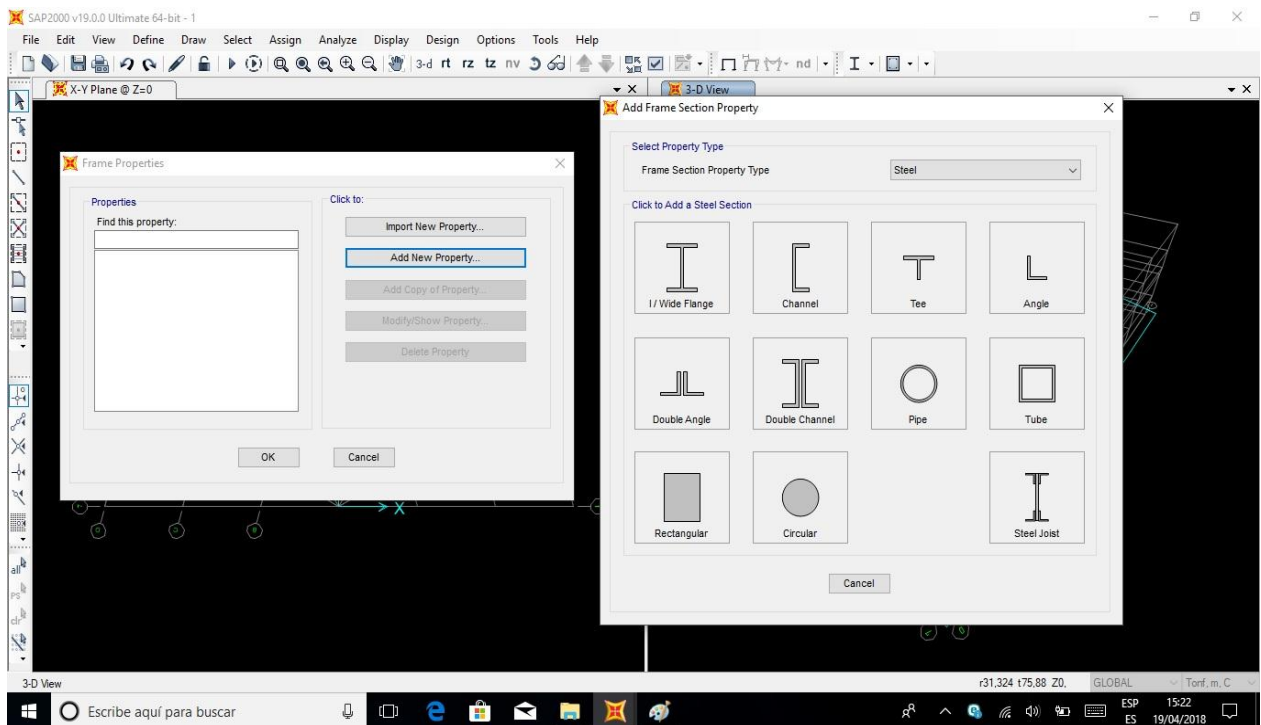
- **Figura N° 39.** Una vez culminado la ventana de definición de materiales nos mostrará todos los materiales creados o modificados.



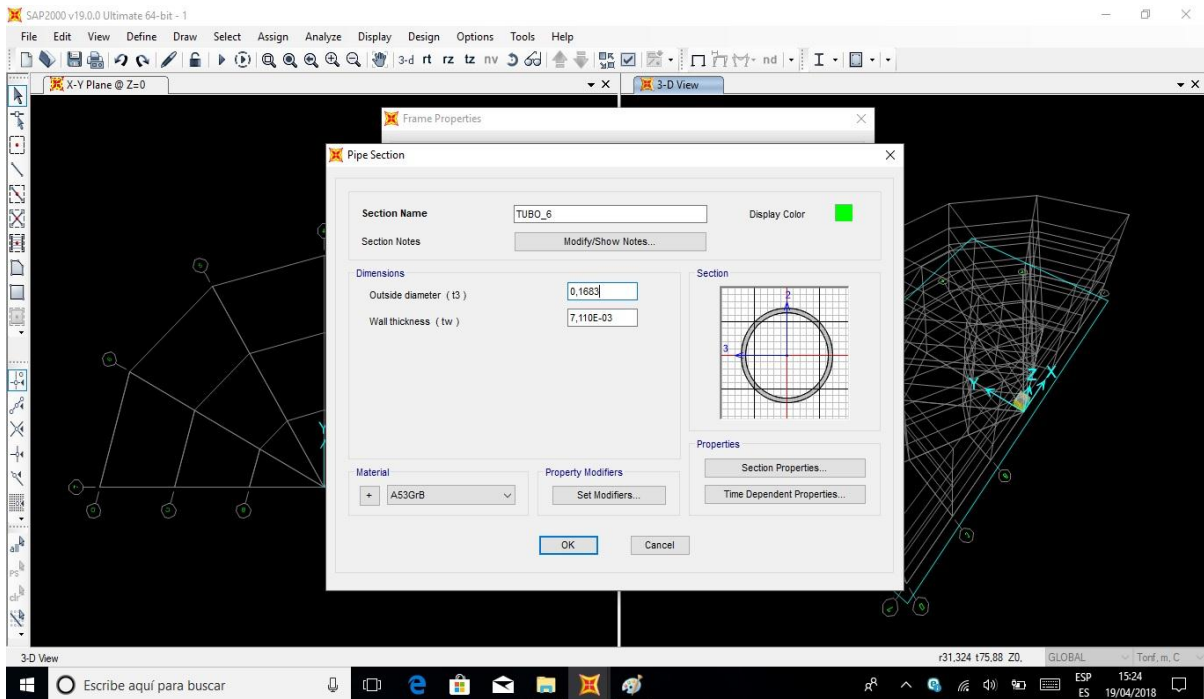
- **Figura N° 40.** En la siguiente ventana pasaremos a modificar las grillas con la que se dibujará la estructura, para que ésta sea la estructura a analizar.



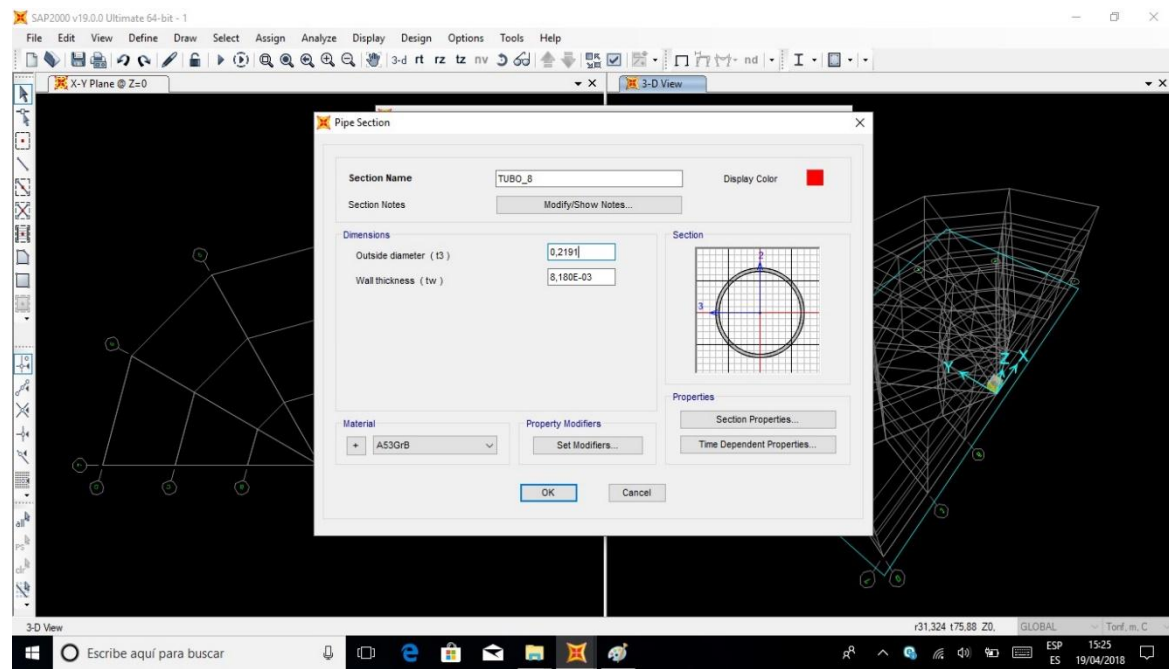
- **Figura N° 41.** En la pestaña Define pasaremos a diseñar nuestras propiedades de sección de los materiales a utilizar.



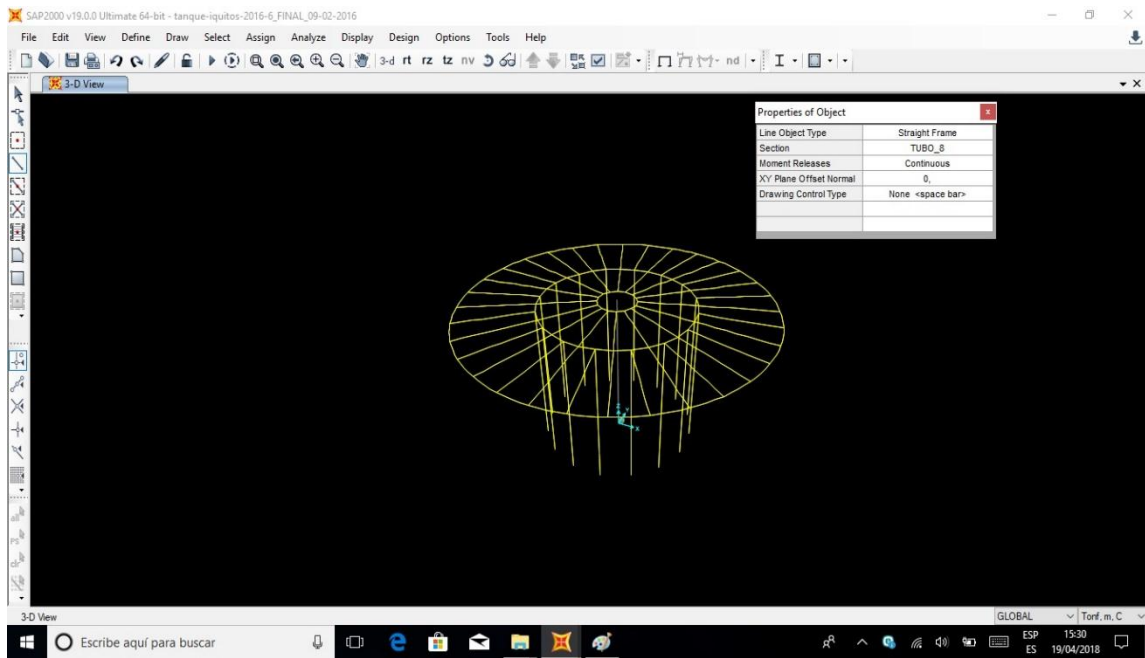
- **Figura N° 42.** El siguiente pantallazo nos muestra los tipos de secciones de metal que hay, elegimos nuestra sección para nuestro diseño.



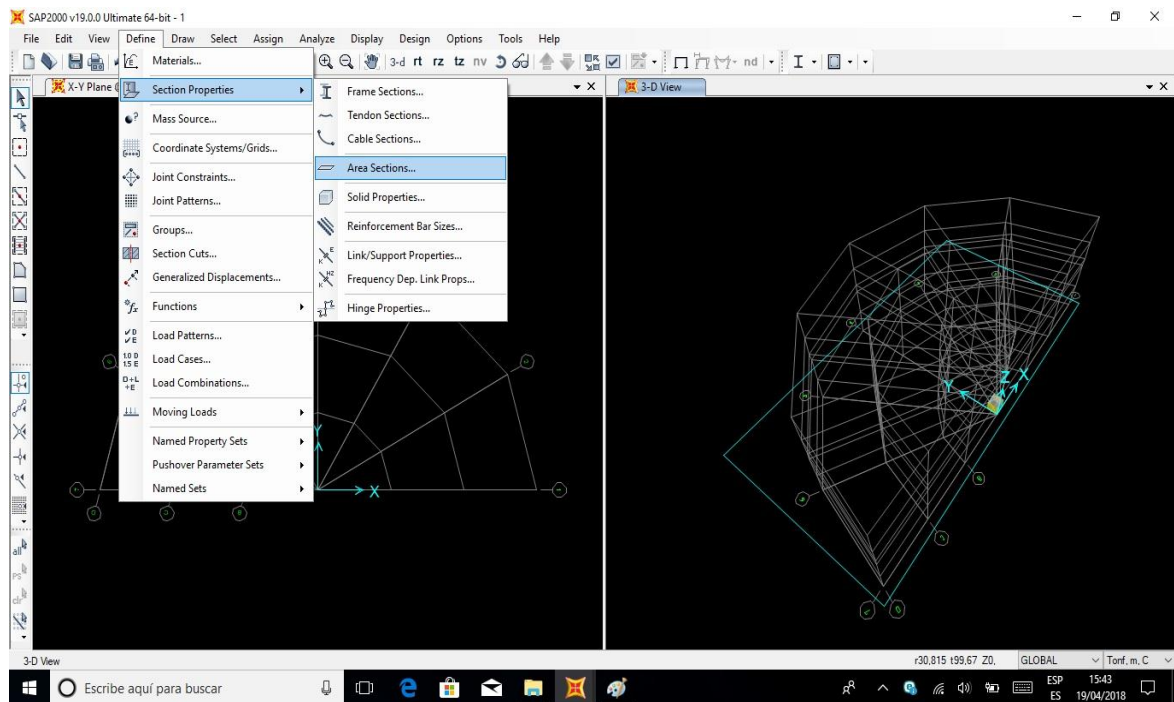
- **Figura N° 43.** En la siguiente ventana se modificará los datos para definir los espesores y las dimensiones de nuestro material.



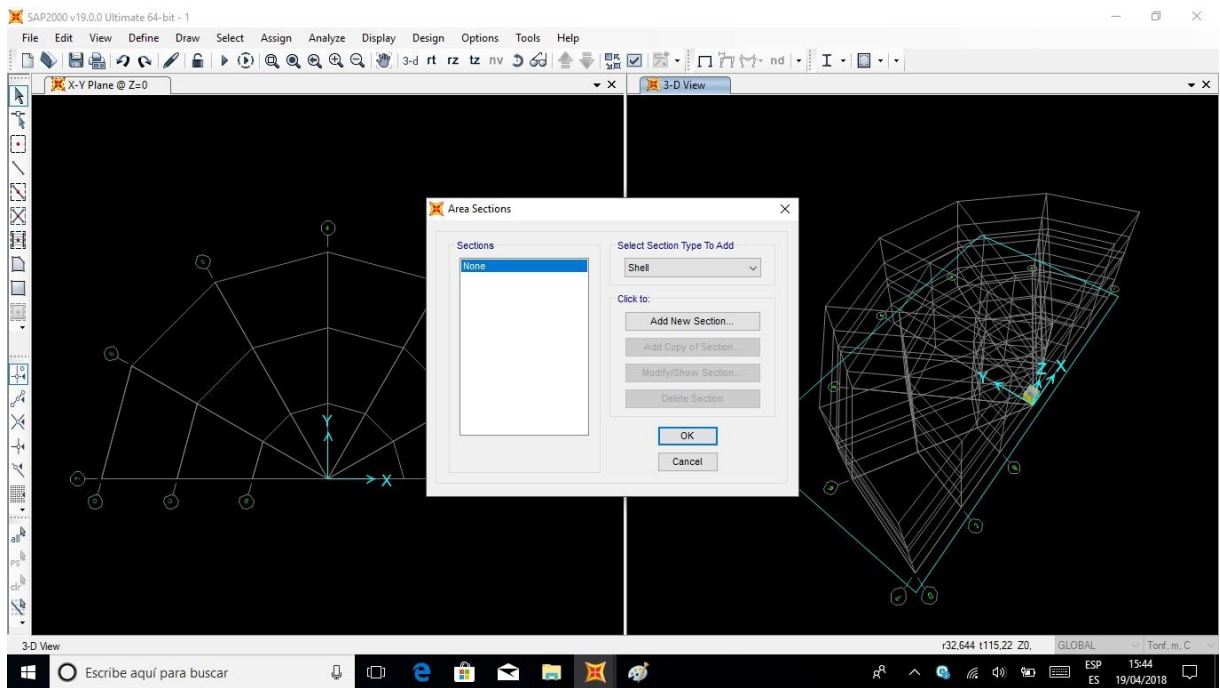
- **Figura N° 44.** Y de la misma manera se modificará a todas las secciones a utilizar.



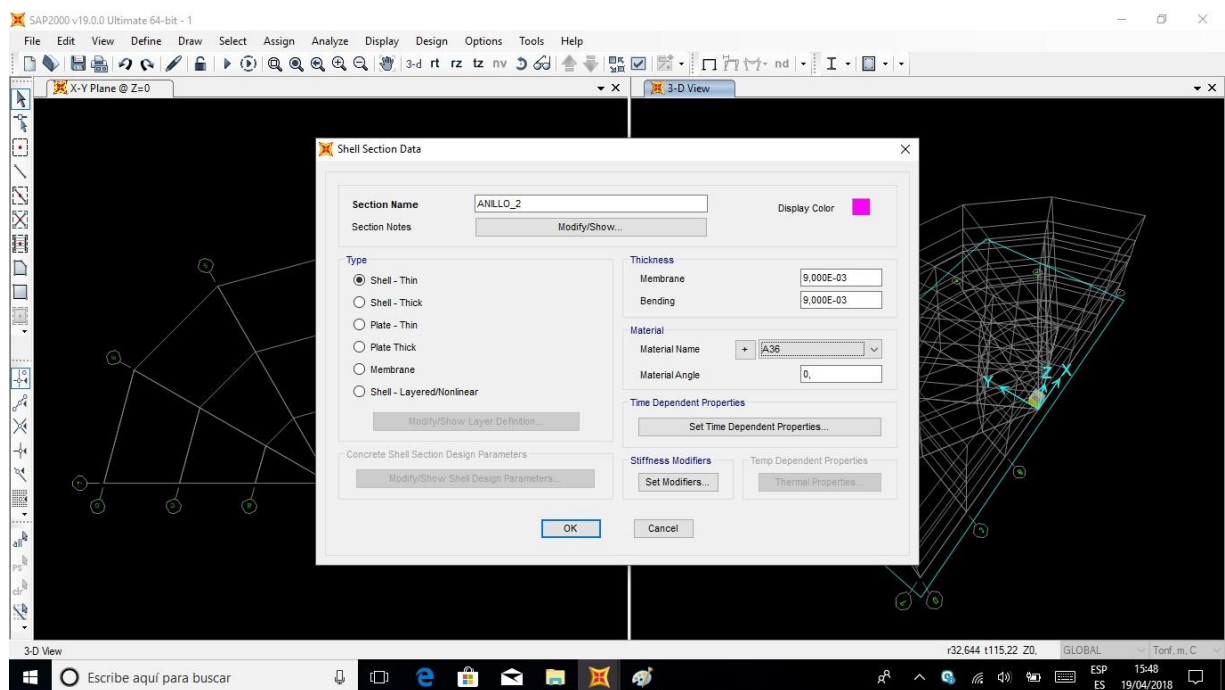
- **Figura N° 45.** Una vez finalizado y definido las características de nuestro material, la siguiente ventana nos mostrará todos los materiales creados.



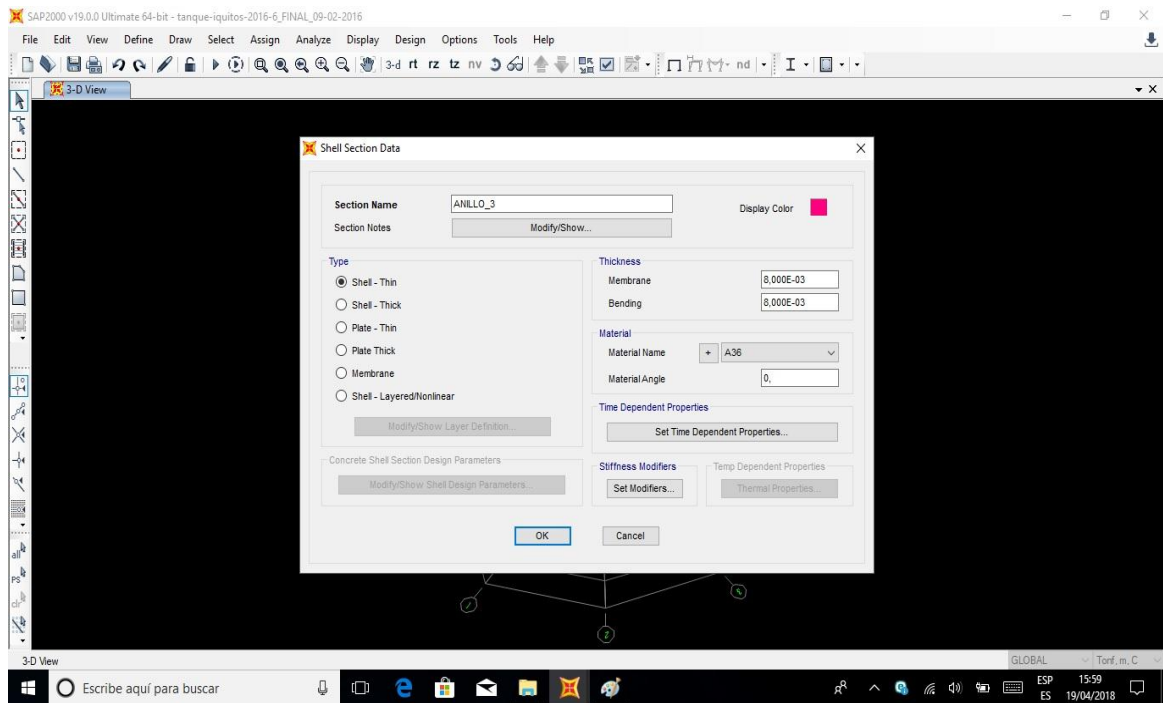
- **Figura N° 46.** Definido las características de nuestro material, la siguiente ventana nos mostrará todos los materiales creados.



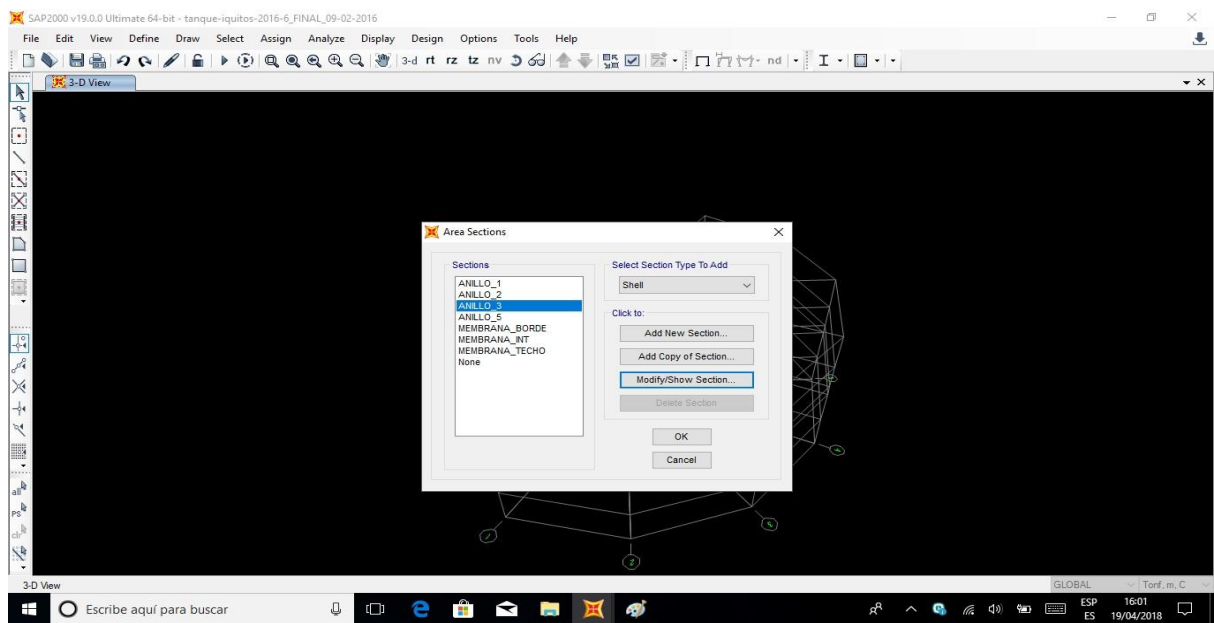
- **Figura N° 47.** Ahora nos dirigimos a definir nuestras secciones de área, como serán las paredes, la base y el techo del tanque.



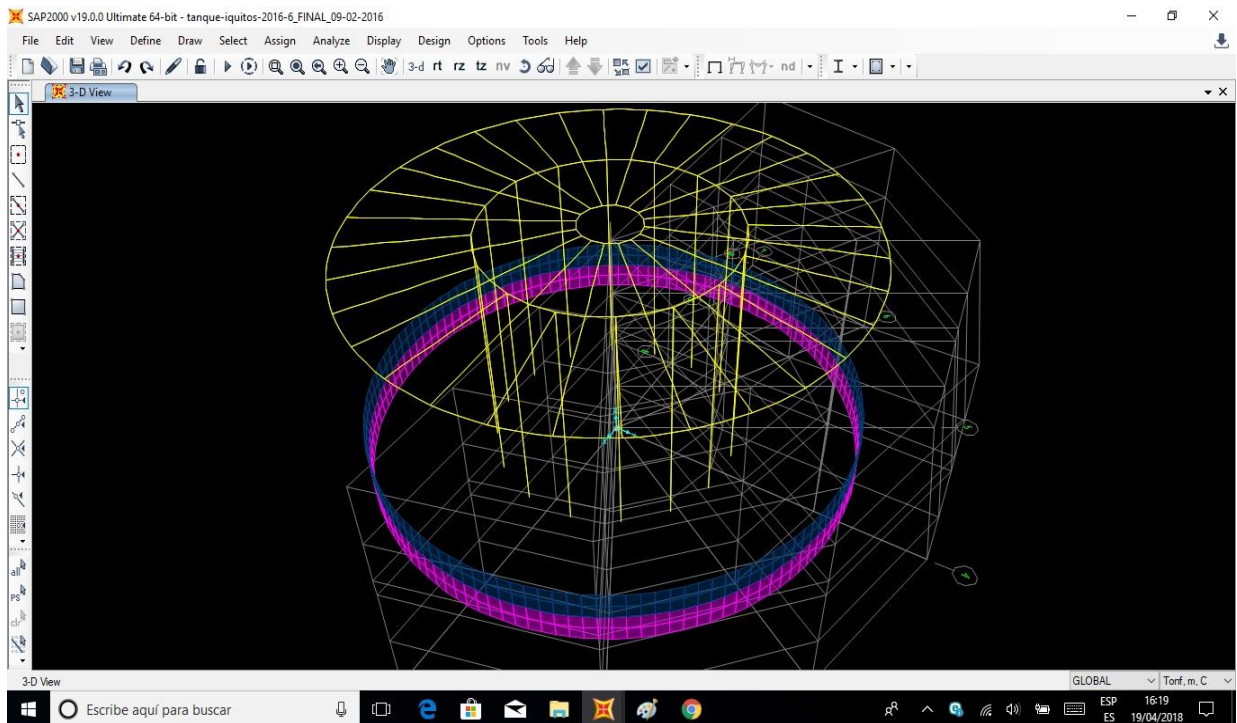
- **Figura N° 48.** La ventana siguiente es donde se modificarán los Shell y que material se utilizará, para eso se hizo una previa creación de los materiales a ser utilizados.



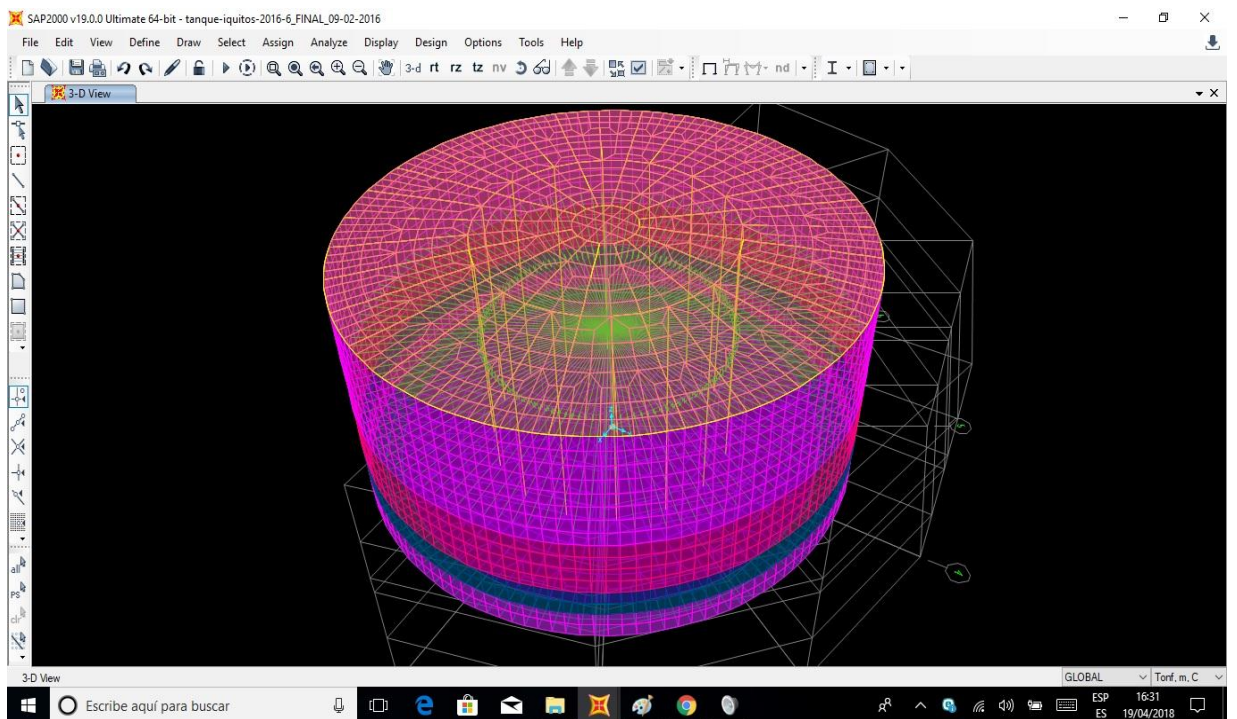
- **Figura N° 49.** En la siguiente ventana se diseñará las dimensiones de nuestras secciones de área. Tanto como el espesor y el tipo de material.



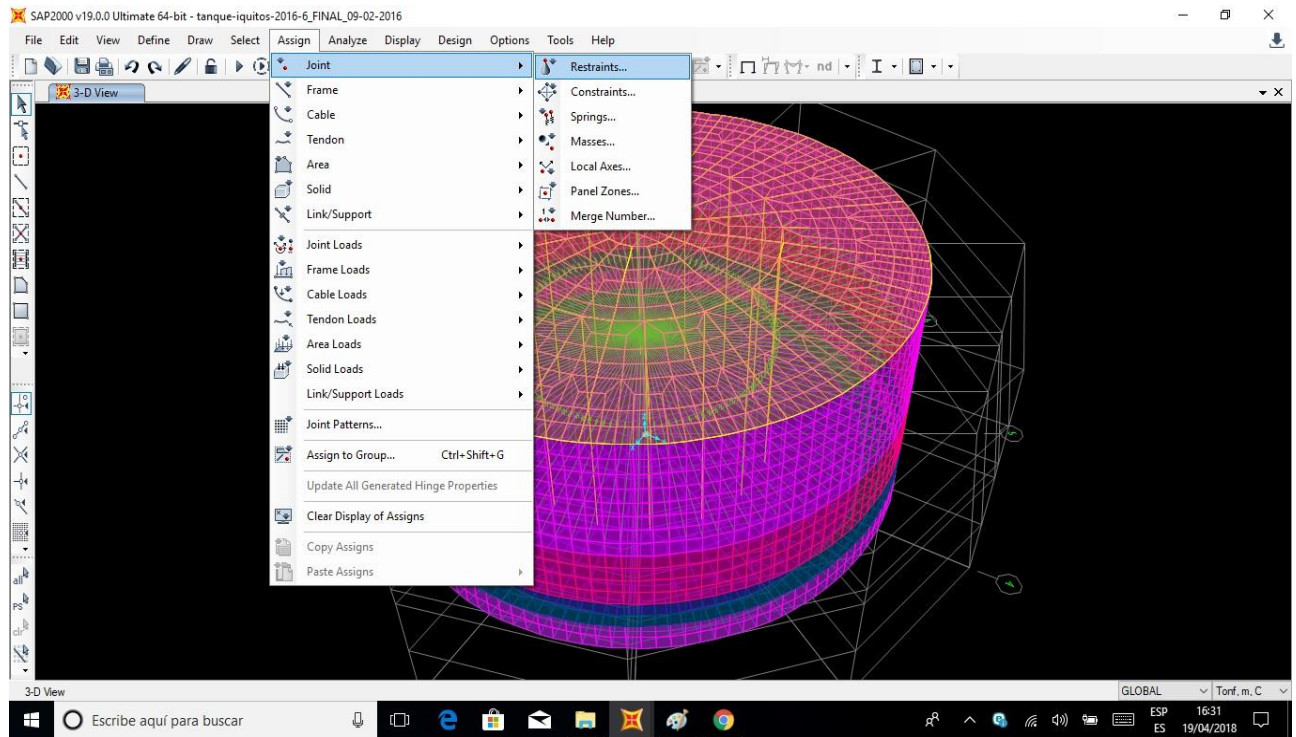
- **Figura N° 50.** La venta de las secciones de área nos mostrará todas las que fueron creadas para proceder a su asignación.



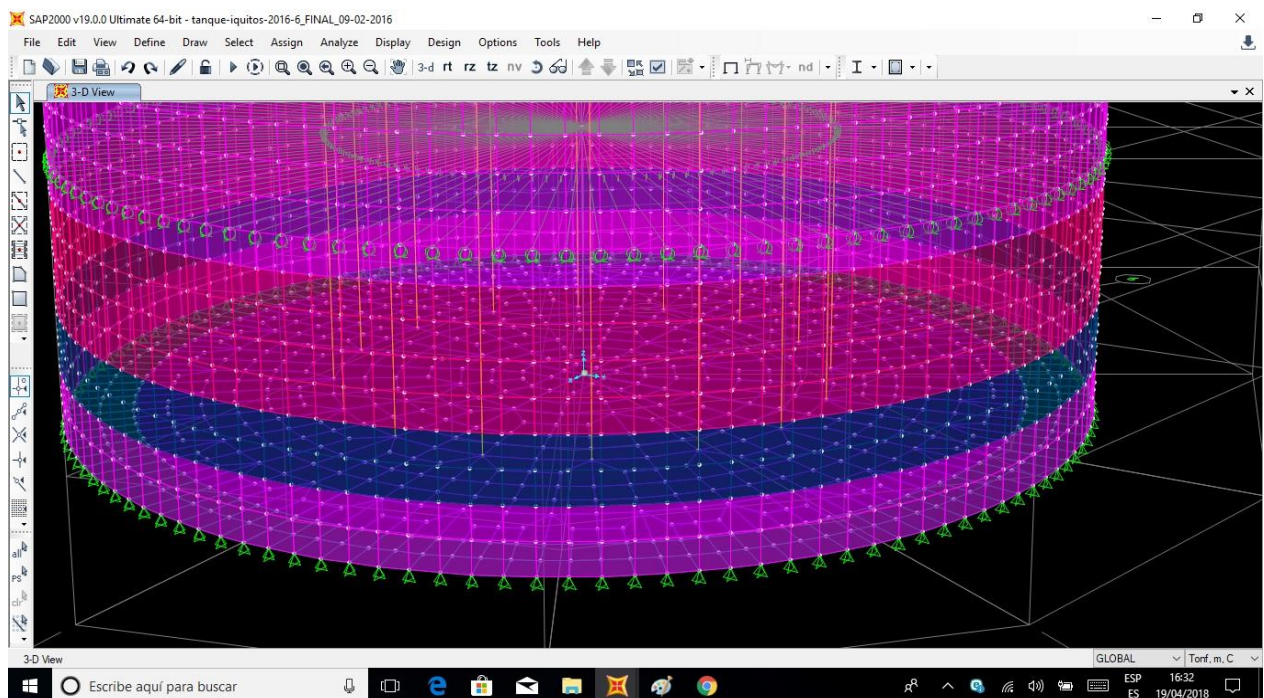
- **Figura N° 51.** Después de haber definido el material y las secciones pasamos a dibujar nuestra estructura y asignar en las grillas donde estarán cada una de ellas.



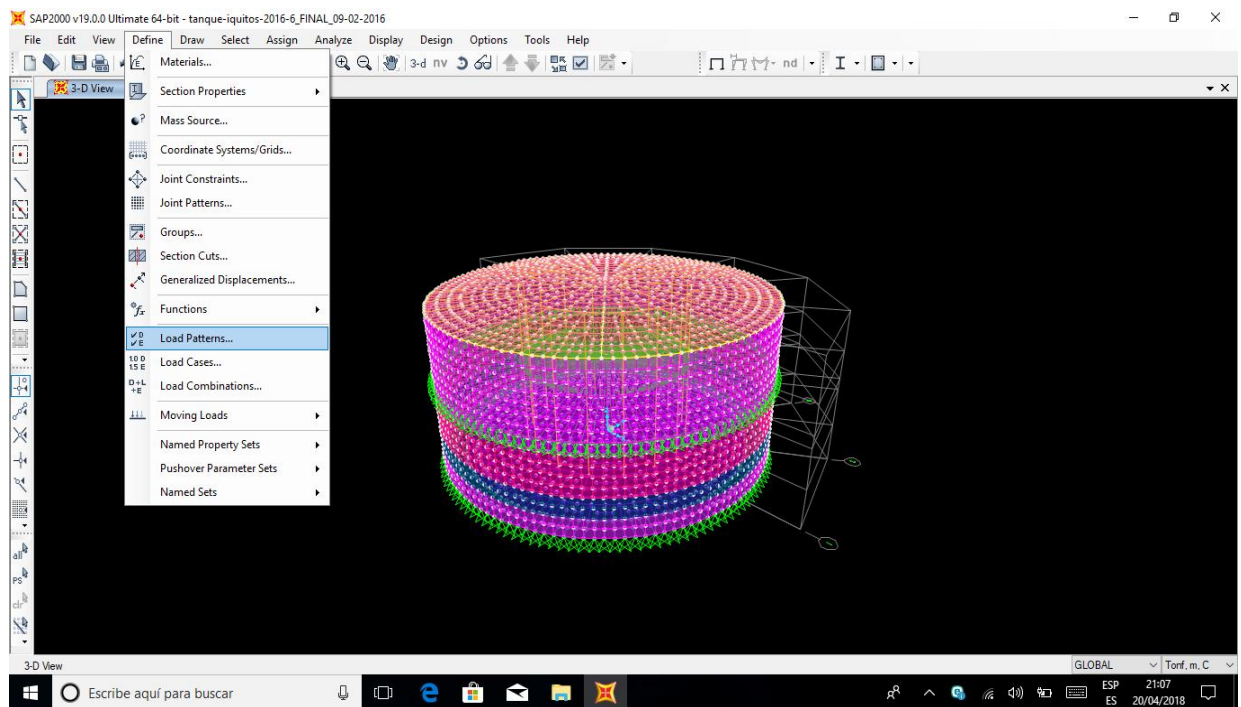
- **Figura N° 52.** La siguiente imagen nos muestra el tanque dibujado, ya con sus secciones de áreas, tubos y otros elementos creados en los frame sections, cada elemento de sección discretizados para un mejor análisis.



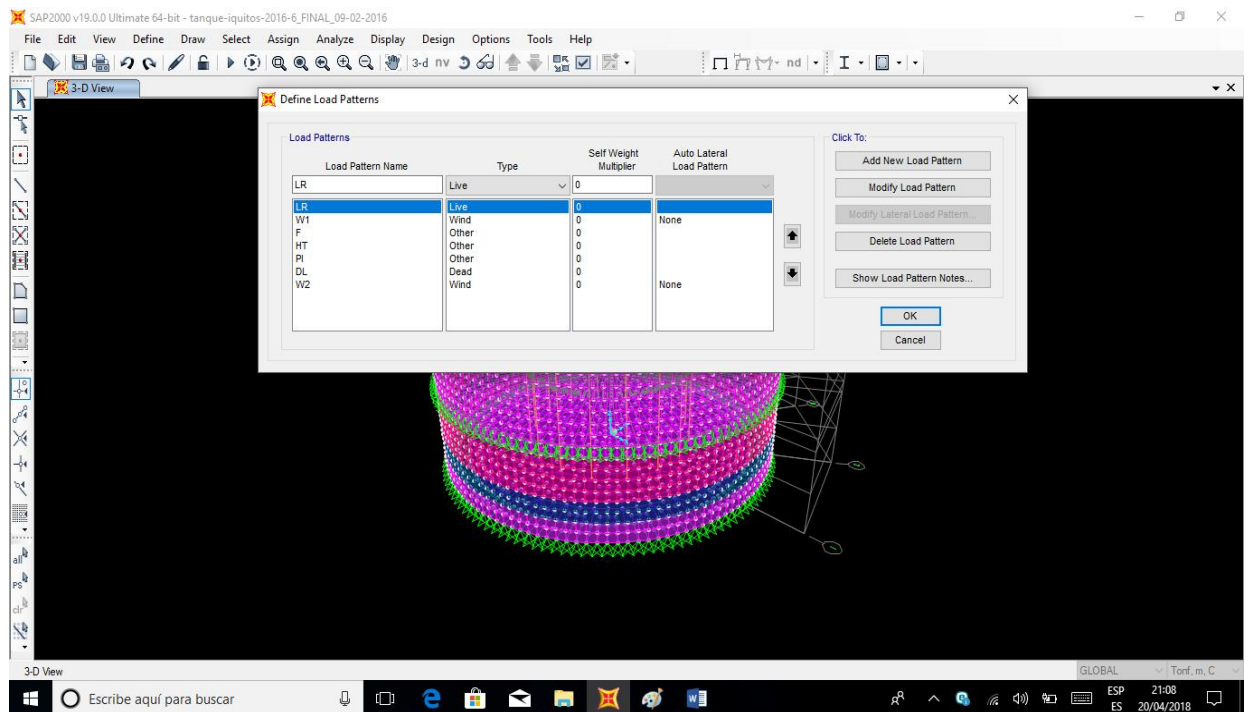
- **Figura N° 53.** La siguiente ventana nos muestra la asignación de nuestras restricciones que tendrá el tanque en cuanto a su análisis.



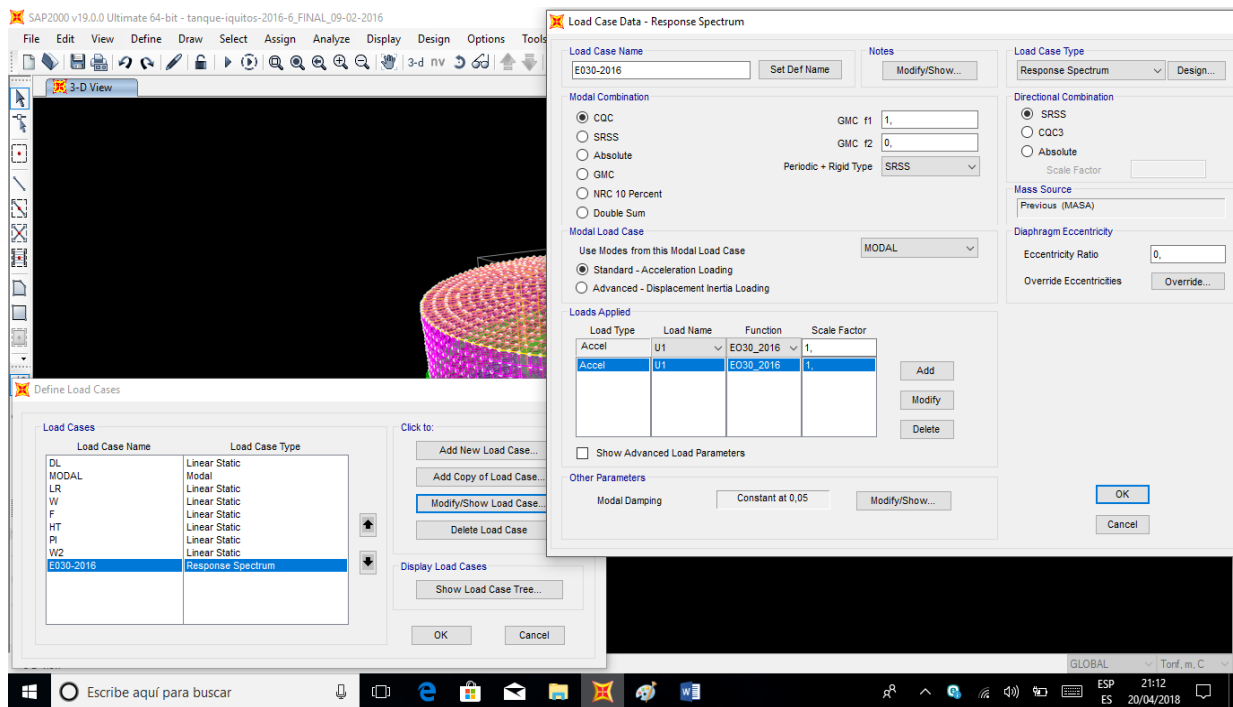
- **Figura N° 54.** Se le asignó un apoyo simple, la cual se verá reflejado en el Análisis de Estructura.



- **Figura N° 55.** En la siguiente pestaña que se desplaza, se definirá nuestros patrones de cargas.



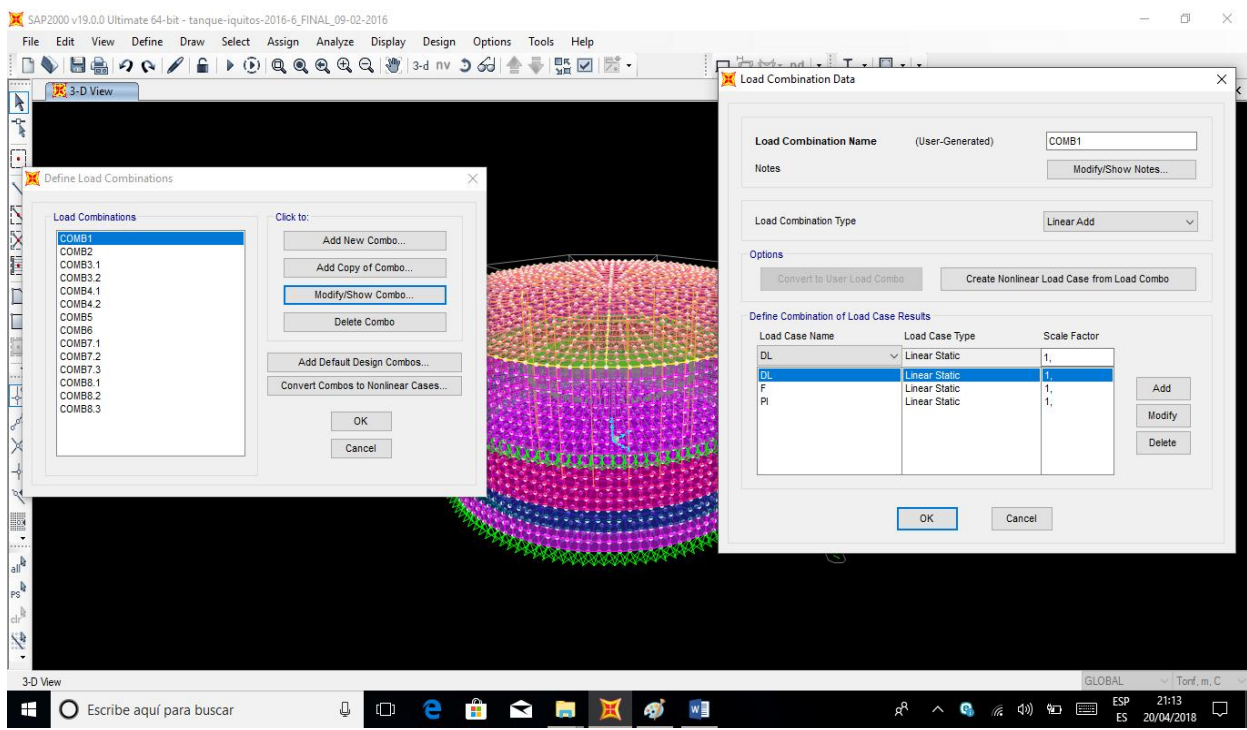
- **Figura N° 56.** La ventana emergente es donde se añadirá los patrones de cargas a utilizar.



- **Figura N° 57.** La siguiente imagen nos muestra los casos de cargas que tendrá el análisis de la estructura.
- **Figura N° 58.** La siguiente imagen nos muestra las combinaciones de carga asignadas para nuestro análisis estructural. Después de haber culminado las combinaciones, pasamos a correr el programa para obtener los resultados de la estructura.

3.3 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE MODELO

CARACTERÍSTICAS MECANICAS Y GEOMETRICAS

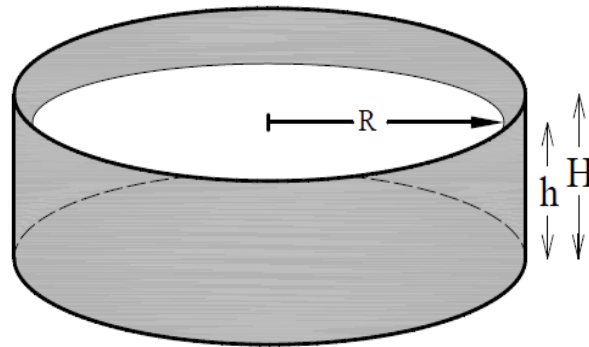


DIMENSION	
H(m) TOTAL	12.191
H(m) LIQUIDO	11.3242576
D(m)	26.74

h/D	0.42
-----	------

PESO		
Peso de la pared del tanque	(kN)	662.07
Peso de la placa base	(kN)	25.41
Peso del techo	(kN)	31.55
Peso del producto	(kN)	54276.36

PROPIEDADES MECANICAS		
Modulo de Young del acero Mpa	Es	210000
Espesor equivalente de la pared (mm)	t	7.625
Densidad del fluido (kg/m3)	p	870
Gravedad Especifica del Producto N/m3	ys	0.87



MALLA	
Numero de divisiones en la base	128
Numero de divisiones en la pared	16

AREAS	
Radio de techo en forma de cono	13.40
Área de techo	564.16
Área de pared	1024.12
Área de la base	561.58

PESO UNITARIO	
TECHO	0.05593
PARED	0.64648
BASE	0.04524

CARGA VIVA LR (API 650)	1.00	(kN)
PRESION INTERNA		

CAPITULO IV.

RESULTADOS

API	DISEÑO MECANICO API-650	APENDICE		650	
1. DATOS DE DISEÑO (ANEXO 02)					
		SIMBOLO	UNIDADES	VALORES	
....	Diámetro del Tanque	D	ft/m	87.730	26.74
....	Altura del Tanque	HT	ft/m	39.997	12.19
....	Nivel máximo diseño del Liquido	H	ft/m	37.153	11.32
....	Gravedad especifica del producto	G	-		0.87
....	Espesor equivalente de la pared	tu	in/mm	3001970.13	7.63
....	Densidad del fluido	p	lb/ft3 - kg/m3	0.031	870.00
....	Módulo de Elasticidad del material del tanque	E	lbf/in2 - Mpa	30457980.00	210000.00
....	Grupo Uso Sismico	SUG	-	I	
....	Factor de fricción	Rwi	-	3.5	
		Rwc		6.09	
....	Factor de Importancia				
....	Factor de Importancia	I	-	1	
....	Tipo inicial de anclaje			J > 1,54	
....	Clase de sitio				
....	Coefficiente ajuste aceleración espectral	K	Sa	3.09	1.50
....	Factor de escala	Q	-	1	
....	Periodo transicional	TL	seg	4	
....	Mapped max. Earthquake short period	SS		0.25	
....	Mapped max. Earthquake 1-sec period	S1		0.125	
....	Mapped max. Earthquake 0-sec period	S0		0.04	
....	Peak ground acceleration for non-ASCE	Sp	Z	0.1	
....	Design acceleration Parameter at short periods for ASCE methods	SDS		0.4	
....	Peso del producto	Wp	lb/KN	12201810.31	54276.36
....	Peso del cuerpo	Ws	lb/KN	148839.257	662.07
....	Peso del techo incluyendo cualquier elemento permanente que el techo soporte	Wr	lb/KN	7093.621391	31.55
....	Peso del fondo	Wf	lb/KN	5711.271199	25.41
....	Espesor del anillo en contacto con el fondo - C.A.	ts	ft/m		
....	Espesor del fondo - C.A.	Wf	ft/m		
....	Valor de "product design stress" para acero ASTM A36	Sd	lbf/in2	23760	
....	Valor de "minimum yield strength" para acero ASTM A36	Fy	lbf/in2	36000	2530.00
....	Valor de "product design stress" para acero ASTM A53 b	Sd	lbf/in2	23100	
....	Valor de "minimum yield strength" para acero ASTM A53 b	Fy	lbf/in2	35000	2460.00
....	Distancia medida desde el fondo hasta el C.G. del cuerpo cilíndrico del tanque	Xs	ft	20.687	6.31

(Tabla N° 2)

4.1 PESOS EFECTIVOS DEL PRODUCTO (Según: Numeral E.6.1.1 del API650 del 2007)

Relación D/H

D/H =	2.36
-------	------

Wp=	12201810.31
-----	-------------

Para $D/H \geq 1.33$, W_i (peso efectivo de la porción de líquido impulsivo) se calcula como:

$$W_i = \frac{\tanh\left(0.866\frac{D}{H}\right)}{0.866\frac{D}{H}} W_p$$

W _i =	5770462.02	lb
------------------	------------	----

W_c (peso efectivo de la porción de líquido convectivo) se calcula como:

$$W_c = 0.230\frac{D}{H}\tanh\left(\frac{3.67H}{D}\right) W_p$$

W _c =	6060076.16	lb
------------------	------------	----

4.2 CENTROS DE ACCION DE LAS FUERZAS LATERALES EFECTIVAS (Según: Numeral E.6.1.2.1 del API650 del 2007)

X_i (altura desde el fondo del tanque al centro de acción de W_i)

Para $D/H \geq 1.33$, X_i se calcula como:

X _i =	0.375 H	13.93	ft
------------------	---------	-------	----

Sea:

X_c (altura desde el fondo del tanque al centro de acción de W_c)

$$X_c = \left[1.0 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67H}{D} \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)} \right] H$$

D/H =	2.36
H=	37.15
D=	87.73

Se calcula, primeramente:

$$\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1 = 1.47 \qquad \frac{3.67H}{D} \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right) = 3.51$$

Por lo tanto, se resuelve:

X _c =	21.59	ft
------------------	-------	----

4.3 PERIODO CONVECTIVO - Tc (Según: Numeral E.4.5.2 del API650 Edición 2007)

En base al numeral E.4.5.2, el periodo natural convectivo Tc se calcula con la siguiente relación:

$$T_c = K_s \sqrt{D}$$

D=	87.73
----	-------

Tc =	5.66	Sec.
------	------	------

El valor de Ks está determinado por la relación siguiente:

H=	37.15
----	-------

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H}{D}\right)}}$$

Ks =	0.60	ft
------	------	----

4.4 PERIODO IMPULSIVO - Ti (Según: Numeral E.4.5.1 del API650 Edición 2007)

En base al numeral E.4.5.1, el periodo natural impulsivo Ti (Unidades US) se calcula con la siguiente relación:

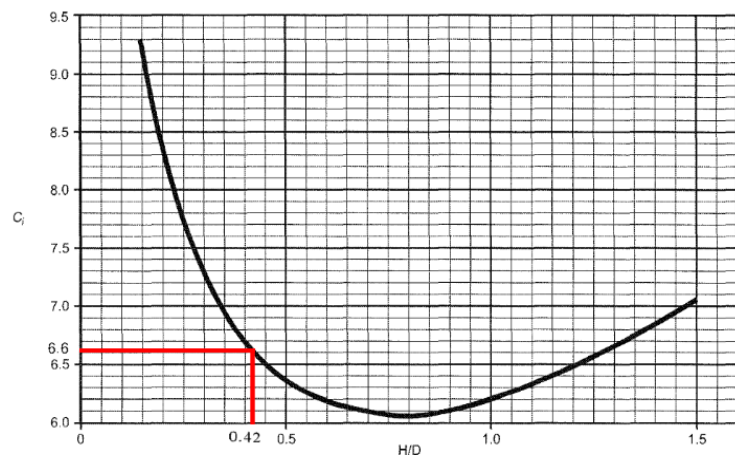
$$T_i = \left(\frac{1}{27.8}\right) \left(\frac{C_i H}{\sqrt{t_u}}\right) \left(\frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}}\right)$$

H/D=	0.42	Ci=	6.60
------	------	-----	------

Datos:	
E=	30457980.00
tu=	3001970.13
p=	0.03

El valor de Ti está determinado por:

Ti=	0.036	sec
-----	-------	-----



(Tabla N° 3)
Relación altura/diámetro del tanque impulsivo

4.5 CALCULO DEL PARAMETRO DE ACELERACION IMPULSIVA ESPECTRAL - A_i (Según: Numeral E.4.6.1 del API650 Edición 2007)

Sobre los datos tomados:

Según: API650 Edición 2007

$S_s =$	$2,5 \times S_p$	0.25
$S_1 =$	$1,25 \times S_p$	0.125
$S_0 =$	$0,4 \times S_s$	0.1
Clase de Sitio = D		
$T_L =$	4	seg
$K =$	3.09015	
$Q =$	1	

Ver E.4.3-1

Ver E.4.3-2

Ver E.4.1

Ver E.4.4

Ver E.4.6.1

Ver E.2.2

Ver E.4.6.1

$F_a =$	1.60
---------	-------------

No hay parámetros del suelo o de clase sitio se dan en las regulaciones locales

$F_v =$	2.30
---------	-------------

No hay parámetros del suelo o de clase sitio se dan en las regulaciones locales

El valor de A_i se calcula en base a la siguiente ecuación:

$$A_i = S_{DS} \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) = 2.5 Q F_a S_0 \left(\frac{I}{R_{wi}} \right)$$

$$A_i \geq 0.007$$

Datos:

$S_{DS} =$	0.4
$R_{wi} =$	3.5
$I =$	1

Se define en primer lugar el valor de SDS :

$A_i =$	0.114
---------------------------	-------

Nota:

Las aceleraciones máximas consideradas de respuesta espectral sísmica para la aceleración máxima del terreno, se modificó por los coeficientes de sitio apropiados, F_a y F_v de la Tabla E.1 y la Tabla E.2. Cuando las propiedades del suelo no se conocen con suficiente detalle para determinar la clase del sitio, se asumirá la Clase D del sitio, a menos que la autoridad competente determine que la Clase de Sitio E o F debe aplicarse en el sitio.

4.6 CALCULO DEL PARAMETRO DE ACELERACION CONVECTIVA ESPECTRAL - A_c (Numeral E.4.6.1 del API650 Edición 2007)

Cuando $T_c > T_L$ el valor de A_c se calcula con la siguiente formulas:

$$A_c = K S_{D1} \left(\frac{T_L}{T_c^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) = 2.5 K Q F_a S_0 \left(\frac{T_L T_L}{T_c^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i$$

Es necesario en primer termino, encontrar el valor de T_s :

$T_s =$	0.719
---------------------------	-------

$T_s = F_v S_1 / F_a S_s$ (Según: Ver E.2.2 del API650 Edición 2007)

Se procede a calcular el valor de A_c :

$A_c =$	0.007

Nota : $A_c < A_i$

IITK	GUIDELINES FOR SEISMIC DESIGN OF LIQUID STORAGE TANKS			
1. CALCULO DE PESOS				
		SIMBOLO	UNIDADES	VALORES
....	Peso de la pared del tanque		KN	662.070
....	Masa de la pared del tanque	mw	kg	67489.297
....	Peso de la placa base		KN	25.405
....	Masa de la placa base	mb	kg	2589.704
....	Capacidad del Tanque		MB	40000.000
....	Volumen de liquido		m3	6359.490
....	Peso del liquido		KN	54276.339
....	Masa del liquido	m	kg	5532756.300
....	Peso del techo		KN	31.554
....	Masa del techo	mt	kg	3216.514

(Tabla N° 4. Guidelines For Seismic Design Of Liquid Storage Tanks)

4.7. PARAMETROS DEL RESORTE MASA MODELO (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

L = Altura del tanque (m) = 12.19
H = Altura del Líquido (m) = 11.32
D = Diámetro de Tanque (m) = 26.74

$h_i = m_i * h / (masa \text{ del tanque} + m_c + m_i)$	5.45
$h_i = m_i * h / (m_c + m_i)$	5.52

Para $h/D = 0.42$

mi/m	0.473	(kg)	mi	2616542.89
hi/h	0.375	(m)	hi	4.25
hi*/h	0.932	(m)	hi*	10.56
mc/m	0.497	(kg)	mc	2749940.18
hc/h	0.581	(m)	hc	6.58
hc*/h	0.867	(m)	hc*	9.82

Tabla C 1 - Expresión para parámetros del modelo de masa elástica. (Pag. 16 del IITK-GSDMA)	
Circular tank	
$\frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{D}{h}\right)}{0.866 \frac{D}{h}}$	$\frac{m_c}{m} = 0.23 \frac{\tanh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}{\frac{h}{D}}$
$\frac{h_i}{h} = 0.375 \quad \text{for } h/D \leq 0.75$ $= 0.5 - \frac{0.09375}{h/D} \quad \text{for } h/D > 0.75$	$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{h}{D}\right) - 1.0}{3.68 \frac{h}{D} \sinh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}$
$\frac{h_i^*}{h} = \frac{0.866 \frac{D}{h}}{2 \tanh\left(0.866 \frac{D}{h}\right)} \quad 0.125$ $\quad \text{for } h/D \leq 1.33$ $= 0.45 \quad \text{for } h/D > 1.33$	$\frac{h_c^*}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{h}{D}\right) - 2.01}{3.68 \frac{h}{D} \sinh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}$ $K_c = 0.836 \frac{mg}{h} \tanh^2\left(3.68 \frac{h}{D}\right)$

(Tabla N° 5. Parámetro del modelo de masa elástica)

4.8 PERIODOS NATURALES IMPULSIVO (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

Periodo de tiempo de modo impulsivo

$$T_i = \frac{C_i h \sqrt{\rho}}{\sqrt{(t/D)} \sqrt{E}}$$

Donde:

h = profundidad de líquido	= 11.32	(m)
p = densidad masa del líquido	= 870	(kg/m ³)
t = espesor de la pared	= 0.00763	(m)
D = diámetro del tanque interior	= 26.74	(m)
E = módulo de Young acero	= 2.1 E+11	(N/m ²)

Para h/D = 0.42

Ci = Coeficiente de periodo de tiempo para impulsivo modo.

Ci = 4.45 (Ver sección 4.3.1.1)

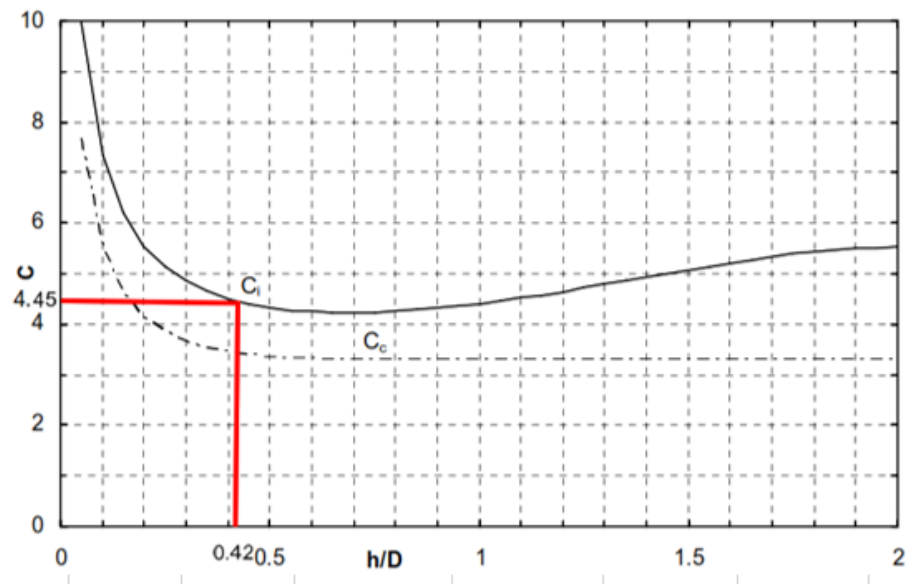


Tabla N° 6. - Período de tiempo del modo de coeficiente impulsivo (Ci) y convectivo (Cc) para circular

El valor de Ti está determinado por:

Ti =	0.192	sec
------	-------	-----

4.9 PERIODOS NATURALES CONVECTIVO (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

Periodo de tiempo del modo convector

$$T_c = C_c \sqrt{\frac{D}{g}}$$

Para $h/D = 0.42$

C_i = Coeficiente de periodo de tiempo para convector modo.

C_i = 3.4 (Ver sección 4.3.2.2 (IITK-GSDMA))

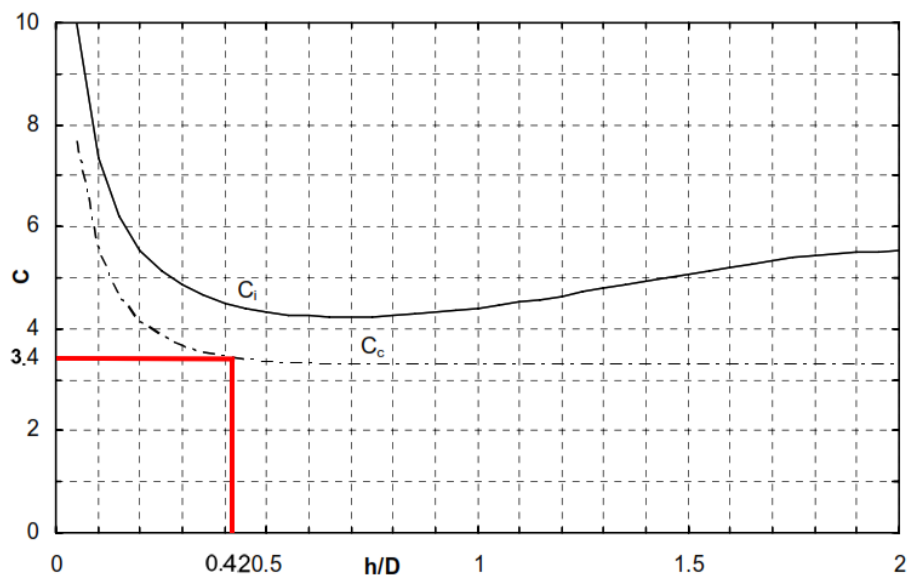


Tabla N° 7. - Período de tiempo del modo de coeficiente impulsivo (C_i) y convector (C_c) para circular

El valor de T_c está determinado por:

$T_c =$	5.613	sec
---------	-------	-----

4.10 COEFICIENTE HORIZONTAL DE DISEÑO SISMICO (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

Diseñar coeficiente sísmico horizontal para el modo IMPULSIVO

$$(A_h)_i = \frac{Z}{2} \frac{I}{R} \left(\frac{S_a}{g} \right)_i$$

Ver sección 4.5 (IITK-GSDMA)

Donde:

Z = Factor de zona dado en la Tabla 2 de IS 1893 = 0.15 C4.5.3
 I = Factor de importancia = 1.5 Tabla 1
 R = Factor de reducción = 2.5 Tabla 2
 En que tanque de acero anclado en la base, por lo tanto, R es tomado como 2.5

T_{yo} = T_i	0.192	sec
---------------------------------------	-------	-----

esto se debe por el tipo de suelo que presenta

Damping =	0.005
------------------	-------

S_a / g =	2.500
----------------------------	-------

aceleración de la respuesta del verage

coeficiente **IS 1893 (Parte 1): Figura 2**

Entonces tendremos

(A_h)_i =	0.113	sec
--------------------------------------	-------	-----

Diseñar coeficiente sísmico horizontal para el modo CONVECTIVO

$$(A_h)_c = \frac{Z}{2} \frac{I}{R} \left(\frac{S_a}{g} \right)_c$$

Ver sección 4.5 (IITK-GSDMA)

Donde:

Z=	Factor de zona dado en la Tabla 2 de IS 1893	=	0.15	C4.5.3
I=	Factor de importancia	=	1.5	Tabla 1
R=	Factor de reducción	=	2.5	Tabla 2

En que tanque de acero anclado en la base, por lo tanto, R es tomado como 2.5

T_{do} = T_i	5.613	sec
---------------------------------------	-------	-----

esto se debe por el tipo de suelo que presenta

Damping =	0.005
------------------	-------

S_a / g =	0.298
----------------------------	-------

aceleración de la respuesta del verage

coeficiente **IS 1893 (Parte 1): Figura 2**

Entonces tendremos

(A_h)_c =	0.013	sec
--------------------------------------	-------	-----

Type of liquid storage tank	I
Tanks used for storing drinking water, non-volatile material, low inflammable petrochemicals etc. and intended for emergency services such as fire fighting services. Tanks of post earthquake importance.	1.5
All other tanks with no risk to life and with negligible consequences to environment, society and economy.	1.0

Note- Values of importance factor, I given in IS 1893 (Part 4) may be used where appropriate.

Ground supported tank	
Masonry tank	
a) Masonry wall reinforced with horizontal bands*	1.3
b) Masonry wall reinforced with horizontal bands and vertical bars at corners and jambs of openings	1.5
RC / prestressed tank	
a) Fixed or hinged/pinned base tank (Figures 6a, 6b, 6c)	2.0
b) Anchored flexible base tank (Figure 6d)	2.5
c) Unanchored contained or uncontained tank (Figures 6e, 6f)	1.5
Steel tank	
a) Unanchored base	2.0
b) Anchored base	2.5
Underground RC and steel tank*	
	4.0

Tabla N° 8. Importance Factor, I

Tabla N° 9. Response Reduction factor, R

C4.5.3 –	
Clauses 4.5.2 and 4.5.3, effectively imply response acceleration coefficient (S_a/g) as	
<i>For hard soil sites</i>	
$S_a/g = 2.5$	for $T < 0.4$
$= 1.0/T$	for $T \geq 0.4$
<i>For medium soil sites</i>	
$S_a/g = 2.5$	for $T < 0.55$
$= 1.36/T$	for $T \geq 0.55$
<i>For soft soil sites</i>	
$S_a/g = 2.5$	for $T < 0.67$
$= 1.67/T$	for $T \geq 0.67$

Tabla N° 10. Acceleration coefficient (S_a/g)

4.11 CORTANTE DE LA BASE (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

Base de cizallamiento en la parte inferior de la pared en modo impulsivo

$$V_i = (A_h)_i (m_i + m_w + m_t) g \quad \text{Sección 4.6.1 (IITK-GSDMA)}$$

Vi =	2965714.852	(kN)
-------------	-------------	------

Del mismo modo, basar cizallamiento en el modo de convección.

$$V_e = (A_h)_e m_e g \quad \text{Sección 4.6.2 (IITK-GSDMA)}$$

Vc =	361157.072	(kN)
-------------	------------	------

Cortante basal total en la parte inferior de la pared

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_e^2} \quad \text{Sección 4.6.3 (IITK-GSDMA)}$$

V =	2987624.310	(kN)
------------	-------------	------

4.12 MOMENTO EN LA PARTE INFERIOR DE LA PARED (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

Momento de flexión en la parte inferior de la pared en modo impulsivo

$$M_i = (A_h)_i [m_i h_i + m_w h_w + m_t h_t] g \quad \text{Sección 4.7.1.1 (IITK-GSDMA)}$$

Donde:

$$\begin{aligned} h_w &= \text{altura del C.G. de masa de la pared} &= & 6.10 \quad (\text{m}) \\ h_t &= \text{altura del C.G. de masa de la azotea} &= & 12.606 \quad (\text{m}) \end{aligned}$$

M_i	=	12761.581	(kN-m)
----------------------	----------	-----------	--------

Del mismo modo, momento de flexión en el modo de convección

$$M_c = (A_h)_c m_c h_c g \quad \text{Sección 4.7.1.1 (IITK-GSDMA)}$$

M_c	=	2378.111	(kN-m)
----------------------	----------	----------	--------

Momento de flexión total en la parte inferior de la pared

$$M = \sqrt{M_i^2 + M_c^2} \quad \text{Sección 4.7.3 (IITK-GSDMA)}$$

M	=	12981.269	(kN-m)
----------	----------	-----------	--------

4.13 MOMENTO DE VOLTEO (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

Momento de volteo en la parte inferior de la placa de la base en el modo impulsivo

$$M_i^* = (A_h)_i [m_i (h_i^* + t_b) + m_w (h_w + t_b) + m_t (h_t + t_b) + m_b t_b / 2] g \quad \text{Sección 4.7.1.2 (IITK-GSDMA)}$$

M_i[*]	=	31009.843	(kN-m)
----------------------------------	----------	-----------	--------

Del mismo modo, momento de volteo en modo convectivo

$$M_c^* = (A_h)_c m_c (h_c^* + t_b) g \quad \text{Sección 4.7.1.2 (IITK-GSDMA)}$$

M_c[*]	=	3548.226	(kN-m)
----------------------------------	----------	----------	--------

Momento de volteo total en la parte inferior de la base

$$M^* = \sqrt{M_i^{*2} + M_c^{*2}} \quad \text{Sección 4.7.3 (IITK-GSDMA)}$$

M[*]	=	31212.181	(kN-m)
----------------------	----------	-----------	--------

4.14 PRESION HIDRODINAMICA IMPULSIVA (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

Presión hidrodinámica impulsivo en la pared.

$$p_{iw}(y) = Q_{iw}(y) (A_h)_i \rho g h \cos \phi$$

$$Q_{iw}(y) = 0.866 [1 - (y/h)^2] \tanh(0.866 D/h)$$

La presión máxima se producirá a $\phi=0$
En la base de la pared, $y=0$

$$Q_{iw}(y = 0) = 0.84$$

Impulsiva presión en la base de la pared

$$p_{iw}(y = 0) = 9105.929569 \text{ N/m}^2$$

Presión hidrodinámica impulsivo en la base de losa ($y=0$)

$$p_{ib} = 0.866 (A_h)_i \rho g h \sinh(0.866 x/L) / \cosh(0.866 l'/h)$$

$$p_{ib} = 9105.929569 \text{ N/m}^2$$

4.15 RESULTADO DEL PERIODO DEL MODELAMIENTO
(Tabla N° 11.)

TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	SumUX	RY	RZ	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	5.613262	0.506117	0.506117	0.350734	2.998E-20	0.350734	2.998E-20
MODAL	Mode	674	0.104156	0.073846	0.907543	0.021579	3.954E-09	0.694176	0.3696
MODAL	Mode	533	0.145656	0.055385	0.69577	0.024353	1.107E-08	0.431122	0.239585
MODAL	Mode	684	0.099567	0.032364	0.939921	0.058088	0.0000002	0.752303	0.654651
MODAL	Mode	481	0.160575	0.025155	0.618243	0.011348	9.337E-10	0.383261	0.108044
MODAL	Mode	596	0.127314	0.017379	0.793159	0.007071	3.116E-08	0.584202	0.283811
MODAL	Mode	406	0.179569	0.016921	0.558057	0.003177	1.094E-10	0.358022	0.051076
MODAL	Mode	547	0.142568	0.016678	0.727359	0.034548	1.608E-08	0.469228	0.253649
MODAL	Mode	670	0.104995	0.014758	0.833693	0.000765	0.000001095	0.672597	0.354621
MODAL	Mode	537	0.144801	0.014694	0.710484	0.002779	8.707E-07	0.43391	0.250154
MODAL	Mode	550	0.141286	0.012693	0.740052	0.020087	1.206E-08	0.489316	0.257495
MODAL	Mode	477	0.162193	0.012406	0.593087	0.001092	2.664E-09	0.371913	0.102123
MODAL	Mode	593	0.128347	0.012179	0.77577	0.014825	0.000012	0.57712	0.283802
MODAL	Mode	601	0.126619	0.009125	0.802311	0.009857	0.000041	0.594087	0.334568
MODAL	Mode	696	0.096437	0.009022	0.952571	0.000779	4.223E-07	0.754214	0.773603
MODAL	Mode	408	0.178355	0.008647	0.566703	0.001723	4.35E-09	0.359745	0.051076
MODAL	Mode	647	0.112168	0.008235	0.81638	0.033248	0.000008773	0.66669	0.350634
MODAL	Mode	390	0.182755	0.007899	0.540523	0.00004	1.139E-11	0.354605	0.049385
MODAL	Mode	353	0.195823	0.007247	0.52424	0.000892	4.596E-11	0.35252	0.026999
MODAL	Mode	530	0.147765	0.006782	0.640384	0.002852	1.131E-07	0.40677	0.127513
MODAL	Mode	1006	0.041193	0.005869	0.990337	0.040565	2.759E-07	0.923289	0.944182
MODAL	Mode	700	0.095689	0.005386	0.957957	0.000587	0.000006273	0.754801	0.819785
MODAL	Mode	583	0.132747	0.004956	0.762528	0.020543	2.765E-08	0.562096	0.26397
MODAL	Mode	554	0.141091	0.004761	0.744816	0.009062	1.933E-08	0.498383	0.25755
MODAL	Mode	796	0.069651	0.004698	0.975397	0.024972	0.000007807	0.835137	0.898296
MODAL	Mode	465	0.164131	0.004587	0.578553	0.000374	6.792E-09	0.370495	0.064429
MODAL	Mode	736	0.085422	0.003957	0.96685	0.022004	0.00007	0.787486	0.878486
MODAL	Mode	518	0.150019	0.003755	0.633435	0.003249	1.465E-09	0.400629	0.116846
MODAL	Mode	579	0.133248	0.003734	0.757569	0.014622	4.455E-08	0.541539	0.262285
MODAL	Mode	712	0.092381	0.003532	0.962137	0.008062	0.000181	0.762867	0.864795
MODAL	Mode	486	0.15913	0.003279	0.624669	0.004146	7.032E-10	0.387558	0.109384
MODAL	Mode	692	0.097188	0.003211	0.943548	0.000692	8.531E-09	0.753436	0.760674

	RESUMEN	
--	---------	--

		API	unid.	IITK	unid.	E-30	unid.
Peso Impulsivo	Wi	5770462.02	lb			54276.36	
Masa Impulsivo	Mi			2616542.89	(kg)		
Peso Convectivo	Wc	6060076.16	lb				
Masa Convectivo	Mc			2749940.18	(kg)		

Periodo Convectivo	Tc	5.66	sec	5.61	sec	5.613	sec
Periodo Impulsivo	Ti	0.04	sec	0.19	sec	0.104	sec

Coeficiente sismico	Ah(i)	0.11		0.11		
Coeficiente sismico	Ah(c.)	0.00729		0.01		

(Tabla N° 12. Resumen de cálculos)

4.16 DISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN IMPULSIVA Y CONVECTIVA

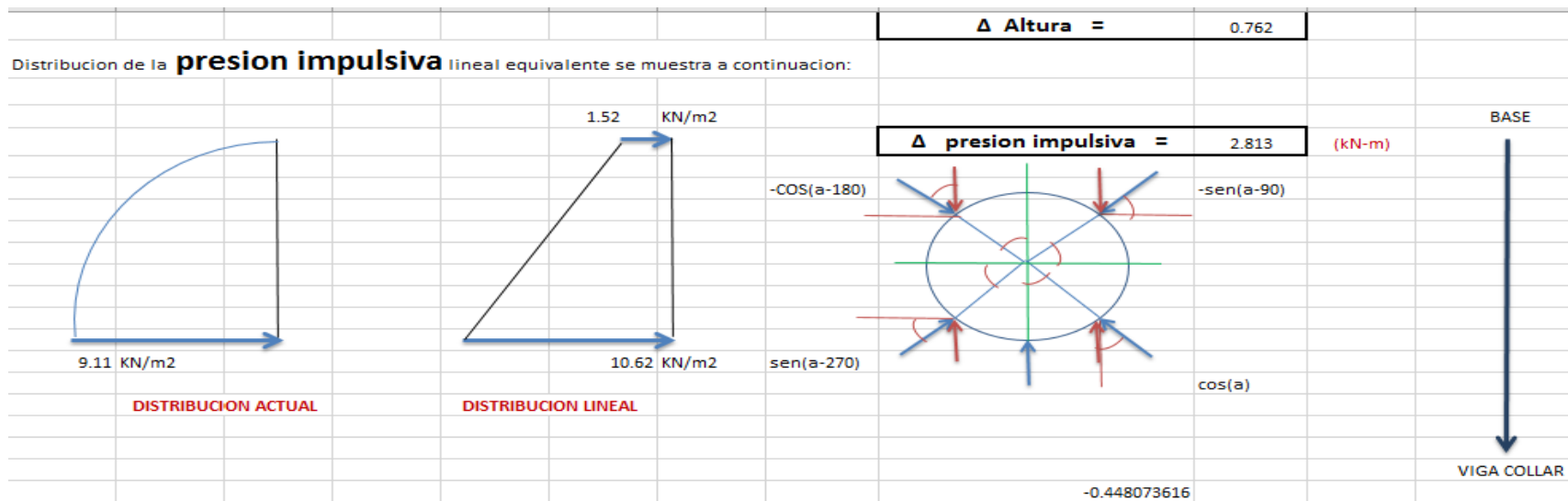


Tabla N° 13. Presión impulsiva en tanque

	PUNTOS	0	2.813	5.625	8.438	11.250	14.063	16.875	19.688	22.500	25.313	28.125	30.938	33.750	36.563	39.375	42.188	45.000
ALTURA																		
0	16	10.62	10.61	10.57	10.51	10.42	10.31	10.17	10.00	9.82	9.60	9.37	9.11	8.83	8.53	8.21	7.87	7.51
0.7619375	15	10.06	10.04	10.01	9.95	9.86	9.75	9.62	9.47	9.29	9.09	8.87	8.62	8.36	8.08	7.77	7.45	7.11
1.523875	14	9.49	9.47	9.44	9.38	9.30	9.20	9.08	8.93	8.76	8.58	8.37	8.14	7.89	7.62	7.33	7.03	6.71
2.2858125	13	8.92	8.91	8.87	8.82	8.75	8.65	8.53	8.40	8.24	8.06	7.86	7.65	7.41	7.16	6.89	6.61	6.31
3.04775	12	8.35	8.34	8.31	8.26	8.19	8.10	7.99	7.86	7.71	7.55	7.36	7.16	6.94	6.70	6.45	6.19	5.90
3.8096875	11	7.78	7.77	7.74	7.69	7.63	7.55	7.44	7.32	7.19	7.03	6.86	6.67	6.47	6.25	6.01	5.76	5.50
4.571625	10	7.21	7.20	7.17	7.13	7.07	6.99	6.90	6.79	6.66	6.52	6.36	6.18	5.99	5.79	5.57	5.34	5.10
5.3335625	9	6.64	6.63	6.61	6.57	6.51	6.44	6.35	6.25	6.13	6.00	5.86	5.70	5.52	5.33	5.13	4.92	4.70
6.0955	8	6.07	6.06	6.04	6.01	5.95	5.89	5.81	5.72	5.61	5.49	5.35	5.21	5.05	4.88	4.69	4.50	4.29
6.8574375	7	5.50	5.50	5.48	5.44	5.40	5.34	5.26	5.18	5.08	4.97	4.85	4.72	4.57	4.42	4.25	4.08	3.89
7.619375	6	4.93	4.93	4.91	4.88	4.84	4.78	4.72	4.64	4.56	4.46	4.35	4.23	4.10	3.96	3.81	3.65	3.49
8.3813125	5	4.36	4.36	4.34	4.32	4.28	4.23	4.18	4.11	4.03	3.94	3.85	3.74	3.63	3.50	3.37	3.23	3.09
9.14325	4	3.79	3.79	3.78	3.75	3.72	3.68	3.63	3.57	3.51	3.43	3.35	3.25	3.15	3.05	2.93	2.81	2.68
9.9051875	3	3.23	3.22	3.21	3.19	3.16	3.13	3.09	3.04	2.98	2.92	2.84	2.77	2.68	2.59	2.49	2.39	2.28
10.667125	2	2.66	2.65	2.64	2.63	2.61	2.58	2.54	2.50	2.45	2.40	2.34	2.28	2.21	2.13	2.05	1.97	1.88
11.4290625	1	2.09	2.08	2.08	2.06	2.05	2.02	2.00	1.96	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.61	1.55	1.48
12.191	0	1.52	1.52	1.51	1.50	1.49	1.47	1.45	1.43	1.40	1.37	1.34	1.30	1.26	1.22	1.17	1.12	1.07

47.813	50.625	53.438	56.250	59.063	61.875	64.688	67.500	70.313	73.125	75.938	78.750	81.563	84.375	87.188	90.000	92.813	95.625	98.438	101.250
7.13	6.74	6.33	5.90	5.46	5.01	4.54	4.07	3.58	3.08	2.58	2.07	1.56	1.04	0.52	0.00	-0.52	-1.04	-1.56	-2.07
6.75	6.38	5.99	5.59	5.17	4.74	4.30	3.85	3.39	2.92	2.44	1.96	1.48	0.99	0.49	0.00	-0.49	-0.99	-1.48	-1.96
6.37	6.02	5.65	5.27	4.88	4.47	4.06	3.63	3.20	2.75	2.30	1.85	1.39	0.93	0.47	0.00	-0.47	-0.93	-1.39	-1.85
5.99	5.66	5.31	4.95	4.58	4.20	3.81	3.41	3.00	2.59	2.17	1.74	1.31	0.87	0.44	0.00	-0.44	-0.87	-1.31	-1.74
5.61	5.30	4.97	4.64	4.29	3.94	3.57	3.19	2.81	2.42	2.03	1.63	1.22	0.82	0.41	0.00	-0.41	-0.82	-1.22	-1.63
5.22	4.93	4.63	4.32	4.00	3.67	3.33	2.98	2.62	2.26	1.89	1.52	1.14	0.76	0.38	0.00	-0.38	-0.76	-1.14	-1.52
4.84	4.57	4.29	4.01	3.71	3.40	3.08	2.76	2.43	2.09	1.75	1.41	1.06	0.71	0.35	0.00	-0.35	-0.71	-1.06	-1.41
4.46	4.21	3.96	3.69	3.41	3.13	2.84	2.54	2.24	1.93	1.61	1.30	0.97	0.65	0.33	0.00	-0.33	-0.65	-0.97	-1.30
4.08	3.85	3.62	3.37	3.12	2.86	2.60	2.32	2.05	1.76	1.48	1.18	0.89	0.60	0.30	0.00	-0.30	-0.60	-0.89	-1.18
3.69	3.49	3.28	3.06	2.83	2.59	2.35	2.11	1.85	1.60	1.34	1.07	0.81	0.54	0.27	0.00	-0.27	-0.54	-0.81	-1.07
3.31	3.13	2.94	2.74	2.54	2.33	2.11	1.89	1.66	1.43	1.20	0.96	0.72	0.48	0.24	0.00	-0.24	-0.48	-0.72	-0.96
2.93	2.77	2.60	2.42	2.24	2.06	1.87	1.67	1.47	1.27	1.06	0.85	0.64	0.43	0.21	0.00	-0.21	-0.43	-0.64	-0.85
2.55	2.41	2.26	2.11	1.95	1.79	1.62	1.45	1.28	1.10	0.92	0.74	0.56	0.37	0.19	0.00	-0.19	-0.37	-0.56	-0.74
2.17	2.05	1.92	1.79	1.66	1.52	1.38	1.23	1.09	0.94	0.78	0.63	0.47	0.32	0.16	0.00	-0.16	-0.32	-0.47	-0.63
1.78	1.68	1.58	1.48	1.37	1.25	1.14	1.02	0.89	0.77	0.65	0.52	0.39	0.26	0.13	0.00	-0.13	-0.26	-0.39	-0.52
1.40	1.32	1.24	1.16	1.07	0.98	0.89	0.80	0.70	0.61	0.51	0.41	0.31	0.20	0.10	0.00	-0.10	-0.20	-0.31	-0.41
1.02	0.96	0.90	0.84	0.78	0.72	0.65	0.58	0.51	0.44	0.37	0.30	0.22	0.15	0.07	0.00	-0.07	-0.15	-0.22	-0.30

104.063	106.875	109.688	112.500	115.313	118.125	120.938	123.750	126.563	129.375	132.188	135.000	137.813	140.625	143.438	146.250	149.063	151.875	154.688	157.500
-2.58	-3.08	-3.58	-4.07	-4.54	-5.01	-5.46	-5.90	-6.33	-6.74	-7.13	-7.51	-7.87	-8.21	-8.53	-8.83	-9.11	-9.37	-9.60	-9.82
-2.44	-2.92	-3.39	-3.85	-4.30	-4.74	-5.17	-5.59	-5.99	-6.38	-6.75	-7.11	-7.45	-7.77	-8.08	-8.36	-8.62	-8.87	-9.09	-9.29
-2.30	-2.75	-3.20	-3.63	-4.06	-4.47	-4.88	-5.27	-5.65	-6.02	-6.37	-6.71	-7.03	-7.33	-7.62	-7.89	-8.14	-8.37	-8.58	-8.76
-2.17	-2.59	-3.00	-3.41	-3.81	-4.20	-4.58	-4.95	-5.31	-5.66	-5.99	-6.31	-6.61	-6.89	-7.16	-7.41	-7.65	-7.86	-8.06	-8.24
-2.03	-2.42	-2.81	-3.19	-3.57	-3.94	-4.29	-4.64	-4.97	-5.30	-5.61	-5.90	-6.19	-6.45	-6.70	-6.94	-7.16	-7.36	-7.55	-7.71
-1.89	-2.26	-2.62	-2.98	-3.33	-3.67	-4.00	-4.32	-4.63	-4.93	-5.22	-5.50	-5.76	-6.01	-6.25	-6.47	-6.67	-6.86	-7.03	-7.19
-1.75	-2.09	-2.43	-2.76	-3.08	-3.40	-3.71	-4.01	-4.29	-4.57	-4.84	-5.10	-5.34	-5.57	-5.79	-5.99	-6.18	-6.36	-6.52	-6.66
-1.61	-1.93	-2.24	-2.54	-2.84	-3.13	-3.41	-3.69	-3.96	-4.21	-4.46	-4.70	-4.92	-5.13	-5.33	-5.52	-5.70	-5.86	-6.00	-6.13
-1.48	-1.76	-2.05	-2.32	-2.60	-2.86	-3.12	-3.37	-3.62	-3.85	-4.08	-4.29	-4.50	-4.69	-4.88	-5.05	-5.21	-5.35	-5.49	-5.61
-1.34	-1.60	-1.85	-2.11	-2.35	-2.59	-2.83	-3.06	-3.28	-3.49	-3.69	-3.89	-4.08	-4.25	-4.42	-4.57	-4.72	-4.85	-4.97	-5.08
-1.20	-1.43	-1.66	-1.89	-2.11	-2.33	-2.54	-2.74	-2.94	-3.13	-3.31	-3.49	-3.65	-3.81	-3.96	-4.10	-4.23	-4.35	-4.46	-4.56
-1.06	-1.27	-1.47	-1.67	-1.87	-2.06	-2.24	-2.42	-2.60	-2.77	-2.93	-3.09	-3.23	-3.37	-3.50	-3.63	-3.74	-3.85	-3.94	-4.03
-0.92	-1.10	-1.28	-1.45	-1.62	-1.79	-1.95	-2.11	-2.26	-2.41	-2.55	-2.68	-2.81	-2.93	-3.05	-3.15	-3.25	-3.35	-3.43	-3.51
-0.78	-0.94	-1.09	-1.23	-1.38	-1.52	-1.66	-1.79	-1.92	-2.05	-2.17	-2.28	-2.39	-2.49	-2.59	-2.68	-2.77	-2.84	-2.92	-2.98
-0.65	-0.77	-0.89	-1.02	-1.14	-1.25	-1.37	-1.48	-1.58	-1.68	-1.78	-1.88	-1.97	-2.05	-2.13	-2.21	-2.28	-2.34	-2.40	-2.45
-0.51	-0.61	-0.70	-0.80	-0.89	-0.98	-1.07	-1.16	-1.24	-1.32	-1.40	-1.48	-1.55	-1.61	-1.68	-1.74	-1.79	-1.84	-1.89	-1.93
-0.37	-0.44	-0.51	-0.58	-0.65	-0.72	-0.78	-0.84	-0.90	-0.96	-1.02	-1.07	-1.12	-1.17	-1.22	-1.26	-1.30	-1.34	-1.37	-1.40

160.313	163.125	165.938	168.750	171.563	174.375	177.188	180.000	182.813	185.625	188.438	191.250	194.063	196.875	199.688	202.500	205.313	208.125	210.938	213.750
-10.00	-10.17	-10.31	-10.42	-10.51	-10.57	-10.61	-10.62	-10.61	-10.57	-10.51	-10.42	-10.31	-10.17	-10.00	-9.82	-9.60	-9.37	-9.11	-8.83
-9.47	-9.62	-9.75	-9.86	-9.95	-10.01	-10.04	-10.06	-10.04	-10.01	-9.95	-9.86	-9.75	-9.62	-9.47	-9.29	-9.09	-8.87	-8.62	-8.36
-8.93	-9.08	-9.20	-9.30	-9.38	-9.44	-9.47	-9.49	-9.47	-9.44	-9.38	-9.30	-9.20	-9.08	-8.93	-8.76	-8.58	-8.37	-8.14	-7.89
-8.40	-8.53	-8.65	-8.75	-8.82	-8.87	-8.91	-8.92	-8.91	-8.87	-8.82	-8.75	-8.65	-8.53	-8.40	-8.24	-8.06	-7.86	-7.65	-7.41
-7.86	-7.99	-8.10	-8.19	-8.26	-8.31	-8.34	-8.35	-8.34	-8.31	-8.26	-8.19	-8.10	-7.99	-7.86	-7.71	-7.55	-7.36	-7.16	-6.94
-7.32	-7.44	-7.55	-7.63	-7.69	-7.74	-7.77	-7.78	-7.77	-7.74	-7.69	-7.63	-7.55	-7.44	-7.32	-7.19	-7.03	-6.86	-6.67	-6.47
-6.79	-6.90	-6.99	-7.07	-7.13	-7.17	-7.20	-7.21	-7.20	-7.17	-7.13	-7.07	-6.99	-6.90	-6.79	-6.66	-6.52	-6.36	-6.18	-5.99
-6.25	-6.35	-6.44	-6.51	-6.57	-6.61	-6.63	-6.64	-6.63	-6.61	-6.57	-6.51	-6.44	-6.35	-6.25	-6.13	-6.00	-5.86	-5.70	-5.52
-5.72	-5.81	-5.89	-5.95	-6.01	-6.04	-6.06	-6.07	-6.06	-6.04	-6.01	-5.95	-5.89	-5.81	-5.72	-5.61	-5.49	-5.35	-5.21	-5.05
-5.18	-5.26	-5.34	-5.40	-5.44	-5.48	-5.50	-5.50	-5.50	-5.48	-5.44	-5.40	-5.34	-5.26	-5.18	-5.08	-4.97	-4.85	-4.72	-4.57
-4.64	-4.72	-4.78	-4.84	-4.88	-4.91	-4.93	-4.93	-4.93	-4.91	-4.88	-4.84	-4.78	-4.72	-4.64	-4.56	-4.46	-4.35	-4.23	-4.10
-4.11	-4.18	-4.23	-4.28	-4.32	-4.34	-4.36	-4.36	-4.36	-4.34	-4.32	-4.28	-4.23	-4.18	-4.11	-4.03	-3.94	-3.85	-3.74	-3.63
-3.57	-3.63	-3.68	-3.72	-3.75	-3.78	-3.79	-3.79	-3.79	-3.78	-3.75	-3.72	-3.68	-3.63	-3.57	-3.51	-3.43	-3.35	-3.25	-3.15
-3.04	-3.09	-3.13	-3.16	-3.19	-3.21	-3.22	-3.23	-3.22	-3.21	-3.19	-3.16	-3.13	-3.09	-3.04	-2.98	-2.92	-2.84	-2.77	-2.68
-2.50	-2.54	-2.58	-2.61	-2.63	-2.64	-2.65	-2.66	-2.65	-2.64	-2.63	-2.61	-2.58	-2.54	-2.50	-2.45	-2.40	-2.34	-2.28	-2.21
-1.96	-2.00	-2.02	-2.05	-2.06	-2.08	-2.08	-2.09	-2.08	-2.08	-2.06	-2.05	-2.02	-2.00	-1.96	-1.93	-1.89	-1.84	-1.79	-1.74
-1.43	-1.45	-1.47	-1.49	-1.50	-1.51	-1.52	-1.52	-1.52	-1.51	-1.50	-1.49	-1.47	-1.45	-1.43	-1.40	-1.37	-1.34	-1.30	-1.26

216.563	219.375	222.188	225.000	227.813	230.625	233.438	236.250	239.063	241.875	244.688	247.500	250.313	253.125	255.938	258.750	261.563	264.375	267.188	270.000
-8.53	-8.21	-7.87	-7.51	-7.13	-6.74	-6.33	-5.90	-5.46	-5.01	-4.54	-4.07	-3.58	-3.08	-2.58	-2.07	-1.56	-1.04	-0.52	0.00
-8.08	-7.77	-7.45	-7.11	-6.75	-6.38	-5.99	-5.59	-5.17	-4.74	-4.30	-3.85	-3.39	-2.92	-2.44	-1.96	-1.48	-0.99	-0.49	0.00
-7.62	-7.33	-7.03	-6.71	-6.37	-6.02	-5.65	-5.27	-4.88	-4.47	-4.06	-3.63	-3.20	-2.75	-2.30	-1.85	-1.39	-0.93	-0.47	0.00
-7.16	-6.89	-6.61	-6.31	-5.99	-5.66	-5.31	-4.95	-4.58	-4.20	-3.81	-3.41	-3.00	-2.59	-2.17	-1.74	-1.31	-0.87	-0.44	0.00
-6.70	-6.45	-6.19	-5.90	-5.61	-5.30	-4.97	-4.64	-4.29	-3.94	-3.57	-3.19	-2.81	-2.42	-2.03	-1.63	-1.22	-0.82	-0.41	0.00
-6.25	-6.01	-5.76	-5.50	-5.22	-4.93	-4.63	-4.32	-4.00	-3.67	-3.33	-2.98	-2.62	-2.26	-1.89	-1.52	-1.14	-0.76	-0.38	0.00
-5.79	-5.57	-5.34	-5.10	-4.84	-4.57	-4.29	-4.01	-3.71	-3.40	-3.08	-2.76	-2.43	-2.09	-1.75	-1.41	-1.06	-0.71	-0.35	0.00
-5.33	-5.13	-4.92	-4.70	-4.46	-4.21	-3.96	-3.69	-3.41	-3.13	-2.84	-2.54	-2.24	-1.93	-1.61	-1.30	-0.97	-0.65	-0.33	0.00
-4.88	-4.69	-4.50	-4.29	-4.08	-3.85	-3.62	-3.37	-3.12	-2.86	-2.60	-2.32	-2.05	-1.76	-1.48	-1.18	-0.89	-0.60	-0.30	0.00
-4.42	-4.25	-4.08	-3.89	-3.69	-3.49	-3.28	-3.06	-2.83	-2.59	-2.35	-2.11	-1.85	-1.60	-1.34	-1.07	-0.81	-0.54	-0.27	0.00
-3.96	-3.81	-3.65	-3.49	-3.31	-3.13	-2.94	-2.74	-2.54	-2.33	-2.11	-1.89	-1.66	-1.43	-1.20	-0.96	-0.72	-0.48	-0.24	0.00
-3.50	-3.37	-3.23	-3.09	-2.93	-2.77	-2.60	-2.42	-2.24	-2.06	-1.87	-1.67	-1.47	-1.27	-1.06	-0.85	-0.64	-0.43	-0.21	0.00
-3.05	-2.93	-2.81	-2.68	-2.55	-2.41	-2.26	-2.11	-1.95	-1.79	-1.62	-1.45	-1.28	-1.10	-0.92	-0.74	-0.56	-0.37	-0.19	0.00
-2.59	-2.49	-2.39	-2.28	-2.17	-2.05	-1.92	-1.79	-1.66	-1.52	-1.38	-1.23	-1.09	-0.94	-0.78	-0.63	-0.47	-0.32	-0.16	0.00
-2.13	-2.05	-1.97	-1.88	-1.78	-1.68	-1.58	-1.48	-1.37	-1.25	-1.14	-1.02	-0.89	-0.77	-0.65	-0.52	-0.39	-0.26	-0.13	0.00
-1.68	-1.61	-1.55	-1.48	-1.40	-1.32	-1.24	-1.16	-1.07	-0.98	-0.89	-0.80	-0.70	-0.61	-0.51	-0.41	-0.31	-0.20	-0.10	0.00
-1.22	-1.17	-1.12	-1.07	-1.02	-0.96	-0.90	-0.84	-0.78	-0.72	-0.65	-0.58	-0.51	-0.44	-0.37	-0.30	-0.22	-0.15	-0.07	0.00

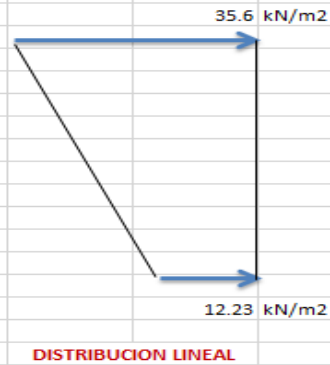
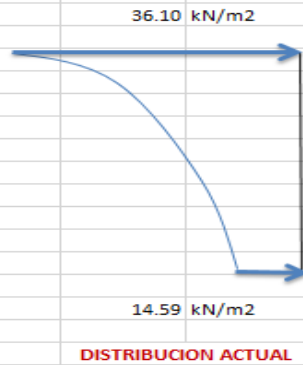
272.813	275.625	278.438	281.250	284.063	286.875	289.688	292.500	295.313	298.125	300.938	303.750	306.563	309.375	312.188	315.000	317.813	320.625	323.438	326.250
0.52	1.04	1.56	2.07	2.58	3.08	3.58	4.07	4.54	5.01	5.46	5.90	6.33	6.74	7.13	7.51	7.87	8.21	8.53	8.83
0.49	0.99	1.48	1.96	2.44	2.92	3.39	3.85	4.30	4.74	5.17	5.59	5.99	6.38	6.75	7.11	7.45	7.77	8.08	8.36
0.47	0.93	1.39	1.85	2.30	2.75	3.20	3.63	4.06	4.47	4.88	5.27	5.65	6.02	6.37	6.71	7.03	7.33	7.62	7.89
0.44	0.87	1.31	1.74	2.17	2.59	3.00	3.41	3.81	4.20	4.58	4.95	5.31	5.66	5.99	6.31	6.61	6.89	7.16	7.41
0.41	0.82	1.22	1.63	2.03	2.42	2.81	3.19	3.57	3.94	4.29	4.64	4.97	5.30	5.61	5.90	6.19	6.45	6.70	6.94
0.38	0.76	1.14	1.52	1.89	2.26	2.62	2.98	3.33	3.67	4.00	4.32	4.63	4.93	5.22	5.50	5.76	6.01	6.25	6.47
0.35	0.71	1.06	1.41	1.75	2.09	2.43	2.76	3.08	3.40	3.71	4.01	4.29	4.57	4.84	5.10	5.34	5.57	5.79	5.99
0.33	0.65	0.97	1.30	1.61	1.93	2.24	2.54	2.84	3.13	3.41	3.69	3.96	4.21	4.46	4.70	4.92	5.13	5.33	5.52
0.30	0.60	0.89	1.18	1.48	1.76	2.05	2.32	2.60	2.86	3.12	3.37	3.62	3.85	4.08	4.29	4.50	4.69	4.88	5.05
0.27	0.54	0.81	1.07	1.34	1.60	1.85	2.11	2.35	2.59	2.83	3.06	3.28	3.49	3.69	3.89	4.08	4.25	4.42	4.57
0.24	0.48	0.72	0.96	1.20	1.43	1.66	1.89	2.11	2.33	2.54	2.74	2.94	3.13	3.31	3.49	3.65	3.81	3.96	4.10
0.21	0.43	0.64	0.85	1.06	1.27	1.47	1.67	1.87	2.06	2.24	2.42	2.60	2.77	2.93	3.09	3.23	3.37	3.50	3.63
0.19	0.37	0.56	0.74	0.92	1.10	1.28	1.45	1.62	1.79	1.95	2.11	2.26	2.41	2.55	2.68	2.81	2.93	3.05	3.15
0.16	0.32	0.47	0.63	0.78	0.94	1.09	1.23	1.38	1.52	1.66	1.79	1.92	2.05	2.17	2.28	2.39	2.49	2.59	2.68
0.13	0.26	0.39	0.52	0.65	0.77	0.89	1.02	1.14	1.25	1.37	1.48	1.58	1.68	1.78	1.88	1.97	2.05	2.13	2.21
0.10	0.20	0.31	0.41	0.51	0.61	0.70	0.80	0.89	0.98	1.07	1.16	1.24	1.32	1.40	1.48	1.55	1.61	1.68	1.74
0.07	0.15	0.22	0.30	0.37	0.44	0.51	0.58	0.65	0.72	0.78	0.84	0.90	0.96	1.02	1.07	1.12	1.17	1.22	1.26

329.063	331.875	334.688	337.500	340.313	343.125	345.938	348.750	351.563	354.375	357.188	360.000
9.11	9.37	9.60	9.82	10.00	10.17	10.31	10.42	10.51	10.57	10.61	10.62
8.62	8.87	9.09	9.29	9.47	9.62	9.75	9.86	9.95	10.01	10.04	10.06
8.14	8.37	8.58	8.76	8.93	9.08	9.20	9.30	9.38	9.44	9.47	9.49
7.65	7.86	8.06	8.24	8.40	8.53	8.65	8.75	8.82	8.87	8.91	8.92
7.16	7.36	7.55	7.71	7.86	7.99	8.10	8.19	8.26	8.31	8.34	8.35
6.67	6.86	7.03	7.19	7.32	7.44	7.55	7.63	7.69	7.74	7.77	7.78
6.18	6.36	6.52	6.66	6.79	6.90	6.99	7.07	7.13	7.17	7.20	7.21
5.70	5.86	6.00	6.13	6.25	6.35	6.44	6.51	6.57	6.61	6.63	6.64
5.21	5.35	5.49	5.61	5.72	5.81	5.89	5.95	6.01	6.04	6.06	6.07
4.72	4.85	4.97	5.08	5.18	5.26	5.34	5.40	5.44	5.48	5.50	5.50
4.23	4.35	4.46	4.56	4.64	4.72	4.78	4.84	4.88	4.91	4.93	4.93
3.74	3.85	3.94	4.03	4.11	4.18	4.23	4.28	4.32	4.34	4.36	4.36
3.25	3.35	3.43	3.51	3.57	3.63	3.68	3.72	3.75	3.78	3.79	3.79
2.77	2.84	2.92	2.98	3.04	3.09	3.13	3.16	3.19	3.21	3.22	3.23
2.28	2.34	2.40	2.45	2.50	2.54	2.58	2.61	2.63	2.64	2.65	2.66
1.79	1.84	1.89	1.93	1.96	2.00	2.02	2.05	2.06	2.08	2.08	2.09
1.30	1.34	1.37	1.40	1.43	1.45	1.47	1.49	1.50	1.51	1.52	1.52

Distribucion de la **presion convectiva** lineal equivalente se muestra a continuacion:

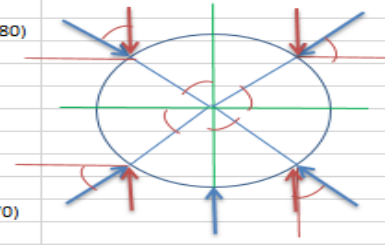
0.00

Distribucion de la presion lineal equivalente convectivo se muestra a continuacion



$-\cos(a-180)$

$\sin(a-270)$



$-\sin(a-90)$

$\cos(a)$

BASE

VIGA COLLAR

Tabla N° 14. Presión convectiva en tanque

	PUNTOS	0	2.813	5.625	8.438	11.250	14.063	16.875	19.688	22.500	25.313	28.125	30.938	33.750	36.563	39.375	42.188	45.000	
0		12.23	12.22	12.17	12.10	12.00	11.86	11.70	11.52	11.30	11.06	10.79	10.49	10.17	9.82	9.45	9.06	8.65	
0.7619375	1	13.69	13.68	13.63	13.54	13.43	13.28	13.10	12.89	12.65	12.38	12.08	11.74	11.38	11.00	10.58	10.15	9.68	
1.523875	2	15.15	15.14	15.08	14.99	14.86	14.70	14.50	14.27	14.00	13.70	13.36	13.00	12.60	12.17	11.71	11.23	10.72	
2.2858125	3	16.62	16.60	16.54	16.44	16.30	16.12	15.90	15.64	15.35	15.02	14.65	14.25	13.82	13.35	12.84	12.31	11.75	
3.04775	4	18.08	18.06	17.99	17.88	17.73	17.54	17.30	17.02	16.70	16.34	15.94	15.51	15.03	14.52	13.97	13.39	12.78	
3.8096875	5	19.54	19.52	19.45	19.33	19.16	18.95	18.70	18.40	18.05	17.66	17.23	16.76	16.25	15.69	15.10	14.48	13.82	
4.571625	6	21.00	20.98	20.90	20.77	20.60	20.37	20.10	19.77	19.40	18.99	18.52	18.01	17.46	16.87	16.23	15.56	14.85	
5.3335625	7	22.46	22.44	22.36	22.22	22.03	21.79	21.50	21.15	20.75	20.31	19.81	19.27	18.68	18.04	17.36	16.64	15.88	
6.0955	8	23.93	23.90	23.81	23.67	23.47	23.21	22.89	22.53	22.10	21.63	21.10	20.52	19.89	19.22	18.49	17.73	16.92	
6.8574375	9	25.39	25.36	25.26	25.11	24.90	24.63	24.29	23.90	23.45	22.95	22.39	21.78	21.11	20.39	19.62	18.81	17.95	
7.619375	10	26.85	26.82	26.72	26.56	26.33	26.04	25.69	25.28	24.81	24.27	23.68	23.03	22.32	21.57	20.75	19.89	18.99	
8.3813125	11	28.31	28.28	28.17	28.00	27.77	27.46	27.09	26.66	26.16	25.59	24.97	24.28	23.54	22.74	21.88	20.98	20.02	
9.14325	12	29.77	29.74	29.63	29.45	29.20	28.88	28.49	28.03	27.51	26.91	26.26	25.54	24.76	23.91	23.01	22.06	21.05	
9.9051875	13	31.23	31.20	31.08	30.90	30.63	30.30	29.89	29.41	28.86	28.24	27.55	26.79	25.97	25.09	24.14	23.14	22.09	
10.667125	14	32.70	32.66	32.54	32.34	32.07	31.72	31.29	30.79	30.21	29.56	28.84	28.04	27.19	26.26	25.27	24.23	23.12	
11.4290625	15	34.16	34.12	33.99	33.79	33.50	33.13	32.69	32.16	31.56	30.88	30.12	29.30	28.40	27.44	26.40	25.31	24.15	
12.191	16	35.62	35.58	35.45	35.23	34.94	34.55	34.09	33.54	32.91	32.20	31.41	30.55	29.62	28.61	27.53	26.39	25.19	
47.813	50.625	53.438	56.250	59.063	61.875	64.688	67.500	70.313	73.125	75.938	78.750	81.563	84.375	87.188	90.000	92.813	95.625	98.438	101.250

8.21	7.76	7.29	6.79	6.29	5.77	5.23	4.68	4.12	3.55	2.97	2.39	1.79	1.20	0.60	0.00	-0.60	-1.20	-1.79	-2.39
9.20	8.69	8.16	7.61	7.04	6.45	5.85	5.24	4.61	3.97	3.33	2.67	2.01	1.34	0.67	0.00	-0.67	-1.34	-2.01	-2.67
10.18	9.61	9.03	8.42	7.79	7.14	6.48	5.80	5.11	4.40	3.68	2.96	2.22	1.49	0.74	0.00	-0.74	-1.49	-2.22	-2.96
11.16	10.54	9.90	9.23	8.54	7.83	7.10	6.36	5.60	4.82	4.04	3.24	2.44	1.63	0.82	0.00	-0.82	-1.63	-2.44	-3.24
12.14	11.47	10.77	10.04	9.29	8.52	7.73	6.92	6.09	5.25	4.39	3.53	2.65	1.77	0.89	0.00	-0.89	-1.77	-2.65	-3.53
13.12	12.40	11.64	10.86	10.05	9.21	8.35	7.48	6.58	5.67	4.75	3.81	2.87	1.92	0.96	0.00	-0.96	-1.92	-2.87	-3.81
14.10	13.32	12.51	11.67	10.80	9.90	8.98	8.04	7.08	6.10	5.10	4.10	3.08	2.06	1.03	0.00	-1.03	-2.06	-3.08	-4.10
15.09	14.25	13.38	12.48	11.55	10.59	9.60	8.60	7.57	6.52	5.46	4.38	3.30	2.20	1.10	0.00	-1.10	-2.20	-3.30	-4.38
16.07	15.18	14.25	13.29	12.30	11.28	10.23	9.16	8.06	6.95	5.81	4.67	3.51	2.35	1.17	0.00	-1.17	-2.35	-3.51	-4.67
17.05	16.11	15.12	14.10	13.05	11.97	10.85	9.72	8.55	7.37	6.17	4.95	3.73	2.49	1.25	0.00	-1.25	-2.49	-3.73	-4.95
18.03	17.03	15.99	14.92	13.80	12.66	11.48	10.27	9.05	7.79	6.52	5.24	3.94	2.63	1.32	0.00	-1.32	-2.63	-3.94	-5.24
19.01	17.96	16.86	15.73	14.55	13.35	12.10	10.83	9.54	8.22	6.88	5.52	4.15	2.77	1.39	0.00	-1.39	-2.77	-4.15	-5.52
19.99	18.89	17.74	16.54	15.31	14.03	12.73	11.39	10.03	8.64	7.23	5.81	4.37	2.92	1.46	0.00	-1.46	-2.92	-4.37	-5.81
20.98	19.81	18.61	17.35	16.06	14.72	13.35	11.95	10.52	9.07	7.59	6.09	4.58	3.06	1.53	0.00	-1.53	-3.06	-4.58	-6.09
21.96	20.74	19.48	18.17	16.81	15.41	13.98	12.51	11.02	9.49	7.94	6.38	4.80	3.20	1.60	0.00	-1.60	-3.20	-4.80	-6.38
22.94	21.67	20.35	18.98	17.56	16.10	14.60	13.07	11.51	9.92	8.30	6.66	5.01	3.35	1.68	0.00	-1.68	-3.35	-5.01	-6.66
23.92	22.60	21.22	19.79	18.31	16.79	15.23	13.63	12.00	10.34	8.65	6.95	5.23	3.49	1.75	0.00	-1.75	-3.49	-5.23	-6.95

104.063	106.875	109.688	112.500	115.313	118.125	120.938	123.750	126.563	129.375	132.188	135.000	137.813	140.625	143.438	146.250	149.063	151.875	154.688	157.500
-2.97	-3.55	-4.12	-4.68	-5.23	-5.77	-6.29	-6.79	-7.29	-7.76	-8.21	-8.65	-9.06	-9.45	-9.82	-10.17	-10.49	-10.79	-11.06	-11.30
-3.33	-3.97	-4.61	-5.24	-5.85	-6.45	-7.04	-7.61	-8.16	-8.69	-9.20	-9.68	-10.15	-10.58	-11.00	-11.38	-11.74	-12.08	-12.38	-12.65
-3.68	-4.40	-5.11	-5.80	-6.48	-7.14	-7.79	-8.42	-9.03	-9.61	-10.18	-10.72	-11.23	-11.71	-12.17	-12.60	-13.00	-13.36	-13.70	-14.00
-4.04	-4.82	-5.60	-6.36	-7.10	-7.83	-8.54	-9.23	-9.90	-10.54	-11.16	-11.75	-12.31	-12.84	-13.35	-13.82	-14.25	-14.65	-15.02	-15.35
-4.39	-5.25	-6.09	-6.92	-7.73	-8.52	-9.29	-10.04	-10.77	-11.47	-12.14	-12.78	-13.39	-13.97	-14.52	-15.03	-15.51	-15.94	-16.34	-16.70
-4.75	-5.67	-6.58	-7.48	-8.35	-9.21	-10.05	-10.86	-11.64	-12.40	-13.12	-13.82	-14.48	-15.10	-15.69	-16.25	-16.76	-17.23	-17.66	-18.05
-5.10	-6.10	-7.08	-8.04	-8.98	-9.90	-10.80	-11.67	-12.51	-13.32	-14.10	-14.85	-15.56	-16.23	-16.87	-17.46	-18.01	-18.52	-18.99	-19.40
-5.46	-6.52	-7.57	-8.60	-9.60	-10.59	-11.55	-12.48	-13.38	-14.25	-15.09	-15.88	-16.64	-17.36	-18.04	-18.68	-19.27	-19.81	-20.31	-20.75
-5.81	-6.95	-8.06	-9.16	-10.23	-11.28	-12.30	-13.29	-14.25	-15.18	-16.07	-16.92	-17.73	-18.49	-19.22	-19.89	-20.52	-21.10	-21.63	-22.10
-6.17	-7.37	-8.55	-9.72	-10.85	-11.97	-13.05	-14.10	-15.12	-16.11	-17.05	-17.95	-18.81	-19.62	-20.39	-21.11	-21.78	-22.39	-22.95	-23.45
-6.52	-7.79	-9.05	-10.27	-11.48	-12.66	-13.80	-14.92	-15.99	-17.03	-18.03	-18.99	-19.89	-20.75	-21.57	-22.32	-23.03	-23.68	-24.27	-24.81
-6.88	-8.22	-9.54	-10.83	-12.10	-13.35	-14.55	-15.73	-16.86	-17.96	-19.01	-20.02	-20.98	-21.88	-22.74	-23.54	-24.28	-24.97	-25.59	-26.16
-7.23	-8.64	-10.03	-11.39	-12.73	-14.03	-15.31	-16.54	-17.74	-18.89	-19.99	-21.05	-22.06	-23.01	-23.91	-24.76	-25.54	-26.26	-26.91	-27.51
-7.59	-9.07	-10.52	-11.95	-13.35	-14.72	-16.06	-17.35	-18.61	-19.81	-20.98	-22.09	-23.14	-24.14	-25.09	-25.97	-26.79	-27.55	-28.24	-28.86
-7.94	-9.49	-11.02	-12.51	-13.98	-15.41	-16.81	-18.17	-19.48	-20.74	-21.96	-23.12	-24.23	-25.27	-26.26	-27.19	-28.04	-28.84	-29.56	-30.21
-8.30	-9.92	-11.51	-13.07	-14.60	-16.10	-17.56	-18.98	-20.35	-21.67	-22.94	-24.15	-25.31	-26.40	-27.44	-28.40	-29.30	-30.12	-30.88	-31.56
-8.65	-10.34	-12.00	-13.63	-15.23	-16.79	-18.31	-19.79	-21.22	-22.60	-23.92	-25.19	-26.39	-27.53	-28.61	-29.62	-30.55	-31.41	-32.20	-32.91
160.313	163.125	165.938	168.750	171.563	174.375	177.188	180.000	182.813	185.625	188.438	191.250	194.063	196.875	199.688	202.500	205.313	208.125	210.938	213.750

-11.52	-11.70	-11.86	-12.00	-12.10	-12.17	-12.22	-12.23	-12.22	-12.17	-12.10	-12.00	-11.86	-11.70	-11.52	-11.30	-11.06	-10.79	-10.49	-10.17
-12.89	-13.10	-13.28	-13.43	-13.54	-13.63	-13.68	-13.69	-13.68	-13.63	-13.54	-13.43	-13.28	-13.10	-12.89	-12.65	-12.38	-12.08	-11.74	-11.38
-14.27	-14.50	-14.70	-14.86	-14.99	-15.08	-15.14	-15.15	-15.14	-15.08	-14.99	-14.86	-14.70	-14.50	-14.27	-14.00	-13.70	-13.36	-13.00	-12.60
-15.64	-15.90	-16.12	-16.30	-16.44	-16.54	-16.60	-16.62	-16.60	-16.54	-16.44	-16.30	-16.12	-15.90	-15.64	-15.35	-15.02	-14.65	-14.25	-13.82
-17.02	-17.30	-17.54	-17.73	-17.88	-17.99	-18.06	-18.08	-18.06	-17.99	-17.88	-17.73	-17.54	-17.30	-17.02	-16.70	-16.34	-15.94	-15.51	-15.03
-18.40	-18.70	-18.95	-19.16	-19.33	-19.45	-19.52	-19.54	-19.52	-19.45	-19.33	-19.16	-18.95	-18.70	-18.40	-18.05	-17.66	-17.23	-16.76	-16.25
-19.77	-20.10	-20.37	-20.60	-20.77	-20.90	-20.98	-21.00	-20.98	-20.90	-20.77	-20.60	-20.37	-20.10	-19.77	-19.40	-18.99	-18.52	-18.01	-17.46
-21.15	-21.50	-21.79	-22.03	-22.22	-22.36	-22.44	-22.46	-22.44	-22.36	-22.22	-22.03	-21.79	-21.50	-21.15	-20.75	-20.31	-19.81	-19.27	-18.68
-22.53	-22.89	-23.21	-23.47	-23.67	-23.81	-23.90	-23.93	-23.90	-23.81	-23.67	-23.47	-23.21	-22.89	-22.53	-22.10	-21.63	-21.10	-20.52	-19.89
-23.90	-24.29	-24.63	-24.90	-25.11	-25.26	-25.36	-25.39	-25.36	-25.26	-25.11	-24.90	-24.63	-24.29	-23.90	-23.45	-22.95	-22.39	-21.78	-21.11
-25.28	-25.69	-26.04	-26.33	-26.56	-26.72	-26.82	-26.85	-26.82	-26.72	-26.56	-26.33	-26.04	-25.69	-25.28	-24.81	-24.27	-23.68	-23.03	-22.32
-26.66	-27.09	-27.46	-27.77	-28.00	-28.17	-28.28	-28.31	-28.28	-28.17	-28.00	-27.77	-27.46	-27.09	-26.66	-26.16	-25.59	-24.97	-24.28	-23.54
-28.03	-28.49	-28.88	-29.20	-29.45	-29.63	-29.74	-29.77	-29.74	-29.63	-29.45	-29.20	-28.88	-28.49	-28.03	-27.51	-26.91	-26.26	-25.54	-24.76
-29.41	-29.89	-30.30	-30.63	-30.90	-31.08	-31.20	-31.23	-31.20	-31.08	-30.90	-30.63	-30.30	-29.89	-29.41	-28.86	-28.24	-27.55	-26.79	-25.97
-30.79	-31.29	-31.72	-32.07	-32.34	-32.54	-32.66	-32.70	-32.66	-32.54	-32.34	-32.07	-31.72	-31.29	-30.79	-30.21	-29.56	-28.84	-28.04	-27.19
-32.16	-32.69	-33.13	-33.50	-33.79	-33.99	-34.12	-34.16	-34.12	-33.99	-33.79	-33.50	-33.13	-32.69	-32.16	-31.56	-30.88	-30.12	-29.30	-28.40
-33.54	-34.09	-34.55	-34.94	-35.23	-35.45	-35.58	-35.62	-35.58	-35.45	-35.23	-34.94	-34.55	-34.09	-33.54	-32.91	-32.20	-31.41	-30.55	-29.62

216.563	219.375	222.188	225.000	227.813	230.625	233.438	236.250	239.063	241.875	244.688	247.500	250.313	253.125	255.938	258.750	261.563	264.375	267.188	270.000
-9.82	-9.45	-9.06	-8.65	-8.21	-7.76	-7.29	-6.79	-6.29	-5.77	-5.23	-4.68	-4.12	-3.55	-2.97	-2.39	-1.79	-1.20	-0.60	0.00
-11.00	-10.58	-10.15	-9.68	-9.20	-8.69	-8.16	-7.61	-7.04	-6.45	-5.85	-5.24	-4.61	-3.97	-3.33	-2.67	-2.01	-1.34	-0.67	0.00
-12.17	-11.71	-11.23	-10.72	-10.18	-9.61	-9.03	-8.42	-7.79	-7.14	-6.48	-5.80	-5.11	-4.40	-3.68	-2.96	-2.22	-1.49	-0.74	0.00
-13.35	-12.84	-12.31	-11.75	-11.16	-10.54	-9.90	-9.23	-8.54	-7.83	-7.10	-6.36	-5.60	-4.82	-4.04	-3.24	-2.44	-1.63	-0.82	0.00
-14.52	-13.97	-13.39	-12.78	-12.14	-11.47	-10.77	-10.04	-9.29	-8.52	-7.73	-6.92	-6.09	-5.25	-4.39	-3.53	-2.65	-1.77	-0.89	0.00
-15.69	-15.10	-14.48	-13.82	-13.12	-12.40	-11.64	-10.86	-10.05	-9.21	-8.35	-7.48	-6.58	-5.67	-4.75	-3.81	-2.87	-1.92	-0.96	0.00
-16.87	-16.23	-15.56	-14.85	-14.10	-13.32	-12.51	-11.67	-10.80	-9.90	-8.98	-8.04	-7.08	-6.10	-5.10	-4.10	-3.08	-2.06	-1.03	0.00
-18.04	-17.36	-16.64	-15.88	-15.09	-14.25	-13.38	-12.48	-11.55	-10.59	-9.60	-8.60	-7.57	-6.52	-5.46	-4.38	-3.30	-2.20	-1.10	0.00
-19.22	-18.49	-17.73	-16.92	-16.07	-15.18	-14.25	-13.29	-12.30	-11.28	-10.23	-9.16	-8.06	-6.95	-5.81	-4.67	-3.51	-2.35	-1.17	0.00
-20.39	-19.62	-18.81	-17.95	-17.05	-16.11	-15.12	-14.10	-13.05	-11.97	-10.85	-9.72	-8.55	-7.37	-6.17	-4.95	-3.73	-2.49	-1.25	0.00
-21.57	-20.75	-19.89	-18.99	-18.03	-17.03	-15.99	-14.92	-13.80	-12.66	-11.48	-10.27	-9.05	-7.79	-6.52	-5.24	-3.94	-2.63	-1.32	0.00
-22.74	-21.88	-20.98	-20.02	-19.01	-17.96	-16.86	-15.73	-14.55	-13.35	-12.10	-10.83	-9.54	-8.22	-6.88	-5.52	-4.15	-2.77	-1.39	0.00
-23.91	-23.01	-22.06	-21.05	-19.99	-18.89	-17.74	-16.54	-15.31	-14.03	-12.73	-11.39	-10.03	-8.64	-7.23	-5.81	-4.37	-2.92	-1.46	0.00
-25.09	-24.14	-23.14	-22.09	-20.98	-19.81	-18.61	-17.35	-16.06	-14.72	-13.35	-11.95	-10.52	-9.07	-7.59	-6.09	-4.58	-3.06	-1.53	0.00
-26.26	-25.27	-24.23	-23.12	-21.96	-20.74	-19.48	-18.17	-16.81	-15.41	-13.98	-12.51	-11.02	-9.49	-7.94	-6.38	-4.80	-3.20	-1.60	0.00
-27.44	-26.40	-25.31	-24.15	-22.94	-21.67	-20.35	-18.98	-17.56	-16.10	-14.60	-13.07	-11.51	-9.92	-8.30	-6.66	-5.01	-3.35	-1.68	0.00
-28.61	-27.53	-26.39	-25.19	-23.92	-22.60	-21.22	-19.79	-18.31	-16.79	-15.23	-13.63	-12.00	-10.34	-8.65	-6.95	-5.23	-3.49	-1.75	0.00
272.813	275.625	278.438	281.250	284.063	286.875	289.688	292.500	295.313	298.125	300.938	303.750	306.563	309.375	312.188	315.000	317.813	320.625	323.438	326.250
0.60	1.20	1.79	2.39	2.97	3.55	4.12	4.68	5.23	5.77	6.29	6.79	7.29	7.76	8.21	8.65	9.06	9.45	9.82	10.17

0.67	1.34	2.01	2.67	3.33	3.97	4.61	5.24	5.85	6.45	7.04	7.61	8.16	8.69	9.20	9.68	10.15	10.58	11.00	11.38
0.74	1.49	2.22	2.96	3.68	4.40	5.11	5.80	6.48	7.14	7.79	8.42	9.03	9.61	10.18	10.72	11.23	11.71	12.17	12.60
0.82	1.63	2.44	3.24	4.04	4.82	5.60	6.36	7.10	7.83	8.54	9.23	9.90	10.54	11.16	11.75	12.31	12.84	13.35	13.82
0.89	1.77	2.65	3.53	4.39	5.25	6.09	6.92	7.73	8.52	9.29	10.04	10.77	11.47	12.14	12.78	13.39	13.97	14.52	15.03
0.96	1.92	2.87	3.81	4.75	5.67	6.58	7.48	8.35	9.21	10.05	10.86	11.64	12.40	13.12	13.82	14.48	15.10	15.69	16.25
1.03	2.06	3.08	4.10	5.10	6.10	7.08	8.04	8.98	9.90	10.80	11.67	12.51	13.32	14.10	14.85	15.56	16.23	16.87	17.46
1.10	2.20	3.30	4.38	5.46	6.52	7.57	8.60	9.60	10.59	11.55	12.48	13.38	14.25	15.09	15.88	16.64	17.36	18.04	18.68
1.17	2.35	3.51	4.67	5.81	6.95	8.06	9.16	10.23	11.28	12.30	13.29	14.25	15.18	16.07	16.92	17.73	18.49	19.22	19.89
1.25	2.49	3.73	4.95	6.17	7.37	8.55	9.72	10.85	11.97	13.05	14.10	15.12	16.11	17.05	17.95	18.81	19.62	20.39	21.11
1.32	2.63	3.94	5.24	6.52	7.79	9.05	10.27	11.48	12.66	13.80	14.92	15.99	17.03	18.03	18.99	19.89	20.75	21.57	22.32
1.39	2.77	4.15	5.52	6.88	8.22	9.54	10.83	12.10	13.35	14.55	15.73	16.86	17.96	19.01	20.02	20.98	21.88	22.74	23.54
1.46	2.92	4.37	5.81	7.23	8.64	10.03	11.39	12.73	14.03	15.31	16.54	17.74	18.89	19.99	21.05	22.06	23.01	23.91	24.76
1.53	3.06	4.58	6.09	7.59	9.07	10.52	11.95	13.35	14.72	16.06	17.35	18.61	19.81	20.98	22.09	23.14	24.14	25.09	25.97
1.60	3.20	4.80	6.38	7.94	9.49	11.02	12.51	13.98	15.41	16.81	18.17	19.48	20.74	21.96	23.12	24.23	25.27	26.26	27.19
1.68	3.35	5.01	6.66	8.30	9.92	11.51	13.07	14.60	16.10	17.56	18.98	20.35	21.67	22.94	24.15	25.31	26.40	27.44	28.40
1.75	3.49	5.23	6.95	8.65	10.34	12.00	13.63	15.23	16.79	18.31	19.79	21.22	22.60	23.92	25.19	26.39	27.53	28.61	29.62

329.063	331.875	334.688	337.500	340.313	343.125	345.938	348.750	351.563	354.375	357.188	360.000
10.49	10.79	11.06	11.30	11.52	11.70	11.86	12.00	12.10	12.17	12.22	12.23
11.74	12.08	12.38	12.65	12.89	13.10	13.28	13.43	13.54	13.63	13.68	13.69
13.00	13.36	13.70	14.00	14.27	14.50	14.70	14.86	14.99	15.08	15.14	15.15
14.25	14.65	15.02	15.35	15.64	15.90	16.12	16.30	16.44	16.54	16.60	16.62
15.51	15.94	16.34	16.70	17.02	17.30	17.54	17.73	17.88	17.99	18.06	18.08
16.76	17.23	17.66	18.05	18.40	18.70	18.95	19.16	19.33	19.45	19.52	19.54
18.01	18.52	18.99	19.40	19.77	20.10	20.37	20.60	20.77	20.90	20.98	21.00
19.27	19.81	20.31	20.75	21.15	21.50	21.79	22.03	22.22	22.36	22.44	22.46
20.52	21.10	21.63	22.10	22.53	22.89	23.21	23.47	23.67	23.81	23.90	23.93
21.78	22.39	22.95	23.45	23.90	24.29	24.63	24.90	25.11	25.26	25.36	25.39
23.03	23.68	24.27	24.81	25.28	25.69	26.04	26.33	26.56	26.72	26.82	26.85
24.28	24.97	25.59	26.16	26.66	27.09	27.46	27.77	28.00	28.17	28.28	28.31
25.54	26.26	26.91	27.51	28.03	28.49	28.88	29.20	29.45	29.63	29.74	29.77
26.79	27.55	28.24	28.86	29.41	29.89	30.30	30.63	30.90	31.08	31.20	31.23
28.04	28.84	29.56	30.21	30.79	31.29	31.72	32.07	32.34	32.54	32.66	32.70
29.30	30.12	30.88	31.56	32.16	32.69	33.13	33.50	33.79	33.99	34.12	34.16
30.55	31.41	32.20	32.91	33.54	34.09	34.55	34.94	35.23	35.45	35.58	35.62

$$F_a = 1.6$$

$$F_v = 2.3$$

$$Q = 1 \quad \text{Factor de escala}$$

0.2	2
0.125	x
0.1	2.4

$$x=2.3$$

Por lo tanto según el API650

$$SDS = Q \cdot F_a \cdot S_s = 0.40$$

$$SD1 = Q \cdot F_v \cdot S1 = 0.29$$

$$SD0 = Q \cdot S_0 = 0.04$$

$$T_s = SD1/SD_s = 0.72$$

$$T_o = 0.2 SD1/SD_s = 0.14$$

Therefore

$$SDS = Q F_a S_s$$

$$SD1 = Q F_v S_1$$

$$SD0 = Q S_0$$

$$T_s = SD1/SD_s$$

$$T_o = 0.2 SD1/SD_s$$

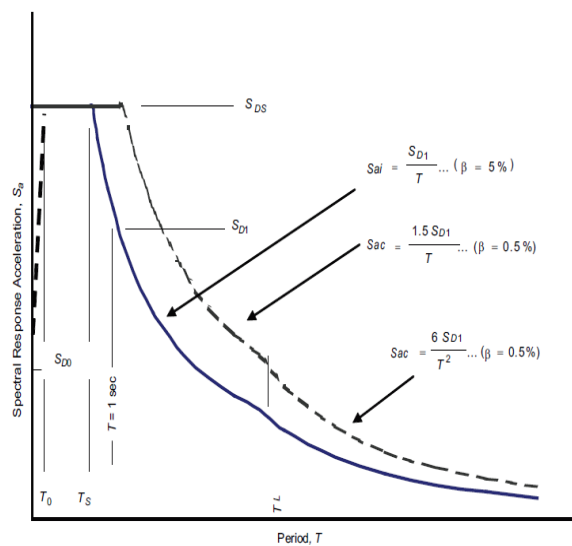
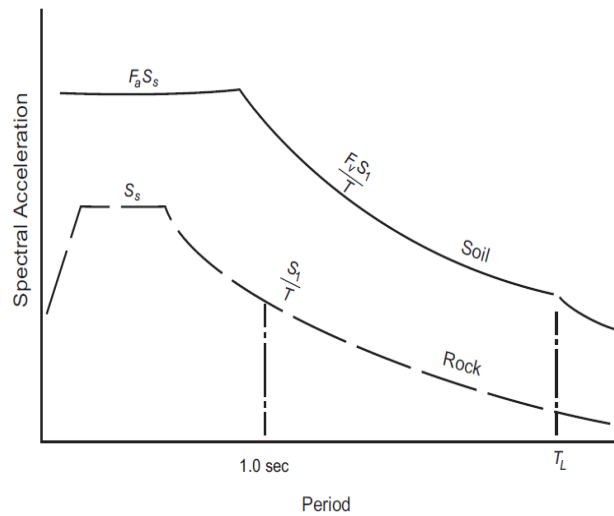


Figure EC.7—Design Response Spectra for Ground-Supported Liquid Storage Tanks

PERIODO	Sa		ESPECTRO API650				
0	0.04	0.39	0.24	2.65	0.11	1.06	0.64
0.14	0.40	3.92	2.35	2.7	0.11	1.04	0.63
0.72	0.40	3.92	2.35	2.75	0.10	1.03	0.62
0.7	0.41	4.03	2.42	2.8	0.10	1.01	0.60
0.75	0.38	3.76	2.26	2.85	0.10	0.99	0.59
0.8	0.36	3.53	2.12	2.9	0.10	0.97	0.58
0.85	0.34	3.32	1.99	2.95	0.10	0.96	0.57
0.9	0.32	3.13	1.88	3	0.10	0.94	0.56
0.95	0.30	2.97	1.78	3.05	0.09	0.92	0.55
1	0.29	2.82	1.69	3.1	0.09	0.91	0.55
1.05	0.27	2.69	1.61	3.15	0.09	0.90	0.54
1.1	0.26	2.56	1.54	3.2	0.09	0.88	0.53
1.15	0.25	2.45	1.47	3.25	0.09	0.87	0.52
1.2	0.24	2.35	1.41	3.3	0.09	0.85	0.51
1.25	0.23	2.26	1.35	3.35	0.09	0.84	0.51
1.3	0.22	2.17	1.30	3.4	0.08	0.83	0.50
1.35	0.21	2.09	1.25	3.45	0.08	0.82	0.49
1.4	0.21	2.01	1.21	3.5	0.08	0.81	0.48
1.45	0.20	1.95	1.17	3.55	0.08	0.79	0.48
1.5	0.19	1.88	1.13	3.6	0.08	0.78	0.47
1.55	0.19	1.82	1.09	3.65	0.08	0.77	0.46
1.6	0.18	1.76	1.06	3.7	0.08	0.76	0.46
1.65	0.17	1.71	1.03	3.75	0.08	0.75	0.45
1.7	0.17	1.66	1.00	3.8	0.08	0.74	0.45
1.75	0.16	1.61	0.97	3.85	0.07	0.73	0.44
1.8	0.16	1.57	0.94	3.9	0.07	0.72	0.43
1.85	0.16	1.52	0.91	3.95	0.07	0.71	0.43
1.9	0.15	1.48	0.89	4	0.07	0.71	0.42
1.95	0.15	1.45	0.87	4.05	0.07	0.70	0.42
2	0.14	1.41	0.85	4.1	0.07	0.69	0.41
2.05	0.14	1.38	0.83	4.15	0.07	0.68	0.41
2.1	0.14	1.34	0.81	4.2	0.07	0.67	0.40
2.15	0.13	1.31	0.79	4.25	0.07	0.66	0.40
2.2	0.13	1.28	0.77	4.3	0.07	0.66	0.39
2.25	0.13	1.25	0.75	4.35	0.07	0.65	0.39
2.3	0.13	1.23	0.74	4.4	0.07	0.64	0.38
2.35	0.12	1.20	0.72	4.45	0.06	0.63	0.38
2.4	0.12	1.18	0.71	4.5	0.06	0.63	0.38
2.45	0.12	1.15	0.69	4.55	0.06	0.62	0.37
2.5	0.12	1.13	0.68	4.6	0.06	0.61	0.37
2.55	0.11	1.11	0.66	4.65	0.06	0.61	0.36
2.6	0.11	1.08	0.65				
				4.7	0.06	0.60	0.36
				4.75	0.06	0.59	0.36

4.8	0.06	0.59	0.35				
4.85	0.06	0.58	0.35	5.95	0.05	0.47	0.28
4.9	0.06	0.58	0.35	6	0.05	0.47	0.28
4.95	0.06	0.57	0.34	6.05	0.05	0.47	0.28
5	0.06	0.56	0.34	6.1	0.05	0.46	0.28
5.05	0.06	0.56	0.34	6.15	0.05	0.46	0.28
5.1	0.06	0.55	0.33	6.2	0.05	0.45	0.27
5.15	0.06	0.55	0.33	6.25	0.05	0.45	0.27
5.2	0.06	0.54	0.33	6.3	0.05	0.45	0.27
5.25	0.05	0.54	0.32	6.35	0.05	0.44	0.27
5.3	0.05	0.53	0.32	6.4	0.04	0.44	0.26
5.35	0.05	0.53	0.32	6.45	0.04	0.44	0.26
5.4	0.05	0.52	0.31	6.5	0.04	0.43	0.26
5.45	0.05	0.52	0.31	6.55	0.04	0.43	0.26
5.5	0.05	0.51	0.31	6.6	0.04	0.43	0.26
5.55	0.05	0.51	0.30	6.65	0.04	0.42	0.25
5.6	0.05	0.50	0.30	6.7	0.04	0.42	0.25
5.65	0.05	0.50	0.30	6.75	0.04	0.42	0.25
5.7	0.05	0.49	0.30	6.8	0.04	0.41	0.25
5.75	0.05	0.49	0.29	6.85	0.04	0.41	0.25
5.8	0.05	0.49	0.29	6.9	0.04	0.41	0.25
5.85	0.05	0.48	0.29	6.95	0.04	0.41	0.24
5.9	0.05	0.48	0.29	7	0.04	0.40	0.24

Tabla N° 17. Espectros: API650

4.17.2 Earthquake Response Spectrum (Según: IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Edición: octubre 2007)

Donde:

Z= Factor de zona dado en la Tabla 2 de IS 1893 = 0.15 C4.5.3
I= Factor de importancia = 1.5 Tabla 1
R= Factor de reducción = 2.5 Tabla 2

$$\frac{Z}{2} \frac{I}{R} = 0.045$$

$$(A_h)_i = \frac{Z}{2} \frac{I}{R} \left(\frac{S_a}{g} \right)_i$$

PERIODO	Sa	Sa*R
0	1.10	2.76
0.05	1.10	2.76
0.10	1.10	2.76
0.15	1.10	2.76
0.20	1.10	2.76
0.25	1.10	2.76
0.3	1.10	2.76
0.35	1.10	2.76
0.40	1.10	2.76
0.45	1.10	2.76
0.50	1.10	2.76
0.55	1.10	2.76
0.6	1.10	2.76
0.65	1.10	2.76
0.70	1.05	2.63
0.75	0.98	2.46
0.80	0.92	2.30
0.85	0.87	2.17
0.90	0.82	2.05
0.95	0.78	1.94
1.00	0.74	1.84
1.05	0.70	1.76
1.1	0.67	1.68
1.15	0.64	1.60
1.20	0.61	1.54
1.25	0.59	1.47
1.3	0.57	1.42
1.35	0.55	1.37
1.40	0.53	1.32
1.45	0.51	1.27
1.50	0.49	1.23
1.55	0.48	1.19
1.60	0.46	1.15
1.65	0.45	1.12
1.70	0.43	1.08
1.75	0.42	1.05
1.8	0.41	1.02
1.85	0.40	1.00
1.90	0.39	0.97
1.95	0.38	0.95
2	0.37	0.92
2.05	0.36	0.90
2.10	0.35	0.88
2.15	0.34	0.86
2.20	0.34	0.84
2.25	0.33	0.82
2.30	0.32	0.80
2.35	0.31	0.78
2.40	0.31	0.77

2.45	0.30	0.75
2.5	0.29	0.74
2.55	0.29	0.72
2.60	0.28	0.71
2.65	0.28	0.70
2.7	0.27	0.68
2.75	0.27	0.67
2.80	0.26	0.66
2.85	0.26	0.65
2.90	0.25	0.64
2.95	0.25	0.62
3.00	0.25	0.61
3.05	0.24	0.60
3.10	0.24	0.59
3.15	0.23	0.59
3.2	0.23	0.58
3.25	0.23	0.57
3.30	0.22	0.56
3.35	0.22	0.55
3.4	0.22	0.54
3.45	0.21	0.53
3.50	0.21	0.53
3.55	0.21	0.52
3.60	0.20	0.51
3.65	0.20	0.50
3.70	0.20	0.50
3.75	0.20	0.49
3.80	0.19	0.49
3.85	0.19	0.48
3.9	0.19	0.47
3.95	0.19	0.47
4.00	0.18	0.46
4.05	0.18	0.46
4.1	0.18	0.45
4.15	0.18	0.44
4.20	0.18	0.44
4.25	0.17	0.43
4.30	0.17	0.43
4.35	0.17	0.42
4.40	0.17	0.42
4.45	0.17	0.41
4.50	0.16	0.41
4.55	0.16	0.41
4.6	0.16	0.40
4.65	0.16	0.40
4.70	0.16	0.39
4.75	0.16	0.39
4.8	0.15	0.38
4.85	0.15	0.38
4.90	0.15	0.38

4.95	0.15	0.37
5.00	0.15	0.37
5.05	0.15	0.36
5.10	0.14	0.36
5.15	0.14	0.36
5.20	0.14	0.35
5.25	0.14	0.35
5.3	0.14	0.35
5.35	0.14	0.34
5.40	0.14	0.34
5.45	0.14	0.34
5.5	0.13	0.34
5.55	0.13	0.33
5.60	0.13	0.33
5.65	0.13	0.33
5.70	0.13	0.32
5.75	0.13	0.32
5.80	0.13	0.32
5.85	0.13	0.32
5.90	0.12	0.31
5.95	0.12	0.31
6	0.12	0.31
6.05	0.12	0.30
6.10	0.12	0.30
6.15	0.12	0.30
6.2	0.12	0.30
6.25	0.12	0.29
6.30	0.12	0.29
6.35	0.12	0.29
6.40	0.12	0.29
6.45	0.11	0.29
6.50	0.11	0.28
6.55	0.11	0.28
6.60	0.11	0.28
6.65	0.11	0.28
6.7	0.11	0.28
6.75	0.11	0.27
6.80	0.11	0.27
6.85	0.11	0.27
6.9	0.11	0.27
6.95	0.11	0.27
7.00	0.11	0.26
7.05	0.10	0.26

(Tabla N° 18. GSDMA)

Espectros: IITK-

4.17.3 Aceleración Espectral (Según: Norma Técnica E-030, Diseño Sismorresistente del 2014 y Diseño Sismorresistente del 2016)

E-0.30 -
ANTIGUA

E0.30 -
2016

Z	0.15	0.1
U	1.5	1.5
C	2.5	2.5
S	1.4	2
R	2.5	2.5

$T_p = 1$ $T_L = 1.6$

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} \cdot g$$

0.126

0.120

E-0.30 - ANTIGUA 2014	
T	Sa
0	3.09
0.05	3.09
0.1	3.09
0.15	3.09
0.2	3.09
0.25	3.09
0.3	3.09
0.35	3.09
0.4	3.09
0.45	3.09
0.5	3.09
0.55	3.09
0.6	3.09
0.65	3.09
0.7	3.09
0.75	3.09
0.8	3.09
0.85	3.09
0.9	3.09
0.95	2.93
1	2.78
1.05	2.65
1.1	2.53
1.15	2.42

$$T < T_p \quad C = 2.5$$

$$T_p < T < T_L \quad C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p}{T} \right)$$

$$T > T_L \quad C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T^2} \right)$$

E-0.30 - ENERO 2016	
T	Sa
0	2.94
0.05	2.94
0.1	2.94
0.15	2.94
0.2	2.94
0.25	2.94
0.3	2.94
0.35	2.94
0.4	2.94
0.45	2.94
0.5	2.94
0.55	2.94
0.6	2.94
0.65	2.94
0.7	2.94
0.75	2.94
0.8	2.94
0.85	2.94
0.9	2.94
0.95	2.94
1	2.94
1.05	2.80
1.1	2.68
1.15	2.56

1.2	2.32
1.25	2.22
1.3	2.14
1.35	2.06
1.4	1.99
1.45	1.92
1.5	1.85
1.55	1.79
1.6	1.74
1.65	1.69
1.7	1.64
1.75	1.59
1.8	1.55
1.85	1.50
1.9	1.46
1.95	1.43
2	1.39
2.05	1.36
2.1	1.32
2.15	1.29
2.2	1.26
2.25	1.24
2.3	1.21
2.35	1.18
2.4	1.16
2.45	1.14
2.5	1.11
2.55	1.09
2.6	1.07
2.65	1.05
2.7	1.03
2.75	1.01
2.8	0.99
2.85	0.98
2.9	0.96
2.95	0.94
3	0.93
3.05	0.91
3.1	0.90
3.15	0.88
3.2	0.87
3.25	0.86
3.3	0.84

1.2	2.45
1.25	2.35
1.3	2.26
1.35	2.18
1.4	2.10
1.45	2.03
1.5	1.96
1.55	1.90
1.6	1.84
1.65	1.73
1.7	1.63
1.75	1.54
1.8	1.45
1.85	1.38
1.9	1.30
1.95	1.24
2	1.18
2.05	1.12
2.1	1.07
2.15	1.02
2.2	0.97
2.25	0.93
2.3	0.89
2.35	0.85
2.4	0.82
2.45	0.78
2.5	0.75
2.55	0.72
2.6	0.70
2.65	0.67
2.7	0.65
2.75	0.62
2.8	0.60
2.85	0.58
2.9	0.56
2.95	0.54
3	0.52
3.05	0.51
3.1	0.49
3.15	0.47
3.2	0.46
3.25	0.45
3.3	0.43

3.35	0.83
3.4	0.82
3.45	0.81
3.5	0.79
3.55	0.78
3.6	0.77
3.65	0.76
3.7	0.75
3.75	0.74
3.8	0.73
3.85	0.72
3.9	0.71
3.95	0.70
4	0.70
4.05	0.69
4.1	0.68
4.15	0.67
4.2	0.66
4.25	0.65
4.3	0.65
4.35	0.64
4.4	0.63
4.45	0.62
4.5	0.62
4.55	0.61
4.6	0.60
4.65	0.60
4.7	0.59
4.75	0.59
4.8	0.58
4.85	0.57
4.9	0.57
4.95	0.56
5	0.56
5.05	0.55
5.1	0.55
5.15	0.54
5.2	0.53
5.25	0.53
5.3	0.52
5.35	0.52
5.4	0.52
5.45	0.51

3.35	0.42
3.4	0.41
3.45	0.40
3.5	0.38
3.55	0.37
3.6	0.36
3.65	0.35
3.7	0.34
3.75	0.33
3.8	0.33
3.85	0.32
3.9	0.31
3.95	0.30
4	0.29
4.05	0.29
4.1	0.28
4.15	0.27
4.2	0.27
4.25	0.26
4.3	0.25
4.35	0.25
4.4	0.24
4.45	0.24
4.5	0.23
4.55	0.23
4.6	0.22
4.65	0.22
4.7	0.21
4.75	0.21
4.8	0.20
4.85	0.20
4.9	0.20
4.95	0.19
5	0.19
5.05	0.18
5.1	0.18
5.15	0.18
5.2	0.17
5.25	0.17
5.3	0.17
5.35	0.16
5.4	0.16
5.45	0.16

5.5	0.51
5.55	0.50
5.6	0.50
5.65	0.49
5.7	0.49
5.75	0.48
5.8	0.48
5.85	0.48
5.9	0.47
5.95	0.47
6	0.46
6.05	0.46
6.1	0.46
6.15	0.45
6.2	0.45
6.25	0.44
6.3	0.44
6.35	0.44
6.4	0.43
6.45	0.43
6.5	0.43
6.55	0.42
6.6	0.42
6.65	0.42
6.7	0.42
6.75	0.41
6.8	0.41
6.85	0.41
6.9	0.40
6.95	0.40
7	0.40

5.5	0.16
5.55	0.15
5.6	0.15
5.65	0.15
5.7	0.14
5.75	0.14
5.8	0.14
5.85	0.14
5.9	0.14
5.95	0.13
6	0.13
6.05	0.13
6.1	0.13
6.15	0.12
6.2	0.12
6.25	0.12
6.3	0.12
6.35	0.12
6.4	0.11
6.45	0.11
6.5	0.11
6.55	0.11
6.6	0.11
6.65	0.11
6.7	0.10
6.75	0.10
6.8	0.10
6.85	0.10
6.9	0.10
6.95	0.10
7	0.10

Tabla N° 19. Espectros: Norma Tècnica E-030

4.17.4

Earthquake Response Spectrum RESUMEN (Tabla N° 20)

API650		IITK-GSDMA		E0.30		E0.30 (2016)	
PERIODO		PERIODO		PERIODO		PERIODO	
0	0.24	0	2.76	0	3.09	0	2.94
0.14	2.35	0.05	2.76	0.05	3.09	0.05	2.94
0.69	2.35	0.10	2.76	0.1	3.09	0.1	2.94
0.7	2.42	0.15	2.76	0.15	3.09	0.15	2.94
0.75	2.26	0.20	2.76	0.2	3.09	0.2	2.94
0.8	2.12	0.25	2.76	0.25	3.09	0.25	2.94
0.85	1.99	0.3	2.76	0.3	3.09	0.3	2.94
0.9	1.88	0.35	2.76	0.35	3.09	0.35	2.94
0.95	1.78	0.40	2.76	0.4	3.09	0.4	2.94
1	1.69	0.45	2.76	0.45	3.09	0.45	2.94
1.05	1.61	0.50	2.76	0.5	3.09	0.5	2.94
1.1	1.54	0.55	2.76	0.55	3.09	0.55	2.94
1.15	1.47	0.6	2.76	0.6	3.09	0.6	2.94
1.2	1.41	0.65	2.76	0.65	3.09	0.65	2.94
1.25	1.35	0.70	2.63	0.7	3.09	0.7	2.94
1.3	1.30	0.75	2.46	0.75	3.09	0.75	2.94
1.35	1.25	0.80	2.30	0.8	3.09	0.8	2.94
1.4	1.21	0.85	2.17	0.85	3.09	0.85	2.94
1.45	1.17	0.90	2.05	0.9	3.09	0.9	2.94
1.5	1.13	0.95	1.94	0.95	2.93	0.95	2.94
1.55	1.09	1.00	1.84	1	2.78	1	2.94
1.6	1.06	1.05	1.76	1.05	2.65	1.05	2.80
1.65	1.03	1.1	1.68	1.1	2.53	1.1	2.68
1.7	1.00	1.15	1.60	1.15	2.42	1.15	2.56
1.75	0.97	1.20	1.54	1.2	2.32	1.2	2.45
1.8	0.94	1.25	1.47	1.25	2.22	1.25	2.35
1.85	0.91	1.3	1.42	1.3	2.14	1.3	2.26
1.9	0.89	1.35	1.37	1.35	2.06	1.35	2.18
1.95	0.87	1.40	1.32	1.4	1.99	1.4	2.10
2	0.85	1.45	1.27	1.45	1.92	1.45	2.03
2.05	0.83	1.50	1.23	1.5	1.85	1.5	1.96
2.1	0.81	1.55	1.19	1.55	1.79	1.55	1.90
2.15	0.79	1.60	1.15	1.6	1.74	1.6	1.84
2.2	0.77	1.65	1.12	1.65	1.69	1.65	1.73
2.25	0.75	1.70	1.08	1.7	1.64	1.7	1.63
2.3	0.74	1.75	1.05	1.75	1.59	1.75	1.54
2.35	0.72	1.8	1.02	1.8	1.55	1.8	1.45
2.4	0.71	1.85	1.00	1.85	1.50	1.85	1.38
2.45	0.69	1.90	0.97	1.9	1.46	1.9	1.30
2.5	0.68	1.95	0.95	1.95	1.43	1.95	1.24
2.55	0.66	2	0.92	2	1.39	2	1.18
2.6	0.65	2.05	0.90	2.05	1.36	2.05	1.12
2.65	0.64	2.10	0.88	2.1	1.32	2.1	1.07
2.7	0.63	2.15	0.86	2.15	1.29	2.15	1.02
2.75	0.62	2.20	0.84	2.2	1.26	2.2	0.97

2.8	0.60	2.25	0.82	2.25	1.24	2.25	0.93
2.85	0.59	2.30	0.80	2.3	1.21	2.3	0.89
2.9	0.58	2.35	0.78	2.35	1.18	2.35	0.85
2.95	0.57	2.40	0.77	2.4	1.16	2.4	0.82
3	0.56	2.45	0.75	2.45	1.14	2.45	0.78
3.05	0.55	2.5	0.74	2.5	1.11	2.5	0.75
3.1	0.55	2.55	0.72	2.55	1.09	2.55	0.72
3.15	0.54	2.60	0.71	2.6	1.07	2.6	0.70
3.2	0.53	2.65	0.70	2.65	1.05	2.65	0.67
3.25	0.52	2.7	0.68	2.7	1.03	2.7	0.65
3.3	0.51	2.75	0.67	2.75	1.01	2.75	0.62
3.35	0.51	2.80	0.66	2.8	0.99	2.8	0.60
3.4	0.50	2.85	0.65	2.85	0.98	2.85	0.58
3.45	0.49	2.90	0.64	2.9	0.96	2.9	0.56
3.5	0.48	2.95	0.62	2.95	0.94	2.95	0.54
3.55	0.48	3.00	0.61	3	0.93	3	0.52
3.6	0.47	3.05	0.60	3.05	0.91	3.05	0.51
3.65	0.46	3.10	0.59	3.1	0.90	3.1	0.49
3.7	0.46	3.15	0.59	3.15	0.88	3.15	0.47
3.75	0.45	3.2	0.58	3.2	0.87	3.2	0.46
3.8	0.45	3.25	0.57	3.25	0.86	3.25	0.45
3.85	0.44	3.30	0.56	3.3	0.84	3.3	0.43
3.9	0.43	3.35	0.55	3.35	0.83	3.35	0.42
3.95	0.43	3.4	0.54	3.4	0.82	3.4	0.41
4	0.42	3.45	0.53	3.45	0.81	3.45	0.40
4.05	0.42	3.50	0.53	3.5	0.79	3.5	0.38
4.1	0.41	3.55	0.52	3.55	0.78	3.55	0.37
4.15	0.41	3.60	0.51	3.6	0.77	3.6	0.36
4.2	0.40	3.65	0.50	3.65	0.76	3.65	0.35
4.25	0.40	3.70	0.50	3.7	0.75	3.7	0.34
4.3	0.39	3.75	0.49	3.75	0.74	3.75	0.33
4.35	0.39	3.80	0.49	3.8	0.73	3.8	0.33
4.4	0.38	3.85	0.48	3.85	0.72	3.85	0.32
4.45	0.38	3.9	0.47	3.9	0.71	3.9	0.31
4.5	0.38	3.95	0.47	3.95	0.70	3.95	0.30
4.55	0.37	4.00	0.46	4	0.70	4	0.29
4.6	0.37	4.05	0.46	4.05	0.69	4.05	0.29
4.65	0.36	4.1	0.45	4.1	0.68	4.1	0.28
4.7	0.36	4.15	0.44	4.15	0.67	4.15	0.27
4.75	0.36	4.20	0.44	4.2	0.66	4.2	0.27
4.8	0.35	4.25	0.43	4.25	0.65	4.25	0.26
4.85	0.35	4.30	0.43	4.3	0.65	4.3	0.25
4.9	0.35	4.35	0.42	4.35	0.64	4.35	0.25
4.95	0.34	4.40	0.42	4.4	0.63	4.4	0.24
5	0.34	4.45	0.41	4.45	0.62	4.45	0.24
5.05	0.34	4.50	0.41	4.5	0.62	4.5	0.23
5.1	0.33	4.55	0.41	4.55	0.61	4.55	0.23
5.15	0.33	4.6	0.40	4.6	0.60	4.6	0.22
5.2	0.33	4.65	0.40	4.65	0.60	4.65	0.22
5.25	0.32	4.70	0.39	4.7	0.59	4.7	0.21
5.3	0.32	4.75	0.39	4.75	0.59	4.75	0.21

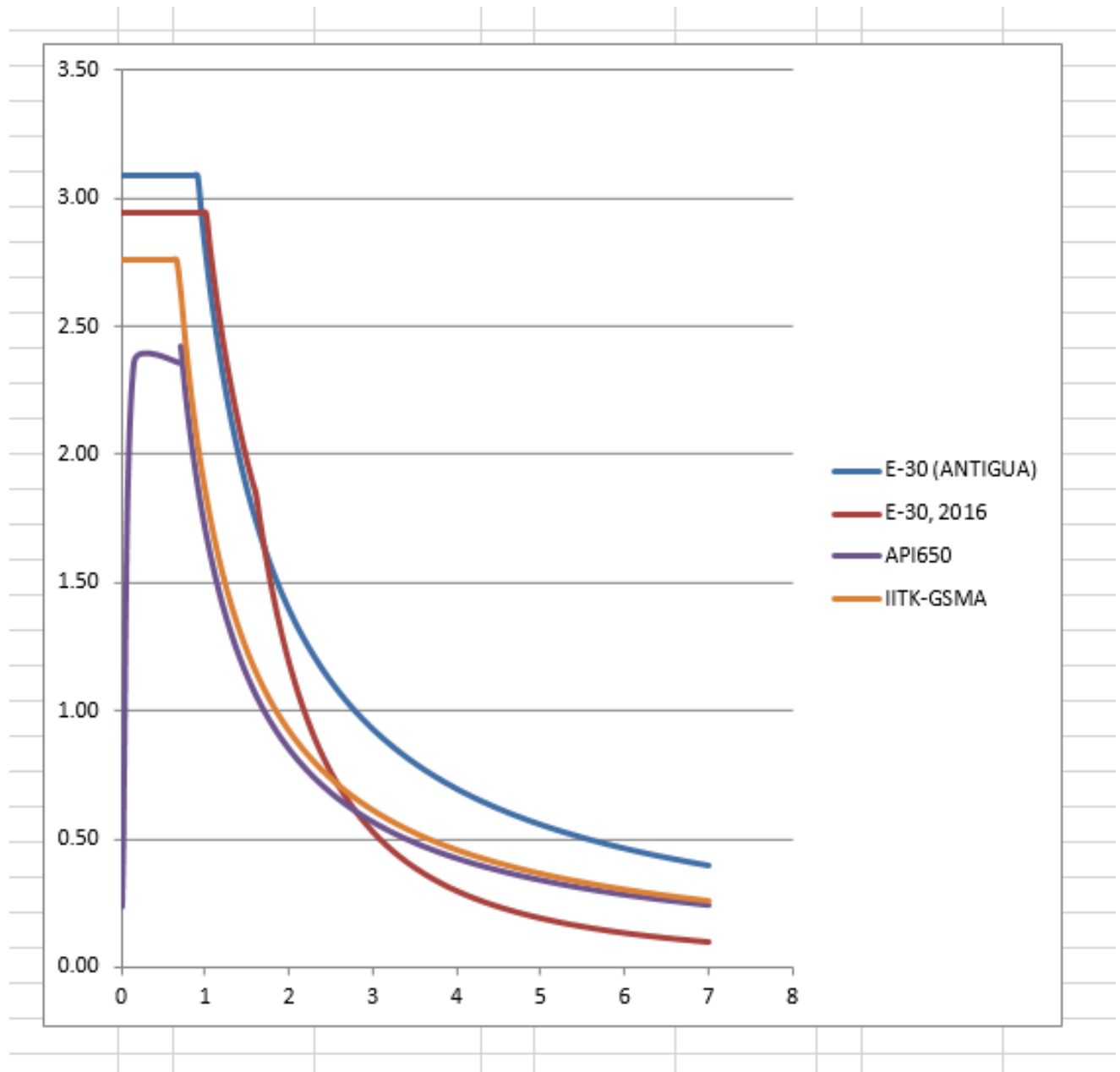
5.35	0.32
5.4	0.31
5.45	0.31
5.5	0.31
5.55	0.30
5.6	0.30
5.65	0.30
5.7	0.30
5.75	0.29
5.8	0.29
5.85	0.29
5.9	0.29
5.95	0.28
6	0.28
6.05	0.28
6.1	0.28
6.15	0.28
6.2	0.27
6.25	0.27
6.3	0.27
6.35	0.27
6.4	0.26
6.45	0.26
6.5	0.26
6.55	0.26
6.6	0.26
6.65	0.25
6.7	0.25
6.75	0.25
6.8	0.25
6.85	0.25
6.9	0.25
6.95	0.24
7	0.24

4.8	0.38
4.85	0.38
4.90	0.38
4.95	0.37
5.00	0.37
5.05	0.36
5.10	0.36
5.15	0.36
5.20	0.35
5.25	0.35
5.3	0.35
5.35	0.34
5.40	0.34
5.45	0.34
5.5	0.34
5.55	0.33
5.60	0.33
5.65	0.33
5.70	0.32
5.75	0.32
5.80	0.32
5.85	0.32
5.90	0.31
5.95	0.31
6	0.31
6.05	0.30
6.10	0.30
6.15	0.30
6.2	0.30
6.25	0.29
6.30	0.29
6.35	0.29
6.40	0.29
6.45	0.29
6.50	0.28
6.55	0.28
6.60	0.28
6.65	0.28
6.7	0.28
6.75	0.27
6.80	0.27
6.85	0.27
6.9	0.27
6.95	0.27
7.00	0.26

4.8	0.58
4.85	0.57
4.9	0.57
4.95	0.56
5	0.56
5.05	0.55
5.1	0.55
5.15	0.54
5.2	0.53
5.25	0.53
5.3	0.52
5.35	0.52
5.4	0.52
5.45	0.51
5.5	0.51
5.55	0.50
5.6	0.50
5.65	0.49
5.7	0.49
5.75	0.48
5.8	0.48
5.85	0.48
5.9	0.47
5.95	0.47
6	0.46
6.05	0.46
6.1	0.46
6.15	0.45
6.2	0.45
6.25	0.44
6.3	0.44
6.35	0.44
6.4	0.43
6.45	0.43
6.5	0.43
6.55	0.42
6.6	0.42
6.65	0.42
6.7	0.42
6.75	0.41
6.8	0.41
6.85	0.41
6.9	0.40
6.95	0.40
7	0.40

4.8	0.20
4.85	0.20
4.9	0.20
4.95	0.19
5	0.19
5.05	0.18
5.1	0.18
5.15	0.18
5.2	0.17
5.25	0.17
5.3	0.17
5.35	0.16
5.4	0.16
5.45	0.16
5.5	0.16
5.55	0.15
5.6	0.15
5.65	0.15
5.7	0.14
5.75	0.14
5.8	0.14
5.85	0.14
5.9	0.14
5.95	0.13
6	0.13
6.05	0.13
6.1	0.13
6.15	0.12
6.2	0.12
6.25	0.12
6.3	0.12
6.35	0.12
6.4	0.11
6.45	0.11
6.5	0.11
6.55	0.11
6.6	0.11
6.65	0.11
6.7	0.10
6.75	0.10
6.8	0.10
6.85	0.10
6.9	0.10
6.95	0.10
7	0.10

4.18 GRAFICA DE ESPECTROS DE LAS NORMAS (Figura N° 60)



4.19 CÁLCULO DEL VIENTO:

4.19.1 CARGA DE VIENTO EN ESTANQUES (Según: Numeral E.5.2 - E.5.2.1 (K) del API650 del 2007)

La norma API 650 indica que la velocidad de diseño (V) es de 160 km/h

factores que se aplican a las expresiones según el API650 Edición 2007 corresponda

la presión de viento (de diseño) es de $0.86 \cdot (V/160)^2$ KPa, aplicada en el área vertical que proyectan las superficies cilíndricas

$$\begin{aligned}(1)- P_{cilindrica} &= 0.86 \cdot (V/160)^2 \\(1)- P_{cilindrica} &= 0.86 \cdot (95/160)^2 \\(1)- P_{cilindrica} &= 0.30 \quad \text{KPa}\end{aligned}$$

La presión de viento (de diseño) es de $1.44 \cdot (V/160)^2$ KPa, aplicada al área horizontal producida por superficies cónicas o curvadas.

$$\begin{aligned}(2)- P_{techo} &= 1.44 \cdot (V/160)^2 \\(2)- P_{techo} &= 1.44 \cdot (95/160)^2 \\(2)- P_{techo} &= 0.51 \quad \text{KPa}\end{aligned}$$

NOTA: La Norma E.020, indica la velocidad de diseño hasta 10m de altura será la velocidad máxima adecuada de zona de ubicación de la estructura (En el Mapa Eólico del Perú indica que en zona de Loreto es 95)

4.19.2 Carga de viento en Estanques (Según: Norma Técnica E-020, Cargas)

$$C = 0.7$$

kgf/m2	kPa
1	0.00980665

kgf/m2			KPa	
h	Vh	Ph	Ph	
1.00	95.00	31.59	0.31	
10.00	95.00	31.59	0.31	
10.50	96.03	32.27	0.32	
11.00	97.01	32.94	0.32	
11.50	97.97	33.59	0.33	
12.19	99.23	34.46	0.34	
12.30	99.43	34.60	0.34	
12.50	99.78	34.85	0.34	
12.70	100.13	35.09	0.34	
13.00	100.64	35.45	0.35	
13.02	100.68	35.48	0.35	

Tabla N° 21. Carga de viento en Estanques a cada altura

12.3 VELOCIDAD DE DISEÑO

La velocidad de diseño del viento hasta 10 m de altura será la velocidad máxima adecuada a la zona de ubicación de la edificación (Ver Anexo 2) pero no menos de 75 Km/h. La velocidad de diseño del viento en cada altura de la edificación se obtendrá de la siguiente expresión.

$$V_h = V(h/10)^{0.22}$$

Donde:

V_h : es la velocidad de diseño en la altura h en Km/h
 V : es la velocidad de diseño hasta 10 m de altura en Km/h
 h : es la altura sobre el terreno en metros

12.4 CARGA EXTERIOR DE VIENTO

La carga exterior (presión o succión) ejercida por el viento se supondrá estática y perpendicular a la superficie sobre la cual se actúa. Se calculará mediante la expresión:

$$P_h = 0.005 C V_h^2$$

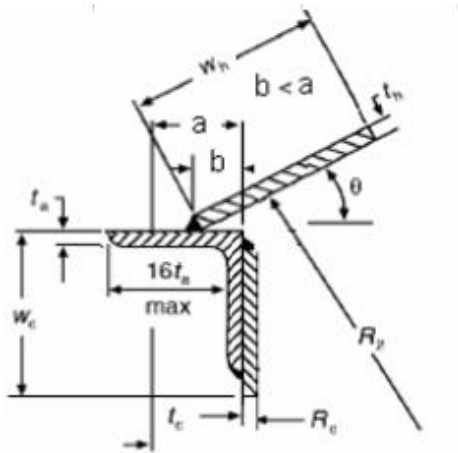
Donde:

P_h : presión o succión del viento a una altura h en Kg/m²
 C : factor de forma adimensional indicado en la Tabla 4
 V_h : velocidad de diseño a la altura h, en Km/h, definida en el Artículo 12 (12.3)

Tabla N° 22. Factores de Forma (C)

CONSTRUCCIÓN	BARLOVENTO	SOTAVENTO
Superficies verticales de edificios	+0.8	-0.6
Anuncios, muros aislados, elementos con una dimensión corta en la dirección del viento	+1.5	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular o elíptica	+0.7	
Tanques de agua, chimeneas, y otros de sección cuadrada o rectangular	+2.0	
Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda 45°	±0.8	-0.5
Superficies inclinadas a 15° o menos	+0.3	-0.6

4.20 PRESIÓN INTERNA



Notas:

A: longitud desde el filo del anillo hasta el eje neutral del ángulo
B: longitud desde el filo del anillo hasta el tope de la lámina del techo
 W_c : máxima distancia considerada del cuerpo, se determina con $W_c = 0.6(R_c \cdot T_s)^{0.5}$
 R_c : radio interior del tanque (radio nominal del tanque – espesor del último anillo).
 W_h : máxima longitud considerada del techo, determina con $W_h = 0.3(R^2 \cdot T_h)^{0.5}$
 T_s : espesor del último anillo más placa de refuerzo, por lo contrario, $t_s = t_c$

$R2=Rc/\text{sen}\theta$, donde θ es ángulo de la pendiente del techo.

Th= espesor de la placa del techo

Ts: espesor de la pata del ángulo.

Tb: espesor de la barra o ala del ángulo.

Calculo del área de compresión:

$$Dc= 26.74 \quad (\text{Diámetro de tanque})$$

$$Rc = Dc/2 \text{ m}$$

$$Rc = 13.37 \text{ m}$$

$$Rc = 13370 \text{ mm}$$

Donde:

Dc= Diámetro de tanque

Rc= Radio de Tanque

Posteriormente, se calcula Wc:

$$Wc = 0.6*(Rc*6)^{0.5} \text{ (mm)}$$

$$Wc = 169.9388125 \text{ mm}$$

Donde:

Wc= Máxima Longitud del cuerpo

Primero, se calcula la pendiente del techo

línea vertical del Tanque. Primero, se calcula la pendiente del techo en grados (para efecto de drenaje), siendo esta de 3/4 pulg por cada pie de longitud.

$$X = (3/4 \text{ plg.})*(1 \text{ pie}/12 \text{ plg})$$

$$X = 1/16 \text{ pie}$$

$$\theta = \text{ARCTAN}(X)$$

$$\theta = 3.58 \text{ deg}$$

Posteriormente, se calcula

$$R2= Rc*\text{sen}\theta$$

$$R2 = 214118.2267 \text{ mm}$$

Calcular la longitud efectiva

$$Wh = 0.3*(Rc*5)^{0.5} \text{ mm}$$

$$Wh = 310.4081217 \text{ mm}$$

Calcular el área de compresión Acomp, debido a la presión ejercida dentro del tanque.

El area de sección transversal del ángulo superior, en pulgadas ^2, más las áreas de sección transversal de las placas del casco y el techo dentro de una distancia de 16 veces sus espesores, medidas a partir de su punto de sujeción más remoto al ángulo superior, deberá ser:

100x100x6mm

$$A_{\text{perfil}} :=$$

$$A_{\text{perfil}} = 1155.2 \text{ mm}^2 \quad 1.79056 \text{ in}^2$$

$$A_{\text{techo}} := W_h \cdot (t_h \cdot 16)$$

$$A_{\text{techo}} = 24832.64973 \text{ mm}^2 \quad 38.4906071 \text{ in}^2$$

$$A_{\text{pared}} := W_c \cdot (t_c \cdot 16)$$

$$A_{\text{pared}} = 16314.126 \text{ mm}^2 \quad 25.2868953 \text{ in}^2$$

$$A_{\text{comp}} := A_{\text{perfil}} + A_{\text{techo}} + A_{\text{pared}}$$

$$A_{\text{comp}} = 42301.97574 \text{ mm}^2 \quad 65.5680624 \text{ in}^2$$

con los valores anteriormente calculados para el area, se puede calcular la presión interna de diseño

DATOS DEL MATERIAL A-36		
$\sigma_y =$	2530.00	kg/cm ²
$\sigma_y =$	248.11	Mpa
$\sigma_d =$	165.41	Mpa

$$\eta := 8 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^3}$$

factor según el API 650

$$\sigma_d := (\sigma_y) \cdot \left(\frac{2}{3}\right)$$

$$P_i := \left[\frac{(\sigma_d) \cdot A_{\text{comp}} \cdot \tan(\theta)}{D^2} \right] + (\eta \cdot t_h)$$

$$P_i = 1.66 \text{ psi}$$

$$P_i = 11.47 \text{ kPa}$$

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

Aplicando la norma API para un mismo espectro arrojó un periodo convectivo T_c de 5.66 seg y un periodo impulsivo T_i de 0.04 seg y al considerar la normativa propuesta por el Instituto tecnológico Kanpur de la India(IITK) se determinan un periodo convectivo T_c de 5.61 seg y un periodo impulsivo de 0.19 seg; asimismo, los coeficientes sísmico horizontal para el modo impulsivo y modo convectivo según API fue de 0.18 y 0.01085 seg y para IITK fue de 0.11 y 0.01 seg, respectivamente.

CAPÍTULO VI

6.00 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

6.1. CONCLUSIONES:

La norma peruana de diseño sismorresistente válida en todos sus extremos para edificaciones, y es válida para el diseño de tanques en sus aspectos de espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento, periodos de vibración, así como el del factor zona.

El modelo numérico dinámico modal espectral del tanque de almacenamiento de petróleo, aplicando el espectro de la norma peruana E.030-2016, considera un suelo de clase D arrojó los siguientes valores:

$$SDs = 0.63, SD1 = 0.43, SDo = 0.04, Ts = 0.69 \text{ y } To = 0.14$$

El periodo convectivo según las normas IITK-GSDMA, API650 y el modelo (E-30), son del mismo orden de magnitud.

El periodo impulsivo según las normas IITK-GSDMA, API650 y el modelo (E-30), son coincidentes de la misma orden de magnitud.

Los valores de fuerza global (cortantes y otros) según las normas IITK-GSDMA, API650 y el modelo (E-30), son coincidentes

Los primeros modos del modelo del tanque lleno del líquido indica: que el modo convectivo es mayor y los últimos modos; el modo impulsivo es menor, esto se debe a aquel periodo impulsivo, el periodo que acompaña al tanque

Los valores de carga de viento según las normas API650 y el modelo (E-30), son coincidentes

El módulo numérico estático equivalente para el diseño del tanque de almacenamiento de petróleo, aplicando la norma peruana E.030-2016, arrojó los valores que se presentan.

RESUMEN		
---------	--	--

		API	unid.	IITK	unid.	E-30	unid.
Peso Impulsivo	Wi	5770462.02	lb			54276.36	
Masa Impulsivo	Mi			2616542.89	(kg)		
Peso Convectivo	Wc	6060076.16	lb				
Masa Convectivo	Mc			2749940.18	(kg)		
Periodo Convectivo	Tc	5.66	sec	5.61	sec	5.613	sec
Periodo Impulsivo	Ti	0.04	sec	0.19	sec	0.104	sec
Coefficiente sismico	Ah(i)	0.11		0.11			
Coefficiente sismico	Ah(c.)	0.00729		0.01			

RESUMEN DE LOS ESPECTRO DE RESPUESTA A TERREMOTOS

API650		IITK-GSDMA		E0.30		E0.30 (2016)	
PERIODO		PERIODO		PERIODO		PERIODO	
0	0.24	0	2.76	0	3.09	0	2.94
0.14	2.35	0.05	2.76	0.05	3.09	0.05	2.94
0.69	2.35	0.10	2.76	0.1	3.09	0.1	2.94
0.7	2.42	0.15	2.76	0.15	3.09	0.15	2.94
0.75	2.26	0.20	2.76	0.2	3.09	0.2	2.94
0.8	2.12	0.25	2.76	0.25	3.09	0.25	2.94
0.85	1.99	0.3	2.76	0.3	3.09	0.3	2.94
0.9	1.88	0.35	2.76	0.35	3.09	0.35	2.94
0.95	1.78	0.40	2.76	0.4	3.09	0.4	2.94
1	1.69	0.45	2.76	0.45	3.09	0.45	2.94
1.05	1.61	0.50	2.76	0.5	3.09	0.5	2.94
1.1	1.54	0.55	2.76	0.55	3.09	0.55	2.94
1.15	1.47	0.6	2.76	0.6	3.09	0.6	2.94
1.2	1.41	0.65	2.76	0.65	3.09	0.65	2.94
1.25	1.35	0.70	2.63	0.7	3.09	0.7	2.94
1.3	1.30	0.75	2.46	0.75	3.09	0.75	2.94
1.35	1.25	0.80	2.30	0.8	3.09	0.8	2.94
1.4	1.21	0.85	2.17	0.85	3.09	0.85	2.94
1.45	1.17	0.90	2.05	0.9	3.09	0.9	2.94
1.5	1.13	0.95	1.94	0.95	2.93	0.95	2.94
1.55	1.09	1.00	1.84	1	2.78	1	2.94
1.6	1.06	1.05	1.76	1.05	2.65	1.05	2.80
1.65	1.03	1.1	1.68	1.1	2.53	1.1	2.68
1.7	1.00	1.15	1.60	1.15	2.42	1.15	2.56
1.75	0.97	1.20	1.54	1.2	2.32	1.2	2.45
1.8	0.94	1.25	1.47	1.25	2.22	1.25	2.35
1.85	0.91	1.3	1.42	1.3	2.14	1.3	2.26
1.9	0.89	1.35	1.37	1.35	2.06	1.35	2.18
1.95	0.87	1.40	1.32	1.4	1.99	1.4	2.10
2	0.85	1.45	1.27	1.45	1.92	1.45	2.03
2.05	0.83	1.50	1.23	1.5	1.85	1.5	1.96
2.1	0.81	1.55	1.19	1.55	1.79	1.55	1.90
2.15	0.79	1.60	1.15	1.6	1.74	1.6	1.84
2.2	0.77	1.65	1.12	1.65	1.69	1.65	1.73
2.25	0.75	1.70	1.08	1.7	1.64	1.7	1.63
2.3	0.74	1.75	1.05	1.75	1.59	1.75	1.54

2.35	0.72	1.8	1.02	1.8	1.55	1.8	1.45
2.4	0.71	1.85	1.00	1.85	1.50	1.85	1.38
2.45	0.69	1.90	0.97	1.9	1.46	1.9	1.30
2.5	0.68	1.95	0.95	1.95	1.43	1.95	1.24
2.55	0.66	2	0.92	2	1.39	2	1.18
2.6	0.65	2.05	0.90	2.05	1.36	2.05	1.12
2.65	0.64	2.10	0.88	2.1	1.32	2.1	1.07
2.7	0.63	2.15	0.86	2.15	1.29	2.15	1.02
2.75	0.62	2.20	0.84	2.2	1.26	2.2	0.97
2.8	0.60	2.25	0.82	2.25	1.24	2.25	0.93
2.85	0.59	2.30	0.80	2.3	1.21	2.3	0.89
2.9	0.58	2.35	0.78	2.35	1.18	2.35	0.85
2.95	0.57	2.40	0.77	2.4	1.16	2.4	0.82
3	0.56	2.45	0.75	2.45	1.14	2.45	0.78
3.05	0.55	2.5	0.74	2.5	1.11	2.5	0.75
3.1	0.55	2.55	0.72	2.55	1.09	2.55	0.72
3.15	0.54	2.60	0.71	2.6	1.07	2.6	0.70
3.2	0.53	2.65	0.70	2.65	1.05	2.65	0.67
3.25	0.52	2.7	0.68	2.7	1.03	2.7	0.65
3.3	0.51	2.75	0.67	2.75	1.01	2.75	0.62
3.35	0.51	2.80	0.66	2.8	0.99	2.8	0.60
3.4	0.50	2.85	0.65	2.85	0.98	2.85	0.58
3.45	0.49	2.90	0.64	2.9	0.96	2.9	0.56
3.5	0.48	2.95	0.62	2.95	0.94	2.95	0.54
3.55	0.48	3.00	0.61	3	0.93	3	0.52
3.6	0.47	3.05	0.60	3.05	0.91	3.05	0.51
3.65	0.46	3.10	0.59	3.1	0.90	3.1	0.49
3.7	0.46	3.15	0.59	3.15	0.88	3.15	0.47
3.75	0.45	3.2	0.58	3.2	0.87	3.2	0.46
3.8	0.45	3.25	0.57	3.25	0.86	3.25	0.45
3.85	0.44	3.30	0.56	3.3	0.84	3.3	0.43
3.9	0.43	3.35	0.55	3.35	0.83	3.35	0.42
3.95	0.43	3.4	0.54	3.4	0.82	3.4	0.41
4	0.42	3.45	0.53	3.45	0.81	3.45	0.40
4.05	0.42	3.50	0.53	3.5	0.79	3.5	0.38
4.1	0.41	3.55	0.52	3.55	0.78	3.55	0.37
4.15	0.41	3.60	0.51	3.6	0.77	3.6	0.36
4.2	0.40	3.65	0.50	3.65	0.76	3.65	0.35
4.25	0.40	3.70	0.50	3.7	0.75	3.7	0.34
4.3	0.39	3.75	0.49	3.75	0.74	3.75	0.33
4.35	0.39	3.80	0.49	3.8	0.73	3.8	0.33
4.4	0.38	3.85	0.48	3.85	0.72	3.85	0.32
4.45	0.38	3.9	0.47	3.9	0.71	3.9	0.31
4.5	0.38	3.95	0.47	3.95	0.70	3.95	0.30
4.55	0.37	4.00	0.46	4	0.70	4	0.29
4.6	0.37	4.05	0.46	4.05	0.69	4.05	0.29
4.65	0.36	4.1	0.45	4.1	0.68	4.1	0.28
4.7	0.36	4.15	0.44	4.15	0.67	4.15	0.27
4.75	0.36	4.20	0.44	4.2	0.66	4.2	0.27
4.8	0.35	4.25	0.43	4.25	0.65	4.25	0.26
4.85	0.35	4.30	0.43	4.3	0.65	4.3	0.25
4.9	0.35	4.35	0.42	4.35	0.64	4.35	0.25
4.95	0.34	4.40	0.42	4.4	0.63	4.4	0.24
5	0.34	4.45	0.41	4.45	0.62	4.45	0.24
5.05	0.34	4.50	0.41	4.5	0.62	4.5	0.23
5.1	0.33	4.55	0.41	4.55	0.61	4.55	0.23

5.15	0.33
5.2	0.33
5.25	0.32
5.3	0.32
5.35	0.32
5.4	0.31
5.45	0.31
5.5	0.31
5.55	0.30
5.6	0.30
5.65	0.30
5.7	0.30
5.75	0.29
5.8	0.29
5.85	0.29
5.9	0.29
5.95	0.28
6	0.28
6.05	0.28
6.1	0.28
6.15	0.28
6.2	0.27
6.25	0.27
6.3	0.27
6.35	0.27
6.4	0.26
6.45	0.26
6.5	0.26
6.55	0.26
6.6	0.26
6.65	0.25
6.7	0.25
6.75	0.25
6.8	0.25
6.85	0.25
6.9	0.25
6.95	0.24
7	0.24

4.6	0.40
4.65	0.40
4.70	0.39
4.75	0.39
4.8	0.38
4.85	0.38
4.90	0.38
4.95	0.37
5.00	0.37
5.05	0.36
5.10	0.36
5.15	0.36
5.20	0.35
5.25	0.35
5.3	0.35
5.35	0.34
5.40	0.34
5.45	0.34
5.5	0.34
5.55	0.33
5.60	0.33
5.65	0.33
5.70	0.32
5.75	0.32
5.80	0.32
5.85	0.32
5.90	0.31
5.95	0.31
6	0.31
6.05	0.30
6.10	0.30
6.15	0.30
6.2	0.30
6.25	0.29
6.30	0.29
6.35	0.29
6.40	0.29
6.45	0.29
6.50	0.28
6.55	0.28
6.60	0.28
6.65	0.28
6.7	0.28
6.75	0.27
6.80	0.27
6.85	0.27
6.9	0.27
6.95	0.27
7.00	0.26

4.6	0.60
4.65	0.60
4.7	0.59
4.75	0.59
4.8	0.58
4.85	0.57
4.9	0.57
4.95	0.56
5	0.56
5.05	0.55
5.1	0.55
5.15	0.54
5.2	0.53
5.25	0.53
5.3	0.52
5.35	0.52
5.4	0.52
5.45	0.51
5.5	0.51
5.55	0.50
5.6	0.50
5.65	0.49
5.7	0.49
5.75	0.48
5.8	0.48
5.85	0.48
5.9	0.47
5.95	0.47
6	0.46
6.05	0.46
6.1	0.46
6.15	0.45
6.2	0.45
6.25	0.44
6.3	0.44
6.35	0.44
6.4	0.43
6.45	0.43
6.5	0.43
6.55	0.42
6.6	0.42
6.65	0.42
6.7	0.42
6.75	0.41
6.8	0.41
6.85	0.41
6.9	0.40
6.95	0.40
7	0.40

4.6	0.22
4.65	0.22
4.7	0.21
4.75	0.21
4.8	0.20
4.85	0.20
4.9	0.20
4.95	0.19
5	0.19
5.05	0.18
5.1	0.18
5.15	0.18
5.2	0.17
5.25	0.17
5.3	0.17
5.35	0.16
5.4	0.16
5.45	0.16
5.5	0.16
5.55	0.15
5.6	0.15
5.65	0.15
5.7	0.14
5.75	0.14
5.8	0.14
5.85	0.14
5.9	0.14
5.95	0.13
6	0.13
6.05	0.13
6.1	0.13
6.15	0.12
6.2	0.12
6.25	0.12
6.3	0.12
6.35	0.12
6.4	0.11
6.45	0.11
6.5	0.11
6.55	0.11
6.6	0.11
6.65	0.11
6.7	0.10
6.75	0.10
6.8	0.10
6.85	0.10
6.9	0.10
6.95	0.10
7	0.10

6.2. RECOMENDACIONES:

Se recomienda evaluar el cumplimiento del modelo contrastando diseños existentes de tanques diseñados aplicando las normas del API650 Y IITK, existentes en Iquitos-Loreto y Talara-Piura, por ejemplo. Se recomienda, aplicar específicamente el modelo IITK.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

1. ALGREANE, S, ; OSMAN, S,; KARIM, O. Y KASA, A. (2011). Study the fluid structure interaction due to dynamic response of elevated concrete water tank. Australian Journal of basic and Applied Sciences, 5(9): 1084-1087. (Consulta: 01 de octubre 2015) (<http://ajbasweb.com/old/ajbas/2011/September-2011/1084-1087.pdf>).
2. American Petroleum Institute. "API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage". API, 2007, Washington D.C.
3. ARANDA, Peter Alexander (2011). Universidad Ricardo Palma. Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería civil. "Diseño de tanques de acero soldados apoyados sobre el suelo para almacenamiento de hidrocarburos". Tesis para optar el título profesional de Ingeniero civil. Lima-Perú. 2011.
- 4.- ARZOLA, Ismael (2009) Funciones de vulnerabilidad de tanques de almacenamiento ante acciones sísmicas.(Tesis para optar título de ingeniero civil). México D.F.; Instituto politécnico Nacional (consulta 13 abril de 2015)(http://tesis.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/4982/1/FUNCION_ESVULNERAB.pdf).
- 5.- COMPAGNONI, M.E; CURADELLI, R.O. y MARTÍNEZ, C.A (2012) Análisis del comportamiento dinámico de tanques cilíndricos bajo excitación sísmica, pp. 2019-2230. En revista de Asociación argentina mecánica computacional Vol. XXXI. (Consulta: 05 abril de 2015) (<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4187/4113>).
- 6.- COMPAGNONI, María y MARTÍNEZ, Carlos(2013) Mitigación de daños en tanques contenedores de líquido bajo excitación sísmica con

optimización de costos.(Consulta: 05 abril de 2015)(<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4467/4397>).

7.- DÍAZ DEL VALLE, Julian (2013) Análisis sísmico de depósitos (consulta: 15 de abril 2015) (http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2013/trabajos/C0A48_TC.pdf).

8.- EUROCODE 8, 2003. Desing of structures for earthquake resistance-part 1.1: General rules-Seismic action and general requirements for structures-part 4: Silos, tanks and pipelines. European Committee for Standardization, Final PT Draft.

9.- Dongangün, A., Livaoglu, R. “A Comparative Study of the Seismic Analysis of the rectangular Tanks According to Different Codes”. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17 2008, Beijing China.

10.- GUILLEN, Misael Enzo y ROJAS, Alex Vladimir (2017). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UTP) ,2017. Facultad de Ingeniería. Carrera de Ingeniería Civil. “Análisis del comportamiento dinámico del agua en tanques apoyados rectangulares y cilíndricos bajo acción sísmica”. Tesis para optar el título de ingeniero civil.

11.- HERNÁNDEZ, Sergio (2007). Comparación del diseño sísmico de tanques de acero según normas norteamericanas, neozelandesa y las recomendaciones chilenas (tesis para optar el título de ingeniero civil).Concepción: Universidad católica de la Santísima Concepción (consulta 17 de abril 2015). (<http://civil.ucsc.cl/investigacion/memorias/shernondez.pdf>).

12.- HUAMANI, Hans Valerio (2015). Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Facultad de Ingeniería civil. Diseño estructural de un reservorio elevado tipo Fuste de concreto armado. Informe de suficiencia para optar el título profesional de Ingeniero civil. Lima-Perú. 2015.

- 13.- HOUSNER, G. "Earthquake Pressures on Fluid Containers". California Institute of Technology, 1954, Pasadena California.
- 14.- HOURNER, W. (1963). Comportamiento dinámico de tanques de agua. Traducido en 2013 por Alex Palomino. Perú: Cajamarca.
- 15.- IITK-GSDMA GUIDELINES for SEISMIC DESIGN OF LIQUID STORAGE TANKS, Provisions with Commentary and Explanatory Examples. Indian Institute of Technology Kanpur-Gujarat State Disaster Management Authority, october 2007.
- 16.- MALHOTRA P.K; Wenk T; Wieland, M.2000. Simple Procedure for Seismic Analysis of liquid-Storage Tanks. Structural Engineering Reports. International Vol 3 n°10 Pp.197-201.
- 17.- MALHOTRA, P. "Seismic Design of Liquid Storage Tanks". American Society of Civil Engineers, 2006.
- 18.- MOLINA, Juan (2013). Desarrollo de procedimiento de cálculo de tanques API 650 incluyendo cálculo sísmico de normas PDVSA (tesis para optar el título de ingeniero mecánico). Sartenejas: Universidad Simón Bolívar (consulta 12 de abril 2015) (<http://159.90.80.55/tesis/000159150.pdf>).
- 19.- NAVARRO, Salvador (2018). Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela de Ingeniería de Caminos Y minas. Master en Ingeniería del agua y del terreno. Obtención de cargas Hidrodinámicas en depósitos rectangulares de hormigón armado.
- 20.- "Norma Peruana de Diseño Sismo Resistente E030", El Peruano, 24 de Enero de 2016, Perú.

21.- “Norma Peruana de Cargas E020”, El Peruano, 23 de Mayo de 2006, Perú.

22.- PENALBA, Daniel (2010). Análisis sismorresistente de depósitos metálicos. (Trabajo de fin de carrera de ingeniería industrial).Madrid: Universidad Carlos III de Madrid (consulta 15 de mayo de 2015) (<http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10234>).

23.- PEREIRA, Rosmiri (2010). Evaluación de la capacidad estructural del tanque elevado de agua industrial y potable de Sidor ubicado en Matanzas, Estado Bolívar y adaptada a las normas COVENIN (1753-2006 y 1756-2001)(tesis para optar el título de ingeniero civil). Bolívar: Universidad de Oriente. (Consulta 11 de abril 2015)(<http://ri.bib.udo.edu.ve/handle/123456789/1505>).

24.- PUPILIALES, Alex (2013). Análisis de la interacción fluido-estructura en el diseño de tanques cilíndricos de acero según la norma americana, neozelandesa, ecuatoriana y métodos simplificados (tesis para optar título de ingeniero civil). Quito: Universidad San Francisco de Quito.(<http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2405/1/107099.pdf>)

25.- SANCHEZ, H., Cortés C., Matías A. “Structural behavior of liquid filled storage tanks of large capacity placed in seismic zones of high risk in México”. The 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 1-6 2004, paper 2665, Vancouver Canada.

26.- SANCHEZ, H., y Vargas O. “Análisis Sísmico de Tanques Cilíndricos de Almacenamiento”. Sección de estudios de Posgrado e Investigación ESIA, Instituto Politécnico Nacional U. P. Adolfo López Mateos, México D. F.

27.- VELETSOS, A.S; and Young (1977). Earthquake response of liquid storage tanks. Proc. of 2nd Engg. Mechanics specialty conf. ASCE Raleigh, 1977, 1-24.

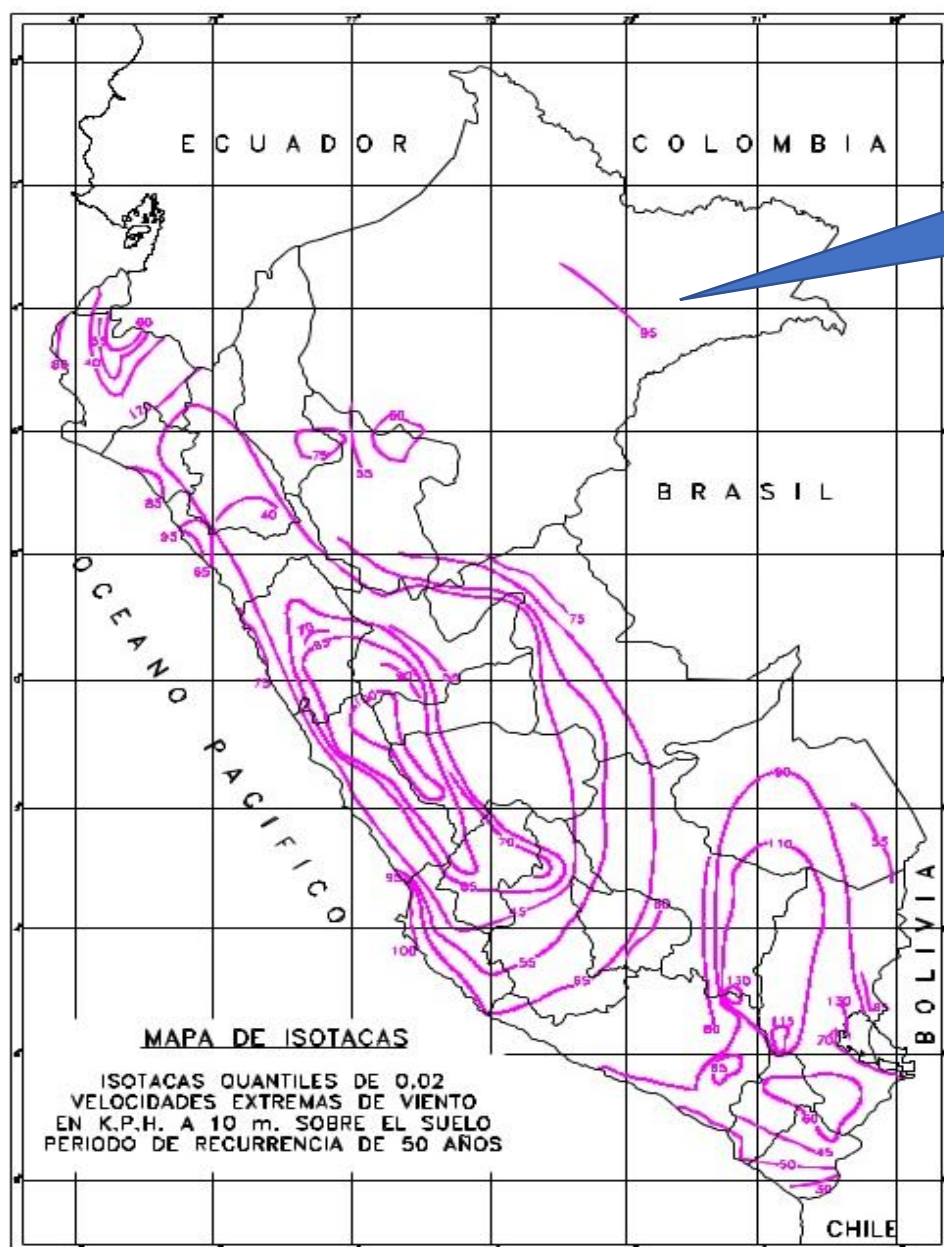
28.- VESENJAK, M. MATTHAEI, M. MULLERSCHON, H Y REN, Z. "Fluid models in Ls-DYNA and their interaction with a structure in dynamic simulations" de ASME Pressure Vessels and Piping Division conference, Denver, 2005.

29.- ZENINY, A. "Simplified modeling of liquid-structure interaction in the seismic analysis of cylindrical liquid storage tanks". The 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 1-6 2004, paper 1914 Vancouver Canada.

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 01

Mapa Eólico del Perú



Velocidad básica
del viento para
Loreto es de **95**
km/h (a 10 m
sobre el suelo)

Figura 2. Mapa Eólico de la Distribución de Vientos en el Perú (Ref. 3 y 4)

ANEXOS 02

API		DISEÑO MECANICO API-650			APENDICE		650	
1. DATOS DE DISEÑO (ANEXO 02)								
					SIMBOLO	UNIDADES	VALORES	
****	Diametro del Tanque				D	ft/m	87.730	26.74
****	Altura del Tanque				HT	ft/m	39.997	12.19
****	Nivel maximo diseño del Liquido				H	ft/m	37.153	11.32
****	Gravedad especifica del producto				G	-		0.87
****	Espesor equivalente de la pared				tu	in/mm	3001970.13	7.63
****	Densidad del fluido				p	lb/ft3 - kg/m3	0.031	870.00
****	Modulo de Elasticidad del material del tanque				E	lbf/in2 - Mpa	30457980.00	210000.00
****	Grupo Uso Sismico				SUG	-	1	
****	Factor de friccion				Rwi	-	3.5	
					Rwc		6.09	
****	Factor de Importancia							
****	Factor de Importancia				I	-	1	
****	Tipo inicial de anclaje						J > 1,54	
****	Clase de sitio							
****	Coeficiente ajuste aceleracion espectral				K	Sa	3.09	1.50
****	Factor de escala				Q	-	1	
****	Periodo transicional				TL	seg	4	
****	Mapped max. Earthquake short period				SS		0.25	
****	Mapped max. Earthquake 1-sec period				S1		0.125	
****	Mapped max. Earthquake 0-sec period				S0		0.04	
****	Peak ground acceleration for non-ASCE				Sp	Z	0.1	
****	Design acceleration Parameter at short periods for ASCE methods				SDS		0.4	
****	Peso del producto				Wp	lb/KN	12201810.31	54276.36
****	Peso del cuerpo				Ws	lb/KN	148839.257	662.07
****	Peso del techo incluyendo cualquier elemento permanente que el techo soporte				Wr	lb/KN	7093.621391	31.55
****	Peso del fondo				Wf	lb/KN	5711.271199	25.41
****	Espesor del anillo en contacto con el fondo - C.A.				ts	ft/m		
****	Espesor del fondo - C.A.				Wf	ft/m		
****	Valor de "product design stress" para acero ASTM A36				Sd	lbf/in2	23760	
****	Valor de "minimum yield strength" para acero ASTM A36				Fy	lbf/in2	36000	2530.00
****	Valor de "product design stress" para acero ASTM A53 b				Sd	lbf/in2	23100	
****	Valor de "minimum yield strength" para acero ASTM A53 b				Fy	lbf/in2	35000	2460.00
****	Distancia medida desde el fondo hasta el C.G. del cuerpo cilindrico del tanque				Xs	ft	20.687	6.31

ANEXOS 03

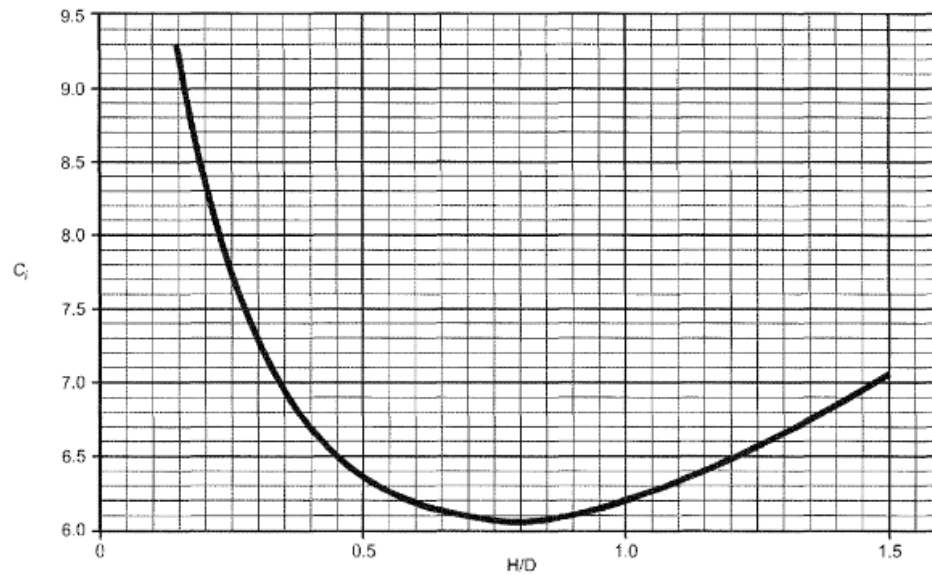


Figure E-1—Coefficient C_i

ANEXOS 04

1. CALCULO DE PESOS						
				SIMBOLO	UNIDADES	VALORES
....	Peso de la pared del tanque				KN	662.070
....	Masa de la pared del tanque			m _w	kg	67489.297
....	Peso de la placa base				KN	25.405
....	Masa de la placa base			m _b	kg	2589.704
....	Capacidad del Tanque				MB	40000.000
....	Volumen de liquido				m ³	6359.490
....	Peso del liquido				KN	54276.339
....	Masa del liquido			m	kg	5532756.300
....	Peso del techo				KN	31.554
....	Masa del techo			m _t	kg	3216.514

ANEXO 05

Table C 1 – Expression for parameters of spring mass model

Circular tank	Rectangular tank
$\frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{D}{h}\right)}{0.866 \frac{D}{h}}$	$\frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{L}{h}\right)}{0.866 \frac{L}{h}}$
$\frac{h_i}{h} = 0.375 \quad \text{for } h/D \leq 0.75$ $= 0.5 - \frac{0.09375}{h/D} \quad \text{for } h/D > 0.75$	$\frac{h_i}{h} = 0.375 \quad \text{for } h/L \leq 0.75$ $= 0.5 - \frac{0.09375}{h/L} \quad \text{for } h/L > 0.75$
$\frac{h_i^*}{h} = \frac{0.866 \frac{D}{h}}{2 \tanh\left(0.866 \frac{D}{h}\right)} - 0.125$ for $h/D \leq 1.33$ $= 0.45 \quad \text{for } h/D > 1.33$	$\frac{h_i^*}{h} = \frac{0.866 \frac{L}{h}}{2 \tanh\left(0.866 \frac{L}{h}\right)} - 0.125$ for $h/L \leq 1.33$ $= 0.45 \quad \text{for } h/L > 1.33$
$\frac{m_c}{m} = 0.23 \frac{\tanh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}{\frac{h}{D}}$	$\frac{m_c}{m} = 0.264 \frac{\tanh\left(3.16 \frac{h}{L}\right)}{\frac{h}{L}}$
$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{h}{D}\right) - 1.0}{3.68 \frac{h}{D} \sinh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}$	$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.16 \frac{h}{L}\right) - 1.0}{3.16 \frac{h}{L} \sinh\left(3.16 \frac{h}{L}\right)}$
$\frac{h_c^*}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{h}{D}\right) - 2.01}{3.68 \frac{h}{D} \sinh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}$	$\frac{h_c^*}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.16 \frac{h}{L}\right) - 2.01}{3.16 \frac{h}{L} \sinh\left(3.16 \frac{h}{L}\right)}$
$K_c = 0.836 \frac{mg}{h} \tanh^2\left(3.68 \frac{h}{D}\right)$	$K_c = 0.833 \frac{mg}{h} \tanh^2\left(3.16 \frac{h}{L}\right)$

ANEXO 06
PROVISIONS

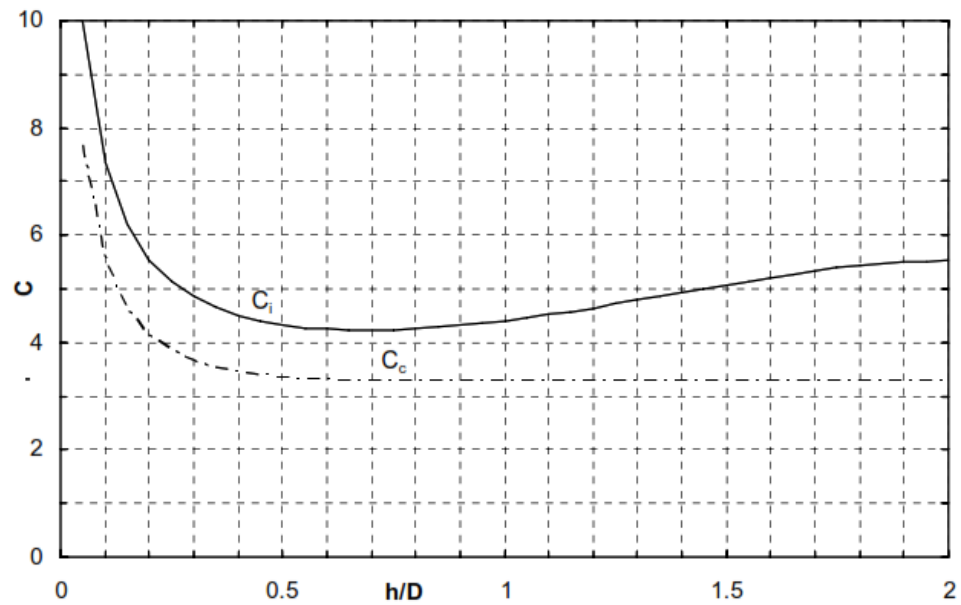


Figure 5 – Coefficient of impulsive (C_i) and convective (C_c) mode time period for circular tank

ANEXO 07

Table E-1—Value of F_a as a Function of Site Class

Mapped Maximum Considered Earthquake Spectral Response Accelerations at Short Periods					
Site Class	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	a	a	a	a	a

^aSite-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.

07

07

Table E-2—Value of F_v as a Function of Site Class

Mapped Maximum Considered Earthquake Spectral Response Accelerations at 1 Sec Periods					
Site Class	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	a	a	a	a	a

^aSite-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.

07

07

GLOSARIO

API: Sigla de American Petroleum Institute, que es una asociación estadounidense de la industria petrolera

IITK: Indian Institute of Technology Kanpur Kanpur, Es la Autoridad Estatal de Gestión de Desastres de Gujarat Gandhinagar

ASCE: American Society of Civil Engineers, es una organización más antigua de los estados Unidos de la sociedad de ingeniera

MODO CONVECTIVO: Es la primera vibración del líquido contenido en el tanque; el líquido experimenta un movimiento oscilatorio respecto a un eje horizontal que coincide con el diámetro del tanque.

MODO IMPULSIVO: es el modo de vibración del sistema tanque-liquido se mueve al unísono con el tanque.

PERIODO ESTRUCTURAL DE VIBRACION: El método de análisis modal pseudodinámico utilizado en este anexo se basa en el período natural de la estructura y los contenidos, como, se define en esta sección.

PERIODO CONVECTIVO: El primer período de onda de chapoteo del modo

PERIODO IMPULSIVO: es el periodo superior del sistema tanque-liquido se mueve al unísono con el tanque

ACELERACIÓN ESPECTRAL: es el análisis sísmico del diseño.