



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Master en Ingeniería de Procesos Petroquímicos

**“Efecto de las ondas de presión de una explosión
sobre tanques de almacenamiento de sustancias
peligrosas”**

Mauricio Xavier Morales Velasco

Ingeniero Mecánico

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2016

PREFACIO

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Master en Ingeniería de Procesos Petroquímicos, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otras. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en los Departamentos de Ingeniería Química y de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, durante el período comprendido entre marzo del 2014 y junio de 2016, bajo la dirección de la Dra. Stella Maris Tonelli, Docente Investigador de la Universidad Nacional del Sur (UNS) y Profesional Principal en Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI) perteneciente al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Fecha: Julio de 2016

Mauricio Xavier Morales Velasco

	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR Secretaría General de Posgrado y Educación Continua</p>
<p>La presente tesis ha sido aprobada el/...../....., mereciendo la calificación de(.....)</p>	

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra manera posibilitaron que este trabajo llegara a su fin.

A mi directora de tesis, Dra. Stella Tonelli, por su predisposición a transmitir conocimientos y valores humanos y profesionales; por su calidad humana y por sus valiosos consejos a lo largo del camino.

A Mg. Santiago Maíz, quien me ofreció su incondicional ayuda durante el desarrollo del trabajo; por su constante aporte de ideas, comentarios y sugerencias en el trabajo diario.

A las autoridades del Departamento de Ingeniería Química (UNS) por brindarme el espacio de trabajo y formación profesional.

A las autoridades de SENACYT (Ecuador), que financiaron la becas de estudios y la realización de ésta Tesis.

A mis amigos: Andrés, Agus, Ale, Alexis, Beto, Crispy, Carlitos, Diana, Fiore, Kary, Karolth, Jhova, Lean, Marco, Maira, Migue, Rommy, Sebas, Pablito por su apoyo incondicional y el precioso regalo de su amistad.

A mi familia, por su amor, comprensión, paciencia y apoyo permanente a la distancia en cada una de las etapas de esta Tesis; sin ellos no hubiera tenido sentido el esfuerzo.

Y especialmente a Dios por cuidarme y permitirme vivir esta hermosa experiencia en un país diferente al mío.

RESUMEN

Uno de los mayores desafíos en cuanto al manejo de riesgos en las plantas de proceso es el almacenamiento de grandes cantidades de sustancias inflamables que pueden generar incendios, explosiones y proyectiles. Estos incidentes podrían convertirse en disparadores de accidentes de grandes proporciones, causando cuantiosas pérdidas humanas y materiales. Sin embargo, a pesar de la gravedad que pueden alcanzar los sucesos que afectan la integridad de los recipientes la mayoría de los códigos y prácticas recomendadas no incluye el efecto de una deflagración entre sus especificaciones de diseño.

Actualmente el estudio de las explosiones y sus consecuencias es cada vez más importante para evaluar los riesgos y desarrollar formas de proteger a las personas y los bienes que puedan ser afectados.

El método más preciso para la obtención del perfil de presión de una explosión es la experimentación, sin embargo, este tipo de ensayos tiene muchas limitaciones relativas a la seguridad y los costos involucrados. Por lo tanto, desde este punto de vista, la simulación computacional es un enfoque más apropiado que el método experimental. Además, la simulación puede ser utilizada para investigar más profundamente las características de carga de la explosión que afectan directamente al daño estructural, considerando una amplia gama de posibles escenarios.

Con la finalidad de analizar los efectos que producen las ondas de presión originadas en una explosión sobre equipos típicos de la industria como: tanques cilíndricos atmosféricos, y recipientes horizontales a presión, se llevaron a cabo diferentes simulaciones para determinar su comportamiento hasta alcanzar el límite elástico del material (esfuerzo de fluencia). Como herramienta de análisis en este estudio se utilizó el software “Autodesk Simulation Multiphysics” de Autodesk Inc., el cual implementa la resolución utilizando el método de

elementos finitos. Los perfiles de las ondas de presión generadas en la explosión fueron simuladas a partir de las ecuaciones planteadas por Larcher (2008), tomando en consideración diferentes valores de masas de TNT equivalente.

Para tanques cilíndricos atmosféricos, en todos los casos estudiados se observa que los puntos donde se presentan los mayores esfuerzos coinciden con la zona del perno de sujeción más cercano al eje 90° - 270° .

Por otra parte, para alcanzar el esfuerzo de fluencia en recipientes a presión horizontales se requiere una explosión notablemente mayor que en el caso de los tanques atmosféricos. En los recipientes horizontales, los mayores esfuerzos están relacionados con las silletas que lo soportan. Uno de los resultados más interesante de este trabajo es el análisis de los importantes cambios de los esfuerzos al modificar el ángulo de contacto entre el recipiente y las silletas cuando incide una onda perpendicular al eje del recipiente.

ABSTRACT

One of the biggest challenges in terms of risk management in process plants is the storage of large quantities of flammable substances that can cause fires, explosions and projectiles. These incidents could trigger large-scale accidents, causing big human and material losses. However, despite the seriousness that can reach events affecting the integrity of the containers most codes and recommended practices not include the effect of deflagrations between their design specifications.

Currently the study of explosions and their consequences are increasingly important for assessing risks and developing ways to protect people and assets that may be affected.

The most accurate method for obtaining pressure profile of an explosion is experimentation, however, this kind of assays have many limitations related to safety issues and costs involved. Therefore, from this point of view, computational simulation is a more appropriate approach. In addition, simulation can be used to further investigate the load characteristics of the explosion that directly affect the structural damage and may consider a wide range of possible scenarios.

In order to analyse the pressure wave's effects produced on typical industry equipment like atmospheric cylindrical tanks, and horizontal pressure vessels, several simulations were carried out to determine their behaviour when achieve material yield strength (yield stress). As a tool of analysis in this study the "Autodesk Simulation Multiphysics" software "Autodesk Inc.", which implements the resolution using the finite element method, was used. The profiles of the pressure waves generated by the blast were simulated from the equations raised by Larcher (2008), considering different values of TNT equivalent mass.

For atmospheric cylindrical tanks, in all cases studied it is observed that the points where the greatest stress occurs coincide with the clamping pin area closest to the axis 90° - 270° .

Moreover, to achieve the yield stress in horizontal pressure vessels is required a significantly bigger explosion than in the case of atmospheric tanks. In the horizontal vessels, the greatest stress is related to the saddles that support it. One of the most interesting results of this work is the analysis of the significant changes in the stress when the contact angle between the pressure vessel and the saddles varies.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Relevancia del tema	6
1.3. Objetivos	7
1.4. Contenido	8
2. Recipientes	13
2.1. Tipos de recipientes.....	13
2.1.A. Tipos de recipientes según su diseño	14
2.1.B. Tipos de recipientes según su forma	14
2.1.C. Tipos de recipientes por su uso.....	17
2.2. Códigos aplicables.....	19
2.2.A. Norma API 650	19
2.2.B. Norma API 620	19
2.2.C. Especificación API 12F	20
2.2.D. Especificación API 12D.....	20
2.2.E. Especificación API 12B	21
2.2.F. Código ASME de calderas y recipientes a presión	21
3. Explosiones.....	31
3.1. Causa de las explosiones	31
3.1.A. Lo que sucede dentro del recipiente.....	31

3.1.B.	Lo que sucede en el recipiente	32
3.1.C.	Lo que sucede fuera del recipiente.....	33
3.2.	Tipos de explosiones	34
3.2.A.	Por los escenarios accidentales que presenta	34
3.2.B.	Por la velocidad de la onda de sobrepresión de la explosión.....	43
3.3.	Onda de choque	46
3.4.	Cargas resultantes debido a la onda de choque	49
3.4.A.	Carga de difracción	49
3.4.B.	Carga por desplazamiento.....	51
3.5.	Métodos de cálculo.....	51
3.5.A.	Fase positiva.....	52
3.5.B.	Fase negativa.....	54
3.5.C.	Curva presión tiempo	55
3.6.	Efectos de la onda de choque	57
4.	Análisis dinámico de estructuras.....	63
4.1.	Respuesta de la estructura	65
4.1.A.	Carga dinámica	69
4.1.B.	Carga cuasi-estática	70
4.1.C.	Carga de impacto	71
4.2.	Problema elástico lineal del sólido.....	71
4.2.A.	Ecuaciones diferenciales de equilibrio.....	73

4.2.B.	Ecuaciones de compatibilidad.....	74
4.2.C.	Ecuaciones constitutivas	74
4.3.	Método de los elementos finitos	75
4.3.A.	Funciones de interpolación	75
4.3.B.	Mallado	78
4.3.C.	Elección de tipo de elemento finito	79
4.3.D.	Condiciones de contorno.....	80
4.4.	Aplicación de MEF para el análisis dinámico de estructuras.....	80
4.4.A.	Modelado del sistema	80
4.4.B.	Formulación del MEF	81
4.4.C.	Solución del sistema lineal $KU=R$	87
4.4.D.	Análisis dinámico.....	89
4.4.E.	Matrices de propiedades estructurales	89
4.4.F.	Métodos de integración directa explícita	93
5.	Análisis de tanques cilíndricos atmosféricos	99
5.1.	Modelado.....	99
5.1.A.	Tipo de elementos	101
5.1.B.	Materiales.....	104
5.1.C.	Condiciones de contorno.....	105
5.1.D.	Carga y perfil de ondas de presión.....	105
5.1.E.	Tipo de análisis	106

5.1.F. Validación del mallado del modelo	107
5.2. Análisis del modelo propuesto	108
5.2.A. Análisis de frecuencia natural	108
5.2.B. Análisis esfuerzo de fluencia	109
5.2.C. Análisis de sensibilidad al ángulo de incidencia de la carga	115
5.2.D. Análisis del número de pernos de anclaje.....	124
5.2.E. Análisis para una masa constante de TNT equivalente	131
6. Análisis de recipientes horizontales a presión.....	137
6.1. Modelado.....	137
6.1.A. Tipo de Elementos	139
6.1.B. Materiales.....	141
6.1.C. Condiciones de contorno.....	141
6.1.D. Carga y perfil de onda de presión	141
6.1.E. Tipo de análisis	142
6.1.F. Validación del mallado del modelo	142
6.2. Análisis del modelo propuesto	144
6.2.A. Análisis de frecuencia natural	144
6.2.B. Análisis esfuerzo de fluencia	145
6.2.C. Análisis de sensibilidad ángulo de incidencia de la carga aplicada.....	155
6.2.D. Análisis de sensibilidad ángulo de contacto de silletas	170
6.2.E. Análisis para una masa constante de TNT equivalente	184

7. Conclusiones y Recomendaciones	189
7.1. Conclusiones	189
7.1.A. Tanque cilíndrico atmosférico	190
7.1.B. Recipiente horizontal a presión.....	191
7.2. Recomendaciones.....	193
8. Bibliografía	197
ANEXOS	205
ANEXO A.....	207
ANEXO B.....	211
ANEXO C.....	223
ANEXO D.....	227
ANEXO E.....	239
ANEXO G.....	251
ANEXO H.....	263
ANEXO I.....	275
ANEXO J.....	287
ANEXO K.....	297
ANEXO L.....	309
ANEXO M.....	319
ANEXO N.....	331

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de recipientes a presión según su diseño	14
Tabla 3.1 Daños estimados para estructuras comunes por sobrepresión	58
Tabla 3.2 Significado de acrónimos (ver Tabla 3.3).....	59
Tabla 3.3 Daños estimados en base a sobrepresión para equipos de procesos	60
Tabla 5.1 Material y espesores para elementos placa	102
Tabla 5.2 Propiedades de materiales utilizados	105
Tabla 5.3 Frecuencia natural y periodo natural	109
Tabla 5.4 Parámetros de perfil de onda de presión	110
Tabla 5.5 Esfuerzos máximos	112
Tabla 5.6 Esfuerzos máximos por paso (pernos de anclaje rotados 5 ⁰)	117
Tabla 5.7 Esfuerzos máximos por paso (pernos de anclaje rotados: 10 ⁰)	119
Tabla 5.8 Esfuerzos máximos por paso (pernos de anclaje rotados 15 ⁰)	121
Tabla 5.9 Esfuerzos máximos por paso para pernos de anclaje rotados	122
Tabla 5.10 Números de pernos de anclaje y esfuerzo máximo.....	124
Tabla 5.11 Esfuerzos máximos por paso para diferente número pernos de anclaje	126
Tabla 5.12 Parámetros de perfil de presión tiempo y esfuerzo máximo para masa de TNT equivalente constante y diferentes distancias.	131
Tabla 6.1 Materiales y espesores para elementos placa.....	139
Tabla 6.2 Propiedades de materiales utilizados	141
Tabla 6.3 Frecuencia natural y periodo natural	144
Tabla 6.4 Parámetros de perfil de onda de presión	145
Tabla 6.5 Esfuerzos máximos	147
Tabla 6.6 Parámetros de perfil de onda de presión (ángulo de incidencia 90 ⁰)	155
Tabla 6.7 Esfuerzos máximos- modelo: ángulo de incidencia 90 ⁰	156

Tabla 6.8 Parámetros de perfil de onda de presión (ángulo de incidencia 45 ⁰)	162
Tabla 6.9 Esfuerzos máximos (modelo: ángulo de incidencia 45 ⁰)	163
Tabla 6.10 Ángulo de incidencia, masa de TNT equivalente, presión máxima y mínima	169
Tabla 6.11 Esfuerzos máximos -modelo: ángulo de contacto de 150 ⁰	171
Tabla 6.12 Esfuerzos máximos -modelo: ángulo de contacto de 180 ⁰	175
Tabla 6.13 Ángulo de contacto de silleta y esfuerzo máximo	178
Tabla 6.14 Esfuerzos máximos por paso para diferente ángulo de contacto de silleta.....	180
Tabla 6.15 Esfuerzos máximos por paso para diferente ángulo de contacto de silleta (continuación)	181
Tabla 6.16 Parámetros de perfil de presión tiempo y esfuerzo máximo para masa de TNT equivalente constante y diferentes distancias	185

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Tipos de recipientes.....	13
Figura 2.2 Torres de destilación.....	15
Figura 2.3 Separador horizontal.....	16
Figura 2.4 Esfera de GLP.....	17
Figura 2.5 Tanque de almacenamiento de butano	18
Figura 2.6 Intercambiador de calor casco tubo	18
Figura 3.1 Rotura de recipiente (causa dentro del recipiente)	32
Figura 3.2 Rotura de recipiente (causada en el recipiente).....	33
Figura 3.3 Rotura de recipiente (causas externas)	34
Figura 3.4 Esquema de los efectos de la sobrepresión de una explosión	36
Figura 3.5 Fallo de recipiente a presión durante prueba hidráulica en inspección anual	38
Figura 3.6 BLEVE en esfera de almacenamiento de LPG.....	40

Figura 3.7 Desastre de Bhopal	41
Figura 3.8 Evolución en el tiempo de la onda de choque en deflagración	44
Figura 3.9 Evolución en el tiempo de la onda de choque en detonación.....	45
Figura 3.10 Perfil de Presión vs Tiempo	46
Figura 3.11 Estructura sometida a carga por difracción	49
Figura 3.12 Estructura sometida a carga por desplazamiento.	51
Figura 3.13 Diagrama de Kingery con distancias escaladas.....	53
Figura 3.14 Perfil Presión vs Tiempo (fase negativa aproximada).....	56
Figura 4.1 Sistema masa, resorte y amortiguador.....	65
Figura 4.2 Carga dinámica: Fuerza $R(t)$ vs Tiempo (t) y Desplazamiento $U(t)$ vs Tiempo (t)	70
Figura 4.3 Carga Cuasi-Estática Fuerza $F(t)$ vs Tiempo (t) y Desplazamiento $U(t)$ vs Tiempo (t)	70
Figura 4.4 Carga de impacto: Fuerza $F(t)$ vs Tiempo (t) y Desplazamiento $U(t)$ vs Tiempo (t)	71
Figura 4.5 Función de interpolación para elemento lineal de tres nodos.....	76
Figura 4.6 Función de forma para un elemento cuadrangular de nueve nodos. (a) N1, (b) N5, (c) N5, (d) N9.....	78
Figura 4.7 Mallado de puente colgante para MEF.....	79
Figura 4.8: Proceso de ensamblaje de la matriz de rigidez global. (A) Elemento plano de cuatro nodos, (B) Dominio discretizado, (C) Matrices de rigidez de cada elemento, (D) Matriz de rigidez global	87
Figura 4.9 Amortiguamiento proporcional o de Rayleigh	92
Figura 5.1 Vista frontal tanque de desnatado (plano general)	100
Figura 5.2 Vista de planta tanque de desnatado (plano general)	101
Figura 5.3 Estructura tanque de desnatado (corte transversal – soporte del techo).....	103

Figura 5.4 Vista en corte de modelo de tanque (Autodesk Simulation Multiphysics)	104
Figura 5.5 Modelo de tanque y área de carga (Autodesk Simulation Multiphysics).....	106
Figura 5.6 Esfuerzo vs Número de elementos	108
Figura 5.7 Perfil de Presión vs. Tiempo (original)	110
Figura 5.8 Perfil de Presión vs Tiempo (modificado).....	111
Figura 5.9 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis)	113
Figura 5.10 Esfuerzo vs Tiempo para cada punto de análisis.....	114
Figura 5.11 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (modelo original, paso: 23)	115
Figura 5.12 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - pernos de anclaje rotados: 5°	116
Figura 5.13 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - pernos de anclaje rotados: 10°	118
Figura 5.14 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - pernos de anclaje rotados: 15°	120
Figura 5.15 Esfuerzo máximo vs Tiempo (modelo original y modelos con pernos de anclaje rotados)	123
Figura 5.16 Esfuerzo Máximo vs Número de Anclajes	124
Figura 5.17 Esfuerzo Máximo vs Tiempo (diferente número de pernos de anclaje).....	125
Figura 5.18 Nodo con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - 20 pernos de anclaje.....	127
Figura 5.19 Nodo con esfuerzo máximo (punto de análisis) - 24 pernos de anclaje	128
Figura 5.20 Nodo con esfuerzo máximo (puntos de análisis) -36 pernos de anclaje.....	129
Figura 5.21 Nodo con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - 40 pernos de anclaje.....	130
Figura 5.22 Presión Máxima y Mínima vs Distancia para masa de TNT equivalente constante	132
Figura 5.23 Esfuerzo Máximo vs Distancia para masa de TNT equivalente constante	132

Figura 6.1 Vista lateral y frontal del separador trifasico (plano de conjunto y detalles).....	138
Figura 6.2 Vista isométrica de modelo de recipiente a presión (Autodesk Simulation Multiphysics)	140
Figura 6.3 Modelo de recipiente a presión y área de carga (Autodesk Simulation Multiphysics)	142
Figura 6.4 Esfuerzo vs Número de Elementos.....	143
Figura 6.5 Esfuerzo vs Número de Elementos.....	143
Figura 6.6 Perfil de Presión vs. Tiempo (original)	146
Figura 6.7 Perfil de Presión vs Tiempo (modificado).....	146
Figura 6.8 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista lateral.....	149
Figura 6.9 Nodos con Esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal	149
Figura 6.10 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista de planta.....	150
Figura 6.11 Esfuerzo vs Tiempo para puntos de análisis.....	150
Figura 6.12 Resultados de Autodesk Simulation Multyphysics (paso: 5).....	151
Figura 6.13 Resultados de Autodesk Simulation Multyphysics (paso: 7)	152
Figura 6.14 Resultados de Autodesk Simulation Multyphysics (paso: 19).....	153
Figura 6.15 Resultados de Autodesk Simulation Multyphysics (paso: 43).....	154
Figura 6.16 Perfil de Presión vs Tiempo (modificado)- modelo: ángulo de incidencia a 90 ⁰	156
Figura 6.17 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista lateral (modelo: ángulo de incidencia a 90 ⁰).....	158
Figura 6.18 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal (modelo: ángulo de incidencia a 90 ⁰).....	158
Figura 6.19 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista de planta (modelo: ángulo de incidencia a 90 ⁰).....	159

Figura 6.20 Esfuerzo vs Tiempo para punto de análisis - modelo: ángulo de incidencia a 90°	160
Figura 6.21 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 5) - modelo: ángulo de incidencia a 90°	161
Figura 6.22 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 15) - modelo: ángulo de incidencia a 90°	161
Figura 6.23 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 28) - modelo: ángulo de incidencia a 90°	162
Figura 6.24 Perfil de Presión vs Tiempo (modificado)- modelo: ángulo de incidencia a 45°	163
Figura 6.25 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista lateral (modelo: ángulo de incidencia a 45°).....	165
Figura 6.26 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal (modelo: ángulo de incidencia a 45°).....	165
Figura 6.27 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal (modelo: ángulo de incidencia a 45°).....	166
Figura 6.28 Esfuerzo vs Tiempo para punto de análisis - modelo: ángulo de incidencia a 45°	167
Figura 6.29 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 5) -.....	168
Figura 6.30 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 44) -.....	168
Figura 6.31 Masa vs Ángulo de Incidencia.....	169
Figura 6.32 Presión Maxima/Minima vs Ángulo de Incidencia	170
Figura 6.33 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista lateral (modelo: ángulo de contacto de 150°)	173

Figura 6.34 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal (modelo: ángulo de contacto de 150°)	174
Figura 6.35 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista de planta (modelo: ángulo de contacto de 150°).....	174
Figura 6.36 Nodos con esfuerzo máximo – vista lateral (modelo: ángulo de contacto de 180°)	177
Figura 6.37 Nodos con esfuerzo máximo – vista frontal (modelo: ángulo de contacto de 180°).....	177
Figura 6.38 Nodos con esfuerzo máximo – vista de planta (modelo: ángulo de contacto de 180°).....	178
Figura 6.39 Esfuerzo Máximo vs Ángulo de Contacto de Silleta.....	179
Figura 6.40 Esfuerzo vs Tiempo para puntos de análisis (diferentes ángulos de contacto) ...	181
Figura 6.41 Resultados de Autodesk Simulation Multyphysics (modelo ángulo de contacto 140° , paso: 37).....	182
Figura 6.42 Resultados de Autodesk Simulation Multyphysics (modelo ángulo de contacto 150° , paso: 37)	183
Figura 6.43 Resultados de Autodesk Simulation Multyphysics (modelo ángulo de contacto 160° , paso: 19).....	183
Figura 6.44 Resultados de Autodesk Simulation Multyphysics (modelo ángulo de contacto 180° , paso: 18).....	184
Figura 6.45 Presión Máxima / Mínima vs Distancia para masa de TNT equivalente constante	186
Figura 6.46 Esfuerzo Máximo vs Distancia para masa de TNT equivalente constante	186

CAPÍTULO 1

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Las sustancias inflamables producidas o almacenadas en las plantas industriales pueden generar incendios, explosiones y proyectiles, que a su vez pueden convertirse en disparadores de una serie de eventos que resultan en accidentes de grandes proporciones.

El análisis histórico de los casos registrados en las últimas décadas, y catalogados como accidentes mayores, muestra la magnitud que pueden alcanzar las consecuencias de estos eventos dentro y fuera de las instalaciones industriales.

Algunos de los accidentes más catastróficos se han producido debido a violentas explosiones e incendios que han dañado recipientes conteniendo sustancias inflamables. En esta categoría se encuentran los accidentes ocurridos en San Juan de Ixhuatepec, México (1984), con la propagación de explosiones y el incendio masivo de un parque de tanques de almacenamiento de gas licuado de petróleo (LPG); Buncefield, Inglaterra (2005), con la destrucción de 20 tanques conteniendo combustibles líquidos, y más recientemente el incendio en la Refinería de Amuay Venezuela (2012) que produjo la muerte de 48 personas y la destrucción de varios tanques de almacenamiento.

Existen numerosas causas que pueden conducir a la destrucción de tanques, Lin y Chang (2006) analizan 242 accidentes y las causas que los originaron, llegando a la conclusión que el fuego y las explosiones son las responsables del 85% de los casos. Además, en los análisis cuantitativos de riesgos (QRA), un importante criterio utilizado para definir la posibilidad de un efecto dominó causado por sobrepresión es el daño estructural a recipientes y equipos en general (Xiaoyuan y col, 2012).

Sin embargo, a pesar de la gravedad que pueden alcanzar los eventos que afectan la integridad de los tanques, la mayoría de los códigos y prácticas recomendadas no incluye el efecto de una deflagración entre sus especificaciones de diseño. Así, las normas API 650 (2013) y 620 (2002) consideran para el diseño de tanques el efecto de cargas por peso del tanque y sus componentes, presión externa e interna, cargas sísmicas, acción del líquido almacenado, viento, nieve y cargas externas, pero no toman en cuenta el efecto de una posible explosión que afecte la integridad del tanque. Por su parte, el código ASME Sección VIII División 1 (2013) permite tener en cuenta cargas debidas a presiones anormales como las causadas por una deflagración, sin embargo este punto no es obligatorio, por lo que su falta de cumplimiento no afecta la certificación del equipo.

Por este motivo, el análisis de las cargas a las que están sometidos los recipientes cuando son alcanzados por las ondas de choque de una explosión y las posibles fallas estructurales resultantes es de gran interés.

El método más preciso para la obtención del perfil de carga de una explosión es la experimentación donde se refleje las condiciones ambientales reales a las que está sometida la estructura analizada. Sin embargo, la experimentación con explosiones tienen muchas limitaciones relativas a los problemas de seguridad y los costos involucrados. Por lo tanto, la simulación computacional puede ser un enfoque más apropiado que el método experimental, ya que es un método seguro y menos costoso. Además, los métodos de simulación pueden ser utilizados para investigar más profundamente las características de carga de la explosión que afectan directamente al daño estructural, pudiendo considerar una amplia gama de posibles escenarios.

Por esta razón se han llevado a cabo numerosas investigaciones utilizando herramientas computacionales para predecir la respuesta dinámica de las estructuras sometidas a cargas explosivas.

Balkan y Mecitoglu (2014) utilizaron técnicas teóricas y experimentales para desarrollar un estudio del comportamiento estructural de una placa compuesta tipo sándwich bajo cargas explosivas no uniformes. Sohn y col. (2013) investigaron la respuesta de un muro antiexplosión bajo una carga explosiva que fue idealizada como un impulso triangular. Además, realizaron un análisis exhaustivo de la desviación del muro antiexplosión desarrollando una curva presión - impulso. Larcher en su trabajo de 2008 investigó el vidrio laminado bajo un perfil de presión resultado de una explosión. Allí se describe la presión de la explosión en términos de la ecuación de decaimiento exponencial de Friedlander-Baker (1973). En 2011, Aman y col. estudiaron las características de la respuesta estructural de equipos a bordo de un buque afectado por ondas de choque resultado de una explosión submarina. También consideraron el efecto elástico del acoplamiento entre el equipo y la estructura del casco de la embarcación. Ali y Louca, (2008a, 2008b) investigaron la respuesta de la parte superior de una estructura típica en alta mar, teniendo en cuenta la carga de explosión idealizada como un impulso triangular.

Otros estudios se refieren al efecto de las ondas de presión sobre estructuras tubulares (Bambach, 2013). Este trabajo considera una amplia gama de propiedades geométricas, condiciones de contorno y condiciones de explosión típicas de elementos comprimidos axialmente. Autores como Kolakowski y col. (2010) y Kowal-Michalska y col. (2011) estudiaron la respuesta dinámica de los cabezales cónicos, esféricos y semiesféricos de recipientes ante las ondas de choque de una explosión.

Más recientemente, Zhang y col. (2015) realizaron un estudio numérico sobre la respuesta dinámica y análisis de fallas de tanques de almacenamiento esféricos bajo carga explosiva externa.

No obstante, en los trabajos relevados no se ha encontrado un análisis exhaustivo para predecir la respuesta dinámica de equipos reales muy comunes de la industria de procesos

como recipientes a presión horizontales y tanques cilíndricos atmosféricos sometidos a cargas explosivas externas utilizando herramientas computacionales.

1.2. Relevancia del tema

Actualmente, el estudio de las explosiones y sus consecuencias se ha transformado en una herramienta poderosa para evaluar riesgos y amenazas y para desarrollar formas de proteger a las personas, el medio ambiente y los bienes que pudieran ser afectados.

Las consecuencias de las ondas de presión sobre una estructura dependen tanto de las propiedades de la onda como de las características del objeto impactado (masa, frecuencia natural de vibración, resistencia dinámica, etc.). El equipamiento puede ser sensible a la sobrepresión estática, a la presión dinámica o a una combinación de las mismas (Reniers y Cozzani, 2013). La forma en que impactan las ondas de choque sobre la superficie puede originar deformaciones de las superficies externas. Otros equipos, en cambio, pueden ser susceptibles a los movimientos del cuerpo rígido (Salzanoy col, 2013).

En particular, en esta tesis se analizarán los efectos de las ondas de choque generadas en explosiones típicas en la industria química, las que tienen un patrón definido y medible. Luego de una explosión, la repentina liberación de energía causa que la presión del aire circundante aumente rápidamente, creando una región de presión positiva hasta alcanzar un valor máximo (pico de sobrepresión) y luego se reduce gradualmente. Esta fase de presión “positiva” es seguida por una región de presión “negativa” (fase negativa). La onda que se mueve desde el centro de la explosión impacta los objetos que encuentra en su camino, causando la deformación y falla de estructuras y equipos. El daño producido es función de la velocidad con que crece la presión y de la duración de la onda.

Existen varios métodos para calcular los efectos de explosiones y determinar la respuesta de los equipos y estructuras frente a éstas. En los últimos años, se ha popularizado el uso de software para mecánica del sólido computacional basados en avanzados métodos numéricos para modelar y simular distintos escenarios. Estas herramientas permiten rapidez y versatilidad en los análisis de escenarios. Por lo tanto, la rigurosidad y complejidad del modelo dependerá del usuario, el que puede elegir evaluar modelos muy simples (tomando en cuenta únicamente deformación elástica del recipiente y la onda de choque de la explosión) o modelos mucho más complejos simulando además otros ítems como el contenido del recipiente, aislamientos, soportes, cargas térmicas, deformaciones plásticas, etc.

Por este motivo, la utilización de herramientas computacionales que permitan modelar las cargas a las que están sometidos los equipos cuando son alcanzados por las ondas de choque de una explosión y el análisis de las posibles fallas estructurales resultantes es un tema de relevancia cuando se analiza la seguridad de los procesos.

En este contexto se propone estudiar los efectos de las ondas de choque de una explosión sobre equipos típicos de la industria de proceso como son los tanques cilindros atmosféricos y los recipientes a presión horizontales. Para ello se utilizará el software Autodesk Simulation Multiphysics.

1.3. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento estructural de tanques cilíndricos atmosféricos y recipientes a presión horizontales frente a diferentes escenarios e identificar la ubicación de los puntos de mayor afectación cuando son alcanzados por las ondas de choque de una explosión.

Para alcanzar este objetivo se desarrollarán las siguientes tareas específicas:

- Definir el perfil de onda de choque que es capaz de llevar al equipo analizado a un valor máximo de esfuerzo, cercano a la fluencia del material.
- Estudiar la influencia del ángulo de incidencia de las ondas de choque de una explosión (carga) respecto al comportamiento estructural del equipo analizado e identificar la ubicación de los puntos más afectados.
- Determinar la influencia de la configuración de los soportes respecto al comportamiento estructural del equipo, identificando la ubicación de los puntos de mayor afectación cuando son alcanzados por la carga dinámica.
- Observar el comportamiento estructural de los equipos analizados e identificar la ubicación y los esfuerzos a los que están sometidos los puntos más afectados cuando se modifica la distancia al foco de la explosión.

1.4. Contenido

Esta tesis se ha dividido en 7 capítulos, siendo éste el primero de ellos. En el segundo capítulo se realiza una introducción a los recipientes a presión. Se desarrolla una clasificación de los tipos de recipientes a presión según su diseño, su forma y su uso. Además se hace una revisión general de los códigos, normas y especificaciones que se utilizan en la industria de los hidrocarburos para la construcción y diseño de los mismos.

El tercer capítulo está dedicado a las explosiones. Se describen los tipos y las causas más comunes así como las explosiones más frecuentes en la industria de procesos. Además, se define el concepto de onda de choque y los parámetros que la determinan, las cargas resultantes y el método de cálculo de la misma. Finalmente se tratan los efectos y consecuencias resultantes.

El cuarto capítulo presenta las ideas fundamentales sobre el análisis dinámico de estructuras. Inicialmente se describen los conceptos básicos sobre los tipos de cargas (dinámicas, cuasi estáticas y de impacto) y la respuesta de las estructuras ante ellas. Posteriormente el capítulo describe el planteo del método de elementos finitos y da una breve explicación sobre cómo funciona este método.

El capítulo quinto analiza los resultados obtenidos en tanques cilíndricos atmosféricos utilizando como herramienta el software comercial Autodesk Simulation Multiphysics. Para este capítulo se propuso estudiar un tanque de desnatado de 7517 bbl (1195.11 m³) de capacidad nominal, construido bajo la norma API 650. Se presentan los resultados de la frecuencia natural y el perfil de onda de choque necesario para llevar al equipo analizado a un valor máximo de esfuerzo cercano a la fluencia del material. Además, se realiza un análisis de sensibilidad de la posición de los pernos de anclaje así como del número de pernos de anclaje respecto a los esfuerzos obtenidos. Para finalizar, se observó el comportamiento estructural del tanque atmosférico como una función de la distancia al centro de la explosión.

En el capítulo sexto se estudian recipientes horizontales a presión utilizando la misma herramienta computacional. En particular se propuso estudiar un separador trifásico de crudo de 59 m³ de capacidad nominal construido según el código ASME sección VIII división 1. Para este tipo de recipiente se presentan, como en el caso anterior, la frecuencia natural y el perfil de onda de choque que somete al recipiente a un valor máximo de esfuerzo cercano a la fluencia del material. Se realiza también un análisis de los esfuerzos obtenidos en función del ángulo de incidencia de la carga, así como del ángulo de contacto entre la silleta y el recipiente. Para finalizar se observó el comportamiento estructural de los equipos analizados y se identificó la ubicación de los puntos de mayor afectación en el recipiente a presión cuando se modifica la distancia del equipo al foco de la explosión.

En el último capítulo se exponen las conclusiones fundamentales de la tesis y se proponen posibles líneas de desarrollo para trabajos futuros.

CAPITULO 2

Recipientes

2. RECIPIENTES

Los recipientes a presión son ampliamente utilizados en la industria de los procesos porque proveen la cubierta estructural para una amplia variedad de funciones, todas ellas de suma importancia. La mayoría de los procesos de transformación física y/o química se llevan a cabo en el interior de los mismos.

Entre las funciones de los recipientes se puede citar: acumuladores de líquidos, columna de destilación, intercambiadores de calor, reactores químicos, tanques flash, separadores y tanques de almacenamiento entre otros.

2.1. Tipos de recipientes

Existen diferentes tipos de recipientes según los diferentes tipos de almacenamiento y su rango de aplicabilidad. De acuerdo a su diseño, forma y uso se clasifican según la Figura 2.1.

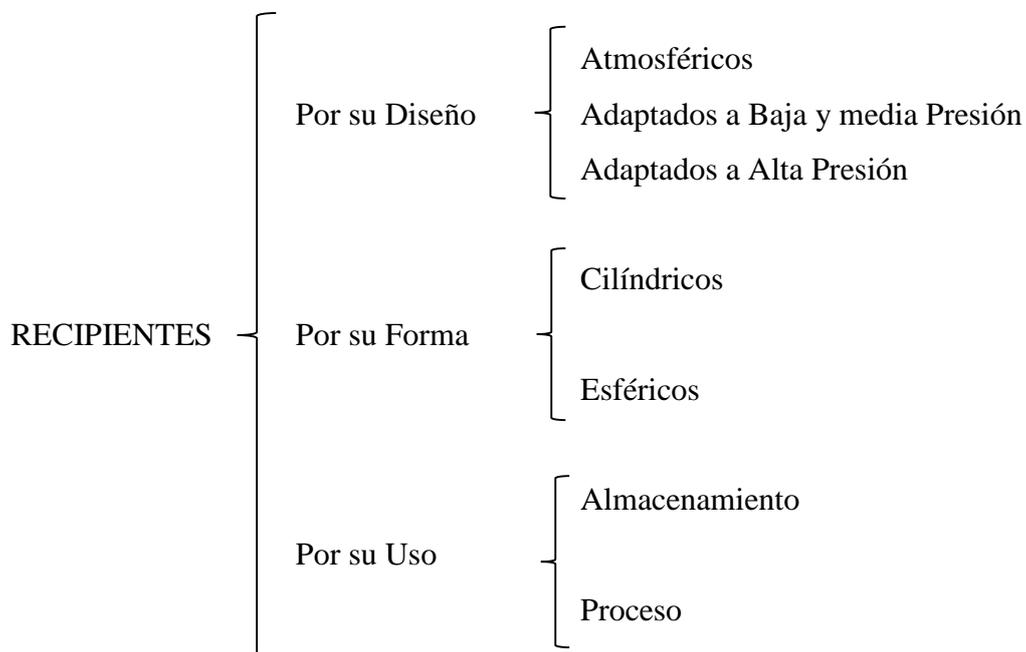


Figura 2.1 Tipos de recipientes.

2.1.A. Tipos de recipientes según su diseño

Los recipientes se pueden clasificar según su diseño, dependiendo de las condiciones de operación a realizar en:

(i) **Atmosféricos**

(ii) **Adaptados a presiones bajas y medianas**

(iii) **Adaptados a presiones altas**

Las características de cada uno de ellos se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tipos de recipientes a presión según su diseño

Nominación del tanque	Rango de presión de trabajo	Forma y tipo de pared	Normas utilizadas en el diseño	Fluidos que puede almacenar el tanque	Otras características
Atmosférico	Presión atmosférica (0 a 0.04 psi)	Cilíndricos y soldados. Ocasionalmente empernado	API-650	Poco Volátiles/ Volátiles	Techos fijos o flotantes
Presiones Bajas y Medianas	Hasta 15 psi	Cilíndrico con techo cónico o domo. También pueden ser esféricos y esferoidales.	API-620	Volátiles / Muy Volátiles	Techos fijos o flotantes
Presiones Altas	Mayor de 15 psi	Cilíndricos soldados o también de forma esférica y esferoidales.	CODIGO ASME	Productos refinados	Los cilindros presurizados usualmente poseen cabezales hemisféricos

2.1.B. Tipos de recipientes según su forma

Esta clasificación de los recipientes se asocia fundamentalmente con su forma geométrica y en algunos casos también incluye las dimensiones del tanque. Basándose en estos criterios, los recipientes se pueden clasificar de la manera siguiente:

(i) Recipientes a presión cilíndricos

Los recipientes a presión cilíndricos generalmente son divididos en dos tipos: Recipientes a Presión Cilíndricos Horizontales y en Recipientes a Presión Cilíndricos Verticales. La gama de equipos que se pueden encontrar en estas dos clasificaciones es muy amplia e ira variando de acuerdo a la función que desempeña y a la complejidad de los internos que posee.

- *Recipientes cilíndricos verticales:*

Son aquellos cuyo cuerpo forma un cilindro y se encuentran dispuestos verticalmente, los equipos representativos de este tipo van desde tanques de almacenamiento cilíndricos con techos fijos (cónicos o abovedados) o flotantes, acumuladores de aire, filtros de carga y coalescedores, tanques flash, depósitos de líquidos (drums), hasta los más complejos como splitters, torres de destilación o reactores químicos (Figura 2.2).



Figura 2.2 Torres de destilación

Fuente: Homepage - Electricity Supply Board (2016)

- *Recipientes cilíndricos horizontales:*

Son aquellos que están dispuestos horizontalmente y poseen un cuerpo cilíndrico, los ejemplos más representativos son: separadores, K.O Drums de sistema de antorcha, intercambiadores de calor, recipientes de alimentación líquida a unidades, tambores de reflujos etc. (Figura 2.3).



Figura 2.3 Separador horizontal

Fuente: Separadores de líquidos, gases y sólidos | Bolland (2016)

(ii) Recipientes a presión esféricos

Los recipientes esféricos se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes de fluidos a altas presiones. Este tipo de tanques es utilizado en la industria del petróleo y petroquímica para productos gaseosos

licuados, como amoníaco, gas butano, gas licuado de petróleo (GLP), isopropanos, etc. (Figura 2.4).



Figura 2.4 Esfera de GLP
Fuente: Journal Oil-Mineral N° 236 (2013)

2.1.C. Tipos de recipientes por su uso

En función de su uso se pueden dividir en recipientes de almacenamiento y en recipientes de proceso.

En general los recipientes de almacenamiento no poseen internos mientras que los recipientes de proceso son más complejos, requiriendo de diversos dispositivos internos para cumplir su función.

(i) Recipientes de almacenamiento

Los recipientes de almacenamiento son llamados tanques o depósitos, tienen la función principal de contener una reserva suficiente de algún producto líquido para su uso posterior y/o comercialización, ya sea como almacenamiento inicial, intermedio o final del proceso.

Estos tanques, de acuerdo a su servicio son conocidos como tanques de almacenamiento, tanques de día, acumuladores, etc. (Figura 2.5).



Figura 2.5 Tanque de almacenamiento de butano
Fuente: Sistema de gas Archives - EcuadorTimes.net (2016)

(ii) Recipientes de proceso

Los recipientes a presión de proceso requieren elementos especiales (internos) para poder cumplir sus múltiples y variados usos. Como ejemplos pueden citarse los separadores, tanques flash, intercambiadores de calor, reactores, torres fraccionadoras, torres de destilación etc. (Figura 2.6).

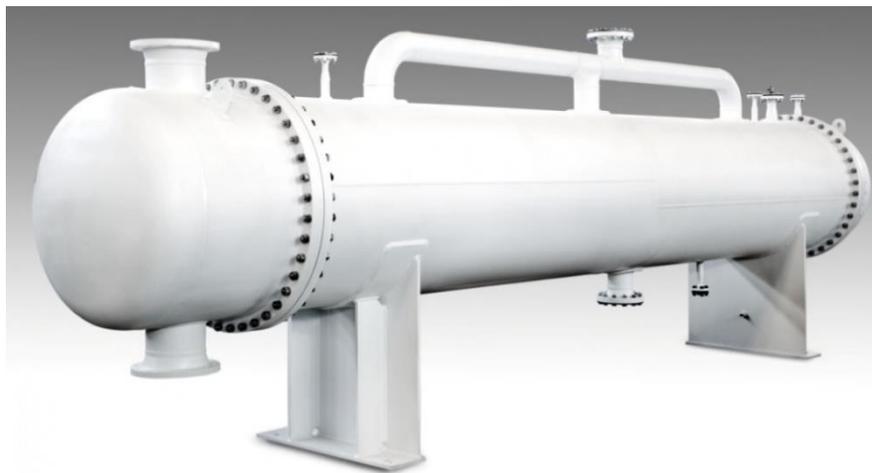


Figura 2.6 Intercambiador de calor casco tubo
Fuente: Shell & Tube warmtewisselaars (2016)

2.2. Códigos aplicables

Existen diferentes normas aplicables a los recipientes a presión, las más representativas son los códigos ASME (American Society of Mechanical Engineers) y API (American Petroleum Institute) de procedencia norteamericana. A continuación se detallan los principales códigos, normas y especificaciones aplicables:

2.2.A. Norma API 650

La norma API 650: “Welded Steel Tanks for Oil Storage”, establece los requerimientos mínimos de materiales, diseño, fabricación, montaje e inspección para tanques soldados de almacenamiento, operando en presiones internas similares a las atmosféricas. Aplica sólo para tanques no refrigerados con una temperatura de operación máxima de 200 °F (93 °C) y cuya base está completamente soportada (American Petroleum Institute, 2013).

Para el diseño de tanques toma en cuenta el efecto de cargas generadas por: peso del tanque y sus componentes, presión externa (hasta un máximo 0.25 kPa o 0.04 psi, y en el caso de la aplicación de los requerimientos del ANEXO V de la norma hasta un máximo de 6.9 kPa o 0.94 psi), considerando además presión interna, prueba hidrostática, cargas sísmicas, acción del líquido almacenado, viento, nieve y cargas externas. En ningún caso esta norma toma en cuenta el efecto sobre la integridad del tanque de las ondas expansivas producidas por algún tipo de explosión.

2.2.B. Norma API 620

El estándar API 620; “Design and Construction of Large Welded, Low Pressure Storage Tanks”, cubre el diseño y la construcción de grandes tanques de almacenamiento soldados de baja presión, para temperaturas no mayores a 250 °F (121 °C) y presiones internas no mayores a 15 psi (103 kPa). Las reglas de este estándar aplican para la construcción de

tanques que pretenden almacenar líquidos con gases o vapores en su superficie o para tanques que almacenan gases o vapores solamente (American Petroleum Institute, 2002).

Este estándar considera para su diseño las cargas por: presión interna y/o vacío resultado de su operación, peso del tanque y su contenido, cargas impuestas (como peso de plataformas, escaleras o el efecto nieve), cargas por viento, cargas sísmicas, cargas producidas por conexiones con tuberías, peso de recubrimientos o aislamientos. Al igual que la norma API 650 no toma en cuenta el efecto que podría causar una explosión.

2.2.C. Especificación API 12F

La especificación API 12F “Specification for Shop Welded Tank for Storage of Production Liquids”, cubre los requerimientos de materiales, diseño, fabricación y pruebas para tanques soldados de almacenamiento verticales fabricados en taller, no abiertos a la atmósfera para varios tamaños y capacidades estándar. Las capacidades nominales varían entre 90 bbl (14.31 m³) y 500 bbl (79.49 m³), para presiones internas aproximadas a la atmosférica, no mayor a 16 oz/plg² (6.90 kPa) y en vacío no menor a 0.5 oz/plg² (0.215 kPa), exclusivamente para el almacenamiento de petróleo crudo y otros líquidos manejados y almacenados en la industria del petróleo (American Petroleum Institute, 1994).

2.2.D. Especificación API 12D

La especificación API 12D “Specification for Field Weld Tank for Storage of Production Liquids”, cubre los requerimientos de materiales, diseño, fabricación y pruebas para tanques soldados de almacenamiento verticales fabricados en campo, no abiertos a la atmósfera para varios tamaños y capacidades estándar. Las capacidades nominales varían entre 500 bbls (79.49 m³) y 10000 bbls (1589.87m³), para presiones internas aproximadas a la atmosférica, no mayor de 8 oz/plg² (3.45 kPa) y en vacío no menor a 0.5 oz/plg² (0.215 kPa),

exclusivamente para el almacenamiento de petróleo crudo y otros líquidos comúnmente manejados y almacenados en la industria del petróleo (American Petroleum Institute, 1994).

2.2.E. Especificación API 12B

La especificación API 12B “Specification for Bolted Tank for Storage of Production Liquids”, cubre los requerimientos de materiales, diseño, fabricación y pruebas para tanques empernados, abiertos y no abiertos a la atmósfera para varios tamaños y capacidades estándar. Las capacidades nominales varían entre 100 bbls (15.90 m³) y 10000 bbls (1589.87m³) para presiones internas aproximadas a la atmosférica, no mayor de 3 oz/plg² (1.29 kPa) y en vacío no menor a 0.5 oz/plg² (0.215 kPa), exclusivamente para el almacenamiento de petróleo crudo y otros líquidos comúnmente manejados y almacenados en esta la industria del petróleo (American Petroleum Institute, 1995).

Las especificaciones API 12B, API 12D y API 12F establecen las dimensiones de gran parte de los componentes de los tanques, razón por la cual no requiere de cálculos de ingeniería para los mismos. Estas normativas no establecen específicamente las cargas para las que fueron diseñados estos tanques, por lo que no puede decirse nada respecto a las cargas por explosión, aunque se supone, como en los casos anteriores, que no fueron consideradas.

2.2.F. Código ASME de calderas y recipientes a presión

El código ASME de Calderas y Recipientes a Presión, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code”, establece las normas de seguridad, dentro de los límites del código, que rige el diseño, la fabricación y la inspección de calderas, recipientes a presión, y componentes de plantas de energía nuclear.

El código consta de doce secciones:

Sección I: Reglas para construcción de calderas de potencia

Sección II: Especificaciones de materiales

Parte A: Especificaciones de materiales ferrosos

Parte B: Especificaciones de materiales no ferrosos.

Parte C: Especificaciones de materiales de soldadura.

Sección III: Plantas de potencia nuclear**Sección IV:** Reglas para construcción de calderas para calefacción**Sección V:** Pruebas no destructivas**Sección VI:** Reglas recomendadas para el cuidado y operación de calderas para calefacción.**Sección VII:** Reglas Sugeridas para el cuidado de calderas de potencia**Sección VIII:** Reglas para construcción de recipientes a presión

División 1: Recipientes a presión

División 2: Reglas para diferentes alternativas para recipientes a presión.

División 3: Reglas alternativas para la construcción de recipientes de alta presión

Sección IX: Requisitos de soldadura**Sección X:** Recipientes a presión de plástico reforzado y fibra de vidrio.**Sección XI:** Reglas para inspección en servicio de plantas de potencia nuclear.**Sección XII:** Reglas para la construcción y uso continuo de tanques de transporte.**(i) Sección I: Reglas de construcción de calderas de potencia**

La Sección I, “Rules for Construction of Power Boilers”, proporciona los requerimientos para la construcción de calderas de potencia, calderas eléctricas, calderas en miniatura,

calderas de alta temperatura usadas en servicio estacionario, así como calderas de potencia usadas en locomotoras, y servicio portable.

Las reglas de esta sección están restringidas para calderas de vapor con presiones de operación mayores a 15 psi (103 kPa), para calderas de calefacción y suministro de agua caliente con presiones mayores a 160 psi (1100 kPa) y/o temperaturas mayores a 250 °F (121°C). También aplican para calderas de una presión máxima de vacío de 15 psi (103 kPa) que no excedan una temperatura de 210 °F (99 °C) (American Society of Mechanical Engineers, 2001).

Para el diseño se toma en cuenta los esfuerzos debidos a la presión de trabajo, la carga hidrostática y cualquier otra carga que incremente la tensión media en más de un 10% de la tensión de trabajo permitida (esto incluye las cargas por peso de componentes y soportes).

Esta sección no toma en cuenta el efecto de una explosión y su naturaleza en el diseño de las calderas.

(ii) Sección IV: Reglas de construcción de calderas de calefacción

La sección IV, “Rules for Construction of Heating Boilers”, establece los requerimientos mandatorios, prohibiciones específicas y guías no mandatorias para el diseño, fabricación, examinación, inspección, pruebas, certificación y alivio de presión de calderas de calentamiento de vapor, calderas de calefacción y suministro de agua caliente.

Las reglas de esta sección están restringidas para calderas de vapor que no excedan presiones de operación de 15 psi (103 kPa), y para calderas de calefacción y suministro de agua caliente que no excedan 160 psi (1100 kPa) y/o temperaturas mayores a 250 °F (121°C). También es aplicable a calderas con una presión máxima de vacío de 15 psi (103 kPa) que no excedan una temperatura de 210 °F (99 °C). La Sección no toma en cuenta el efecto de una explosión en el diseño (American Society of Mechanical Engineers, 1999).

(iii) Sección VIII: Reglas para la construcción de recipientes a presión

La sección VII, “Rules for Construction of Pressure Vessels”, se divide según la condiciones de operación en División 1, División 2 y División 3.

La Sección VIII, Div 1, contienen los requerimientos obligatorios, prohibiciones y guías no obligatorias para las actividades de construcción, diseño, fabricación, inspección, pruebas y certificación de:

- recipientes a presión que contienen agua a presiones de diseño mayores a 300 psi (2070 kPa).
- temperatura de diseño mayor a 210 °F (99 °C).
- tanques de almacenamiento de agua caliente: calentados por vapor u otros medios indirectos cuando el calor transmitido es mayor a 200000 BTU/hr con temperatura del agua mayor a 210 °F (99 °C) o capacidad del tanque mayor a 120 gal (450 l).
- recipientes con presión interna o externa mayor a 15 psi (100 kPa).
- recipientes que tengan un diámetro interior mayor a 6”.
- recipientes con presiones de diseño menores a 3000 psi (20685 kPa).

El código toma en cuenta para el diseño cargas por: presión interna y externa, peso del recipiente y su contenido tanto en condición de operación como en condiciones de prueba (incluye la presión adicional producida por la altura hidrostática del líquido), cargas impuestas por equipos agregados (como motores, mecanismos, tuberías, otros recipientes, recubrimientos y aislamientos), colocación de internos, soporte de recipientes, reacciones cíclicas y dinámicas producida por variación de presión, otros equipos y/o cargas mecánicas, carga de viento y nieve, cargas sísmicas, cargas por impacto (como las producidas por el choque del fluido), gradientes de temperatura, expansión térmica diferencial y presiones

anormales (como las causada por deflagración) (American Society of Mechanical Engineers, 2007).

Para este último punto establece como guía no obligatoria al ANEXO H; y éste a su vez refiere a los criterios establecidos en NPFA 69 y ASME BPV sección III, subsección NB para su uso en clase 1. Es preciso aclarar que el ANEXO H es solamente una sección sugerida y no obligatoria del código, por lo que su cumplimiento no afecta la certificación del equipo bajo los lineamientos del código ASME BPV sección VIII División 1.

Por otra parte, las reglas de la Sección VIII, Div 2, tomadas en su conjunto, proporcionan un conjunto de requisitos mínimos alternativos para el diseño, fabricación, inspección, y certificación de recipientes a presión incluidos en el ámbito de la División 1. El alcance de esta división incluye recipientes a presión que contienen agua a presiones de diseño mayores a 300 psi (2070 kPa) y temperatura de diseño menor a 210 °F (99 °C); tanques de almacenamiento de agua caliente: calentados por vapor u otros medios indirectos cuando el calor transmitido es mayor a 200000 BTU/hr con temperatura del agua mayor a 210 °F (99 °C) o capacidad del tanque mayor a 120 gal (450 l); recipientes con presión interna o externa mayor a 15 psi (100 kPa) y recipientes que tengan un diámetro interior mayor a 6" (150 mm). A diferencia de la División 1 no presenta limitación alguna sobre altas presiones.

Su alcance cubre a recipientes a presión instalados en una locación estacionaria o instalados en buques de altamar, barcasas, y otras embarcaciones, de un servicio específico que mantenga la operación y el control de mantenimiento durante toda la vida útil del recipiente según lo establecido en la especificación de diseño y los lineamientos dado por la sección; así como los recipientes a presión sujetos a fuego directo pero que no estén dentro del alcance de las secciones I, III, y IV.

En relación con las reglas de la División 1 de la Sección VIII, estas reglas de la División 2 son más restrictivas en la elección de los materiales, procedimientos de fabricación, inspecciones y pruebas; pero tiene esfuerzos admisibles mayores que los de la División 1, lo que se traduce en espesores más pequeños.

En la sección se considerarán las siguientes cargas: presión interna y externa (incluyendo la presión hidrostática), el peso del recipiente a presión y su contenido bajo condiciones de funcionamiento o de prueba, cargas impuestas por equipos adicionales como: otros recipientes a presión, equipos operativos, aislamientos, revestimientos resistentes a la corrosión o erosión y tuberías, la cargas de viento, cargas de nieve y cargas sísmicas, las reacciones en apoyos (anillos, sillas de montar, otros tipos de soportes de recipientes a presión), cargas de impacto (incluyendo la fluctuación rápida de presión), y condiciones de temperatura que sean capaces de introducir cargas de tensión diferencial y reacciones debido a la expansión o contracción de la tubería adjunta u otras partes.

Al igual de lo que ocurre en otras normas y códigos no se toma en cuenta las cargas debido a una explosión para su diseño.

Por su parte en la sección VIII división 3, constituye los requerimientos mínimos para el diseño, la construcción, la inspección y la protección a la sobrepresión de recipientes a presión metálicos con presiones de diseño generalmente sobre 10000 psi (68948 kPa). Los requerimientos de la división 3 aplican a recipientes para la contención de fluidos líquidos o gaseosos, bajo presión interna o externa generada por: una fuente externa, aplicación de calor directa o indirecta, reacción del proceso o la combinación de alguna de ellas. Además aplica solamente a tanque instalados en una ubicación fija (estacionarios), no aplica a tanques de carga montados en vehículos de transporte.

La sección considera las cargas para presión interna y externa a la temperatura de ocurrencia, condiciones de temperatura que produzcan esfuerzos térmicos (como los producidos por gradientes térmicos y expansiones térmicas), el peso del recipiente y su contenido bajo condiciones de operación y prueba, cargas impuestas por equipos agregados como: otros recipientes a presión, tuberías, u otros equipos operativos, las cargas de viento, cargas de nieve, cargas sísmicas, reacciones en apoyos (anillos, sillas de montar, otros tipos de soportes de recipientes a presión), cargas de impacto (incluyendo la fluctuación rápida presión y fuerzas de reacciones debidas a dispositivos de alivio). De igual manera que en los casos anteriores la sección VII división 3 no toma en cuenta la carga debida a una explosión.

CAPITULO 3

Explosiones

3. EXPLOSIONES

Una explosión se define como una liberación repentina de energía generando una onda de choque que se desplaza alejándose de la fuente que la origina al mismo tiempo que va perdiendo energía con el tiempo (Casal y col, 1999).

Las velocidades de propagación superiores a 1 m/s generan ondas de choque que, en función de si se desarrollan en espacios abiertos o cerrados, tendrán facilidad para su disipación o sufrirán un proceso aún mayor de compresión.

3.1. Causa de las explosiones

Las causas de las explosiones se pueden analizar desde 3 puntos de vista:

- Lo que sucede dentro del Recipiente .
- Lo que sucede en el Recipiente.
- Lo que sucede fuera del Recipiente.

3.1.A. Lo que sucede dentro del recipiente

Este análisis teórico se hace bajo la hipótesis de que el recipiente se encuentra en óptimas condiciones, siendo el contenido del recipiente el que está sufriendo un aumento de la presión debido a cambios físicos y/o químicos (Figura 3.1).

En determinados casos el aumento de la presión se genera por medios mecánicos o por fenómenos sin presencia de una transformación química de la sustancia involucrada. El gas puede alcanzar alta presión por sobrellenado, o por calentamiento, o bien un líquido sobrecalentado que puede generar alta presión por evaporación repentina. Ninguno de estos fenómenos significa cambio en la naturaleza química de las sustancias involucradas; todo el

proceso de aumento de presión, descarga y efectos de la explosión puede entenderse de acuerdo con las leyes fundamentales de la física (Botta, 2011).

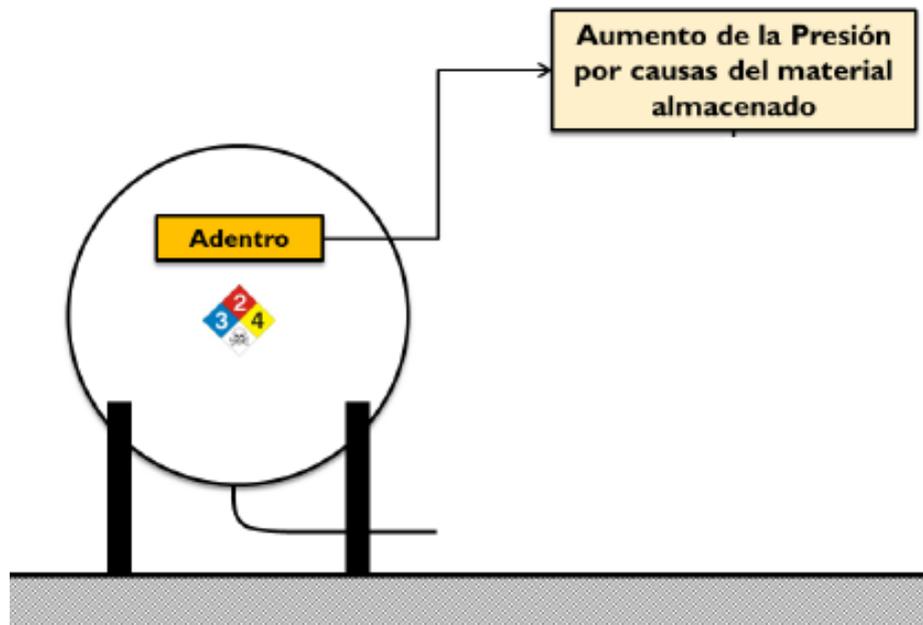


Figura 3.1 Rotura de recipiente (causa dentro del recipiente)

Fuente: Adaptado de Botta (2011)

En otras circunstancias, la generación del gas a alta presión es el resultado de reacciones químicas donde la naturaleza del producto difiere sustancialmente de la inicial (reactivo). Hay muchas reacciones químicas que generan gases a alta presión por ejemplo la descomposición de sustancias puras, combustión, hidratación, polimerización y distintas interacciones de dos o más sustancias químicas en mayor o menor grado de mezcla. Cualquier reacción química puede provocar una explosión si se emiten productos gaseosos, si se vaporizan sustancias no reaccionantes por el calor liberado en la reacción o si se eleva la temperatura de gases presentes, por la energía liberada (Botta, 2011).

3.1.B. Lo que sucede en el recipiente

Este análisis teórico se hace bajo la hipótesis de que el contenido del recipiente no está sufriendo ningún cambio fisicoquímico (Figura 3.2). El fallo de las paredes del contenedor se

puede deber a corrosión interna o externa, espesor no adecuado de las paredes, fallos del material, fallos en la soldaduras, etc. Es decir, un debilitamiento del recipiente por fenómenos de diseño, fabricación, transporte, montaje, uso, control o mantenimiento.

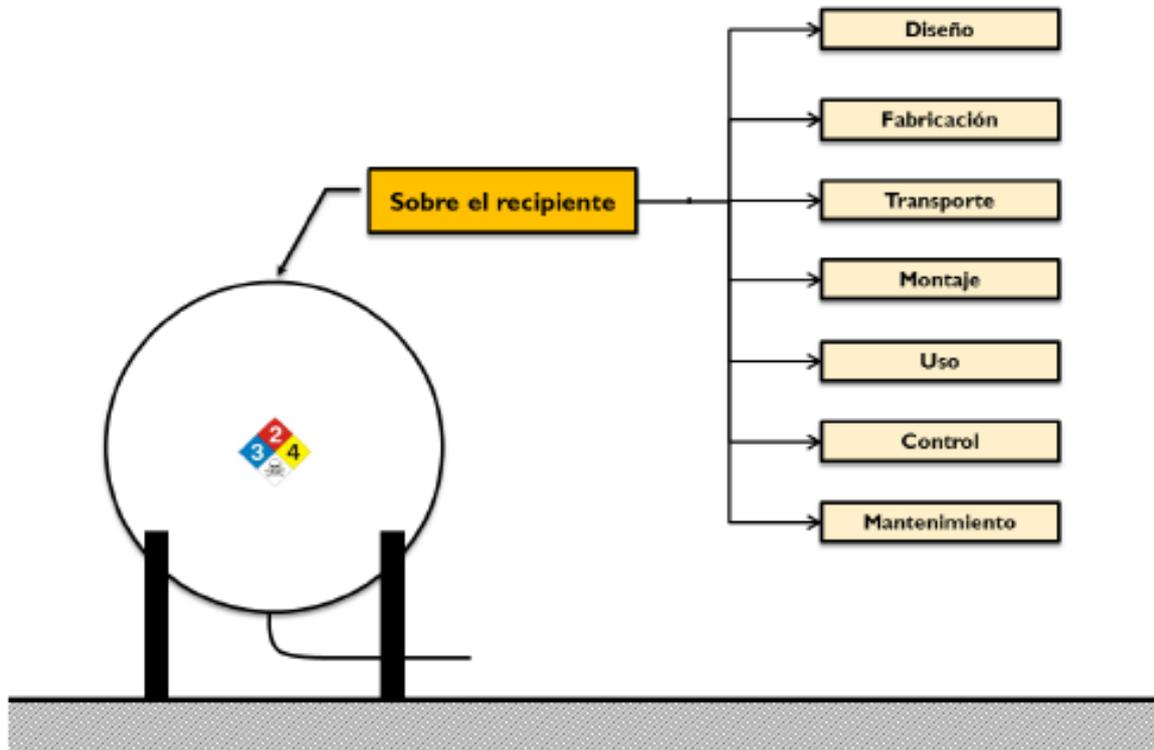


Figura 3.2 Rotura de recipinete (causada en el recipiente)

Fuente: Adaptado de Botta (2011)

3.1.C. Lo que sucede fuera del recipiente

Este análisis teórico se hace bajo la hipótesis de que la rotura del recipiente sucede por causas externas ajenas a la sustancia almacenada, que el recipiente se encuentra en óptimas condiciones.

El fallo estructural del recipiente se puede producir por un calentamiento localizado o generalizado externo (por ejemplo por un incendio en sectores adyacentes) que produce una disminución en la resistencia mecánica del recipiente, por un proyectil (por ejemplo otra

explosión) o por un impacto mayor como puede ser el choque de un vehículo o la onda de choque de una explosión en el exterior (Botta, 2011).

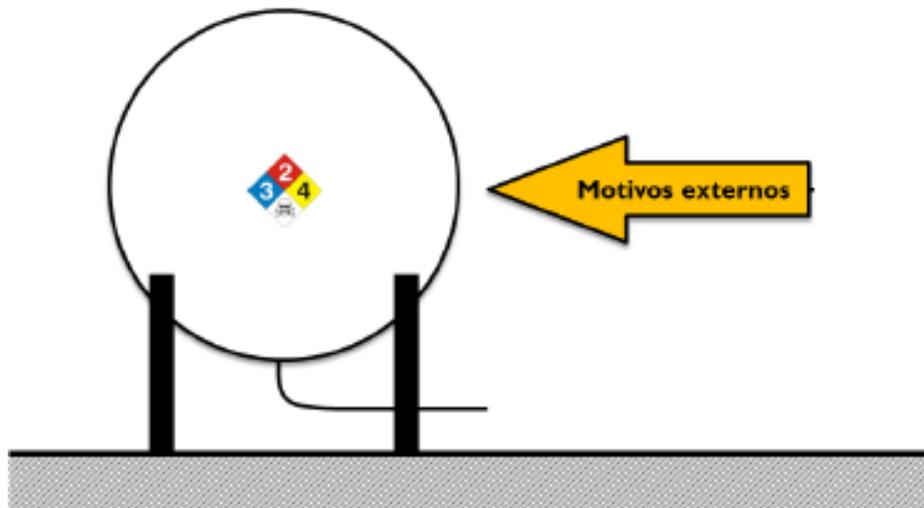


Figura 3.3 Rotura de recipiente (causas externas)

Fuente: Adaptado de Botta (2011)

En estas circunstancias la liberación de gas es extremadamente rápida y se genera una violenta onda de choque que puede producir significativos efectos de presión.

3.2. Tipos de explosiones

Existen dos enfoques con los que se pueden clasificar a las explosiones:

- Por los escenarios accidentales que presenta.
- Por la velocidad de la onda de sobrepresión de la explosión.

3.2.A. Por los escenarios accidentales que presenta

Según los escenarios accidentales que presenta las explosiones se clasifican en:

- En espacios cerrados.
- Explosión de vapores confinados (CVE).
- Ignición de polvos combustibles en suspensión.

- En espacios abiertos.
- Ignición nube de vapor no confinada (UVCE).
- Por explosión de recipientes.
- De gas comprimido.
- De gas licuado o líquido sobrecalentado (BLEVE).
- Reacciones fuera de control.

(i) En espacios cerrados

- *Explosiones de vapores confinados*

Las explosiones de vapores confinados ocurren cuando habiéndose producido un escape de un gas o de un vapor inflamable en un área confinada, el gas está dentro de los límites de inflamabilidad y encuentra un punto de ignición (Casal y col, 1999).

Se pueden distinguir dos tipos de comportamiento en función del grado de confinamiento: uno cuando las dimensiones de la zona confinada tienen una relación $L/D = 1$ y, además, en el interior hay pocos obstáculos y divisiones.

En este caso se producirá únicamente una sobrepresión relativamente baja que, si se trata de edificios, hará saltar el tejado al mismo tiempo que las paredes del recinto se desploman hacia los lados (Figura 3.4).

Si el recinto donde se encuentra el gas inflamable tiene $L/D > 1$ o en su interior hay un gran número de obstáculos o divisiones, al producirse la ignición el frente de la llama puede acelerarse en los lugares donde están situados los obstáculos, provocando detonaciones locales y alcanzando a sobrepresiones mucho mayores que en el caso anterior. Así, los

efectos finales de este tipo de explosión serán mucho más destructivos, principalmente en puntos alejados.

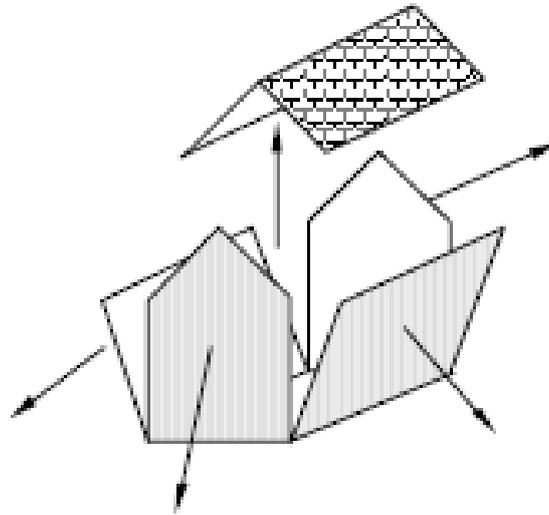


Figura 3.4 Esquema de los efectos de la sobrepresión de una explosión en el interior de un recinto cerrado

Fuente: Casal y col (1999)

- *Explosión por ignición de polvo combustible en suspensión*

En principio, cualquier producto sólido que sea combustible en aire puede experimentar este tipo de explosión, siempre y cuando se encuentre dividido en partículas lo suficientemente pequeñas y esté en suspensión en una cantidad de aire lo bastante grande, como para que cada partícula tenga espacio suficiente para arder libremente.

Algunos sólidos considerados inofensivos como la harina o el polvo de aspirina han originado explosiones muy destructivas. En algunos casos las partículas metálicas pueden reaccionar con otros gases, pero lo más frecuente es que la reacción tenga lugar con oxígeno. Únicamente aquellos materiales que son estables en oxígeno no experimentan este tipo de fenómeno; es el caso del polvo de silicatos, sulfatos, nitratos, carbonatos y fosfatos, como pueden ser el cemento portland, la arena, etc. Ejemplos de materiales que si pueden

experimentar estas explosiones son: cereales, lino, fibras, azúcar, plásticos, pigmentos orgánicos, pesticidas, carbón y metales como el aluminio, el magnesio, el zinc, el hierro, etc.

Las explosiones de nubes de polvo grandes comienzan por pequeñas explosiones en el interior de los equipos de proceso; cuando éstos estallan, provocan turbulencia y mezcla de más polvo con el aire, originando otra explosión de dimensiones mucho mayores y con efectos altamente destructivos (Casal y col, 1999).

(ii) En espacios abiertos

- *Explosiones de nubes de vapor no confinadas*

Las nubes de vapor no confinadas conocidas también como UVCE (“Unconfined Vapour Cloud Explosion”) se generan a raíz del escape de una cantidad determinada de un vapor combustible, o bien de un líquido a partir del cual se formará el vapor. Esto puede ocurrir en las instalaciones de una planta de proceso, en las inmediaciones de un gaseoducto o durante el transporte.

Una vez formada la nube pueden ocurrir tres escenarios: que se disperse en el aire antes de que se produzca la ignición sin causar una explosión o llamarada, que se inicie inmediatamente y se inicie un incendio de charco (en general, en este caso no habrá explosión y los daños ocasionados serán menores), que se disperse en un área extensa y producirse la ignición al cabo de un cierto tiempo (de manera que se formará una gran llamarada), o dispersarse en un área extensa y producirse la ignición al cabo de un cierto tiempo pero de modo que el frente de la llama se acelera tanto que genera una onda de sobrepresión.

Las explosiones de nubes de vapor no confinadas son uno de los mayores peligros dentro de la industria de procesos debido a que ocurren con bastante frecuencia. Por otra parte, el problema principal de este tipo de nubes proviene del hecho que la ignición de ésta puede

producirse en un punto alejado de la fuente origen del vertido y afectar a grandes áreas (Casal y col, 1999).

(iii) Por explosión de recipientes

Este tipo de explosiones puede tener orígenes muy diversos. En primer lugar, el estallido de un recipiente se puede producir simplemente por causa de algún defecto de diseño, montaje, construcción, mal uso, por una pérdida de resistencia a causa de la corrosión o erosión, por la fatiga del material o incluso por un impacto externo (por ejemplo otra explosión). Estos casos, en general son muy poco frecuentes pero pueden ser particularmente peligrosos si el contenido del recipiente es inflamable (Figura 3.5).



Figura 3.5 Fallo de recipiente a presión durante prueba hidraulica en inspección anual

Fuente: Haywood (2005)

Otro caso distinto se presenta cuando el recipiente está expuesto a un aumento excesivo de presión debido a la falla del sistema de seguridad y control, a un sobrellenado, o al calentamiento del recipiente desde el exterior (a causa de un incendio por ejemplo), de manera que la presión en el interior va aumentando mientras el recipiente va perdiendo también resistencia por el aumento de temperatura, hasta que se produce la rotura.

Dentro de este tipo de explosiones encontramos las originadas por la liberación de gas comprimido, liberación de gas licuado o líquido sobrecalentado (BLEVE) o por reacciones fuera de control (“runaway reactions”) (Casal y col, 1999).

- *Liberación de un gas comprimido*

La sustancia involucrada es un gas contenido en un recipiente a una presión superior a la atmosférica. La mayor parte de estas explosiones involucran a un contenedor, una caldera, un cilindro de gas, etc.

En el contenedor se genera alta presión por compresión mecánica del gas, calentamiento o introducción de un gas a elevada presión desde otro contenedor. Cuando la presión alcanza el límite de resistencia de la parte más débil del contenedor, se produce el fallo. En algunos casos, el punto débil lo constituyen los componentes relativamente pequeños en la instalación, que se proyecta como metralla. A veces son las paredes las que fallan y el contenedor revienta con extrema violencia (Botta, 2011).

- *Liberación de gas licuado o líquido sobrecalentado (BLEVE)*

BLEVE es una palabra formada por las cinco primeras letras de la frase, en inglés, “Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion”, es decir explosión de los vapores que se expanden al hervir un líquido” (Figura 3.6).

La BLEVE comienza con la liberación de una sustancia contenida en un recipiente en estado líquido y que, en condiciones ambientales normales de presión y temperatura, sería un gas o vapor.

Si se rompe el recipiente, este gas o vapor que está licuado se despresuriza y se expande dentro y fuera del recipiente, el líquido entra bruscamente en ebullición y una gran cantidad del mismo se evapora muy rápidamente en forma casi instantánea. El cambio de estado

líquido a vapor supone un gran aumento de volumen que se produce casi instantáneamente. La expansión del vapor produce una onda de presión destructiva, que es en definitiva la que produce la explosión. La BLEVE regularmente está asociada a una bola de fuego y trae aparejado graves daños humanos y materiales.



Figura 3.6 BLEVE en esfera de almacenamiento de LPG

Fuente: Galán (2012)

- *Reacciones fuera de control*

Las reacciones fuera de control (“*runaway reactions*”) se pueden definir como el desarrollo incontrolado de una o varias reacciones exotérmicas. Este tipo de reacciones ha causado a lo largo de la historia numerosos accidentes en la industria química. Entre los más conocidos cabría destacar el de Seveso (1976) y el de Bhopal (1984), éste último con dramáticas consecuencias en la población.

Las reacciones fuera de control pueden originarse por una pérdida de control en una reacción deseada o bien por la aparición de una reacción no deseada. No sólo las reacciones fuertemente exotérmicas son potencialmente peligrosas. Las reacciones débilmente exotérmicas también pueden originar un incremento de temperatura suficiente como para permitir la aparición posterior de reacciones fuertemente exotérmicas.

La pérdida de control de una reacción química exotérmica puede producirse no únicamente en reactores químicos, sino también en otras unidades como, por ejemplo, columnas de destilación, depósitos de almacenamiento, etc. Los efectos de estas reacciones pueden ser la explosión de estos recipientes y/o la pérdida de contención de los productos químicos que contengan, eventualmente tóxicos o inflamables.



Figura 3.7 Desastre de Bhopal

Fuente: Industrial accident in Bhopal: 25 years later (2009)

Si la velocidad a la que el sistema desprende calor es superior a la velocidad con la que el propio sistema puede disiparlo, la temperatura aumentará hasta un valor crítico a partir del cual el proceso será incontrolable. La condición esencial para este fenómeno es la aparición

de un proceso auto acelerado de calefacción, o sea, un proceso auto térmico: a medida que la temperatura aumenta, la velocidad de reacción se incrementa exponencialmente hasta valores muy elevados; este proceso puede ser muy lento al principio, pero muy rápido en su fase final.

La formación de gas o el incremento de la presión de vapor originan un aumento de la presión del sistema. Si el sistema es cerrado, este aumento de presión originará la explosión del recipiente, mientras que si se dispone de un sistema de seguridad, tipo disco de rotura o válvula de seguridad, este aumento de presión podrá ser controlado pese a que habrá una emisión importante de material hacia la atmósfera; si no existe ningún sistema para contener, tratar o dispersar este producto, la pérdida de contención puede también ocasionar graves efectos (Casal y col, 1999).

Como medida de prevención para la explosión de recipientes periódicamente los distintos códigos, normas y reglamentos, establecen, dependiendo del tipo de recipiente a presión, así como dependiendo del uso, que deben de ser sometidos a inspecciones y pruebas preestablecidas, una de estas es la prueba de presión.

Las pruebas de presión pueden ser hidráulicas o neumáticas. Se realizan a la presión de prueba, que depende del tipo de recipiente, y suelen estar indicada por el fabricante del equipo. El objetivo principal de estas pruebas es verificar el correcto funcionamiento del equipo. Hay que tener en cuenta que el objetivo principal es verificar la resistencia de la estructura buscando un fallo en el recipiente.

- *Tipos de rotura de recipientes*

Con la finalidad de entender los riesgos que pueden ocasionar las explosiones es pertinente estudiar los tipos de fallos que puedan aparecer en los recipientes.

Las roturas de los recipientes, pueden clasificarse en dos tipos dependiendo de la deformación plástica del material que acompaña a la rotura. Las roturas de los recipientes se clasifican en dúctiles y frágiles.

Roturas dúctiles: Son las más frecuentes en la industria, producen pocos fragmentos de gran tamaño, con un elevado potencial para producir daños. Este tipo de roturas, tienen lugar después de una intensa deformación plástica y se caracteriza por una lenta propagación de la grieta.

Roturas frágiles: En este tipo se producen fragmentos de menor tamaño, tienen lugar sin una apreciable deformación y debido a una rápida propagación de la grieta.

Teniendo en cuenta lo mencionado se concluye que el estallido puede producirse a la presión normal de operación o como consecuencia del aumento de ésta. Por este motivo, los recipientes a presión poseen dispositivos de seguridad que permiten aliviar la presión interna si ésta supera ciertos límites. La explosión ocurrirá cuando los sistemas de alivio no son capaces de compensar el aumento de presión o cuando dichos sistemas fallan.

En el momento del estallido la energía del fluido se invertirá en la formación de proyectiles y de una onda de presión.

Además, pueden producirse otra serie de consecuencias asociadas; así, la fuga de estos productos puede dar lugar a una bola de fuego, una explosión de nube de vapor, un incendio flash o a la formación de una nube tóxica. Que ocurran estas u otras consecuencias dependerá de las características inflamables y tóxicas de los productos contenidos o generados en la combustión y de las circunstancias de cada accidente.

3.2.B. Por la velocidad de la onda de sobrepresión de la explosión

Según este enfoque las explosiones pueden ser de dos tipos: detonaciones y deflagraciones.

(i) Deflagración

En este tipo de explosiones la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es subsónica; y tienen una forma como la esquematizada en la Figura 3.8 , con una fase positiva y una fase negativa (Casal y col, 1999).

La masa que deflagra puede estar en estado sólido, líquido, gas, vapor, polvo en suspensión, líquido nebulizado o mezclas de éstos. Esta masa puede encontrarse libre o confinada.

El confinamiento suele tener lugar en un recipiente, pero también puede ser producido por un recinto e incluso por el efecto de inercia de una gran masa sobre sí misma (Botta, 2011).

En determinadas situaciones, sin embargo, una deflagración puede llegar a convertirse en detonación (por ejemplo, en el caso de un frente de llama que se propaga dentro de una tubería).

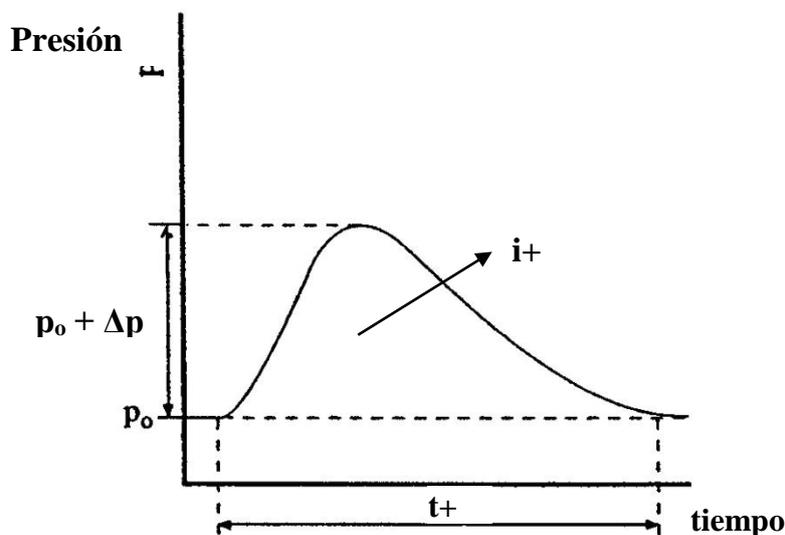


Figura 3.8 Evolución en el tiempo de la onda de choque en deflagración

Fuente: Adaptado de Casal y col (1999)

(ii) Detonación

En este tipo de explosiones la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es supersónica. La onda tiene una forma como la representada en la Figura 3.9, la

onda de sobrepresión muestra un incremento de la presión casi instantáneo hasta el pico de máxima presión, presenta también una fase positiva y otra negativa (Casal y col, 1999).

Como la deflagración, la masa que detona puede encontrarse en estado sólido, líquido, gas o vapor. Esta masa puede encontrarse libre o confinada. Bajo ciertas condiciones de confinamiento pueden producirse también detonaciones de polvo en suspensión.

Debido a la velocidad de reacción, las detonaciones siempre generan gases a alta presión, independientemente del estado y grado de confinamiento de la mezcla detonante. La presión generada es mayor que en el caso de las deflagraciones (Botta, 2011).

Las detonaciones son siempre (para una determinada cantidad de energía) mucho más destructivas que las deflagraciones, ya que pueden llegar a tener picos de presión cercanos a los 20 bar, mientras que en las deflagraciones los valores máximos son de unos 8 bar. Como contrapartida hay que tener en cuenta que es muy difícil iniciar una detonación; por el contrario, las deflagraciones requieren de muy poca energía (del orden de mJ) para iniciarse (Casal y col, 1999).

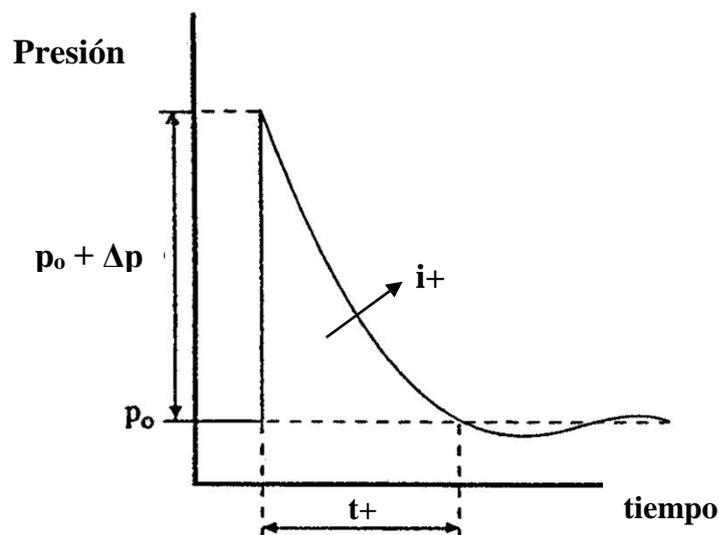


Figura 3.9 Evolución en el tiempo de la onda de choque en detonación

Fuente: Adapado de Casal y col (1999)

3.3. Onda de choque

Las ondas se definen como un fenómeno de transmisión de energía sin que haya transporte de materia, la energía que se propaga proviene del foco emisor, que puede ser continuo o discontinuo.

En una explosión el efecto más característico es el brusco aumento de la presión que se produce en el aire circundante y que se propaga en forma de onda en todas las direcciones libres del espacio. La forma, características y magnitud de la onda dependen del tipo de explosión como se explica previamente, pero también del entorno y de la distancia al origen del accidente.

Las ondas de presión presentan un decaimiento en función de la distancia al epicentro. Idealmente la onda que llega a una cierta distancia de la explosión se puede representar con la forma esquematizada en la Figura 3.10.

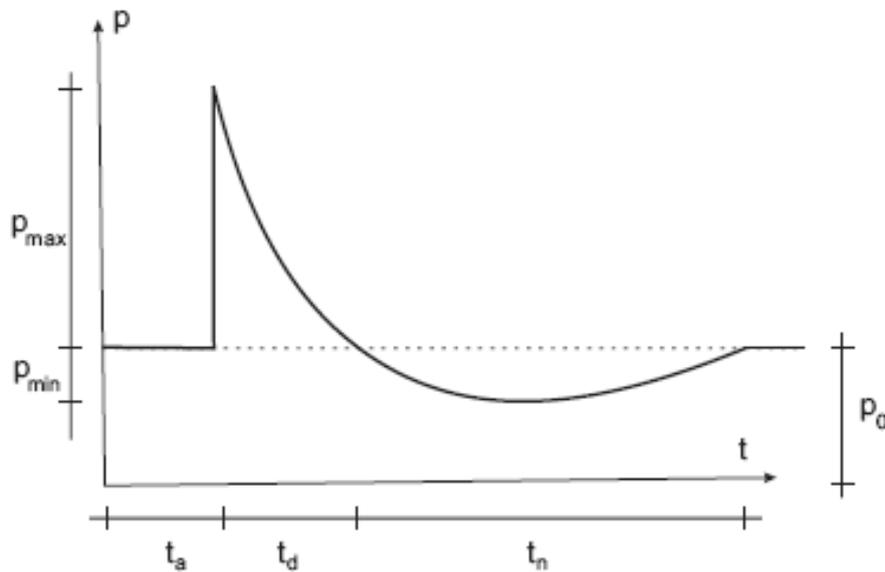


Figura 3.10 Perfil de Presión vs Tiempo

Fuente: Larcher (2007)

Donde:

P_{max} = Pico de presión, sobrepresión estática o presión máxima

P_{min} = Presión mínima o presión de succión

P_o = Presión atmosférica

t_a = Tiempo de arribo

t_d = Tiempo de duración fase positiva

t_n = Tiempo de duración fase negativa o succión

Esta onda produce tras ella el desplazamiento del aire a gran velocidad. En la zona de sobrepresión o fase positiva la onda de presión genera que la materia emigre del foco explosivo. En la fase negativa o succión la materia regresa hacia el foco.

Los puntos de mayor presión viajan a mayor velocidad que los que están a menor presión, lo que se traduce en la formación de un choque en el frente de la onda.

Por otro lado, como consecuencia del incremento de entropía del medio sometido al choque, la energía se disipa e inevitablemente el frente de onda pierde presión y velocidad hasta convertirse en una onda sónica.

Antes de la llegada del frente de la onda de choque, la presión existente es la presión ambiental atmosférica P_o en el instante en que se produce la explosión. El efecto principal es el aumento brusco de la presión desde la presión atmosférica P_o hasta que alcanza un valor máximo que se conoce como pico de presión, sobrepresión estática o presión máxima. P_{max} .

En el tiempo de arribo t_a de la onda de choque, la presión sube abruptamente (discontinua en una onda ideal) hasta un valor $P_{max} + P_o$. A partir de ese momento la presión decae logarítmicamente hasta alcanzar la presión ambiental P_o en un tiempo $t_a + t_d$.

El tiempo t_d en el que la presión es superior a la atmosférica se conoce como fase positiva.

Después de la fase positiva, suele seguir un descenso de la presión en forma logarítmica hasta P_{min} por debajo de la presión atmosférica. Esta etapa se conoce esta etapa como fase negativa o de succión.

El efecto de la fase negativa se debe a la contracción del aire que se expande en la explosión para proporcionar equilibrio al sistema (Lopes, 2007).

A efectos de los cálculos esta fase es despreciable debido a que su valor absoluto es muy inferior al de la fase positiva. Aunque en el caso de la explosión de nubes de vapor se puede originar valores de la fase negativa elevados que ocasionen daños muy importantes.

Además de la sobrepresión generada por la onda de choque existe otro fenómeno asociado a una presión dinámica. El mismo se origina porque el aire quieto que se encuentra delante de la masa de gas que se expande a alta velocidad se comprime y se mueve ahora a alta velocidad produciendo un aumento de la presión, debido a la velocidad del aire desplazado por el gas y al propio gas en expansión. Este efecto denominado “viento de la explosión”, ejerce una carga adicional sobre las estructuras o las superficies sobre las que incide (Galán, 2012).

Es preciso señalar que la variación en las condiciones ambientales y el tipo de sustancia involucrada pueden ocasionar cambios significativos en la forma en la que se presenta la onda de choque y sus consecuencias (Lopes, 2007).

Los parámetros característicos de la onda de sobrepresión descritos anteriormente se refieren a la onda no perturbada. Cuando la onda de presión choca con un medio más denso que el aire (típicamente una estructura) es reflejada y la sobrepresión aumenta, pudiendo alcanzar incluso valores de 10 veces la inicial (aunque normalmente tiende a ser 2 veces superior a la inicial). Esto significa que la onda que colisiona con la estructura podrá ser muy diferente a la

inicial si se tienen en cuenta las múltiples reflexiones que pueda haber sufrido con otros obstáculos o con el suelo (Casal y col, 1999).

3.4. Cargas resultantes debido a la onda de choque

La carga generada sobre una estructura o un equipo como resultado de la interacción de ésta con la onda de sobrepresión es debida a dos efectos: la difracción y el desplazamiento.

3.4.A. Carga de difracción

La carga producida por la sobrepresión incidente, durante un proceso de interacción en el cual esta es reflejada por la estructura, se llama carga de difracción. Este proceso incluye diversos tipos posibles de reflexión.

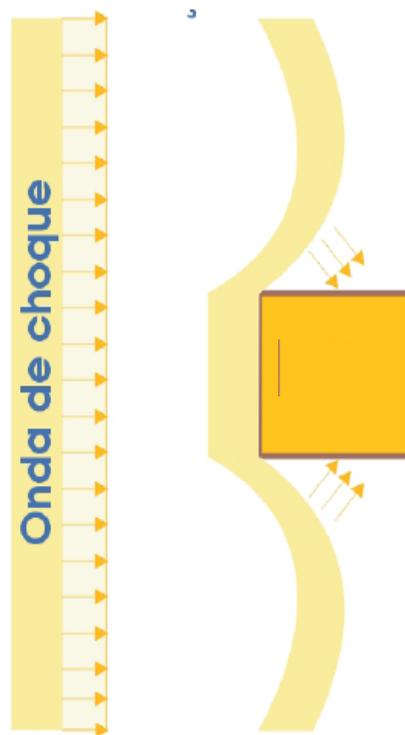


Figura 3.11 Estructura sometida a carga por difracción

Fuente: Adaptado de Lopes (2007)

La carga de difracción se origina en la diferencia de presión generada en la estructura cuando la onda de sobrepresión pasa por encima de ella. Al entrar en contacto la onda de sobrepresión y el objeto, se genera una onda que es reflejada y que al colisionar con los

vientos que siguen la onda inicial, origina una sobrepresión muy elevada denominada sobrepresión reflejada en la cara expuesta de la estructura. A medida que la onda inicial envuelve completamente la estructura se van generando otras ondas reflejadas en todas sus caras, y de este modo la presión se uniformiza (Casal y col, 1999).

Esta carga se puede dividir entre las tensiones generadas por la diferencia de presión entre la superficie frontal y la parte trasera de la estructura, así como las tensiones generadas por la diferencia de presión entre el interior y el exterior de la misma (Lopes, 2007).

Para obtener la curva de la carga de difracción sobre la estructura, a lo largo de la onda de choque, es necesario conocer la evolución de la presión a través del tiempo en cada punto de la estructura, contado desde el comienzo del paso de la onda sobre el equipo o estructura a analizar.

El efecto de desplazamiento, es debido a la presión dinámica, ejercida por el viento que sigue siempre a la onda de sobrepresión. La influencia de la carga por desplazamiento es mayor cuanto más grande sea la duración de la fase positiva de la onda de choque o cuanto menor sea la dimensión de la estructura en la dirección de la onda de choque.

Para grandes explosiones (con picos de sobrepresión superiores a 4,8 bar), la presión dinámica es superior al pico de sobrepresión, de manera que la carga más grande sobre la estructura será debida principalmente al efecto del desplazamiento. Para explosiones menores pero en estructuras poco resistentes (paredes, vidrios, puertas) que se rompan más fácilmente, la presión dentro y fuera se iguala rápidamente y el efecto de difracción se reduce a valores prácticamente despreciables. En esos casos también es más importante la carga por desplazamiento (Casal y col, 1999).

3.4.B. Carga por desplazamiento

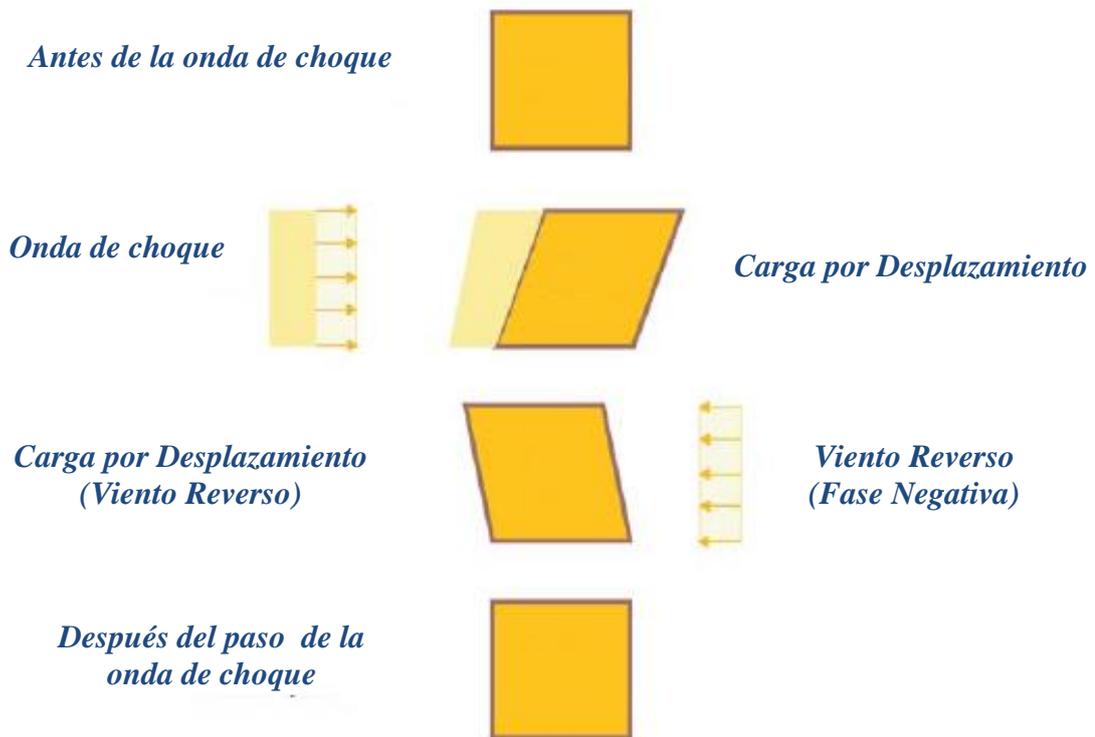


Figura 3.12 Estructura sometida a carga por desplazamiento.

Fuente: Adaptado de Lopes (2007)

En general, en las explosiones que se producen en la industria el valor máximo de sobrepresión es mayor que la presión dinámica y, por lo tanto, la carga es debida principalmente a los efectos de la difracción más que a los de desplazamiento; si bien no hay que olvidar que ambos efectos van unidos y están siempre presentes.

3.5. Métodos de cálculo

Estimar las consecuencias que puede tener una explosión sobre equipos de proceso y estructuras requiere: determinar la evolución en el tiempo de la onda de sobrepresión en el ambiente, la evolución en el tiempo de la carga que actúa sobre la estructura de interés como resultado de la interacción de la misma con la onda de sobrepresión y la respuesta a esta carga de la estructura.

En este trabajo se realizan las siguientes suposiciones para determinar las cargas que actuaran sobre los recipientes estudiados:

- No se considera el efecto de la presión dinámica ya que como se menciona en el punto 3.4.B, este efecto no es el más relevante.
- Las cargas corresponden a ondas que provienen directamente del centro de la explosión y que no han sufrido reflexiones previas con otros equipos ni con el suelo.
- La masa utilizada para el cálculo de los parámetros de las ondas de presión corresponde a una masa de TNT equivalente. Este valor se define como la masa de TNT que produciría los mismos efectos que una determinada masa de una sustancia inflamable específica.

Los diferentes parámetros del perfil de onda de choque se pueden calcular a través de diferentes métodos y ecuaciones matemáticas. La mayor parte de ellos se obtienen utilizando graficas o ecuaciones que se encuentran en términos de la distancia escalada Z :

$$Z = \frac{d}{W^{\frac{1}{3}}} \quad \left[m/kg^{\frac{1}{3}} \right]$$

Ecuación 3.1

Dónde:

d = distancia al centro de la carga [m]

W = masa de TNT equivalente [kg]

3.5.A. Fase positiva

Los parámetros de la fase positiva o zona de sobrepresión se pueden estimar por medio de expresiones matemáticas o en base a diagramas.

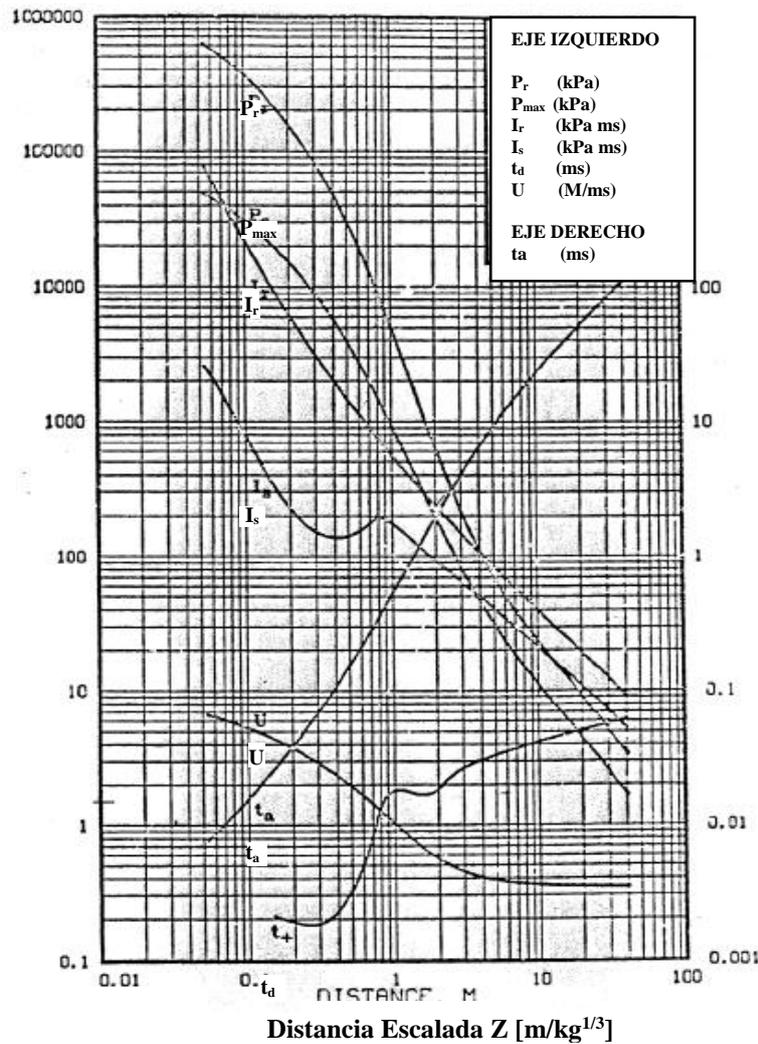


Figura 3.13 Diagrama nomogramático con distancias escaladas para parámetro de la fase positiva.

Fuente: Larcher (2007)

En la bibliografía entre los más utilizados se encuentran diagramas como en el propuesto por Baker y col (1983) para valores de Z mayores a 1000 o el propuesto por Kingery y Bulmash (1984) para valores de Z menores a 40 (Figura 3.14).

Para poder estimar los valores de los parámetros de presión máxima (P_{max}), tiempo de arribo (t_a) y tiempo de duración de la fase positiva (t_d) Kingery presenta también una serie de ecuaciones polinómicas (Lees, 1996).

$$\log_{10} \Phi = \sum_{i=0}^n c_i (a + b \cdot \log_{10} Z)^i$$

Ecuación 3.2

Donde Φ es la función de interés (P_{max} , t_a , t_d), n es el número de constantes c_i que posee según la función de interés a calcular, Z es la distancia escalada ($m/kg^{1/3}$), mientras que a , b , c_i son constantes. En general trabaja con $Z < 40$. Estas ecuaciones son ampliamente utilizadas como referencia por la mayoría de los investigadores y se encuentran implementadas en diferentes programas de ordenador. El ANEXOS A muestra el valor de las constantes sus rangos de trabajo y las unidades utilizadas.

Para valores de distancia escalada $Z > 40$ $m/kg^{1/3}$, Baker y col (1983) establece las siguientes expresiones para la presión máxima y el tiempo de duración de la fase positiva

$$P_{max} = 10^{-1.10 \cdot \log_{10}(Z) + 5.00} \quad [Pa] \quad \text{para } Z > 40 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$t_d = 10^{0.230 \cdot \log_{10}(Z) - 2.594} \quad [seg] \quad \text{para } Z > 40 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

El tiempo de arribo t_a para $Z > 40$ se lo estima tomando en consideración la velocidad del sonido por medio de la siguiente expresión (Larcher, 2008).

$$t_a = t_a(Z = 40) + \frac{d - d(Z = 40)}{343 \text{ m/s}} \quad [seg] \quad \text{para } Z > 40 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

3.5.B. Fase negativa

Los parámetros que definen la fase negativa tanto la presión mínima P_{min} como la duración de la fase negativa t_n dependen de la distancia a escala Z .

Generalmente los efectos de la fase negativa no se toman en cuenta, pero para una distancia escalada Z mayor a 20 y especialmente para Z mayor que 50 la influencia de la fase negativa no siempre puede ser despreciada (Larcher, 2007).

El valor de la Presión mínima P_{min} así como el de la duración de la fase negativa t_n pueden ser obtenidos del diagrama presentado por Drake y col (1989). Como alternativa se pueden

utilizar las siguientes expresiones para aproximar los valores de la presión mínima del diagrama antes citado.

$$P_{min} = \frac{0.35}{Z} 10^5 \text{ [Pa]} \quad \text{para } Z > 3.5$$

Ecuación 3.6

$$P_{min} = 10^4 \text{ [Pa]} \quad \text{para } Z \leq 3.5$$

Ecuación 3.7

$$\text{con } Z \left[m/kg^{\frac{1}{3}} \right]$$

La duración de la fase negativa del diagrama de Drake puede aproximarse con las siguientes funciones (Larcher, 2008).

$$t_n = 0.0104 \cdot W^{\frac{1}{3}} \text{ [seg]} \quad \text{para } Z < 0.3$$

Ecuación 3.8

$$t_n = (0.003125 \cdot \log(Z) + 0.01201) \cdot W^{\frac{1}{3}} \text{ [seg]} \quad \text{para } 0.3 \leq Z \leq 1.9$$

Ecuación 3.9

$$t_n = 0.0139 \cdot W^{\frac{1}{3}} \text{ [seg]} \quad \text{para } Z > 1.9$$

Ecuación 3.10

3.5.C. Curva presión tiempo

En base a los parámetros calculados se establece el perfil onda de presiones en función del tiempo utilizando diferentes expresiones. Para la fase positiva se utiliza la ecuación modificada Friendlander (Baker W. E., 1973).

$$P = P_0 \text{ [kPa]} \quad \text{para: } t \leq t_a$$

Ecuación 3.11

$$P = P_0 + P_{max} \left(1 - \frac{(t - t_a)}{t_d} \right)^{-\frac{b \cdot t}{t_d}} \text{ [kPa]} \quad \text{para: } t_a < t < t_a + t_d$$

Ecuación 3.12

Donde:

b = Parametro de forma de onda

El parámetro b se estima según la siguiente expresión (Larcher, 2007).

$$b = 5.2777 \cdot Z^{-1.1975}$$

Ecuación 3.13

La fase negativa se aproxima con dos rectas utilizando los parámetros de la fase negativa (Larcher, 2007)

$$P = P_0 - \frac{2 \cdot P_{min}}{t_n} (t - (t_d + t_a)) \quad \text{para: } t_d + t_a \leq t \leq t_d + t_a + \frac{t_n}{2}$$

Ecuación 3.14

$$P = P_0 - \frac{2 \cdot P_{min}}{t_n} ((t_d + t_a + t_n) - t) \quad \text{para: } t_d + t_a + \frac{t_n}{2} \leq t \leq t_d + t_a + t_n$$

Ecuación 3.15

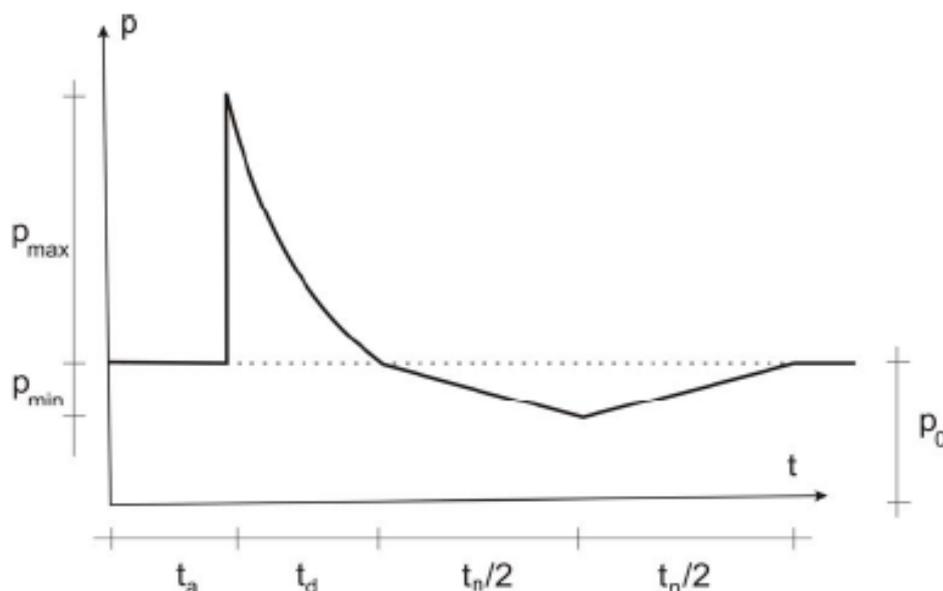


Figura 3.14 Perfil Presión vs Tiempo (fase negativa aproximada)

Fuente: Larcher (2007)

En la Figura 3.14 se muestran los parámetros que definen la curva (P_{max} , P_{min} , P_0 , t_a , t_d , t_n) y la fase negativa modelada por medio de dos rectas.

3.6. Efectos de la onda de choque

Existen distintas formas de determinar la respuesta de los equipos, de las estructuras e incluso de las personas frente a una explosión. Para este fin es necesario conocer la evolución de la carga que actúa en función del tiempo y los efectos que estas generan.

En la práctica para obtener resultados aproximados se suelen utilizar tablas obtenidas a partir de datos históricos o experimentales.

Se puede decir que habiendo tantos parámetros difíciles de cuantificar que pueden tener un efecto importante en la respuesta de una estructura (calidad de la construcción, edad, defectos preexistentes, etc.) recurrir a las tablas obtenidas mediante datos históricos es uno de los métodos más utilizados si lo que se quiere es tener una idea de la magnitud de las consecuencias derivadas de una explosión (Casal y col, 1999).

Sin embargo las consecuencias de los efectos de la onda de choque en una estructura o equipo industrial dependerán no sólo de las características de la carga de explosión, sino también de las características del receptor tales como su masa, su frecuencia natural y su resistencia dinámica (Salzano y col, 2013).

En general, se hace una distinción entre los efectos sobre las estructuras y los equipos frente a los efectos sobre las personas. En el primer caso se utilizan tablas donde sólo es necesario conocer la sobrepresión generada (Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3).

Respecto a los efectos sobre las personas, además de los efectos directos debidos al contacto con la onda de sobrepresión también hay que tener en consideración los denominados efectos secundarios como son los debidos a los efectos de desplazamiento del cuerpo. Los aspectos de vulnerabilidad de personas a causa de los efectos de las explosiones se tratan más detalladamente en el capítulo 9 de Casal y col (1999).

Tabla 3.1 Daños estimados para estructuras comunes por sobrepresión

Sobrepresión	Consecuencia	Sobrepresión
kPa		bar
0.15	Ruidos Molestos	0.0015
0.2	Rotura ocasional de grandes cristales de ventanas que ya estaban en tensión. Sin daños estructurales	0.002
0.3	El ruido fuerte similar al estampido sónico. Ocasional falla de cristales	0.003
0.7	Rotura de ventanas pequeñas bajo tensión	0.007
1	Umbral típico de rotura de cristales	0.01
2	Probabilidad de 0.95 de ningún daño grave más allá de este valor. Algunos daños en cielo rasos de las casas. Un 50% del cristal de ventana rotos	0.02
3	Límite mínimo de sobrepresión para daños estructurales	0.03
3.5-7	Generalmente ventanas destruidas. Daño ocasional a marcos de ventanas	0.035-0.07
5	Daños menores a estructuras de casas	0.05
7	Colapso del techo de tanques	0.07
8	La demolición parcial de casas (inhabitable)	0.08
7-15	Falla en sujeción de paneles corrugados de Aluminio o acero seguido por pandeo de los mismos. Falla de sujeción de paneles de madera.	0.07-0.15
10	Estructura de acero de edificios revestidos ligeramente distorsionada	0.1
15	Colapso parcial de paredes y techo de casas	0.15
15-20	Paredes de bloque de hormigón o de concreto no reforzadas destruidas	0.15-0.2
18	Límite inferior para serio daño estructural. 50% de ladrillos de casas destruidos.	0.18
20	Máquinas pesadas en edificios industriales sufren poco daño. Edificio de estructura de acero deformado y desplazado de cimientos	0.2
20-28	Demolición de edificios sin estructura metálica o edificios de paneles de acero auto soportados. Ruptura de tanque de almacenamiento de Hidrocarburo.	0.2-0.28
20-40	Arboles grandes derribados	0.2-0.4
30	Rompimiento de revestimiento de edificios industriales ligeros.	0.3
35	La rotura de los postes de teléfono de madera. Destrucción de la mayor parte de los edificios, excepto edificios de paredes de hormigón armado reforzado	0.35
35-40	Desplazamiento de tubería estructural de puentes. Falla de Tubería	0.35-0.4
35-50	Destrucción casi completa de casas	0.35-0.5
40-55	Colapso de tubería estructural de puentes	0.4-0.55

Tabla 3.1 Daños estimados para estructuras comunes por sobrepresión- continuación

Sobrepresión	Consecuencia	Sobrepresión
kPa		bar
50	Volcamiento de vagones de tren / carros tanque. Colapso de paredes de ladrillo de 20-30 cm de espesor.	0.5
50-55	Paneles no reforzados de 25-35 cm de espesor, falla por cortante o por flexión.	0.5-0.55
60	Demolición completa de vagones de tren cargados	0.6
70	Probable destrucción total de edificios. Herramientas de maquinaria pesadas desplazada y gravemente dañada	0.7

Fuente: American Institute of Chemical Engineers (2000)

Tabla 3.2 Significado de acrónimos (ver Tabla 3.3)

A. Vidrios y sensores rotos	L. Cables de poder se cortan
B. Falla de rejillas a 0.2-0.5 psi	M. Daño de controladores
C. Interruptor dañado por colapso de techo	N. Paredes de bloque fallan
D. Colapso de techo	O. Colapso de estructura
E. Instrumentación dañada	P. Deformación de estructura
F. Partes interna dañadas	Q. Carcaza se daña
G. Grietas en ladrillos	R. Estructura se agrieta
H. Escombros - daño ocurrido por misiles	S. Rotura de tuberías
I. Desplazamiento de la unidad y rotura de tuberías	T. Volcamiento o destrucción de unidad
J. Falla en riostras	U. Elevación de unidad (0.9 inclinado)
K. Elevación de unidad (0.5 inclinado)	V. Unidad se desliza de cimientos

Fuente: American Institute of Chemical Engineers (2000)

Tabla 3.3 Daños estimados en base a sobrepresión para equipos de procesos¹

Equipo	Sobrepresión (psi)																								
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	12	14	16	18	20
Techo de Acero de Cuarto de Control	A	C	D				N																		
Techo de Concreto de cuarto de Control	A	E	P	D			N																		
Torre de Enfriamiento	B			F			O																		
Tanque: Techo Cónico		D				K						U													
Cubículo de Instrumentación			A			LM						T													
Horno de Fuego				G	I					T															
Reactor Químico				A				I				P						T							
Filtro				H					F										V		T				
Regenerador						I				IP					T										
Tanque: Techo Flotante						K						U												D	
Reactor: Craqueo							I							I							T				
Soportes de Tubería							P					SO													
Instalaciones: Medidor de Gas									Q																
Instalaciones: Transformador Electrónico									H					I						T					
Motor Eléctrico										H								I							V
Soplador Industrial										Q											T				
Columna Fraccionadora											R			T											
Recipiente a Presión Horizontal												PI							T						
Instalaciones: Regulador de Gas												I									MQ				
Columna Extractora													I							V	T				
Turbina de Vapor														I								M	S		V
Intercambiador de Calor														I					T						
Recipiente a Presión Esférico																I						I	T		
Recipiente a Presión Vertical																						I	T		
Bomba																						I		V	

Fuente: American Institute of Chemical Engineers (2000)

¹ Ver Tabla 3.2 para significado de acrónimos

CAPITULO 4

Análisis Dinámico de Estructuras

4. ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTRUCTURAS

El objetivo principal del análisis dinámico de estructuras es obtener su respuesta dinámica, es decir los campos de desplazamientos y de esfuerzos presentes en la estructura luego de ser aplicadas cargas y/o desplazamientos dinámicos.

La obtención de la respuesta requiere la definición del desplazamiento o carga dinámica aplicada. El análisis se realiza sobre un modelo matemático que depende del tipo de estructura y pretende brindar una serie de relaciones entre acciones y respuestas que describan el comportamiento real del sistema. Este modelo matemático puede ser resuelto mediante diversas técnicas analíticas o numéricas. La precisión de la respuesta obtenida dependerá de la rigurosidad con que fueron formulados los modelos y de los procedimientos o algoritmos de cálculo utilizados durante la resolución.

El término “dinámico” define un comportamiento variable en el tiempo, por lo tanto, una carga dinámica es aquella en la que la magnitud, la dirección y/o la posición varían en el tiempo (Enciso, 2014).

Para analizar la respuesta estructural frente a cargas dinámicas existen dos tipos de abordajes: determinista y no-determinista o estocástico. Cual deberá ser usado en cada caso se determina en función de la información disponible sobre la naturaleza de la carga aplicada a la estructura. Si se conoce por completo la variación de la carga en función del tiempo se podrá usar un enfoque determinista. Por el contrario, en el caso de tener sólo información estadística sobre la variación de la carga se deberán utilizar las herramientas específicas para resolver este tipo de problemas, generando resultados también en términos estadísticos.

Dentro de los problemas dinámicos deterministas existen dos grandes grupos: los de propagación de ondas y los de dinámica estructural. El primer grupo engloba a las cargas de

impacto u ondas explosivas; la excitación y, por lo tanto, la respuesta de la estructura presentarán altas frecuencias y modos de vibración (Enciso, 2014).

En cuanto a los modelos matemáticos, pueden distinguirse los modelos dinámicos analíticos y los modelos dinámicos discretos. La solución de los primeros consiste en resolver teóricamente las ecuaciones diferenciales, lo cual, en general, sólo puede realizarse para casos sencillos con una aplicación práctica limitada. Los modelos dinámicos discretos, en cambio, obtienen la solución para instantes de tiempo determinados mediante la subdivisión del tiempo y el espacio en dominios finitos. Estos modelos son ampliamente utilizados para un sinnúmero de aplicaciones (Cassano, 2009).

En el análisis dinámico de estructuras tales como vigas, placas, chapas, etc., las ecuaciones diferenciales que se obtienen son a derivadas parciales en función del tiempo y el espacio. Para resolver este tipo de ecuaciones usando métodos numéricos se discretiza el dominio espacial mediante algún método como MEF (Métodos de Elementos finitos) o MDF (Método de Diferencias Finitas), lo que genera un sistema de ecuaciones algebraicas lineales.

Para la integración en el dominio del tiempo de las ecuaciones que provienen de algún método numérico, como MEF por ejemplo, se pueden usar métodos de integración directa en el tiempo o métodos de superposición modal. Este tema se tratará con más detalle en el apartado 4.4.F de este capítulo.

El método seleccionado para resolver el problema de dinámica estructural estará determinado por la naturaleza de la excitación y la complejidad tanto de la carga dinámica como del sistema mecánico analizado.

4.1. Respuesta de la estructura

Para entender la respuesta de la estructura a una carga dinámica se puede iniciar el análisis con un sistema mecánico simple con un solo grado de libertad.

Supóngase un sistema mecánico modelado como un bloque de masa m acoplado a un resorte lineal y un amortiguador como se muestra en Fig. 4.1. Si el sistema es sometido a la acción de una fuerza variable en el tiempo $R(t)$ que desplaza el bloque de su posición de equilibrio estático, el bloque recibirá la acción de las fuerzas resistivas del resorte f_s , del amortiguador f_D y la fuerza inercial f_i .

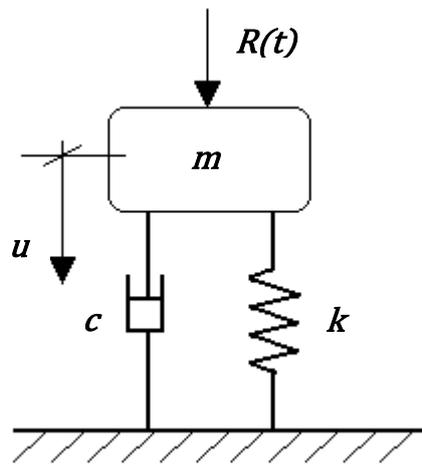


Figura 4.1 Sistema masa, resorte y amortiguador

Fuente: Adaptado de Lopes (2007)

$$f_s + f_D + f_i = R(t)$$

Ecuación 4.1

La reacción de una estructura ante una carga dinámica se traduce en un determinado desplazamiento o deformación producida durante un determinado tiempo. En el caso que la deformación exceda el límite de deformación del material o que el desplazamiento sea mayor que el tolerable, puede ocurrir un colapso total o parcial de la estructura. Cuando la carga actuante sobre una estructura se mantiene dentro del régimen elástico, la fuerza aplicada a la

misma produce un desplazamiento proporcional a una resistencia característica. Para estructuras elásticas esta resistencia puede ser comparada a la rigidez k de un resorte.

$$f_S(t) = k \cdot u(t)$$

Ecuación 4.2

Donde:

f_S = fuerza resistiva del resorte [N]

k = rigidez del resorte [kg/s²]

$u(t)$ = desplazamiento del resorte [m]

Si se aplica repentinamente una fuerza sobre una estructura, esta tiende a oscilar en una determinada dirección. La amplitud de oscilación resultante y su duración serán determinadas por una constante de amortiguamiento c característica de la estructura. El modelo de amortiguamiento más usado es el modelo viscoso y es el que se usará para la deducción de las ecuaciones de movimiento.

$$f_D(t) = c \cdot \dot{u}(t)$$

Ecuación 4.3

Donde:

f_D = fuerza resistiva del amortiguador [N]

c = constante de amortiguamiento [kg/s]

$\dot{u}(t)$ = derivada del desplazamiento respecto al tiempo, velocidad [m]

Según la segunda ley de Newton la aceleración que adquiere un cuerpo es proporcional a la fuerza neta aplicada sobre el mismo. La constante de proporcionalidad es la masa del cuerpo.

$$f_I(t) = m \cdot \ddot{u}(t)$$

Ecuación 4.4

Donde:

f_I = fuerza inercial [N]

m = masa del cuerpo [kg]

$\ddot{u}(t)$ = segunda derivada del desplazamiento respecto al tiempo, aceleración [m/s²]

Por simplicidad en la notación se emitirá de aquí en adelante la dependencia de las variables con el tiempo, por lo que:

$$u(t) \rightarrow u \quad ; \quad f_S(t) \rightarrow f_S$$

$$\dot{u}(t) \rightarrow \dot{u} \quad ; \quad f_D(t) \rightarrow f_D$$

$$\ddot{u}(t) \rightarrow \ddot{u} \quad ; \quad f_I(t) \rightarrow f_I$$

$$R(t) \rightarrow R$$

Reemplazando las Ecuación 4.2, Ecuación 4.3 y Ecuación 4.4 en la Ecuación 4.1 se deduce la ecuación del movimiento:

$$ku + c\dot{u} + m\ddot{u} = R$$

Ecuación 4.5

Generalizando la Ecuación anterior a sistemas con múltiples grados de libertad, la siguiente ecuación diferencial determina el movimiento de un sistema con múltiples grados de libertad (MGDL) expresada en términos matriciales:

$$KU + C\dot{U} + M\ddot{U} = R$$

Ecuación 4.6

Donde:

K = Matriz de rigidez del material

C = Matriz de amortiguamiento

M = Matriz de masa

Las matrices M y K provienen de una discretización por MEF, mientras que la matriz C es función de las matrices M y K . Posteriormente, en las secciones 4.4.C y 4.4.E de este capítulo, se detallarán cada una de estas matrices.

Siguiendo con el análisis es necesario establecer cómo será la carga dinámica y compararla con otra característica de la estructura, su periodo natural. Calcular el periodo natural de un sistema mecánico es una tarea que se torna más compleja cuanto más elaborada es la forma del mismo. Usualmente se hace necesario cierto grado de simplificación para que este proceso sea realizado de forma más rápida, simplificación que implica un grado de imprecisión tolerable en estructuras más simples (Lopes, 2007).

Para el caso de un sistema mecánico con un grado de libertad se define a la frecuencia natural ω como:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [Hz]$$

Ecuación 4.7

Donde:

ω = frecuencia natural [Hz]

En sistemas con N grados de libertad, cada modo natural de vibración tendrá una frecuencia natural asociada, que será la del movimiento armónico resultante al desplazar los nodos del sistema respecto de su posición de equilibrio estático en la forma del modo natural correspondiente. Cada frecuencia natural será el cociente entre la rigidez modal y la inercia modal correspondiente.

En cualquier caso, la o las frecuencias naturales constituyen un parámetro modal intrínseco al sistema y sólo dependerán de la rigidez (k), la inercia (m) del sistema (incluida la distribución de m por el sistema), pero no del tiempo ni de las condiciones iniciales. Sean cuales sea estas

condiciones iniciales, el sistema siempre tendrá la misma o mismas frecuencias naturales (Pintor Borobia, 2015).

A su vez el periodo natural T está definido como

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad [seg]$$

Ecuación 4.8

Donde:

T = periodo natural [seg]

O bien reemplazando la Ecuación 4.7

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad [seg]$$

Ecuación 4.9

Obtenido el periodo natural, el paso siguiente es compararlo con la duración de la carga dinámica o, en el caso de ondas de choque, con la duración de la fase positiva de la misma. Con esto será posible definir si la carga es dinámica, cuasi estática o de impacto (Lopes, 2007)

4.1.A. Carga dinámica

Cuando el periodo natural tiene una magnitud similar a la duración de la carga aplicada sobre la estructura se denomina carga dinámica (para el caso de una explosión la duración de la fase positiva de la onda de choque).

Siempre que sea posible la carga dinámica deberá representarse como la sumatoria de esfuerzos sobre una estructura en oscilación o por una integral, siempre y cuando se pueda traducir analíticamente ésta a una curva de fuerza en función del tiempo.

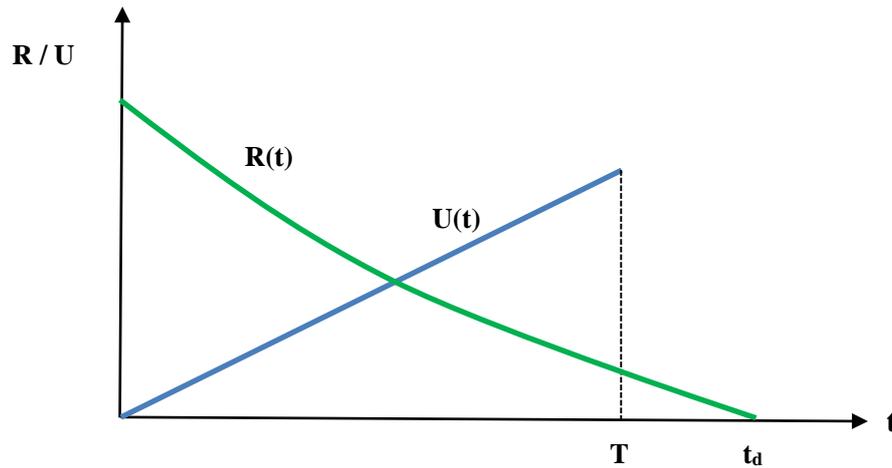


Figura 4.2 Carga dinámica: Fuerza $R(t)$ vs Tiempo (t) y Desplazamiento $U(t)$ vs Tiempo (t)

Fuente: Adaptado de Lopes (2007)

En la Figura 4.2 se presenta el desplazamiento $U(t)$ en función de la carga dinámica $R(t)$. En ella se muestra claramente la similitud en la duración de la fase positiva t_d y el periodo natural de oscilación de la estructura T .

4.1.B. Carga cuasi-estática

Se produce cuando la duración de la carga aplicada es mayor que el periodo natural. En ese caso la estructura tendrá el tiempo necesario de reaccionar a la carga y su desplazamiento $U(t)$ llegará al máximo durante la duración de la carga aplicada.

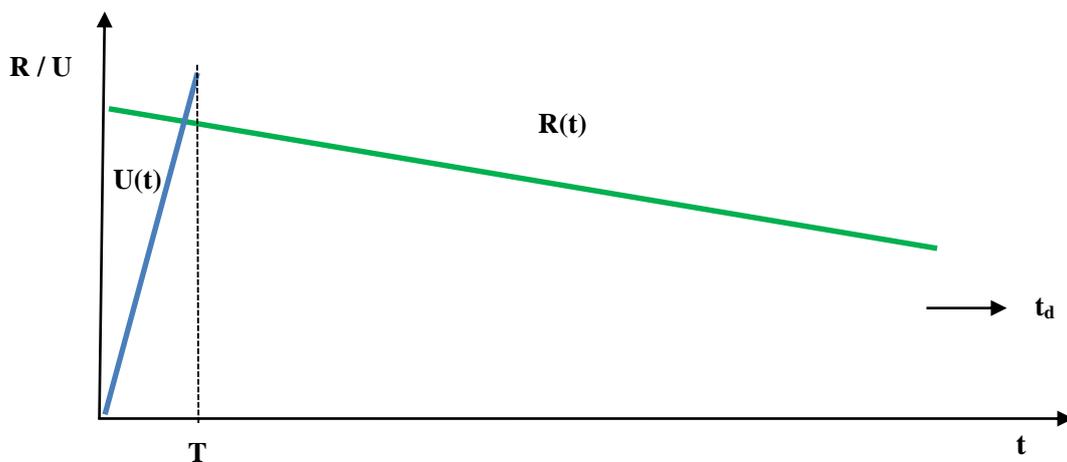


Figura 4.3 Carga Cuasi-Estática Fuerza $F(t)$ vs Tiempo (t) y Desplazamiento $U(t)$ vs Tiempo (t)

Fuente: Adaptado de Lopes (2007)

4.1.C. Carga de impacto

Cuando el tiempo de duración de la carga es muy pequeño respecto a su periodo natural se denomina carga de impacto o carga impulsiva. Para poder considerar a una carga como carga de impacto la relación del tiempo de duración de la carga con respecto al del periodo natural debe ser menor o igual 0.5 aproximadamente (Salman y col, 2007).

$$\frac{t_d}{T} \leq 0.5$$

Ecuación 4.10

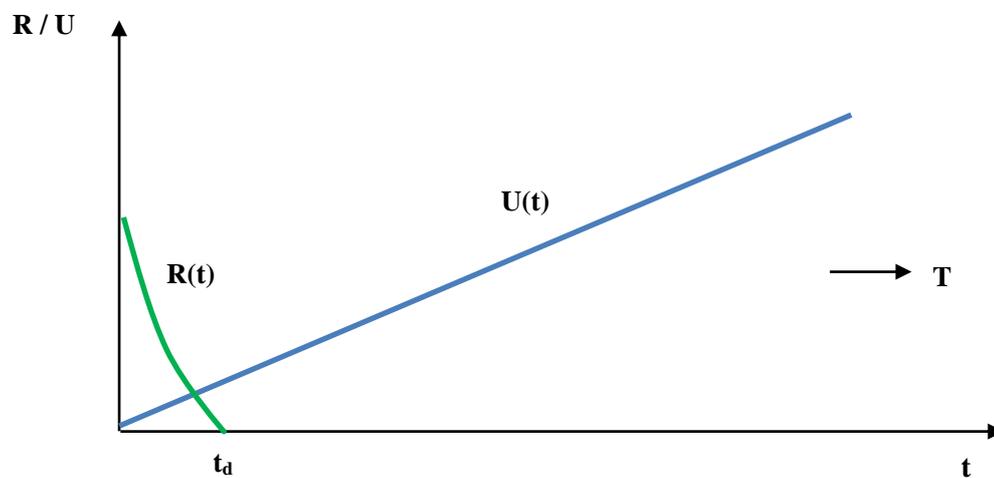


Figura 4.4 Carga de impacto: Fuerza $F(t)$ vs Tiempo (t) y Desplazamiento $U(t)$ vs Tiempo (t)

Fuente: Adaptado de Lopes (2007)

La identificación del tipo de carga permitirá seleccionar el método de integración en el dominio del tiempo de las ecuaciones que gobiernan la respuesta dinámica de la estructura.

4.2. Problema elástico lineal del sólido

El problema elástico consiste en encontrar los desplazamientos y tensiones de un sólido deformable cuando este es sometido a cargas externas y/o desplazamientos impuestos. En el caso del problema elástico lineal las relaciones entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones obtenidas se pueden modelar usando funciones lineales. Para definir

completamente el estado tensional de un punto, que pertenece al cuerpo en análisis, es necesario definir un tensor de esfuerzos.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Donde:

σ = Tensor de esfuerzos

σ_{ii} = Esfuerzo normal en dirección i (elemento de matriz tensor de esfuerzos)

τ_{ij} = Esfuerzo cortante en el plano ij (elemento de matriz tensor de esfuerzos)

Dada la naturaleza simétrica del tensor de esfuerzos se lo puede expresar como un vector de seis componentes:

$$\sigma = \{\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \tau_{xy} \quad \tau_{xz} \quad \tau_{yz}\}^T$$

De igual manera se utiliza una matriz que define completamente el estado de deformación de un cuerpo. Ésta también es simétrica, por lo que puede ser expresada como un vector de seis componentes.

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \epsilon_{yy} & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\epsilon = \left\{ \epsilon_{xx} \quad \epsilon_{yy} \quad \epsilon_{zz} \quad \frac{\gamma_{xy}}{2} \quad \frac{\gamma_{xz}}{2} \quad \frac{\gamma_{yz}}{2} \right\}^T$$

Donde:

ϵ = Matriz de deformación

ϵ_{ii} = Deformación en eje i (elemento de matriz de deformación)

γ_{ij} = Deformación tangencial en el plano ij (elemento matriz de deformación.)

Es conveniente además de considerar los ejes globales de referencia (x, y, z) se debe seleccionar un sistema de referencia local (u, v, w) .

Luego de la aplicación de la carga el valor de desplazamiento u de cada punto en las distintas direcciones se define por el vector:

$$u = \{u_x \quad u_y \quad u_z\}^T$$

Donde:

u = Vector desplazamiento en la dirección u

u_i = Desplazamiento de u en eje i (elemento de vector desplazamiento)

De igual manera ocurre con las direcciones v y w para

$$v = \{v_x \quad v_y \quad v_z\}^T$$

$$w = \{w_x \quad w_y \quad w_z\}^T$$

El problema elástico consiste en determinar las quince incógnitas arriba presentadas: seis esfuerzos, seis deformaciones y tres desplazamientos en cada punto. La teoría de la elasticidad lineal presenta los tres grupos de ecuaciones que se verán a continuación, con lo que se obtiene quince ecuaciones para quince incógnitas.

4.2.A. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Estas ecuaciones aseguran el equilibrio entre el campo de esfuerzos internos con las fuerzas de cuerpo.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$

Ecuación 4.11

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0$$

Ecuación 4.12

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0$$

Ecuación 4.13

4.2.B. Ecuaciones de compatibilidad

Estas ecuaciones aseguran que los campos de deformación y desplazamiento sean compatibles, es decir, no se presenten grietas en el sólido luego de la deformación.

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

Ecuación 4.14

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Ecuación 4.17

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

Ecuación 4.15

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

Ecuación 4.18

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

Ecuación 4.16

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

Ecuación 4.19

4.2.C. Ecuaciones constitutivas

Las ecuaciones constitutivas relacionan los esfuerzos con las deformaciones, son lineales en el caso de tener un comportamiento puramente elástico del material.

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}))$$

Ecuación 4.20

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}$$

Ecuación 4.23

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}))$$

Ecuación 4.21

$$\gamma_{xz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xz}$$

Ecuación 4.24

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}))$$

Ecuación 4.22

$$\gamma_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz}$$

Ecuación 4.25

Donde:

E = Modulo de elasticidad del material

ν = Coeficiente de Poisson.

Para poder resolver el conjunto de ecuaciones formadas por la Ecuación 4.11a la Ecuación 4.19 se deben adicionar las condiciones de contorno.

4.3. Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos es un método general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias parciales. Por ejemplo: la distribución de temperaturas en una placa, la deflexión en la dirección vertical de una viga empotrada, la distribución de esfuerzos y deformaciones normales en la sección de una pieza de maquinaria, etc.

A continuación se presentan los conceptos necesarios para plantear el modelo y para comprender el método.

4.3.A. Funciones de interpolación

Interpolación es crear una función continua que satisface condiciones prescritas en un número finito de puntos. Las funciones de interpolación son en general funciones polinómicas de la forma:

$$\phi = \sum_{i=0}^n a_i \cdot x^i = X \cdot a$$

Ecuación 4.26

Donde:

a = Matriz de coeficientes del polinomio

X = Matriz de coordenadas

$n = \text{Orden del polinomio}$

$$a = \{0 \quad a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n\}^T$$

$$X = \{1 \quad x^1 \quad x^2 \quad \dots \quad x^n\}$$

En general las funciones de interpolación ϕ hacen referencia a los desplazamientos. Estas funciones definen el comportamiento del desplazamiento en términos de valores unitarios de desplazamientos nodales (Da Fonseca, 2011).

Los coeficientes a_i pueden ser expresados en función de valores conocidos de ϕ en puntos específicos o nodos, cuya coordenada x es conocida. La relación antes mencionada entre los valores nodales ϕ_e y los coeficientes a_i se pueden escribir de la siguiente manera.

$$\phi_e = A \cdot a$$

Ecuación 4.27

Donde cada fila de la matriz A es X evaluada en cada nodo.

Las funciones de interpolación son claves para el estudio del MEF. Las funciones de interpolación varían de nodo a nodo, cada nodo de la discretización tiene su propia función de forma. Al evaluar la función de forma en las coordenadas de su propio nodo esta debe ser 1 en el nodo estudiado y 0 en los demás nodos, como se muestra en la Figura 4.5.

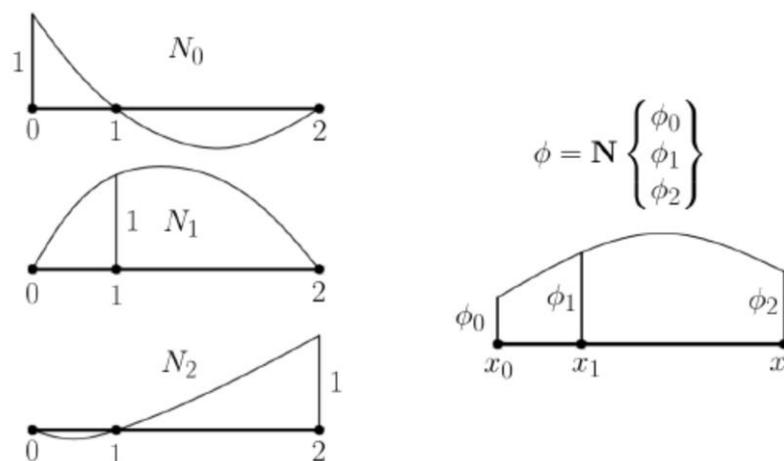


Figura 4.5 Función de interpolación para elemento lineal de tres nodos

Fuente: Enciso (2014)

Las funciones de interpolación se pueden hallar usando métodos analíticos o de manera intuitiva. Se puede usar la información de las ecuaciones para hallar funciones de forma haciendo:

$$\phi = N \cdot \phi_e$$

Ecuación 4.28

Remplazando la Ecuación 4.26 y Ecuación 4.27 en la Ecuación 4.28 despejando N se obtiene:

$$N = X \cdot A^{-1}$$

Ecuación 4.29

Este método utiliza mucho tiempo computacional en invertir la matriz A repetidas veces.

Otra opción es el polinomio de interpolación de Lagrange que usa la siguiente fórmula para obtener las funciones

$$N_j(x_j) = \prod_{i=0, i \neq j}^n \frac{x - x_i}{x_j - x_i}$$

Ecuación 4.30

Así por ejemplo la función de interpolación para un elemento lineal de tres nodos que implica una aproximación cuadrática será:

$$N_0 = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \cdot \frac{x - x_2}{x_0 - x_2} \quad N_1 = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \cdot \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} \quad N_2 = \frac{x - x_0}{x_2 - x_0} \cdot \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

Para elementos más complejos se procederá de igual manera utilizando métodos con mayor complejidad.

A continuación en la Figura 4.6 se presenta función interpolación para un elemento cuadrangular de nueve nodos.

4.3.B. Mallado

Un medio continuo elástico tiene infinitos grados de libertad, por lo tanto, las funciones que representan los campos de desplazamiento de un cuerpo deben ser funciones continuas. El MEF divide el continuo en un número finito de elementos, cada elemento posee un número finito de nodos, cada nodo tiene un número de GDL asignado.

Un correcto mallado permitirá resolver problemas complejos discreteando el dominio de manera adecuada y por tanto optimizar la resolución el problema. Por ejemplo el mallado que corresponde a una sección de un puente se observa en la Figura 4.7. Al colocar un número suficiente de elementos se podrá reproducir el dominio con tanta aproximación como se desee. Aunque, en general, reduciendo el tamaño de los elementos se obtiene mejores resultados, un refinamiento excesivo conduce a grandes sistemas de ecuaciones lo cual puede tornarse impráctico desde el punto de vista computacional (Da Fonseca, 2011).

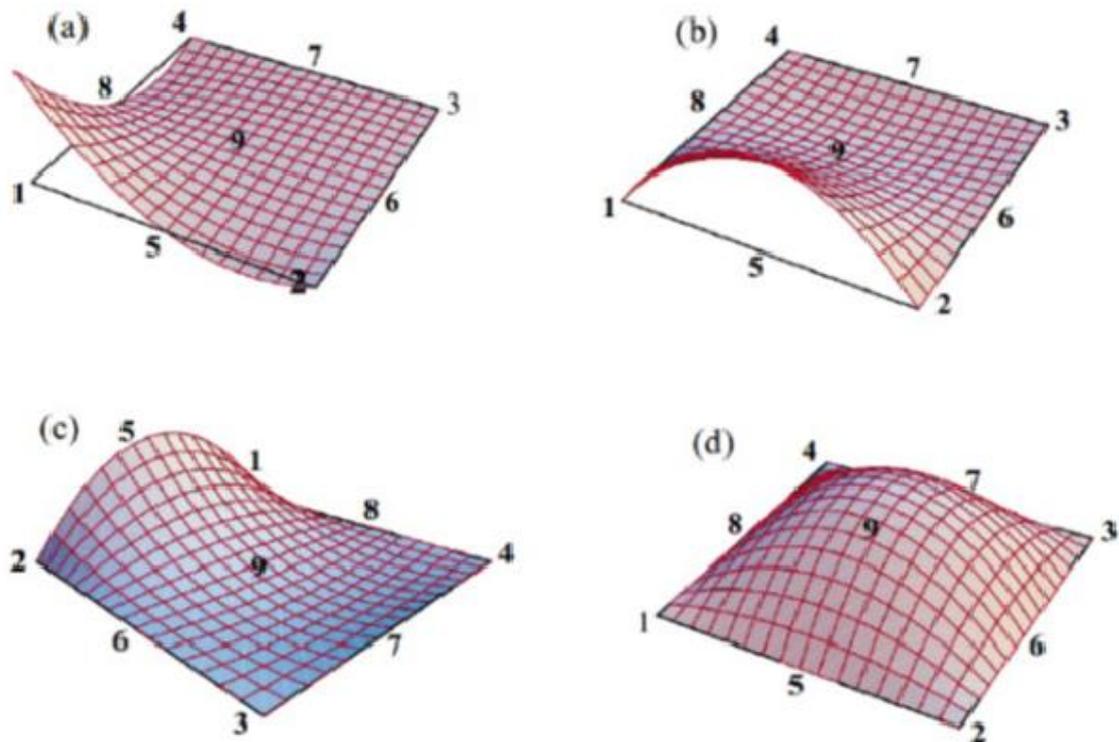


Figura 4.6 Función de forma para un elemento cuadrangular de nueve nodos. (a) N1, (b) N5, (c) N5, (d) N9.

Fuente: Enciso (2014)

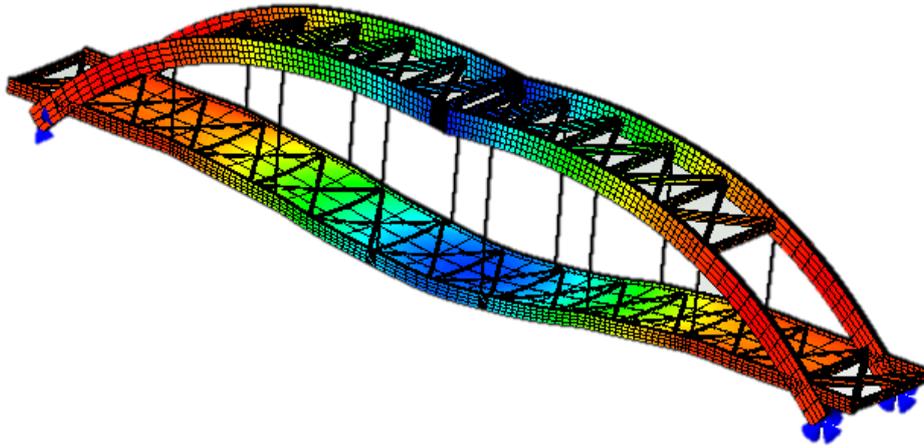


Figura 4.7 Mallado de puente colgante para MEF
Fuente: MSC's Civil Simulation Software volgt trend (2016)

Es preciso mencionar que, dependiendo del análisis varía la densidad de la malla. Así por ejemplo para hallar la distribución de esfuerzos dentro del cuerpo en análisis es necesario usar una malla mucho más densa que para el caso de solo hallar desplazamientos nodales (Enciso, 2014).

4.3.C. Elección de tipo de elemento finito

La calidad de los resultados dependen en gran medida de la calidad del modelo geométrico con el que se trabaja, por lo tanto la precisión de la solución no depende solamente de la densidad de la malla usada o de la complejidad del modelo de elementos finitos sino también de la elección de los elementos correctos que modelen de la mejor manera el problema físico que se pretende resolver.

En el MEF se puede utilizar elementos lineales (como barra, viga, resorte, etc.), elementos planos (como placa, cáscara o membrana) o elementos sólidos. En general el tipo de elemento a ser usado depende del tipo de análisis a realizar, la complejidad del modelo, la precisión requerida para los resultados y el tiempo de cómputo disponible.

Si se quiere analizar el comportamiento global de una estructura se deben usar elementos del tipo viga y cáscara. Si se desea optimizar el diseño de un soporte se deben usar elementos sólidos con el fin de conocer mejor la distribución de esfuerzos.

4.3.D. Condiciones de contorno

Dentro de la formulación de los elementos finitos se deben introducir las condiciones de contorno propias de cada problema, por ello un entendimiento profundo del problema físico es indispensable para modelarlo correctamente.

Las condiciones de contorno requieren que se restrinjan algunos grados de libertad, representados por lo general en los soportes de las estructuras. Si se restringen grados de libertad traslacionales y rotacionales se tienen un soporte empotrado; si se restringen solo los grados de traslación se tiene un soporte pivotante. Utilizando combinaciones de estas condiciones se logra modelar la gran mayoría de condiciones de contorno.

Es necesario representar de manera adecuada las conexiones y juntas dentro de la estructura, ya que el variar el tipo de unión entre elementos puede influir de manera drástica en la rigidez del sistema y modificar el estado de tensiones y deformaciones en las proximidades del soporte.

4.4. Aplicación de MEF para el análisis dinámico de estructuras

4.4.A. Modelado del sistema

En el caso del análisis dinámico de una estructura se debe resolver un problema elástico lineal perteneciente al área de la mecánica de sólidos. La formulación matemática de este fenómeno físico se describe por medio de las ecuaciones diferenciales de equilibrio, de compatibilidad y constitutivas (Ecuación 4.11 a Ecuación 4.25).

Para el modelo de la estructura además de los ejes globales de referencia del sistema completo se debe seleccionar un sistema de referencia local para cada uno de los elementos. Si bien el MEF se puede realizar directamente utilizando los ejes globales, la facilidad que brindan los ejes locales para construir las funciones de interpolación e integrarlas en el interior de los elementos son razones suficientes para utilizarlos (Da Fonseca, 2011). Esto se traduce en un menor tiempo de cómputo para resolver el problema.

En el MEF la discretización del dominio del problema (mallado) así como la aproximación de las variables involucradas (funciones de interpolación) mediante funciones lineales o funciones de grado superior proporcionaran al método una mayor o menor precisión en los resultados obtenidos.

4.4.B. Formulación del MEF

Una vez que se ha completado la definición del problema, la selección del tipo de elemento y condiciones de contorno, la definición de sistemas de referencia global y local, el mallado y las funciones de interpolación, se debe establecer sobre cada elemento las ecuaciones discretas del problema continuo. La obtención de las ecuaciones discretas (ecuaciones de equilibrio) se realiza por medio de los principios clásicos usados en el análisis de estructuras como son: PTV (Principio de los Trabajos Virtuales), principio de mínima energía estacionaria, ecuaciones de Lagrange, etc. En este caso para la formulación del MEF se utilizará PTV.

El trabajo virtual se define como un campo real de esfuerzos multiplicado por un campo virtual de deformaciones, esto trae como consecuencia que la formulación esté basada en los desplazamientos y no en las fuerzas.

Como se ha mencionado, el MEF consiste en el reemplazo de un conjunto de ecuaciones diferenciales, por otro conjunto equivalente, pero aproximado, de ecuaciones algebraicas

donde cada una de las variables es evaluada en los puntos nodales. Para la evaluación de estas ecuaciones se puede utilizar diferente tipo de aproximaciones (método directo, métodos residuales, métodos variacionales).

Para la explicación del MEF en este caso particular se utiliza el Método de Rayleigh Ritz que forma parte de los métodos variacionales (Da Fonseca, 2011).

Para PTV el MEF aproxima el campo de desplazamientos del cuerpo mediante la interpolación de valores nodales conocidos. Se asumen campos de deformaciones y desplazamientos virtuales, $\bar{\epsilon}$ y \bar{u} respectivamente. Estos campos virtuales se multiplican por los campos de tensión y las fuerzas aplicadas, ambos parámetros son reales. El producto de un desplazamiento virtual y una carga real da como resultado un trabajo virtual \bar{W}

$$\int_V^{V_0} \bar{\epsilon}^T \sigma dV = \int_V^{V_0} \bar{u}^T f^b dV + \int_S^{S_0} \bar{u}^T f^s dS + \sum_i \bar{u}^{iT} R_c^i$$

Ecuación 4.31

Donde:

$\bar{\epsilon}$ = Campo de deformación virtual (asumido)

\bar{u} = Campo de desplazamiento virtual (asumido)

f^b = Fuerza de cuerpo

f^s = Fuerza de tracción

R_c = Fuerza exterior

$\bar{W}_i = \int_V^{V_0} \bar{\epsilon}^T \sigma dV =$ Trabajo virtual realizado por las fuerzas internas

$\bar{W}_b = \int_V^{V_0} \bar{u}^T f^b dV =$ Trabajo virtual realizado por las fuerzas de cuerpo (volumen)

$\bar{W}_s = \int_V^{V_0} \bar{u}^T f^s dS =$ Trabajo virtual realizado por las fuerzas de tracción (superficie)

$$\bar{W}_c = \sum_i \bar{u}^{iT} R_c^i = \text{Trabajo virtual total realizado por las fuerzas exteriores}$$

Las fuerzas de tracción o cargas de superficie están asociadas a presiones ejercidas por fluidos o por otros sólidos, tiene unidades de N/m^2 . Las fuerzas de cuerpo o cargas de tipo volumétricas se distribuyen en todo el dominio tridimensional, las más conocidas son la fuerza gravitatoria (peso), las fuerzas inerciales, las fuerzas electromagnéticas, etc. Debido a la naturaleza del MEF las cargas deben ser aplicadas en cada nodo y no sobre el dominio de cada elemento. Existen diferentes métodos para distribuir la carga total en cada nodo. En este punto se introduce una nueva aproximación ya que el efecto de la carga distribuida real no es igual al efecto de la carga nodal. Para ello se distribuye la carga considerando que el trabajo realizado por las cargas nodales sobre el cuerpo sea el mismo que el realizado por la carga real distribuida sobre el mismo.

El campo de desplazamiento \bar{u} se puede aproximar mediante las fórmulas de interpolación definidas anteriormente, en particular para un elemento k.

$$u^k = N_k \cdot \hat{U}$$

Ecuación 4.32

Donde:

\hat{U} = Vector de desplazamientos nodales reales conocidos

Con el uso de las ecuaciones de compatibilidad y aplicando éstas a la función de interpolación N_k se puede aproximar la deformación usando las expresiones:

$$\epsilon^k = B_k \hat{U}$$

Ecuación 4.33

$$B = D \cdot N$$

Ecuación 4.34

Donde:

B = Matriz de derivada de la función de interpolación

D = Matriz de operadores diferenciales para la función de interpolación N

La Ecuación 4.33 relaciona $\bar{\epsilon}$ con \bar{u} mediante las ecuaciones de compatibilidad (Ecuación 4.14 a Ecuación 4.19). Como se indica, la Ecuación 4.32 y Ecuación 4.33 son función de \hat{U} pero al estar utilizando PTV por definición se requiere aproximar el campo de desplazamientos reales \hat{U} a un campo de desplazamientos virtuales mediante \bar{U} .

$$\bar{u}^k = N_k \cdot \bar{U}$$

Ecuación 4.35

$$\bar{\epsilon}^k = N_k \cdot \bar{U}$$

Ecuación 4.36

Remplazando la Ecuación 4.35 y la Ecuación 4.36 en el término de la Ecuación 4.31 que se refiere al trabajo virtual interno \bar{W}_i tenemos:

$$\bar{W}_i = \sum_k \int_{V_k}^{V_0} (B_k \cdot \bar{U}^k)^T C^k \epsilon^k dV^k$$

Ecuación 4.37

Donde:

C^k = Relación esfuerzo – deformación del material dentro del elemento\

Es preciso mencionar que el término σ de la Ecuación 4.31 es remplazado por la multiplicación de $C \cdot \epsilon$ en la Ecuación 4.36, donde el término ϵ es real y no virtual.

$$\bar{W}_i = \sum_k \int_V^{V_0} (B \bar{U})^T C B \hat{U} = \sum_k \int_V^{V_0} \bar{U}^T B^T C B \hat{U} = \bar{U}^T \left[\sum_k \int_V^{V_0} B^T C B \right] \hat{U}$$

Ecuación 4.38

$$K = \sum_k \int_V^{V_0} B^{kT} C^k B^k$$

Ecuación 4.39

Donde:

K = Matriz de Rigidez del Material

Remplazando la Ecuación 4.35 en los demás términos de la Ecuación 4.31 ($\bar{W}_b, \bar{W}_s, \bar{W}_c$) se obtiene:

$$\bar{W}_b + \bar{W}_s + \bar{W}_c = \bar{U}^T \left[\left\{ \sum_k \int_V^{V_0} N^T f^b dV \right\} + \left\{ \sum_k \int_S^{S_0} N^T f^s dS \right\} + \left\{ \sum_i R_c^i \right\} \right]$$

Ecuación 4.40

$$R_b = \sum_k \int_V^{V_0} N^T f^b dV$$

Ecuación 4.41

$$R_s = \sum_k \int_S^{S_0} N^T f^s dS$$

Ecuación 4.42

$$R_c = \sum_i R_c^i$$

Ecuación 4.43

Donde:

R_b = Fuerzas de Cuerpo

R_s = Fuerzas de Superficie

R_c = Fuerza de Exterior

Finalmente, remplazando Ecuación 4.38 y Ecuación 4.40 en Ecuación 4.31 se obtiene:

$$\bar{U}^T \left[\sum_k \int_V^{V_0} B^T C B \right] \bar{U} = \bar{U}^T \left[\left\{ \sum_k \int_V^{V_0} N^T f^b dV \right\} + \left\{ \sum_k \int_S^{S_0} N^T f^s dS \right\} + \{R_c\} \right]$$

Ecuación 4.44

Simplificando el término \bar{U}^T y remplazando la Ecuación 4.39, Ecuación 4.41, la Ecuación 4.42 y la Ecuación 4.43 se llega a la expresión:

$$KU = R$$

Ecuación 4.45

$$R = R_b + R_s + R_c$$

Ecuación 4.46

La Ecuación 4.45 representa la esencia del método de los elementos finitos. El problema de contorno en derivadas parciales se aproximó a un sistema de ecuaciones lineales.

(i) Ensamblaje de matriz de rigidez global

En la Ecuación 4.39 referente a la matriz de rigidez del material, la sumatoria no significa una suma algebraica de matrices sino un ensamble de submatrices. La matriz resultante del ensamble de cada una de las matrices de rigidez de cada elemento ki dentro del problema general se denomina matriz de rigidez global K . La Figura 4.8 muestra el proceso de ensamble.

En el desarrollo de la solución por el MEF, inicialmente se discretiza el medio elástico continuo usando elementos con un número finito de grados de libertad, Figura 4.8 (B). Los elementos pueden utilizar diferentes formas como cuadriláteros, triángulos, etc.

Posteriormente se halla la matriz de rigidez de cada uno de los elementos usados. La matriz de rigidez tendrá dimensiones $n \times n$, donde n es el número de grados de libertad del elemento. En la Figura 4.8 (A) se muestra un elemento de 8 grados de libertad.

La matriz global de rigidez es de tamaño $N \times N$, donde N es el número de grados de libertad de todo el continuo y depende del número de elementos y del número de grados de libertad de los elementos, en este caso 20. La matriz de rigidez global relaciona todos los grados de libertad producto de la discretización. En esta matriz se deben ir ensamblando las matrices de

rigidez de cada elemento basándose en la numeración asignada a cada grado de libertad del elemento finito en la discretización como se observa en Figura 4.8 (C).

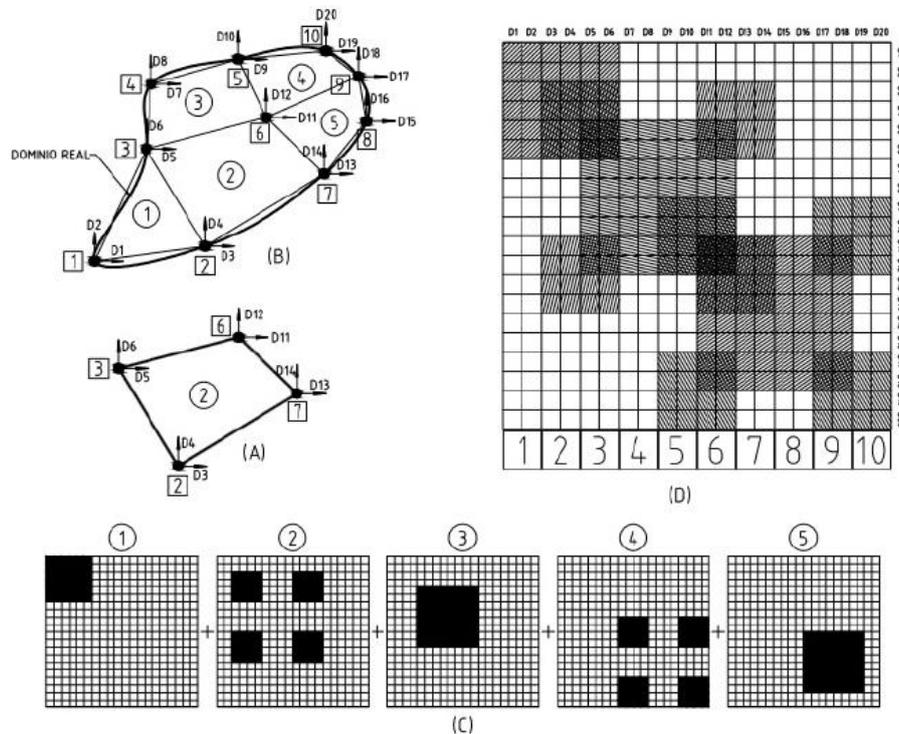


Figura 4.8: Proceso de ensamblaje de la matriz de rigidez global. (A) Elemento plano de cuatro nodos, (B) Dominio discretizado, (C) Matrices de rigidez de cada elemento, (D) Matriz de rigidez global

Fuente: Enciso (2014)

Finalmente la matriz ensamblada queda como se muestra en Figura 4.8 (D). Se puede observar que hay elementos de la matriz que van sumándose en el ensamblaje y elementos que son igual a cero. Cada cuadrícula de la matriz representa un grado de libertad (Enciso, 2014).

4.4.C. Solución del sistema lineal $KU=R$

La solución de la Ecuación 4.45 resuelve el problema elástico de manera aproximada. La aproximación de esta solución no solo está en la discretización del continuo sino también en los métodos numéricos utilizados para obtener los coeficientes de las matrices de rigidez y los métodos para la inversión de esta matriz.

(i) Integración numérica

Las integrales presentes en la matriz de rigidez son difíciles de evaluar en forma exacta por lo que debe ser resueltas de forma numérica. Para calcular los coeficientes de la matriz de rigidez se debe seleccionar correctamente el método numérico a utilizar a fin de que la solución sea lo suficiente precisa pero sin hacer cálculos excesivamente largos.

(ii) Inversión de la matriz de rigidez

Una vez que se obtuvieron los coeficientes de las matrices de rigidez, la solución del problema elástico lineal se reduce a invertir la matriz de rigidez global K y multiplicarla por el vector de fuerzas externas R . Sin embargo así como fue definida en la Ecuación 4.45, la matriz K no puede ser invertida por ser singular. Se necesita aplicar las condiciones de contorno, es decir, eliminar las filas y columnas correspondientes a los GDL que son cero.

$$U = K^{-1}R$$

Ecuación 4.47

El problema de invertir matrices puede ser resuelto por diferentes métodos numéricos, entre ellos se encuentra la eliminación Gaussiana, descomposición LU, descomposición de Cholesky, métodos iterativos y métodos espectrales. Cada uno de ellos será más o menos adecuado en función de cómo estén dispersos los valores dentro de la matriz global K .

El grado de dispersión de los valores dentro de la matriz depende de cómo se numeraron los nodos ya que en base a esto se ensambla la matriz de rigidez global. Los programas especializados en simulación por elementos finitos contienen algoritmos que reducen el grado de dispersión de las matrices para poder ser invertidas con mayor velocidad.

4.4.D. Análisis dinámico.

El análisis dinámico de sistemas mecánicos de MGL tiene como finalidad encontrar la respuesta en el tiempo de una estructura sometida a cargas dinámicas, cuasi estáticas o de impacto.

Para efectuar el análisis dinámico se supone que se cuenta con una matriz de rigidez, una matriz de amortiguamiento y una matriz de masa para cada instante del tiempo.

4.4.E. Matrices de propiedades estructurales

Como se indicó en la Ecuación 4.6, para la respuesta de un sistema a una carga dinámica es necesario definir tres propiedades estructurales: masa, amortiguamiento y rigidez. Estas propiedades se definen en forma matricial para un modelo con número finito de grados de libertad.

La matriz de rigidez K fue definida anteriormente en base a una discretización por elementos finitos. A continuación se definen las matrices de masa M y amortiguamiento C .

(i) Matriz de masa

La matriz de masa M es la representación discreta de la distribución continua de la masa de un sistema. Para construir esta matriz se debe discretizar las cargas inerciales distribuidas en todo el volumen del sistema. Esto puede hacerse de dos diferentes modos: distribuyendo la carga sobre cada nodo (“lumped”) o usando las funciones de interpolación (“consistent”).

Cuando se distribuye la masa sobre los nodos resulta una matriz diagonal que es más rápida de invertir, pero no siempre da resultados precisos.

Por otro lado para cuando se distribuye la carga inercial usando funciones de interpolación del elemento, estas funciones aproximan el campo de desplazamiento \bar{u} y sus derivadas de la siguiente manera:

$$\bar{u} = NU$$

Ecuación 4.48

$$\dot{\bar{u}} = N\dot{U}$$

Ecuación 4.49

$$\ddot{\bar{u}} = N\ddot{U}$$

Ecuación 4.50

Según la Ecuación 4.42 el trabajo debido a cargas inerciales se define como:

$$\bar{W}_b = \int_V^{V_0} N^T f^b dV = \int_V^{V_0} N^T (\rho \cdot \ddot{u}) dV$$

Ecuación 4.51

Remplazando la Ecuación 4.50 en Ecuación 4.51:

$$\bar{W}_b = \left(\int_V^{V_0} \rho N^T N dV \right) \ddot{U}$$

Ecuación 4.52

Finalmente, se define la matriz de masa M como:

$$M = \rho \int_V^{V_0} N^T N dV$$

Ecuación 4.53

Al distribuir la carga inercial usando funciones de interpolación el cálculo de la matriz de masa se torna más preciso pero la matriz pierde la estructura diagonal y su inversión toma más tiempo y espacio de almacenamiento computacional.

Las matrices de masa presentadas puede producir errores apreciables al momento de analizar modos de vibración altos, quinto o sexto modo, para estos análisis se aconseja recurrir a otras

formulaciones como son: combinación de los dos métodos anteriores, agrupamiento HRZ, etc.

(ii) Matriz de amortiguamiento

El amortiguamiento es la capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética. Típicamente los amortiguadores disipan la energía cinética en energía térmica y/o en energía plástica. El amortiguamiento trae como resultado que, en un sistema sometido a una carga dinámica, la oscilación producida tiende a disminuir su amplitud con el tiempo. El amortiguamiento presente en la dinámica de estructuras puede ser de tipo viscoso (dependiente de la velocidad \dot{u}), de histéresis (debido a las deformaciones plásticas a nivel microscópico) y de Coulomb (asociado a la fricción).

La matriz de amortiguamiento global del sistema C , representa la disipación de energía global del sistema. Esta matriz no se genera del proceso de ensamble de las matrices de amortiguamiento de los elementos como es el caso de la matriz de masa o de rigidez. El mecanismo más común usado en el análisis de estructuras es el mecanismo de amortiguamiento proporcional (“proportional damping”) o amortiguamiento de Rayleigh (Enciso, 2014). Este modelo relaciona las matrices globales M y K con C de la siguiente manera:

$$C = \alpha M + \beta K$$

Ecuación 4.54

Bajo el modelo de amortiguamiento proporcional el factor de amortiguamiento queda:

$$\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega} + \beta \omega \right)$$

Ecuación 4.55

Para determinar las constantes α y β es necesario definir el espectro de análisis. Siendo ω_1 la primera frecuencia natural y ω_2 la máxima frecuencia de interés, las constantes se definen con las siguientes expresiones:

$$\alpha = 2\omega_1\omega_2 \left(\frac{\zeta_1\omega_2 - \zeta_2\omega_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \right)$$

Ecuación 4.56

$$\beta = 2 \left(\frac{\zeta_2\omega_2 - \zeta_1\omega_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \right)$$

Ecuación 4.57

En base a la Ecuación 4.55, la Ecuación 4.56 y la Ecuación 4.57 se despejan las incógnitas α , β , y ζ . El término αM amortigua mejor los modos de vibración bajos. El término βK amortigua los modos de vibración más altos que son de poca importancia para la dinámica estructural ya que son considerados como ruido, pero de mucha importancia cuando se analizan problemas de propagación de ondas.

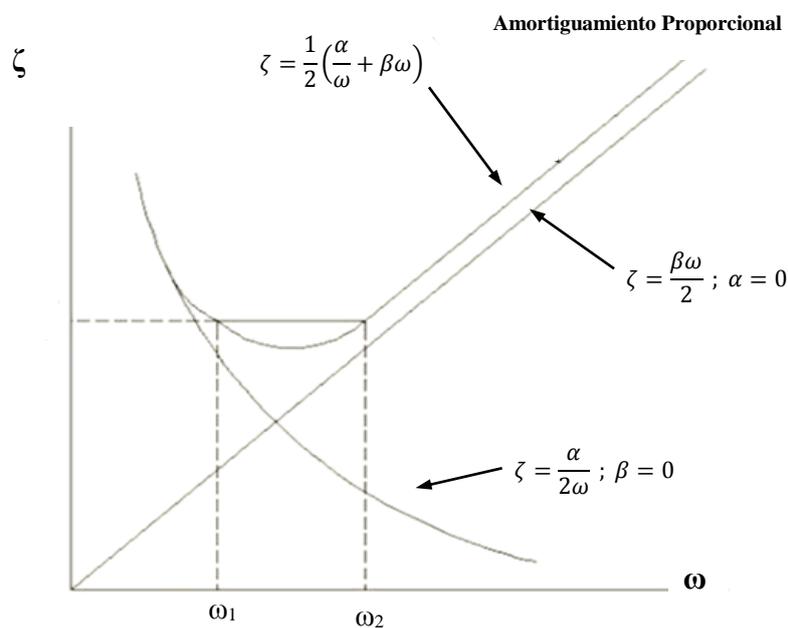


Figura 4.9 Amortiguamiento proporcional o de Rayleigh

Fuente: Adaptado de Enciso (2014)

La Figura 4.9 muestra la composición de la matriz de amortiguamiento por medio de una función lineal, proporcional a la rigidez, y una función recíproca, proporcional a la masa.

4.4.F. Métodos de integración directa explícita

Para la solución de las ecuaciones con derivadas temporales se dispone de varios métodos, la elección de uno u otro de estos métodos dependerá de la información que se desee obtener y del tipo de problema específico a resolver. Entre los métodos más conocidos se encuentran los métodos modales y métodos de integración directa (explícitos e implícitos).

Los métodos modales se fundamentan en la ortogonalidad de espacios finitos y la resolución de problemas de autovalores y autovectores. La esencia de los métodos modales radica en expresar el vector de desplazamientos como una combinación lineal de los autovectores, esto permite transformar la ecuación general del movimiento, Ecuación 4.6, para su posterior resolución. Estos métodos se adaptan mejor a problemas de dinámica estructural, es decir, problemas en los cuales los modos de vibración más bajos son los más importantes. El mayor costo computacional de estas técnicas está en resolver el problema de autovalores y autovectores.

Por otro lado los métodos de integración directa son llamados así porque no requieren de transformar la ecuación general de movimiento. Estos métodos tienen la ventaja de que pueden ser aplicados tanto a sistemas lineales como a sistemas no lineales. Como desventaja se puede señalar que requieren mayor esfuerzo de cálculo (De Miguel, 2011).

Existen dos tipos de integración directa: integración implícita e integración explícita. El método de integración implícita compite con los métodos modales para la solución de problemas de dinámica estructural. En el caso de trabajar con modelos 2D o 3D el costo computacional aumenta por lo que se recomienda su uso cuando el análisis no sea muy extenso en el tiempo. Este método es siempre estable, permite acomodar condiciones de carga más complejas y puede trabajar con matrices de rigidez no lineales sin inconvenientes.

Por otra parte, el método de integración directa explícita es más adecuado para problemas de propagación de ondas, es decir, cargas de impacto o choque. Este método se caracteriza por dividir el dominio del tiempo en pequeños intervalos (time steps) en los cuales las derivadas son aproximadas mediante expansiones de Taylor. Se resuelve el problema estático a cada paso de tiempo considerando las cargas inerciales y disipativas.

En los problemas de propagación de ondas se producen modos de vibración altos por lo que se hace crítico usar un paso de tiempo suficientemente pequeño, en caso contrario se pueden presentar problemas de estabilidad numérica. A pesar de la cantidad de pasos requeridos es un método de bajo costo computacional y bajo tiempo de análisis.

De las posibles variantes en el método, la aproximación utilizando diferencias centrales es la más conocida.

Expandiendo las derivadas por medio de una serie de Taylor hacia adelante y hacia atrás se tiene:

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \Delta t \cdot \dot{U}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}_t + \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{U}_t + \dots$$

Ecuación 4.58

$$U_{t-\Delta t} = U_t - \Delta t \cdot \dot{U}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}_t - \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{U}_t + \dots$$

Ecuación 4.59

Despreciando los términos mayores o iguales a Δt^3 y restando la Ecuación 4.58 de la Ecuación 4.59.

$$\dot{U}_t = \frac{1}{2\Delta t} (U_{t+\Delta t} - U_{t-\Delta t})$$

Ecuación 4.60

Para aproximar la segunda derivada se suma la Ecuación 4.58 con la Ecuación 4.59 y se desprecian los términos mayores o iguales a Δt^3 .

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2}(U_{t+\Delta t} - 2U_t + U_{t-\Delta t})$$

Ecuación 4.61

Remplazando la Ecuación 4.60 y Ecuación 4.61 en Ecuación 4.6:

$$\left[\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C \right] U_{t+\Delta t} = R_t - KU_t + \frac{2}{\Delta t^2}MU_t - \left[\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C \right] U_{t-\Delta t}$$

Ecuación 4.62

La velocidad con la que se ejecuta la integración numérica depende fuertemente de la naturaleza de las matrices M, C y K . Al usar la Ecuación 4.62 el lado izquierdo contendrá matrices de masa y amortiguamiento, si estas matrices son diagonales cada paso de tiempo será resuelto con mucha mayor velocidad. En el caso de usar un modelo de amortiguamiento proporcional a la matriz de rigidez $C = \beta K$ no será diagonal por lo que se vuelve más lenta la solución de las ecuaciones. En este caso se recomienda usar otras variantes del método.

Como se mencionó anteriormente el método de integración explícita es muy sensible al tamaño del paso de tiempo, pasos pequeños generan mejores resultados pero aumentarán el tiempo de cálculo. Para el caso de diferencias centrales planteado, el paso de tiempo debe ser determinado con la siguiente expresión:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} = \Delta t_{crit}$$

En donde ω_{max} representa la máxima frecuencia natural de vibración correspondiente al modo más alto de interés.

CAPITULO 5

Análisis de Tanques Cilíndricos Atmosféricos

5. ANÁLISIS DE TANQUES CILÍNDRICOS ATMOSFÉRICOS

Uno de los mayores desafíos en cuanto al manejo de riesgos en las plantas de proceso es el almacenamiento de grandes cantidades de sustancias inflamables que pueden generar incendios, explosiones y proyectiles. Estos incidentes, aunque inicialmente pequeños, podrían convertirse en disparadores de una serie de eventos que resultan en accidentes de grandes proporciones, causando cuantiosas pérdidas humanas y materiales. Sin embargo, a pesar de la gravedad que pueden alcanzar los sucesos que afectan la integridad de los tanques, como ya se ha mencionado en el capítulo II la mayoría de los códigos y prácticas recomendadas no incluye el efecto de una deflagración entre sus especificaciones de diseño.

Con la finalidad de analizar los efectos que producen las ondas de presión originadas en una explosión sobre un tanque cilíndrico atmosférico, se llevaron a cabo diferentes simulaciones para determinar su comportamiento en función de parámetros característicos tales como: masa, frecuencia natural de vibración, resistencia dinámica, etc. Como herramienta de análisis en este estudio se utilizó el software comercial “Autodesk Simulation Multiphysics” de Autodesk Inc., el cual implementa la resolución utilizando el método de elementos finitos. Además los perfiles de ondas de presión generados en la explosión se simularon a partir de las ecuaciones planteadas por Larcher (2008), detalladas en el capítulo III.

En este capítulo en particular se analizó el comportamiento de un tanque de desnatado que se encuentra vacío al ser alcanzado por la onda de presión de la explosión (Figura 5.1 y Figura 5.2).

5.1. Modelado

El tanque fue diseñado con un diámetro de 38'-7 5/8" (11.776 m) y una altura de 36' (10.973 m), lo que genera una capacidad nominal de 7517 bbl. (1195.11 m³). El mismo se

encuentra ubicado en la plata de procesamiento de crudo del Campo Tiguino, en la provincia de Pastaza en Ecuador actualmente operado por la empresa Petrobell Inc. & Grantmining S.A. (Figura 5.1).

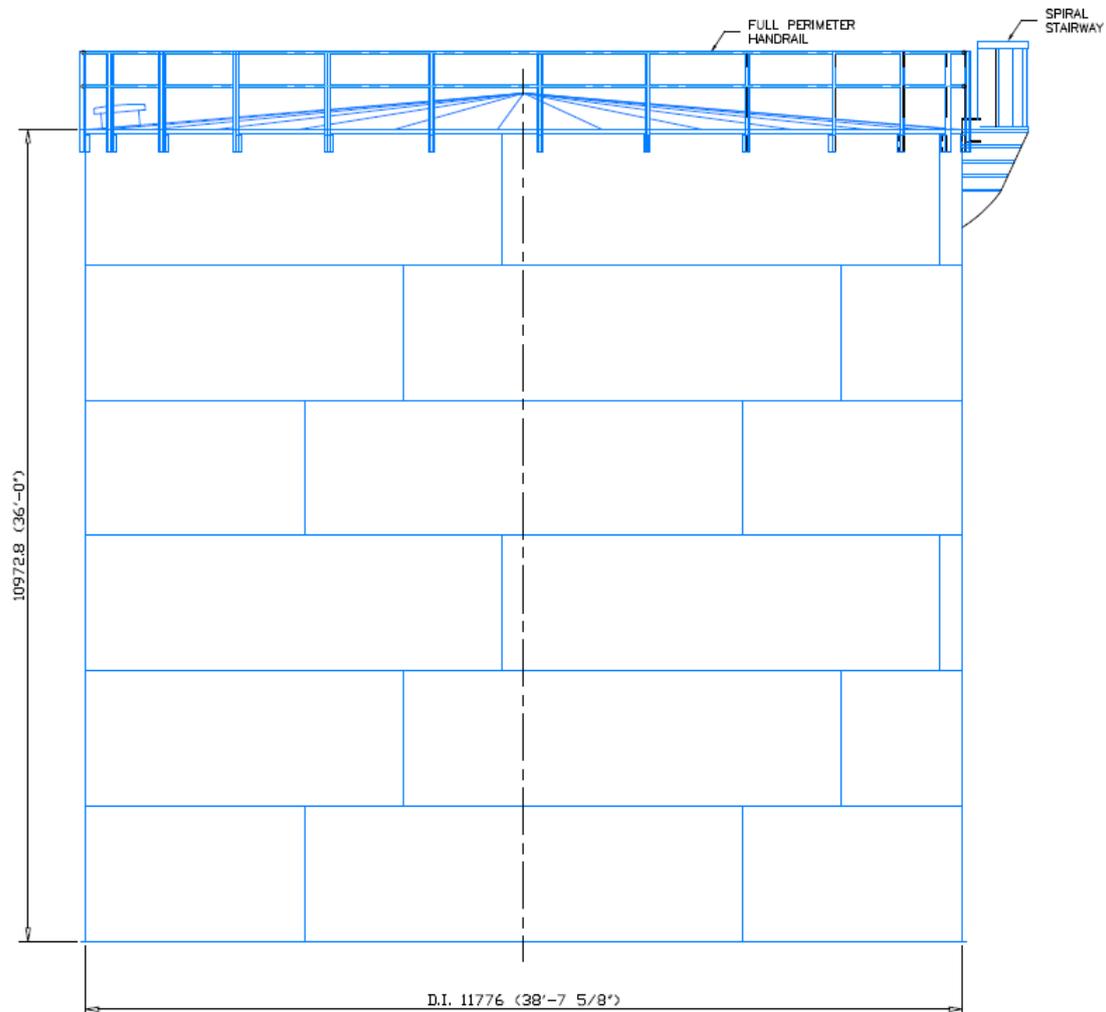


Figura 5.1 Vista frontal tanque de desnatado (plano general)

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T-160 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)²

Es un tanque de techo cónico soportado, los soportes del techo constan de 20 perfiles UPN 160 apoyados sobre una placa circular, la misma que a su vez esta soportada por un caño de 8" SCH 20 de 11.127 m de altura. El cuerpo del tanque consta de seis anillos con diferentes espesores, y 18 pernos de anclaje diseñados bajo cargas de viento, sismo y presión interna. Se

² Dimensiones en mm

encuentra fabricado en su mayor parte con acero al carbono ASTM A36 y construido según los lineamientos de API 650 (Figura 5.2).

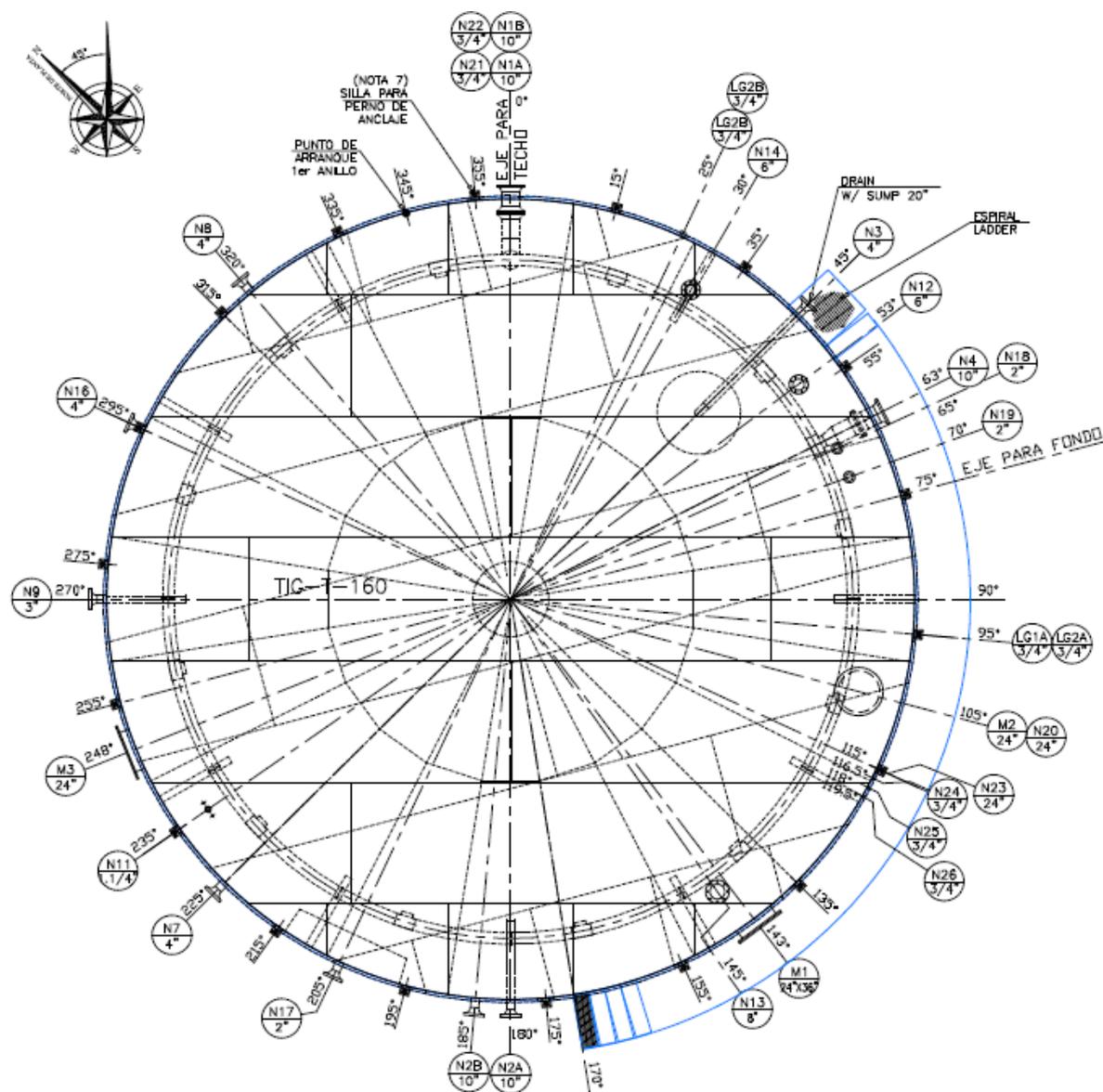


Figura 5.2 Vista de planta tanque de desnatao (plano general)

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatao TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

5.1.A. Tipo de elementos

Utilizando el software comercial Autodesk Simulation Multiphysics se modelo el tanque utilizando diferentes tipos de elementos como son: elemento placa, viga y elementos rígidos (según lo establecido en la sección 4.2D).

La envolvente del tanque (cuerpo), el techo, el fondo, el caño central de 8" SCH 20, y la placa central (estos dos últimos que forman parte del soporte del techo) se modelaron por medio de elementos placa usando distintos espesores según el diseño original, como se observa en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Material y espesores para elementos placa

DESCRIPCION		MATERIAL	ESPESOR (mm)	PESO (Kg)
Fondo		ASTM -A36	6.35	5517
Techo		ASTM-A36	6.35	5478
Envolvente (Cuerpo)	Anillo 1	ASTM-A36	6.35	3358
	Anillo 2	ASTM-A36	6.35	3358
	Anillo 3	ASTM-A36	4.76	2517
	Anillo 4	ASTM-A36	4.76	2517
	Anillo 5	ASTM-A36	4.76	2517
	Anillo 6	ASTM-A36	4.76	2459
Soporte del Techo	Caño 8"	ASTM-A106 Gr B	6.35 (SCH 20)	371
	Placa Central	ASTM-A36	19.05	573

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

Los elementos de placa utilizados son elementos de tres o cuatro nodos, formulados en el espacio tridimensional, poseen 5 grados de libertad (exceptuando el momento alrededor del eje normal a la cara del elemento). Estos elementos son compatibles con fuerzas nodales, momentos nodales (excepto cuando giran alrededor del eje normal a la cara del elemento), presiones (normal a la cara del elemento), cargas superficiales de tracción o compresión, aceleración / gravedad, fuerzas centrífugas y cargas térmicas. Se recomiendan utilizar para modelar y analizar objetos, tales como tanques, recipientes a presión, o estructuras de partes del cuerpo de automóviles.

En cuanto a los perfiles UPN 160 que soportan el techo se utilizó elementos viga, ideales para modelar este tipo de estructuras y cargas que soporta. Finalmente se utilizó elementos rígidos para simular la unión entre los perfiles UPN 160 y la placa central del soporte y las UPN 160 y la envolvente del tanque.

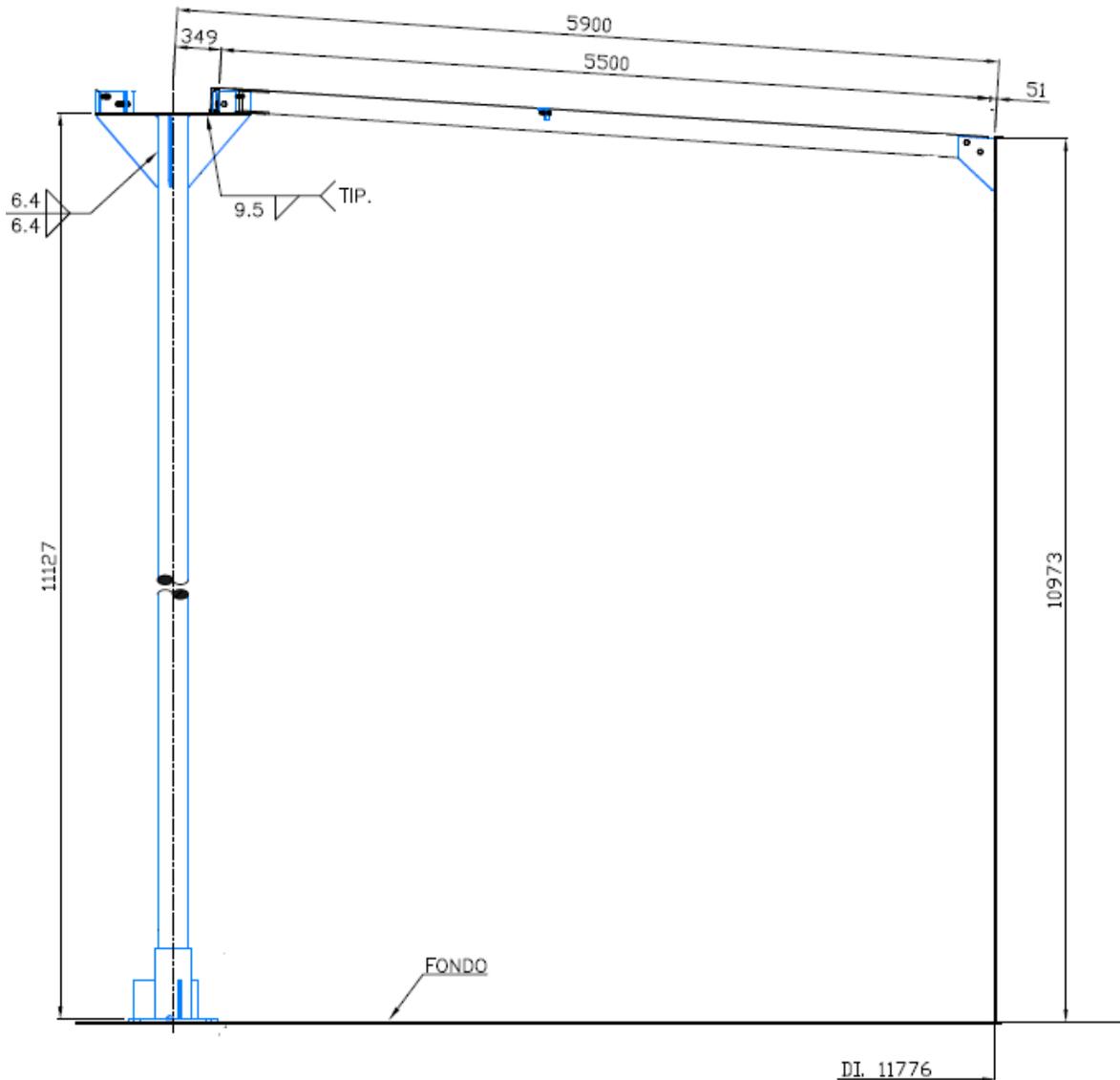


Figura 5.3 Estructura tanque de desnatado (corte transversal – soporte del techo)

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)³

Como se observa en la Figura 5.3 el diseño original de los soportes del techo tienen un grado mayor de complejidad, pero a fin de tener un modelo más simple y obtener tiempos de cómputo más pequeños se ha realizado ciertas simplificaciones en el modelado.

Entre las simplificaciones propuestas se omiten las uniones emperradas, los clips de sujeción y placas rigidizadoras y de refuerzo, ver plano: TIG –M1-105 (en particular: DETALLE A, DETALLE B, DETALLE MK: 2 y DETALLA MK: 3 & 4) del ANEXO B.

³ Dimensiones en mm

La Figura 5.4 presenta una vista en corte del modelo generado en el software comercial Autodesk Simulation Multiphysics, donde se aprecian los anillos, el techo y el fondo en diferentes colores así como el soporte del techo (caño de 8", placa central, y los perfiles UPN 160).

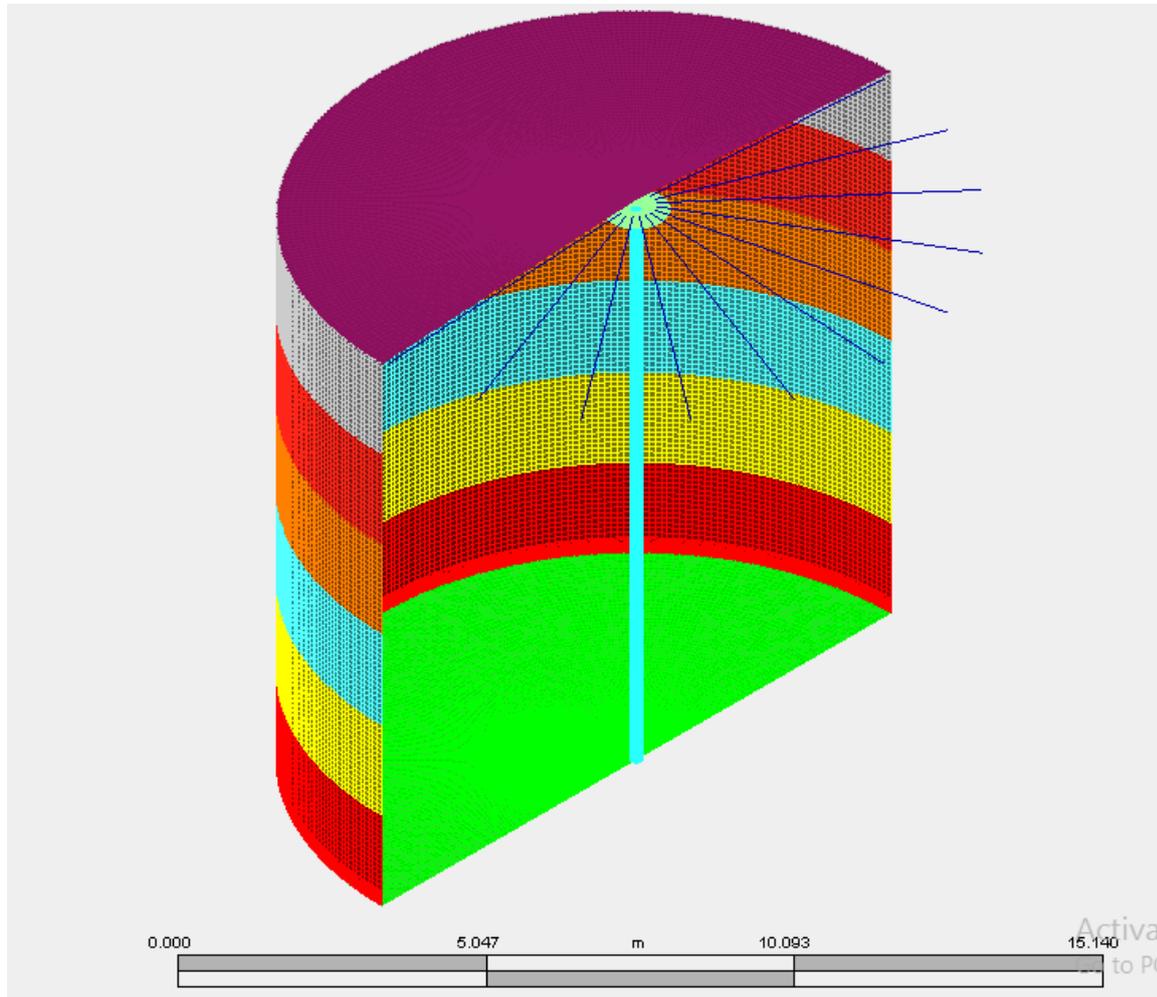


Figura 5.4 Vista en corte de modelo de tanque (Autodesk Simulation Multiphysics)

El diseño original del tanque, dimensiones y detalles de construcción se detallan en los planos de la ingeniería básica y de detalle del tanque que se encuentran en el ANEXO B.

5.1.B. Materiales

El material utilizado en casi la totalidad del tanque es el acero al carbono ASTM-A36, excepto el caño de 8" SCH 20 que forma parte del soporte del techo, este fue modelado con

acero al carbono ASTM-A106 Gr B (Tabla 5.2). Las propiedades de interés de estos materiales se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Propiedades de materiales utilizados

Material	Densidad (kg/m³)	Módulo Elasticidad E (MPa)	Relación de Poisson	Esfuerzo de Fluencia (MPa)
ASTM-A36	7854.868	199.95	0.290	250.00
ASTM-A106 Gr B.	7861.093	208.50	0.288	277.90

5.1.C. Condiciones de contorno

El tanque tiene 18 pernos de anclaje ubicados como indica la Figura 5.2. Estos pernos de anclaje impiden que el tanque se desplace, y están diseñados para cargas de viento, sismo y presión interna según lo establecido por API 650.

En los nodos coincidentes con la ubicación de los pernos de anclaje se colocaron restricciones tipo empotramiento (restringe los 6 grados de libertad).

5.1.D. Carga y perfil de ondas de presión

Para modelar el efecto de una explosión y su correspondiente onda de presión que varía en el tiempo, se ha propuesto que el modelo este sujeto a una carga dinámica, que trabaja sobre la mitad de la superficie exterior del tanque.

Esta carga dinámica responde al perfil presión-tiempo, modelado de acuerdo a lo planteado por (Larcher, 2008) y descritos en las secciones 3.4 a 3.6.

La Figura 5.5 se muestra el modelo del tanque elaborado en Autodesk Simulation Multiphysics y la carga dinámica trabaja sobre la mitad de la superficie exterior del tanque. Para simular la carga dinámica se utilizó la herramienta “surface pressure / traction object” la que permite seleccionar la superficie donde se desea aplicar la carga y aplicarla definiendo su dirección y magnitud (presión máxima de la onda de presión). Posteriormente al definir el

tipo de análisis utilizado se ingresa la forma en la que varía la carga respecto al tiempo según el perfil presión-tiempo.

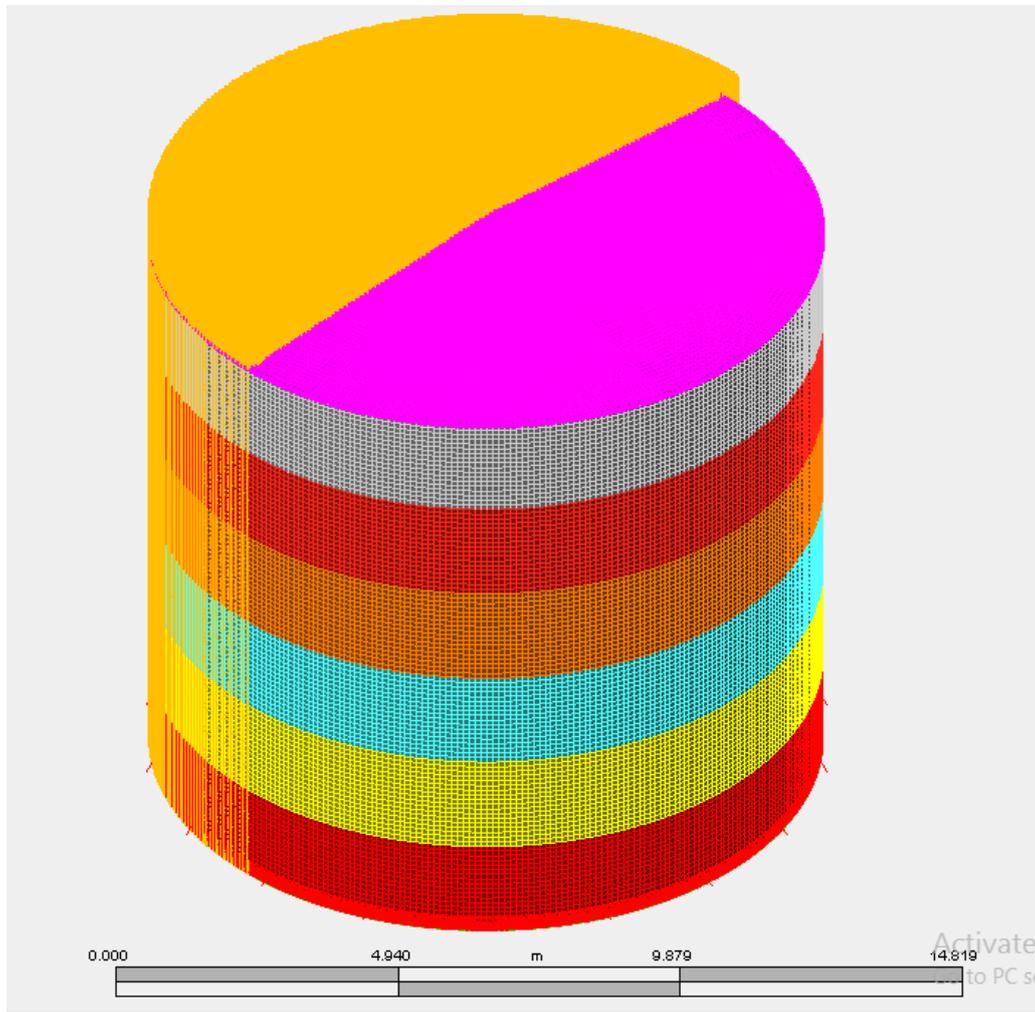


Figura 5.5 Modelo de tanque y área de carga (Autodesk Simulation Multiphysics)

5.1.E. Tipo de análisis

El método de elementos finitos implementado en Autodesk Simulation Multiphysics utiliza dos procedimientos para la resolución de problemas dinámicos: el método de superposición (“Transient Stress: Modal Superposition”) y el método de integración directa (“Transient Stress: Direct Integration”). De estas dos opciones se seleccionó la última mencionada, ya que se ajusta mejor a estructuras sometidas a cargas de impacto u ondas de choque, como es el caso estudiado.

5.1.F. Validación del mallado del modelo

Antes de realizar el cálculo de los esfuerzos a los que está sometido el tanque es necesario validar el mallado del modelo.

Se define que la malla de un modelo esta validada cuando no se observa variaciones apreciables en una propiedad calculada a medida que aumenta el número de elementos de la malla.

La validación del mallado del modelo se lo realiza variando el número de elementos y observando en un punto arbitrario del modelo el esfuerzo de Von Mises (ver sección 5.5 de Budynas & Nisbett, 2008).

El modelo se probó frente a una carga estática de 1 kPa ejercida sobre la mitad de la superficie exterior del tanque. El punto arbitrario seleccionado fue el nodo ubicado a un ángulo horario de 135° respecto al eje vertical y a la mitad de la altura del primer anillo, en las coordenadas ($X = 4.16344$, $Y = -4.16344$, $Z = 0.91$). Es decir está ubicado a 0.91 m sobre el perno de anclaje ubicado a un ángulo de 135° respecto al eje de referencia (ver Figura 5.2).

Los resultados mostrados en la Figura 5.6 arrojaron que a partir de un mallado de alrededor de 120000 elementos el esfuerzo de Von Mises se estabiliza en un valor cercano a 4.1 MPa.

Se seleccionó el modelo con 121689 elementos. Para optimizarlo se propuso utilizar una malla más fina alrededor de los puntos de mayor interés, es decir aquellos puntos que presentaban esfuerzos máximos frente a la carga analizada. Los puntos de interés son los cercanos a los pernos de anclaje. Finalmente el modelo optimizado tiene una malla total de 129607 elementos.

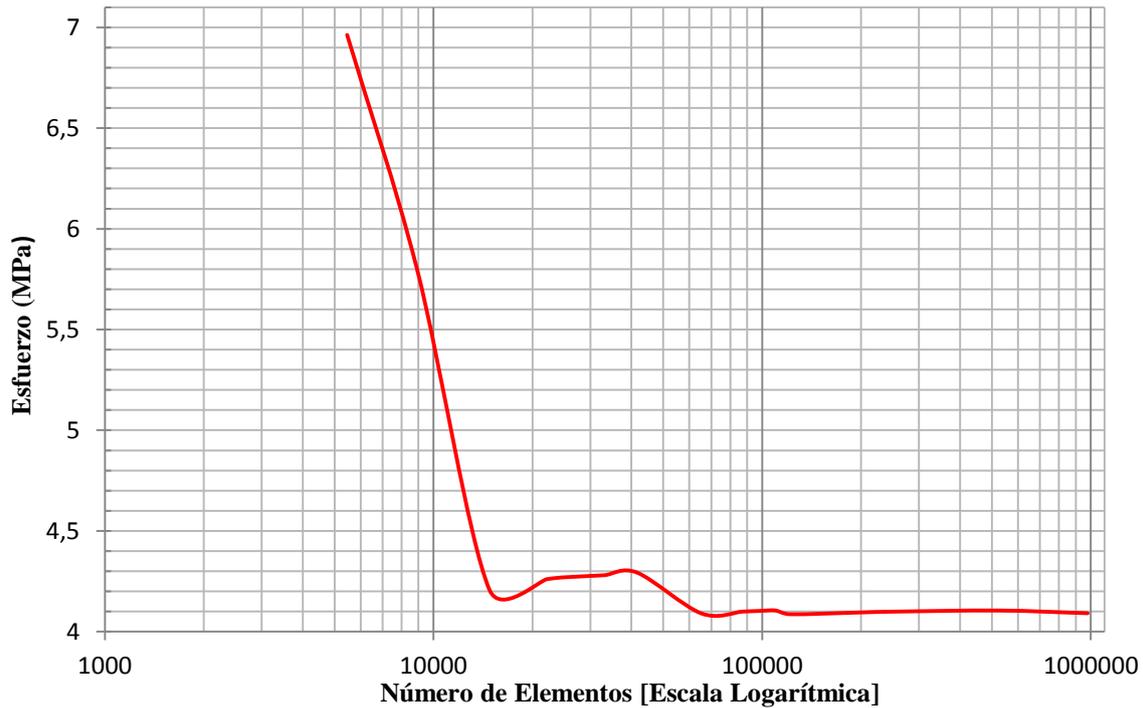


Figura 5.6 Esfuerzo vs Número de elementos

5.2. Análisis del modelo propuesto

En base al modelo propuesto se desarrollaron diferentes tipos de análisis utilizando las herramientas del software Autodesk Simulation Multiphysics. Estos análisis se discuten a continuación

5.2.A. Análisis de frecuencia natural

Previo a cualquier análisis de esfuerzos es necesario obtener las frecuencias naturales de los diferentes modos de vibración del tanque, con la finalidad de poder definir la naturaleza de la carga aplicada (dinámica, cuasi-estática o de impacto).

El software Autodesk Simulation Multiphysics por defecto calcula las frecuencias naturales de los cinco primeros modos de vibración del modelo, cuyos valores se detallan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Frecuencia natural y periodo natural

Modo	Frecuencia Natural		Periodo Natural
	ω (cycle/s)	ω (Hz)	T (s)
1	0.2363	1.4848	0.6735
2	0.2374	1.4915	0.6705
3	0.4408	2.7695	0.3611
4	0.7590	4.7690	0.2097
5	0.7608	4.7801	0.2092

Se establece que la relación del tiempo de duración de la carga con respecto al periodo natural debe ser menor o próxima a 0.5 para poder considerar a una carga como carga de impacto. Tomando el primer modo de vibración de 0.6735, entonces la máxima duración de la carga t_d para que la carga sea considerada de impacto tendrá un valor aproximado de 0.33674 s (336.74 ms).

5.2.B. Análisis esfuerzo de fluencia

(i) Determinación de la onda de presión

Una vez que sea definido el modelo y sus frecuencias naturales, utilizando el método de la secante, se somete sucesivamente al modelo a una carga dinámica (basada en el perfil de onda de choque asumiendo en todos los casos una distancia al foco de explosión constante de 10 m) hasta obtener como esfuerzo máximo un valor cercano al esfuerzo de fluencia del material (250 MPa). El esfuerzo máximo coincide con una masa de TNT equivalente de 0.131 kg y presenta un perfil de la onda de choque como el que se indica en la Figura 5.7.

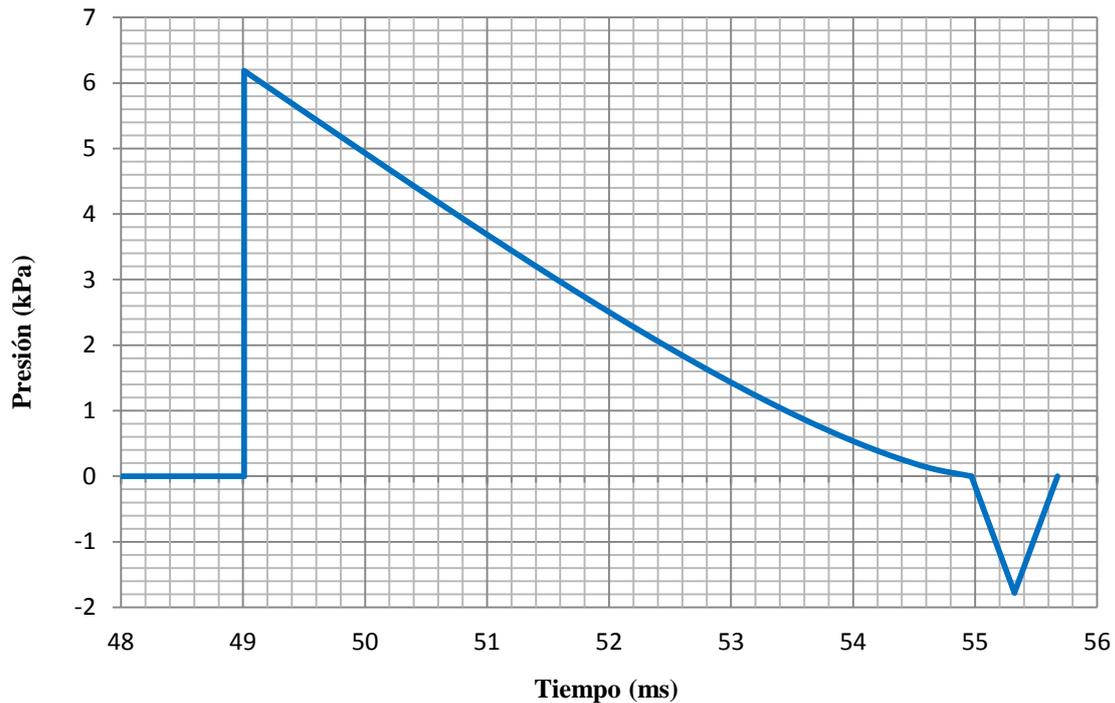


Figura 5.7 Perfil de Presión vs. Tiempo (original)

Para el perfil de presión-tiempo mostrado anteriormente los parámetros obtenidos se observan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Parámetros de perfil de onda de presión

W	0.131	kg
Z	19.700	m/kg ^{1/3}
P_{max}	6.185	kPa(g)
P_{min}	-1.77	kPa(g)
t_a	49.0	ms
t_d	5.96	ms
t_n	0.71	ms

La Tabla 5.4 presenta las presiones manométricas máxima y mínima. Los parámetros del perfil de la onda de presión fueron calculados según lo establecido en la sección 3.6.

Además se corrobora que la carga establecida (perfil presión tiempo) es una carga de impacto porque el tiempo de duración de la fase positiva t_d es 6.67 ms menor a la máxima duración de la carga 336.74 ms.

Para este tipo de carga Autodesk Simulation Multiphysics usa el método de integración directa para obtener los esfuerzos y deformaciones. El método requiere dividir la carga dinámica en varios pasos (“time steps”), para cada uno de los cuales se calcula las respectivas deformaciones y esfuerzos.

Debido a que durante el tiempo de arribo t_a la presión es igual a la presión atmosférica de referencia, se asume un t_a menor al real para disminuir el tiempo de cómputo requerido.

Como se observa en la Figura 5.8, la curva permanece igual a la original pero desplazada en el tiempo. Para este caso se redujo el tiempo de arribo t_a de 49 ms a 0.30 ms.

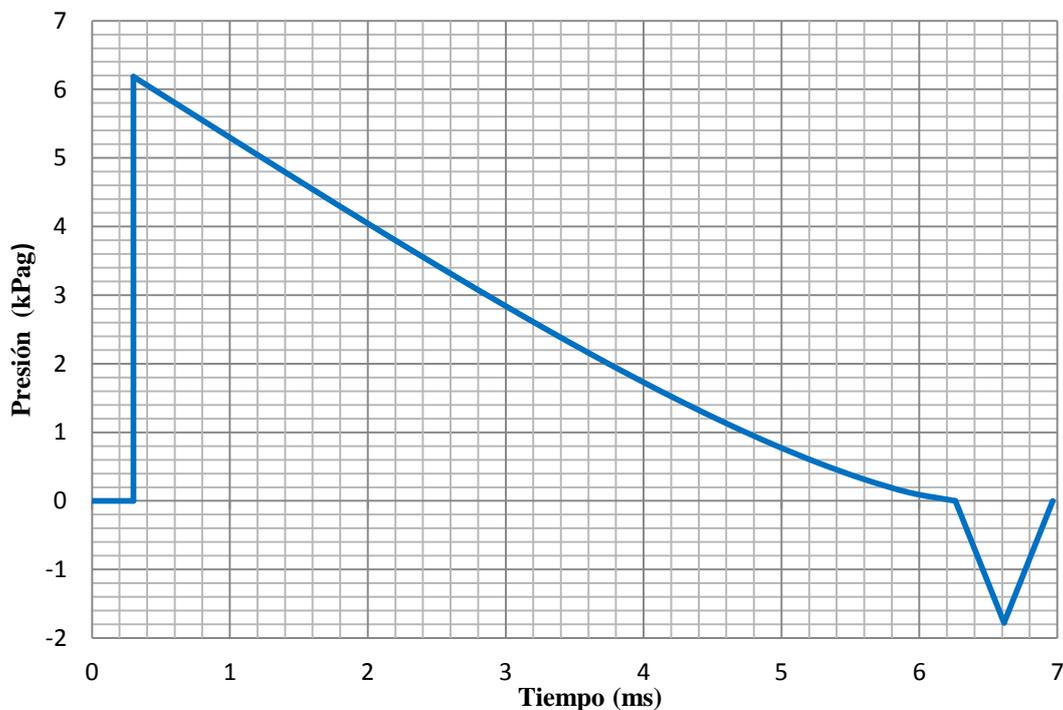


Figura 5.8 Perfil de Presión vs Tiempo (modificado)

(ii) Esfuerzos máximos

Los mayores esfuerzos se obtuvieron en los nodos que se ubican en los pernos de anclaje del tanque (donde se ubican las restricciones).

En particular los pernos de anclaje ubicados en la mitad de la superficie exterior del tanque afectada directamente por la carga dinámica de la onda de presión son los que soportan esfuerzos mayores.

Los nodos con esfuerzos máximos que se encontraron para valores de tiempo hasta 7.2 ms se indican en la Tabla 5.5. Para tiempos mayores a este valor se obtuvieron esfuerzos monótonamente decrecientes.

Tabla 5.5 Esfuerzos máximos

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto
1	0.30	1.0	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
2	0.60	6.6	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
3	0.90	15.7	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
4	1.20	26.4	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
5	1.50	37.1	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
6	1.80	47.9	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
7	2.10	58.8	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
8	2.40	69.7	X = -1.523, Y = -5.687, Z = 0	3
9	2.71	81.2	X = -1.523, Y = -5.687, Z = 0	3
10	3.01	91.8	X = -1.523, Y = -5.687, Z = 0	3
11	3.31	101.7	X = -1.523, Y = -5.687, Z = 0	3
12	3.61	110.9	X = -1.523, Y = -5.687, Z = 0	3
13	3.91	121.1	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
14	4.21	132.0	X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0	2
15	4.51	142.8	X = -3.377, Y = -4.823, Z = 0	4
16	4.81	151.9	X = -3.377, Y = -4.823, Z = 0	4
17	5.11	160.3	X = -4.163, Y = 4.163, Z = 0	5
18	5.41	177.5	X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0	1
19	5.71	200.9	X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0	1
20	6.01	221.3	X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0	1
21	6.31	236.8	X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0	1
22	6.61	246.3	X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0	1
23	6.91	250.0	X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0	1
24	7.21	249.4	X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0	1

El cuadro anterior muestra para cada paso: el tiempo (tiempo modificado en relación al perfil de presiones-tiempo original), la magnitud del esfuerzo calculado, las coordenadas donde se encuentra ubicado el nodo y un nombre arbitrario asignado al punto de análisis.

El esfuerzo máximo, obtenido en el paso 23 (6.91 ms) tiene una magnitud de 250 MPa (cercano al esfuerzo de fluencia) y se encuentra en el punto de análisis 1, de coordenadas: $X = -5.866$, $Y = 0.513$, $Z = 0$.

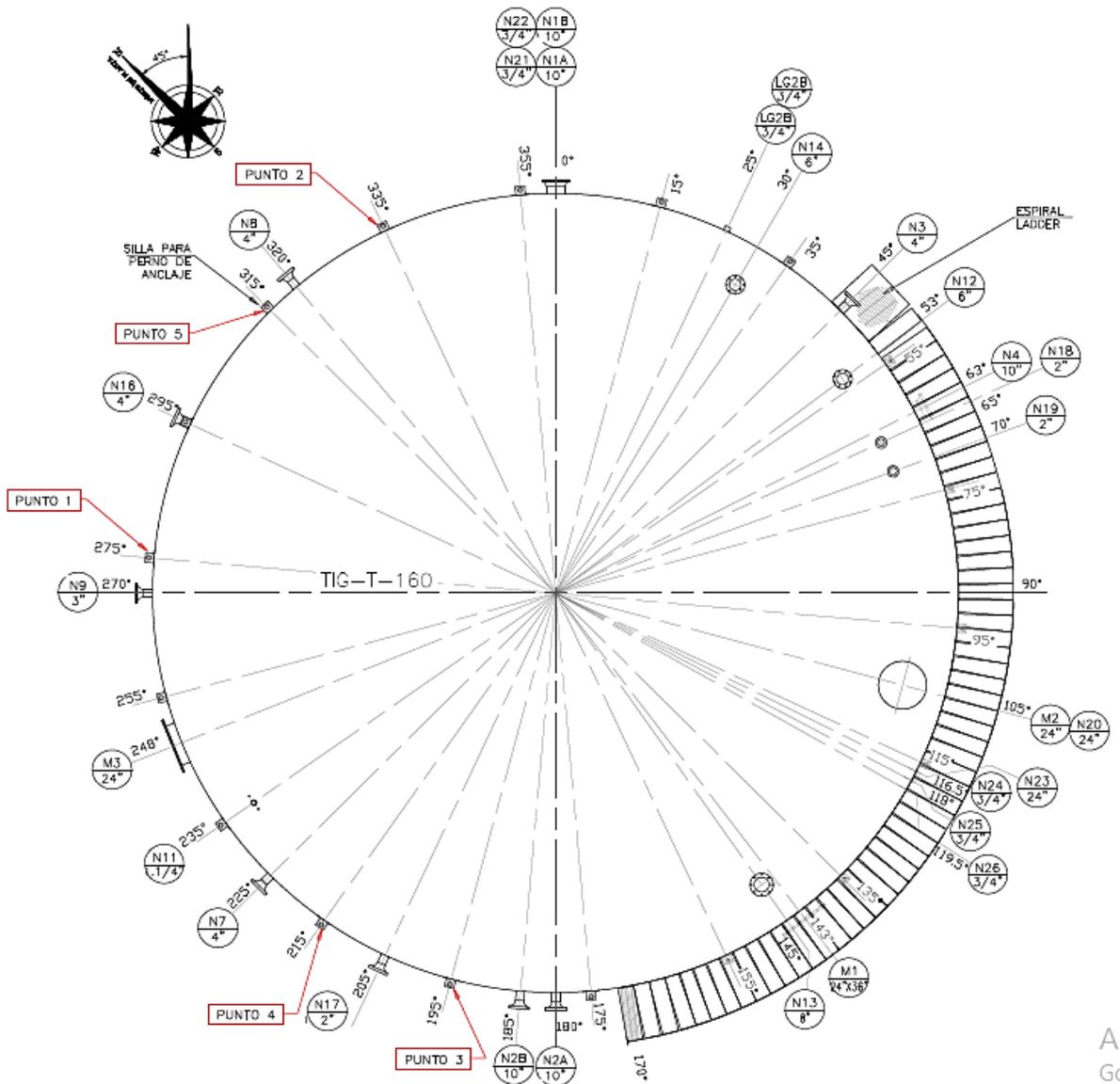


Figura 5.9 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis)

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

En la Figura 5.9 se indica una vista de planta del tanque analizado y la ubicación de los nodos que poseen los esfuerzos máximos los que utilizan el nombre arbitrario que se designó en la tabla anterior.

El punto de análisis 1 que presenta el máximo esfuerzo coincide con el perno de anclaje más cercano al eje 90° - 270° . El resto de puntos de análisis al igual que el punto 1 son coincidentes con pernos de anclajes ubicados en la mitad de la superficie exterior del tanque expuesta directamente a la onda de choque.

La Figura 5.10 se muestra la gráfica esfuerzo-tiempo para cada punto de análisis durante el tiempo analizado.

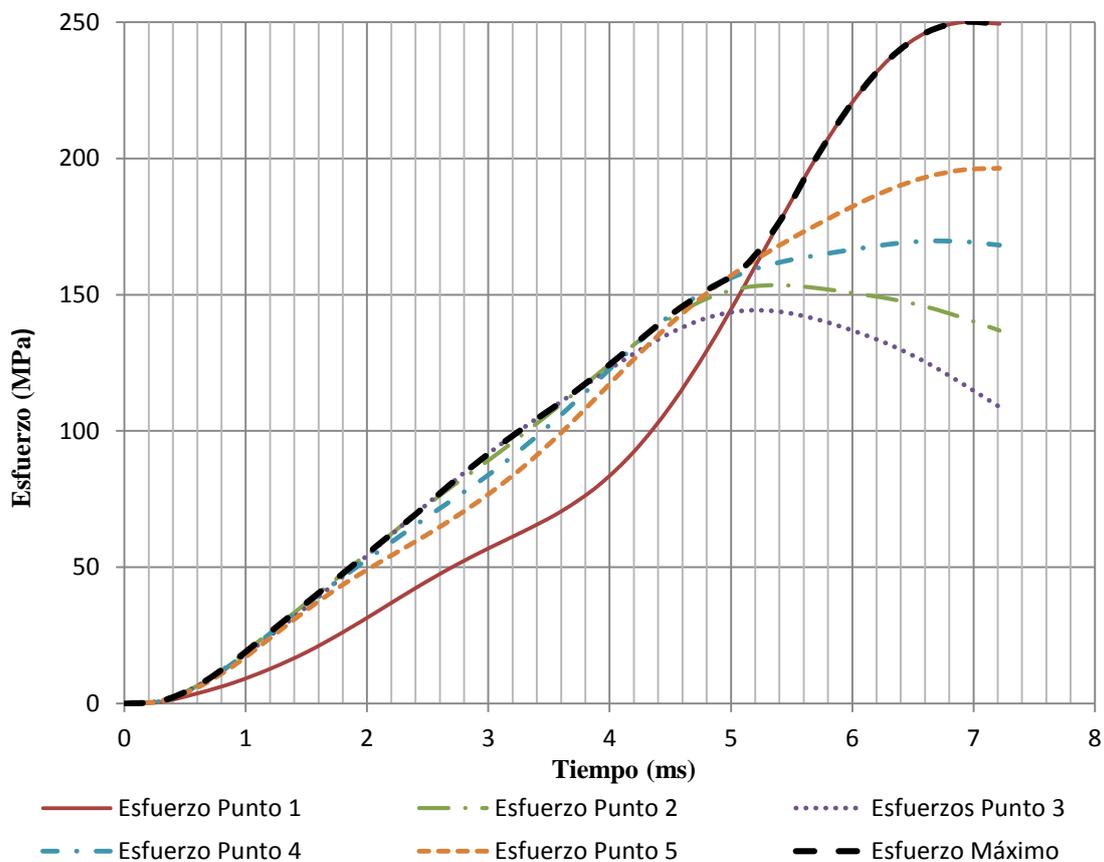


Figura 5.10 Esfuerzo vs Tiempo para cada punto de análisis

Como se observa la evolución del esfuerzo a lo largo del tiempo en todos los casos estudiados inicia con un crecimiento rápido del esfuerzo. Posteriormente a medida que la fase positiva del perfil presión-tiempo comienza a disminuir, el incremento del esfuerzo va disminuyendo paulatinamente. Finalmente, por la influencia de la fase negativa, el esfuerzo deja de aumentar o incluso, en algunos casos, se observa una pequeña disminución del mismo. En la

Figura 5.11 se grafican los resultados obtenidos para el paso: 23, donde se puede observar el esfuerzo máximo.

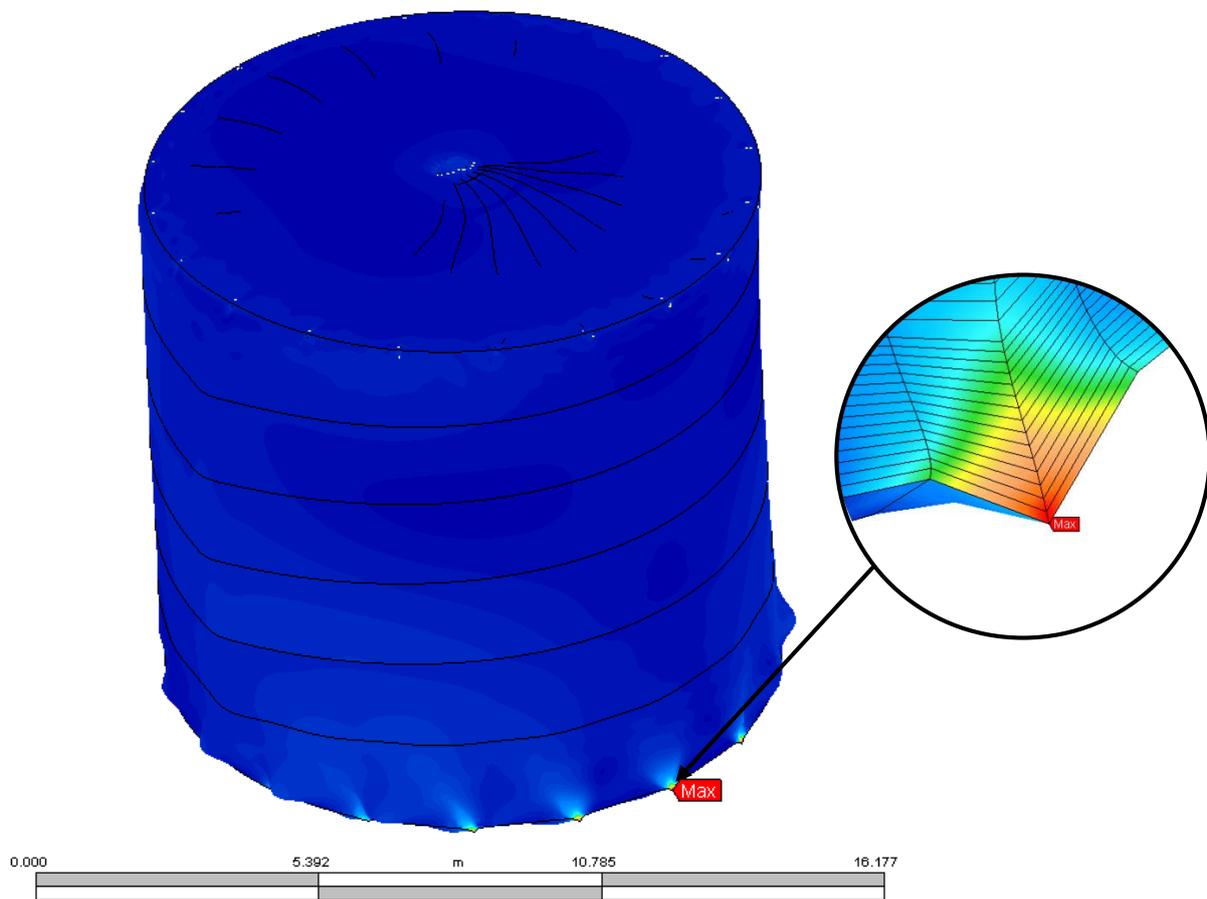


Figura 5.11 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (modelo original, paso: 23)

5.2.C. Análisis de sensibilidad al ángulo de incidencia de la carga

En el análisis del esfuerzo de fluencia en la sección anterior, se determinó que los puntos que presentan mayores esfuerzos son aquellos donde se encuentran los pernos de anclaje.

En esta sección se estudia la influencia del ángulo de incidencia de las ondas de choque de una explosión (carga) en el comportamiento estructural del tanque. Por ello se ha planteado observar la influencia de la posición de los pernos de anclaje y su relación con los esfuerzos obtenidos. Para realizar este análisis se rotaron en sentido anti horario los pernos de anclaje a: 5° , 10° y 15° respecto a su posición original.

A continuación se detallan los resultados obtenidos en cada caso

(i) Pernos de anclaje rotados 5°

Al rotar de manera anti horaria 5° la ubicación de los pernos de anclaje éstos quedan dispuestos simétricamente respecto al eje 90°-270° (Figura 5.12)

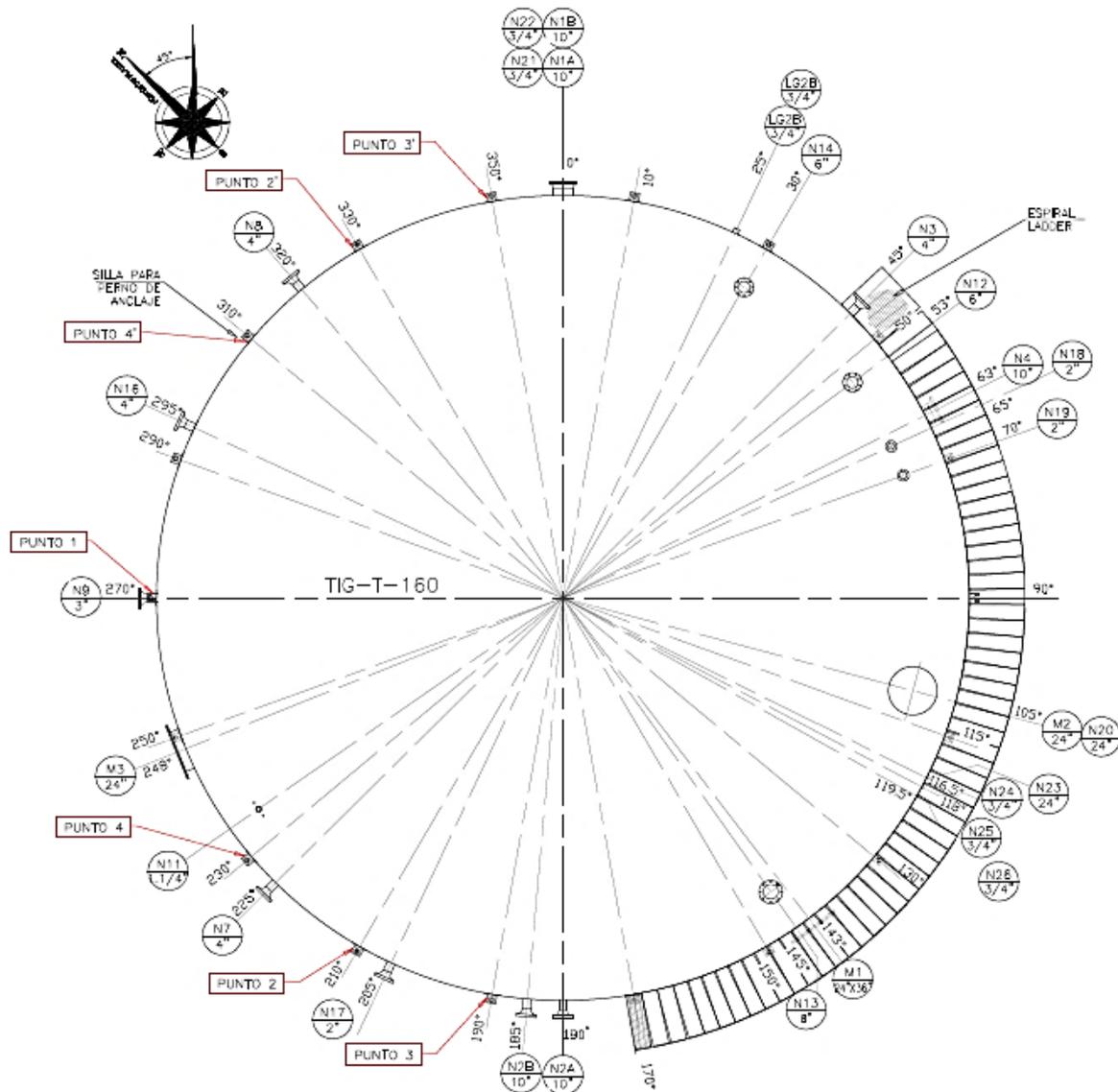


Figura 5.12 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - pernos de anclaje rotados: 5°

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

La nueva distribución provoca que dos nodos simétricos respecto al eje 90^0-270^0 tengan el mismo esfuerzo. Por ejemplo para el paso: 3, el punto de análisis 2 tendrá un esfuerzo de 6.5MPa, al igual que su simétrico el punto 2'.

El punto con el esfuerzo máximo sigue siendo el punto de análisis 1, con 250.6MPa de esfuerzo. Este esfuerzo máximo ocurre durante el paso: 23 a 6.91 ms en el nodo coincidente con el eje 90^0-270^0 ($X=-5.888$, $Y=0$, $Z=0$). La Tabla 5.6 indica el valor de los esfuerzos máximos para el resto de pasos y las coordenadas donde están ubicados.

Tabla 5.6 Esfuerzos máximos por paso (pernos de anclaje rotados 5^0)

Paso	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto
1	0.30	1.0	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
2	0.60	6.5	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
3	0.90	15.6	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
4	1.20	26.3	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
5	1.50	37.1	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
6	1.80	47.5	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
7	2.10	57.8	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
8	2.40	69.5	X = -1.022, Y = -5.799, Z = 0	3
9	2.71	81.1	X = -1.022, Y = -5.799, Z = 0	3
10	3.01	91.8	X = -1.022, Y = -5.799, Z = 0	3
11	3.31	101.3	X = -1.022, Y = -5.799, Z = 0	3
12	3.61	109.8	X = -1.022, Y = -5.799, Z = 0	3
13	3.91	120.4	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
14	4.21	132.2	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
15	4.51	142.8	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
16	4.81	150.8	X = -2.944, Y = -5.099, Z = 0	2
17	5.11	160.2	X = -4.511, Y = -3.785, Z = 0	4
18	5.41	177.5	X = -5.888, Y = 0, Z = 0	1
19	5.71	201.2	X = -5.888, Y = 0, Z = 0	1
20	6.01	221.8	X = -5.888, Y = 0, Z = 0	1
21	6.31	237.4	X = -5.888, Y = 0, Z = 0	1
22	6.61	246.9	X = -5.888, Y = 0, Z = 0	1
23	6.91	250.6	X = -5.888, Y = 0, Z = 0	1
24	7.21	249.9	X = -5.888, Y = 0, Z = 0	1

(ii) Pernos de anclaje rotados 10°

En el modelo donde los pernos de anclaje fueron rotados 10° se obtuvieron esfuerzos iguales a los del modelo original pero los puntos en los que se dan estos esfuerzos máximos no son los mismos.

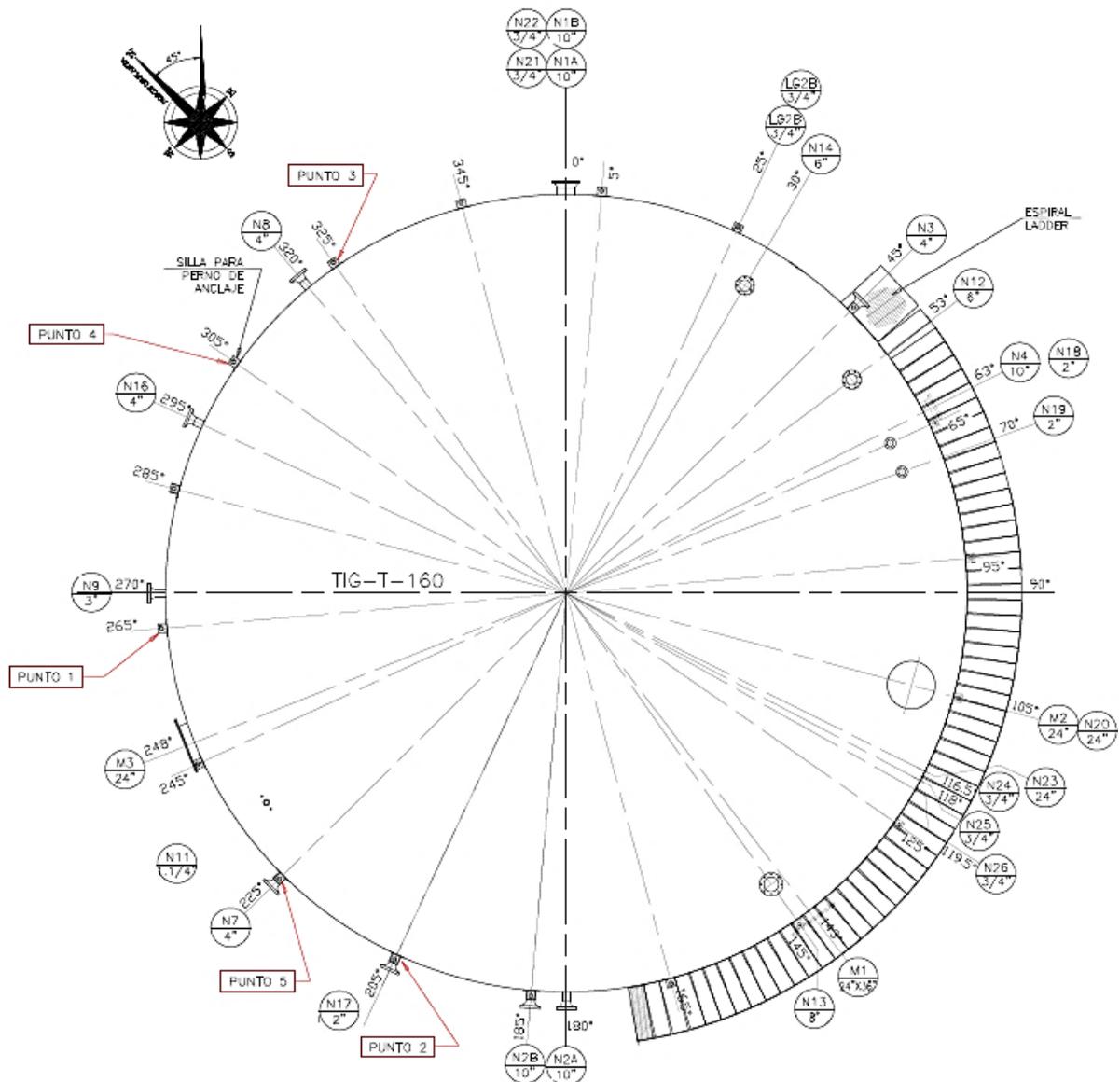


Figura 5.13 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - pernos de anclaje rotados: 10°

Fuente: Adaptado de Plano de Ingeniería Básica y de Detalle Tanque de Desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

Los puntos del modelo con pernos de anclaje rotados 10° son simétricos respecto al eje 90° - 270° si se los compara con el modelo original. Así por ejemplo en este caso de estudio para el

paso 23, el nodo de mayor esfuerzo es el ubicado en las coordenadas $X = -5.866$, $Y = -0.513$, $Z = 0$, mientras que para el modelo original las coordenadas de ubicación son $X = -5.866$, $Y = 0.513$, $Z = 0$. A pesar que para ambos casos el esfuerzo máximo es de alrededor 250 MPa (ver Figura 5.13 y la Figura 5.9).

La Tabla 5.7 muestra los puntos de análisis, sus coordenadas la magnitud del esfuerzo máximo, el tiempo y el paso para el modelo con pernos de anclaje girados 10^0 . Si se compara la Tabla 5.7 con la Tabla 5.5 se encontrar que en ambos casos se obtienen los mismo esfuerzos pero ubicados en puntos simétricos respecto al eje 90^0 - 270^0 .

Tabla 5.7 Esfuerzos máximos por paso (pernos de anclaje rotados: 10^0)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto
1	0.30	1.0	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
2	0.60	6.6	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
3	0.90	15.7	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
4	1.20	26.4	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
5	1.50	37.1	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
6	1.80	47.9	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
7	2.10	58.8	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
8	2.40	69.7	$X = -1.524, Y = -5.687, Z = 0$	3
9	2.71	81.2	$X = -1.524, Y = -5.687, Z = 0$	3
10	3.01	91.8	$X = -1.524, Y = -5.687, Z = 0$	3
11	3.31	101.7	$X = -1.524, Y = -5.687, Z = 0$	3
12	3.61	110.9	$X = -1.524, Y = -5.687, Z = 0$	3
13	3.91	121.1	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
14	4.21	132.0	$X = -2.488, Y = 5.336, Z = 0$	2
15	4.51	142.8	$X = -3.377, Y = -4.823, Z = 0$	4
16	4.81	151.9	$X = -3.377, Y = -4.823, Z = 0$	4
17	5.11	160.3	$X = -4.163, Y = 4.163, Z = 0$	5
18	5.41	177.5	$X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0$	1
19	5.71	200.9	$X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0$	1
20	6.01	221.3	$X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0$	1
21	6.31	236.8	$X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0$	1
22	6.61	246.3	$X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0$	1
23	6.91	250.0	$X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0$	1
24	7.21	249.4	$X = -5.866, Y = 0.513, Z = 0$	1

El punto con el esfuerzo máximo para todos los pasos es el punto de análisis 1 con 250 MPa de esfuerzo. Este esfuerzo máximo ocurre durante el paso: 23 a 6.91 ms y se encuentra

ubicado en las coordenadas: $X=-5.866$, $Y=-0.513$, $Z=0$. El nodo esta sobre el perno de anclaje más cercano con el eje 90° - 270° .

(iii) Pernos de anclaje rotados 15°

En este caso, la nueva distribución permite que los pernos de anclaje queden dispuestos simétricamente respecto al eje 90° - 270° (Figura 5.14).

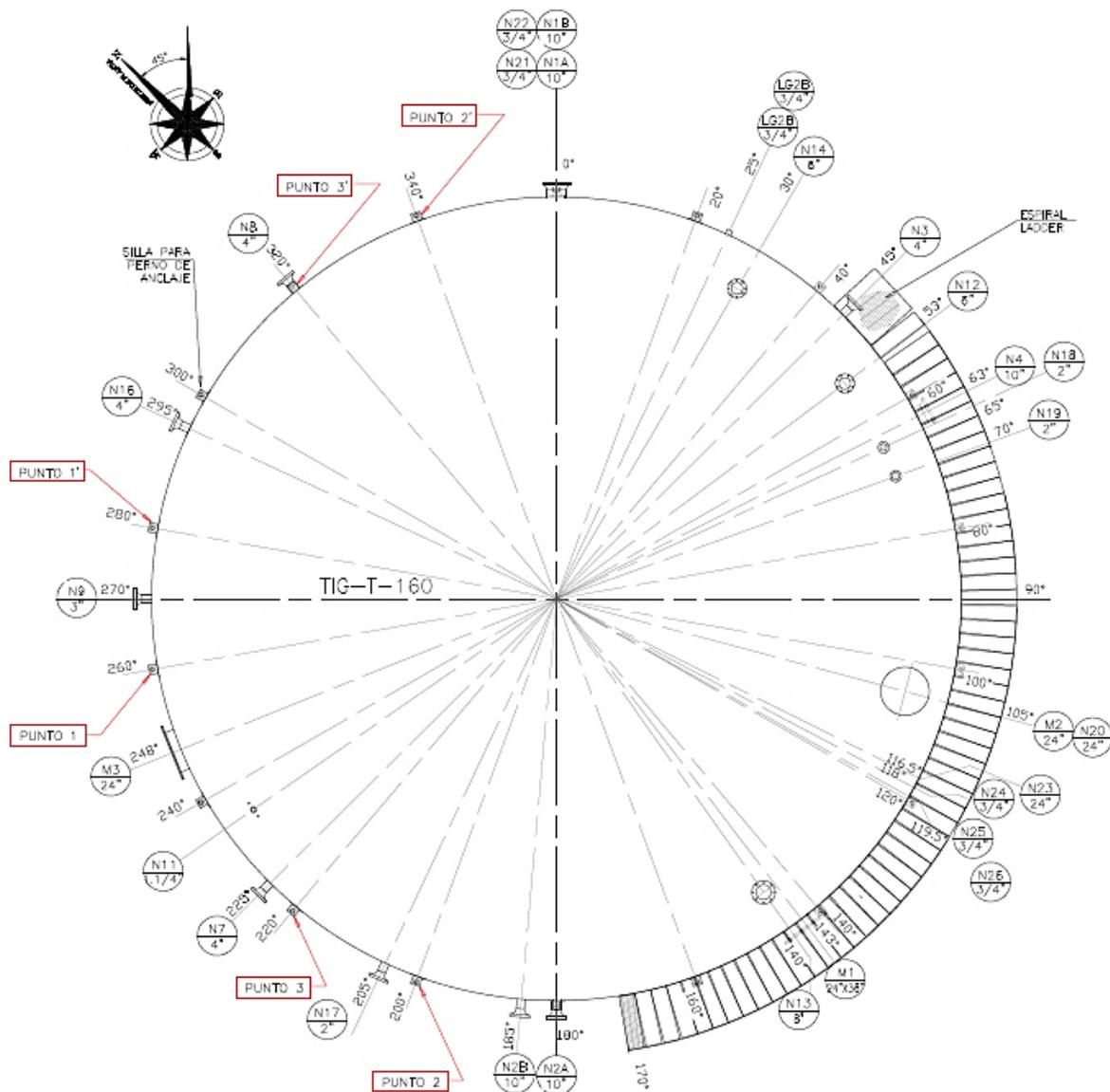


Figura 5.14 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - pernos de anclaje rotados: 15°

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

Tomando en cuenta todos los pasos calculados el esfuerzo máximo se encuentra en dos puntos simétricos respecto al eje 90^0-270^0 . Son los puntos de análisis 1 y 1' ubicados en las coordenadas $X = -5.798, Y = 1.022, Z = 0$ y $X = -5.798, Y = -1.022, Z = 0$ respectivamente.

Este esfuerzo máximo ocurre como en los casos anteriores en el paso: 23 (6.91 ms).

Tabla 5.8 Esfuerzos máximos por paso (pernos de anclaje rotados 15^0)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto
1	0.30	1.0	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 0	2
2	0.60	6.6	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 0	2
3	0.90	15.5	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 1	2
4	1.20	25.9	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 2	2
5	1.50	36.6	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 3	2
6	1.80	47.7	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 4	2
7	2.10	59.0	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 5	2
8	2.40	70.2	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 6	2
9	2.71	80.8	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 7	2
10	3.01	91.0	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 8	2
11	3.31	101.0	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 9	2
12	3.61	111.0	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 10	2
13	3.91	121.0	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 11	2
14	4.21	130.8	X = -2.014, Y = -5.533, Z = 12	2
15	4.51	141.8	X = -3.785, Y = -4.511, Z = 0	3
16	4.81	151.9	X = -3.785, Y = -4.511, Z = 0	3
17	5.11	159.6	X = -3.785, Y = -4.511, Z = 0	3
18	5.41	177.3	X = -5.799, Y = 1.022, Z = 0	1
19	5.71	199.9	X = -5.799, Y = 1.022, Z = 0	1
20	6.01	219.7	X = -5.799, Y = 1.022, Z = 0	1
21	6.31	234.9	X = -5.799, Y = 1.022, Z = 0	1
22	6.61	244.2	X = -5.799, Y = 1.022, Z = 0	1
23	6.91	248.1	X = -5.799, Y = 1.022, Z = 0	1
24	7.21	247.7	X = -5.799, Y = 1.022, Z = 0	1

Es preciso señalar que en este caso, cualquier punto con su respectivo valor de esfuerzo, tendrá un punto simétrico al eje 90^0-270^0 , que poseerá el mismo valor de esfuerzo (ver Tabla 5.8).

(iv) Análisis comparativo de resultados

En la Tabla 5.9, se muestran un resumen de los resultados para los tres casos estudiados y la diferencia porcentual respecto al caso original.

Tabla 5.9 Esfuerzos máximos por paso para pernos de anclaje rotados

Pa so	Tiempo (ms)	Modelo Original	Modelo Rotado 5°		Modelo Rotado 10°		Modelo Rotado 15°	
		Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Diferen. (%)	Esfuerzo (MPa)	Diferen. (%)	Esfuerzo (MPa)	Diferen. (%)
1	0.30	1.0	1.0	-1.87	1.0	0.00	1.0	0.58
2	0.60	6.6	6.5	-1.71	6.6	0.00	6.6	0.04
3	0.90	15.7	15.6	-0.95	15.7	0.00	15.5	-1.10
4	1.20	26.4	26.3	-0.09	26.4	0.00	25.9	-1.79
5	1.50	37.1	37.1	-0.02	37.1	0.00	36.6	-1.40
6	1.80	47.9	47.5	-0.76	47.9	0.00	47.7	-0.45
7	2.10	58.8	57.8	-1.63	58.8	0.00	59.0	0.32
8	2.40	69.7	69.5	-0.31	69.7	0.00	70.2	0.75
9	2.71	81.2	81.1	-0.06	81.2	0.00	80.8	-0.50
10	3.01	91.8	91.8	-0.07	91.8	0.00	91.0	-0.96
11	3.31	101.7	101.3	-0.38	101.7	0.00	101.0	-0.61
12	3.61	110.9	109.8	-1.01	110.9	0.00	111.0	0.05
13	3.91	121.1	120.4	-0.62	121.1	0.00	121.0	-0.07
14	4.21	132.0	132.2	0.16	132.0	0.00	130.8	-0.88
15	4.51	142.8	142.8	-0.05	142.8	0.00	141.8	-0.75
16	4.81	151.9	150.8	-0.70	151.9	0.00	151.9	-0.01
17	5.11	160.3	160.2	-0.02	160.3	0.00	159.6	-0.40
18	5.41	177.5	177.5	0.04	177.5	0.00	177.3	-0.12
19	5.71	200.9	201.2	0.17	200.9	0.00	199.9	-0.50
20	6.01	221.3	221.8	0.24	221.3	0.00	219.7	-0.72
21	6.31	236.8	237.4	0.27	236.8	0.00	234.9	-0.82
22	6.61	246.3	246.9	0.27	246.3	0.00	244.2	-0.82
23	6.91	250.0	250.6	0.25	250.0	0.00	248.1	-0.76
24	7.21	249.4	249.9	0.22	249.4	0.00	247.7	-0.68
			Promedio	-0.36	Promedio	0.00	Promedio	-0.48

Como se analizó anteriormente en todos los caso el nodo que posee el esfuerzo máximo siempre se ubica los más cercano al eje 90^0-270^0 , debido a que en esta ubicación la onda de presión incide perpendicularmente a la superficie del tanque.

Además siempre se cumple que este esfuerzo máximo ocurre durante el paso 23 a 6.91 s (tiempo modificado). Para tiempos mayores a este valor el recipiente ya no está sujeto a cargas de presión porque la onda de choque se extinguió.

Finalmente, al comparar los valores de esfuerzo máxima para los casos analizados, se concluye que no existen diferencias apreciables (Figura 5.15).

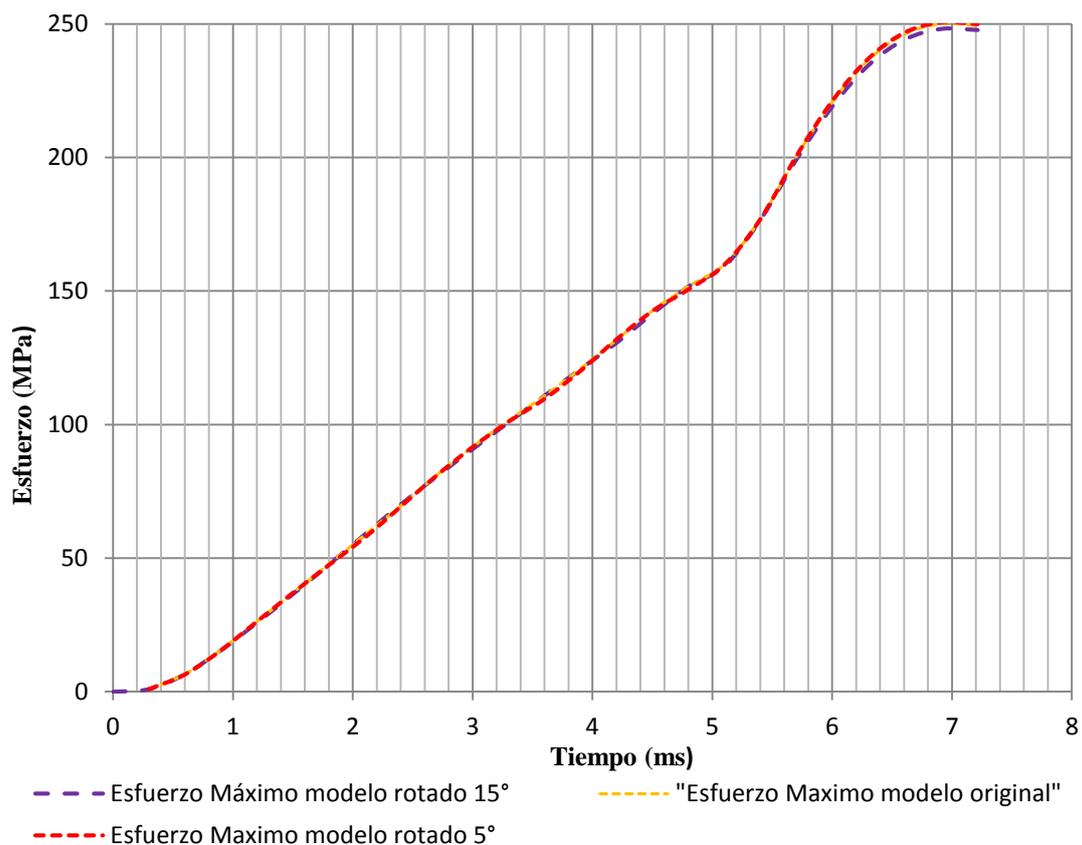


Figura 5.15 Esfuerzo máximo vs Tiempo (modelo original y modelos con pernos de anclaje rotados)

Como se observa en la Figura 5.15 la diferencia entre el modelo original y los modelos con pernos de anclajes rotados es muy pequeña, por lo que se puede decir que la posición de los pernos de anclaje no influencia en los esfuerzos obtenidos.

5.2.D. Análisis del número de pernos de anclaje

Debido a que los puntos que presentan mayores esfuerzos son aquellos donde se encuentran los pernos de anclaje del tanque, se analizará la influencia de la cantidad de la cantidad de los mismos en los esfuerzos obtenidos.

El número de pernos de anclaje del tanque se aumentará de 18 (diseño original) a 20, 24 30, 36 y 40. En la Tabla 5.10 se detallan los esfuerzos máximos obtenidos.

Tabla 5.10 Números de pernos de anclaje y esfuerzo máximo

Número de Pernos de Anclaje	Esfuerzo Máximo (MPa)	Diferencia (%)
18	250.0	0.00
20	232.8	-6.89
24	203.3	-18.68
30	169.9	-32.04
36	145.2	-41.93
40	132.8	-46.87

Gráficamente los resultados se muestran en la Figura 5.16. En ella se observa como disminuyen los esfuerzos máximos en el tanque a medida que aumenta el número de anclajes.

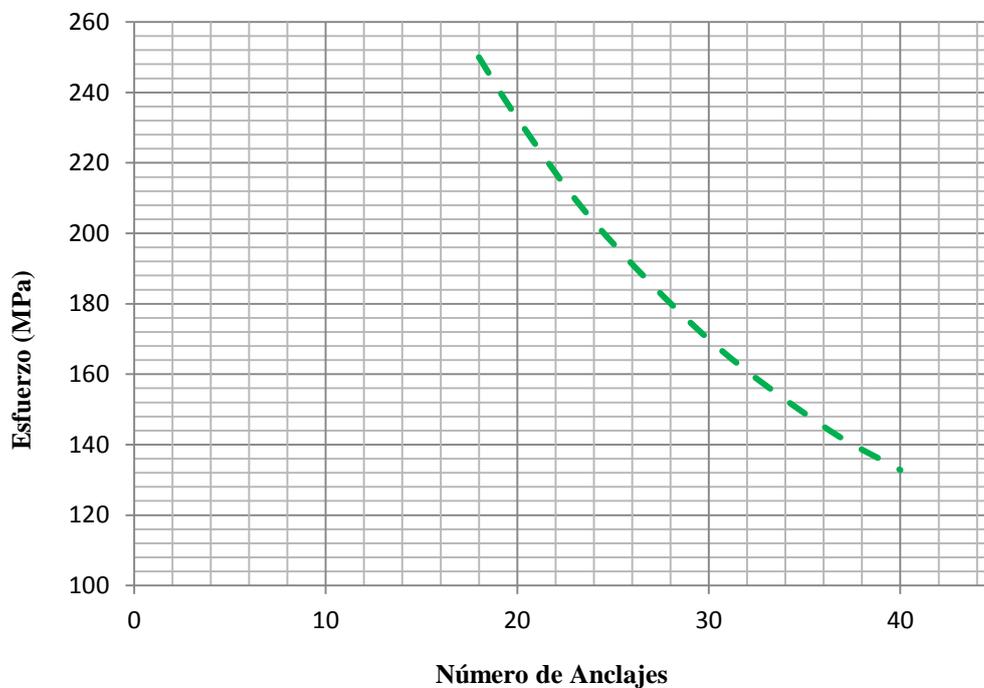


Figura 5.16 Esfuerzo Máximo vs Número de Anclajes

Los valores de esfuerzo máximo en función del tiempo para cada uno de los casos estudiados siguen trayectorias de forma similar aunque los esfuerzos son menores al aumentar el número de pernos (Figura 5.17)

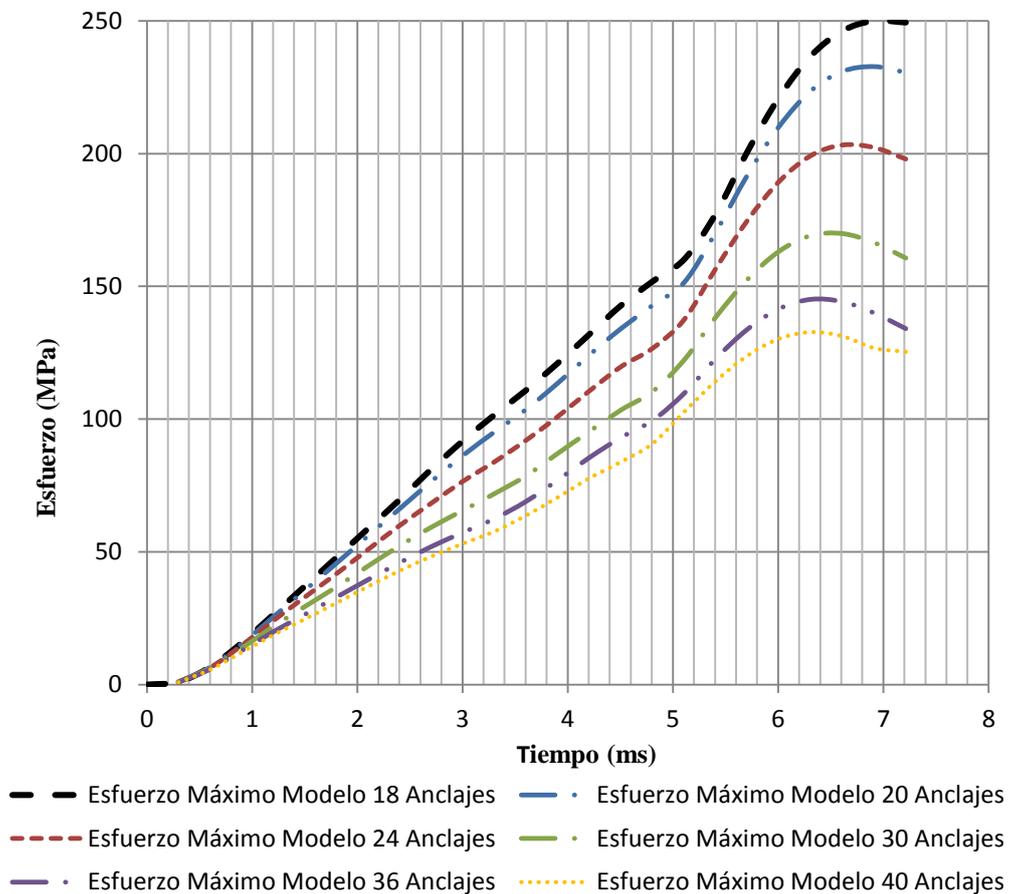


Figura 5.17 Esfuerzo Máximo vs Tiempo (diferente número de pernos de anclaje)

Además según lo mostrado en la Tabla 5.11 a medida que aumenta el número de anclajes no solo disminuye el esfuerzo máximo sino que también este aparece en tiempos más cortos. Por ejemplo el esfuerzo máximo en el modelo original es de 250 MPa y ocurre en el paso 23 a 6.91 ms, mientras que para el modelo con 40 pernos de anclaje el esfuerzo máximo es menor con un valor de 132.8 MPa y ocurre tempranamente durante el paso 21 a 6.31 ms (tiempo modificado).

Tabla 5.11 Esfuerzos máximos por paso para diferente número pernos de anclaje

Paso	Tiempo (ms)	Número de Pernos de Anclajes					
		18	20	24	30	36	40
		Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)
1	0.30	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9
2	0.60	6.6	6.6	6.4	6.1	5.8	5.7
3	0.90	15.7	15.4	14.7	13.7	12.8	12.2
4	1.20	26.4	25.5	24.0	21.8	19.9	18.7
5	1.50	37.1	35.5	33.0	29.4	26.5	24.7
6	1.80	47.9	45.7	41.8	36.8	33.0	30.8
7	2.10	58.8	56.1	50.9	44.6	39.6	37.0
8	2.40	69.7	66.3	60.0	52.3	46.0	42.9
9	2.71	81.2	76.6	68.4	59.3	52.0	48.3
10	3.01	91.8	86.3	76.6	65.6	57.4	53.2
11	3.31	101.7	95.2	84.0	71.9	62.6	57.8
12	3.61	110.9	103.7	92.1	78.7	69.1	63.8
13	3.91	121.1	113.6	101.0	87.1	77.1	70.6
14	4.21	132.0	124.2	110.7	95.4	85.6	77.8
15	4.51	142.8	134.1	119.8	103.5	93.2	84.0
16	4.81	151.9	142.9	126.8	110.5	99.6	90.9
17	5.11	160.3	151.6	137.6	122.4	109.8	102.9
18	5.41	177.5	170.5	156.9	138.5	122.9	114.5
19	5.71	200.9	192.0	175.0	152.7	134.0	124.0
20	6.01	221.3	210.3	189.6	163.3	141.7	130.4
21	6.31	236.8	223.6	199.3	169.2	145.2	132.8
22	6.61	246.3	230.9	203.3	169.9	144.3	131.3
23	6.91	250.0	232.8	202.3	166.5	140.0	126.8
24	7.21	249.4	230.5	198.0	160.7	134.2	125.4

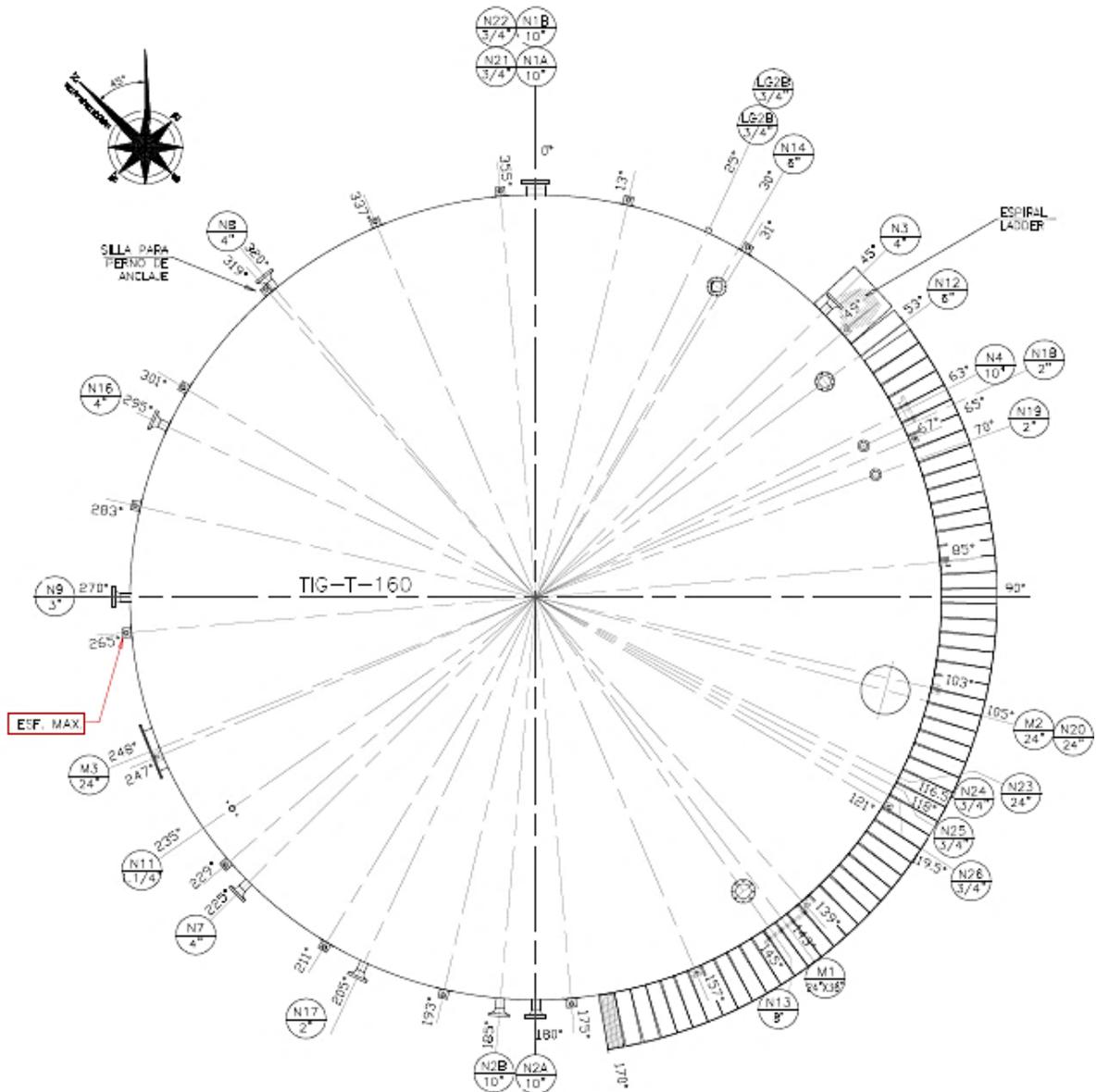


Figura 5.18 Nodo con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - 20 pernos de anclaje
 Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

En la Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20, y Figura 5.21 se indican los nodos donde se registran los mayores esfuerzos para 20, 24, 36 y 40 pernos de anclaje respectivamente.

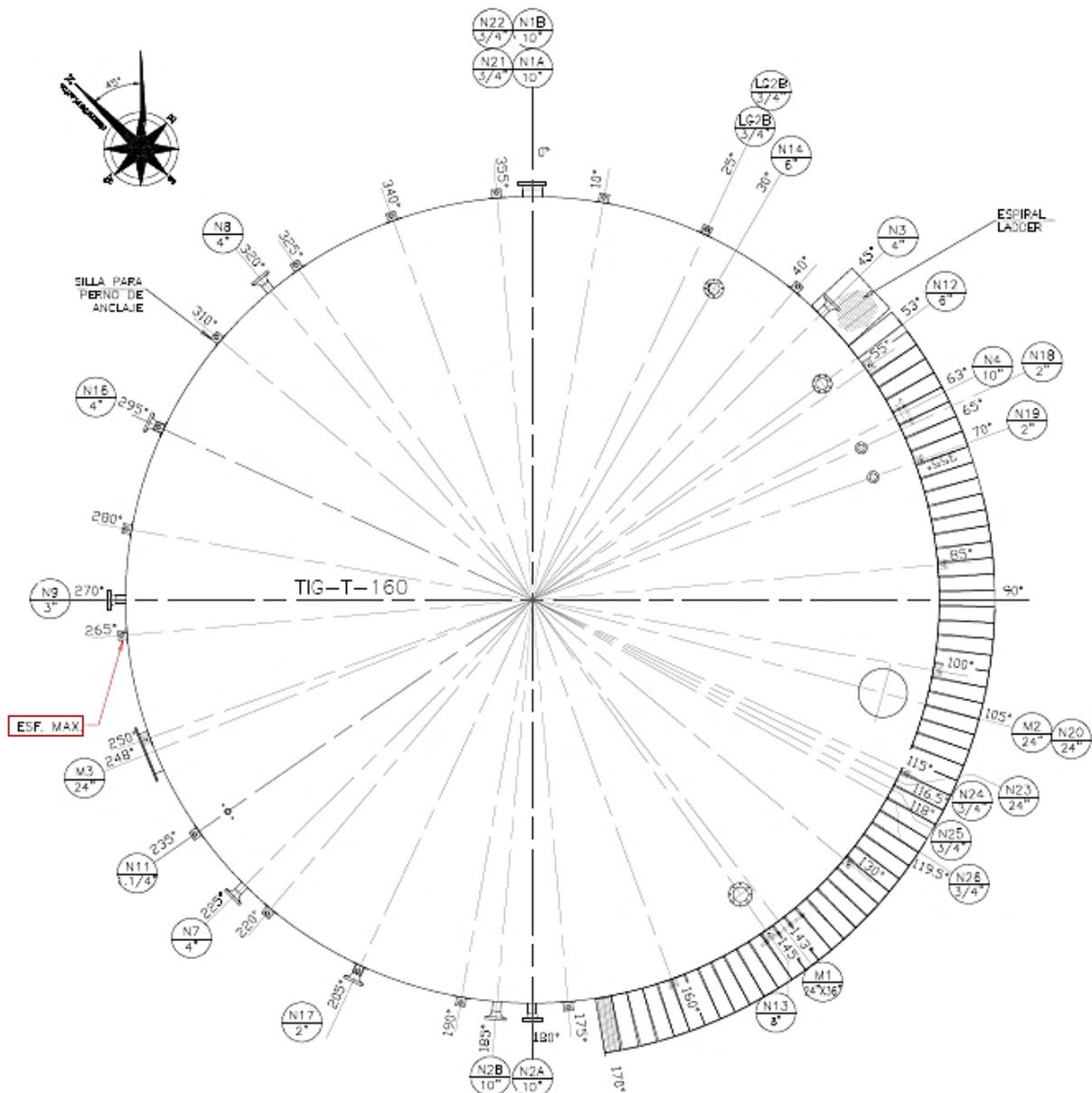


Figura 5.19 Nodo con esfuerzo máximo (punto de análisis) - 24 pernos de anclaje
 Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

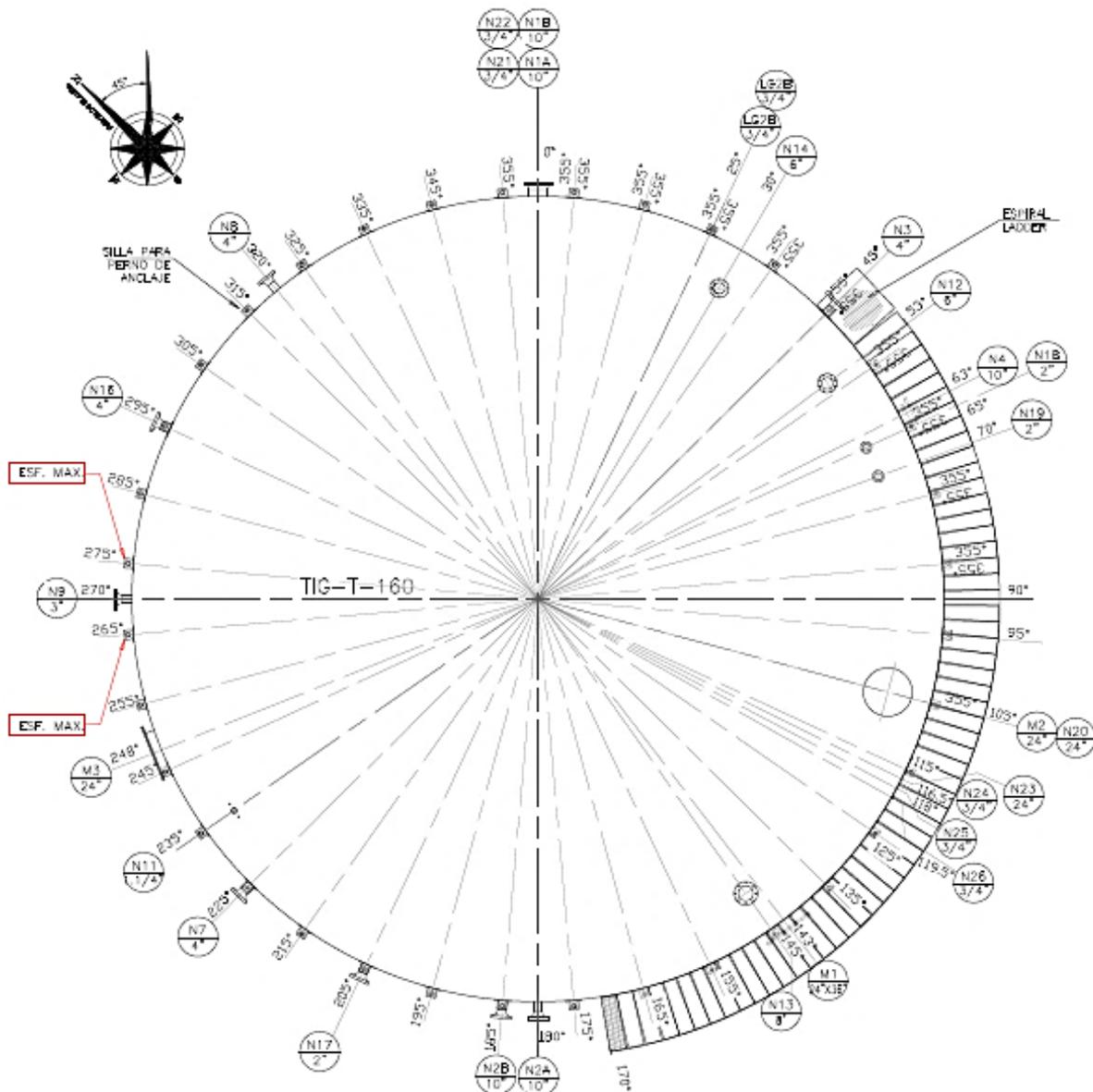


Figura 5.20 Nudo con esfuerzo máximo (puntos de análisis) -36 pernos de anclaje

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

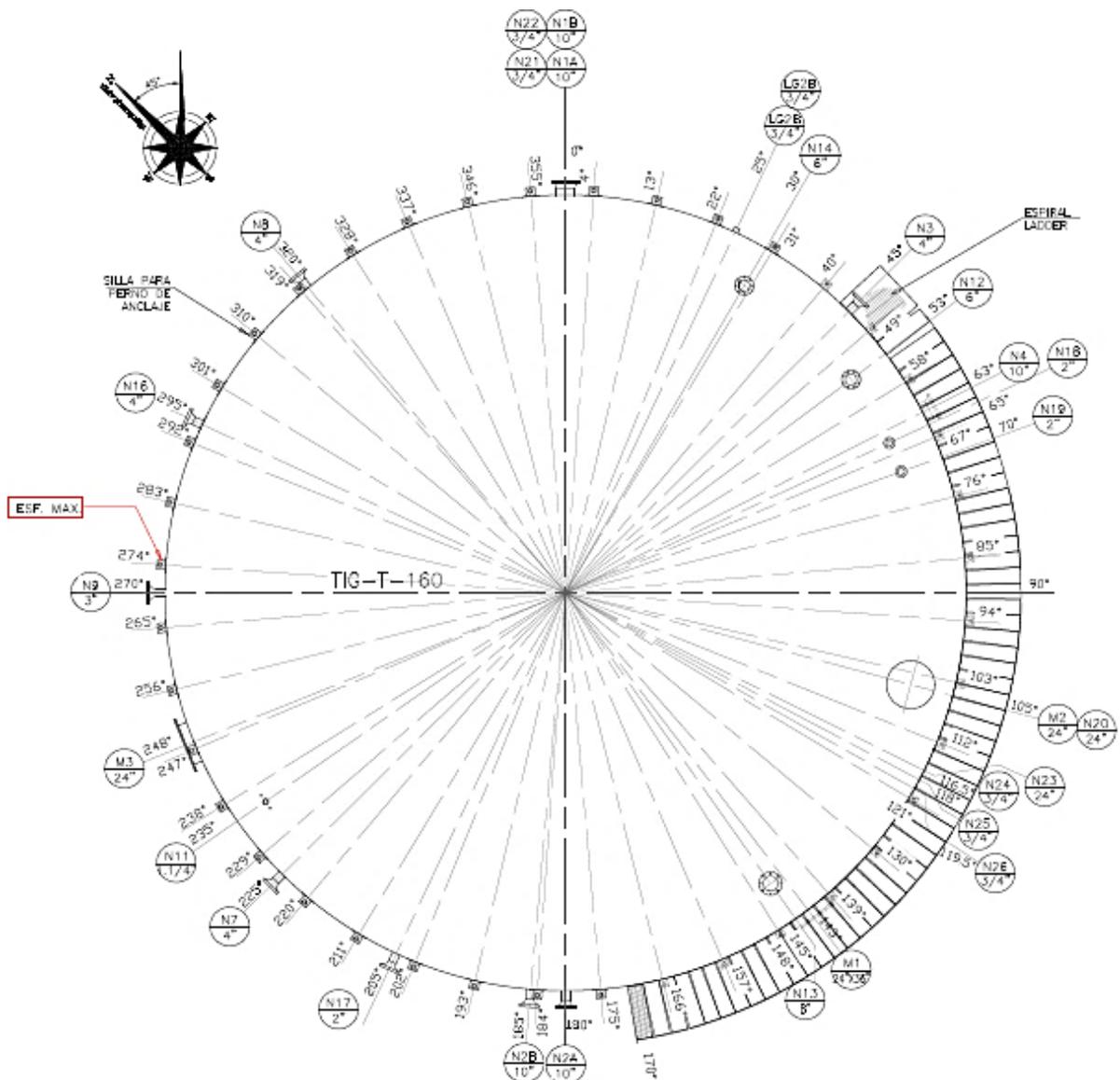


Figura 5.21 Nodo con esfuerzo máximo (puntos de análisis) - 40 pernos de anclaje

Fuente: Adaptado de plano de ingeniería básica y de detalle tanque de desnatado TIG-T- 60 (Petrobell Inc. & Grantmining S.A.)

En todos los casos el nodo que soporta el esfuerzo máximo coincide con el perno de anclaje más cercano al eje $90^\circ - 270^\circ$. Para el tanque de 30 pernos son dos los pernos que presentan el esfuerzo máximo, ya que ambos son simétricos respecto al eje $90^\circ - 270^\circ$.

5.2.E. Análisis para una masa constante de TNT equivalente

El siguiente análisis se orienta a observar la influencia de la distancia al centro de la explosión sobre los esfuerzos en el tanque. Para ello se utilizó una masa constante de 0.131 kg de TNT equivalente (masa necesaria para obtener el esfuerzo de fluencia a 10 m) y se modificó la distancia entre el tanque y el centro de la explosión entre 10m y 1000m

A continuación se presenta los resultados obtenidos en los diferentes casos (Tabla 5.12).

Tabla 5.12 Parámetros de perfil de presión tiempo y esfuerzo máximo para masa de TNT equivalente constante y diferentes distancias.

d(m)	W(kg)	Pmax(KPa)	Pmin(kPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	t_a (ms)	t_d (ms)	t_n (ms)
10	0.131	6.185	-1.777	250.0	49.01	5.96	0.71
50	0.131	0.853	-0.355	51.5	194.13	7.32	0.71
250	0.131	0.170	-0.071	14.5	777.22	10.60	0.71
350	0.131	0.122	-0.051	10.9	1068.77	11.45	0.71
575	0.131	0.074	-0.031	7.6	1724.74	12.84	0.71
750	0.131	0.057	-0.024	5.9	2234.95	13.65	0.71
850	0.131	0.050	-0.021	5.6	2526.49	14.04	0.71
1000	0.131	0.043	-0.018	4.7	2963.81	14.58	0.71

Al mantener la masa de TNT equivalente constante y variar la distancia del foco de la explosión se mantiene constante el tiempo de duración de la fase negativa t_n . En cambio la duración de la fase positiva t_d y el tiempo de arribo t_a incrementan cuando aumenta la distancia.

Por otro lado se observa que tanto la presión máxima como la presión mínima de la onda de choque disminuyen mientras aumenta la distancia. Estos dos parámetros son muy importantes y sus valores representan la atenuación de la onda a medida que aumenta la distancia.

Gráficamente en la Figura 5.23 se muestra la rápida disminución del esfuerzo máximo en el recipiente a medida que aumenta la distancia. Esto se correlaciona con el decaimiento de la onda de presión (Figura 5.22).

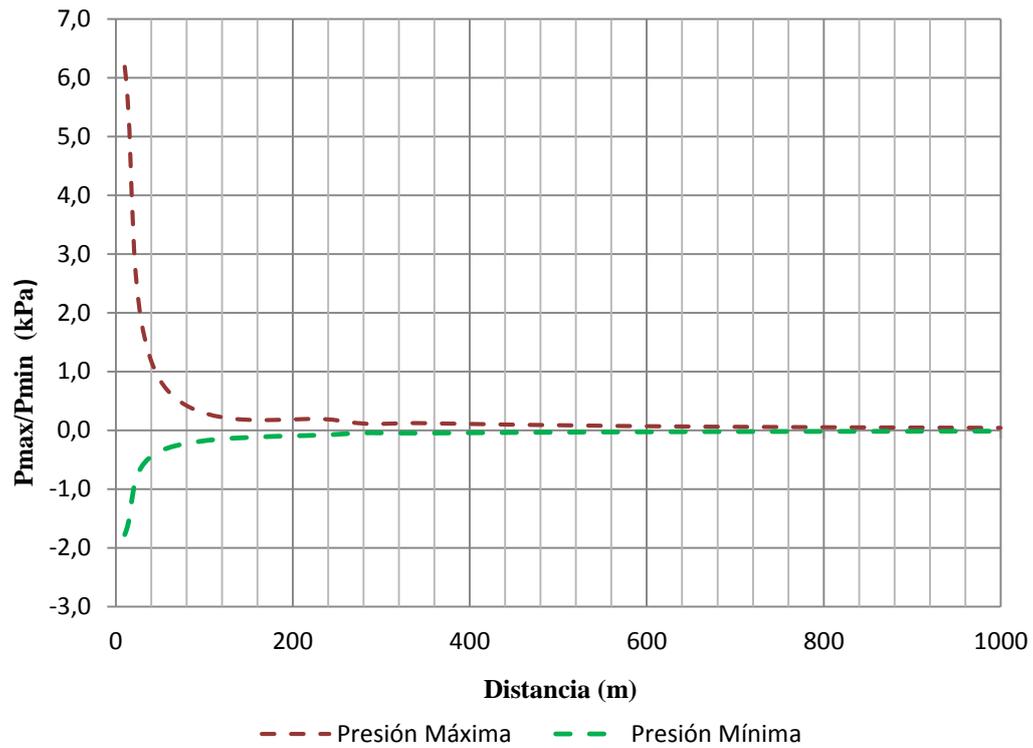


Figura 5.22 Presión Máxima y Mínima vs Distancia para masa de TNT equivalente constante

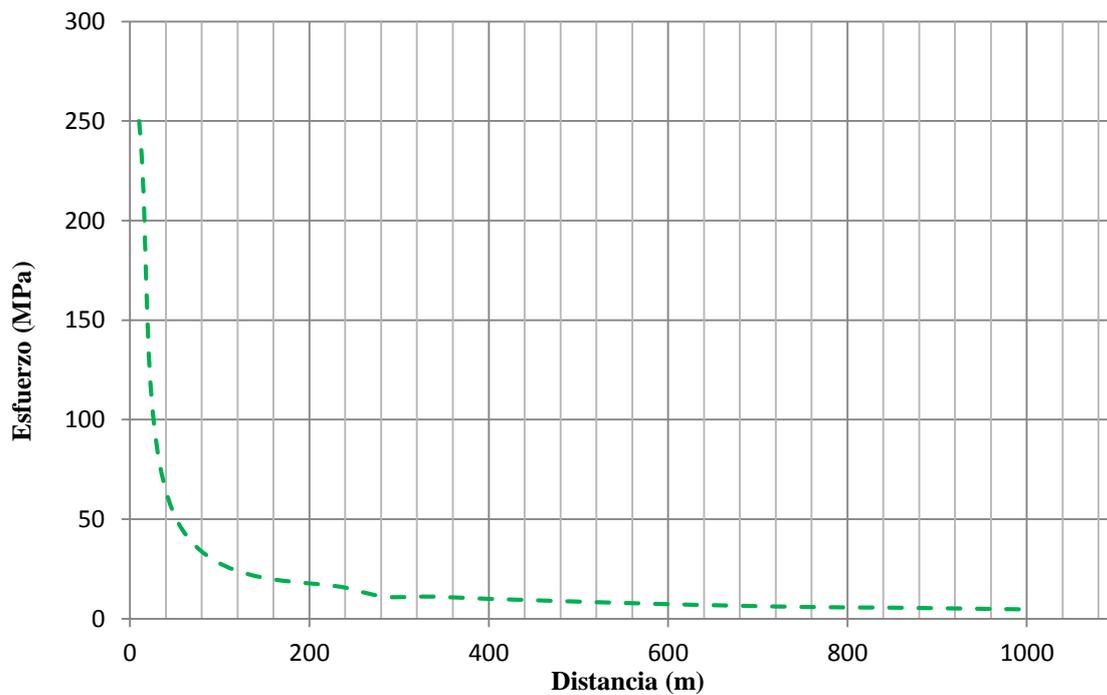


Figura 5.23 Esfuerzo Máximo vs Distancia para masa de TNT equivalente constante

Es pertinente señalar que, en todos casos, los esfuerzos máximos se presentan en los pernos de anclaje ubicados en la mitad de la superficie exterior del tanque afectados directamente por la carga dinámica de la onda de presión.

Además en los casos analizados el nodo que presenta el esfuerzo máximo es aquel que coincide con el perno de anclaje más cercano al eje 90° - 270° como se ha mostrado anteriormente. El mismo se ubica en todos los casos en las coordenadas $X=-5.866$, $Y=-0.5132$, $Z=0$.

CAPITULO 6

Análisis de Recipientes Horizontales a Presión

6. ANÁLISIS DE RECIPIENTES HORIZONTALES A PRESIÓN

El almacenamiento de importantes cantidades de sustancias inflamables en condiciones de presión superior a la atmosférica requiere de medidas de prevención y protección para evitar incidentes tales como incendios, explosiones y la generación de proyectiles. Sin embargo, como en el caso de los recipientes atmosféricos, la mayoría de los códigos y prácticas recomendadas no incluye el efecto de una deflagración entre las especificaciones de diseño de los recipientes a presión.

Actualmente el estudio de las explosiones y sus consecuencias es cada vez más necesario para para evaluar riesgos y amenazas, y desarrollar formas de proteger al ser humano y todos los bienes que puedan ser afectados.

Las consecuencias de las ondas de presión sobre una estructura dependen tanto de la intensidad y la forma de la onda de presión como de las características inherentes del objeto impactado (masa, frecuencia natural de vibración, resistencia dinámica, etc.). El equipamiento puede ser sensible a la sobrepresión estática, a la presión dinámica o a una combinación de las mismas. La forma en que impactan las ondas de choque sobre la superficie puede originar deformaciones de las superficies externas.

El caso desarrollado en este capítulo es un separador de crudo trifásico horizontal construido bajo la norma ASME Sección VIII división 1, el cual se asume vacío en el momento de ser afectado por la onda de presión de una explosión.

6.1. Modelado

El recipiente analizado es un separador trifásico de crudo, de 59 m³ de capacidad nominal. Diseñado bajo el código ASME para calderas y recipientes a presión sección VIII división 1, con presión de diseño de 5.6 kg/cm² (549.17 kPa) y una temperatura de diseño de 121 °C. El

diámetro exterior es de 3 m, con dos cabezales elíptico (relación 2:1) y un largo total de 8.07 m. Los cabezales y el cuerpo del separador están contruidos con chapa de 12 mm de espesor (Figura 6.1).

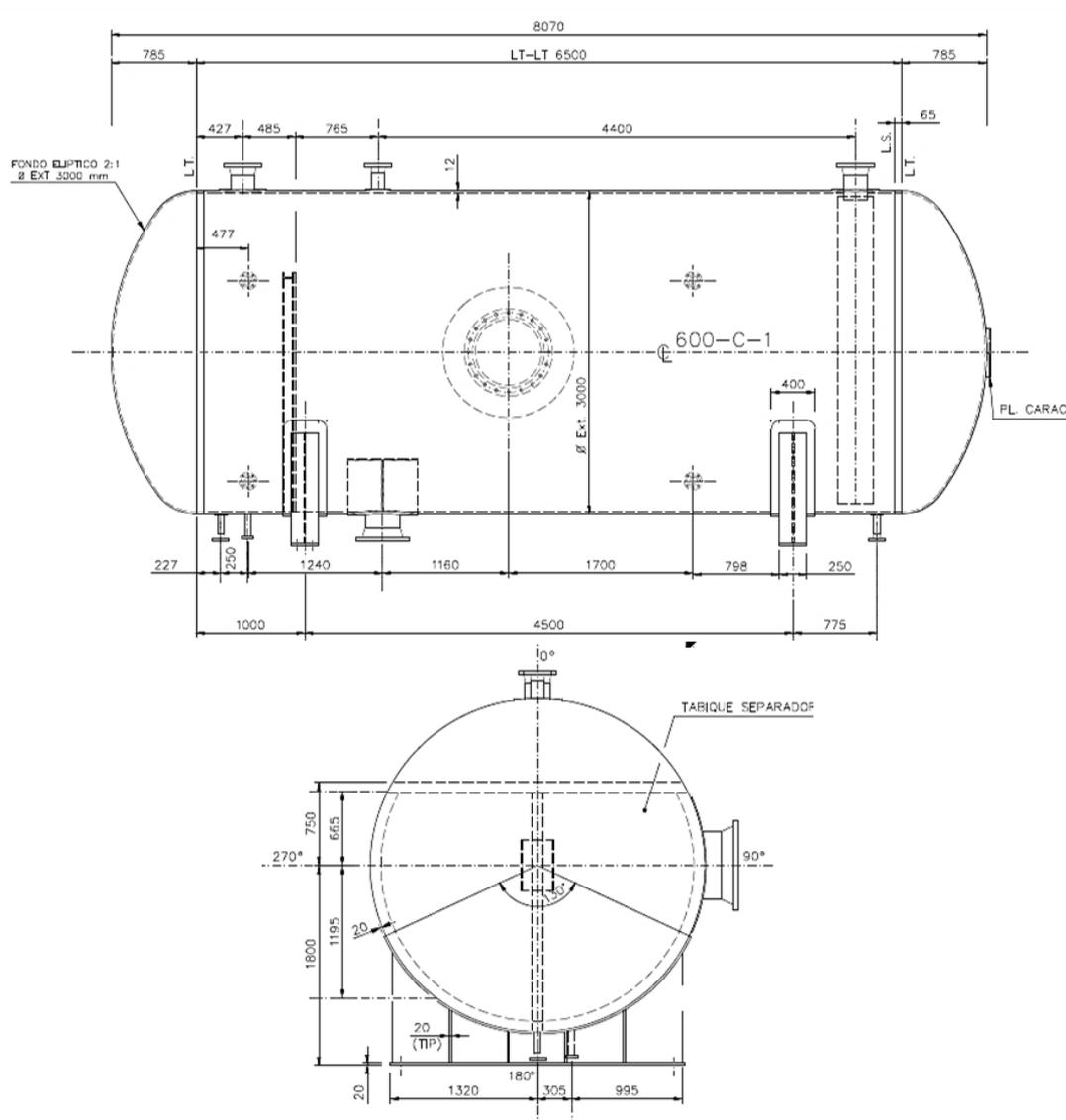


Figura 6.1 Vista lateral y frontal del separador trifasico (plano de conjunto y detalles)

Fuente: Adaptado de plano recipiente 600-C-1 (plano: UZ-TF-B-600-C-1)⁴

El recipiente que se muestra en la Figura 6.1, está soportado por dos silletas (cunas) que tienen un ángulo de contacto de 130° . Posee diferentes bocas que se encuentran ubicadas y especificadas según el plano de construcción. De estas bocas la más grande es la entrada de hombre (“manhole”) con un diámetro de 24”, espesor de cuello de la boca de 13 mm con

⁴ Dimensiones en mm

brida tipo WN, (“welding neck”), clase ANSI #150. La misma presenta un refuerzo de 12 mm de espesor y 1.21 m de diámetro alrededor de la boca dispuestos según los lineamientos del código ASME para calderas y recipientes a presión sección VIII div 1.

En el ANEXO C e brinda más información sobre el diseño original del recipiente a presión: dimensiones y detalles de construcción referirse al plano UZ-TF-B-600-C-1, que incluye conjunto y detalles.

6.1.A. Tipo de Elementos

El análisis se lleva a cabo por medio del software Autodesk Simulation Multiphysics utilizando la herramienta “PV / Designer” que permite realizar simulaciones con el método de elementos finitos exclusivamente para recipientes a presión. El recipiente se modeló de manera simplificada omitiendo todas las bocas a excepción de la entrada de hombre. La envolvente (cuerpo), los cabezales y la entrada de hombre (cuello, brida y refuerzo) fueron modelados por medio de elementos placa con los espesores y materiales establecidos en el diseño original. Además se omitió modelar las silletas que soportan el recipiente a presión, en su lugar se dispuso condiciones de contorno que simulen el efecto de éstas.

La Tabla 6.1 muestra los espesores y los materiales utilizados en la simulación para modelar los cabezales, la envolvente y la entrada de hombre.

Tabla 6.1 Materiales y espesores para elementos placa

DESCRIPCION		MATERIAL	ESPESOR (mm)
Cabezales	Cabezal #1	ASTM A516 Gr 70	12
	Cabezal #2	ASTM A516 Gr 70	12
Envolvente		ASTM A516 Gr 70	6.35
Entrada de Hombre	Refuerzo	ASTM A516 Gr 70	12
	Cuello	ASTM A516 Gr 70	13
	Brida	ASTM A105	47.6

Como se mencionó anteriormente los elementos de placa utilizados son elementos de tres o cuatro nodos, formulados en el espacio tridimensional, con 5 grados de libertad (exceptuando el momento alrededor del eje normal a la cara del elemento).

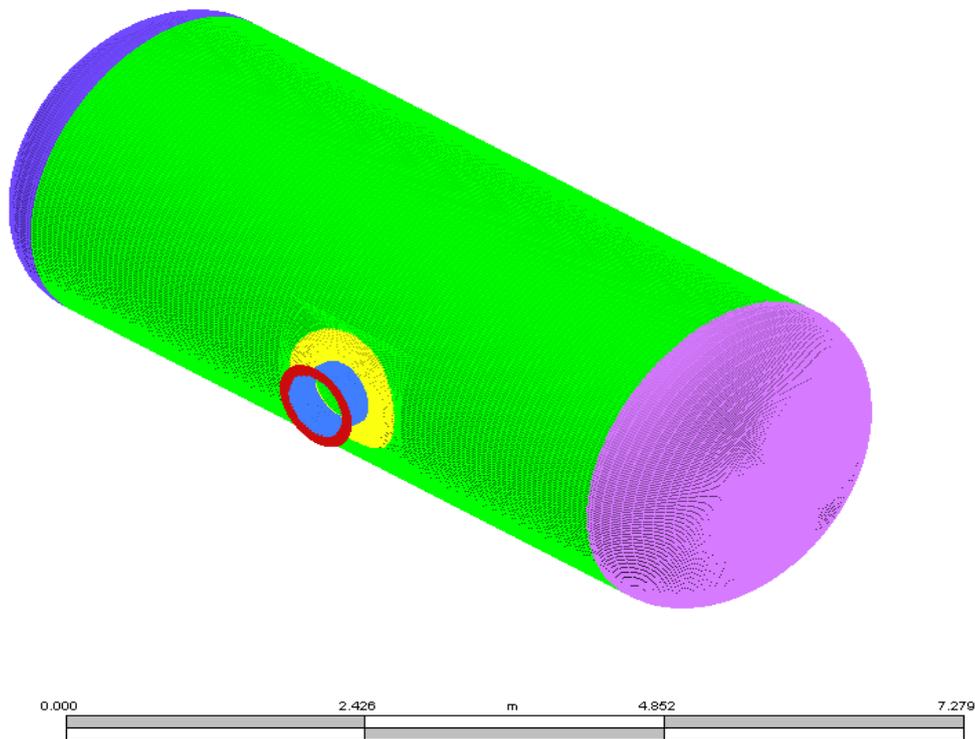


Figura 6.2 Vista isométrica de modelo de recipiente a presión (Autodesk Simulation Multiphysics)

El elemento placa es compatible con fuerzas nodales, momentos nodales (excepto cuando giran alrededor del eje normal a la cara del elemento), presiones (normal a la cara del elemento), cargas superficiales de tracción/compresión, aceleración/gravedad, fuerzas centrífugas y cargas térmicas.

En la Figura 6.2 se muestra una vista isométrica del modelo generado por el software, donde se puede apreciar la envolvente, los cabezales, el refuerzo, el cuello de la entrada de hombre y la brida de la misma.

6.1.B. Materiales

El material utilizado en casi la totalidad del recipiente a presión es acero al carbono ASTM-A516 grado 70, a excepción de la brida que forma parte de la entrada de hombre, que fue modelada con acero al carbono forjado ASTM-A105 (Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Propiedades de materiales utilizados

Material	Densidad (kg/m ³)	Módulo Elasticidad E (MPa)	Relación de Poisson	Esfuerzo de Fluencia (MPa)
ASTM-A516 Gr. 70	7850	200.0	0.290	260.00
ASTM-A105.	7750	201.0	0.30	250.0

6.1.C. Condiciones de contorno

El recipiente a presión esta soportado por dos silletas (cunas) ubicados como indica la Figura 6.1. Estas silletas impiden que el tanque se desplace, y están diseñados según lo establecido por el código ASME sección VIII div 1.

En los nodos coincidentes con la ubicación de las silletas (cunas) se colocaron restricciones tipo empotramiento (restringe los 6 grados de libertad) para simular el efecto de las silletas en el recipiente a presión.

6.1.D. Carga y perfil de onda de presión

Con la finalidad de modelar una explosión y su correspondiente onda de presión, se ha considerado que el modelo está sujeto a una carga dinámica, que trabaja sobre la mitad de la superficie exterior del recipiente a presión. La Figura 6.3 muestra el modelo del recipiente a presión elaborado en Autodesk Simulation Multiphysics y el área donde actúa la carga dinámica (mitad de la superficie exterior).

Esta carga dinámica trabaja según el perfil de presión- tiempo, planteado por Larcher (2008) cuyas ecuaciones se detallan en las secciones 3.4 a 3.6.

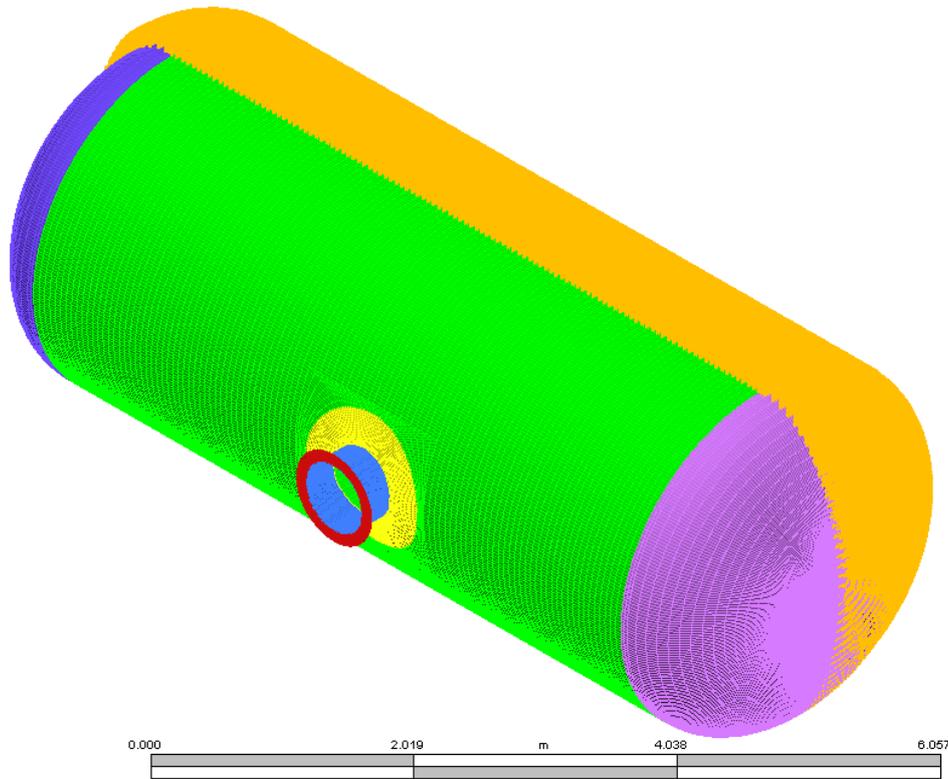


Figura 6.3 Modelo de recipiente a presión y área de carga (Autodesk Simulation Multiphysics)

6.1.E. Tipo de análisis

Como se mencionó anteriormente el método de elementos finitos implementado en Autodesk Simulation Multiphysics utiliza dos procedimientos para la resolución de problemas dinámicos: el método de superposición y el método de integración directa. De estas dos opciones se seleccionó el método de integración directa porque se ajusta mejor a estructuras sometidas a cargas de impacto u ondas de choque.

6.1.F. Validación del mallado del modelo

La validación del mallado del modelo se realizó variando el número de elementos y observando en un punto arbitrario el esfuerzo de Von Mises obtenido, frente a una carga de estática de compresión de 5 kPa perpendicular al eje axial del modelo, ejercida sobre la mitad del recipiente a presión. Ver Figura 6.4 y Figura 6.5.

El punto arbitrario seleccionado fue el nodo ubicado a 90° del eje horizontal sobre la unión entre el cuerpo y la tapa elíptica. Los resultados arrojaron que, a partir de un mallado de alrededor de 57000 nodos el esfuerzo de Von Mises se estabiliza en un valor cercano a 3,13MPa.

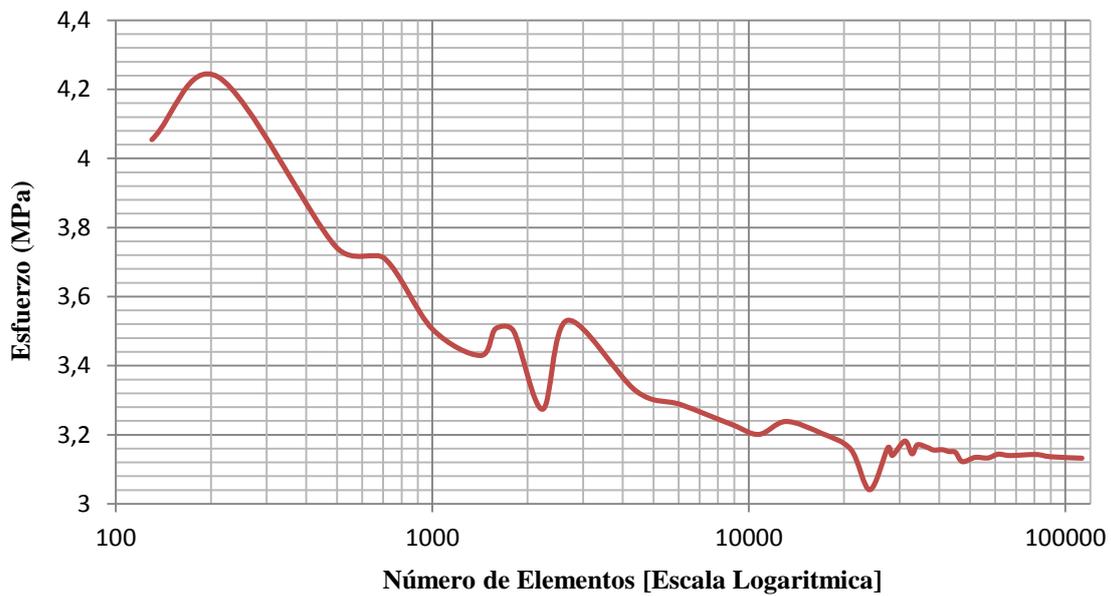


Figura 6.4 Esfuerzo vs Número de Elementos

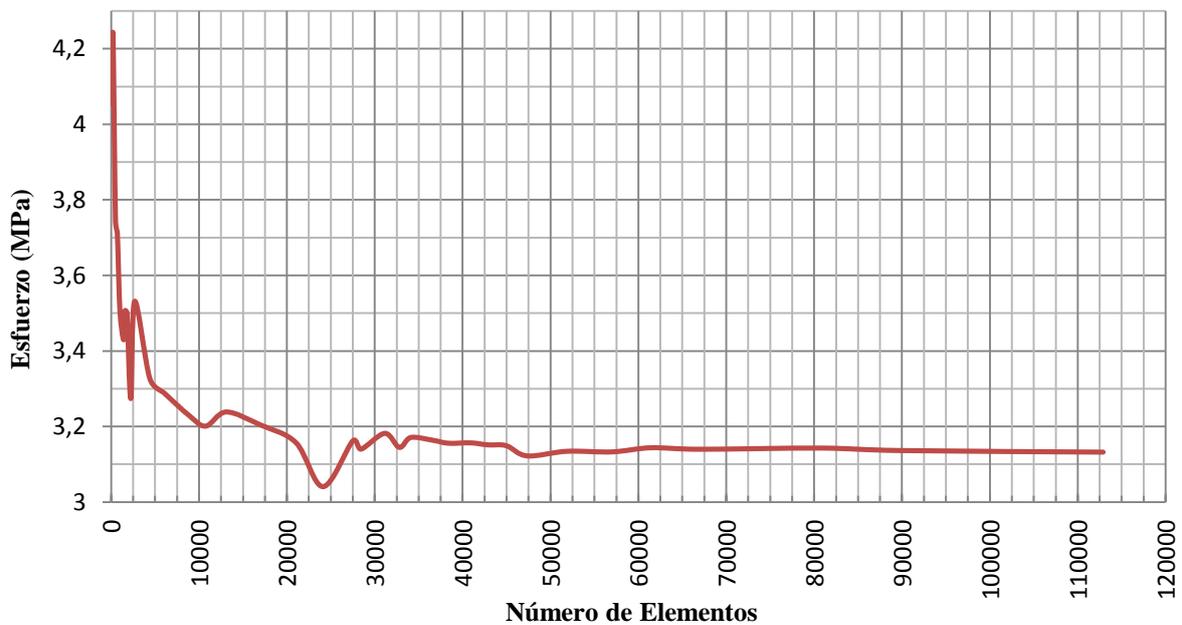


Figura 6.5 Esfuerzo vs Número de Elementos

De acuerdo a los resultados se escogió un modelo específico con 63597 elementos, para realizar los análisis propuestos.

6.2. Análisis del modelo propuesto

En base al modelo propuesto se desarrollaron diferentes tipos de análisis utilizando las herramientas del software Autodesk Simulation Multiphysics.

6.2.A. Análisis de frecuencia natural

Antes de realizar el análisis de esfuerzos se obtuvieron las frecuencias naturales de los diferentes modos de vibración del recipiente a presión, con la finalidad de definir la naturaleza de la carga aplicada (dinámica, cuasi-estática o de impacto) según los criterios establecidos anteriormente.

La Tabla 6.3 presenta los resultados obtenidos con Autodesk Simulation Multiphysics.

Tabla 6.3 Frecuencia natural y periodo natural

Modo	Frecuencia Natural		Periodo Natural
	ω (cycle/s)	ω (Hz)	T (ms)
1	19.5679	122.9487	8.133
2	26.7844	168.2913	5.942
3	27.9257	175.4623	5.699
4	34.4686	216.5726	4.617
5	36.8253	231.3802	4.322

Como se vio en el capítulo 5, la relación entre el tiempo de duración de la fase positiva y el periodo natural debe ser menor o cercana a 0.5, para considerar a una carga como carga de impacto. Observando el valor obtenido para el primer nodo de vibración se concluye que la máxima duración de la carga t_d para que la carga sea considerada de impacto tendrá un valor aproximado 4.07 ms.

6.2.B. Análisis esfuerzo de fluencia

(i) Determinación de la onda de presión

Luego de definir el modelo y sus frecuencias naturales. Por medio del método de la secante, se somete de manera sucesiva al modelo a distintas cargas dinámicas (basada en el perfil de onda de choque asumiendo en todos los casos una distancia al foco de explosión constante de 10 m) hasta obtener como esfuerzo máximo un valor cercano al esfuerzo de fluencia del material (260 MPa).

Se encontró que para un esfuerzo máximo igual a 260 MPa, se necesita una masa de explosivo de 19.91 kg. Para esta condición se presenta un perfil de la onda de choque definido por los siguientes parámetros

Tabla 6.4 Parámetros de perfil de onda de presión

W	19.906	kg		
Z	3.690	m/kg ^{1/3}		
P_{max}	P_{min}	t_a	t_d	t_n
kPa(g)	kPa(g)	ms	ms	ms
75.880	-9.485	5.058	3.722	3.767

La Tabla 6.4 presenta las presiones manométricas máxima y mínima, y los parámetros del perfil de la onda de presión que fueron calculados según lo establecido en la sección 3.6

Además se corrobora que la carga establecida (perfil presión tiempo) es una carga de impacto porque el tiempo de duración de la fase positiva t_d es 3.72 ms, menor a la máxima duración de la carga 4.07 ms. El perfil de la onda de choque obtenida se presenta en la Figura 6.6.

Como en el capítulo anterior, se modifica la curva disminuyendo el valor del tiempo de arribo t_a de 5.06 ms a un tiempo de arribo t_a de 0.28 ms (Figura 6.7), para reducir el tiempo de cómputo requerido.

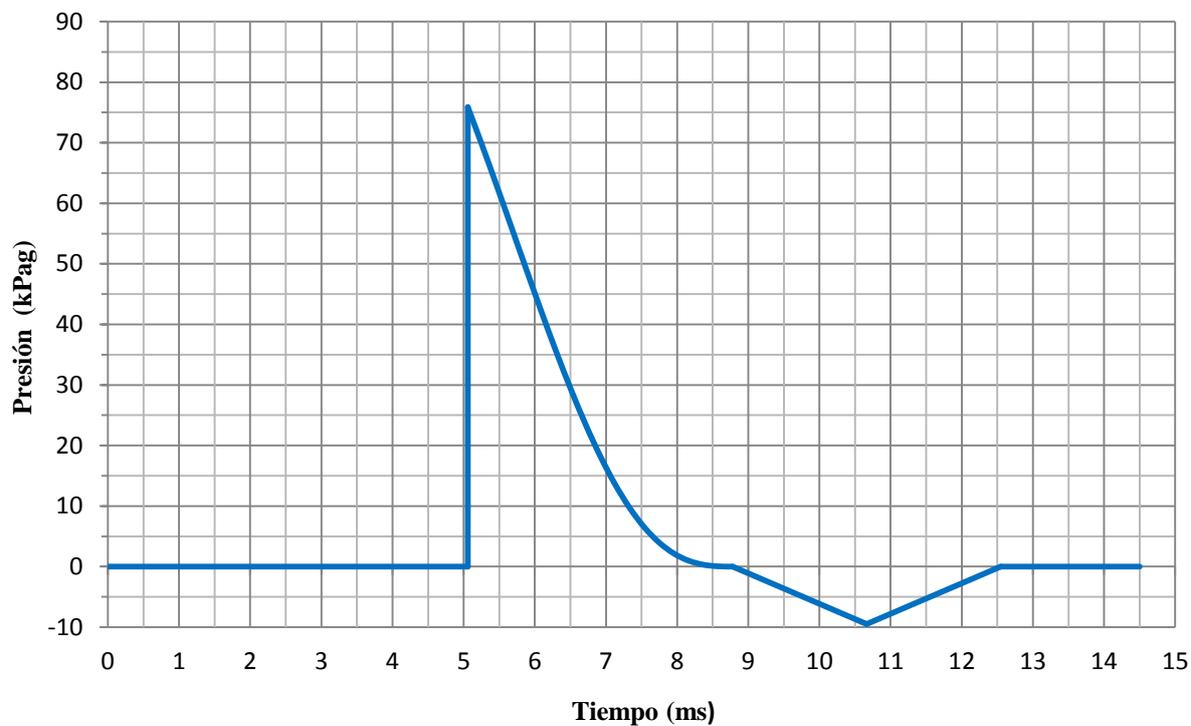


Figura 6.6 Perfil de Presión vs. Tiempo (original)

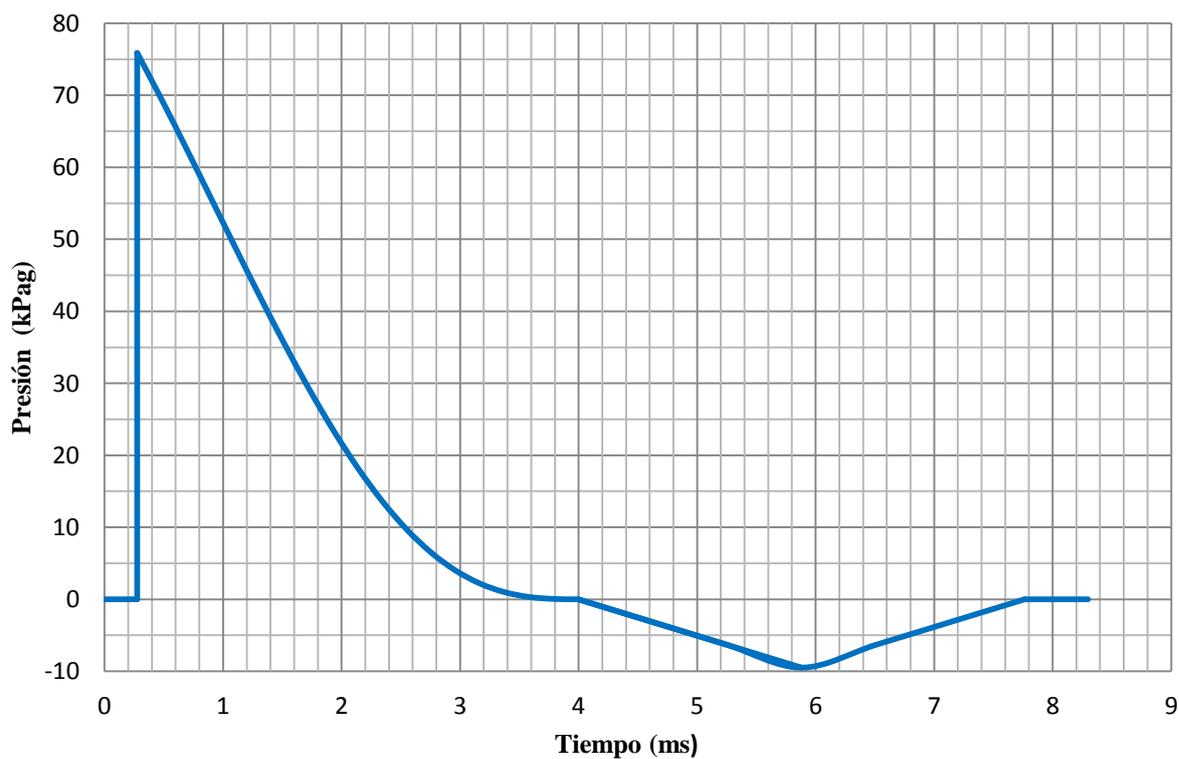


Figura 6.7 Perfil de Presión vs Tiempo (modificado)

(ii) Esfuerzos máximos

Aplicando este perfil presión-tiempo modificado como carga, se identificó que los nodos que tienen mayor esfuerzo son aquellos ubicados junto a las silletas donde se soporta el recipiente presión.

Los nodos con los esfuerzos máximos que se encontraron en cada paso (“time steps”) son los que se indican en la Tabla 6.5. Además se indican las coordenadas donde se encuentra ubicado el nodo y un nombre arbitrario para el punto de análisis.

Tabla 6.5 Esfuerzos máximos

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
1	0.53	11.4	X = -0.849, Y = 0.0875, Z = -0.002	5
2	0.80	46.8	X = -0.849, Y = 0.0875, Z = -0.002	5
3	1.07	24.2	X = -0.849, Y = 0.0875, Z = -0.002	5
4	1.34	37.9	X = -0.849, Y = 0.0875, Z = -0.002	5
5	1.60	25.6	X = 1.042, Y = -1.370, Z = -0.610	6
6	1.87	26.2	X = 0.695, Y = -0.337, Z = -1.462	7
7	2.14	30.6	X = 0.811, Y = 1.360, Z = -0.634	8
8	2.41	43.4	X = 1.042, Y = -1.370, Z = -0.610	6
9	2.67	62.8	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
10	2.94	84.1	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
11	3.21	105.5	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
12	3.48	126.7	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
13	3.74	148.0	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
14	4.01	169.6	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
15	4.28	190.3	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
16	4.55	207.3	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
17	4.81	218.4	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
18	5.08	222.4	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
19	5.35	220.0	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
20	5.62	213.6	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
21	5.88	206.7	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
22	6.15	202.8	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
23	6.42	203.6	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
24	6.69	207.2	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
25	6.95	211.4	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
26	7.22	214.0	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
27	7.49	213.7	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
28	7.75	210.4	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3

Tabla 6.5 Esfuerzos máximos (continuación)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
29	8.02	204.8	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
30	8.29	198.4	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
31	8.56	195.5	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
32	8.82	208.6	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
33	9.09	221.2	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
34	9.36	232.2	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
35	9.63	240.8	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
36	9.89	246.6	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
37	10.16	249.9	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
38	10.43	251.3	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
39	10.70	252.0	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
40	10.96	255.4	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
41	11.23	258.4	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
42	11.50	260.0	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
43	11.77	259.8	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
44	12.03	257.7	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
46	12.30	254.5	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
47	12.57	251.4	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
48	12.84	249.1	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
49	13.10	248.1	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
50	13.37	248.1	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
51	13.64	248.5	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
52	13.90	249.0	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
53	14.17	249.1	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
54	14.44	248.8	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
55	14.71	248.0	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
56	14.97	246.2	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
57	15.24	242.5	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
58	15.51	237.7	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
59	15.78	230.0	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
60	16.04	219.4	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2

El esfuerzo máximo calculado tiene una magnitud de 260 MPa (cercano al esfuerzo de fluencia), se encuentra en el punto de análisis 1, de coordenadas: X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610 y ocurre durante el paso 42, a 11.50 ms (tiempo modificado).

En la Figura 6.8, Figura 6.9 y Figura 6.10 se indica el recipiente a presión estudiado y la ubicación de los nodos que presentan los esfuerzos máximos, identificados con el nombre arbitrario que se les designó en la Tabla 6.5.

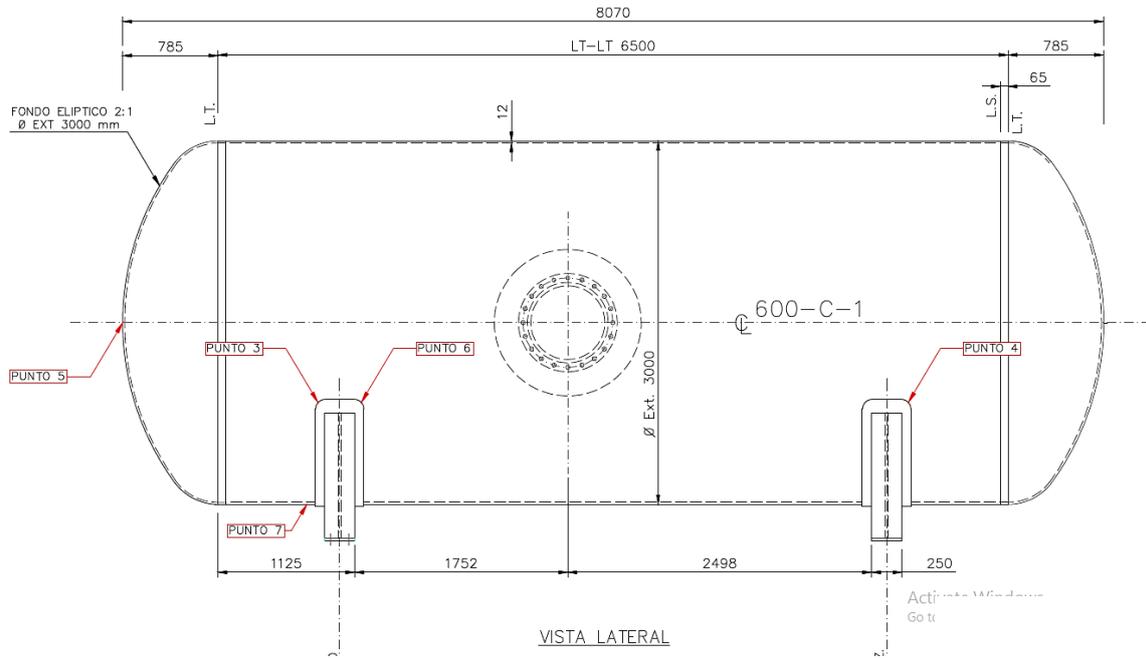


Figura 6.8 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista lateral

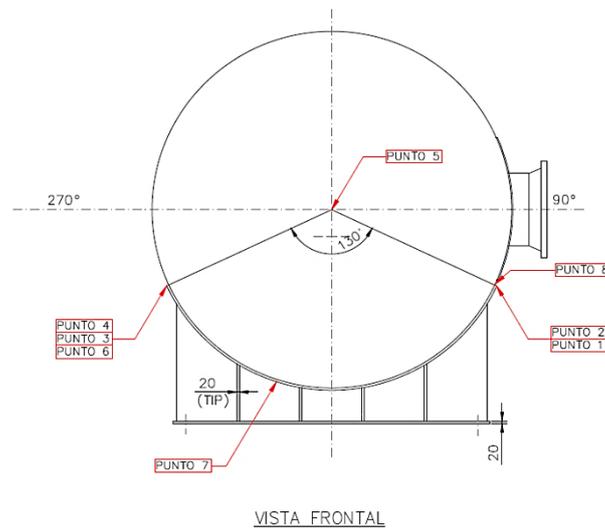


Figura 6.9 Nodos con Esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal

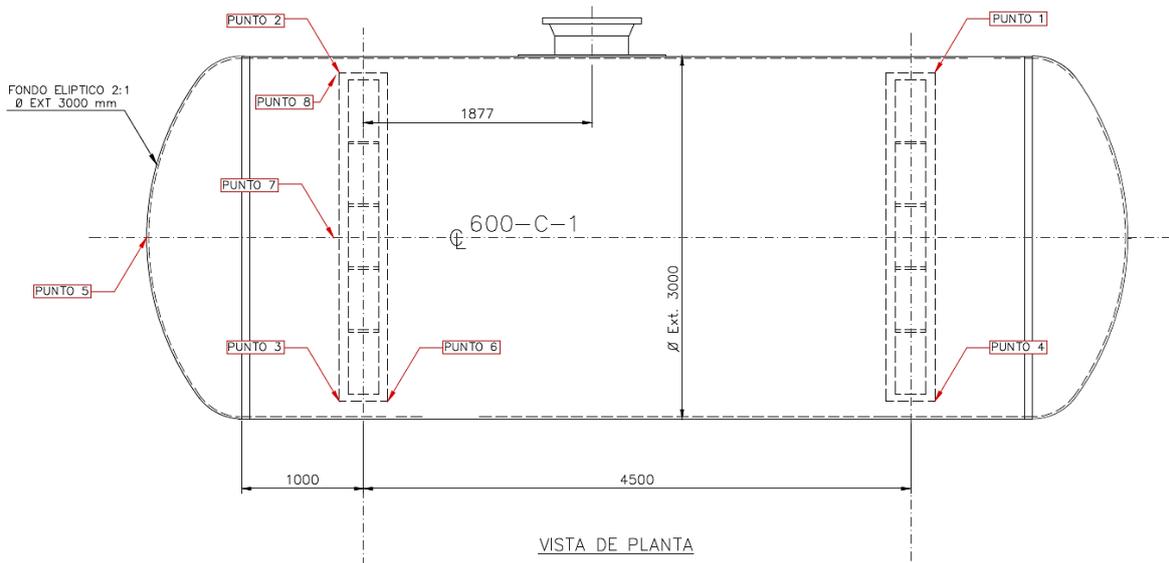


Figura 6.10 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista de planta

Como se muestra en la tabla y las figuras anteriores los puntos que más se repiten a lo largo del análisis son los puntos 1, 2, 3 y 4 relacionados con las silletas que soportan al recipiente a presión. También aparece el punto 5 que se encuentra en uno de los cabezales del recipiente.

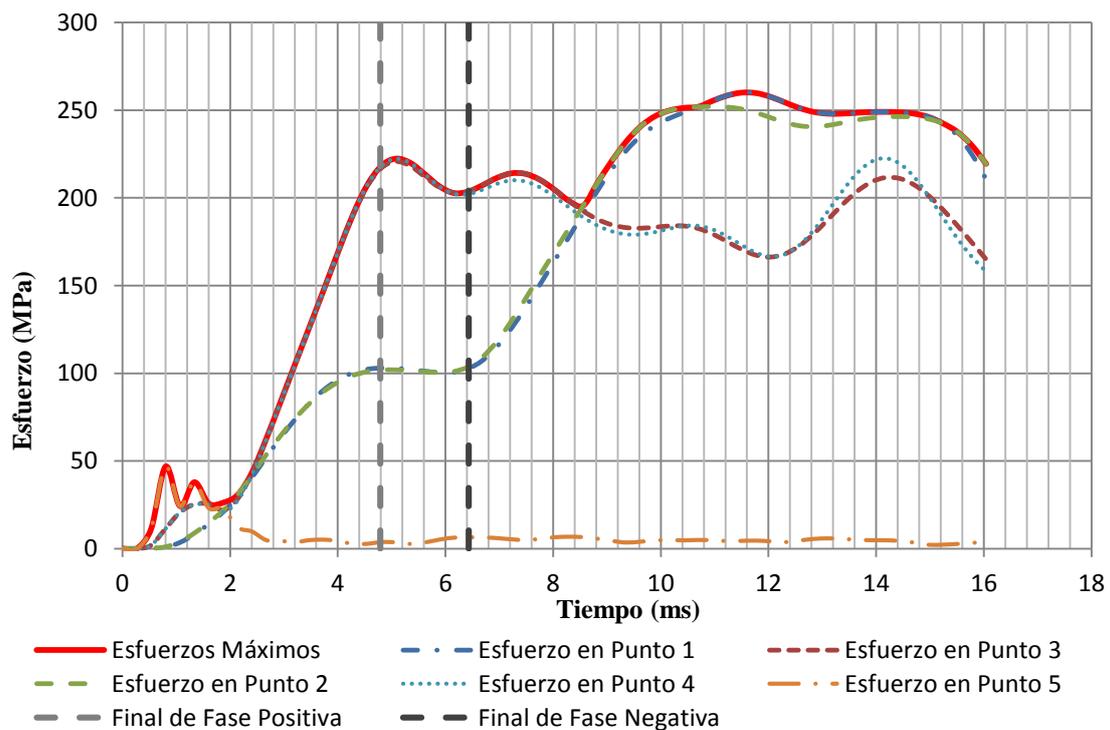


Figura 6.11 Esfuerzo vs Tiempo para puntos de análisis

La Figura 6.11 presenta los esfuerzos en los puntos de análisis más importantes a través del tiempo. Como referencia constan también los tiempos en los que finaliza la fase positiva y la fase negativa del perfil de presiones aplicado.

Al observar la Figura 6.11 se pueden notar 4 etapas a lo largo del tiempo analizado. Inicialmente los esfuerzos máximos se ubican en los cabezales (Figura 6.12) principalmente en el punto de análisis 5. Esto ocurre hasta alrededor paso 4 (1.34 ms). Este comportamiento se debe a que la sobre presión trata de liberarse y recurre al camino más corto que son los extremos del recipiente donde se concentran los esfuerzo sobre los cabezales.

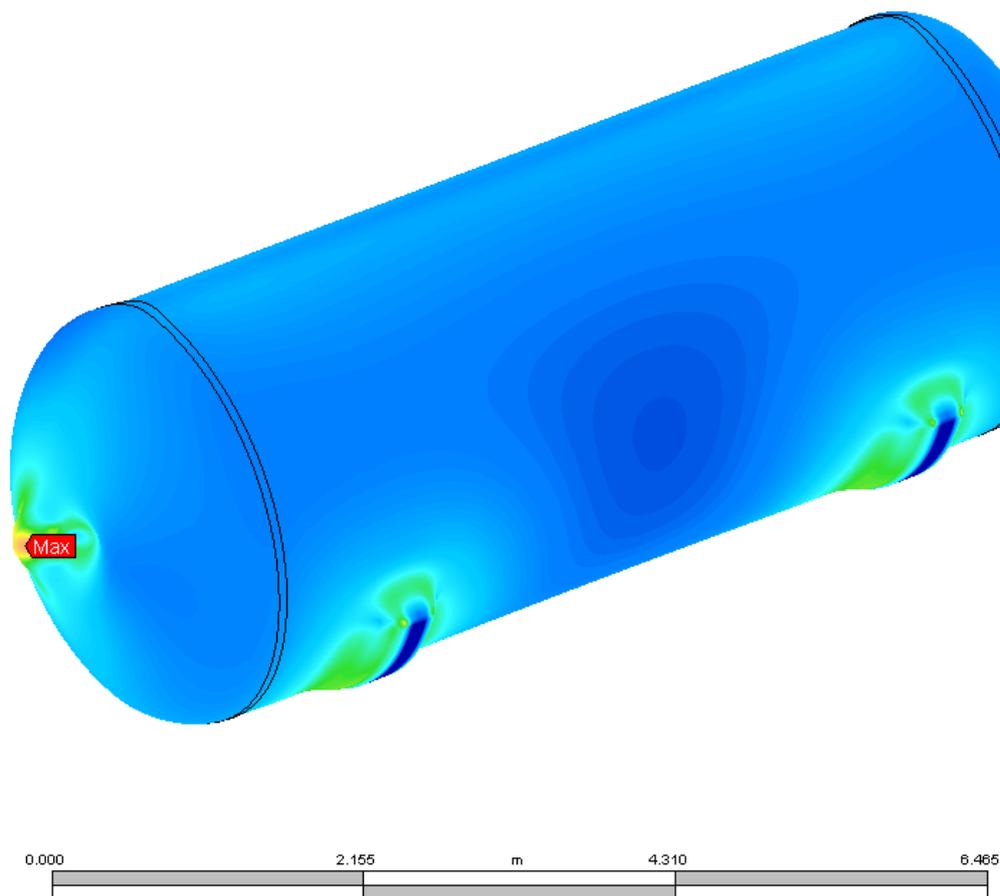


Figura 6.12 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 5)

Posteriormente el recipiente sufre una breve fase de transición, desde el paso 6 al paso 9 (de 1.65 ms a 2.48 ms), donde los esfuerzos máximos varían entre puntos cercanos a la primera silleta que apoya al recipiente, tanto al lado donde actúa directamente la carga dinámica

(punto de análisis 6) como al lado opuesto (punto de análisis 8) pasando por esfuerzo máximos situados en la parte central inferior del recipiente cerca a la primera silleta (punto de análisis 7). La Figura 6.13 muestra los resultados obtenidos en el análisis para el paso 6 donde el esfuerzo máximo se ubica en el punto de análisis 7.

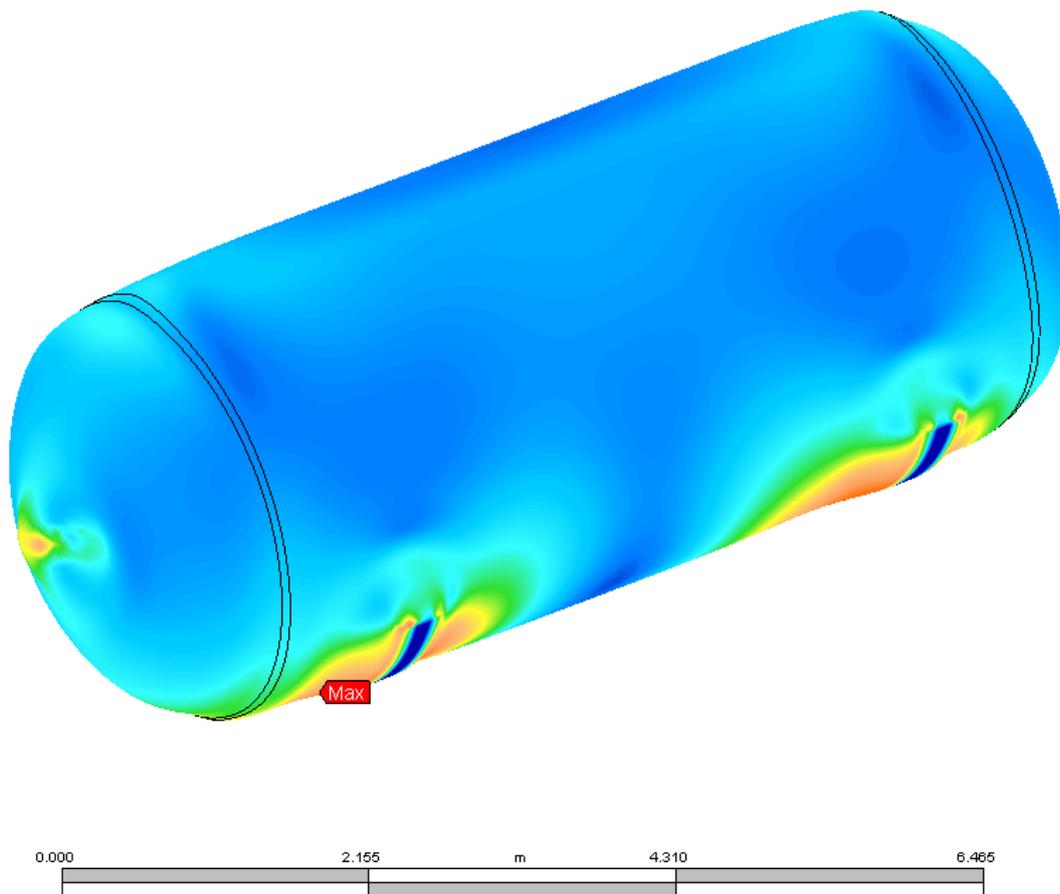


Figura 6.13 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 7)

A partir del paso 9 (2.41 ms) hasta el paso 30 (8.29 ms), los valores máximos de esfuerzo se encuentran en los puntos de análisis 3 y 4, ubicados en las silletas de apoyo del recipiente del lado donde actúa directamente el perfil de presiones de la explosión. Esto se debe a que durante la fase positiva de la onda de choque las fibras del recipiente del lado donde ocurre la explosión trabajan a tracción, mientras que del otro lado trabaja a compresión, permitiendo esfuerzos importantes. Posteriormente al comenzar la fase negativa (que trabaja en sentido contrario) alivia un poco los puntos de mayor esfuerzo.

Como se observa en la Figura 6.11 los esfuerzos en estos puntos crecen de manera acelerada hasta finalizar la fase positiva del perfil de presiones. Luego su pendiente disminuye por efecto de la fase negativa (presión negativa) del perfil de presiones. Finalmente los esfuerzos en estos puntos tienden a disminuir, aunque mantienen cierta oscilación hasta amortiguarse totalmente en tiempos mayores.

Es importante mencionar que en el paso 19 (5.23 ms) se encuentra el segundo valor más alto de esfuerzo de todo el análisis y se ubica en el punto de análisis 4. (Figura 6.14)

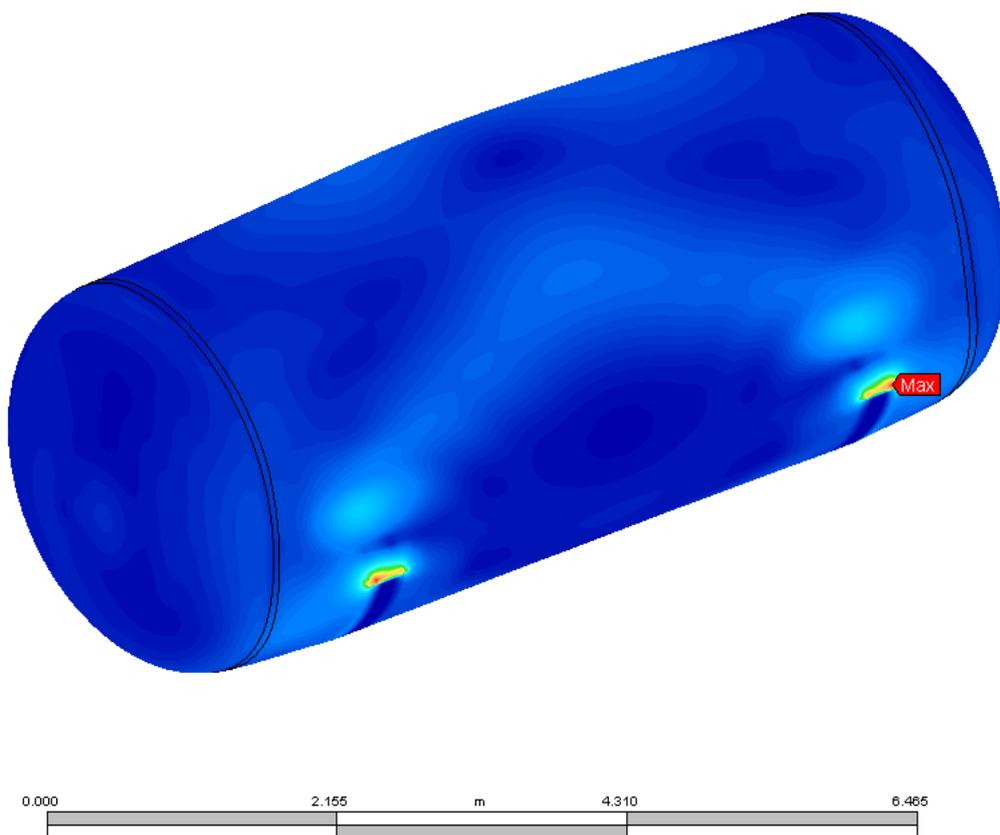


Figura 6.14 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 19)

Por último, desde el paso 31 (8.29 ms) hasta el final del análisis, los esfuerzos máximos se ubican en las silletas de apoyo del recipiente, en el lado donde no actúa directamente el perfil de presiones de la explosión (puntos de análisis 1 y 2). Esto ocurre porque el recipiente que había sido esforzado durante la onda de choque tiende a regresar a su condición original lo que provoca que los puntos cercanos a las silletas del lado no afectado directamente por la

onda pasen de estar en compresión a tracción por efecto de la vibración del cuerpo. Estoue conlleva a un aumento brusco de los esfuerzos en estos puntos (puntos de análisis 1 y 2) y simultáneamente una disminución del esfuerzo en los puntos cercanos alas silletas del lado afectado directamente por la silleta (puntos de análisis 3 y 4). Paulatinamente los esfuerzo en los puntos 1 y 2 mantienen una cierta oscilación hasta amortiguarse totalmente en tiempos mayores. Los valores de los esfuerzos que se han obtenido para los puntos de análisis 1 y 2 son muy parecidos entre sí a lo largo de todo el análisis como se puede observar en la Figura 6.11

En el paso 42 (11.50 ms) se produce el esfuerzo máximo de todo este análisis con un valor de 260 MPa, ubicado en el punto de análisis 1. Este esfuerzo ocurre luego del tiempo de duración de la carga de presión y está asociado al periodo natural del recipiente.

.A continuación se presenta los resultados obtenidos en el análisis para el paso 43 donde el esfuerzo máximo se ubica en el punto de análisis 1 (Figura 6.15).

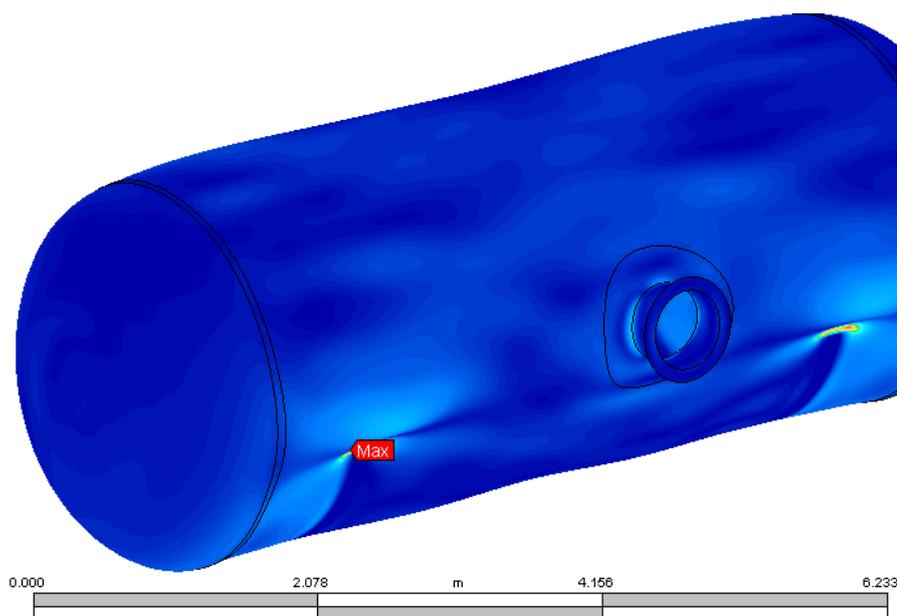


Figura 6.15 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 43)

6.2.C. Análisis de sensibilidad ángulo de incidencia de la carga aplicada

En base lo observado en el análisis del esfuerzo de fluencia en la sección anterior, se identificaron los puntos que presentan mayores esfuerzos. Ahora se ha planteado observar la influencia del ángulo de incidencia de la carga aplicada respecto al recipiente a presión y su relación con los esfuerzos obtenidos.

Originalmente la carga dinámica (perfil de presiones) de la explosión actúa perpendicularmente respecto al eje el recipiente a presión. Para realizar el presente análisis se rotó en sentido anti horario el ángulo de incidencia de la carga aplicada en: 45° , y 90° respecto a su valor original, y se buscó el perfil de presiones que sea capaz de llegar a un esfuerzo máximo con un valor a 260 MPa (valor de esfuerzo de fluencia del material). A continuación se detalla los resultados obtenidos en cada caso:

(i) Ángulo de incidencia de la carga rotado 90°

Utilizando el software Autodesk Simulation Multiphysics, se probó el modelo antes utilizado cargado con diferentes perfiles de presión (asumiendo en todos los casos una distancia al foco de explosión constante de 10 m) hasta llegar a un esfuerzo máximo igual al de la fluencia del material (260 MPa). Se varió el ángulo de incidencia de la carga en 90° sentido anti horario.

Luego de varias iteraciones, se encontró que el perfil de presiones que permite obtener como esfuerzo máximo el esfuerzo de fluencia es aquel que requiere de 1.661 kg de TNT equivalente. Los parámetros de ese perfil se indican en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Parámetros de perfil de onda de presión (ángulo de incidencia 90°)

Parámetros de Onda de Presión				
W	1.661	kg		
Z	8.444	$m/kg^{1/3}$		
P_{max}	P_{min}	t_a	t_d	t_n
kPa(g)	kPa(g)	ms	ms	ms
18.800	4.145	17.382	4.533	1.646

Como en el caso anterior se redujo el tiempo de arribo (de 17.382 ms a 0.255 ms.) para reducir el tiempo de computo requerido en la simulación (Figura 6.16).

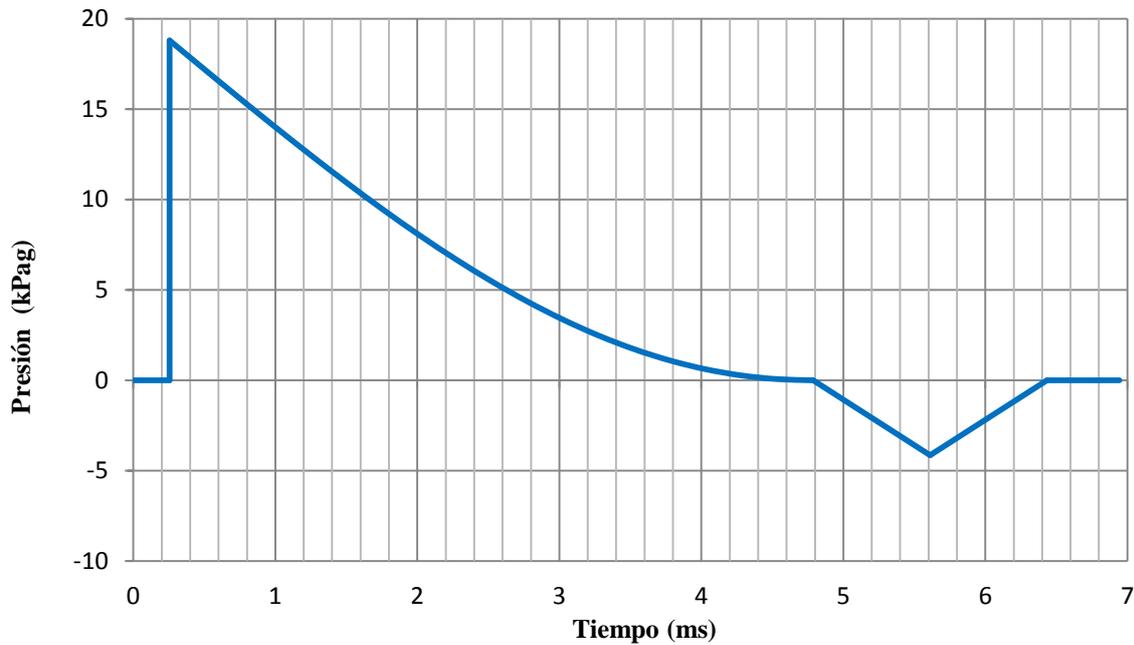


Figura 6.16 Perfil de Presión vs Tiempo (modificado)- modelo: ángulo de incidencia a 90°

Los esfuerzos máximos obtenidos luego de la incidencia de este perfil de presiones se registran en la Tabla 6.7. El esfuerzo máximo de todo el análisis se encuentra en el paso 5 con un valor de 260 kPa, ubicado en el punto de análisis 5.

Tabla 6.7 Esfuerzos máximos- modelo: ángulo de incidencia 90°

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
1	0.27	23.8	X = 7.220, Y = 0, Z = 0	5
2	0.53	132.1	X = 7.220, Y = 0, Z = 0	5
3	0.80	218.5	X = 7.220, Y = 0, Z = 0	5
4	1.07	257.9	X = 7.220, Y = 0, Z = 0	5
5	1.34	260.0	X = 7.220, Y = 0, Z = 0	5
6	1.60	235.4	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
7	1.87	196.4	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
8	2.14	148.8	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
9	2.41	98.7	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
10	2.67	63.0	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
11	2.94	72.5	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
12	3.21	81.1	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1

Tabla 6.7 Esfuerzos máximos - modelo: ángulo de incidencia 90° (continuación)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación(m)	Punto A.
13	3.48	89.0	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
14	3.74	96.4	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
15	4.01	100.8	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
16	4.28	100.1	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
17	4.55	94.4	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
18	4.81	86.8	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
19	5.08	74.8	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
20	5.35	60.7	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
21	5.62	51.0	X = 1.042, Y = -1.370, Z = -0.610	6
22	5.88	43.1	X = 1.042, Y = -1.370, Z = -0.610	6
23	6.15	40.8	X = 7.220, Y = 0, Z = 0	5
24	6.42	51.4	X = 7.220, Y = 0, Z = 0	5
25	6.69	49.6	X = 2.615, Y = 1.482, Z = 0.233	7
26	6.95	55.0	X = 2.605, Y = 1.483, Z = 0.224	8
27	7.22	57.1	X = 2.605, Y = 1.483, Z = 0.224	8
28	7.49	56.4	X = 2.560, Y = 1.484, Z = 0.216	9
29	7.75	54.5	X = 2.605, Y = 1.483, Z = 0.224	8
30	8.02	52.0	X = 2.560, Y = 1.484, Z = 0.216	9
31	8.29	48.2	X = 2.560, Y = 1.484, Z = 0.216	9
32	8.56	42.8	X = 2.560, Y = 1.484, Z = 0.216	9
33	8.82	43.7	X = 3.053, Y = 1.488, Z = -0.187	10
34	9.09	43.2	X = 3.053, Y = 1.488, Z = -0.187	10
35	9.36	38.7	X = 3.019, Y = 1.483, Z = -0.224	11
36	9.63	35.2	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
37	9.89	40.2	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
38	10.16	46.2	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
39	10.43	54.9	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
40	10.70	63.2	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
41	10.96	71.5	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
42	11.23	79.0	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
43	11.50	85.0	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
44	11.77	88.6	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
45	12.03	89.2	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
46	12.30	86.8	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
47	12.57	81.3	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
48	12.84	72.9	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
49	13.10	61.9	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2
50	13.37	48.9	X = 0.811, Y = 1.370, Z = -0.610	2

En la Figura 6.17, Figura 6.18 y Figura 6.19 se indica el recipiente a presión estudiado y la ubicación de los nodos que poseen los esfuerzos máximos, identificado con el nombre arbitrario que se designó en la tabla anterior.

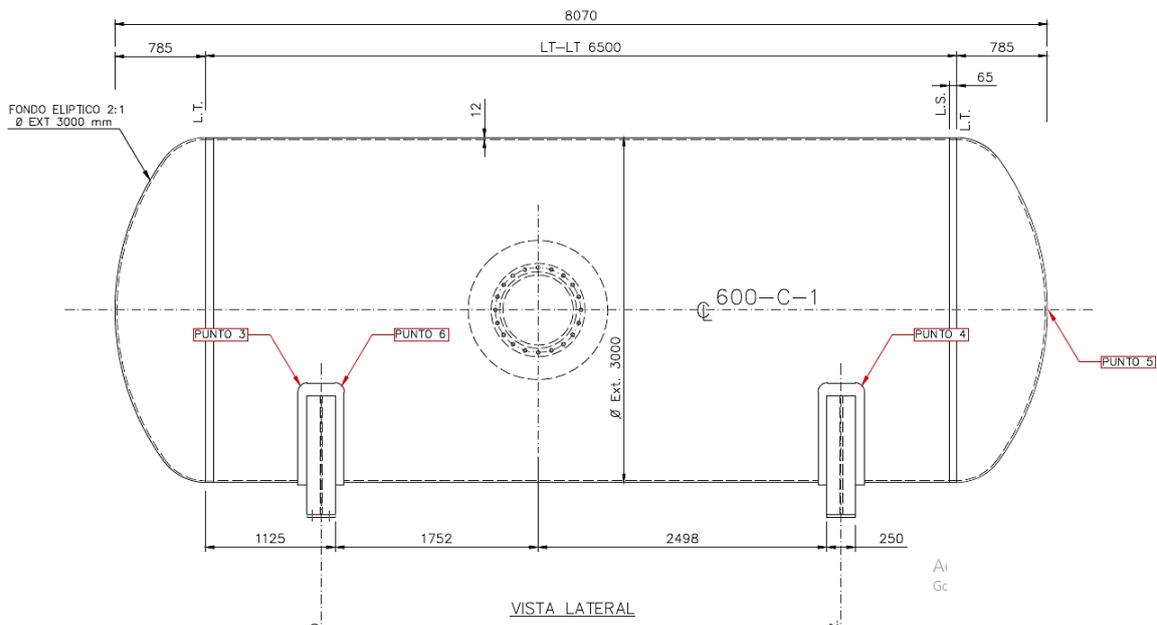


Figura 6.17 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista lateral (modelo: ángulo de incidencia a 90°)

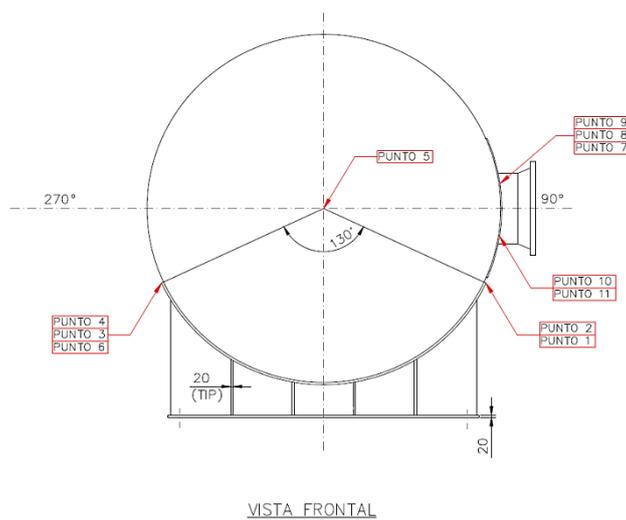


Figura 6.18 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal (modelo: ángulo de incidencia a 90°)

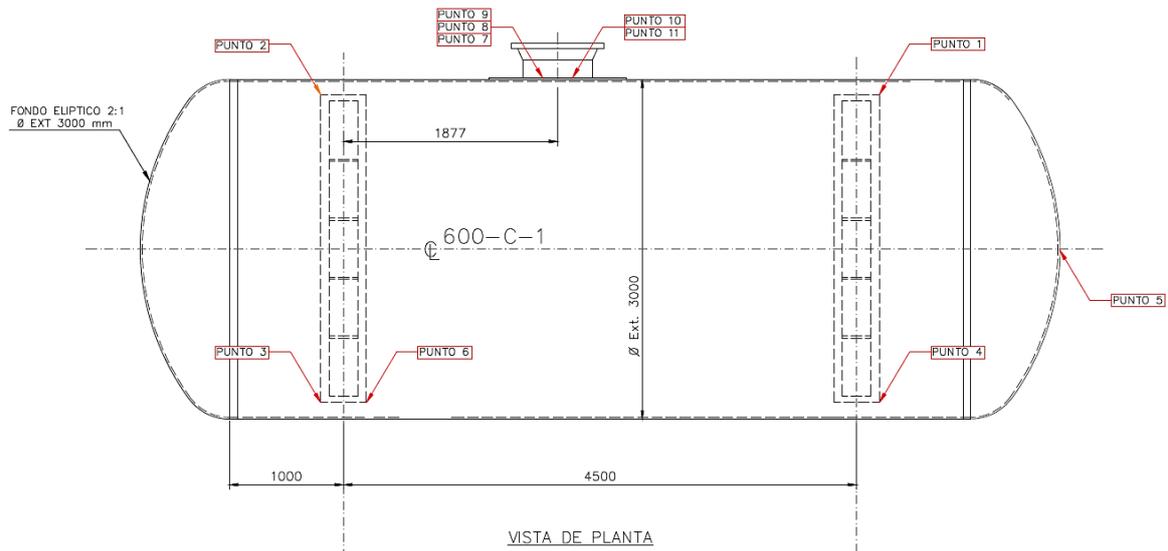


Figura 6.19 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista de planta (modelo: ángulo de incidencia a 90°)

El nodo donde se encuentra el esfuerzo máximo de todo el análisis, es el punto 5 ubicado en las coordenadas: $X = 7.22$, $Y = 0$, $Z = 0$. El punto 5 se encuentra sobre el cabezal donde actúa directamente el perfil de presiones. Este punto alcanza el esfuerzo máximo de 260 MPa durante el paso 5 (1.34 ms).

Como se muestra en la tabla y las figuras anteriores los puntos de análisis con esfuerzos máximos que más se repiten son los puntos 1, 2, 3, y 4 ubicados en las silletas que soportan al recipiente a presión.

Además, a diferencia del modelo original, aparecen esfuerzos máximos alrededor de la entrada de hombre (“manhole”) en los puntos de análisis 8, 9, 10 y 11.

En la Figura 6.20 se observa que el esfuerzo máximo del análisis aparece tempranamente durante la fase positiva del perfil de presiones a diferencia de lo ocurrido en el modelo original donde apareció luego de que el perfil de presiones dejó de actuar sobre el recipiente a presión (ver Figura 6.11). A continuación se presentan los esfuerzos a través del tiempo en los puntos de análisis más importantes. Como referencia se indican también los tiempos en los que finaliza la fase positiva y la fase negativa del perfil de presiones aplicado.

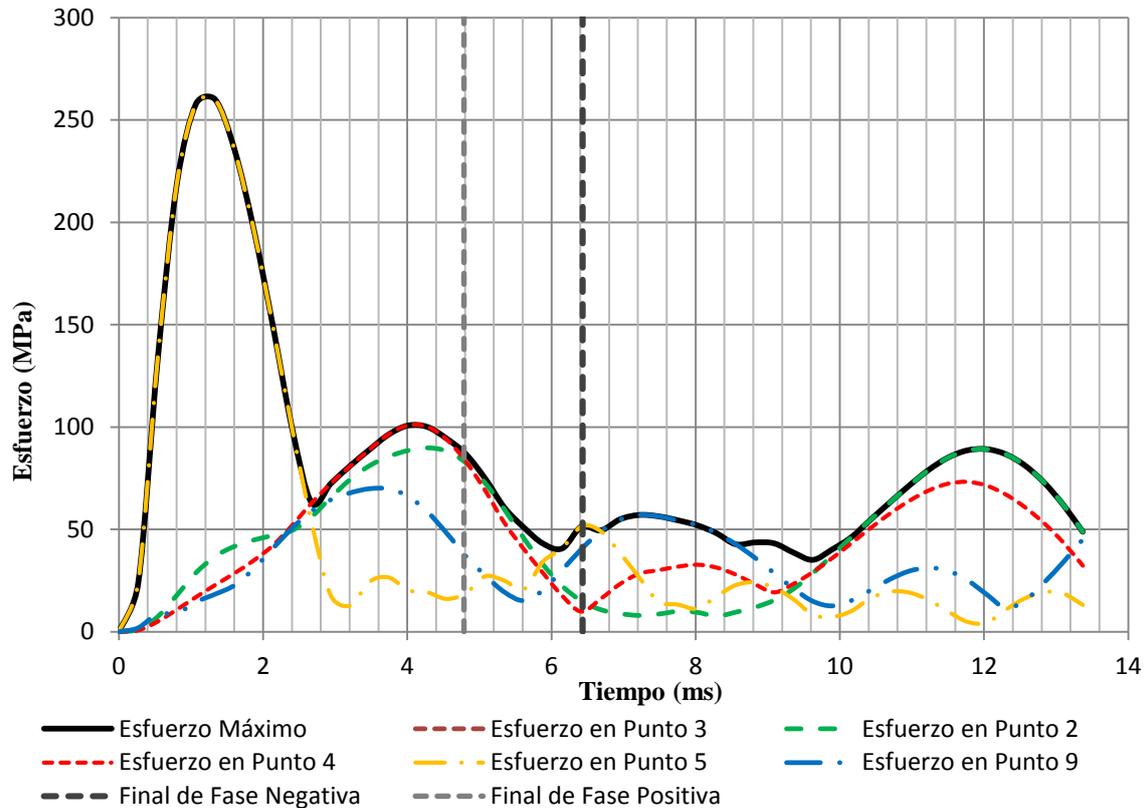


Figura 6.20 Esfuerzo vs Tiempo para punto de análisis - modelo: ángulo de incidencia a 90°

Se observan dos comportamientos bien definidos: por un lado el esfuerzo máximo corresponde al esfuerzo máximo en el punto de análisis 5 (cabezal, donde actúa directamente la carga). Allí los valores aumentan rápidamente hasta llegar al esfuerzo de fluencia y luego disminuir a valores pequeños en tiempos muy breves.

Luego de esta etapa los esfuerzos máximos se ubican en las silletas (puntos 1, 2, 3, y 4) y el punto de análisis 9 que pertenece un nodo aledaño a la entrada de hombre. En todos los casos los valores son menores que en la etapa inicial.

La Figura 6.21, Figura 6.22 y Figura 6.23 muestran la ubicación de los máximos esfuerzos (puntos de análisis 5, 4 y 9) en los pasos 5, 15 y 28 respectivamente.

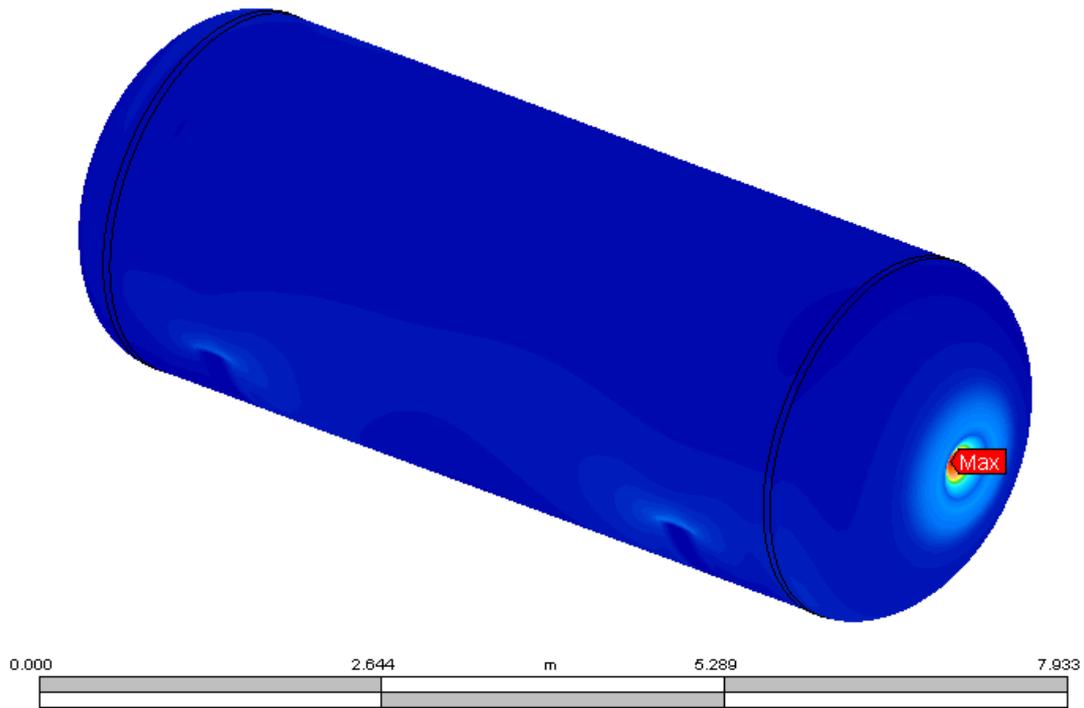


Figura 6.21 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 5) - modelo: ángulo de incidencia a 90°

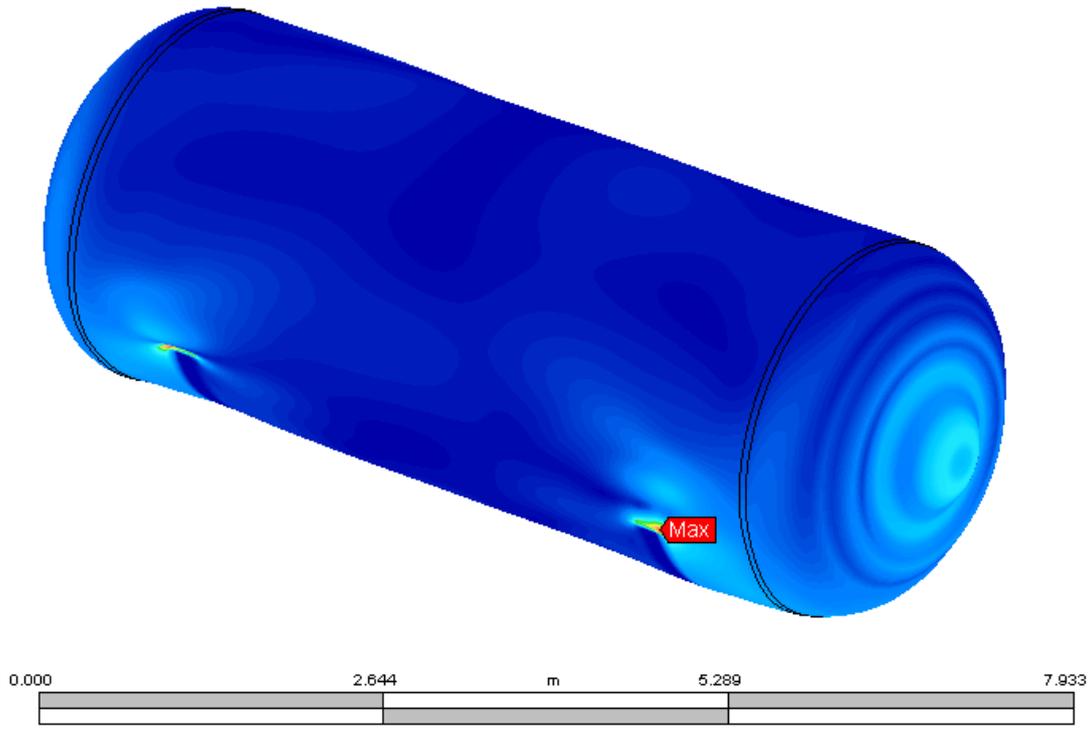


Figura 6.22 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 15) - modelo: ángulo de incidencia a 90°

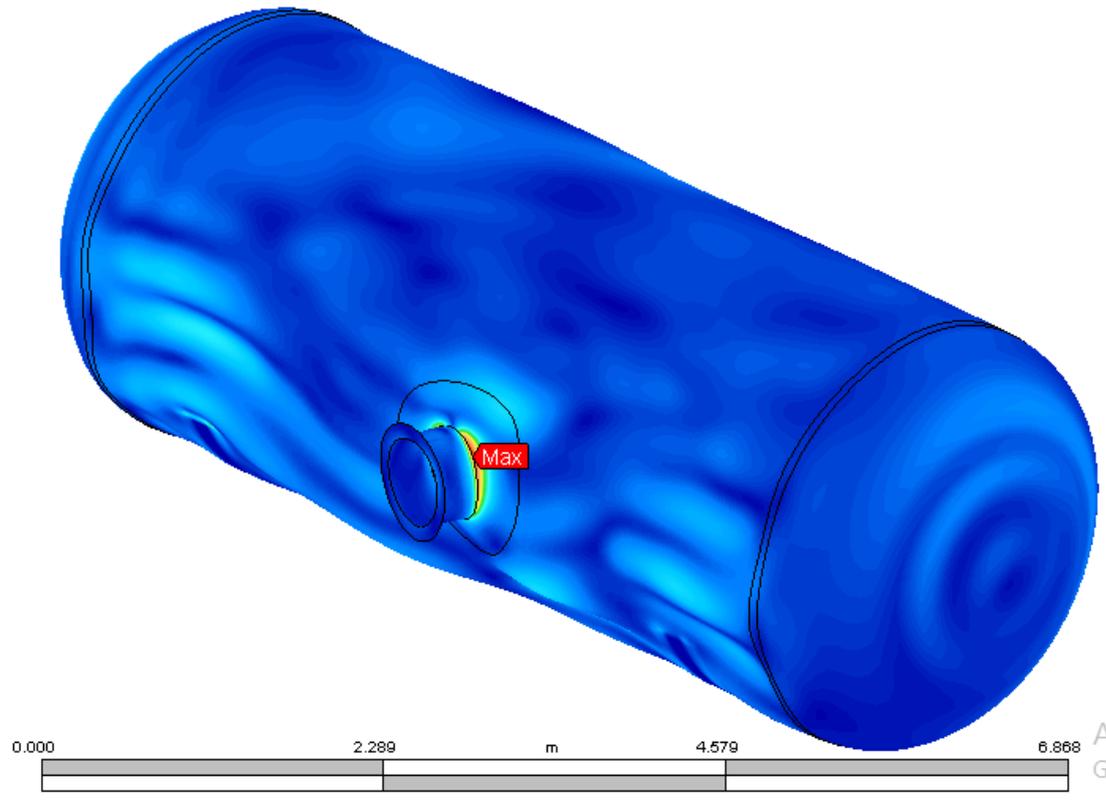


Figura 6.23 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 28) - modelo: ángulo de incidencia a 90°

(ii) Ángulo de incidencia de la carga rotado 45°

En este apartado se repite el estudio realizado en el punto anterior considerando un ángulo de 45° respecto al recipiente. El perfil de presiones utilizando se obtiene asumiendo una distancia al centro de la explosión de 10 m y un sobre valor de presión que somete al recipiente a un esfuerzo máximo similar a la fluencia del material (260 MPa).

La masa de TNT equivalente requiere de 3.496 kg y los parámetros obtenidos para el perfil son los resumidos en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8 Parámetros de perfil de onda de presión (ángulo de incidencia 45°)

W	3.496	kg		
Z	6.589	$\text{m/kg}^{1/3}$		
P_{max}	P_{min}	t_a	t_d	t_n
kPa(g)	kPa(g)	ms	ms	ms
27.330	5.312	12.387	4.185	2.110

Al igual que en los casos anteriores el tiempo de arribo se reduce de 12.387 ms a un tiempo de arribo t_a de 0.255 ms para mejorar la performance computacional.

La Figura 6.24 muestra el perfil de presiones utilizados para obtener los esfuerzos máximos con el tiempo t_a modificado.

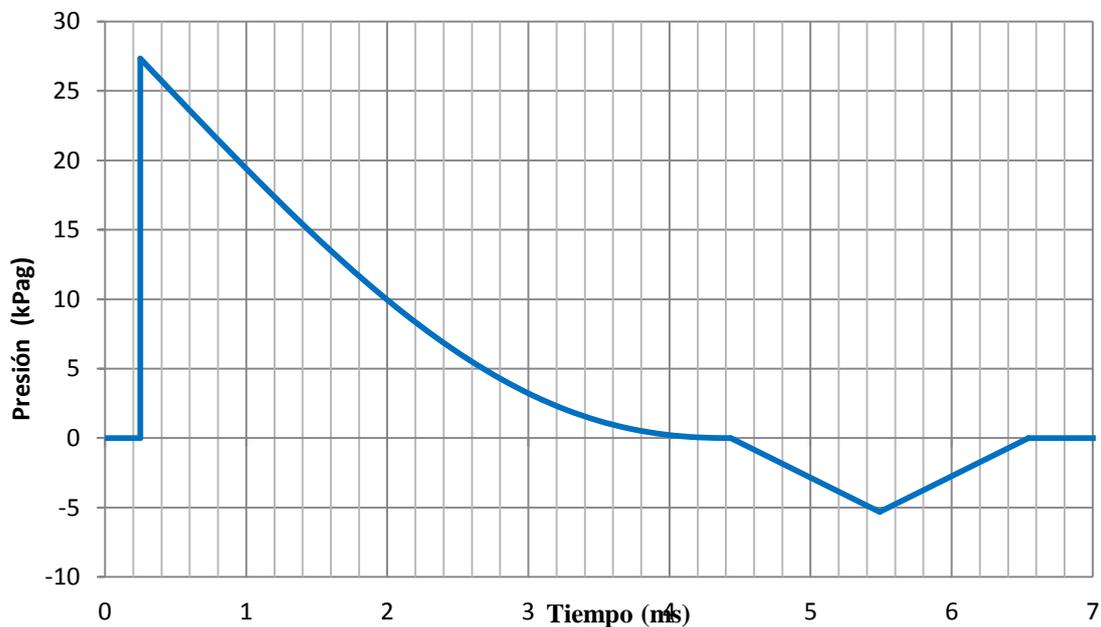


Figura 6.24 Perfil de Presión vs Tiempo (modificado)- modelo: ángulo de incidencia a 45°

En base a este perfil de presiones se registraron los siguientes esfuerzos máximos resumidos en la Tabla 6.9. El esfuerzo máximo de todo el análisis se encuentra en el paso 5 con un valor de 260 kPa, ubicado en el punto de análisis 5.

Tabla 6.9 Esfuerzos máximos (modelo: ángulo de incidencia 45°)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
1	0.27	24.1	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
2	0.53	133.3	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
3	0.80	219.5	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
4	1.07	259.0	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
5	1.34	260.0	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
6	1.60	233.9	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
7	1.87	192.6	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
8	2.14	142.7	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5
9	2.41	89.9	X = 7.22, Y = 0, Z = 0	5

Tabla 6.9 Esfuerzos máximos -modelo: ángulo de incidencia 45° (continuación)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
10	2.67	44.6	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
11	2.94	56.8	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
12	3.21	68.9	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
13	3.48	80.5	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
14	3.74	91.2	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
15	4.01	100.6	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
16	4.28	108.1	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
17	4.55	112.6	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
18	4.81	113.5	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
19	5.08	110.4	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
20	5.35	103.9	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
21	5.62	95.3	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
22	5.88	86.4	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
23	6.15	78.8	X = 5.559, Y = -1.370, Z = -0.610	4
24	6.42	74.8	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
25	6.69	80.9	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
26	6.95	85.7	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
27	7.22	88.6	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
28	7.49	89.7	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
29	7.75	89.3	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
30	8.02	88.1	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
31	8.29	86.9	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
32	8.56	86.3	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
33	8.82	86.3	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
34	9.09	86.8	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
35	9.36	87.4	X = 0.811, Y = -1.370, Z = -0.610	3
36	9.63	90.7	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
37	9.89	98.7	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
38	10.16	106.3	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
39	10.43	113.0	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
40	10.70	118.7	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
42	10.96	124.1	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
43	11.23	128.9	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
44	11.50	132.5	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
45	11.77	134.0	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
46	12.03	132.8	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
47	12.30	129.0	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
48	12.57	123.5	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
49	12.84	117.3	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
50	13.10	111.6	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
51	13.37	106.4	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
52	13.64	101.9	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1

Tabla 6.9 Esfuerzos máximos -modelo: ángulo de incidencia 45° (continuación)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
53	13.90	97.8	X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610	1
54	14.17	96.6	X = 0.811 Y = 1.370, Z = -0.610	2
55	14.44	103.4	X = 0.811 Y = 1.370, Z = -0.610	2
56	14.71	109.2	X = 0.811 Y = 1.370, Z = -0.610	2
57	14.97	113.9	X = 0.811 Y = 1.370, Z = -0.610	2
58	15.24	117.3	X = 0.811 Y = 1.370, Z = -0.610	2
59	15.51	119.6	X = 0.811 Y = 1.370, Z = -0.610	2
60	15.78	120.8	X = 0.811 Y = 1.370, Z = -0.610	2

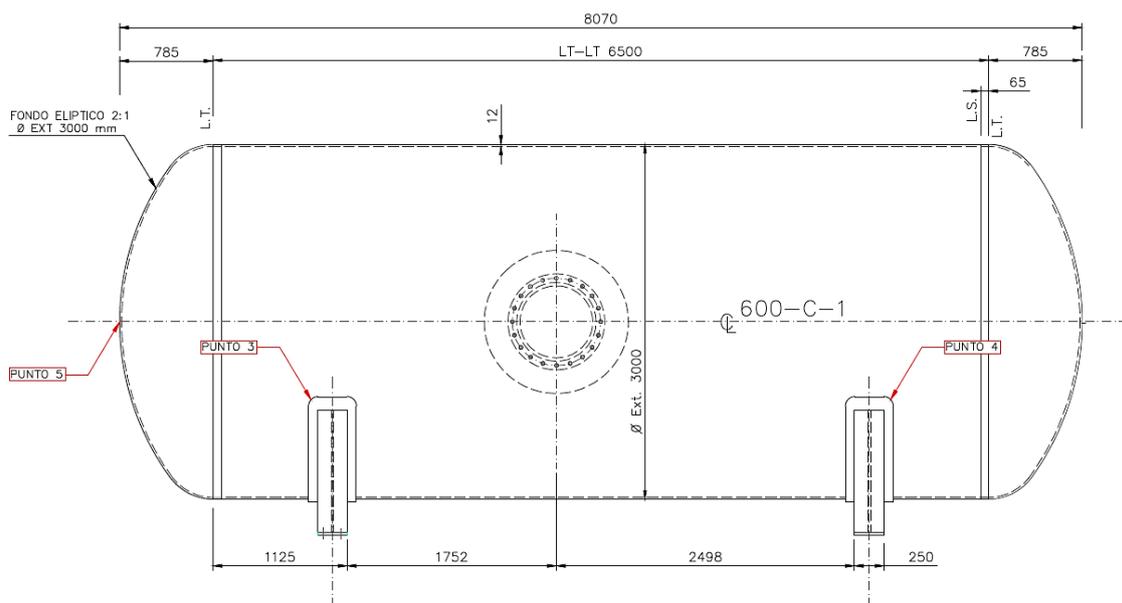


Figura 6.25 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista lateral (modelo: ángulo de incidencia a 45°)

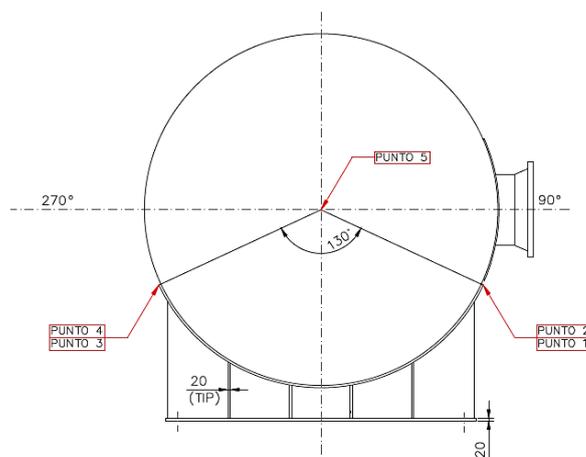


Figura 6.26 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal (modelo: ángulo de incidencia a 45°)

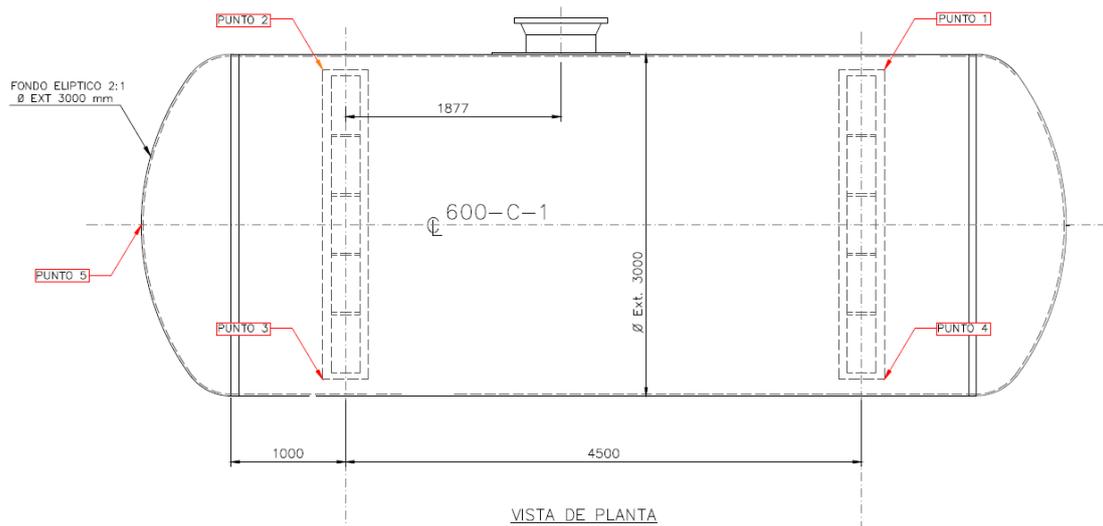


Figura 6.27 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal (modelo: ángulo de incidencia a 45°)

La Figura 6.25, Figura 6.26, y Figura 6.27 esquematizan el recipiente estudiado y la ubicación de los nodos que poseen los esfuerzos máximos.

Los puntos de análisis que más se repiten a lo largo del análisis son los puntos 1, 2, 3 y 4, relacionados con las silletas que soportan al recipiente a presión, y el punto 5 que se encuentra en el cabezal donde actúa directamente la carga dinámica.

El nodo donde se encuentra el esfuerzo máximo de todo el análisis, es el punto 5 ubicado en las coordenadas $X = 7.22$, $Y = 0$, $Z = 0$. Este punto alcanza el esfuerzo máximo de 260 MPa durante el paso 5 (1.34 ms).

En la Figura 6.28 se han graficado los esfuerzos en los puntos de análisis más importantes. Como referencia constan también los tiempos en los que finaliza la fase positiva y la fase negativa del perfil de presiones aplicado.

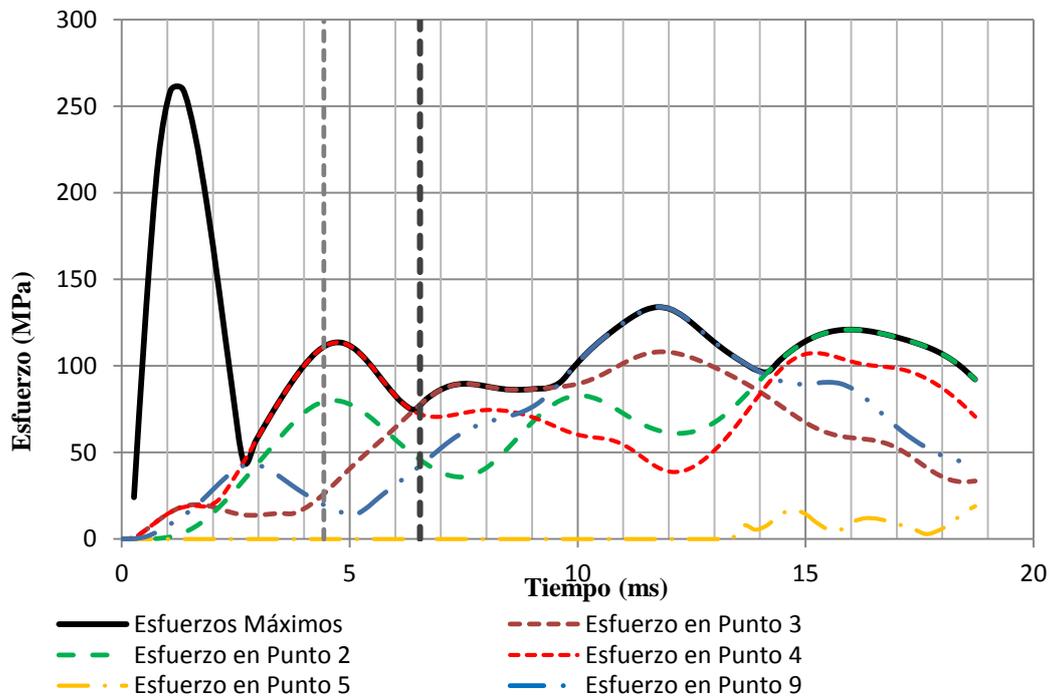


Figura 6.28 Esfuerzo vs Tiempo para punto de análisis - modelo: ángulo de incidencia a 45°

El gráfico anterior se pueden observar dos etapas: una en la que los esfuerzos aumentan rápidamente hasta llegar al esfuerzo de fluencia, para luego disminuir paulatinamente. Esto coincide con los esfuerzos máximos en el punto 5.

Luego aparece otra etapa donde principalmente los puntos de análisis que corresponde a las silletas son los que poseen los esfuerzos máximos. En esta etapa los esfuerzos máximos son mucho más pequeños presentando sucesivos máximos a lo largo del tiempo.

La Figura 6.29 y Figura 6.30 se muestra la ubicación de los puntos donde se presentan máximos (puntos 5 y 1), que aparecen en el paso 5 y 44 de la simulación.

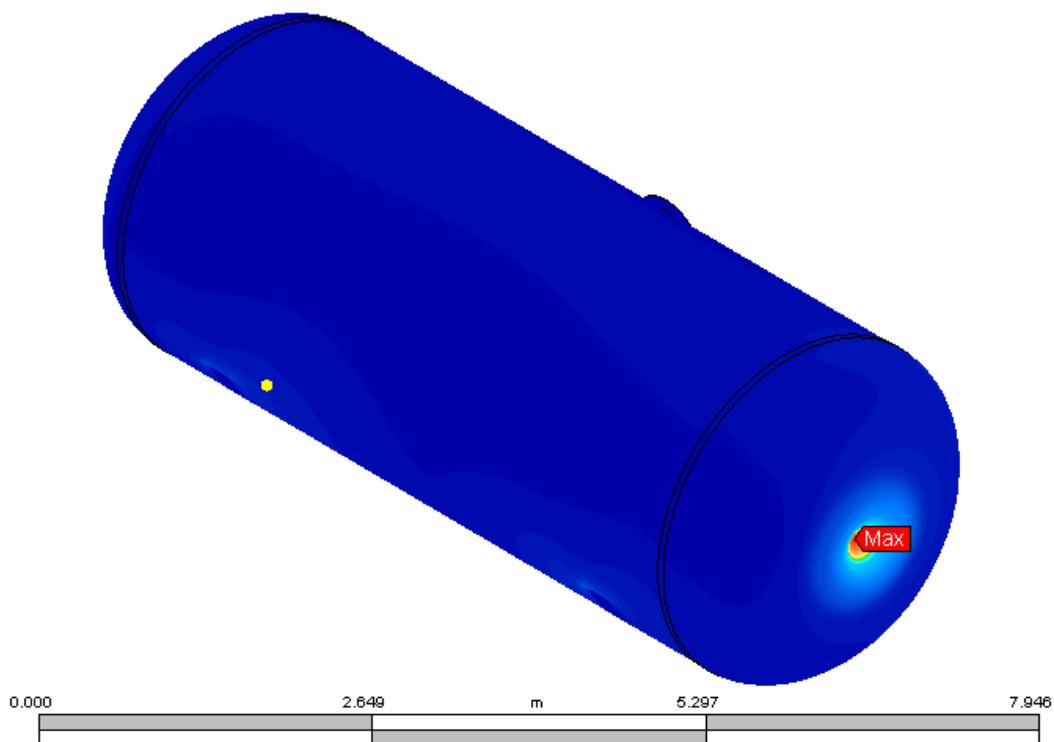


Figura 6.29 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 5) - modelo: ángulo de incidencia a 45°

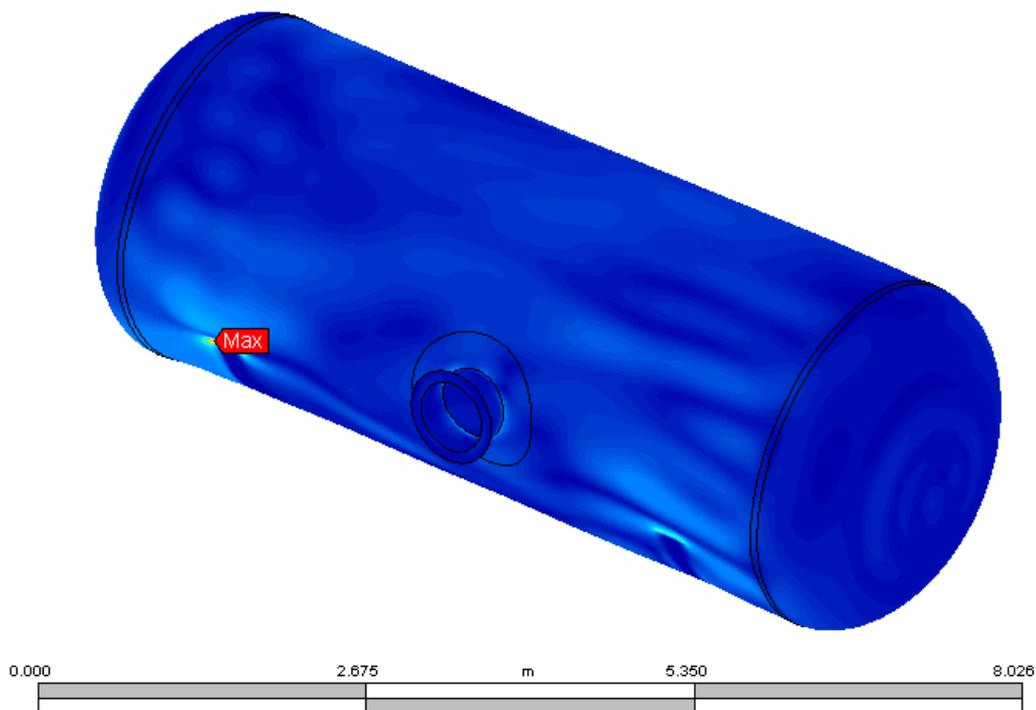


Figura 6.30 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (paso: 44) - modelo: ángulo de incidencia a 45°

(iii) Análisis comparativo de casos presentados

En la Tabla 6.10 se resume la masa de TNT equivalente, la presión máxima y mínima del perfil de presiones necesario para llegar a la fluencia en cada uno de los casos analizados. Se observa que existe una variación apreciable a medida que cambia el ángulo de incidencia de la carga.

Tabla 6.10 Ángulo de incidencia, masa de TNT equivalente, presión máxima y mínima

Ángulo de Incidencia	Masa (kg)	Relación caso / caso original	P _{max} (kPa)	P _{min} (kPa)
0	19.91	1	75.88	-9.49
45	3.50	0.17	27.33	-5.31
90	1.66	0.08	18.88	-4.14

El caso más desfavorable para una explosión es aquel que ocurre con un ángulo de incidencia de 90°, es decir el perfil de presiones actúa perpendicular a una de los cabezales del recipiente.

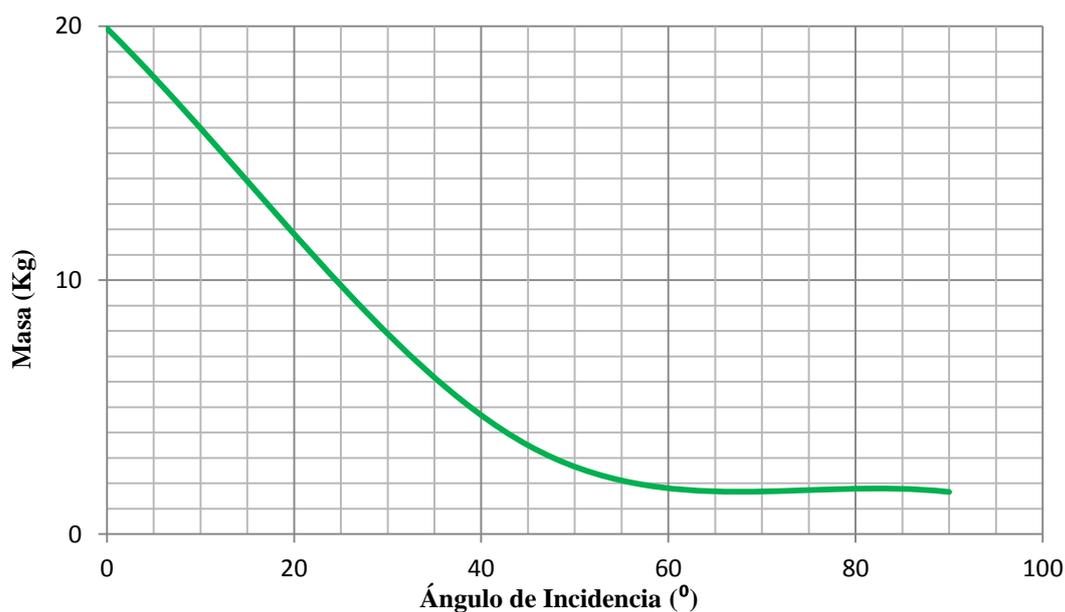


Figura 6.31 Masa vs Ángulo de Incidencia

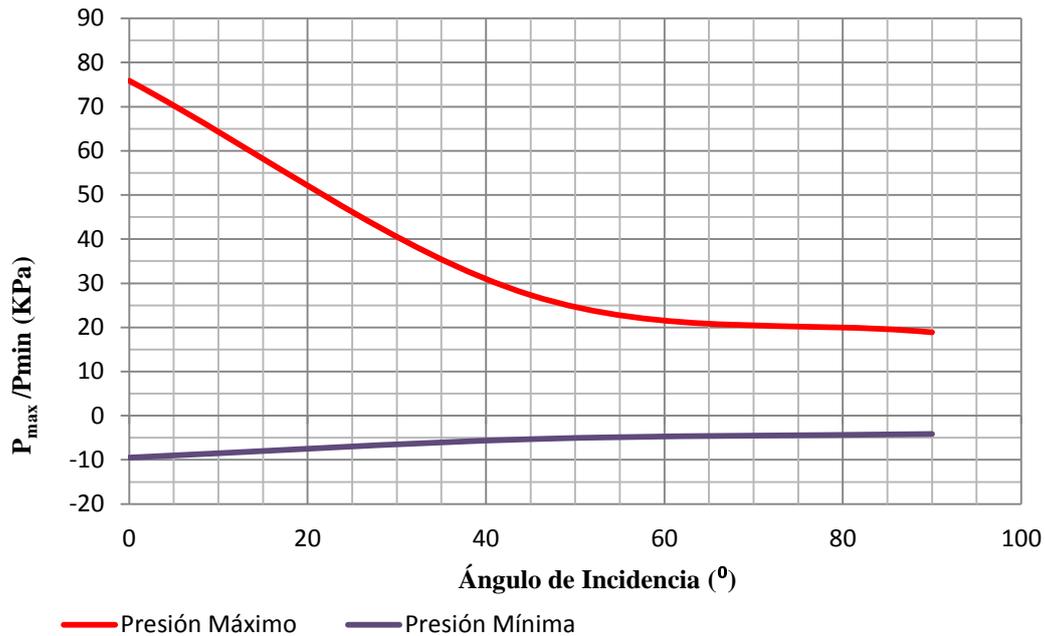


Figura 6.32 Presión Maxima/Minima vs Ángulo de Incidencia

Como se observa en la Figura 6.31 la cantidad de masa de TNT equivalente requerida para llegar a la fluencia a medida que aumenta, el ángulo de incidencia de la carga disminuye drásticamente. El efecto de esta disminución en la masa se refleja en la disminución en las presiones máximas y mínimas obtenidas (Figura 6.32).

De este análisis se concluye que el escenario más desfavorable para una explosión es cuando el ángulo de incidencia es de 90° es decir el perfil de presiones actúa perpendicular a uno de los cabezales del recipiente.

6.2.D. Análisis de sensibilidad ángulo de contacto de siletas

Según los análisis anteriores uno de los puntos con mayor afectación y esfuerzos más altos debido al perfil de presiones causado por una explosión son aquellos nodos relacionados con las siletas que soportan al recipiente a presión.

Las normas y las prácticas recomendadas para la construcción y diseño de recipientes a presión horizontales establecen que el ángulo de contacto entre las siletas y el recipiente a

presión debe variar entre 120° y 180° . En el caso particular del recipiente a presión horizontal analizado fue diseñado con un ángulo de contacto de 130° .

El presente análisis pretende observar la influencia del ángulo de contacto frente a los esfuerzos que se producen debido a la acción del perfil de presiones de una explosión. Con este fin se ha variado el ángulo de contacto de las silleta (140° , 150° , 160° y 180°) y se ha registrado los esfuerzos máximos para cada caso. A continuación se muestra a manera de ejemplo los casos donde el ángulo de contacto es de 150° , y 180° . El caso de 130° pertenece al diseño original del recipiente y se muestra en el apartado 6.2.B.

(i) Ángulo de contacto de silletas de 150°

Utilizando el perfil de presiones con el que se analizó el modelo original se realizó una simulación modificando el ángulo de contacto de la silleta a 150° . Los valores obtenidos se observan en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11 Esfuerzos máximos -modelo: ángulo de contacto de 150°

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
1	0.27	0		
2	0.53	11.4	X = -0.849, Y = 0.088, Z = -0.002	5
3	0.80	46.8	X = -0.849, Y = 0.088, Z = -0.002	5
4	1.07	24.2	X = -0.849, Y = 0.088, Z = -0.002	5
5	1.34	37.9	X = -0.849, Y = 0.088, Z = -0.002	5
6	1.60	31.4	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
7	1.87	42.4	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
8	2.14	58.9	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
9	2.41	79.0	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
10	2.67	100.3	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
11	2.94	121.3	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
12	3.21	141.2	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
13	3.48	160.5	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
14	3.74	179.7	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
15	4.01	199.3	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
16	4.28	218.2	X = 5.559, Y = -1.455, Z = -0.363	4
17	4.55	233.6	X = 5.559, Y = -1.455, Z = -0.363	4
18	4.81	242.8	X = 5.559, Y = -1.455, Z = -0.363	4
19	5.08	244.6	X = 5.559, Y = -1.455, Z = -0.363	4

Tabla 6.11 Esfuerzos máximos -modelo: ángulo de contacto de 150° (continuación)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
20	5.35	239.6	X = 5.559, Y = -1.455, Z = -0.363	4
21	5.62	230.1	X = 5.559, Y = -1.455, Z = -0.363	4
22	5.88	219.6	X = 5.559, Y = -1.455, Z = -0.363	4
23	6.15	211.0	X = 5.559, Y = -1.455, Z = -0.363	4
24	6.42	206.8	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
25	6.69	205.0	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
26	6.95	203.6	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
27	7.22	200.7	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
28	7.49	195.3	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
29	7.75	188.0	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
30	8.02	179.8	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
31	8.29	187.4	X = 0.811, Y = -1.455, Z = -0.363	3
32	8.56	200.8	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
33	8.82	215.5	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
34	9.09	229.0	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
35	9.36	239.6	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
36	9.63	245.9	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
37	9.89	247.3	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
38	10.16	244.1	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
39	10.43	237.7	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
40	10.70	229.5	X = 5.559, Y = 1.455, Z = -0.363	2
41	10.96	222.2	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
42	11.23	215.0	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
43	11.50	207.5	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
44	11.77	199.5	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
45	12.03	191.3	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
46	12.30	183.4	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
47	12.57	176.8	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
48	12.84	171.9	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
49	13.10	168.9	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
50	13.37	167.1	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
51	13.64	165.9	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
52	13.90	164.8	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
53	14.17	163.3	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
54	14.44	161.3	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
55	14.71	158.5	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
56	14.97	154.3	X = 0.811, Y = 1.455, Z = -0.363	1
57	15.24	158.1	X = 2.799, Y = 1.469, Z = 0.305	6
58	15.51	164.8	X = 2.799, Y = 1.469, Z = 0.305	6
59	15.78	169.8	X = 2.812, Y = 1.469, Z = 0.305	7
60	16.04	173.8	X = 2.812, Y = 1.469, Z = 0.305	7

El esfuerzo máximo de todo el análisis se produce en el punto 1 con un valor de 247.3 MPa durante el paso 37 (9.89 ms).

Al igual que en todos los casos analizados, incluyendo el modelo original, los nodos de mayor relevancia son aquellos que se encuentran relacionados con las silletas que soportan al recipiente (puntos 1, 2, 3, y 4) y el centro de los cabezales del recipiente (punto 5), ya que en ellos se localizan la mayor parte de los esfuerzos máximos del análisis. Los puntos aledaños a la boca de hombre (puntos de análisis: 6 y 7).

En la Figura 6.33, Figura 6.34, y Figura 6.35 se indica la ubicación de los puntos mencionados en la tabla anterior.

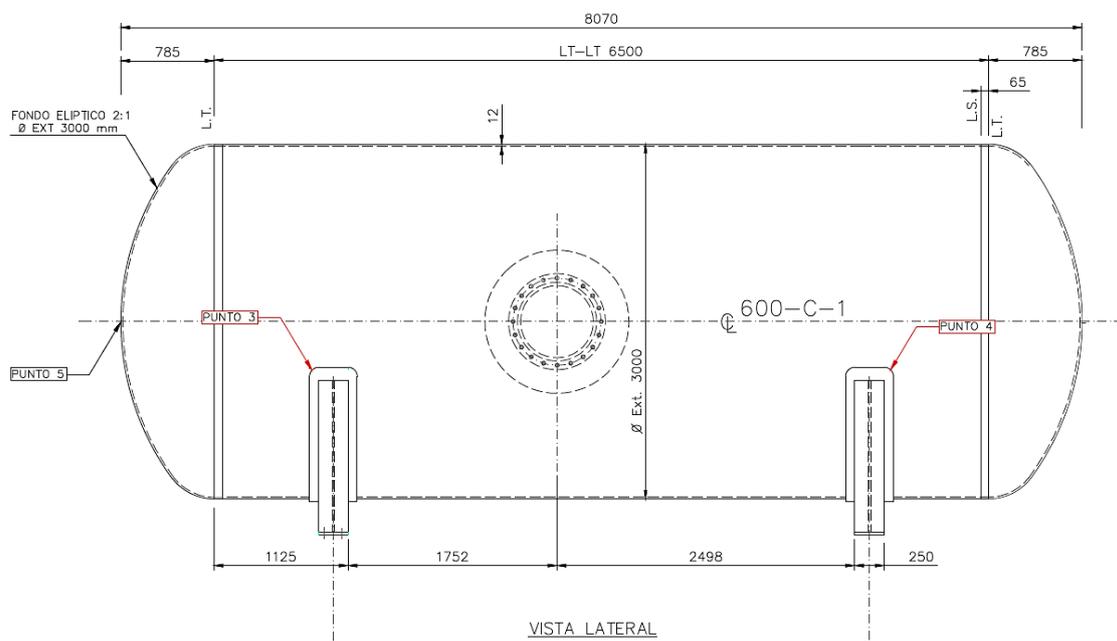


Figura 6.33 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista lateral (modelo: ángulo de contacto de 150°)

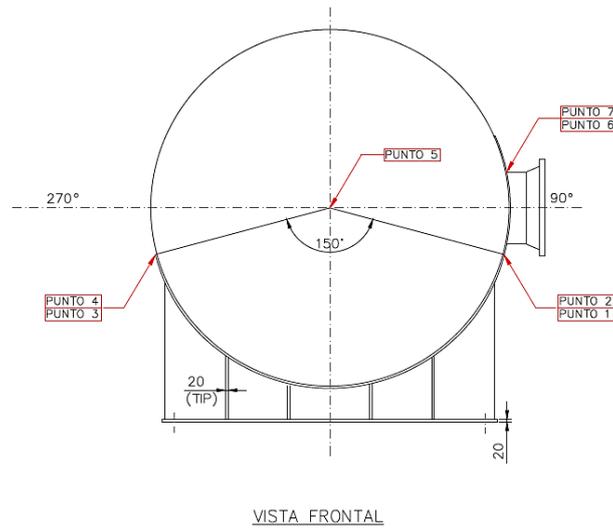


Figura 6.34 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista frontal (modelo: ángulo de contacto de 150°)

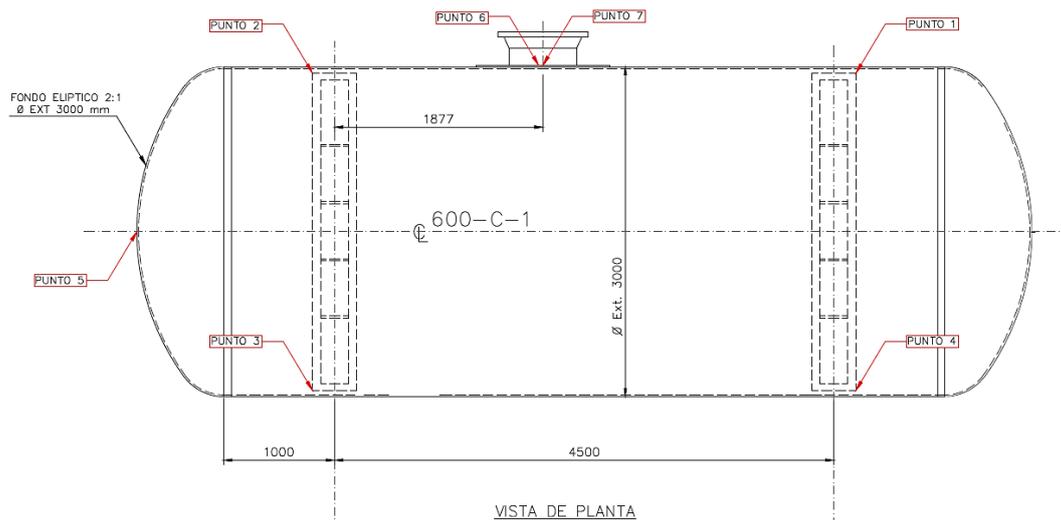


Figura 6.35 Nodos con esfuerzo máximo (puntos de análisis) – vista de planta (modelo: ángulo de contacto de 150°)

(ii) Ángulo de Contacto de Silletas de 180°

Se realiza el mismo análisis que en el caso anterior para un ángulo de contacto de la silleta a 180°, obteniendo los resultados que se resumen en la Figura 6.14.

Tabla 6.12 Esfuerzos máximos -modelo: ángulo de contacto de 180°

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
1	0.27	0		
2	0.53	11.4	X = -0.849, Y = 0.0875, Z = -0.002	5
3	0.80	46.8	X = -0.849, Y = 0.0875, Z = -0.002	5
4	1.07	26.0	X = 0.811, Y = -1.5, Z = 0	3
5	1.34	41.0	X = 0.811, Y = -1.5, Z = 0	3
6	1.60	58.9	X = 0.811, Y = -1.5, Z = 0	3
7	1.87	80.2	X = 0.811, Y = -1.5, Z = 0	3
8	2.14	104.3	X = 1.042, Y = -1.500, Z = 0.026	6
9	2.41	129.9	X = 1.042, Y = -1.500, Z = 0.026	6
10	2.67	154.1	X = 1.042, Y = -1.500, Z = 0.026	6
11	2.94	174.9	X = 1.042, Y = -1.500, Z = 0.026	6
12	3.21	190.8	X = 1.042, Y = -1.500, Z = 0.026	6
13	3.48	201.1	X = 1.042, Y = -1.500, Z = 0.026	6
14	3.74	208.0	X = 0.811, Y = -1.500, Z = 0.026	3
15	4.01	221.2	X = 0.811, Y = -1.500, Z = 0.026	3
16	4.28	234.5	X = 5.559, Y = -1.500, Z = 0.026	4
17	4.55	244.6	X = 5.559, Y = -1.500, Z = 0.026	4
18	4.81	249.1	X = 5.559, Y = -1.500, Z = 0.026	4
19	5.08	246.9	X = 5.559, Y = -1.500, Z = 0.026	4
20	5.35	238.5	X = 5.559, Y = -1.500, Z = 0.026	4
21	5.62	225.9	X = 5.559, Y = -1.500, Z = 0.026	4
22	5.88	211.7	X = 5.559, Y = -1.500, Z = 0.026	4
23	6.15	198.4	X = 5.559, Y = -1.500, Z = 0.026	4
24	6.42	187.8	X = 0.811, Y = -1.500, Z = 0.026	3
25	6.69	178.9	X = 0.811, Y = -1.500, Z = 0.026	3
26	6.95	169.3	X = 0.811, Y = -1.500, Z = 0.026	3
27	7.22	157.9	X = 0.811, Y = -1.500, Z = 0.026	3
28	7.49	145.1	X = 0.811, Y = -1.500, Z = 0.026	3
29	7.75	132.0	X = 0.811, Y = -1.500, Z = 0.026	3
30	8.02	128.0	X = 5.559, Y = 1.500, Z = 0.026	1
31	8.29	134.8	X = 5.559, Y = 1.500, Z = 0.026	1
32	8.56	144.5	X = 5.559, Y = 1.500, Z = 0.026	1
33	8.82	155.9	X = 5.559, Y = 1.500, Z = 0.026	1
34	9.09	167.0	X = 5.559, Y = 1.500, Z = 0.026	1
35	9.36	176.8	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
36	9.63	183.9	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2

Tabla 6.12 Esfuerzos máximos -modelo: ángulo de contacto de 180° (continuación)

Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Ubicación (m)	Punto A.
37	9.89	185.5	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
38	10.16	181.6	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
39	10.43	173.3	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
40	10.70	161.9	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
41	10.96	148.5	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
42	11.23	133.9	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
43	11.50	117.9	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
44	11.77	100.6	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
45	12.03	82.3	X = 0.811, Y = 1.500, Z = 0.026	2
46	12.30	87.0	X = 2.825, Y = 1.469, Z = -0.305	7
47	12.57	93.2	X = 2.837, Y = 1.469, Z = -0.304	8
48	12.84	94.6	X = 2.850, Y = 1.469, Z = -0.303	9
49	13.10	92.6	X = 2.850, Y = 1.469, Z = -0.303	9
50	13.37	88.8	X = 2.862, Y = 1.470, Z = -0.301	10
51	13.64	85.0	X = 2.875, Y = 1.470, Z = -0.299	11
52	13.90	81.7	X = 2.887, Y = 1.471, Z = -0.296	12
53	14.17	78.8	X = 2.887, Y = 1.471, Z = -0.296	12
54	14.44	78.5	X = 1.042, Y = 1.500, Z = 0.0262	13
55	14.71	84.5	X = 1.042, Y = 1.500, Z = 0.0262	13
56	14.97	86.9	X = 1.042, Y = 1.500, Z = 0.0262	13
57	15.24	85.0	X = 1.042, Y = 1.500, Z = 0.0262	13
58	15.51	78.8	X = 1.042, Y = 1.500, Z = 0.0262	13
59	15.78	74.2	X = 2.812, Y = 1.469, Z = 0.305	14
60	16.04	75.5	X = 2.812, Y = 1.469, Z = 0.305	14

El esfuerzo máximo de todo el análisis se encuentra en el punto 4 con un valor de 249.1 MPa durante el paso 18 (4.81 ms).

Como en los estudios anteriores los nodos de mayor relevancia son aquellos que se encuentran relacionados con las silletas que soportan al recipiente (puntos 1, 2, 3, 4, 6 y 13) y el centro de los cabezales del recipiente (punto 5). En el caso de un ángulo de contacto de 180° a diferencia de otros casos, existen mayor número de puntos de análisis aledaños a la boca e hombre (puntos: 7, 8, 9, 10, 11 y 12).

La ubicación de los puntos mencionado para ángulo de contacto entre recipientes y silletas de 180° se muestra las Figura 6.36, Figura 6.37 y Figura 6.38.

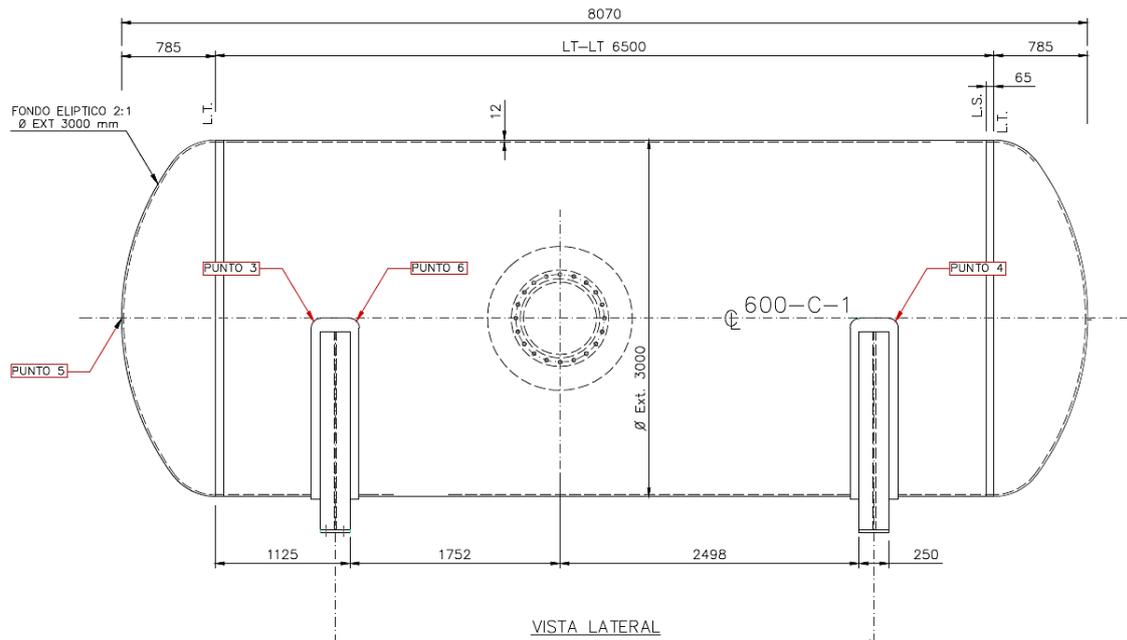


Figura 6.36 Nodos con esfuerzo máximo – vista lateral (modelo: ángulo de contacto de 180°)

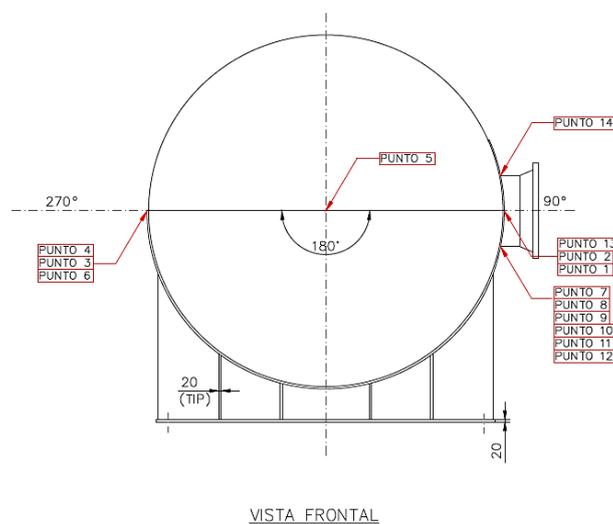


Figura 6.37 Nodos con esfuerzo máximo – vista frontal (modelo: ángulo de contacto de 180°)

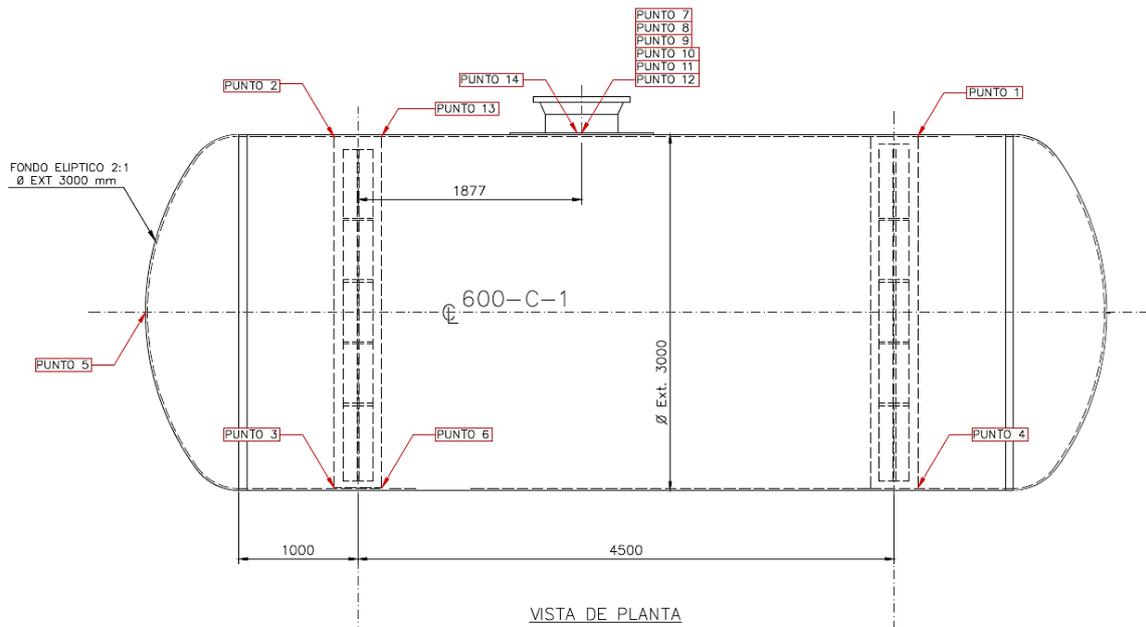


Figura 6.38 Nodos con esfuerzo máximo – vista de planta (modelo: ángulo de contacto de 180°)

(iii) Análisis General de casos Propuestos

La Tabla 6.13 muestra los esfuerzos máximos para cada uno de los casos analizados y la variación relativa del esfuerzo máximo en función del ángulo de contacto.

Tabla 6.13 Ángulo de contacto de silleta y esfuerzo máximo

Ángulo de Contacto (°)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Diferencia (%)
130	260.0	0
140	251.2	-3.40
150	247.3	-4.91
160	249.8	-3.95
180	249.1	-4.21

En la Figura 6.39 se han graficado estos resultados.

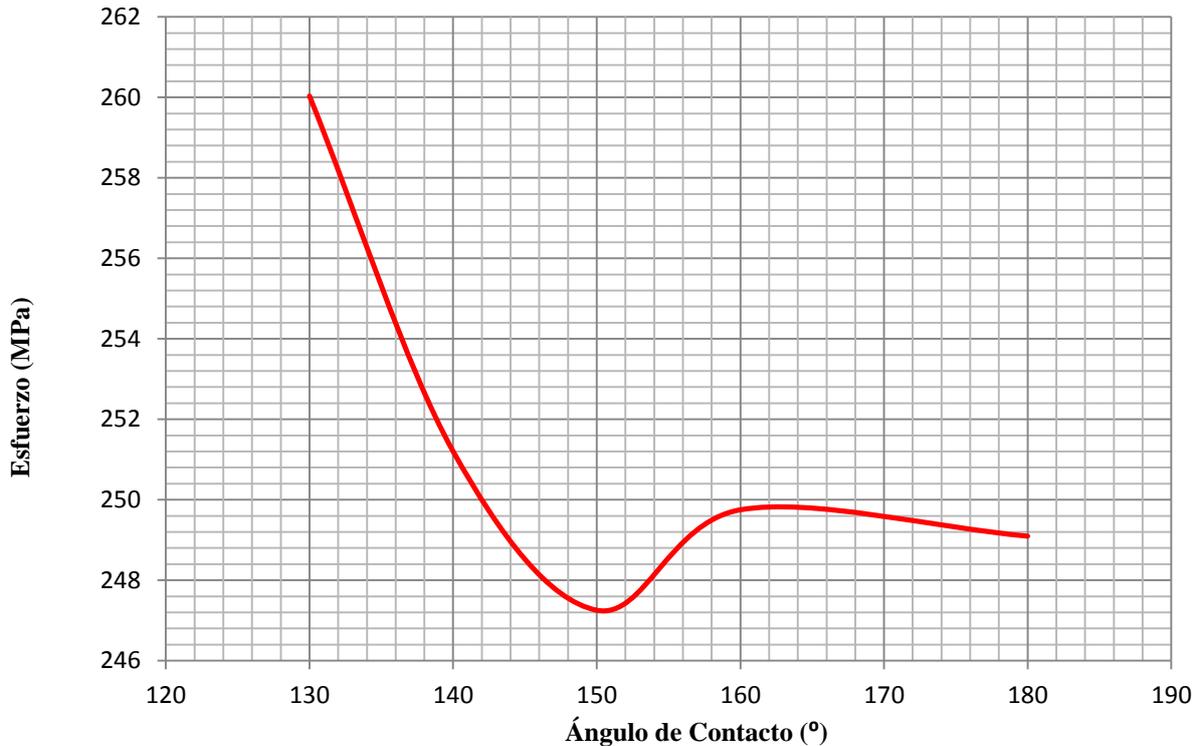


Figura 6.39 Esfuerzo Máximo vs Ángulo de Contacto de Silleta

Se observa que en un principio a medida que aumento el ángulo de contacto disminuye el esfuerzo máximo. Esto sucede hasta un ángulo de 150°, donde se obtiene el mínimo valor del esfuerzo máximo. Posteriormente, el esfuerzo tiende a elevarse un poco para luego disminuir nuevamente al llegar a un ángulo de contacto de 180°.

A continuación se presentan la Figura 6.40 y la Tabla 6.14, donde se comparan los esfuerzos máximos obtenidos en cada instante de tiempo para los diferentes casos estudiados.

Se observa que en general, todos los casos presentan dos picos de alto esfuerzo: el primero aparece poco tiempo después de la finalización de la fase positiva del perfil de presiones, y el segundo que se presenta tiempo después de la finalización de la fase negativa.

Por ejemplo en el caso de un ángulo de contacto de la silleta de 140°, el primer pico aparece a 5.08 ms (paso 19) con un esfuerzo de 235.4 MPa, mientras que el segundo pico aparece a 9.89 ms (paso 37) con un esfuerzo de 251.2 MPa (esfuerzo máximo).

Tabla 6.14 Esfuerzos máximos por paso para diferente ángulo de contacto de silleta

CASO		Ángulo de Contacto de Silleta				
		130° (Original)	140°	150°	160°	180°
Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1	0.27	0.0	0.0	0	0.0	0.0
2	0.53	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4
3	0.80	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8
4	1.07	24.2	24.2	24.2	24.2	26.0
5	1.34	37.9	37.9	37.9	37.9	41.0
6	1.60	25.6	26.5	31.4	40.4	58.9
7	1.87	26.2	30.5	42.4	55.2	80.2
8	2.14	30.6	43.1	58.9	74.6	104.3
9	2.41	43.4	61.2	79.0	96.1	129.9
10	2.67	62.8	81.9	100.3	118.7	154.1
11	2.94	84.1	103.2	121.3	140.6	174.9
12	3.21	105.5	124.1	141.2	159.2	190.8
13	3.48	126.7	144.5	160.5	174.4	201.1
14	3.74	148.0	165.0	179.7	192.0	208.0
15	4.01	169.6	185.7	199.3	209.9	221.2
16	4.28	190.3	205.7	218.2	227.3	234.5
17	4.55	207.3	222.1	233.6	241.4	244.6
18	4.81	218.4	232.4	242.8	249.2	249.1
19	5.08	222.4	235.4	244.6	249.8	246.9
20	5.35	220.0	231.6	239.6	243.5	238.5
21	5.62	213.6	223.7	230.1	232.6	225.9
22	5.88	206.7	214.9	219.6	220.6	211.7
23	6.15	202.8	208.6	211.0	210.1	198.4
24	6.42	203.6	206.9	206.8	203.4	187.8
25	6.69	207.2	207.8	205.0	199.0	178.9
26	6.95	211.4	209.2	203.6	194.7	169.3
27	7.22	214.0	209.1	200.7	188.8	157.9
28	7.49	213.7	206.3	195.3	180.7	145.1
29	7.75	210.4	201.0	188.0	171.2	132.0
30	8.02	204.8	194.1	179.8	165.9	128.0
31	8.29	198.4	189.5	187.4	177.8	134.8
32	8.56	195.5	203.4	200.8	191.2	144.5
33	8.82	208.6	217.3	215.5	205.1	155.9
34	9.09	221.2	230.1	229.0	217.9	167.0
35	9.36	232.2	240.7	239.6	227.7	176.8
36	9.63	240.8	247.9	245.9	232.8	183.9
37	9.89	246.6	251.2	247.3	232.3	185.5
38	10.16	249.9	250.9	244.1	226.5	181.6
39	10.43	251.3	249.2	237.7	218.7	173.3
40	10.70	252.0	246.5	229.5	210.4	161.9
41	10.96	255.4	243.5	222.2	201.1	148.5
42	11.23	258.4	240.2	215.0	191.2	133.9
43	11.50	260.0	236.1	207.5	180.7	117.9
44	11.77	259.8	231.1	199.5	169.5	100.6
45	12.03	257.7	225.3	191.3	157.9	82.3
46	12.30	254.5	219.6	183.4	146.6	87.0
47	12.57	251.4	215.0	176.8	136.6	93.2
48	12.84	249.1	212.0	171.9	128.6	94.6
49	13.10	248.1	210.8	168.9	122.6	92.6
50	13.37	248.1	210.7	167.1	118.1	88.8
51	13.64	248.5	210.9	165.9	114.2	85.0
52	13.90	249.0	210.7	164.8	110.1	81.7

Tabla 6.15 Esfuerzos máximos por paso para diferente ángulo de contacto de silleta (continuación)

CASO		Ángulo de Contacto de Silleta				
		130° (Original)	140°	150°	160°	180°
Paso	Tiempo (ms)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
53	14.17	249.1	209.9	163.3	105.6	78.8
54	14.44	248.8	208.8	161.3	113.3	78.5
55	14.71	248.0	208.0	158.5	124.8	84.5
56	14.97	246.2	206.3	154.3	134.0	86.9
57	15.24	242.5	202.6	158.1	141.0	85.0
58	15.51	237.7	195.9	164.8	146.1	78.8
59	15.78	230.0	185.4	169.8	149.7	74.2
60	16.04	219.4	177.4	173.8	152.1	75.5

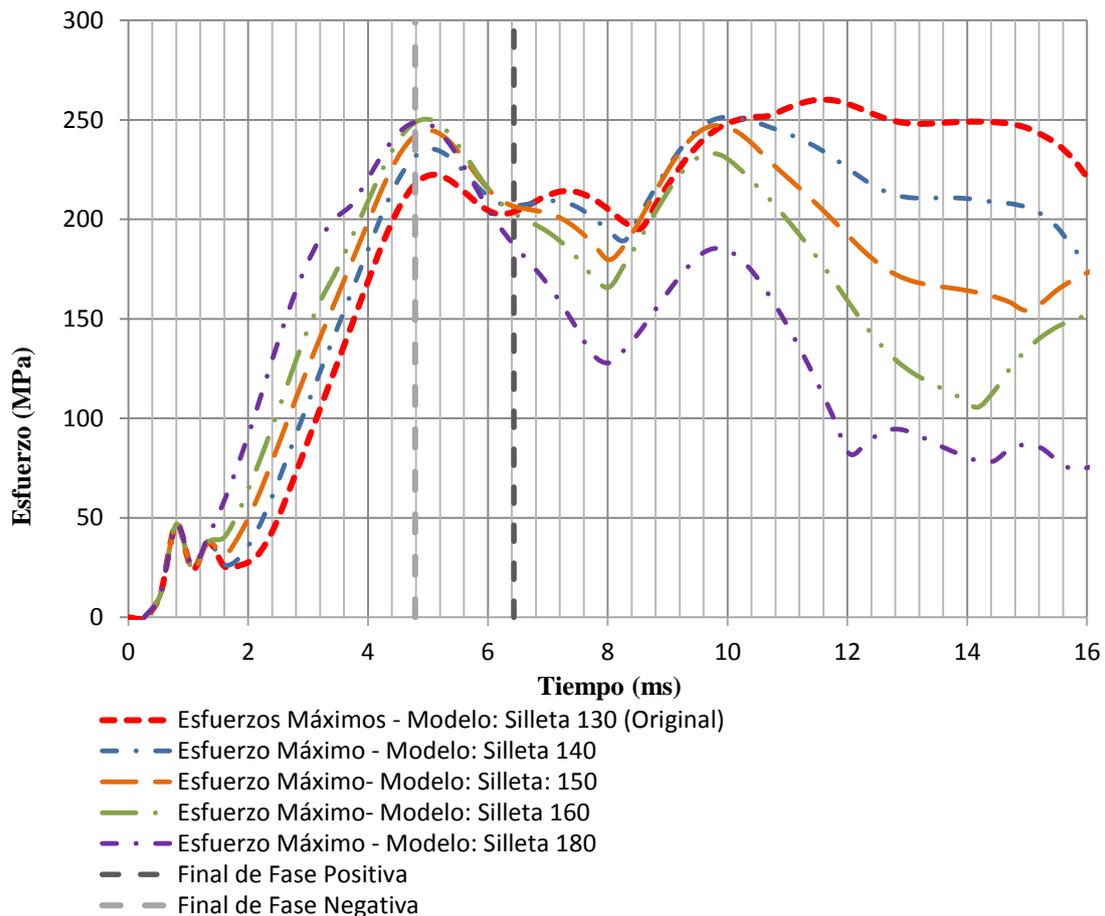


Figura 6.40 Esfuerzo vs Tiempo para puntos de análisis (diferentes ángulos de contacto)

Como se observa en la Figura 6.40 anterior, en todos los casos de estudio el valor del primer pico de alto esfuerzo que aparece poco tiempo después de la finalización de la fase positiva del perfil de presiones, crece a medida que aumenta el ángulo de contacto con la silleta. Lo

contrario ocurre con el segundo pico de alto esfuerzo (que aparece tiempo después de la finalización de la fase negativa) que disminuye a medida que aumenta el ángulo de contacto con la silleta. Este comportamiento provoca que el esfuerzo máximo de todo el análisis que se encontraba inicialmente (para el caso del ángulo de contacto de 130°) en el segundo pico de alto esfuerzo, cambie para el caso de un ángulo de contacto de 160° , al primer pico de alto esfuerzo. La Figura 6.41, Figura 6.42, Figura 6.43 y Figura 6.44 muestra la ubicación de los puntos donde se obtienen los máximos esfuerzos (comparar con la Figura 6.15).

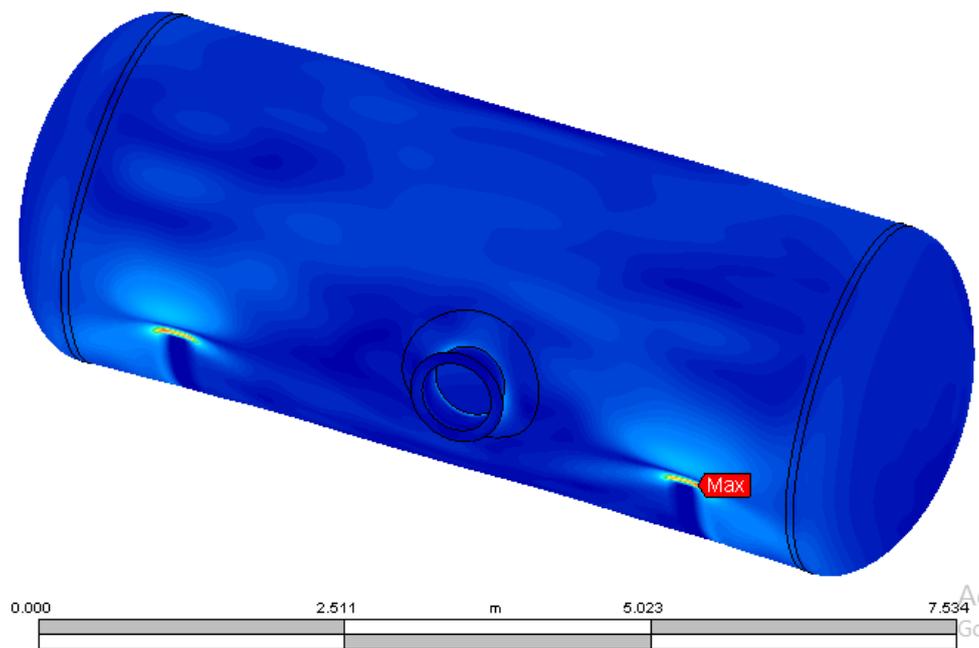


Figura 6.41 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (modelo ángulo de contacto 140° , paso: 37)

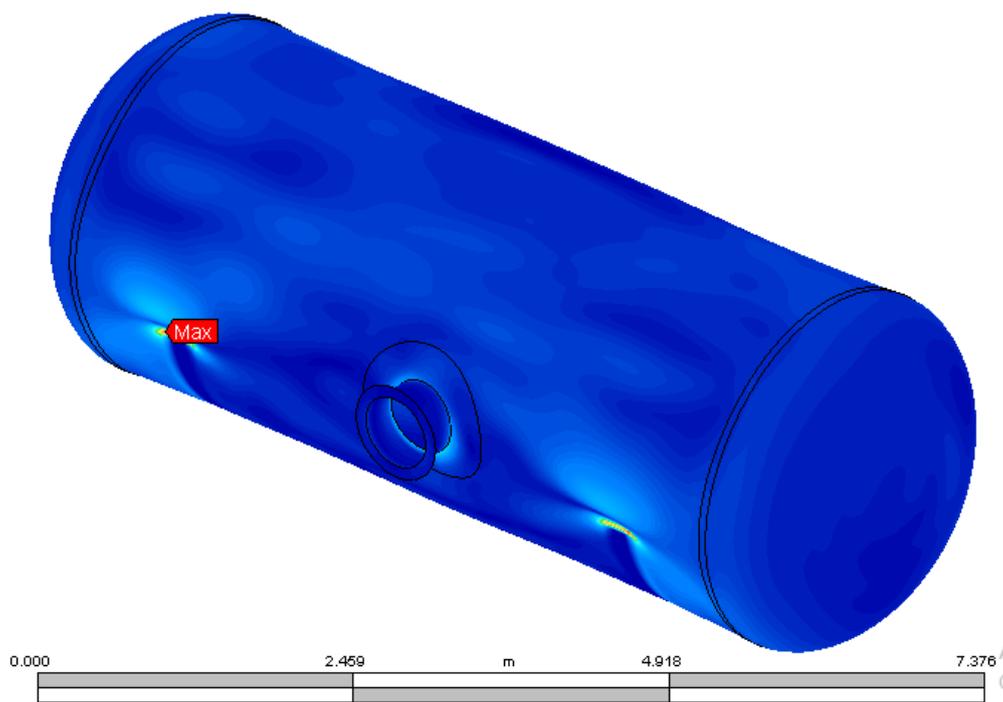


Figura 6.42 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (modelo ángulo de contacto 150°, paso: 37)

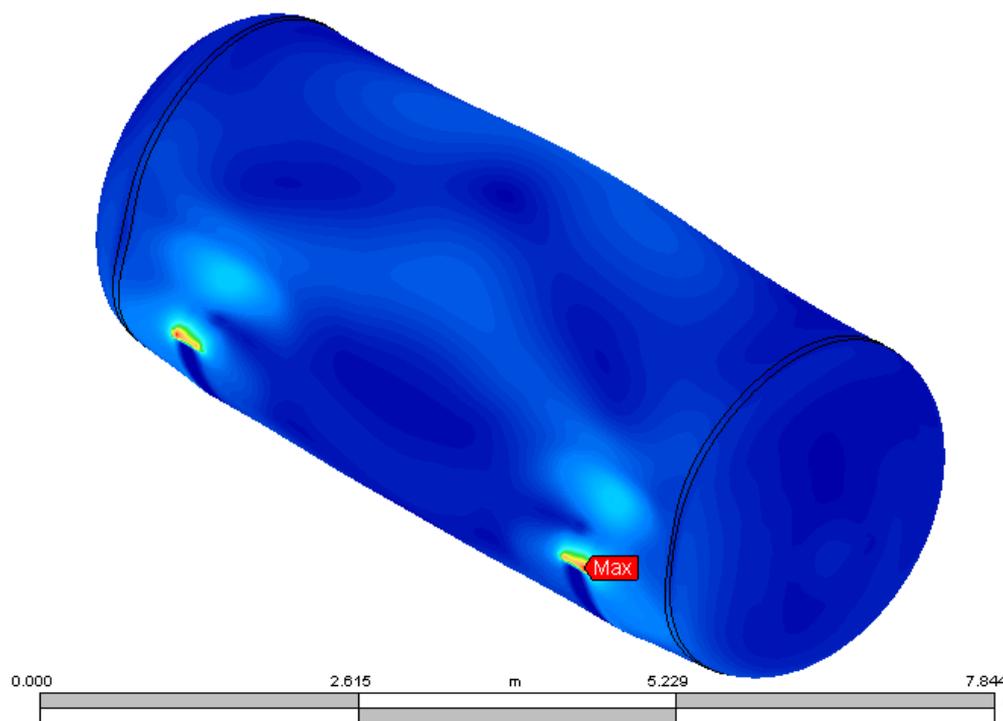


Figura 6.43 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (modelo ángulo de contacto 160°, paso: 19)

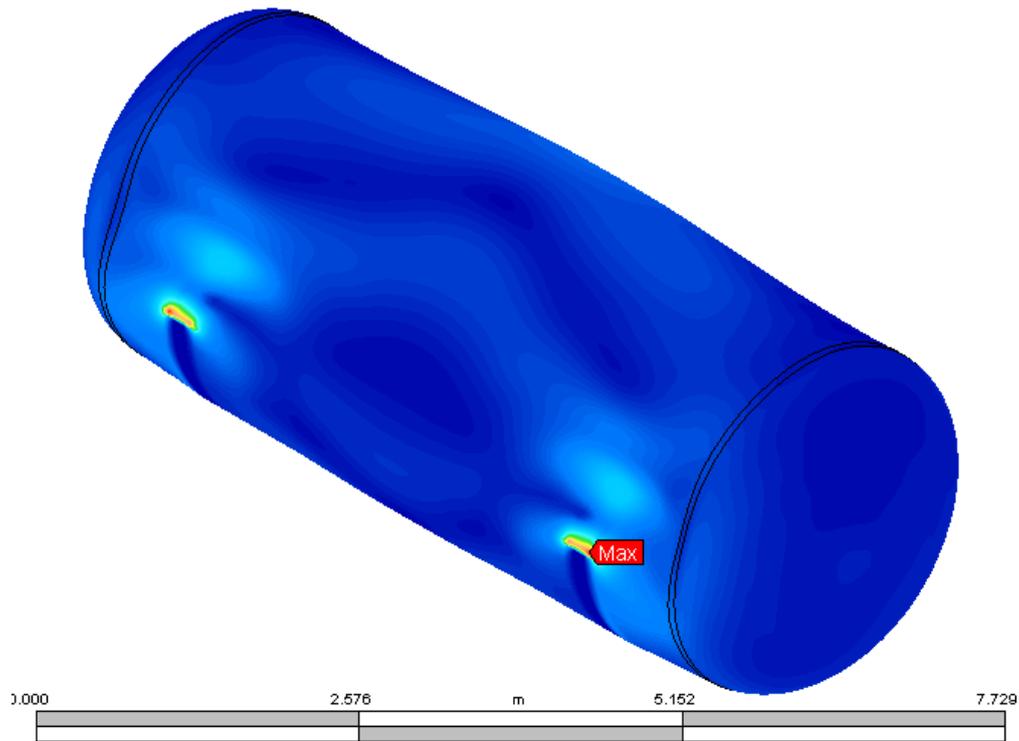


Figura 6.44 Resultados de Autodesk Simulation Multiphysics (modelo ángulo de contacto 180°, paso: 18)

Es preciso señalar también que dado el comportamiento que se indicó anteriormente la ubicación de los esfuerzo máximo en el tiempo pasó de encontrarse en la mitad de la superficie exterior del recipiente que no está afectad directamente por el perfil de presiones (concretamente puntos 1 y 2, en los casos de ángulos de contacto de: 130°, 140° y 150°) a ubicarse en la zona que está afectada directamente por el perfil de presiones (puntos de análisis: 3 y 4, en los casos de ángulos de contacto de: 160° y 180°) como se observa en las figuras anteriores.

6.2.E. Análisis para una masa constante de TNT equivalente

El siguiente análisis pretende observar la influencia de la distancia del recipiente a presión al foco de la explosión sobre los esfuerzos, cuando se mantiene constante la masa de TNT equivalente. Para ello se varió la distancia del recipiente al foco de la explosión utilizando una masa de TNT equivalente constante de 19.906 kg (necesaria para obtener el esfuerzo de

fluencia a 10 m).

En la Tabla 6.16 se indican las distancias simuladas, los parámetros de la curva que define el perfil de presiones aplicado y los esfuerzos máximos obtenidos en cada caso.

Tabla 6.16 Parámetros de perfil de presión tiempo y esfuerzo máximo para masa de TNT equivalente constante y diferentes distancias

d(m)	W(kg)	P_{max}(kPa)	P_{min}(kPa)	Esfuerzo Máximo(MPa)	t_a (ms)	t_d (ms)	t_n (ms)
10	19.906	75.88	-9.49	260.0	5.06	3.722	3.767
50	19.906	6.71	-1.90	49.1	45.41	5.826	3.767
120	19.906	1.91	-0.79	16.8	141.36	6.090	3.767
250	19.906	0.91	-0.38	6.9	520.37	7.210	3.767
500	19.906	0.45	-0.19	4.5	1249.23	8.456	3.767
1000	19.906	0.23	-0.09	3.2	2706.96	9.918	3.767

En todos los casos los nodo que presentaban los mayores esfuerzo máximo fueron los relacionados con las silletas que soportan al recipiente (puntos 1, 2, 3, y 4) y los ubicados en el centro de los cabezales (punto 5) como venía ocurriendo en el modelo original. Además en todos los casos el punto que posee el máximo valor de esfuerzo se encuentra en el punto de análisis 1 (ubicado en: X = 5.559, Y = 1.370, Z = -0.610).

Como se observa en la Tabla 6.16, al mantener la masa de TNT equivalente constante el tiempo de duración de la fase negativa t_n no se modifica aun variando la distancia al foco de la explosión, esto se debe a que de acuerdo a: Ecuación 3.8, Ecuación 3.9 y Ecuación 3.10 t_n depende en mayor grado de la masa de TNT equivalente. En cambio, la duración de la fase positiva t_d y el tiempo de arribo t_a se incrementan mientras aumenta la distancia al epicentro de la explosión.

Por otro lado, como era de esperarse, tanto la presión máxima como la presión mínima del perfil presión tiempo disminuyen en la medida que aumenta la distancia.

En la Figura 6.45 puede verse la rápida disminución de las presiones máximas positiva y negativa de la onda de presión al aumentar la distancia del recipiente al centro de la explosión. Mientras en la Figura 6.46 Figura 6.46 Esfuerzo Máximo vs Distancia para masa

de TNT equivalente constante se observa la disminución del esfuerzo máximo cuando varía la distancia.

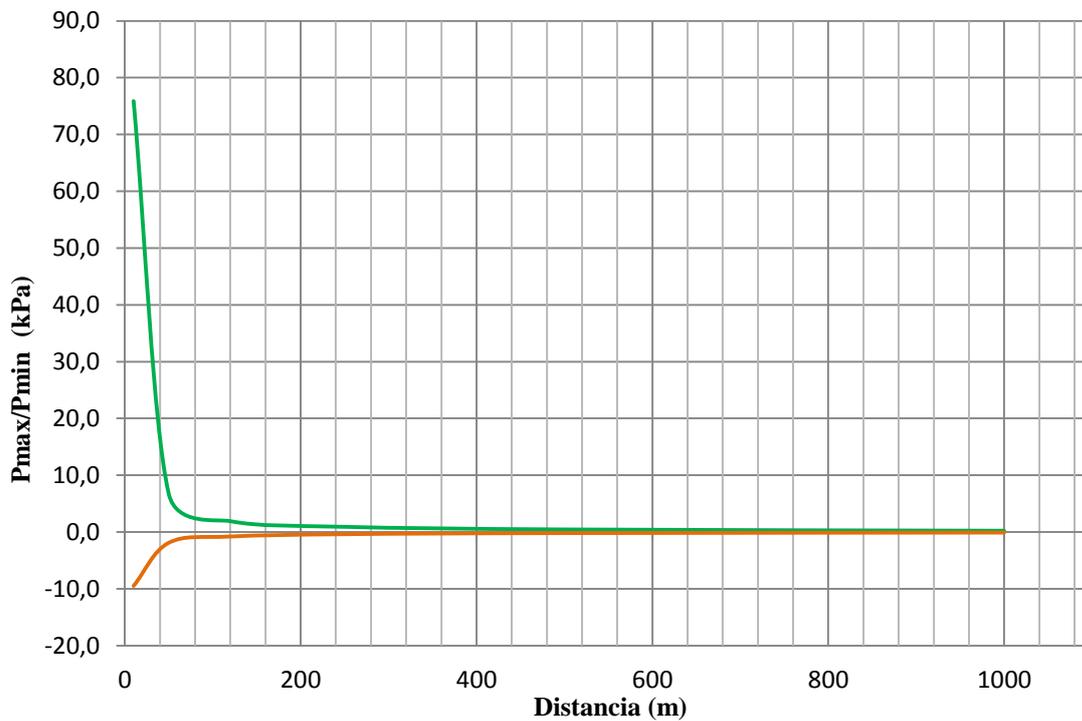


Figura 6.45 Presión Máxima / Mínima vs Distancia para masa de TNT equivalente constante

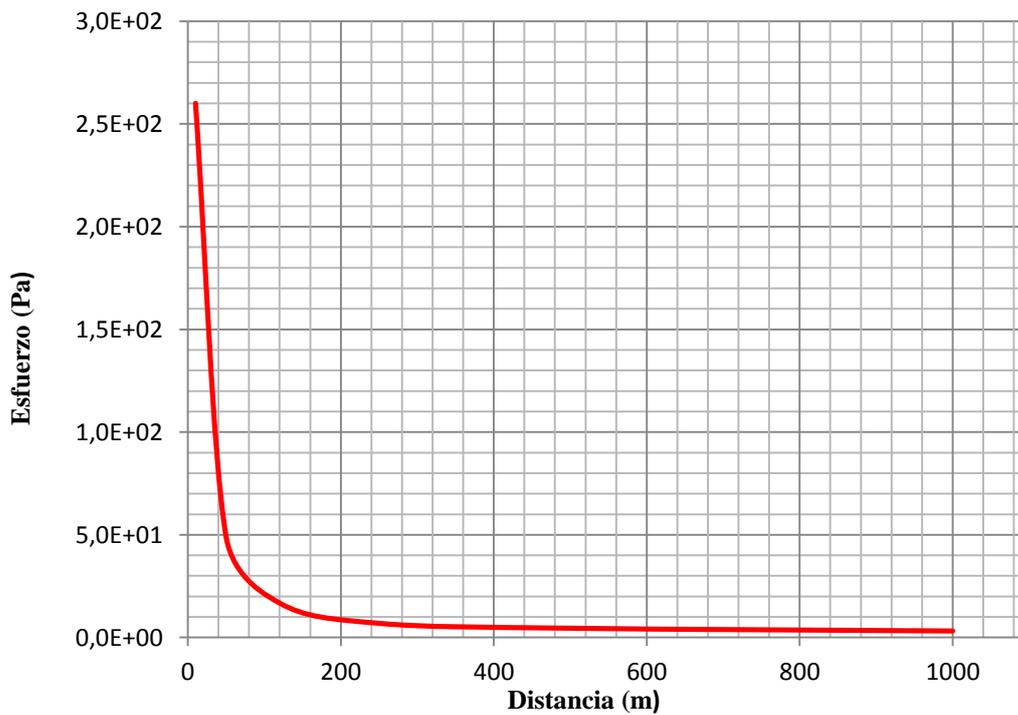


Figura 6.46 Esfuerzo Máximo vs Distancia para masa de TNT equivalente constante

CAPITULO 7

Conclusiones y Recomendaciones

7. CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

7.1. Conclusiones

El análisis histórico de accidentes demuestra que los eventos que generan la falla o el colapso de recipientes conteniendo sustancias peligrosas han sido causa de algunos de los accidentes más graves de la industria química. Por este motivo, el estudio de las cargas a las que están sometidos los recipientes cuando son alcanzados por las ondas de choque de una explosión y las posibles fallas resultantes es un tema de gran interés en el área de la seguridad de procesos.

En este sentido, la simulación computacional utilizando el análisis dinámico del sólido ha demostrado ser una herramienta de suma utilidad. En particular, el uso de Autodesk Simulation Multiphysics para estudiar el comportamiento estructural de recipientes brinda versatilidad y rapidez para analizar diferentes escenarios e identificar los puntos con mayor afectación.

En esta tesis se presentan los resultados alcanzados al considerar dos tipos de recipientes frecuentemente utilizados en la industria de procesos: un tanque atmosférico y un recipiente horizontal a presión. Ambos se han expuesto a una onda de presión producida por una explosión simulada que se representa por kg de TNT equivalente y cuya magnitud es suficiente para someter al recipiente a su tensión de fluencia. En este análisis no se ha considerado el efecto del contenido de estos recipientes.

A continuación se enuncian las principales conclusiones obtenidos durante el desarrollo de este trabajo.

7.1.A. Tanque cilíndrico atmosférico

- La onda de presión capaz de llevar al recipiente al esfuerzo de fluencia es producida por una masa de TNT equivalente de 0.131 kg, asumiendo una distancia de 10 m entre el epicentro de la explosión y el recipiente. Este perfil presenta una presión máxima $P_{max} = 6.18 \text{ kPa}(g)$, una presión mínima $P_{min} = -1.77 \text{ kPa}(g)$, una duración de la fase positiva $t_d = 5.96 \text{ ms}$ y una duración de la fase negativa $t_n = 0.71 \text{ ms}$.
- Los puntos donde se presentan los mayores esfuerzos coinciden con los pernos de anclaje ubicados en el área frontal del tanque, zona impactada directamente por la onda de choque. El punto más afectado es la zona del perno más cercano al eje 90° - 270° . Allí la onda actúa casi perpendicularmente al recipiente, deformándolo en el sentido de propagación de la misma y sometiénolo a un esfuerzo muy cercano a la fluencia.
- El ángulo de incidencia de la onda de choque no modifica los efectos sobre el tanque analizado. Los esfuerzos obtenidos en todos los casos son similares tanto en la magnitud del esfuerzo como en la ubicación de los puntos donde se producen los esfuerzos más importantes. Esto se debe a la forma cilíndrica del tanque que es simétrica para cualquier ángulo de incidencia de la onda de presión.
- Al aumentar el número de anclajes disminuye la magnitud del esfuerzo máximo, aunque el punto de mayor esfuerzo sigue apareciendo en la zona del perno de anclaje más cercano al eje 90° - 270° . Por otra parte, se observa que los esfuerzos máximos aparecen en tiempos más cortos a medida que aumenta el número de pernos de anclaje. La disminución de la magnitud de los esfuerzos se debe a que al aumentar los pernos las tensiones se distribuyen de manera más uniforme.

- En caso de explosiones de iguales características (masa constante de TNT equivalente), el efecto de la variación de la distancia al foco de la explosión se manifiesta de distintas maneras. El tiempo de arribo t_a y la duración de la fase positiva t_d se incrementan cuando aumenta la distancia, mientras que el tiempo de duración de la fase negativa t_n se mantiene constante. Por otro lado, se observa que tanto la presión máxima como la presión mínima de la onda de choque disminuye a medida que aumenta la distancia, lo que verifica el concepto intuitivo de que la onda se atenúa al alejarse del epicentro de la explosión. Cabe señalar que, como en todos casos estudiados, los esfuerzos máximos se presentan en las zonas de los pernos ubicados en el área frontal del tanque y más cercanos al eje 90^0 - 270^0 .

7.1.B. Recipiente horizontal a presión

- Para alcanzar el esfuerzo de fluencia en este tipo de recipientes se requiere una explosión notablemente mayor que en el caso de los tanques atmosféricos, correspondiente a una masa de TNT equivalente de 19.906 kg. La onda de choque producida tiene una presión máxima $P_{max} = 75.88 \text{ kPa}(g)$, una presión mínima $P_{min} = -9.49 \text{ kPa}(g)$, una duración de la fase positiva $t_d = 3.72 \text{ ms}$ y una duración de la fase negativa $t_n = 3.77 \text{ ms}$. Se asume una incidencia del perfil de presiones perpendicular al eje del recipiente y una distancia entre el recipiente y el centro de la explosión es de 10 m. Esta diferencia notable en la masa de TNT equivalente se debe a que estos recipientes, al estar diseñados para soportar presiones superiores a la atmosférica, se construyen con mayores espesores y materiales más resistentes.
- En el recipiente analizado los mayores esfuerzos están relacionados con las silletas que lo soportan. El punto donde se alcanza la tensión de fluencia se encuentra ubicado sobre una de las silletas en la parte posterior del recipiente, del lado donde no actúa

directamente el perfil de presiones. Ello se debe a la natural de vibración del recipiente (período natural de vibración) y las tensiones que aparecen en el recipiente al deformarse por efecto de la onda.

- Al aumentar el ángulo de incidencia de la onda de choque, disminuye la cantidad de masa de TNT equivalente requerida para alcanzar las tensiones de fluencia. Las ondas presentan menores presiones máximas y mayores presiones mínimas (menores en valor absoluto). El escenario más desfavorable para una explosión se produce cuando el ángulo de incidencia es de 90° , es decir el perfil de presiones actúa perpendicular a uno de los cabezales del recipiente. En este caso los esfuerzos máximos se localizan sobre el cabezal afectado directamente por la onda de presión.
- Uno de los resultados más interesante de este trabajo es el asociado al análisis del ángulo de contacto entre el recipiente y las silletas cuando incide una onda perpendicular al eje del recipiente. Por normas de diseño este ángulo está comprendido entre 120° y 180° , sin embargo se obtuvieron importantes cambios en los esfuerzos máximos al variar los ángulos en ese rango. Partiendo del ángulo inicial de 130° , se observó que, a medida que el ángulo aumenta, el esfuerzo máximo disminuye hasta ángulos cercanos a 150° , posteriormente tiende a elevarse un poco para luego disminuir ligeramente en ángulos cercanos a 180° . Un valor de 150° resultó ser el óptimo para el ángulo de contacto de la silleta. Respecto a la ubicación de los puntos donde se encuentran los esfuerzos máximos, como en los casos anteriores están relacionados a las silletas. Sin embargo, a medida que aumenta el ángulo de contacto, los puntos de esfuerzo máximo se desplazan desde el lado posterior del recipiente (donde no actúa directamente la onda de presión) al lado frontal que recibe el impacto directamente. Esto ocurre debido a que, a medida que aumenta el ángulo de contacto,

la estructura se vuelve más rígida e impide el desplazamiento de los puntos del lado donde actúa la carga, lo que genera más tensión en los mismos.

- En cuanto a las consecuencias de modificar las distancias al centro de la explosión en explosiones de iguales características (masa constante de TNT equivalente), las conclusiones respecto a las presiones máximas y mínimas y a los tiempos de arribo y de fase positiva y negativa, son las mismas que las comentadas para los tanques atmosféricos. Finalmente, como en todos los casos estudiados, los esfuerzos máximos se presentan en puntos relacionados con las silletas que soportan al recipiente a presión. El punto donde se alcanza el esfuerzo más cercano a la fluencia se encuentra sobre una de las silletas en el lado donde no actúa directamente el perfil de presiones de la explosión y aparece un tiempo después de terminada la acción de la onda de choque.

7.2. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos se sugieren las siguientes recomendaciones y propuestas para futuras líneas de trabajo.

- Modelar de manera más rigurosa los soportes (silletas de recipiente a presión y componentes del sistema de anclaje del tanque) para analizar con más detalle cómo reaccionan ante la onda de choque.
- Incluir en próximas líneas de estudio el efecto de la temperatura sobre el material, para simular no solo el efecto de la onda de presión sino también la influencia de las altas temperaturas en el caso de incendio. Las altas temperaturas pueden llegar a disminuir el esfuerzo de fluencia del material considerablemente y por consiguiente causar una falla prematura de la estructura.

- En el trabajo presentado se ha analizado la respuesta de tanques atmosféricos y recipientes horizontales a presión vacíos, en próximos estudios se recomienda tener en cuenta el contenido del recipiente, incluyendo diferentes niveles de llenado. Esto permitiría analizar la influencia de la masa del fluido en los casos presentados, lo que podría causar importantes modificaciones en el comportamiento dinámico de la estructura.
- Con el fin de modelar la fase negativa del perfil presión-tiempo, utilizar expresiones más precisas en reemplazo del modelo bilineal utilizado en este trabajo.
- Finalmente, se recomienda la utilización de herramientas de CFD (“Computational Fluid Dynamics”) para la simulación rigurosa de las sobrepresiones generadas en la explosión y el comportamiento del fluido contenido en los recipientes.

CAPITULO 8

Bibliografía

8. BIBLIOGRAFÍA

Industrial accident in Bhopal: 25 years later. (2009). Obtenido de Sputniknews.com:

<http://sputniknews.com/photo/20091204/157098959.html>

Journal Oil-Mineral N° 236. (2013). Obtenido de Issuu:

<https://issuu.com/artesjournal/docs/journaloil-mineral236>

Imágenes de la gigantesca nube química de Iqualada | ABC. (2015). Obtenido de Abc.es:

<http://www.abc.es/fotos-espana/20150212/imagenes-gigantesca-nube-quimica-162300226758.html>

Homepage - Electricity Supply Board. (2016). Obtenido de Esb.ie: <https://www.esb.ie/>

MSC's Civil Simulation Software volgt trend. (2016). Obtenido de Insumma.nl:

<http://www.insumma.nl/news/nl/mscs-civil-simulation-software-volgt-trend/2015-08-04>

Separadores de Líquidos, Gases y Sólidos | Bolland. (2016). Obtenido de Bolland.com.ar:

<http://www.bolland.com.ar/en/node/76>

Shell & Tube warmtewisselaars . (2016). Obtenido de Marefsup.nl:

<http://www.marefsup.nl/nl/warmtewisselaars/34>

Sistema de gas Archives - EcuadorTimes.net. (2016). Obtenido de EcuadorTimes.net |

Breaking News, Ecuador News, World, Sports, Entertainment:
<http://www.ecuadortimes.net/es/topic/sistema-de-gas/>

Aman, Z., Weixing, Z., Shiping, W., & Linhan, F. (2011). Dynamic response of the non-contact underwater. (ELSEVIER, Ed.) *Marine Structures*, 24, 396-411.

American Institute of Chemical Engineers. (2000). *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis* (2nd ed.). New York: Center of Chemical Process Safety.

American Petroleum Institute. (1994). Specification for Field Welded Tanks for Storage of Production Liquids, API Specification 12D.

American Petroleum Institute. (1994). Specification for Shop Welded Tanks for Storage of Production Liquids, API Specification 12F.

American Petroleum Institute. (1995). Specification for Bolted Tanks for Storage of Production Liquids, API Specification 12B.

American Petroleum Institute. (2002). Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks, API Standar 620.

American Petroleum Institute. (2013). Welded Tanks for Oil Storage, API Standard 650.

American Society of Civil Engineers. (1997). Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. Restone, Virginia.

American Society of Mechanical Engineers. (1999). Rules for Construction of Heating Boilers, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section IV.

American Society of Mechanical Engineers. (2001). Rules for Construction of Power Boilers, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section I.

American Society of Mechanical Engineers. (2007). Rules for Construcction of Pressure Vessels, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 1.

American Society of Mechanical Engineers. (2007). Alternative Rules for Construcction of High Pressure Vessels, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division

3.

- American Society of Mechanical Engineers. (2007). *Alternative Rules for Construcction of Pressure Vessels*, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 2.
- Baker, W. E. (1973). *Explosions in the Air*. Austin: University of Texas Press.
- Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kules, J. J., & Strehlow, R. A. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation* . Amsterdam: Elsevier.
- Balkan, D., & Mecitoglu, Z. (2014). Nonlinear dynamic behavior of viscoelastic sandwich. *International Journal of Impact Engineering*, 72, 85-104.
- Bambach, M. R. (Julio de 2013). Design of metal hollow section tubular columns subjected to transverse blast loads. *Thin-Walled Structures*, 68, 92-105.
- Boix, J. (2013). *Recipientes y Depositos*. Zaragoza: Prensa Universidad de Zaragoza.
- Botta, N. A. (2011). *Dinámica de las Explosiones Industriales* (1era ed.). Rosario: Red Proteger.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (Octava ed.). McGraw-Hill.
- Cabello, B. (2011). *Dynamic Stress Analysis of the effect of an Air Blast Wave on a Stainless Steel Plate (Project Master)*. Hartford: Rensselaer Polytechnic Institute.
- Casal y col, J. (1999). *Análisis del Riesgo en Instlaciones Industriales* (1era ed.). Barcelona: Edicions UPC.
- Cassano, A. M. (2009). *Análisis de Estructuras bajo Acciones Dinámicas*. Paraná: Universidad Tecnológica Nacional.
- Da Fonseca, Z. A. (2011). *El Método de Elementos Finitos una Introducción*. Maracibo: Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta.

- De Miguel, A. (2011). *Análisis Dinámico de Estructuras en el Dominio de la Frecuencia (Trabajo de Investigación Tutelado)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Drake, J., Twisdale, L., Frank, R., Dass, W., Rochefort, M., Walker, R., y otros. (1989). *Protective Construction Design Manual*. Florida: Air Force Engineering and Services Center, Tyndall Air Force Base.
- Enciso, F. A. (2014). Procedimiento para el Análisis Dinámico de Estructuras usando el Método de los Elementos Finitos (Tesis de Grado). Lima: Pontificia Universidad Católica de Perú.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2003). *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*.
- Galán, S. (2012). Explosión de Equipos a Presión. Análisis de Riesgos y Consecuencias (Proyecto Final de Carrera). Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Haywood, B. (2005). *Brittle Fracture (Catastrophic) Failure during HYDROTEST of Propane Bullet - Safety Engineering Network*. Obtenido de Safteng.net: <http://www.safteng.net/index.php/free-section/safety-info-posts/chemical-process-safety-psmrrmp/3647-brittle-fracture-catastrophic-failure-during-hydrotest-of-propane-bullet>
- Kingery, C. N., & Bulmash, G. (1984). *Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*. Maryland: Defence Technical Information Center, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground.
- Kinney, G. F., & Graham, K. J. (1985). *Explosive Shocks in Air*. Berlin: Springer.
- Kolakowski, Z., Kubiak, T., Kowal-Michalska, K., Mania, R., & Swiniarski, J. (Septiembre de 2010). Dynamic response of conical and spherical shell structures subjected to blast pressur. (E. Batista, P. Vellasco, & L. de Lima, Edits.) *SDSS'Rio*.

- Kowal-Michalska, K., Kubiak, T., & Swiniarski, J. (2011). Influence of blast pressure modeling on the dynamic response of conical and hemispherical shells. *Thin-Walled Structures*, 49, 604-610.
- Krauthammer, T., & Altenberg, A. (2000). Negative Phase Blast Effects on Glas Panels. *Internacional Journal of Impact Engineering*, 24(1), 1-18.
- Larcher, M. (2007). Simulation of the Effects of an Air Blast Wave. Ispra, Italy: Joint Research Centre-European Commission. Institute for the Protection and Security of the Citizen.
- Larcher, M. (2008). Pressure-Time Functions for the Description of Air Blast Waves. Ispra, Italy: Joint Research Centre-European Commission. Institute for the Protection and Security of the Citizen.
- Lees, F. P. (1996). *Loss Preventions in the Process Industries* (2nd ed., Vol. 2). London: Butterworth-Heinemann.
- Lin, C.-C., & Chang, J. I. (2006). A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 51-59.
- Lopes, W. (2007). Blast – Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas (Tese de Mestre). São José dos Campos, SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- Martínez, F. (2013). *Tanques de Almacenamiento*. Zaragoza: Prensa Universidad de Zaragoza.
- Mohamed Ali, R. M., & Louca, L. A. (2008a). Performance-based design of blast resistant offshore topsides Part I: Philosophy. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 1030-1045.

- Mohamed Ali, R. M., & Louca, L. A. (2008b). Performance-based design of blast resistant offshore topsides, Part II: Modelling and design. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 1046-1058.
- National Aeronautics and Space Administration. (1993). *Workbook for Predicting Pressure Wave and Fragment Effects of Exploding Propellant Tanks and Gas Storage Vessels*. San Antonio, Texas.
- Ngo, T., Mendis, P., Grupta, A., & Ramsay, J. (2007). Blast Loading and Blast Effect on Structures - An Overview. *Electronic Journal of Structural Engineering, Special Issue*.
- Pintor Borobia, J. M. (2015). *Elementos de Maquinas y Vibraciones*. Universidad Publica de Navarra.
- Portillo, G. (2008). Analisis y Diseño de un Recipiente a Presión para el almacenamiento de Gas Natural utilizando un material alternativo SA-283-C (Tesis de pregrado). Mexico D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Reniers, G., & Cozzani, V. (Edits.). (2013). *Domino Effects in the Process Industries* (Primera ed.). ELSEVIER.
- Rigby, S. E., Tyas, A., Bennett, T., Clarke, S. D., & Fray, S. D. (2014). Negative Phase of the Blast Load. *Internacional Journal of Protective Structures*, 5(1).
- Salman, A. D., Ghadiri, M., & Hounslow, M. J. (2007). Handbook of Powder Technology. En *Volumen 12. Particle Breakage* (pág. 1219). Amsterdam: ELSEVIER.
- Salzano, E. P., Khan, F., & Amyotte, P. (2013). *Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing* (1st ed.). (G. Renniers, & V. Cozzani, Edits.) Elsevier.

- Santana, M. (1996). Seguridad en Plantas Químicas Fuego y Explosiones (Tesis de Pregrado). Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.
- Sohn, M. J., Kim, H. B., & Paik, K. J. (2013). Nonlinear structural consequence analysis of FPSO topside blastwalls. *Ocean Engineering*, 60, 149-162.
- Xiaoyuan, W., Faxin, L., & Xiao, Y. (Abril de 2012). Fire and explosion domino effect caused by overpressure evaluation on pressurized spherical tank. *8th Global Congress on Process Safety*, 1-4.
- Zhang, B. Y., Li, H. H., & Wang, W. (2015). Numerical study of dynamic response and failure analysis of spherical storage tanks under external blast loading. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 34, 209-2017.

ANEXOS

ANEXO A

Constantes y Rangos de ecuaciones de Kingery

Constantes y Rangos de ecuaciones de Kingery para Parámetros de onda de choque
(Lees, 1996)

$$\log_{10}\Phi = \sum_{i=0}^n C_i(a + b \cdot \log_{10}Z)^i$$

CONST	RANGO	Pmax (kPa)	ta (ms)	td (ms)
	1	0,0674 ≤ Z ≤ 40	0,0674 ≤ Z ≤ 40	0,178 ≤ Z ≤ 1,01
	2			1,01 ≤ Z ≤ 2,78
	3			2,78 ≤ Z ≤ 40
a	1	-0,21436278915100	-0,20242571617800	1,9294615406800
	2			-2,1249252521600
	3			-3,5362621809100
b	1	1,35034249993000	1,37784223635000	5,2509919392500
	2			9,2996288611000
	3			3,4634974557100
C1	1	2,78076916577000	-0,05916342880460	-0,6142276035590
	2			0,3154092457840
	3			0,6869066424090
C2	1	-1,69589887410000	1,35706496258000	0,1301437176750
	2			-0,0297944268976
	3			0,0933035304009
C3	1	-0,15415937684600	0,05249279864500	0,1348725119540
	2			0,0306329552880
	3			-0,0005849420883
C4	1	0,51406073059300	-0,19656395408600	0,0391574276906
	2			0,0183405574086
	3			-0,0022688499501
C5	1	0,09885543652740	-0,06017700522880	-0,0047593366470
	2			-0,0173964666211
	3			-0,0029590859151
C6	1	-0,29391262303800	0,06963602708910	-0,0042814459801
	2			-0,0010632196363
	3			0,0014802986893
C7	1	-0,02681123450190	0,02152974900920	0,0056206003098
	2			
	3			

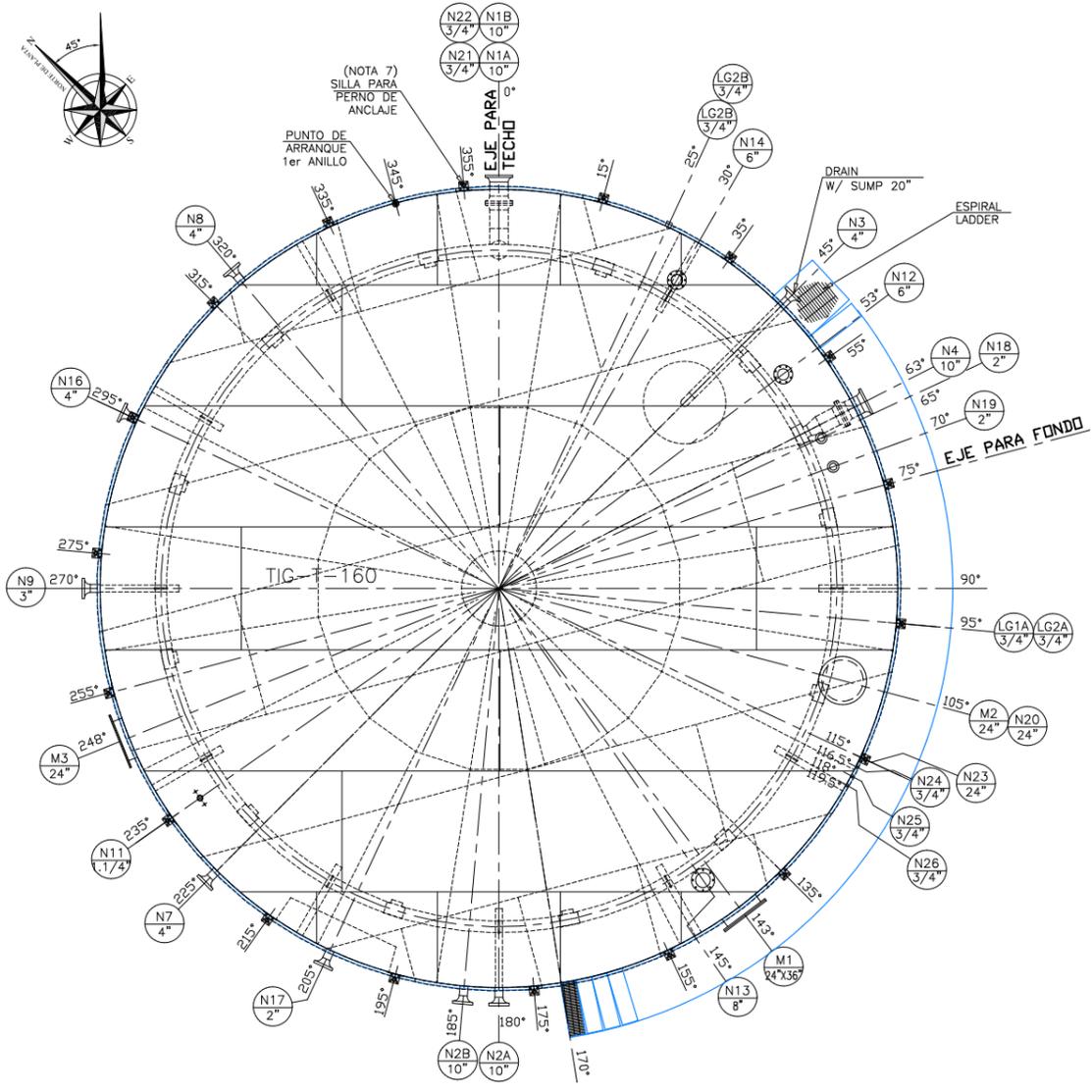
Constantes y Rangos de ecuaciones de Kingery para parámetros de onda de choque (Lees, 1996) (continuación)

$$\log_{10}\Phi = \sum_{i=0}^n C_i(a + b \cdot \log_{10}Z)^i$$

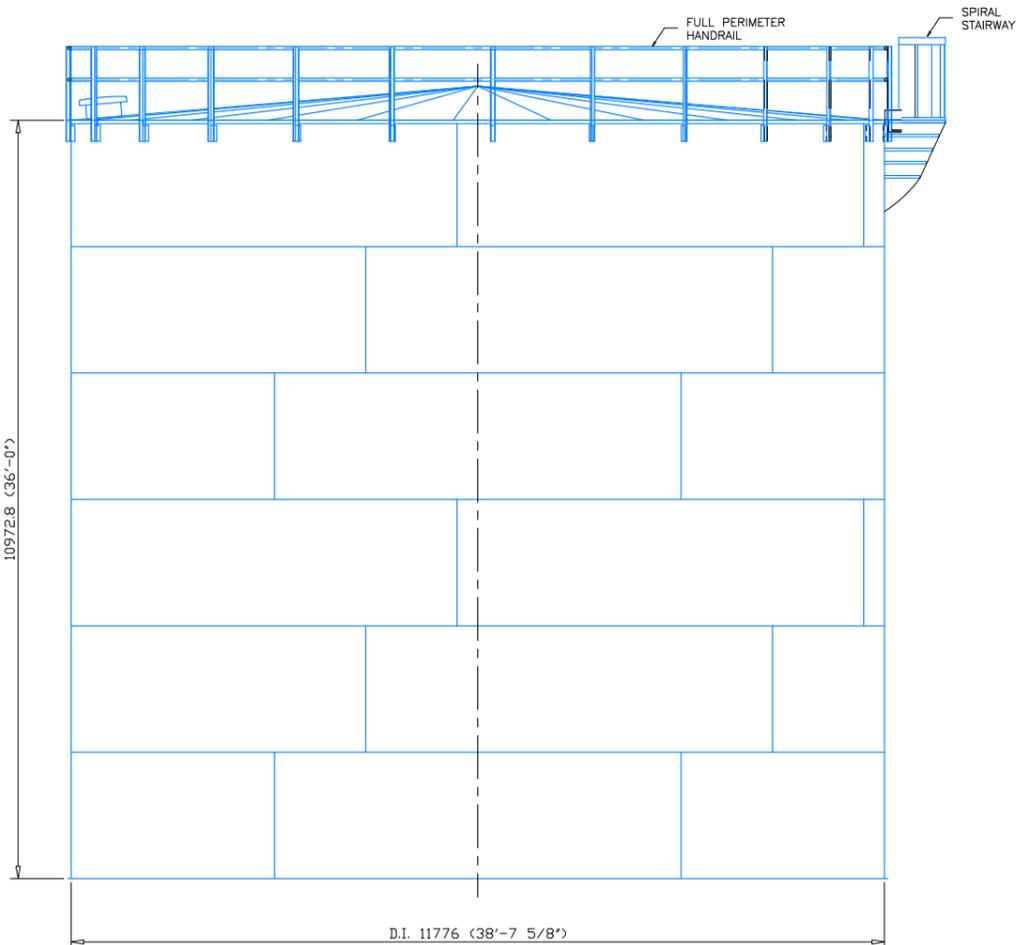
CONST	RANGO	Pmax (kPa)	ta (ms)	td (ms)
	1	0,0674 ≤ Z ≤ 40	0,0674 ≤ Z ≤ 40	0,178 ≤ Z ≤ 1,01
	2			1,01 ≤ Z ≤ 2,78
	3			2,78 ≤ Z ≤ 40
C8	1	0,10909749642100	-0,01616589307850	0,0001618217499
	2			
	3			
C9	1	0,00162846756311	-0,00232531970294	-0,0006860188944
	2			
	3			
C10	1	-0,02146310302420	0,00147752067524	
	2			
	3			
C11	1	0,00014567233820		
	2			
	3			
C12	1	0,00167847752266		
	2			
	3			

ANEXO B

Planos de la ingeniería básica y de detalle del tanque skimmer



ORIENTATION
ESC: 1:100



ELEVATION
ESC: 1:100

PARA CONSTRUCCION

APROBADO APROBADO CON COMENTARIOS

REVISION CON COMENTARIOS RECHAZADO

POR:

FECHA: f.)

NOTES

- ALL ELEVATION ARE FROM TOP OF BOTTOM PLATE.
- NOZZLE PROJECTION ARE MEASURED FROM UT SIDE OF TANK SHELL OR ROOF
- ALL DIMENTION ARE IN mm.
- ALL ITEM INDICATED IN THESE DRAWING ARE TO BE SUPPLIED BY THE VENDOR, EXCEPT IN HERE NOTED OTHERWISE.
- TANK ARE TO BE ERCTED ON AN EXISTING CONCRETE FOUNDATION. ANCHOR BOLT DESIGN, WHERE APPLICABLE, AND FOUNDATION LOADING TO BE THE SCOPE OF TANK VENDOR, ACCORDING CALCULATIONS MATERIAL ANCHOR BOLT IS A-193-B7.
- ALL NOZZLES NO USED SHALL BE BLIND, THESE NOZZLES ARE SPARES (N2B, N7, N8 N14)
- ORIENTATIONS FOR ANCHOR CHAIR SHALL BE VERIFIED IN FIELD.

PAINT

EXTERNAL PROTECTION (SHELL ROOF):
SAND BLASTING: PER SPECIFICATION TIG-MO-111
EXTERNAL PAINT PER SPECIFICATION TIG-MO-111

INTERNAL PROTECTION:

SAND BLASTING: PER SPECIFICATION TIG-MO-111
INTERNAL PAINT PER SPECIFICATION TIG-MO-111

ACCESORIES / INSTRUMENTS			
MARK	TAG	QTY	DESCRIPTION
N11	LEVEL INDICATOR	1	LEVEL INDICATOR W/FLOAT AND TARGET BOARD
N12	PVSV	1	PRESSURE AND VACUUM VALVE 2 onz./in2, -1 onz./in2.
N13	THEIF HATCH	1	VAREC DIA. 8" 42.8.11.V.A
N20	MANHOLE COVER RELIEF	1	VAREC DIA. 24" UBICADA SOBRE EL MANHOLE DE TECHO

DESIGN CONDITIONS	
CODE:	API 650/API 12D LAST EDITION
NOMINAL CAPACITY:	7517 BBL.
DESIGN PRESSURE:	2 onz/in2
VACCUM PRESSURE	-1 onz/in2
OPERATING PRESSURE:	---
CORROSION ALLOWANCE:	
1er., 2do. ANILLO CUERPO	1/16"
ROOF-LOADS:	25 lb/ft2
DESIGN TEMPERATURE:	200°F
OPERATING TEMPERATURE:	180°F
WIND:	80 KPH (50 MPH)
SIEMIC USED GROUP:	I
SITE CLASS.:	D
S _s :	100%
S _i :	40%
S _p :	40%
SPECIFIC GRAVITY:	1
STORAGE PRODUCT:	WATER INJECTION
JOINT EFFICIENT:	PER CODE
X RAY:	PER CODE
FILLING FLOW RATE:	30000 BPD
EMPTY FLOW RATE:	29970 BPD
TEST:	HYDROSTATIC

TANK DESCRIPTION			
MATERIALS			
DESCRIPTION	MATERIAL	THICKNESS & WIDE	WEIGHT(KG.)
BOTTOM	A-36	6.35	5517
ROOF	A-36	6.35	5478
RING 1	A-36	6.35	3358
RING 2	A-36	6.35	3358
RING 3	A-36	4.76	2517
RING 4	A-36	4.76	2517
RING 5	A-36	4.76	2517
RING 6	A-36	4.76	2459
TOP ANGLE	A-36	L 2"x2"x1/4"	176.1
ACC. SHELL	A-106-B/A-234-WPB/A105		750
ACC. ROOF	A-106-B/A-234-WPB/A105		160
ACC. BOTTOM	A-106-B/A-234-WPB/A105		355
INT. ACCESORIES	A-106-B/A-234-WPB/A105		2260
SPIRAL STAIRWAY & PLAT.	A-36		784
STRUCTURE	A-36		2952
HANDRAIL	A-36		536
ANCHOR BOLT CHAIRS	A-36/A-193-B7		1001
BOLT & NUTS	A-193-B7/A-194-2H		
GASKET RF.	SPIRAL WOUND STYLE CG		
GASKET FF.	SPIRAL WOUND STYLE CG		
TOTAL WEIGHT (KG.)			36695

MARK	QTY	DESCRIPTION	DIA.	TYPE	ORIENTATION	PROYECTION	ELEV./ROT.	POSITION	NOTAS
M3	1	MANHOLE DE CUERPO	24"	API 650	248°	--	--	CUERPO	
M2	1	MANHOLE DE TECHO	24"	API 650	105°	--	--	TECHO	
M1	1	BOCA DE LIMPIEZA	24"x36"	API 12B	143°	--	--	CUERPO	
LG2B	1	VISOR NIVEL INTERFACE	3/4"	CPLG. 6000#	25°	--	9295	CUERPO	
LG2A	1	VISOR NIVEL INTERFACE	3/4"	CPLG. 6000#	25°	--	9447	CUERPO	
LG1B	1	VISOR DE LIQUIDO	3/4"	CPLG. 6000#	85°	△	600	CUERPO	
LG1A	1	VISOR DE LIQUIDO	3/4"	CPLG. 6000#	85°	△	6900	CUERPO	
N26	1	TOMA MUESTRAS	3/4"	CPLG. 6000#	119.5°	--	9144	CUERPO	
N25	1	TOMA MUESTRAS	3/4"	CPLG. 6000#	118°	--	7925	CUERPO	
N24	1	TOMA MUESTRAS	3/4"	CPLG. 6000#	116.5°	--	7010	CUERPO	
N23	1	TOMA MUESTRAS	3/4"	CPLG. 6000#	115°	--	1524	CUERPO	
N21/N22	2	INDICADOR TEMPERATURA/PRESION	3/4"	CPLG. 6000#	0°	--	920	CUERPO	
N20	1	MANHOLE RELIEF	24"	150# WN.FF	105°	152	--	TECHO	
N19	1	NIVEL DE LIQUIDO	2"	150# WN.RF.	70°	152	--	TECHO	LT / FUTURO
N18	1	NIVEL INTERFACE	2"	150# WN.RF.	65°	152	--	TECHO	LT / FUTURO
N17	1	SALIDA DE CRUDO	2"	150# WN.RF.	205°	205	8635	CUERPO	
N16	1	REBOSE DE LIQUIDO	4"	150# WN.RF.	295°	205	9600	CUERPO	
N14	1	DISPONIBLE	6"	150# WN.RF.	30°	152	--	TECHO	CON BRIDA CIEGA
N13	1	BOCA DE AFORO	8"	150# WN.RF.	145°	152	--	TECHO	
N12	1	VALVULA DE PRESION DE VACIO	6" △	150# WN.FF.	53°	152	--	TECHO	EN EL MANHOLE DE TECHO
N11	1	INDICADOR DE NIVEL	1.1/2"	CPLG. 6000#	203°	--	--	TECHO	CON FLOTADOR/REGLETA EXTERIOR
N9	1	CAMARA DE ESPUMA	3"	150# WN.RF.	270°	205	10673	CUERPO	SCI
N8	1	DISPONIBLE	4"	150# WN.RF.	320°	205	315	CUERPO	CON BRIDA CIEGA
N7	1	DISPONIBLE	4"	150# WN.RF.	225°	205	235	CUERPO	CON BRIDA CIEGA
N6	1	ELIMINADA							
N5	1	ELIMINADA							
N4	1	ENTRADA DE AGUA DE PRODUCCION	10"	150# WN.RF.	63°	205	6594	CUERPO	
N3	1	DRENAJE CON SUMIDERO	4"	150# WN.RF.	45°	205	315	CUERPO	
N2B	1	SALIDA	10"	150# WN.RF.	185°	205	4525	CUERPO	CON BRIDA CIEGA
N2A	1	SALIDA DE AGUA	10"	150# WN.RF.	180°	205	335	CUERPO	
N1B	1	ENTRADA DE AGUA	10"	150# WN.RF.	0°	205	3305	CUERPO	AGUA DE PRODUCCION
N1A	1	ENTRADA DE AGUA	10"	150# WN.RF.	0°	205	1486	CUERPO	PARA LLENADO AGUA DURANTE ARRANQUE

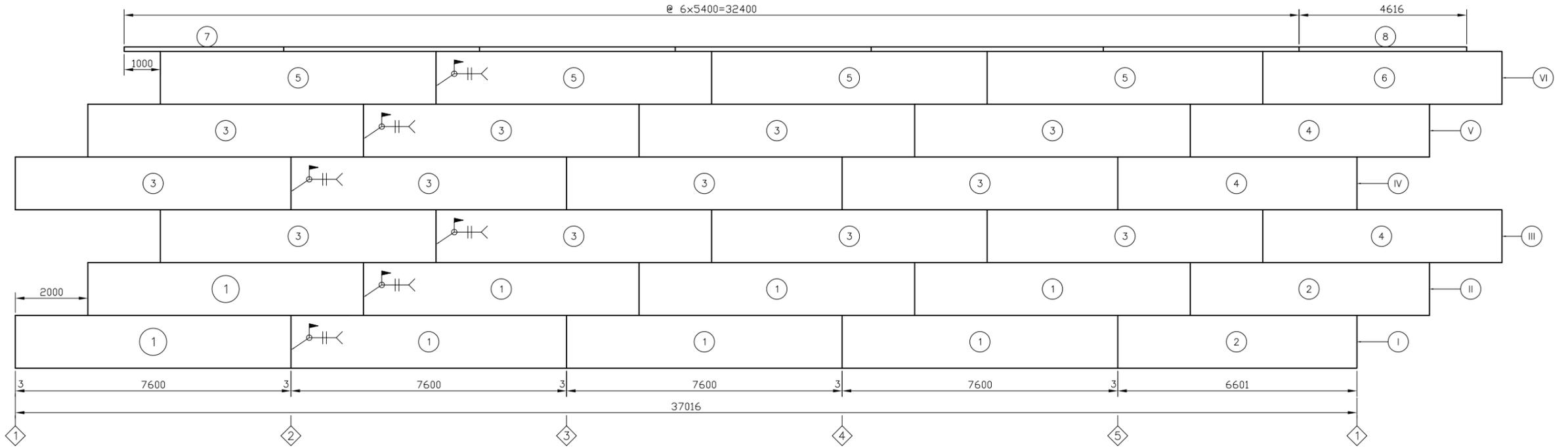
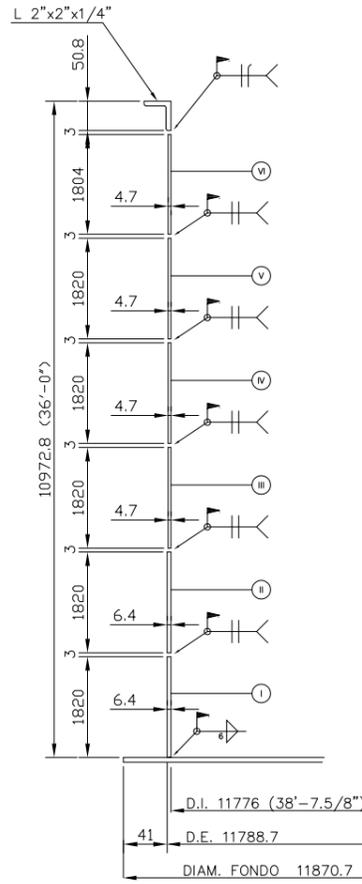
CONNECTIONS (*)

NO.	DATE	REVISIONS	BY	CHKD	APPD	REFERENCES	NO.	RELEASED FOR	BY	DATE	DRAWN BY	DATE
A	01-04-08	PARA APROBACION	V.G.	R.B.	E.O.	HOJA DE DATOS DE PROCESOS TIG-RO-113 REV. 2	A	PARA APROBACION	R.B.	01-04-08	V.GUACHAMIN	24-03-2008
0	16-04-08	PARA CONSTRUCCION	V.G.	R.B.	E.O.		0	PARA CONSTRUCCION	R.B.	16-04-08		
											CHECKED BY	
											R. BARRERA	24-03-2008
											SCALE	
											INDICADAS	



PETROBELL INC. & GRANTMINING
CAMPO MARGINAL TIGUINO
INGENIERIA BASICA Y DE DETALLE
PARA EL DISEÑO DE TANQUE SKIMMER
PLANO GENERAL TIG-T-160 (7517 BBLs.)

PROJECT	DATE
O8CF04	
REVISADO	DATE
COORDINADOR DE PROYECTOS	24-03-08
APROBADO	DATE
GERENTE DE PROYECTOS	24-03-08
DRAWING NO.	REV.
TIG-M1-101	0



DESARROLLO DE LAMINAS DEL CUERPO
ESC: 1:125

PARA CONSTRUCCION

APROBADO APROBADO CON COMENTARIOS

REVISION CON COMENTARIOS RECHAZADO

POR: _____

FECHA: _____ f.)

NOTAS
(1) AJUSTAR EN SITIO

PESO TOTAL (KG)= 16930.5

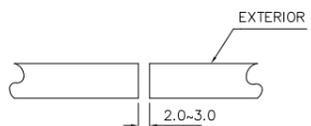
MK	CAN	DESCRIPCION	MATERIAL	P. UNIT	P. TOTAL
8	1	L 2" x 2" x 1/4" x 4616 (5400)	A 36	21.9	21.9
7	6	L 2" x 2" x 1/4" x 5400	A 36	25.6	153.6
6	1	PL. 4.76 x (1804 x 6595)	A 36	444.5	444.5
5	4	PL. 4.76 x (1804 x 7600)	A 36	512.3	2049.2
4	3	PL. 4.76 x (1820 x 6595)	A 36	448.5	1345.5
3	12	PL. 4.76 x (1820 x 7600)	A 36	516.8	6202.2
2	2	PL. 6.35 x (1820 x 6601)	A 36	598.9	1197.7
1	8	PL. 6.35 x (1820 x 7600)	A 36	689.5	5515.9

MK	DESCRIPCION				
	C [MM]	L [MM]	R [MM]	t [MM]	t1 [MM]
1	7596	7080	5888	6.35	---
2	6597	6258	5888	6.35	---
3	7597	7081	5888	4.76	---
4	6592	6253	5888	4.76	---
5	7597	7081	5888	4.76	---
6	6592	6253	5888	4.76	---

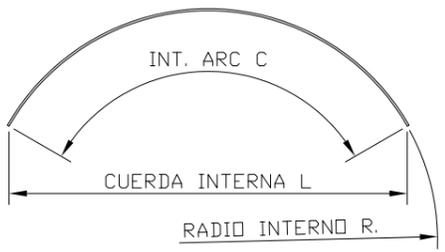
DIMENSIONES (DESPUES DE ROLADO)

REQUERIDAS PARA EL CUERPO

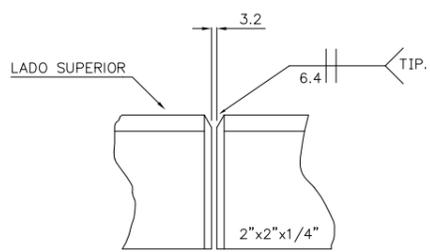
10 LAMINAS 6.35x1830x7600
20 LAMINAS 4.76x1830x7600



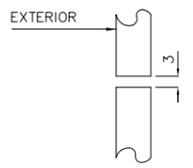
JUNTA VERTICAL (TIP.)
SIN ESCALA



LAMINA DE CUERPO (TIP.)
SIN ESCALA



JUNTA ANGULO DE TOPE
SIN ESCALA



JUNTA HORIZONTAL (TIP.)
SIN ESCALA

NO.	DATE	REVISIONS	BY	CHKD	APPD	REFERENCES	NO.	RELEASED FOR	BY	DATE	DRAWN BY	DATE
A	03-04-08	PARA APROBACION	V.G.	R.B.	E.O.		A	PARA APROBACION	R.B.	03-04-08	V.GUACHAMIN	24-03-2008
0	16-04-08	PARA CONSTRUCCION	V.G.	R.B.	E.O.		0	PARA CONSTRUCCION	R.B.	16-04-08		

PETROBELL INC. & GRANTMINING

PEC
PROJECT ENGINEERING & CONSTRUCTION CIA. LTDA.

SMARTPRO
SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSTRUCCION

Av. Los Graneros E. 14-28 y José Martí, Edificio Triunfo, Puerto Rico, P.R. 00931-2144-4048.
Fono: (787-2) 244-4013
E-Mail: info@smartpro.com

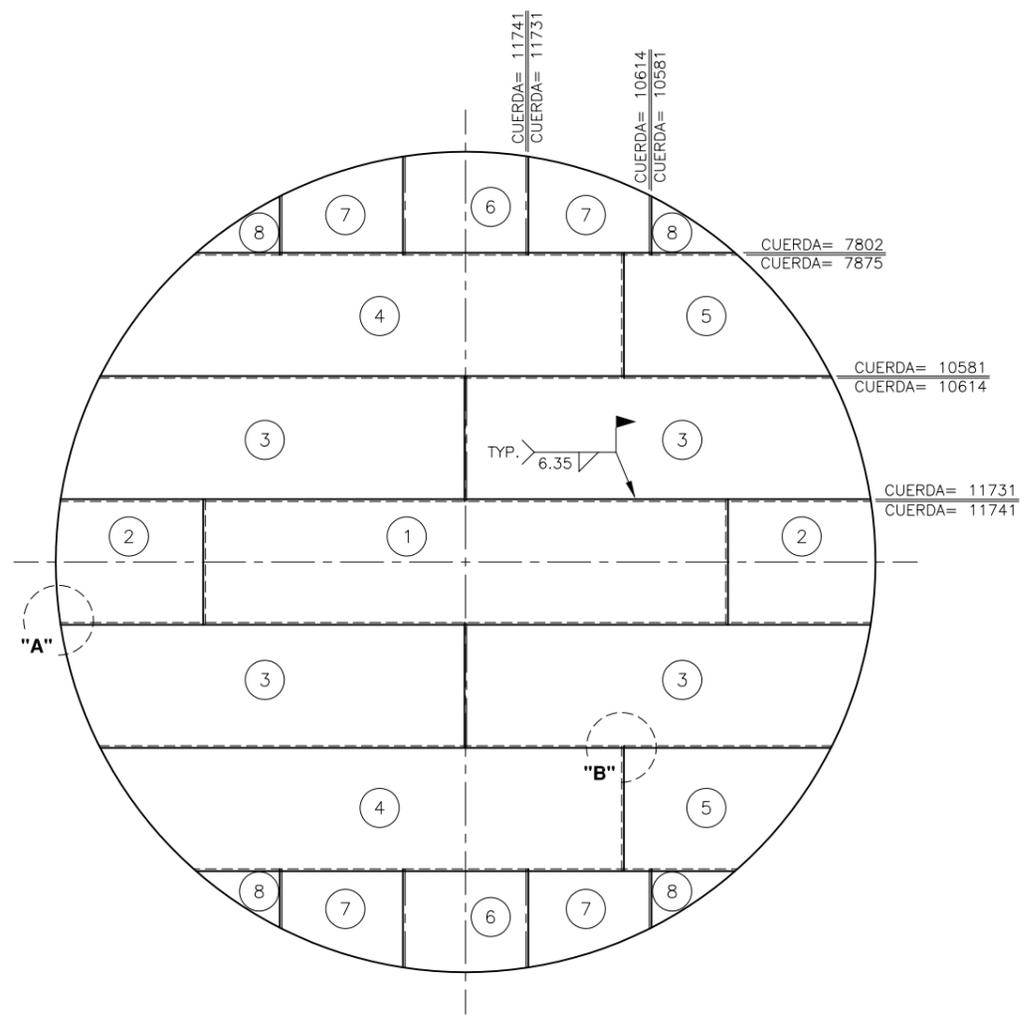
PETROBELL INC. & GRANTMINING
CAMPO MARGINAL TIGUINO

INGENIERIA BASICA Y DE DETALLE
PARA EL DISEÑO DE TANQUE SKIMMER

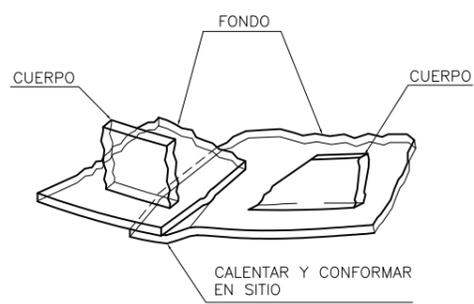
DESARROLLO DE CUERPO TANQUE TIG-T-160 (7517 BBLs.)

NOMENCLATURA

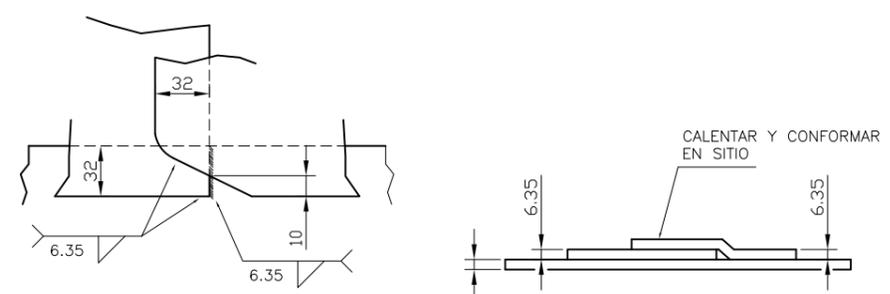
PROJECT:	O8CF04
REVISOR:	DATE
COORDINADOR DE PROYECTOS:	24-03-08
APPROVED:	DATE
GERENTE DE PROYECTOS:	24-03-08
DRAWING NO.:	TIG-M1-102
REV.:	0



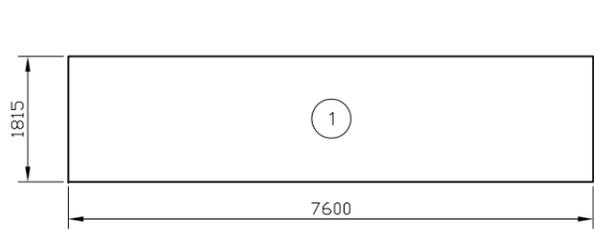
FONDO Ø 11871
ESC: 1:100



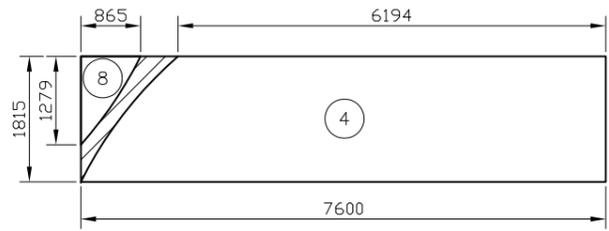
DETALLE "A"
SIN ESCALA



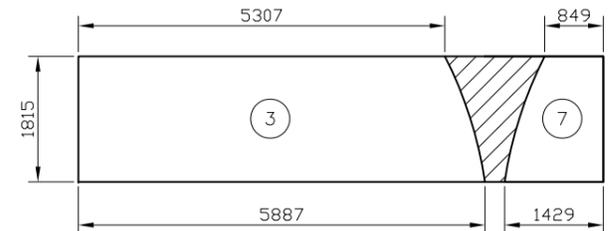
DETAIL "B"
SIN ESCALA



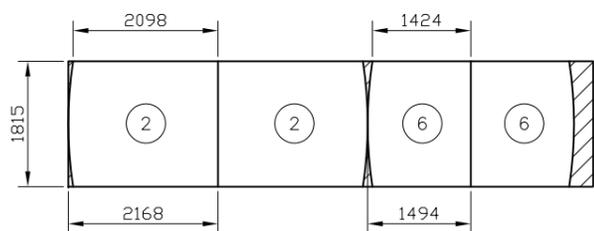
1 PL. 6.35 x 1815 x 7600



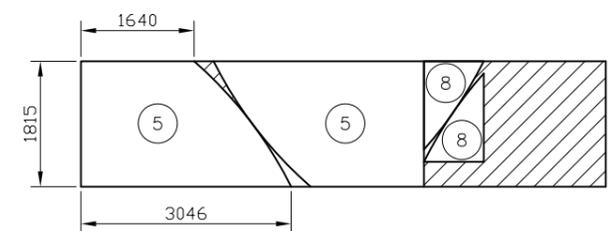
2 PL. 6.35 x 1815 x 7600



4 PL. 6.35 x 1815 x 7600



1 PL. 6.35 x 1815 x 7600



1 PL. 6.35 x 1815 x 7600

LAMINAS PARA FONDO

DETALLE DE LAMINAS A SER CORTADAS EN TALLER
ESC: 1:100

REQUERIDAS PARA EL FONDO
9 LAMINAS 6.35x1830x7600

PARA CONSTRUCCION

APROBADO APROBADO CON COMENTARIOS

REVISION CON COMENTARIOS RECHAZADO

POR: _____

FECHA: _____ f.)

PESO TOTAL (KG)= 6136.3

MK	CAN	DESCRIPCION	MATERIAL	P. UNIT	P. TOTAL
8	4	PL. 6.35 x (865 x 1279)	A 36	55.6	222.4
7	4	PL. 6.35 x (1815 x 1429)	A 36	129.3	517.3
6	2	PL. 6.35 x (1815 x 1494)	A 36	130.3	260.6
5	2	PL. 6.35 x (1815 x 3046)	A 36	275.6	551.2
4	2	PL. 6.35 x (1815 x 7600)	A 36	687.5	1375.0
3	4	PL. 6.35 x (1815 x 5887)	A 36	532.6	2130.0
2	2	PL. 6.35 x (1815 x 2168)	A 36	196.1	392.3
1	1	PL. 6.35 x (1815 x 7600)	A 36	687.6	687.6

NOMENCLATURA

NO.	DATE	REVISIONS	BY	CHKD	APPD	REFERENCES	NO.	RELEASED FOR	BY	DATE	DRAWN BY	DATE
A	03-04-08	PARA APROBACION	V.G.	R.B.	E.O.		A	PARA APROBACION	R.B.	03-04-08	V.GUACHAMIN	24-03-2008
0	16-04-08	PARA CONSTRUCCION	V.G.	R.B.	E.O.		0	PARA CONSTRUCCION	R.B.	16-04-08		

PETROBELL INC. & GRANTMINING

PEC

PROJECT ENGINEERING & CONSTRUCTION CIA. LTDA.

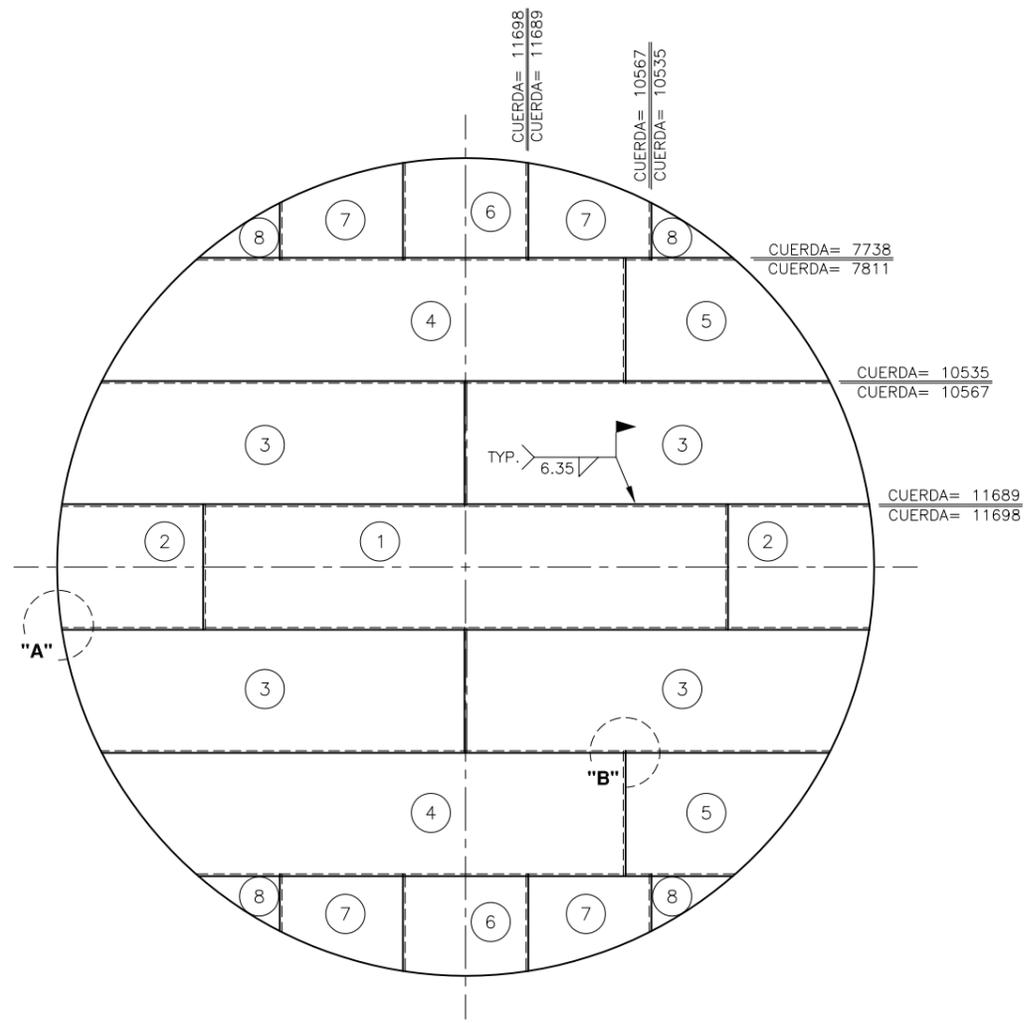
SMARTPRO

SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSTRUCCION

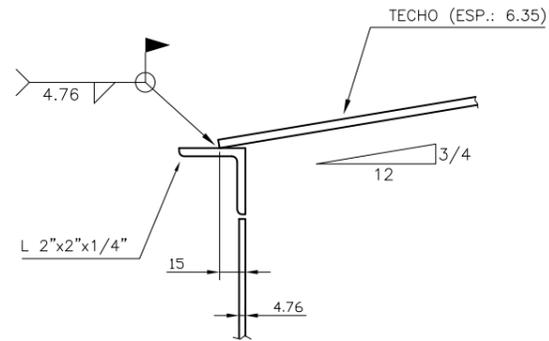
Av. Los Gringos E. 14-28 y José Martí, Edificio Triunfo, Puerto Rico, P.R. 00931-2444-4048.
Fono: (787) 244-4013
E-Mail: info@smartpro.com

PETROBELL INC. & GRANTMINING
CAMPO MARGINAL TIGUINO
INGENIERIA BASICA Y DE DETALLE
PARA EL DISEÑO DE TANQUE SKIMMER
FONDO TANQUE TIG-T-160 (7517 BBLs.)

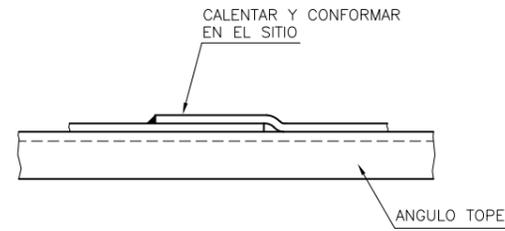
PROJECT:	DATE
O8CF04	
COORDINADOR DE PROYECTOS	24-03-08
APPROVED GERENTE DE PROYECTOS	24-03-08
DRAWING NO.	TIG-M1-103
REV.	0



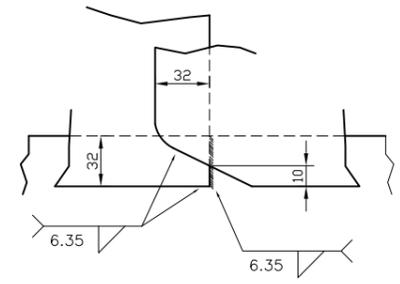
TECHO Ø 11829
ESC: 1:100



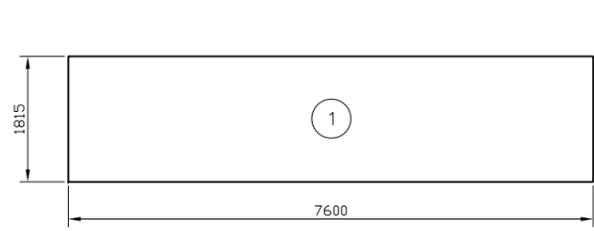
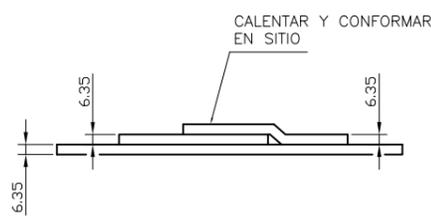
UNION TECHO-CUERPO
SIN ESCALA



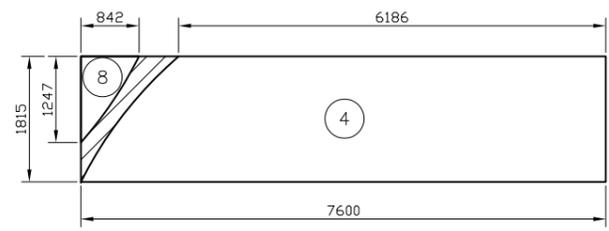
DETALLE "A"
SIN ESCALA



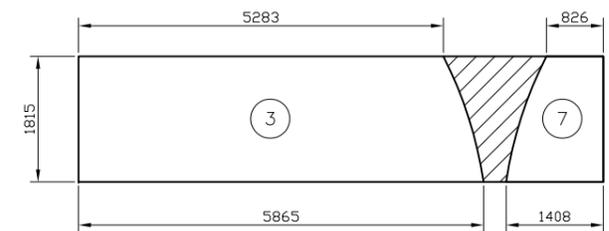
DETALLE "B"
SIN ESCALA



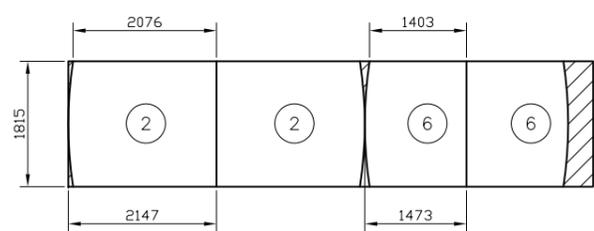
1 PL. 6.35 x 1815 x 7600



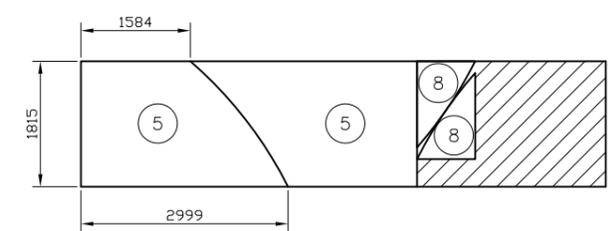
2 PL. 6.35 x 1815 x 7600



4 PL. 6.35 x 1815 x 7600



1 PL. 6.35 x 1815 x 7600



1 PL. 6.35 x 1815 x 7600

LAMINAS PARA TECHO

DETALLE DE LAMINAS A SER CORTADAS EN TALLER
ESC: 1:100

REQUERIDAS PARA EL TECHO
9 LAMINAS 6.35x1830x7600

PARA CONSTRUCCION

APROBADO APROBADO CON COMENTARIOS

REVISION CON COMENTARIOS RECHAZADO

POR: _____

FECHA: _____ f.)

PESO TOTAL (KG)= 6101.9

NO.	CAN.	DESCRIPCION	MATERIAL	P. UNIT	P. TOTAL
8	4	PL. 6.35 x (842 x 1247)	A 36	52.3	209.4
7	4	PL. 6.35 x (1815 x 1408)	A 36	127.4	509.5
6	2	PL. 6.35 x (1815 x 1473)	A 36	133.3	266.5
5	2	PL. 6.35 x (1815 x 2999)	A 36	271.3	542.7
4	2	PL. 6.35 x (1815 x 7600)	A 36	687.6	1375.2
3	4	PL. 6.35 x (1815 x 5865)	A 36	530.6	2122.5
2	2	PL. 6.35 x (1815 x 2147)	A 36	194.2	388.5
1	1	PL. 6.35 x (1815 x 7600)	A 36	687.6	687.6

NOMENCLATURA

NO.	DATE	REVISIONS	BY	CHKD	APPD	REFERENCES	NO.	RELEASED FOR	BY	DATE	DRAWN BY	DATE
A	03-04-08	PARA APROBACION	V.G.	R.B.	E.O.		A	PARA APROBACION	R.B.	03-04-08	V.GUACHAMIN	24-03-2008
0	16-04-08	PARA CONSTRUCCION	V.G.	R.B.	E.O.		0	PARA CONSTRUCCION	R.B.	16-04-08		

PETROBELL INC. & GRANTMINING

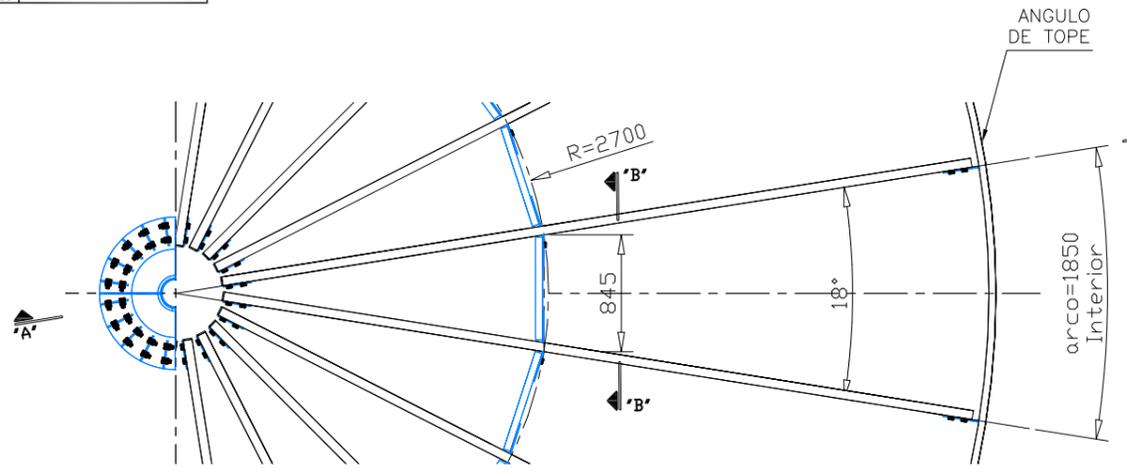
PEC
PROJECT ENGINEERING & CONSTRUCTION CIA. LTDA.

SMARTPRO
SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSTRUCCION

Av. Los Gringos E. 14-28 y José Martí, Edificio Triunfo, Puerto Rico, P.R. 00931-2444-4048.
Fono: (787) 244-4013
E-Mail: info@smartpro.com.ec

PETROBELL INC. & GRANTMINING
CAMPO MARGINAL TIGUINO
INGENIERIA BASICA Y DE DETALLE
PARA EL DISEÑO DE TANQUE SKIMMER
TECHO TANQUE TIG-T-160 (7517 BBLs.)

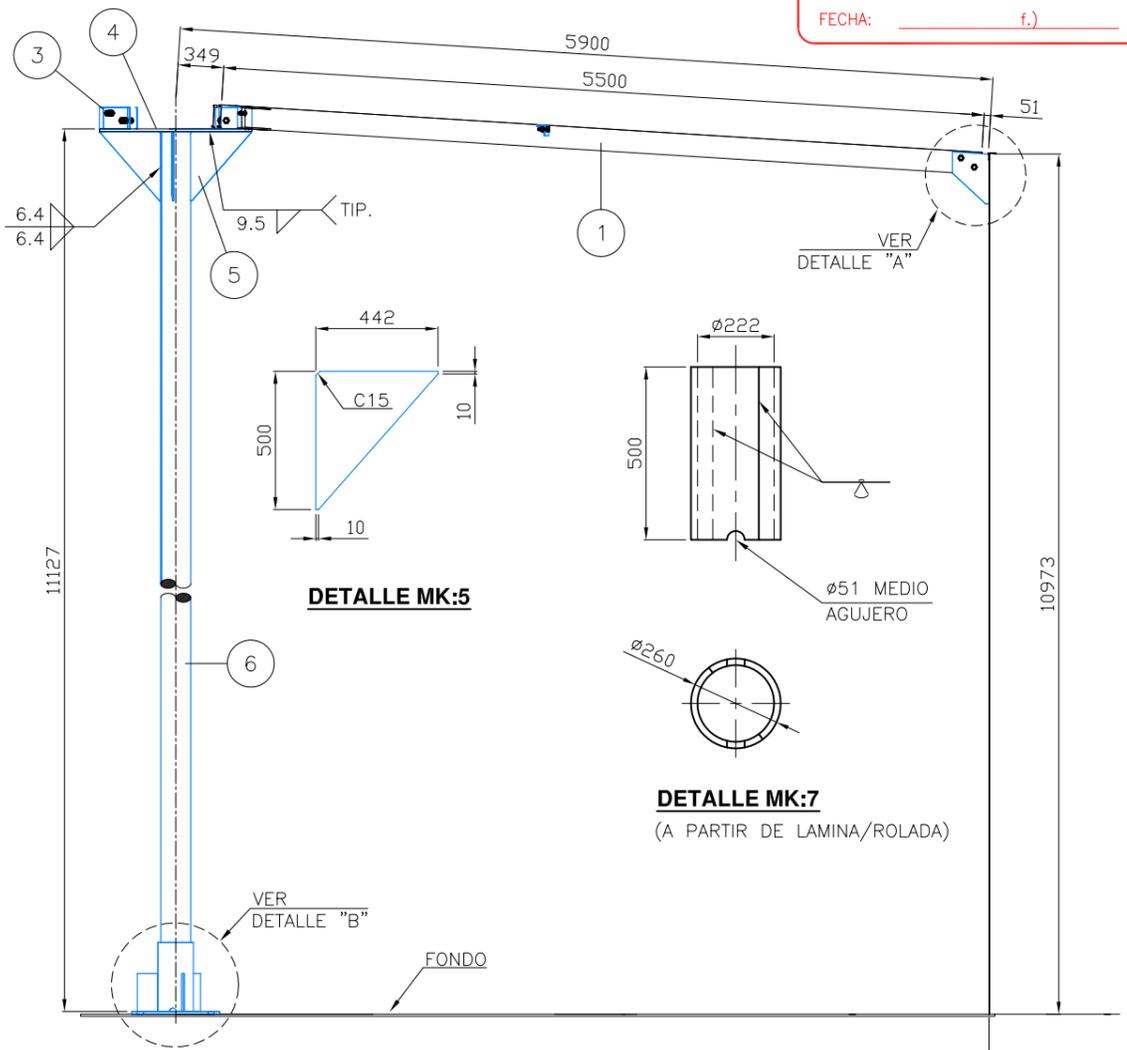
PROJECT: O8CF04	DATE 24-03-08
COORDINADOR DE PROYECTOS	DATE 24-03-08
APPROVED GERENTE DE PROYECTOS	DATE 24-03-08
DRAWING NO. TIG-M1-104	REV. 0



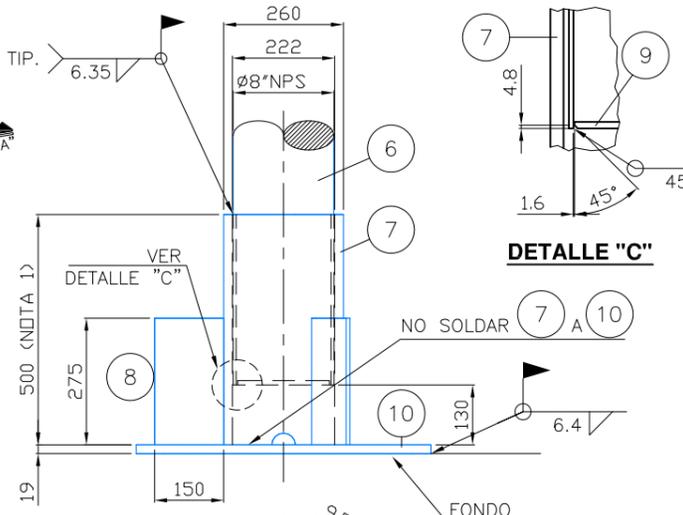
ORIENTACION

PARA CONSTRUCCION

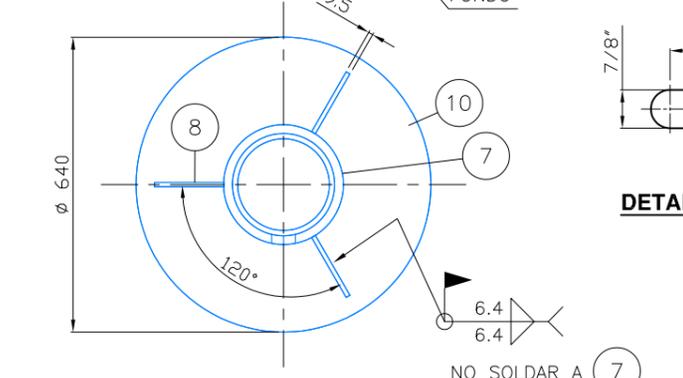
APROBADO APROBADO CON COMENTARIOS
 REVISION CON COMENTARIOS RECHAZADO
 POR: _____
 FECHA: _____ f.)



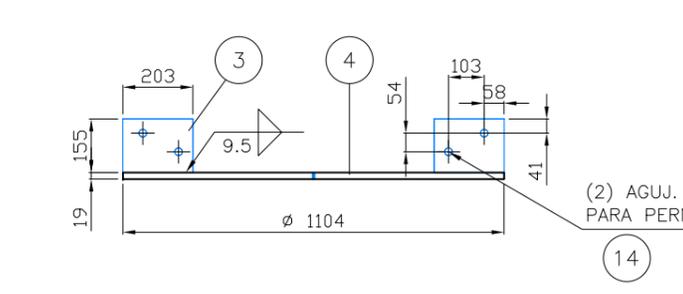
VISTA "A-A"



DETALLE "C"

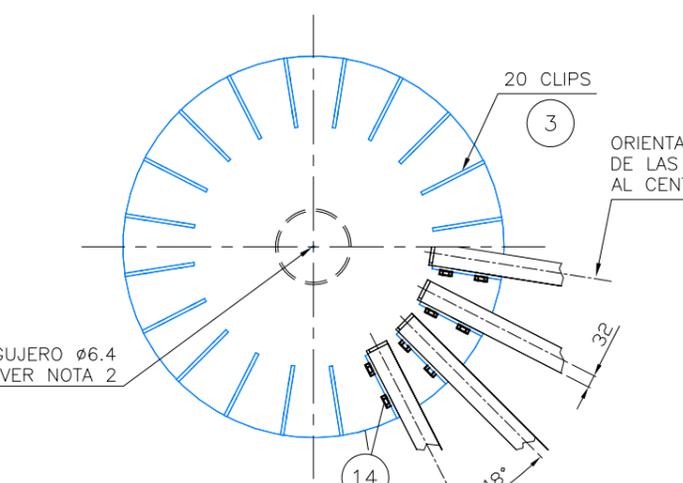


DETALLE "B"

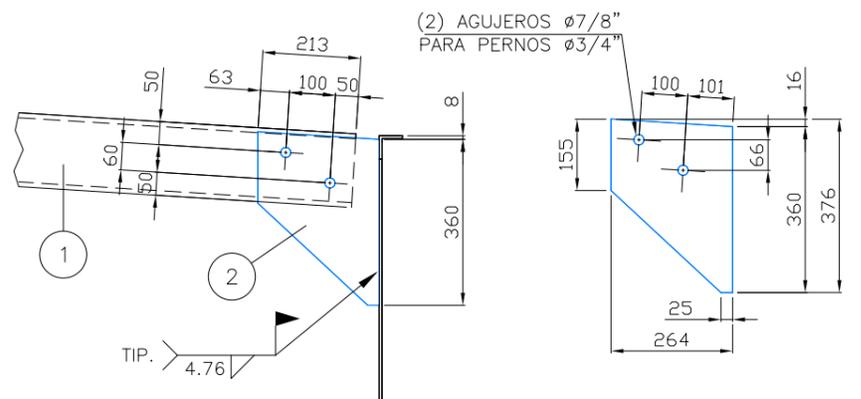


DETALLE MK:12

(2) ϕ 7/8" AGUJERO SLOT PARA PERNOS ϕ 3/4" (VER DETALLE SLOT)

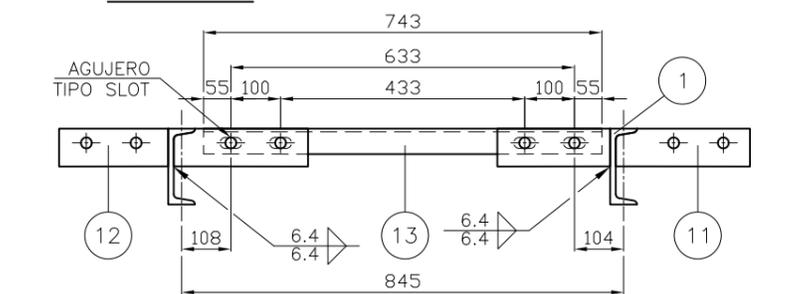


DETALLE MK: 3&4



DETALLE "A"

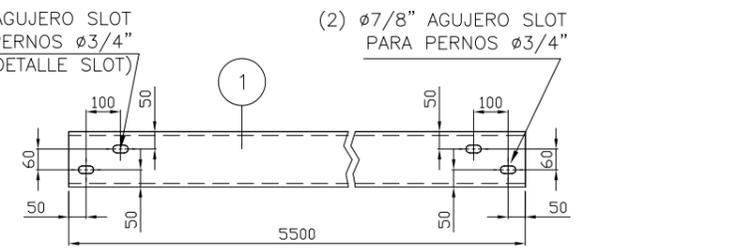
DETALLE MK:2



VISTA "B-B"

DETALLE MK: 12

DETALLE MK: 11



DETALLE MK:1

PESO TOTAL (KG)= 3128.8

NO.	QUANTIDAD	DESCRIPCION	MATERIAL	P. UNIT	P. TOTAL
14	160	PERNO ϕ 3/4"x2" C/TUERCA&ARAND.	A.193.B7	0.3	48.0
13	20	L 2" x 2" x 1/4" x 743	A 36	3.5	70.0
12	20	PL. 9.5 x 76 x 227	A 36	1.3	26.0
11	20	PL. 9.5 x 76 x 280	A 36	1.6	32.0
10	1	PL. 19.05 x ϕ 640	A 36	48.1	48.1
9	1	PL. 9.5 x ϕ 203	A 36	2.4	2.4
8	3	PL. 9.5 x 150 x 275	A 36	3.1	9.3
7	2	PL. 19.05 x (378 x 500) ϕ 260	A 36	28.3	56.6
6	1	PIPE ϕ 8" SCH. 20 x 10978 SMLS.	A-106-B	365.6	365.6
5	4	PL. 9.5 x (442 x 500)	A 36	16.4	65.6
4	1	PL. 19.05 x ϕ 1104	A 36	143.2	143.2
3	20	PL. 9.5 x 155 x 203	A 36	2.3	46.0
2	20	PL. 9.5 x 264 x 376	A 36	7.4	148.0
1	20	UPN 160 x 5500	A 36	103.4	2068.0
MK	CAN	DESCRIPCION	MATERIAL	P. UNIT	P. TOTAL

NOMENCLATURA

NOTAS:
 1.- AJUSTE LA ALTURA DESPUES DE LA PRUEBA HIDROSTATICA
 2.- SELLE EL AGUJERO EN TALLER.

NO.	DATE	REVISIONS	BY	CHKD	APPD	REFERENCES	NO.	RELEASED FOR	BY	DATE	DRAWN BY	DATE
A	04-04-08	PARA APROBACION	V.G.	R.B.	E.O.		A	PARA APROBACION	R.B.	04-04-08	V.GUACHAMIN	01-04-2008
0	16-04-08	PARA CONSTRUCCION	V.G.	R.B.	E.O.		0	PARA CONSTRUCCION	R.B.	16-04-08		

PETROBELL INC. & GRANTMINING

PEC
PROJECT ENGINEERING & CONSTRUCTION CIA. LTDA.

SMARTPRO
SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSTRUCCION

Av. Los Graneles E. 14-28 y José Martí, Edificio Triunfo, Puerto Rico, P.R. 00931-2444-4048.
 Fax: (093-7) 244-4013
 E-Mail: info@smartpro.com

PETROBELL INC. & GRANTMINING
 CAMPO MARGINAL TIGUINO
 INGENIERIA BASICA Y DE DETALLE
 PARA EL DISEÑO DE TANQUE SKIMMER
 ESTRUCTURA TANQUE TIG-T-160 (7517 BBLs.)

PROJECT O8CF04

REVISED DATE
 COORDINADOR DE PROYECTOS 01-04-08

APPROVED DATE
 GERENTE DE PROYECTOS 01-04-08

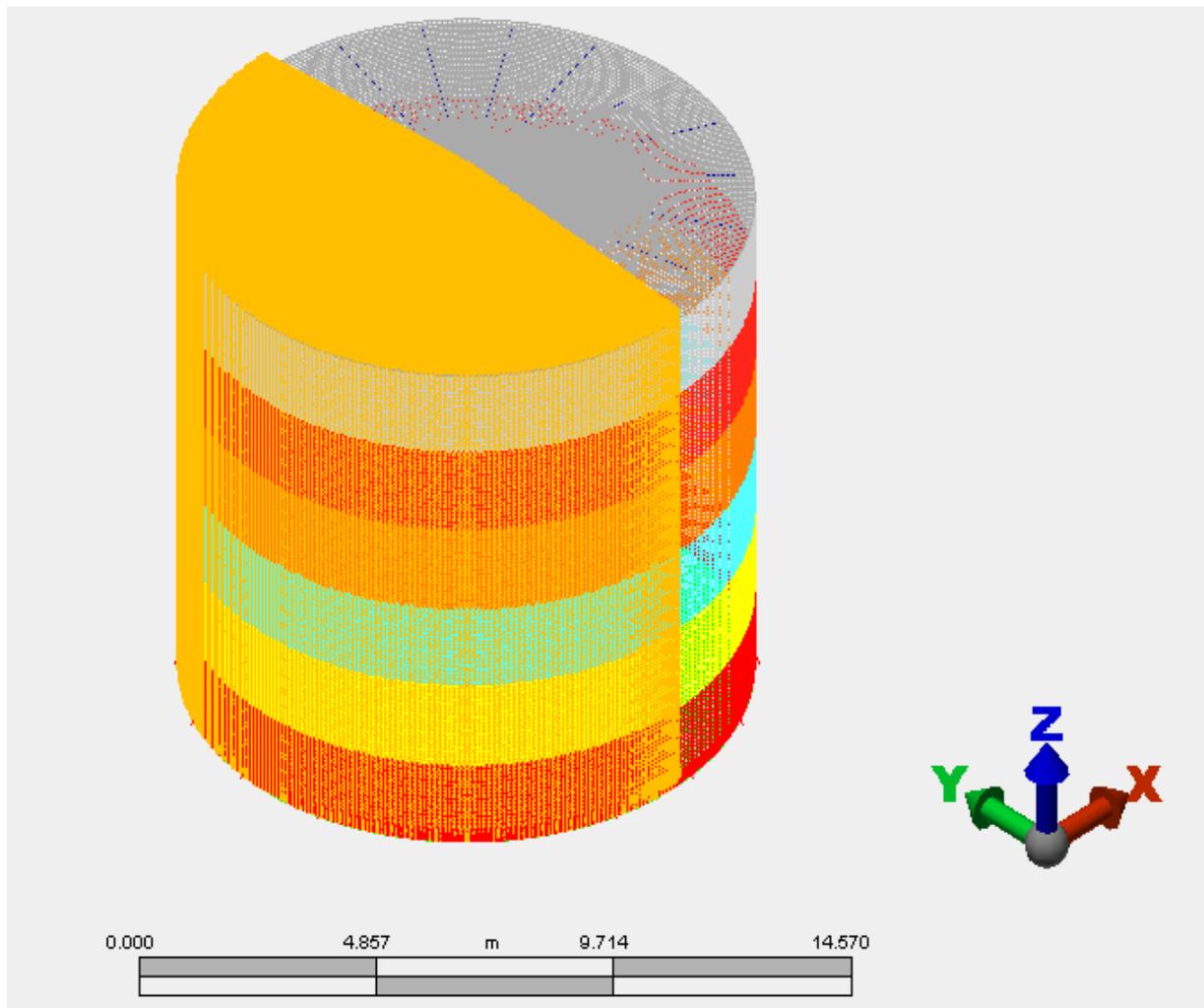
DRAWING NO. TIG-M1-105 REV. 0

ANEXO C

Plano de conjunto y detalles recipiente 600-C-1

ANEXO D

Análisis de tanque cilíndrico atmosférico (frecuencia natural)



Analysis of Atmospheric Cylindrical Tank (Natural Frequency)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	2/21/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	2/21/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

Before performing stress analysis is always necessary to obtain the values of the natural frequencies for different vibration modes of the tank in order to define the nature of the applied load (dynamic, quasi-static or impact).

According to the analysis, for the first mode of vibration the natural period is 0.6735 s (natural frequency: 0.2363 cycle/s).

If the ratio of the duration of the positive phase with respect to the natural period must be less than or close to 0.5, in order to define a load like an impact load.

We conclude that the maximum load duration t_d will have an approximate value of 0.33674 s (336.74 ms) in order to consider a load like an impact load.

Summary

Model Information

Analysis Type - Natural Frequency (Modal)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\tank06(10m 6.1848kPa Vers B).fem
 Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information

Processor Information

Number of Frequencies To Calculate	5
Cutoff Frequency	0 cycles/s
Frequency Shift	0 cycles/s
Expected Rigid Body Modes	0
Maximum Number of Iterations	32
Number of Vectors in Subspace Iteration	0
Orthogonality Check Printout	None
Convergence Value for Eigenvalue	1e-005
Avoid Sturn Sequence Check	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Attempt to Run Despite Errors	No
Do Not Save Restart Files	No
Displacement Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Matrices in Output File	No
Element Input Data in Output File	No

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
<u>1</u>	FLOOR	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>2</u>	RING I	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>3</u>	RING II	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>4</u>	RING III	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>5</u>	RING IV	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>6</u>	RING V	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>7</u>	RING VI	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>8</u>	ROOF	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>9</u>	Rigid Element	Rigid	Rigid elements have no material properties
10	Beam	Beam	Steel (ASTM - A36)
11	PIPE	Plate	[Customer Defined] (Part11)
12	CENTRAL SUPPORT	Plate	Steel (ASTM - A36)
13	Part 13	Rigid	Rigid elements have no material properties
14	Part 14	Rigid	Rigid elements have no material properties
15	Part 15	Rigid	Rigid elements have no material properties
16	Part 16	Rigid	Rigid elements have no material properties

17	Part 17	Rigid	Rigid elements have no material properties
18	Part 18	Rigid	Rigid elements have no material properties
19	Part 19	Rigid	Rigid elements have no material properties
20	Part 20	Rigid	Rigid elements have no material properties
21	Part 21	Rigid	Rigid elements have no material properties
22	Part 22	Rigid	Rigid elements have no material properties
23	Part 23	Rigid	Rigid elements have no material properties
24	Part 24	Rigid	Rigid elements have no material properties
25	Part 25	Rigid	Rigid elements have no material properties
26	Part 26	Rigid	Rigid elements have no material properties
27	Part 27	Rigid	Rigid elements have no material properties
28	Part 28	Rigid	Rigid elements have no material properties
29	Part 29	Rigid	Rigid elements have no material properties
30	Part 30	Rigid	Rigid elements have no material properties
31	Part 31	Rigid	Rigid elements have no material properties
32	Part 32	Rigid	Rigid elements have no material properties
33	Part 33	Rigid	Rigid elements have no material properties
34	Part 34	Rigid	Rigid elements have no material properties
35	Part 35	Rigid	Rigid elements have no material properties
36	Part 36	Rigid	Rigid elements have no material properties
37	Part 37	Rigid	Rigid elements have no material properties
38	Part 38	Rigid	Rigid elements have no material properties
39	Part 39	Rigid	Rigid elements have no material properties
40	Part 40	Rigid	Rigid elements have no material properties
41	Part 41	Rigid	Rigid elements have no material properties
42	Part 42	Rigid	Rigid elements have no material properties
43	Part 43	Rigid	Rigid elements have no material properties
44	Part 44	Rigid	Rigid elements have no material properties
45	Part 45	Rigid	Rigid elements have no material properties
46	Part 46	Rigid	Rigid elements have no material properties

Element Information

Element Properties used for:

- FLOOR
- RING III
- RING IV
- RING V
- RING VI

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic

Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.00476000000000001 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- RING I
- RING II
- ROOF
- PIPE

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.00635 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- Rigid Element

Element Type	Beam
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C

Layer 1 - Area	0.01020702591
Layer 1 - SA2	0.00904878183510639
Layer 1 - SA3	0.00904878183510639
Layer 1 - J1	1.6581313590795e-005
Layer 1 - I2	8.29065679539749e-006
Layer 1 - I3	8.29065679539749e-006
Layer 1 - S2	0.0001454501192175
Layer 1 - S3	0.0001454501192175

Element Properties used for:

- Beam

Element Type	Beam
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Layer 1 - Area	0.0024075
Layer 1 - SA2	0.0011375
Layer 1 - SA3	0.0012
Layer 1 - J1	6.0834299281923e-008
Layer 1 - I2	9.318075625e-006
Layer 1 - I3	9.74040705315421e-007
Layer 1 - S2	0.0001164759453125
Layer 1 - S3	2.16697265117387e-005

Element Properties used for:

- CENTRAL SUPPORT

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.01905 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information**Steel (ASTM - A36) -Plate**

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	77221281678.9633 N/m ²

AISI 1018 Steel, cold drawn -Beam

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/10/28-16:02:00
Material Description	None
Mass Density	7870 kg/m ³
Modulus of Elasticity	205000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C

Steel (ASTM - A36) -Beam

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C

[Customer Defined] (Part11) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/02/05-16:55:45

Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7861.0929 kg/m ³
Modulus of Elasticity	208500000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.288
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	7928970887.00002 N/m ²

Loads

FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions

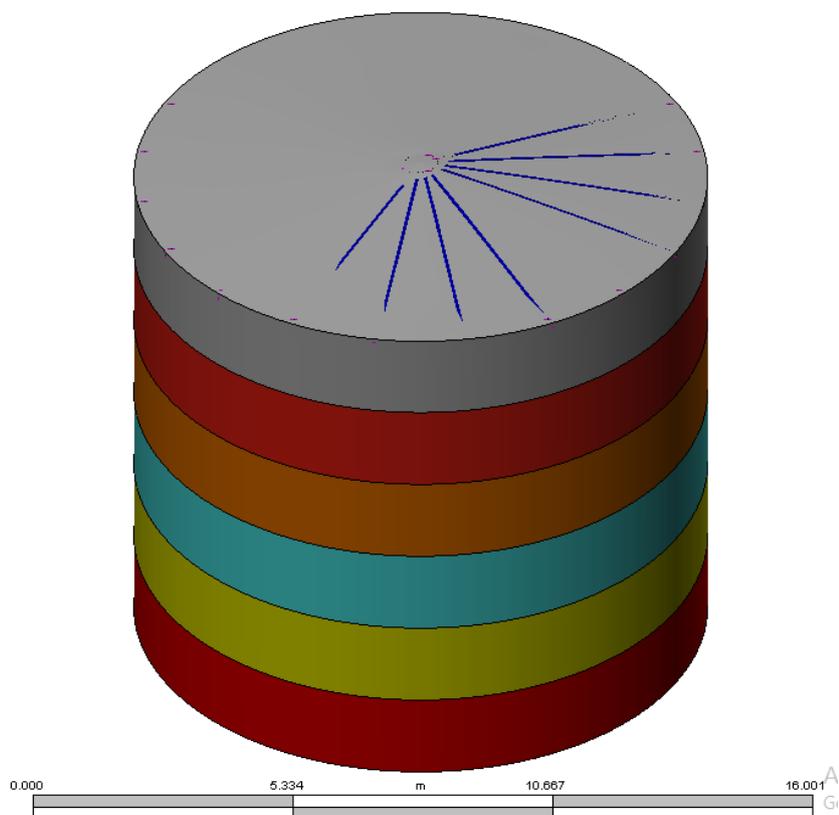
Surface Pressure/Traction

ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
13	Unnamed	4	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
9	Unnamed	8	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
10	Unnamed	6	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
14	Unnamed	3	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
11	Unnamed	5	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
8	Unnamed	2	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
12	Unnamed	7	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

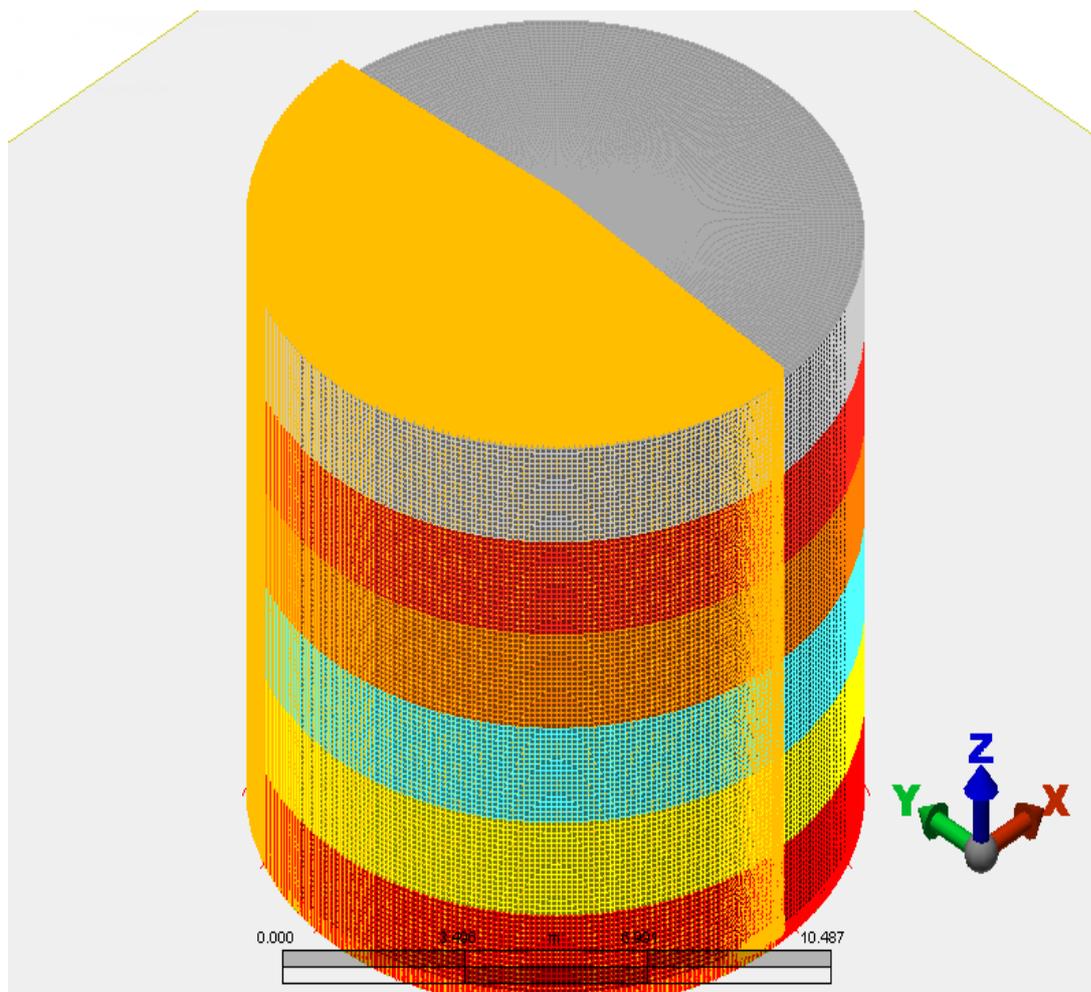
Stress

Mode: 1 of 5
Frequency: 0.236314 cycles/s
Maximum Value: Not Available
Minimum Value: Not Available
1 < Design Scenario 1 >



ANEXO E

Análisis de tanque cilíndrico atmosférico (esfuerzo de fluencia)



Analysis of Atmospheric Cylindrical Tank (Yield Stress)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	2/21/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	2/21/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

After define the model and the natural frequency. Through the secant method, it is subjected successively the model to different dynamic loads (based on the profile shockwave assuming in all cases a constant explosion focus distance of 10 m) to obtain as stress maximum a value close to the material yield strength (250 MPa).

It was found that for a maximum stress equal to 250 MPa , explosive mass of 0.131 kg is needed with profile shockwave's maximum pressure of 6.185 kPa

Summary

Model Information

Analysis Type - Transient Stress (Direct Integration)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\tank06(10m6.184.8).fem

Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information**Processor Information**

Number of time steps	24
Time Step Size	0.0003006 s
Output interval	1
Damping Alpha	0
Damping Beta	0
Dynamic Nodal Load 1 - Node Number	1
Dynamic Nodal Load 1 - Load Curve	1
Dynamic Nodal Load 1 - Type	Translation
Dynamic Nodal Load 1 - X Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Y Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Z Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Activation Time	0
Disable Calculation and Output of Strains	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Ground Motion Type	None
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Nodal Printout Type Indicator	Histories and Maxima

Load Curve Information

Load Curve 1 - Title	Load Curve 1
Load Curve 1 - Type	Piecewise Linear
Load Curve 1 - Index 1 - Time	0.000000 s
Load Curve 1 - Index 1 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 2 - Time	0.000301 s
Load Curve 1 - Index 2 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 3 - Time	0.000301 s
Load Curve 1 - Index 3 - Value	1.000000
Load Curve 1 - Index 4 - Time	0.000632 s
Load Curve 1 - Index 4 - Value	0.932060
Load Curve 1 - Index 5 - Time	0.000963 s
Load Curve 1 - Index 5 - Value	0.864195

Load Curve 1 - Index 6 - Time	0.001294 s
Load Curve 1 - Index 6 - Value	0.796571
Load Curve 1 - Index 7 - Time	0.001625 s
Load Curve 1 - Index 7 - Value	0.729365
Load Curve 1 - Index 8 - Time	0.001956 s
Load Curve 1 - Index 8 - Value	0.662769
Load Curve 1 - Index 9 - Time	0.002288 s
Load Curve 1 - Index 9 - Value	0.596993
Load Curve 1 - Index 10 - Time	0.002619 s
Load Curve 1 - Index 10 - Value	0.532262
Load Curve 1 - Index 11 - Time	0.002950 s
Load Curve 1 - Index 11 - Value	0.468828
Load Curve 1 - Index 12 - Time	0.003281 s
Load Curve 1 - Index 12 - Value	0.406964
Load Curve 1 - Index 13 - Time	0.003612 s
Load Curve 1 - Index 13 - Value	0.346976
Load Curve 1 - Index 14 - Time	0.003943 s
Load Curve 1 - Index 14 - Value	0.289211
Load Curve 1 - Index 15 - Time	0.004274 s
Load Curve 1 - Index 15 - Value	0.234064
Load Curve 1 - Index 16 - Time	0.004601 s
Load Curve 1 - Index 16 - Value	0.182002
Load Curve 1 - Index 17 - Time	0.004937 s
Load Curve 1 - Index 17 - Value	0.133593
Load Curve 1 - Index 18 - Time	0.005268 s
Load Curve 1 - Index 18 - Value	0.089566
Load Curve 1 - Index 19 - Time	0.005599 s
Load Curve 1 - Index 19 - Value	0.050949
Load Curve 1 - Index 20 - Time	0.005930 s
Load Curve 1 - Index 20 - Value	0.019450
Load Curve 1 - Index 21 - Time	0.006261 s
Load Curve 1 - Index 21 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 22 - Time	0.006379 s
Load Curve 1 - Index 22 - Value	-0.095755
Load Curve 1 - Index 23 - Time	0.006496 s
Load Curve 1 - Index 23 - Value	-0.191509
Load Curve 1 - Index 24 - Time	0.006614 s

Load Curve 1 - Index 24 - Value	-0.287264
Load Curve 1 - Index 25 - Time	0.006732 s
Load Curve 1 - Index 25 - Value	-0.191509
Load Curve 1 - Index 26 - Time	0.006849 s
Load Curve 1 - Index 26 - Value	-0.095755
Load Curve 1 - Index 27 - Time	0.006970 s
Load Curve 1 - Index 27 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 28 - Time	0.035000 s
Load Curve 1 - Index 28 - Value	0.000000

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
<u>1</u>	FLOOR	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>2</u>	RING I	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>3</u>	RING II	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>4</u>	RING III	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>5</u>	RING IV	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>6</u>	RING V	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>7</u>	RING VI	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>8</u>	ROOF	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>9</u>	Rigid Element	Rigid	Rigid elements have no material properties
10	Beam	Beam	Steel (ASTM - A36)
11	PIPE	Plate	[Customer Defined] (Part11)
12	CENTRAL SUPPORT	Plate	Steel (ASTM - A36)
13	Part 13	Rigid	Rigid elements have no material properties
14	Part 14	Rigid	Rigid elements have no material properties
15	Part 15	Rigid	Rigid elements have no material properties o
16	Part 16	Rigid	Rigid elements have no material properties
17	Part 17	Rigid	Rigid elements have no material properties
18	Part 18	Rigid	Rigid elements have no material properties
19	Part 19	Rigid	Rigid elements have no material properties
20	Part 20	Rigid	Rigid elements have no material properties
21	Part 21	Rigid	Rigid elements have no material properties
22	Part 22	Rigid	Rigid elements have no material properties
23	Part 23	Rigid	Rigid elements have no material properties
24	Part 24	Rigid	Rigid elements have no material properties
25	Part 25	Rigid	Rigid elements have no material properties

26	Part 26	Rigid	Rigid elements have no material properties
27	Part 27	Rigid	Rigid elements have no material properties
28	Part 28	Rigid	Rigid elements have no material properties
29	Part 29	Rigid	Rigid elements have no material properties
30	Part 30	Rigid	Rigid elements have no material properties
31	Part 31	Rigid	Rigid elements have no material properties
32	Part 32	Rigid	Rigid elements have no material properties
33	Part 33	Rigid	Rigid elements have no material properties
34	Part 34	Rigid	Rigid elements have no material properties
35	Part 35	Rigid	Rigid elements have no material properties
36	Part 36	Rigid	Rigid elements have no material properties
37	Part 37	Rigid	Rigid elements have no material properties
38	Part 38	Rigid	Rigid elements have no material properties
39	Part 39	Rigid	Rigid elements have no material properties
40	Part 40	Rigid	Rigid elements have no material properties
41	Part 41	Rigid	Rigid elements have no material properties
42	Part 42	Rigid	Rigid elements have no material properties
43	Part 43	Rigid	Rigid elements have no material properties
44	Part 44	Rigid	Rigid elements have no material properties
45	Part 45	Rigid	Rigid elements have no material properties
46	Part 46	Rigid	Rigid elements have no material properties
47	Part 47	Rigid	Rigid elements have no material properties
48	Part 48	Rigid	Rigid elements have no material properties
49	Part 49	Rigid	Rigid elements have no material properties
50	Part 50	Rigid	Rigid elements have no material properties
51	Part 51	Rigid	Rigid elements have no material properties

Element Information

Element Properties used for:

- FLOOR
- RING III
- RING IV
- RING V
- RING VI

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free

Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.004760000000000001 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- RING I
- RING II
- ROOF
- PIPE

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.00635 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- Rigid Element

Element Type	Rigid
Stiffness	10000000000
Component DOF - Tx	Yes

Component DOF - Ty	Yes
Component DOF - Tz	Yes
Component DOF - Rx	Yes
Component DOF - Ry	Yes
Component DOF - Rz	Yes

Element Properties used for:

- Beam

Element Type	Beam
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Layer 1 - Area	0.0024075
Layer 1 - SA2	0.0011375
Layer 1 - SA3	0.0012
Layer 1 - J1	6.0834299281923e-008
Layer 1 - I2	9.318075625e-006
Layer 1 - I3	9.74040705315421e-007
Layer 1 - S2	0.0001164759453125
Layer 1 - S3	2.16697265117387e-005

Element Properties used for:

- CENTRAL SUPPORT

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.01905 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information**Steel (ASTM - A36) -Plate**

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	77221281678.9633 N/m ²

Steel (ASTM - A36) -Beam

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C

[Customer Defined] (Part11) -Plate

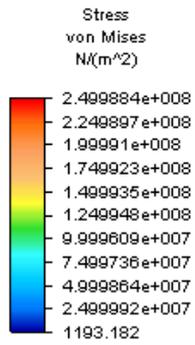
Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/02/05-16:55:45
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7861.0929 kg/m ³
Modulus of Elasticity	208500000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.288
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	7928970887.00002 N/m ²

Loads**FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions****Surface Pressure/Traction**

ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
12	Unnamed	7	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
8	Unnamed	2	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
11	Unnamed	5	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
10	Unnamed	6	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
9	Unnamed	8	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
13	Unnamed	4	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
14	Unnamed	3	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress



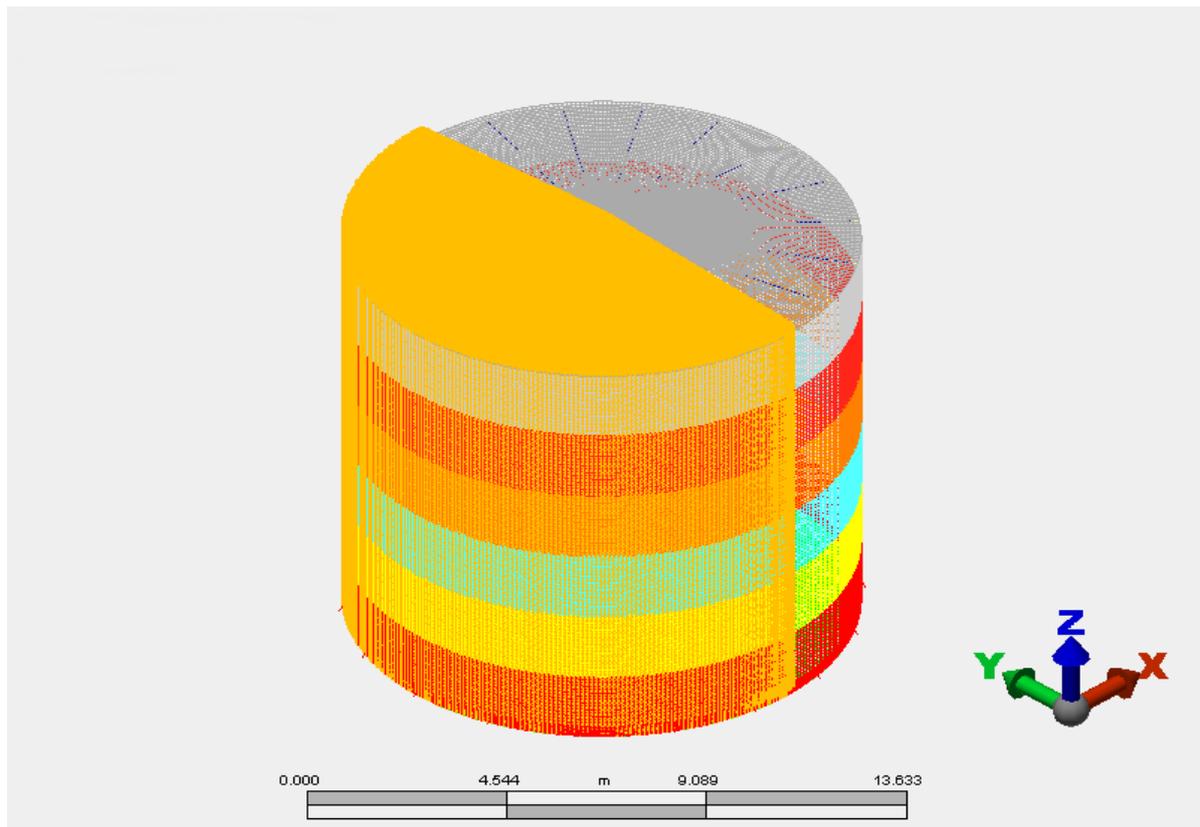
2.4
Time: 0.0069138 s
Time Step: 23 of 80
Maximum Value: 2.49988e+008 N/(m²)
Minimum Value: 1193.18 N/(m²)
1 < Design Scenario 1 >



Activat
www.C:

ANEXO G

Análisis de tanque cilíndrico atmosférico (ángulo de incidencia: 10°)



Analysis of Atmospheric Cylindrical Tank (Incidence Angle:10°)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	2/21/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	2/21/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

According to the yield stress analysis, it was determined that the points where maximum stress are presented, are those where the anchor bolts exist.

This analysis seeks to study the influence of the incidence angle of the shock waves of a blast (load) relative to the structural behaviour of the tank.

To perform this analysis anchor bolts were rotated counter-clockwise: 5°, 10° and 15° from their original position.

This model represents the case where the anchor bolts were rotated 10°.

Summary

Model Information

Analysis Type - Transient Stress (Direct Integration)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\tank06(10m6.184.8 rot.anth10grd).fem

Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information***Processor Information***

Number of time steps	24
Time Step Size	0.0003006 s
Output interval	1
Damping Alpha	0
Damping Beta	0
Dynamic Nodal Load 1 - Node Number	1
Dynamic Nodal Load 1 - Load Curve	1
Dynamic Nodal Load 1 - Type	Translation
Dynamic Nodal Load 1 - X Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Y Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Z Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Activation Time	0
Disable Calculation and Output of Strains	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Ground Motion Type	None
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Nodal Printout Type Indicator	Histories and Maxima

Load Curve Information

Load Curve 1 - Title	Load Curve 1
Load Curve 1 - Type	Piecewise Linear
Load Curve 1 - Index 1 - Time	0.000000 s
Load Curve 1 - Index 1 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 2 - Time	0.000301 s
Load Curve 1 - Index 2 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 3 - Time	0.000301 s
Load Curve 1 - Index 3 - Value	1.000000
Load Curve 1 - Index 4 - Time	0.000632 s
Load Curve 1 - Index 4 - Value	0.932060
Load Curve 1 - Index 5 - Time	0.000963 s
Load Curve 1 - Index 5 - Value	0.864195
Load Curve 1 - Index 6 - Time	0.001294 s

Load Curve 1 - Index 6 - Value	0.796571
Load Curve 1 - Index 7 - Time	0.001625 s
Load Curve 1 - Index 7 - Value	0.729365
Load Curve 1 - Index 8 - Time	0.001956 s
Load Curve 1 - Index 8 - Value	0.662769
Load Curve 1 - Index 9 - Time	0.002288 s
Load Curve 1 - Index 9 - Value	0.596993
Load Curve 1 - Index 10 - Time	0.002619 s
Load Curve 1 - Index 10 - Value	0.532262
Load Curve 1 - Index 11 - Time	0.002950 s
Load Curve 1 - Index 11 - Value	0.468828
Load Curve 1 - Index 12 - Time	0.003281 s
Load Curve 1 - Index 12 - Value	0.406964
Load Curve 1 - Index 13 - Time	0.003612 s
Load Curve 1 - Index 13 - Value	0.346976
Load Curve 1 - Index 14 - Time	0.003943 s
Load Curve 1 - Index 14 - Value	0.289211
Load Curve 1 - Index 15 - Time	0.004274 s
Load Curve 1 - Index 15 - Value	0.234064
Load Curve 1 - Index 16 - Time	0.004601 s
Load Curve 1 - Index 16 - Value	0.182002
Load Curve 1 - Index 17 - Time	0.004937 s
Load Curve 1 - Index 17 - Value	0.133593
Load Curve 1 - Index 18 - Time	0.005268 s
Load Curve 1 - Index 18 - Value	0.089566
Load Curve 1 - Index 19 - Time	0.005599 s
Load Curve 1 - Index 19 - Value	0.050949
Load Curve 1 - Index 20 - Time	0.005930 s
Load Curve 1 - Index 20 - Value	0.019450
Load Curve 1 - Index 21 - Time	0.006261 s
Load Curve 1 - Index 21 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 22 - Time	0.006379 s
Load Curve 1 - Index 22 - Value	-0.095755
Load Curve 1 - Index 23 - Time	0.006496 s
Load Curve 1 - Index 23 - Value	-0.191509
Load Curve 1 - Index 24 - Time	0.006614 s
Load Curve 1 - Index 24 - Value	-0.287264

Load Curve 1 - Index 25 - Time	0.006732 s
Load Curve 1 - Index 25 - Value	-0.191509
Load Curve 1 - Index 26 - Time	0.006849 s
Load Curve 1 - Index 26 - Value	-0.095755
Load Curve 1 - Index 27 - Time	0.006970 s
Load Curve 1 - Index 27 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 28 - Time	0.007215 s
Load Curve 1 - Index 28 - Value	0.000000

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
<u>1</u>	FLOOR	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>2</u>	RING I	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>3</u>	RING II	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>4</u>	RING III	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>5</u>	RING IV	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>6</u>	RING V	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>7</u>	RING VI	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>8</u>	ROOF	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>9</u>	Rigid Element	Rigid	Rigid elements have no material properties
10	Beam	Beam	Steel (ASTM - A36)
11	PIPE	Plate	[Customer Defined] (Part11)
12	CENTRAL SUPPORT	Plate	Steel (ASTM - A36)
13	Part 13	Rigid	Rigid elements have no material properties
14	Part 14	Rigid	Rigid elements have no material properties
15	Part 15	Rigid	Rigid elements have no material properties
16	Part 16	Rigid	Rigid elements have no material properties
17	Part 17	Rigid	Rigid elements have no material properties
18	Part 18	Rigid	Rigid elements have no material properties
19	Part 19	Rigid	Rigid elements have no material properties
20	Part 20	Rigid	Rigid elements have no material properties
21	Part 21	Rigid	Rigid elements have no material properties
22	Part 22	Rigid	Rigid elements have no material properties
23	Part 23	Rigid	Rigid elements have no material properties
24	Part 24	Rigid	Rigid elements have no material properties
25	Part 25	Rigid	Rigid elements have no material properties
26	Part 26	Rigid	Rigid elements have no material properties

27	Part 27	Rigid	Rigid elements have no material properties
28	Part 28	Rigid	Rigid elements have no material properties
29	Part 29	Rigid	Rigid elements have no material properties
30	Part 30	Rigid	Rigid elements have no material properties
31	Part 31	Rigid	Rigid elements have no material properties
32	Part 32	Rigid	Rigid elements have no material properties
33	Part 33	Rigid	Rigid elements have no material properties
34	Part 34	Rigid	Rigid elements have no material properties
35	Part 35	Rigid	Rigid elements have no material properties
36	Part 36	Rigid	Rigid elements have no material properties
37	Part 37	Rigid	Rigid elements have no material properties
38	Part 38	Rigid	Rigid elements have no material properties
39	Part 39	Rigid	Rigid elements have no material properties
40	Part 40	Rigid	Rigid elements have no material properties
41	Part 41	Rigid	Rigid elements have no material properties
42	Part 42	Rigid	Rigid elements have no material properties
43	Part 43	Rigid	Rigid elements have no material properties
44	Part 44	Rigid	Rigid elements have no material properties
45	Part 45	Rigid	Rigid elements have no material properties
46	Part 46	Rigid	Rigid elements have no material properties
47	Part 47	Rigid	Rigid elements have no material properties
48	Part 48	Rigid	Rigid elements have no material properties
49	Part 49	Rigid	Rigid elements have no material properties
50	Part 50	Rigid	Rigid elements have no material properties
51	Part 51	Rigid	Rigid elements have no material properties

Element Information

Element Properties used for:

- FLOOR
- RING III
- RING IV
- RING V
- RING VI

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.77777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free

Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.00476000000000001 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- Ring I
- RING II
- ROOF
- PIPE

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.00635 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- Rigid Element
- Part 13

Element Type	Rigid
Stiffness	10000000000

Component DOF - Tx	Yes
Component DOF - Ty	Yes
Component DOF - Tz	Yes
Component DOF - Rx	Yes
Component DOF - Ry	Yes
Component DOF - Rz	Yes

Element Properties used for:

- Beam

Element Type	Beam
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Layer 1 - Area	0.0024075
Layer 1 - SA2	0.0011375
Layer 1 - SA3	0.0012
Layer 1 - J1	6.0834299281923e-008
Layer 1 - I2	9.318075625e-006
Layer 1 - I3	9.74040705315421e-007
Layer 1 - S2	0.0001164759453125
Layer 1 - S3	2.16697265117387e-005

Element Properties used for:

- Central support

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.01905 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information**Steel (ASTM - A36) -Plate**

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	77221281678.9633 N/m ²

Steel (ASTM - A36) -Beam

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C

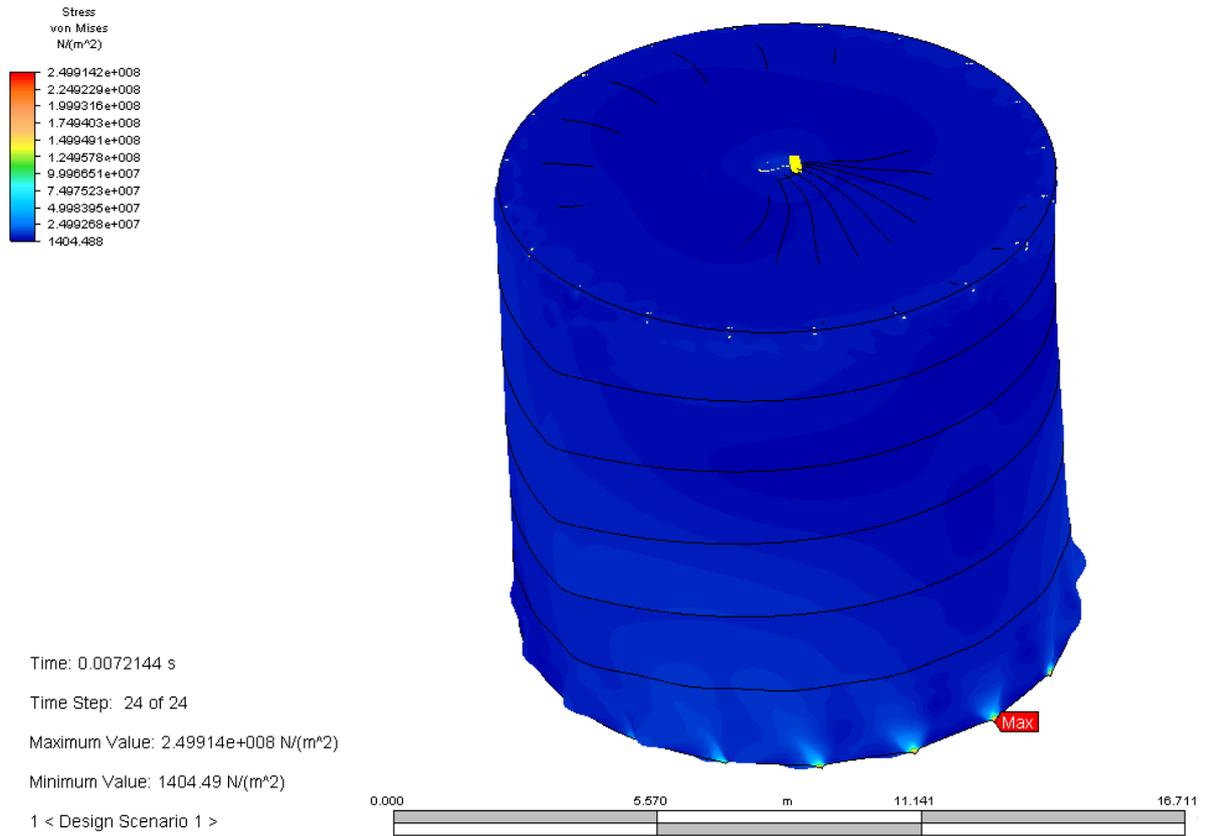
[Customer Defined] (Part11) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/02/05-16:55:45
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7861.0929 kg/m ³
Modulus of Elasticity	208500000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.288
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	7928970887.00002 N/m ²

Loads**FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions****Surface Pressure/Traction**

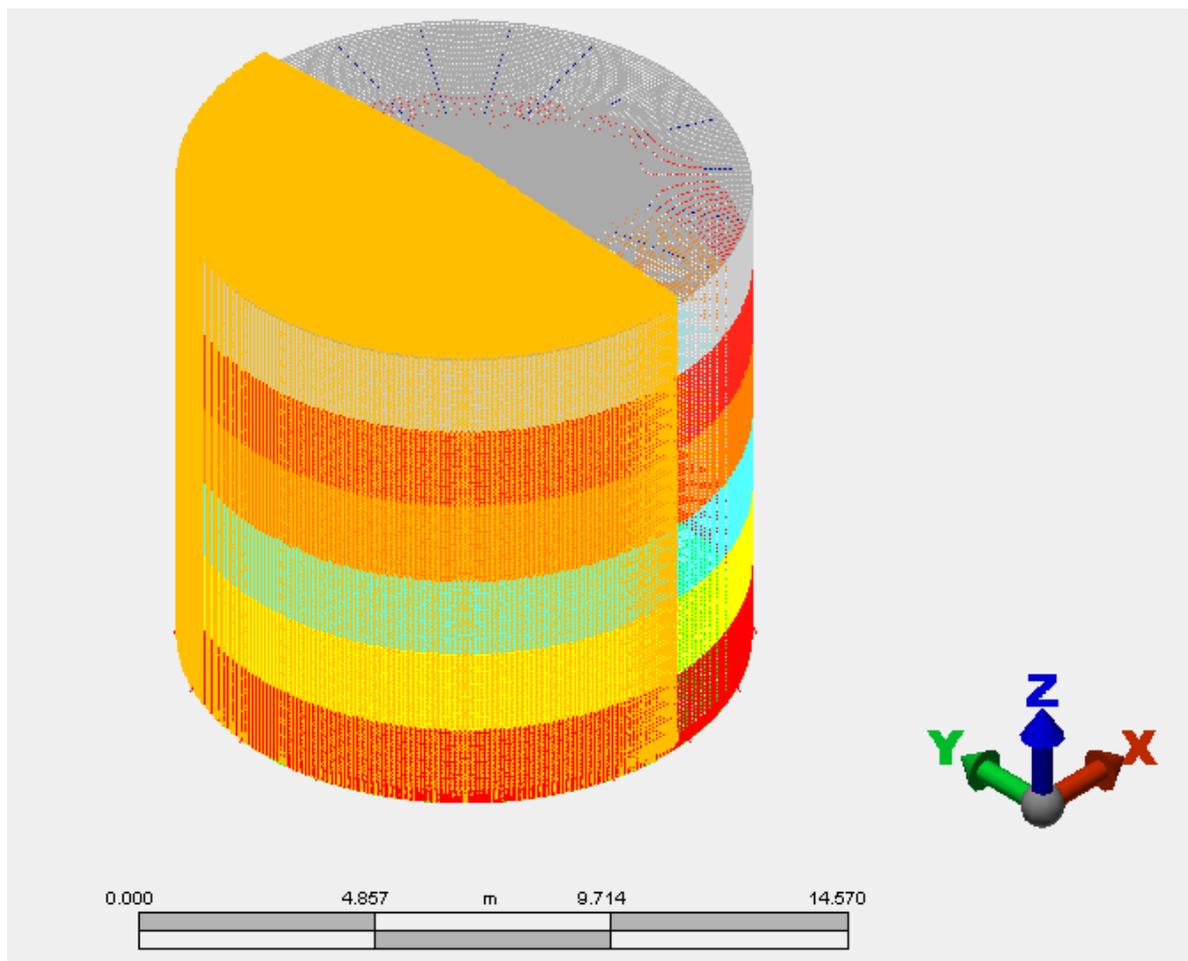
ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
8	Unnamed	2	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
9	Unnamed	8	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
10	Unnamed	6	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
11	Unnamed	5	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
12	Unnamed	7	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
14	Unnamed	3	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
13	Unnamed	4	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress

ANEXO H

Análisis de tanque cilíndrico atmosférico (número de pernos de anclaje)



Analysis of Atmospheric Cylindrical Tank (Number Anchor Bolts)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP(UNS)
Created Date:	2/21/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	2/21/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

It is known that the points with greater stresses are those where the tank anchor bolts were located.

For this reason, it is needed to observe the influence of the number of anchor bolts and its relationship to the stresses obtained.

The original design had a tank with 18 anchor bolts. The analysis proposes several models with more bolts (20, 24, 30, 36, 40) for which the maximum stresses were calculated.

This model presents a tank which has 24 anchor bolts.

Summary

Model Information

Analysis Type - Transient Stress (Direct Integration)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\tank06(10m6.184.8-24 anclajes).fem

Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information***Processor Information***

Number of time steps	24
Time Step Size	0.0003006 s
Output interval	1
Damping Alpha	0
Damping Beta	0
Dynamic Nodal Load 1 - Node Number	1
Dynamic Nodal Load 1 - Load Curve	1
Dynamic Nodal Load 1 - Type	Translation
Dynamic Nodal Load 1 - X Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Y Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Z Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Activation Time	0
Disable Calculation and Output of Strains	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Ground Motion Type	None
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Nodal Printout Type Indicator	Histories and Maxima

Load Curve Information

Load Curve 1 - Title	Load Curve 1
Load Curve 1 - Type	Piecewise Linear
Load Curve 1 - Index 1 - Time	0.000000 s
Load Curve 1 - Index 1 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 2 - Time	0.000301 s
Load Curve 1 - Index 2 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 3 - Time	0.000301 s
Load Curve 1 - Index 3 - Value	1.000000
Load Curve 1 - Index 4 - Time	0.000632 s
Load Curve 1 - Index 4 - Value	0.932060
Load Curve 1 - Index 5 - Time	0.000963 s
Load Curve 1 - Index 5 - Value	0.864195
Load Curve 1 - Index 6 - Time	0.001294 s

Load Curve 1 - Index 6 - Value	0.796571
Load Curve 1 - Index 7 - Time	0.001625 s
Load Curve 1 - Index 7 - Value	0.729365
Load Curve 1 - Index 8 - Time	0.001956 s
Load Curve 1 - Index 8 - Value	0.662769
Load Curve 1 - Index 9 - Time	0.002288 s
Load Curve 1 - Index 9 - Value	0.596993
Load Curve 1 - Index 10 - Time	0.002619 s
Load Curve 1 - Index 10 - Value	0.532262
Load Curve 1 - Index 11 - Time	0.002950 s
Load Curve 1 - Index 11 - Value	0.468828
Load Curve 1 - Index 12 - Time	0.003281 s
Load Curve 1 - Index 12 - Value	0.406964
Load Curve 1 - Index 13 - Time	0.003612 s
Load Curve 1 - Index 13 - Value	0.346976
Load Curve 1 - Index 14 - Time	0.003943 s
Load Curve 1 - Index 14 - Value	0.289211
Load Curve 1 - Index 15 - Time	0.004274 s
Load Curve 1 - Index 15 - Value	0.234064
Load Curve 1 - Index 16 - Time	0.004601 s
Load Curve 1 - Index 16 - Value	0.182002
Load Curve 1 - Index 17 - Time	0.004937 s
Load Curve 1 - Index 17 - Value	0.133593
Load Curve 1 - Index 18 - Time	0.005268 s
Load Curve 1 - Index 18 - Value	0.089566
Load Curve 1 - Index 19 - Time	0.005599 s
Load Curve 1 - Index 19 - Value	0.050949
Load Curve 1 - Index 20 - Time	0.005930 s
Load Curve 1 - Index 20 - Value	0.019450
Load Curve 1 - Index 21 - Time	0.006261 s
Load Curve 1 - Index 21 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 22 - Time	0.006379 s
Load Curve 1 - Index 22 - Value	-0.095755
Load Curve 1 - Index 23 - Time	0.006496 s
Load Curve 1 - Index 23 - Value	-0.191509
Load Curve 1 - Index 24 - Time	0.006614 s
Load Curve 1 - Index 24 - Value	-0.287264

Load Curve 1 - Index 25 - Time	0.006732 s
Load Curve 1 - Index 25 - Value	-0.191509
Load Curve 1 - Index 26 - Time	0.006849 s
Load Curve 1 - Index 26 - Value	-0.095755
Load Curve 1 - Index 27 - Time	0.006970 s
Load Curve 1 - Index 27 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 28 - Time	0.007215 s
Load Curve 1 - Index 28 - Value	0.000000

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
<u>1</u>	FLOOR	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>2</u>	RING I	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>3</u>	RING II	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>4</u>	RING III	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>5</u>	RING IV	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>6</u>	RING V	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>7</u>	RING VI	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>8</u>	ROOF	Plate	Steel (ASTM - A36)
<u>9</u>	Rigid Element	Rigid	Rigid elements have no material properties
10	Beam	Beam	Steel (ASTM - A36)
11	Pipe	Plate	[Customer Defined] (Part11)
12	Central support	Plate	Steel (ASTM - A36)
13	Part 13	Rigid	Rigid elements have no material properties
14	Part 14	Rigid	Rigid elements have no material properties
15	Part 15	Rigid	Rigid elements have no material properties
16	Part 16	Rigid	Rigid elements have no material properties
17	Part 17	Rigid	Rigid elements have no material properties
18	Part 18	Rigid	Rigid elements have no material properties
19	Part 19	Rigid	Rigid elements have no material properties
20	Part 20	Rigid	Rigid elements have no material properties
21	Part 21	Rigid	Rigid elements have no material properties
22	Part 22	Rigid	Rigid elements have no material properties
23	Part 23	Rigid	Rigid elements have no material properties
24	Part 24	Rigid	Rigid elements have no material properties
25	Part 25	Rigid	Rigid elements have no material properties
26	Part 26	Rigid	Rigid elements have no material properties

27	Part 27	Rigid	Rigid elements have no material properties
28	Part 28	Rigid	Rigid elements have no material properties
29	Part 29	Rigid	Rigid elements have no material properties
30	Part 30	Rigid	Rigid elements have no material properties
31	Part 31	Rigid	Rigid elements have no material properties
32	Part 32	Rigid	Rigid elements have no material properties
33	Part 33	Rigid	Rigid elements have no material properties
34	Part 34	Rigid	Rigid elements have no material properties
35	Part 35	Rigid	Rigid elements have no material properties
36	Part 36	Rigid	Rigid elements have no material properties
37	Part 37	Rigid	Rigid elements have no material properties
38	Part 38	Rigid	Rigid elements have no material properties
39	Part 39	Rigid	Rigid elements have no material properties
40	Part 40	Rigid	Rigid elements have no material properties
41	Part 41	Rigid	Rigid elements have no material properties
42	Part 42	Rigid	Rigid elements have no material properties
43	Part 43	Rigid	Rigid elements have no material properties
44	Part 44	Rigid	Rigid elements have no material properties
45	Part 45	Rigid	Rigid elements have no material properties
46	Part 46	Rigid	Rigid elements have no material properties
47	Part 47	Rigid	Rigid elements have no material properties
48	Part 48	Rigid	Rigid elements have no material properties
49	Part 49	Rigid	Rigid elements have no material properties
50	Part 50	Rigid	Rigid elements have no material properties
51	Part 51	Rigid	Rigid elements have no material properties

Element Information

Element Properties used for:

- FLOOR
- RING III
- RING IV
- RING V
- RING VI

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001

Plate Properties	Part Based
Thickness	0.004760000000000001 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- RING I
- RING II
- ROOF
- PIPE

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.00635 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- Rigid Element
- Part 13

Element Type	Rigid
Stiffness	10000000000
Component DOF - Tx	Yes

Component DOF - Ty	Yes
Component DOF - Tz	Yes
Component DOF - Rx	Yes
Component DOF - Ry	Yes
Component DOF - Rz	Yes

Element Properties used for:

- Beam

Element Type	Beam
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Layer 1 - Area	0.0024075
Layer 1 - SA2	0.0011375
Layer 1 - SA3	0.0012
Layer 1 - J1	6.0834299281923e-008
Layer 1 - I2	9.318075625e-006
Layer 1 - I3	9.74040705315421e-007
Layer 1 - S2	0.0001164759453125
Layer 1 - S3	2.16697265117387e-005

Element Properties used for:

- CENTRAL SUPPORT

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.01905 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information**Steel (ASTM - A36) -Plate**

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	77221281678.9633 N/m ²

Steel (ASTM - A36) -Beam

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C

[Customer Defined] (Part11) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/02/05-16:55:45
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7861.0929 kg/m ³
Modulus of Elasticity	208500000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.288
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	7928970887.00002 N/m ²

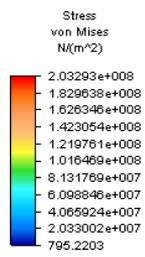
Loads

FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions

Surface Pressure/Traction

ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
9	Unnamed	8	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
10	Unnamed	6	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
12	Unnamed	7	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
8	Unnamed	2	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
11	Unnamed	5	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
13	Unnamed	4	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
14	Unnamed	3	2	0.000000	6184.800000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress

Time: 0.0066132 s

Time Step: 22 of 24

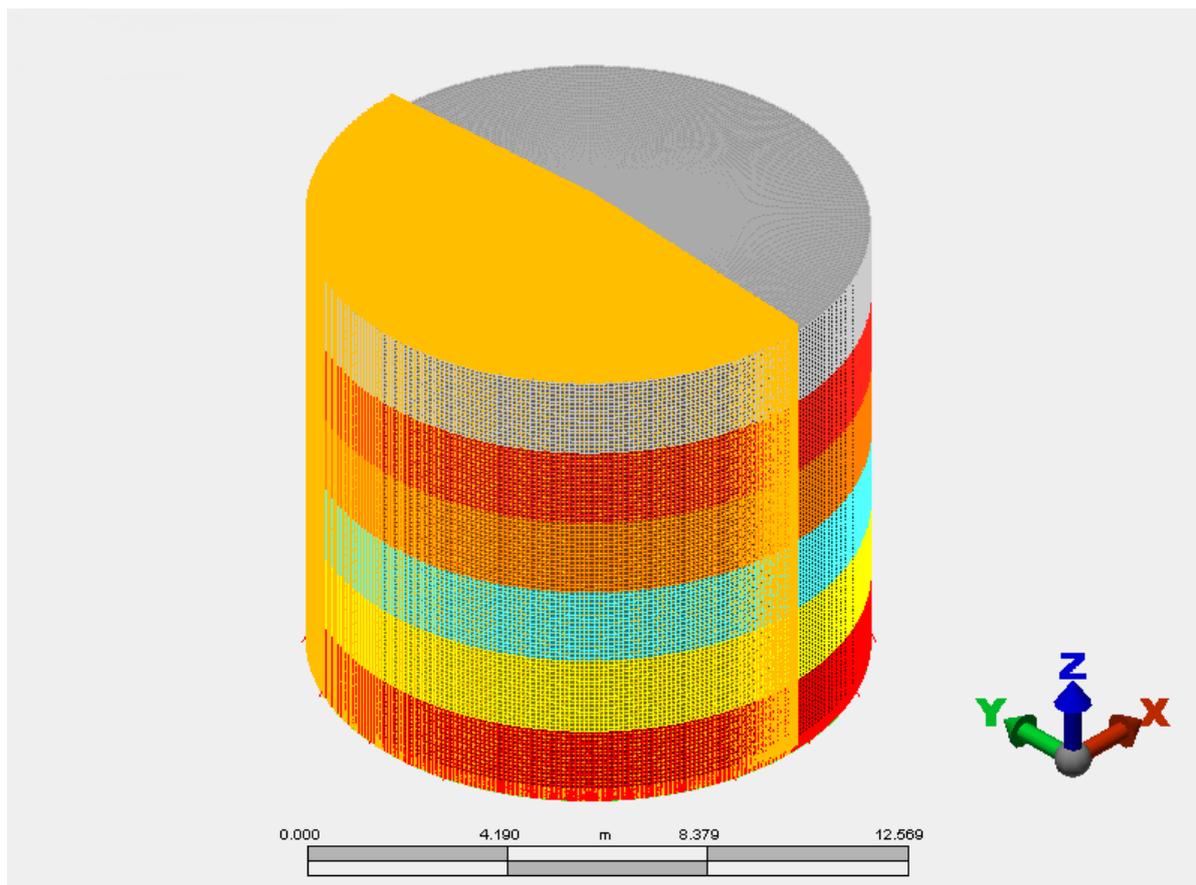
Maximum Value: 2.03293e+008 N/(m²)Minimum Value: 795.22 N/(m²)

1 < Design Scenario 1 >



ANEXO I

Análisis de tanque cilíndrico atmosférico (masa constante, caso:250 m)



Analysis of Atmospheric Cylindrical Tank (Constant Mass, Case: 250m)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	2/21/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	2/21/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

The following analysis is intended to observe the influence of the distance between the tank to the explosion focus and the stresses produced, when the explosive mass remains constant. For this analysis, different cases were tested by varying the distance between the tank to the source of the explosion but using a constant mass of 0.131 kg (mass of explosive required to obtain the yield stress at 10 m). This model is one of these cases where the distance is 250m.

Summary

Model Information

Analysis Type - Transient Stress (Direct Integration)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\tank08(250m 0.1702kPa 0.13Kg).fem

Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information

Processor Information

Number of time steps	23
Time Step Size	0.0005215 s
Output interval	1
Damping Alpha	0
Damping Beta	0
Dynamic Nodal Load 1 - Node Number	1
Dynamic Nodal Load 1 - Load Curve	1
Dynamic Nodal Load 1 - Type	Translation
Dynamic Nodal Load 1 - X Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Y Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Z Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Activation Time	0
Disable Calculation and Output of Strains	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Ground Motion Type	None
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Nodal Printout Type Indicator	Histories and Maxima

Load Curve Information

Load Curve 1 - Title	Load Curve 1
Load Curve 1 - Type	Piecewise Linear
Load Curve 1 - Index 1 - Time	0.000000 s
Load Curve 1 - Index 1 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 2 - Time	0.000522 s
Load Curve 1 - Index 2 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 3 - Time	0.000522 s
Load Curve 1 - Index 3 - Value	1.000000
Load Curve 1 - Index 4 - Time	0.001110 s
Load Curve 1 - Index 4 - Value	0.986875
Load Curve 1 - Index 5 - Time	0.001699 s
Load Curve 1 - Index 5 - Value	0.973122
Load Curve 1 - Index 6 - Time	0.002288 s
Load Curve 1 - Index 6 - Value	0.958671

Load Curve 1 - Index 7 - Time	0.002877 s
Load Curve 1 - Index 7 - Value	0.943439
Load Curve 1 - Index 8 - Time	0.003466 s
Load Curve 1 - Index 8 - Value	0.927326
Load Curve 1 - Index 9 - Time	0.004054 s
Load Curve 1 - Index 9 - Value	0.910211
Load Curve 1 - Index 10 - Time	0.004643 s
Load Curve 1 - Index 10 - Value	0.891943
Load Curve 1 - Index 11 - Time	0.005232 s
Load Curve 1 - Index 11 - Value	0.872330
Load Curve 1 - Index 12 - Time	0.005821 s
Load Curve 1 - Index 12 - Value	0.851129
Load Curve 1 - Index 13 - Time	0.006410 s
Load Curve 1 - Index 13 - Value	0.828014
Load Curve 1 - Index 14 - Time	0.006999 s
Load Curve 1 - Index 14 - Value	0.802546
Load Curve 1 - Index 15 - Time	0.007587 s
Load Curve 1 - Index 15 - Value	0.774095
Load Curve 1 - Index 16 - Time	0.008176 s
Load Curve 1 - Index 16 - Value	0.741723
Load Curve 1 - Index 17 - Time	0.008765 s
Load Curve 1 - Index 17 - Value	0.703920
Load Curve 1 - Index 18 - Time	0.009354 s
Load Curve 1 - Index 18 - Value	0.657996
Load Curve 1 - Index 19 - Time	0.009943 s
Load Curve 1 - Index 19 - Value	0.598303
Load Curve 1 - Index 20 - Time	0.010531 s
Load Curve 1 - Index 20 - Value	0.508543
Load Curve 1 - Index 21 - Time	0.011120 s
Load Curve 1 - Index 21 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 22 - Time	0.011238 s
Load Curve 1 - Index 22 - Value	-0.139157
Load Curve 1 - Index 23 - Time	0.011355 s
Load Curve 1 - Index 23 - Value	-0.278314
Load Curve 1 - Index 24 - Time	0.011473 s
Load Curve 1 - Index 24 - Value	-0.417472
Load Curve 1 - Index 25 - Time	0.011591 s

Load Curve 1 - Index 25 - Value	-0.278314
Load Curve 1 - Index 26 - Time	0.011708 s
Load Curve 1 - Index 26 - Value	-0.139157
Load Curve 1 - Index 27 - Time	0.011826 s
Load Curve 1 - Index 27 - Value	-0.000000
Load Curve 1 - Index 28 - Time	0.011995 s
Load Curve 1 - Index 28 - Value	0.000000

Part Information

Element Information

Element Properties used for:

- FLOOR
- RING III
- RING IV
- RING V
- RING VI

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.0047600000000001 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- RING I
- RING II
- ROOF
- PIPE

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke

Stress Free Reference Temperature	-17.77777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.00635 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- Rigid Element
- Part 13

Element Type	Rigid
Stiffness	10000000000
Component DOF - Tx	Yes
Component DOF - Ty	Yes
Component DOF - Tz	Yes
Component DOF - Rx	Yes
Component DOF - Ry	Yes
Component DOF - Rz	Yes

Element Properties used for:

- Beam

Element Type	Beam
Stress Free Reference Temperature	-17.77777777777778 °C
Layer 1 - Area	0.0024075
Layer 1 - SA2	0.0011375
Layer 1 - SA3	0.0012
Layer 1 - J1	6.0834299281923e-008
Layer 1 - I2	9.318075625e-006
Layer 1 - I3	9.74040705315421e-007
Layer 1 - S2	0.0001164759453125
Layer 1 - S3	2.16697265117387e-005

Element Properties used for:

• CENTRAL SUPPORT

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	-17.7777777777778 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.01905 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information**Steel (ASTM - A36) -Plate**

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel
Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	77221281678.9633 N/m ²

Steel (ASTM - A36) -Beam

Material Model	Standard
Material Source	Autodesk Simulation Material Library
Material Source File	C:\Program Files\Autodesk\Algor Simulation 2012\matlibs\algor.mat.mlb
Date Last Updated	2004/09/30-16:00:00
Material Description	Structural Steel

Mass Density	7854.86795748158 kg/m ³
Modulus of Elasticity	199947961490.173 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	1.17e-005 1/°C

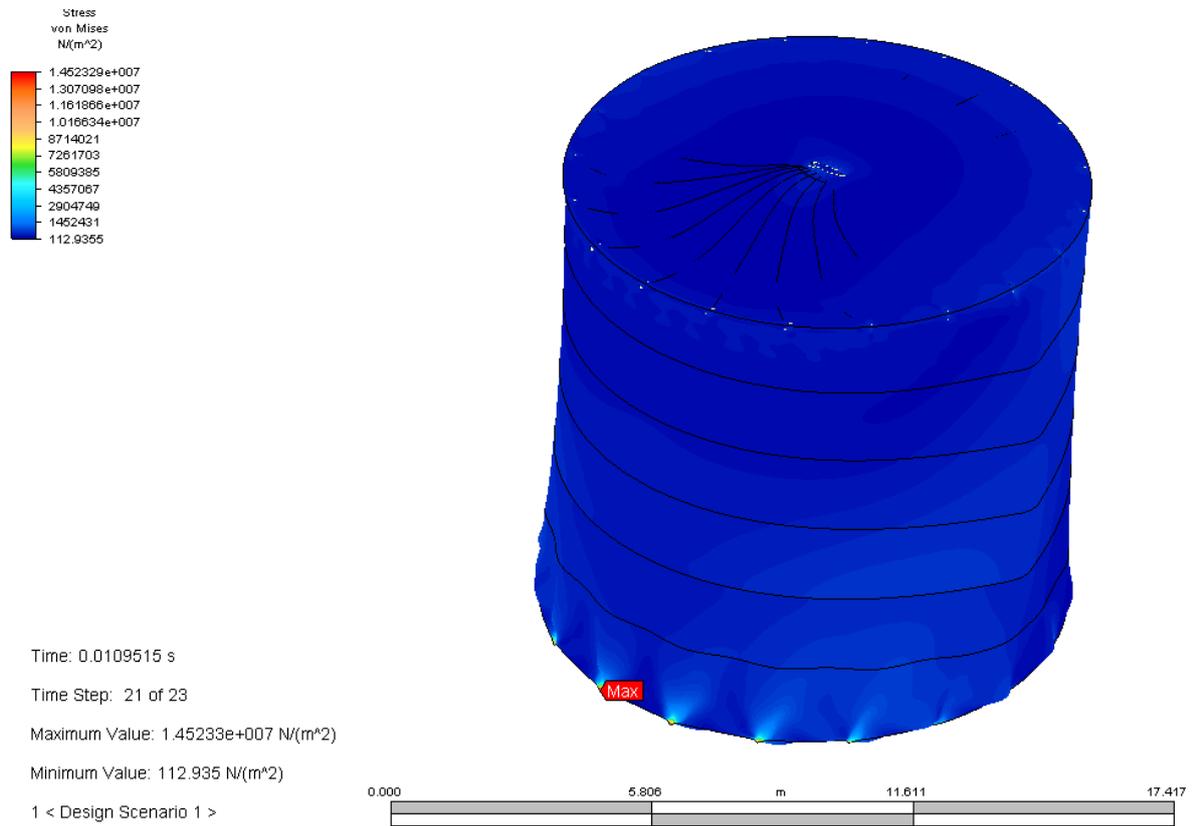
[Customer Defined] (Part11) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/02/05-16:55:45
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7861.0929 kg/m ³
Modulus of Elasticity	208500000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.288
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	7928970887.00002 N/m ²

Loads**FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions****Surface Pressure/Traction**

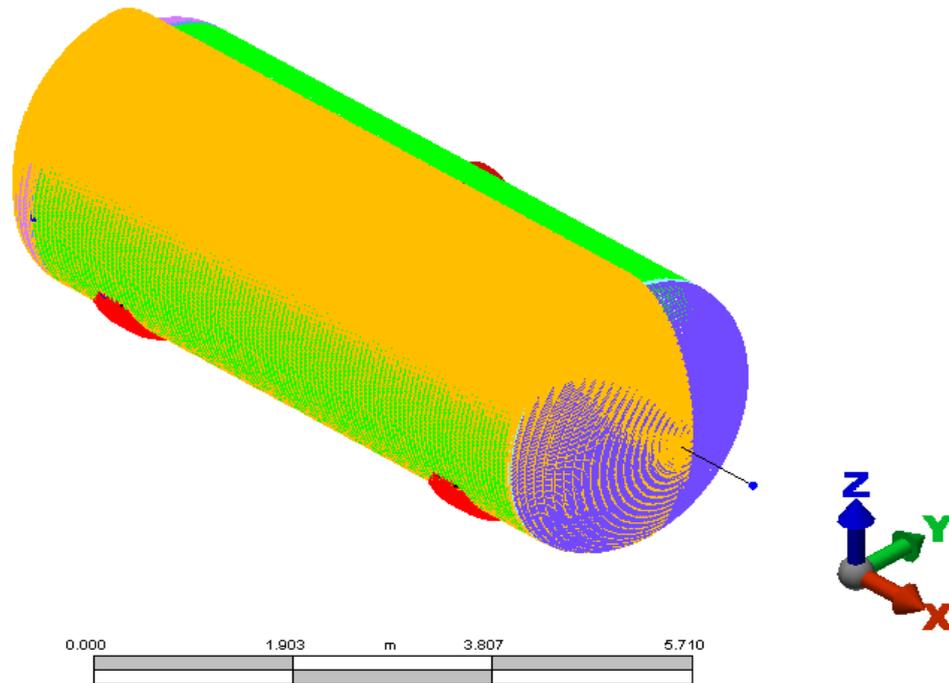
ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
8	Unnamed	2	2	0.000000	170.225906	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
9	Unnamed	8	2	0.000000	170.225906	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
13	Unnamed	4	2	0.000000	170.225906	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
11	Unnamed	5	2	0.000000	170.225906	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
12	Unnamed	7	2	0.000000	170.225906	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
14	Unnamed	3	2	0.000000	170.225906	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
10	Unnamed	6	2	0.000000	170.225906	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress

ANEXO J

Análisis de recipiente a presión horizontal (frecuencia natural)



Analysis of Horizontal Pressure Vessel (Natural Frequency)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	5/31/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	5/31/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

Before performing stress analysis is always necessary to obtain the values of the natural frequencies for different vibration modes of the pressure vessel in order to define the nature of the applied load (dynamic, quasi-static or impact) according the criteria above.

According to the analysis, for the first mode of vibration the natural period is 0.00081 s (natural frequency: 19.5679 cycle/s).

Whereas the ratio of the duration of the positive phase with respect to the natural period must be less than or close to 0.5, in order to consider any load like an impact load.

We conclude that the maximum load duration t_d will have an approximate value of 0.004067 s (4.07 ms) in order to considerate the load like an impact load.

Summary

Model Information

Analysis Type - Natural Frequency (Modal)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\RP07 FN.fem

Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information

Processor Information

Number of Frequencies To Calculate	5
------------------------------------	---

Cutoff Frequency	0 cycles/s
Frequency Shift	0 cycles/s
Expected Rigid Body Modes	0
Maximum Number of Iterations	32
Number of Vectors in Subspace Iteration	0
Orthogonality Check Printout	None
Convergence Value for Eigenvalue	1e-005
Avoid Sturn Sequence Check	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Attempt to Run Despite Errors	No
Do Not Save Restart Files	No
Displacement Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Matrices in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
<u>1</u>	Part 1	Plate	[Customer Defined] (Part1)
20	Part 20	Plate	[Customer Defined] (Part20)
30	Part 30	Plate	[Customer Defined] (Part30)
50	Part 50	Plate	[Customer Defined] (Part50)
60	Part 60	Plate	[Customer Defined] (Part60)
141	Part 141	Plate	[Customer Defined] (Part141)
142	Part 142	Plate	[Customer Defined] (Part142)
143	Part 143	Plate	[Customer Defined] (Part143)

Element Information

Element Properties used for:

- Part 1
- Part 20
- Part 30
- Part 50
- Part 60
- Part 143

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke

Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.012 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- Part 141

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.013 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

- Part 142

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke

Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.0476 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information

[Customer Defined] (Part1) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:07:28
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part20) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:11:06
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part30) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:12:32
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part50) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:49:56
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part60) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:52:28
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part141) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:55:23
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part142) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:59:36
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7750 kg/m ³
Modulus of Elasticity	201000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.3
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part143) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:57:46
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

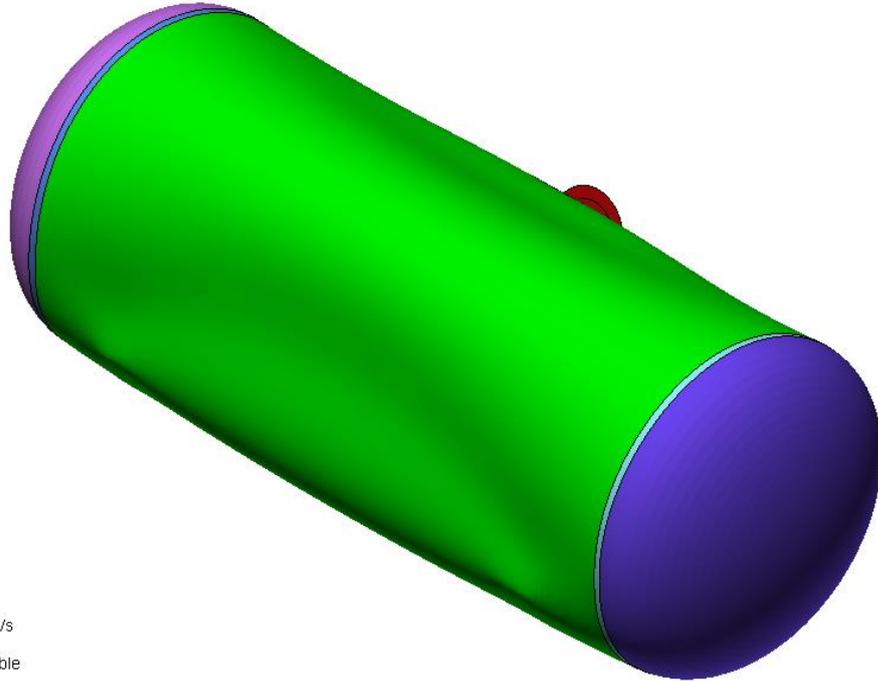
Loads

FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions

Surface Pressure/Traction

ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
1	Unnamed	60	2	0.000000	0.000000	75880.00000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
2	Unnamed	1	2	0.000000	0.000000	75880.00000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
4	Unnamed	50	2	0.000000	0.000000	75880.00000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
5	Unnamed	20	2	0.000000	0.000000	75880.00000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
3	Unnamed	30	2	0.000000	0.000000	75880.00000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress

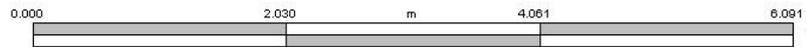
Mode: 1 of 5

Frequency: 19.5679 cycles/s

Maximum Value: Not Available

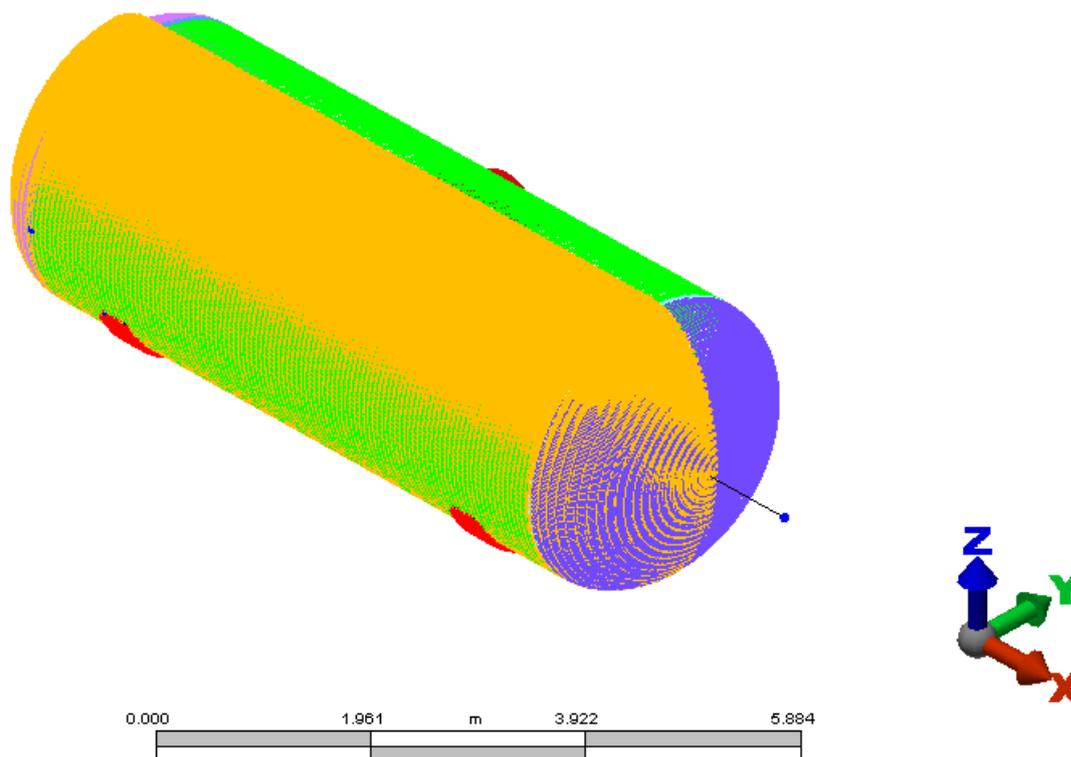
Minimum Value: Not Available

1 < Design Scenario 1 >



ANEXO K

Análisis de recipiente a presión horizontal (esfuerzo de fluencia)



Analysis of Horizontal Pressure Vessel (Yield Stress)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	5/27/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	5/27/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

After define the model and the natural frequency. Through the secant method, it is subjected successively the model to different dynamic loads (based on the profile shockwave assuming in all cases a constant explosion focus distance of 10 m) to obtain as stress maximum a value close to the material yield strength (260 MPa).

It was found that for a maximum stress equal to 260 MPa, explosive mass of 19.91 kg is needed with profile shockwave's maximum pressure of 75.88 kPa

Summary

Model Information

Analysis Type - Transient Stress (Direct Integration)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\rp30 75.88 kpa mod.fem

Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information

Processor Information

Number of time steps	60
Time Step Size	0.000265 s

Output interval	1
Damping Alpha	0
Damping Beta	0
Dynamic Nodal Load 1 - Node Number	1
Dynamic Nodal Load 1 - Load Curve	1
Dynamic Nodal Load 1 - Type	Translation
Dynamic Nodal Load 1 - X Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Y Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Z Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Activation Time	0
Disable Calculation and Output of Strains	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Ground Motion Type	None
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Nodal Printout Type Indicator	Histories and Maxima

Load Curve Information

Load Curve 1 - Title	Load Curve 1
Load Curve 1 - Type	Piecewise Linear
Load Curve 1 - Index 1 - Time	0.000000 s
Load Curve 1 - Index 1 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 2 - Time	0.000275 s
Load Curve 1 - Index 2 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 3 - Time	0.000275 s
Load Curve 1 - Index 3 - Value	1.000000
Load Curve 1 - Index 4 - Time	0.000482 s
Load Curve 1 - Index 4 - Value	0.914502
Load Curve 1 - Index 5 - Time	0.000689 s
Load Curve 1 - Index 5 - Value	0.825799
Load Curve 1 - Index 6 - Time	0.000896 s
Load Curve 1 - Index 6 - Value	0.735299
Load Curve 1 - Index 7 - Time	0.001102 s
Load Curve 1 - Index 7 - Value	0.644511

Load Curve 1 - Index 8 - Time	0.001309 s
Load Curve 1 - Index 8 - Value	0.555007
Load Curve 1 - Index 9 - Time	0.001516 s
Load Curve 1 - Index 9 - Value	0.468374
Load Curve 1 - Index 10 - Time	0.001723 s
Load Curve 1 - Index 10 - Value	0.386162
Load Curve 1 - Index 11 - Time	0.001929 s
Load Curve 1 - Index 11 - Value	0.309829
Load Curve 1 - Index 12 - Time	0.002136 s
Load Curve 1 - Index 12 - Value	0.240670
Load Curve 1 - Index 13 - Time	0.002343 s
Load Curve 1 - Index 13 - Value	0.179757
Load Curve 1 - Index 14 - Time	0.002550 s
Load Curve 1 - Index 14 - Value	0.127872
Load Curve 1 - Index 15 - Time	0.002756 s
Load Curve 1 - Index 15 - Value	0.085446
Load Curve 1 - Index 16 - Time	0.002963 s
Load Curve 1 - Index 16 - Value	0.052510
Load Curve 1 - Index 17 - Time	0.003170 s
Load Curve 1 - Index 17 - Value	0.028654
Load Curve 1 - Index 18 - Time	0.003377 s
Load Curve 1 - Index 18 - Value	0.013011
Load Curve 1 - Index 19 - Time	0.003583 s
Load Curve 1 - Index 19 - Value	0.004256
Load Curve 1 - Index 20 - Time	0.003790 s
Load Curve 1 - Index 20 - Value	0.000637
Load Curve 1 - Index 21 - Time	0.003997 s
Load Curve 1 - Index 21 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 22 - Time	0.004625 s
Load Curve 1 - Index 22 - Value	-0.041669
Load Curve 1 - Index 23 - Time	0.005253 s
Load Curve 1 - Index 23 - Value	-0.083338
Load Curve 1 - Index 24 - Time	0.005880 s
Load Curve 1 - Index 24 - Value	-0.125006
Load Curve 1 - Index 25 - Time	0.006508 s
Load Curve 1 - Index 25 - Value	-0.083338
Load Curve 1 - Index 26 - Time	0.007136 s

Load Curve 1 - Index 26 - Value	-0.041669
Load Curve 1 - Index 27 - Time	0.007764 s
Load Curve 1 - Index 27 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 28 - Time	0.016000 s
Load Curve 1 - Index 28 - Value	0.000000

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
<u>1</u>	Part 1	Plate	[Customer Defined] (Part1)
20	Part 20	Plate	[Customer Defined] (Part20)
30	Part 30	Plate	[Customer Defined] (Part30)
50	Part 50	Plate	[Customer Defined] (Part50)
60	Part 60	Plate	[Customer Defined] (Part60)
141	Part 141	Plate	[Customer Defined] (Part141)
142	Part 142	Plate	[Customer Defined] (Part142)
143	Part 143	Plate	[Customer Defined] (Part143)

Element Information

Element Properties used for:

- Part 1
- Part 20
- Part 30
- Part 50
- Part 60
- Part 143

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.012 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m

Nodal Order Z Coordinate	0 m
--------------------------	-----

Element Properties used for:

• Part 141

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.013 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

• Part 142

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.0476 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information***[Customer Defined] (Part1) -Plate***

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:07:28
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part20) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:11:06
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part30) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:12:32
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part50) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:49:56
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part60) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:52:28
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part141) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:55:23
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part142) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable

Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:59:36
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7750 kg/m ³
Modulus of Elasticity	201000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.3
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part143) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:57:46
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

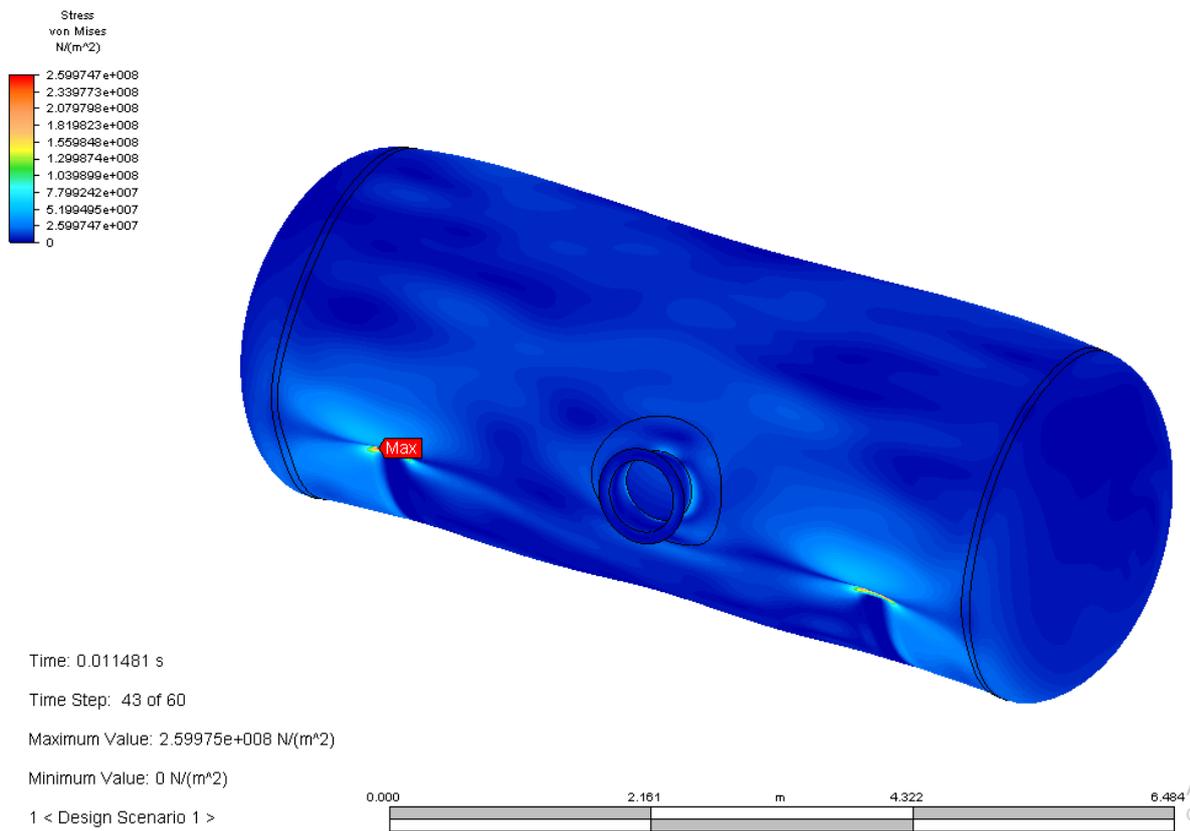
Loads

FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions

Surface Pressure/Traction

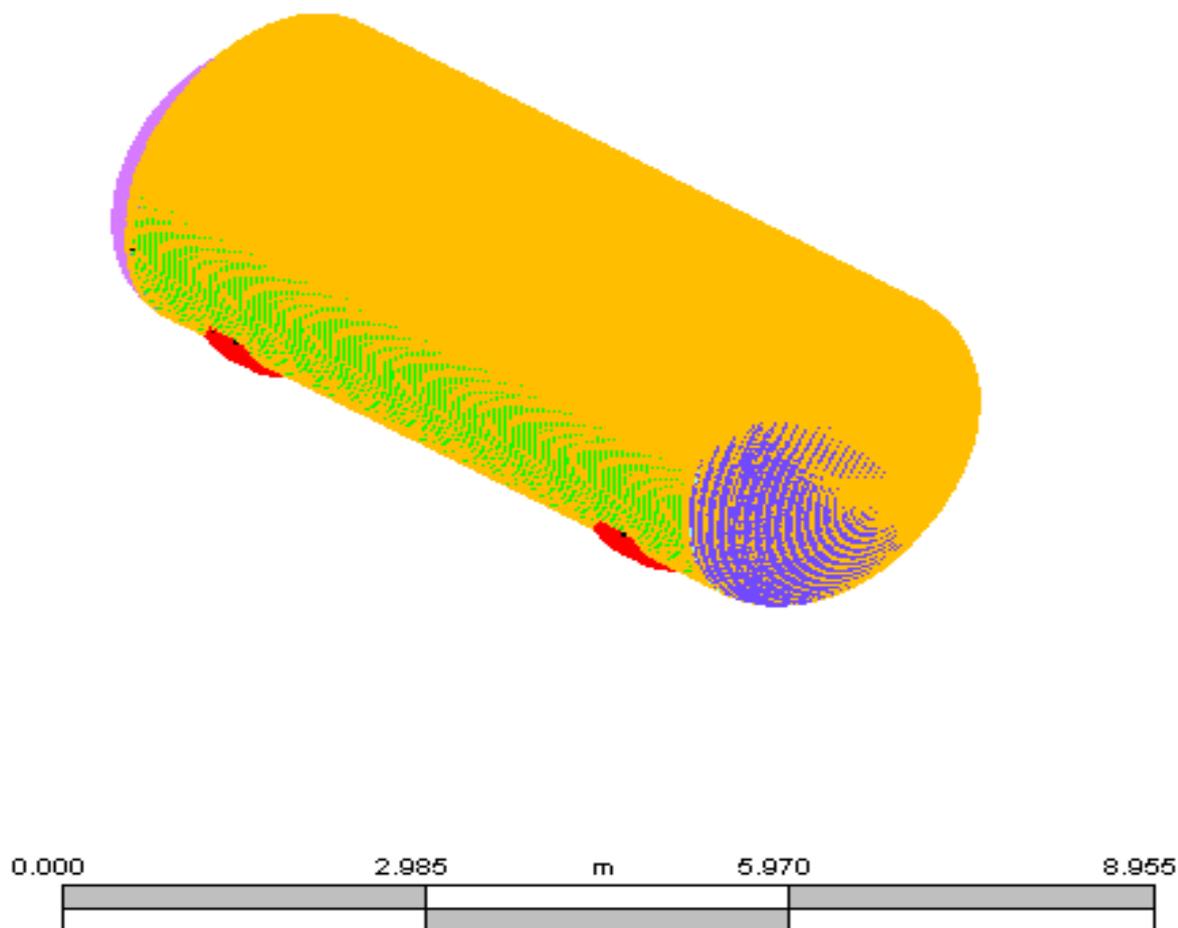
ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
3	Unnamed	30	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
2	Unnamed	1	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
4	Unnamed	50	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
5	Unnamed	20	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
1	Unnamed	60	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress

ANEXO L

Análisis de recipiente a presión horizontal (ángulo de incidencia: 90°)



Analysis of Horizontal Pressure Vessel (Incidence Angle: 90°)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	5/31/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	5/31/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

This analysis try to understand the influence of the incidence angle of the load applied on to the pressure vessel and its relation to the calculated stresses.

According to the calculations, with an incidence angle of 90° the pressure vessel present the worst condition. In this case for a maximum stress equal to 260 MPa, an explosive mass of 1.66 kg is required and a profile shockwave's maximum pressure of 18.8 kPa.

Summary

Model Information

Analysis Type - Transient Stress (Direct Integration)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\RP04 18.8kPa.fem

Design scenario description - Design Scenario # 2

Analysis Parameters Information***Processor Information***

Number of time steps	50
Time Step Size	0.0002551 s
Output interval	1
Damping Alpha	0
Damping Beta	0
Dynamic Nodal Load 1 - Node Number	1
Dynamic Nodal Load 1 - Load Curve	1
Dynamic Nodal Load 1 - Type	Translation
Dynamic Nodal Load 1 - X Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Y Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Z Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Activation Time	0
Disable Calculation and Output of Strains	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Ground Motion Type	None
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Nodal Printout Type Indicator	Histories and Maxima

Load Curve Information

Load Curve 1 - Title	Load Curve 1
Load Curve 1 - Type	Piecewise Linear
Load Curve 1 - Index 1 - Time	0.000000 s
Load Curve 1 - Index 1 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 2 - Time	0.000255 s
Load Curve 1 - Index 2 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 3 - Time	0.000255 s
Load Curve 1 - Index 3 - Value	1.000000
Load Curve 1 - Index 4 - Time	0.000507 s
Load Curve 1 - Index 4 - Value	0.912841
Load Curve 1 - Index 5 - Time	0.000759 s
Load Curve 1 - Index 5 - Value	0.826463
Load Curve 1 - Index 6 - Time	0.001011 s

Load Curve 1 - Index 6 - Value	0.741417
Load Curve 1 - Index 7 - Time	0.001262 s
Load Curve 1 - Index 7 - Value	0.658272
Load Curve 1 - Index 8 - Time	0.001514 s
Load Curve 1 - Index 8 - Value	0.577613
Load Curve 1 - Index 9 - Time	0.001766 s
Load Curve 1 - Index 9 - Value	0.500029
Load Curve 1 - Index 10 - Time	0.002018 s
Load Curve 1 - Index 10 - Value	0.426116
Load Curve 1 - Index 11 - Time	0.002270 s
Load Curve 1 - Index 11 - Value	0.356462
Load Curve 1 - Index 12 - Time	0.002521 s
Load Curve 1 - Index 12 - Value	0.291644
Load Curve 1 - Index 13 - Time	0.002773 s
Load Curve 1 - Index 13 - Value	0.232217
Load Curve 1 - Index 14 - Time	0.003025 s
Load Curve 1 - Index 14 - Value	0.178704
Load Curve 1 - Index 15 - Time	0.003277 s
Load Curve 1 - Index 15 - Value	0.131583
Load Curve 1 - Index 16 - Time	0.003529 s
Load Curve 1 - Index 16 - Value	0.091275
Load Curve 1 - Index 17 - Time	0.003781 s
Load Curve 1 - Index 17 - Value	0.058124
Load Curve 1 - Index 18 - Time	0.004032 s
Load Curve 1 - Index 18 - Value	0.032381
Load Curve 1 - Index 19 - Time	0.004284 s
Load Curve 1 - Index 19 - Value	0.014172
Load Curve 1 - Index 20 - Time	0.004536 s
Load Curve 1 - Index 20 - Value	0.003465
Load Curve 1 - Index 21 - Time	0.004788 s
Load Curve 1 - Index 21 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 22 - Time	0.005062 s
Load Curve 1 - Index 22 - Value	-0.073493
Load Curve 1 - Index 23 - Time	0.005337 s
Load Curve 1 - Index 23 - Value	-0.146985
Load Curve 1 - Index 24 - Time	0.005611 s
Load Curve 1 - Index 24 - Value	-0.220478

Load Curve 1 - Index 25 - Time	0.005885 s
Load Curve 1 - Index 25 - Value	-0.146985
Load Curve 1 - Index 26 - Time	0.006160 s
Load Curve 1 - Index 26 - Value	-0.073493
Load Curve 1 - Index 27 - Time	0.006434 s
Load Curve 1 - Index 27 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 28 - Time	0.006944 s
Load Curve 1 - Index 28 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 29 - Time	0.015000 s
Load Curve 1 - Index 29 - Value	0.000000

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
<u>1</u>	Part 1	Plate	[Customer Defined] (Part1)
20	Part 20	Plate	[Customer Defined] (Part20)
30	Part 30	Plate	[Customer Defined] (Part30)
50	Part 50	Plate	[Customer Defined] (Part50)
60	Part 60	Plate	[Customer Defined] (Part60)
141	Part 141	Plate	[Customer Defined] (Part141)
142	Part 142	Plate	[Customer Defined] (Part142)
143	Part 143	Plate	[Customer Defined] (Part143)

Element Information

Element Properties used for:

- Part 1
- Part 20
- Part 30
- Part 50
- Part 60
- Part 143

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.012 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m

Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

• Part 141

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.013 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

• Part 142

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.0476 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m

delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information

[Customer Defined] (Part1) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/14-01:19:50
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part142) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/14-01:21:59
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7750 kg/m ³
Modulus of Elasticity	201000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.3
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

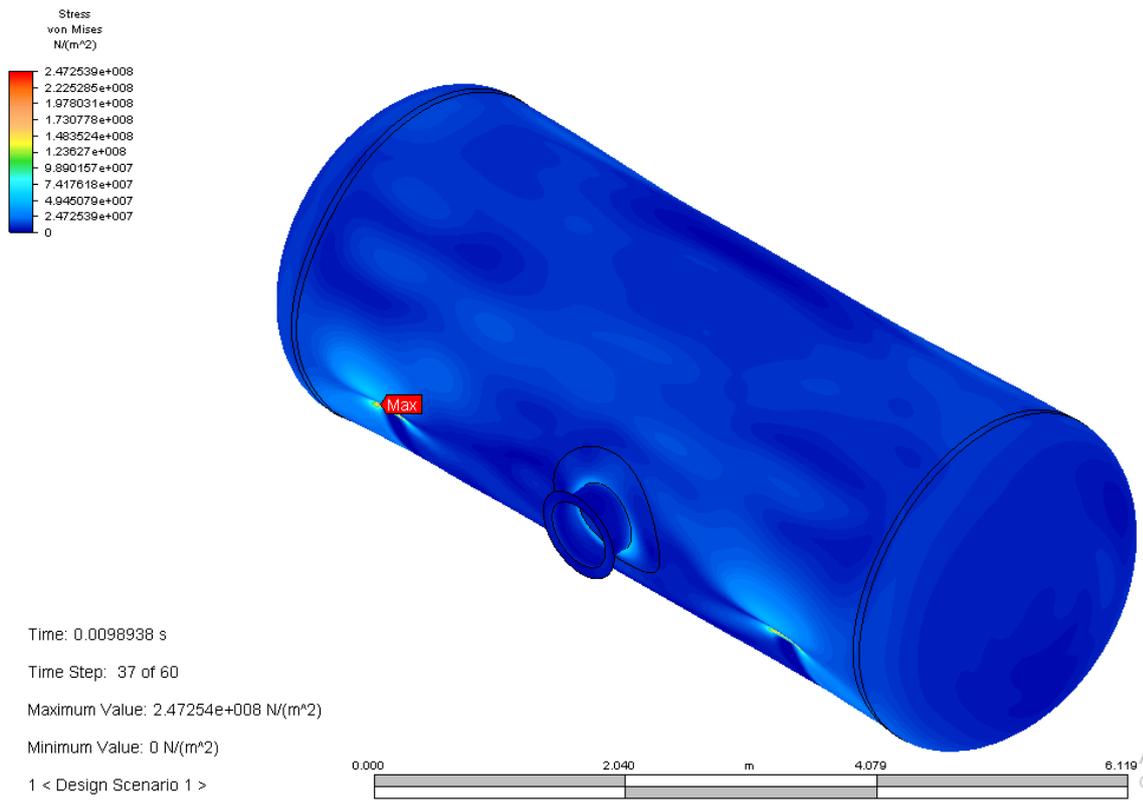
Loads

FEA Object Group 4: Surface Pressure/Tractions

Surface Pressure/Traction

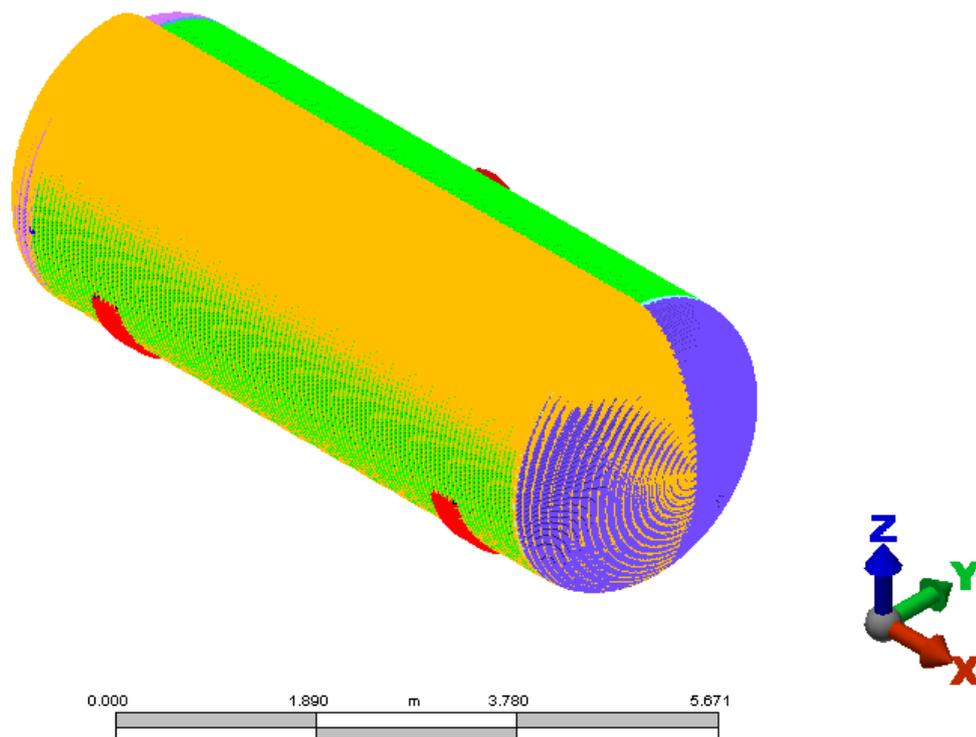
ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
8	Unnamed	141	2	0.000000	-18800.000000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
11	Unnamed	143	2	0.000000	-18800.000000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
10	Unnamed	1	1	0.000000	-18800.000000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
9	Unnamed	60	1	0.000000	-18800.000000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
7	Unnamed	30	1	0.000000	-18800.000000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
12	Unnamed	50	1	0.000000	-18800.000000	0.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress

ANEXO M

Análisis de recipiente a presión horizontal (ángulo de contacto: 150°)



Analysis of Horizontal Pressure Vessel (Contact Angle: 150°)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	5/31/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	5/31/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

In order to study the influence of the contact angle of the saddle relative to those strain produced by a shockwave of an explosion, different simulations to determine their behaviour were carried out.

To identify the influence of the contact angle of the saddle over the stresses produced by a shock wave from an explosion, the magnitude of the contact angle was increased until 180°, in increments of 10°. As a result of analysis it identified that as the contact angle is increased, the stress decreases. This behaviour is maintained up to an angle of contract of 150°. From this point the trend reverses and increases to a lesser extent.

Summary

Model Information

Analysis Type - Transient Stress (Direct Integration)

Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)

Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\RP06 ANGULO 150.fem

Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information

Processor Information

Number of time steps	60
Time Step Size	0.0002674 s

Output interval	1
Damping Alpha	0
Damping Beta	0
Dynamic Nodal Load 1 - Node Number	1
Dynamic Nodal Load 1 - Load Curve	1
Dynamic Nodal Load 1 - Type	Translation
Dynamic Nodal Load 1 - X Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Y Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Z Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Activation Time	0
Disable Calculation and Output of Strains	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Ground Motion Type	None
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Nodal Printout Type Indicator	Histories and Maxima

Load Curve Information

Load Curve 1 - Title	Load Curve 1
Load Curve 1 - Type	Piecewise Linear
Load Curve 1 - Index 1 - Time	0.000000 s
Load Curve 1 - Index 1 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 2 - Time	0.000275 s
Load Curve 1 - Index 2 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 3 - Time	0.000275 s
Load Curve 1 - Index 3 - Value	1.000000
Load Curve 1 - Index 4 - Time	0.000482 s
Load Curve 1 - Index 4 - Value	0.914502
Load Curve 1 - Index 5 - Time	0.000689 s
Load Curve 1 - Index 5 - Value	0.825799
Load Curve 1 - Index 6 - Time	0.000896 s
Load Curve 1 - Index 6 - Value	0.735299
Load Curve 1 - Index 7 - Time	0.001102 s
Load Curve 1 - Index 7 - Value	0.644511

Load Curve 1 - Index 8 - Time	0.001309 s
Load Curve 1 - Index 8 - Value	0.555007
Load Curve 1 - Index 9 - Time	0.001516 s
Load Curve 1 - Index 9 - Value	0.468374
Load Curve 1 - Index 10 - Time	0.001723 s
Load Curve 1 - Index 10 - Value	0.386162
Load Curve 1 - Index 11 - Time	0.001929 s
Load Curve 1 - Index 11 - Value	0.309829
Load Curve 1 - Index 12 - Time	0.002136 s
Load Curve 1 - Index 12 - Value	0.240670
Load Curve 1 - Index 13 - Time	0.002343 s
Load Curve 1 - Index 13 - Value	0.179757
Load Curve 1 - Index 14 - Time	0.002550 s
Load Curve 1 - Index 14 - Value	0.127872
Load Curve 1 - Index 15 - Time	0.002756 s
Load Curve 1 - Index 15 - Value	0.085446
Load Curve 1 - Index 16 - Time	0.002963 s
Load Curve 1 - Index 16 - Value	0.052510
Load Curve 1 - Index 17 - Time	0.003170 s
Load Curve 1 - Index 17 - Value	0.028654
Load Curve 1 - Index 18 - Time	0.003377 s
Load Curve 1 - Index 18 - Value	0.013011
Load Curve 1 - Index 19 - Time	0.003583 s
Load Curve 1 - Index 19 - Value	0.004256
Load Curve 1 - Index 20 - Time	0.003790 s
Load Curve 1 - Index 20 - Value	0.000637
Load Curve 1 - Index 21 - Time	0.003997 s
Load Curve 1 - Index 21 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 22 - Time	0.004625 s
Load Curve 1 - Index 22 - Value	-0.041669
Load Curve 1 - Index 23 - Time	0.005253 s
Load Curve 1 - Index 23 - Value	-0.083338
Load Curve 1 - Index 24 - Time	0.005880 s
Load Curve 1 - Index 24 - Value	-0.125006
Load Curve 1 - Index 25 - Time	0.006508 s
Load Curve 1 - Index 25 - Value	-0.083338
Load Curve 1 - Index 26 - Time	0.007136 s

Load Curve 1 - Index 26 - Value	-0.041669
Load Curve 1 - Index 27 - Time	0.007764 s
Load Curve 1 - Index 27 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 28 - Time	0.008298 s
Load Curve 1 - Index 28 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 29 - Time	0.015000 s
Load Curve 1 - Index 29 - Value	0.000000

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
1	Part 1	Plate	[Customer Defined] (Part1)
20	Part 20	Plate	[Customer Defined] (Part20)
30	Part 30	Plate	[Customer Defined] (Part30)
50	Part 50	Plate	[Customer Defined] (Part50)
60	Part 60	Plate	[Customer Defined] (Part60)
141	Part 141	Plate	[Customer Defined] (Part141)
142	Part 142	Plate	[Customer Defined] (Part142)
143	Part 143	Plate	[Customer Defined] (Part143)

Element Information

Element Properties used for:

- Part 1
- Part 20
- Part 30
- Part 50
- Part 60
- Part 143

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.012 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default

Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

• Part 141

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.013 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

• Part 142

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.0476 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m

Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information***[Customer Defined] (Part1) -Plate***

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:07:28
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part20) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:11:06
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part30) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:12:32
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part50) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:49:56
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part60) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:52:28
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part141) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:55:23
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part142) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable

Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:59:36
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7750 kg/m ³
Modulus of Elasticity	201000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.3
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part143) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:57:46
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

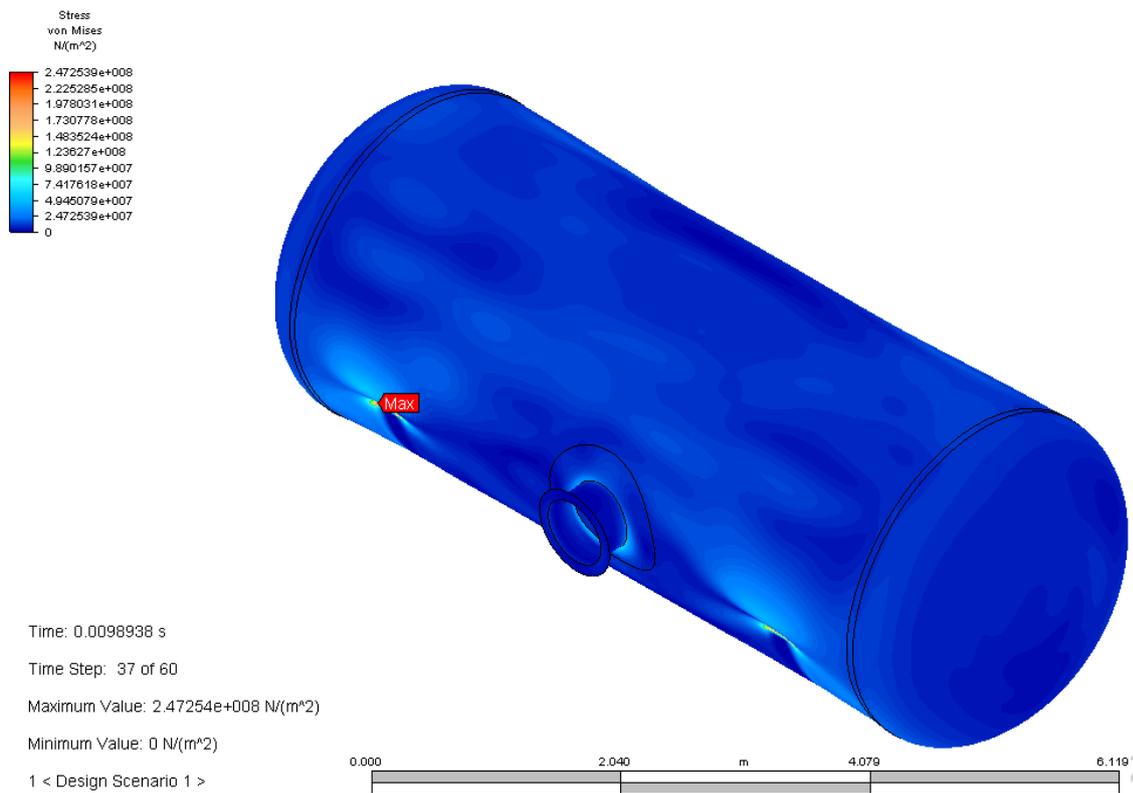
Loads

FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions

Surface Pressure/Traction

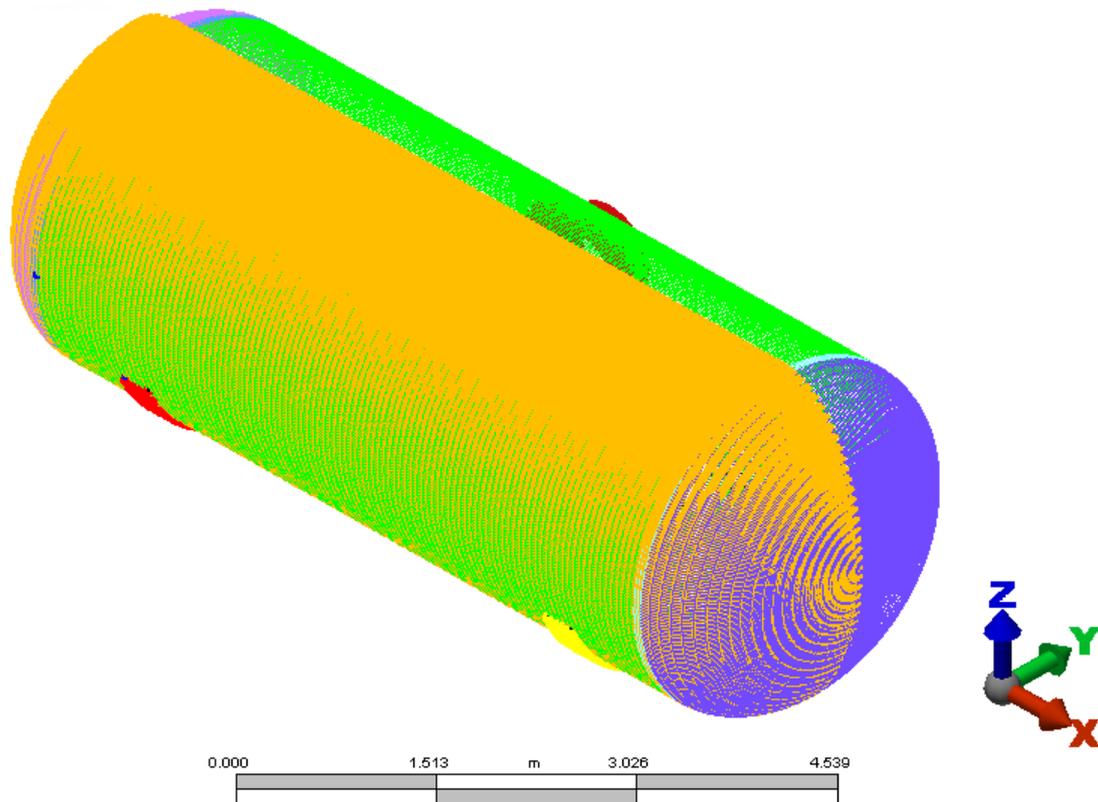
ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
1	Unnamed	60	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
5	Unnamed	20	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
4	Unnamed	50	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
3	Unnamed	30	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
2	Unnamed	1	2	0.000000	0.000000	75880.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress

ANEXO N

Análisis de recipiente a presión horizontal (masa constante, caso: 120 m)



Analysis of Horizontal Pressure Vessel (Constant Mass, Case: 120m)

Created by

Author:	Mauricio Morales
Department:	MIPP (UNS)
Created Date:	5/31/2016

Reviewed by

Reviewer:	Stella Tonelli
Department:	PLAPIQUI
Model Created Date:	5/31/2016
Reviewer Comments:	

Executive Summary

The following analysis is intended to observe the influence of the distance between the pressure vessel to the explosion focus and the stresses produced, when the explosive mass remains constant. For this analysis, different cases were tested by varying the distance between the pressure vessel to the source of the explosion but using a constant mass of 19 906 kg (mass of explosive required to obtain the yield stress at 10 m). This model is one of these cases where the distance is 120m.

Summary

Model Information

Analysis Type - Transient Stress (Direct Integration)
 Units - Metric mks (SI) - (N, m, s, °C, K, V, ohm, A, J)
 Model location - H:\MORALES_LAPTOP\Documents\elementos finitos\RP08 120m 19.906kg.fem
 Design scenario description - Design Scenario # 1

Analysis Parameters Information

Processor Information

Number of time steps	60
Time Step Size	0.0003797 s

Output interval	1
Damping Alpha	0
Damping Beta	0
Dynamic Nodal Load 1 - Node Number	1
Dynamic Nodal Load 1 - Load Curve	1
Dynamic Nodal Load 1 - Type	Translation
Dynamic Nodal Load 1 - X Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Y Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Z Scale	0
Dynamic Nodal Load 1 - Activation Time	0
Disable Calculation and Output of Strains	No
Avoid Bandwidth Minimization	No
Stop After Stiffness Calculations	No
Ground Motion Type	None
Stress Data in Output File	No
Equation Numbers Data in Output File	No
Element Input Data in Output File	No
Nodal Input Data in Output File	No
Nodal Printout Type Indicator	Histories and Maxima

Load Curve Information

Load Curve 1 - Title	Load Curve 1
Load Curve 1 - Type	Piecewise Linear
Load Curve 1 - Index 1 - Time	0.000000 s
Load Curve 1 - Index 1 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 2 - Time	0.000380 s
Load Curve 1 - Index 2 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 3 - Time	0.000380 s
Load Curve 1 - Index 3 - Value	1.000000
Load Curve 1 - Index 4 - Time	0.000718 s
Load Curve 1 - Index 4 - Value	0.927761
Load Curve 1 - Index 5 - Time	0.001056 s
Load Curve 1 - Index 5 - Value	0.856520
Load Curve 1 - Index 6 - Time	0.001395 s
Load Curve 1 - Index 6 - Value	0.786382
Load Curve 1 - Index 7 - Time	0.001733 s
Load Curve 1 - Index 7 - Value	0.717461
Load Curve 1 - Index 8 - Time	0.002071 s
Load Curve 1 - Index 8 - Value	0.649880
Load Curve 1 - Index 9 - Time	0.002410 s

Load Curve 1 - Index 9 - Value	0.583774
Load Curve 1 - Index 10 - Time	0.002748 s
Load Curve 1 - Index 10 - Value	0.519292
Load Curve 1 - Index 11 - Time	0.003086 s
Load Curve 1 - Index 11 - Value	0.456599
Load Curve 1 - Index 12 - Time	0.003425 s
Load Curve 1 - Index 12 - Value	0.395880
Load Curve 1 - Index 13 - Time	0.003763 s
Load Curve 1 - Index 13 - Value	0.337347
Load Curve 1 - Index 14 - Time	0.004101 s
Load Curve 1 - Index 14 - Value	0.281244
Load Curve 1 - Index 15 - Time	0.004440 s
Load Curve 1 - Index 15 - Value	0.227861
Load Curve 1 - Index 16 - Time	0.004778 s
Load Curve 1 - Index 16 - Value	0.177554
Load Curve 1 - Index 17 - Time	0.005116 s
Load Curve 1 - Index 17 - Value	0.130772
Load Curve 1 - Index 18 - Time	0.005455 s
Load Curve 1 - Index 18 - Value	0.088124
Load Curve 1 - Index 19 - Time	0.005793 s
Load Curve 1 - Index 19 - Value	0.050511
Load Curve 1 - Index 20 - Time	0.006131 s
Load Curve 1 - Index 20 - Value	0.019517
Load Curve 1 - Index 21 - Time	0.006470 s
Load Curve 1 - Index 21 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 22 - Time	0.007098 s
Load Curve 1 - Index 22 - Value	-0.137813
Load Curve 1 - Index 23 - Time	0.007725 s
Load Curve 1 - Index 23 - Value	-0.275626
Load Curve 1 - Index 24 - Time	0.008353 s
Load Curve 1 - Index 24 - Value	-0.413440
Load Curve 1 - Index 25 - Time	0.008981 s
Load Curve 1 - Index 25 - Value	-0.275626
Load Curve 1 - Index 26 - Time	0.009609 s
Load Curve 1 - Index 26 - Value	-0.137813
Load Curve 1 - Index 27 - Time	0.010237 s
Load Curve 1 - Index 27 - Value	0.000000
Load Curve 1 - Index 28 - Time	0.010237 s
Load Curve 1 - Index 28 - Value	0.000000

Load Curve 1 - Index 29 - Time	0.020000 s
Load Curve 1 - Index 29 - Value	0.000000

Part Information

Part ID	Part Name	Element Type	Material Name
<u>1</u>	Part 1	Plate	[Customer Defined] (Part1)
20	Part 20	Plate	[Customer Defined] (Part20)
30	Part 30	Plate	[Customer Defined] (Part30)
50	Part 50	Plate	[Customer Defined] (Part50)
60	Part 60	Plate	[Customer Defined] (Part60)
141	Part 141	Plate	[Customer Defined] (Part141)
142	Part 142	Plate	[Customer Defined] (Part142)
143	Part 143	Plate	[Customer Defined] (Part143)

Element Information

Element Properties used for:

- Part 1
- Part 20
- Part 30
- Part 50
- Part 60
- Part 143

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.012 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

• Part 141

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.013 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Element Properties used for:

• Part 142

Element Type	Plate
Material Model	Isotropic
Element Formulation	Veubeke
Stress Free Reference Temperature	0 °C
Temperature Method	Stress Free
Twisting Coefficient Ratio	0.001
Plate Properties	Part Based
Thickness	0.0476 m
Element Normal X Coordinate	0 m
Element Normal Y Coordinate	0 m
Element Normal Z Coordinate	0 m
delta T Through Thickness	0 °C/m
Nodal Order Method	Default
Nodal Order X Coordinate	0 m
Nodal Order Y Coordinate	0 m
Nodal Order Z Coordinate	0 m

Material Information**[Customer Defined] (Part1) -Plate**

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:07:28
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part20) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:11:06
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part30) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:12:32
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part50) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable

Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:49:56
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part60) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:52:28
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part141) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:55:23
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part142) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:59:36
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7750 kg/m ³

Modulus of Elasticity	201000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.3
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

[Customer Defined] (Part143) -Plate

Material Model	Standard
Material Source	Not Applicable
Material Source File	
Date Last Updated	2016/04/12-14:57:46
Material Description	Customer defined material properties
Mass Density	7850 kg/m ³
Modulus of Elasticity	200000000000 N/m ²
Poisson's Ratio	0.29
Thermal Coefficient of Expansion	0 1/°C
Shear Modulus of Elasticity	80000000000 N/m ²

Loads

FEA Object Group 3: Surface Pressure/Tractions

Surface Pressure/Traction

ID	Description	Part ID	Surface ID	Magnitude (N/m ²)	X Magnitude (N/m ²)	Y Magnitude (N/m ²)	Z Magnitude (N/m ²)	Multiplier Table Id	Multiplier	Type	Follows Displacement	Apply Modified Pressure	Pressure Type	Loss Coefficient (N/m ²)
5	Unnamed	20	2	0.000000	0.000000	1912.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
3	Unnamed	30	2	0.000000	0.000000	1912.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
4	Unnamed	50	2	0.000000	0.000000	1912.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
1	Unnamed	60	2	0.000000	0.000000	1912.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000
2	Unnamed	1	2	0.000000	0.000000	1912.000000	0.000000	1	1.000000	Traction	No	No	Static pressure	0.000000

Results Presentation Images

Stress