

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN  
SEMIRREMOLQUE TIPO TANQUE GLP MEDIANTE  
EL ACOUPLE FEM-SPH APLICANDO NORMAS  
PERUANAS E INTERNACIONALES**

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

**AUTOR**

Edwin Raúl Vigo Mendoza (ORCID: 0000-0002-8025-2034)

**ASESOR(ES)**

Mg. Ing. Helard Henry Álvarez Sánchez (ORCID: 0000-0003-4150-9156)

Mg. Ing. Omar Bejarano Grandez (ORCID: 0000-0003-4966-3131)

Lima – Perú

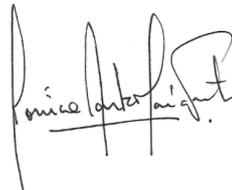
2021

## DECLARACIÓN JURADA

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster identificada con DNI No 18226712 en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis denominada “ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN SEMIRREMOLQUE TIPO TANQUE GLP MEDIANTE EL ACOPLA FEM-SPH APLICANDO NORMAS PERUANAS E INTERNACIONALES” ha sido elaborada por el señor Edwin Raúl Vigo Mendoza, con la asesoría de Helard Henry Álvarez Sánchez identificado con DNI 25564293 y de Omar Bejarano Grandez identificado con DNI 43219393, y que se presenta para obtener el título profesional de Ingeniero mecánico, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 0%.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra. Mónica Santa María Fuster  
Directora de Investigación

En Barranco, el 3 de noviembre de 2023

*Dedicatoria:*

Para: Raúl Vigo.

Con profundo sentimiento para: Adalith, Edwin y Arturo.  
Extraordinarias estelas de vida.

Símbolo de inmenso cariño y admiración para Elvia Sangay y  
Dolores Carrascal.

A Lutgardo, pieza clave en mi tablero académico.

*Agradecimientos:*

A la vida, maestra de mi camino.

A mis profesores Helard Álvarez, Omar Bejarano y Samuel Charca, su tiempo y conocimiento fue fundamental.

A Hubert Ordoñez y Jhon Calderón, su apoyo desinteresado tiene un gran significado para el estudio.

A mi querido profesor de mates y física Miguel Ñañez.

Al Internet globalizado y las páginas disponibles para la libre investigación. Impulsaron exponencialmente el desarrollo de este documento.

*En un polo de mi existencia formo una sola cosa con las piedras y los árboles. Allí tengo que reconocer el dominio de la ley universal. Allí es donde nacen los cimientos de mi existencia. Su fuerza está en que se halla firmemente sujeta en el abrazo del mundo comprensivo y en la plenitud de la comunión con todas las cosas.*

*Pero por el otro polo de mi ser estoy separado de todo. Allí yo soy absolutamente único, yo soy yo, yo soy incomparable. Todo el peso del universo no puede aplastar esta individualidad mía. Yo la mantengo a pesar de la tremenda gravedad de las cosas. Es pequeña en apariencia, pero grande en realidad; se mantiene firme ante las fuerzas que quisieran robarle aquello que la caracteriza y hacerla una con el polvo.*

*R. Tagore*

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
Alcance.....	20
Antecedentes .....	21
Justificación y motivación.....	24
Objetivo general .....	25
Objetivos específicos .....	25
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>26</b>
1.1 Gas Licuado de Petróleo .....	26
1.1.1 Proceso de Obtención.....	26
1.1.1.1 Cadena de Suministro.....	29
1.1.1.2 Medios de Transporte.....	29
1.1.1.3 Marco Legal .....	33
1.1.2 Aplicaciones del GLP.....	34
1.1.3 Características Técnicas .....	37
1.2 Diseño Estructural .....	38
1.2.1 Variantes del Semirremolque .....	38
1.2.2 Teoría enfocada en la Recipiente a presión.....	40
1.2.2.1 Características del Tanque a presión .....	40
1.2.2.2 Pared delgada y Pared gruesa.....	43
1.2.2.3 Silletas .....	49
1.2.3 Características del Bastidor .....	53
1.2.3.1 Elementos del Bastidor.....	54
1.2.3.2 Suspensión.....	58
1.3 Métodos Numéricos en simulación computacional.....	61

1.3.1	Análisis Estático.....	62
1.3.1.1	Mallado para análisis estático.....	66
1.3.2	Análisis Dinámico.....	68
1.3.2.1	Conceptos Generales.....	69
1.3.2.2	Interacción Fluido Estructura (FSI).....	72
1.3.2.3	Mallado para análisis dinámico.....	91
<b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA .....</b>		<b>95</b>
2.1	Fase I: Configuración Estructural.....	96
2.1.1	Definición geométrica del Tanque a presión.....	97
2.1.1.1	Proceso para acotar el volumen del tanque.....	97
2.1.1.2	Proceso de selección geométrica.....	100
2.1.1.3	Proceso de dimensionamiento del tanque.....	101
2.1.1.4	Técnica para definir el material del tanque.....	102
2.1.1.5	Pasos para delimitar el espesor mínimo de plancha para el Tanque a presión....	103
2.1.2	Definición geométrica del Rompeolas.....	107
2.1.3.1	Delimitación el espesor de plancha del Rompeolas.....	107
2.1.3.2	Proceso de dimensionamiento del Rompeolas.....	108
2.1.3	Definición geométrica del Bastidor.....	110
2.1.3.1	Técnica para definir el material del Bastidor.....	111
2.1.3.2	Proceso de dimensionamiento del Chasis.....	114
2.1.3.3	Delimitación geométrica del Bastidor.....	116
2.2	Fase II: Análisis Estático.....	116
2.2.1	Cargas y soportes aplicados.....	116
2.2.2	Casos de Cargas.....	120
2.3	Fase III: Análisis Dinámico.....	122
2.3.1	Configuración del CAD.....	122
2.3.2	Propiedades de los materiales.....	123
2.3.3	Enlace de Dominio Estructural.....	124
2.3.4	Casos de maniobra de conducción.....	125
<b>CAPÍTULO III RESULTADOS .....</b>		<b>128</b>
3.1	Arreglo estructural del Bastidor.....	128

3.1.1	Tanque a presión .....	128
3.1.2	Tornamesa y Bastidor.....	130
3.2	Análisis Estático.....	132
3.2.1	Cargas y soportes característicos del vehículo .....	132
3.2.2	Desempeño del arreglo estructural .....	134
3.2.3	Caso 1: Carga simétrica.....	141
3.2.4	Caso 2: Carga asimétrica.....	145
3.3	Análisis Dinámico.....	148
3.3.1	Caso 1: Rompeolas Ortogonal.....	152
3.3.2	Caso 2: Rompeolas Oblicuo .....	158
3.3.3	Versus de casos .....	164
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>167</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>169</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>189</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.1</b> Categorización Vehicular [49] .....	36
<b>Tabla 1.2</b> Ahorro de combustible según el tipo de vía [11]. .....	57
<b>Tabla 1.3</b> Ramificación de métodos numéricos [101]. .....	61
<b>Tabla 1.4</b> Proceso general del Análisis por elementos finitos [103], [106].....	64
<b>Tabla 1.5</b> Diferencias entre enfoque Implícito y Explícito [108], [109]. .....	70
<b>Tabla 1.6</b> Proceso general del Análisis por elementos finitos [105], [120]–[122]. .....	75
<b>Tabla 1.7</b> Límites en los criterios de mallado de ABAQUS [209]. .....	92
<b>Tabla 2.1</b> Opciones de medidas para el tanque a presión. [2] .....	101
<b>Tabla 2.2</b> Medidas del tanque a presión [154]. .....	102
<b>Tabla 2.3</b> Categoría en la soldadura de Junta [150]. .....	104
<b>Tabla 2.4</b> Tipo de junta para tanques a presión y eficiencias [76] .....	104
<b>Tabla 2.5</b> Medidas del tanque a presión .....	106
<b>Tabla 2.6</b> Medidas del tanque a presión .....	107
<b>Tabla 2.7</b> Rango de dimensiones consideradas para el Rompeolas. .....	109
<b>Tabla 2.8</b> Materiales populares para bastidor [92]. .....	112
<b>Tabla 2.9</b> Opciones de material a nivel nacional para bastidor [185], [186].....	113
<b>Tabla 2.10</b> Distancias longitudinales del semirremolque y el tracto [185] .....	115
<b>Tabla 2.11</b> Perfiles geométricos considerados en el Chasis. .....	116
<b>Tabla 2.12</b> Constante de rigidez para resorte en simulación .....	119
<b>Tabla 2.13</b> Propiedades del Propano requeridas en el análisis FSI [214], [215]. .....	123
<b>Tabla 2.14</b> Sistema de unidades en Abaqus [216]. .....	124
<b>Tabla 3.1</b> Materiales utilizados en el semirremolque tipo tanque GLP de 14 000 US gal. ....	135
<b>Tabla 3.2</b> Parametrización en la estructura.....	138
<b>Tabla A.1</b> Carrocerías de recipiente [62] .....	191
<b>Tabla A.2</b> Ejemplo de número VIN .....	193
<b>Tabla A.3</b> Clasificación vehicular del Semirremolque [2] .....	193
<b>Tabla A.4</b> Medidas máximas de la categoría “O [2] .....	194
<b>Tabla A.5</b> Clasificación vehicular del Semirremolque [2]. .....	196
<b>Tabla A.6</b> Configuración Vehicular T3S3 [2]. .....	198

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Proceso de obtención del GLP por GN [32] .....	27
<b>Figura 1.2</b> Proceso de obtención del GLP por Petróleo [34] .....	28
<b>Figura 1.3</b> Cadena de suministro del GLP [24].....	29
<b>Figura 1.4</b> Buque de GLP [36].....	30
<b>Figura 1.5</b> Contenedor de tanque transportado por tractocamión [38].....	31
<b>Figura 1.6</b> Vagón de carga acondicionado para LPG [40] .....	31
<b>Figura 1.7</b> Semirremolque Tanque GLP [42].....	32
<b>Figura 1.8</b> Camión Tanque GLP [43] .....	32
<b>Figura 1.9</b> Balones de 10 y 45kg [44] .....	33
<b>Figura 1.10</b> Escalera Energética [29] .....	35
<b>Figura 1.11</b> Cabezas tractoras: a) Chasis Delantero Completo, b) Convencional [62] .....	38
<b>Figura 1.12</b> Recipiente sobre Chasis [43] .....	39
<b>Figura 1.13.</b> Recipiente sobre Plataforma [63] .....	40
<b>Figura 1.14</b> Recipiente Autoportante [42].....	40
<b>Figura 1.15</b> Contraste dinámico del fluido ante la presencia de Rompeolas [69].....	41
<b>Figura 1.16</b> Parasol y Manhole [70].....	42
<b>Figura 1.17</b> Tuberías internas de Gas y Líquido [72] .....	43
<b>Figura 1.18</b> Válvula de Gas y Líquido [73] .....	43
<b>Figura 1.19</b> Esfuerzo presente en el casco semiesférico [78].....	44
<b>Figura 1.20</b> Esfuerzos presentes en el cuerpo [79].....	44
<b>Figura 1.21</b> Discontinuidad en frontera [79].....	46
<b>Figura 1.22</b> Distribución de esfuerzos en recipiente sometido a presión: a) Interna, b) Externa [77] .....	49
<b>Figura 1.23</b> Soporte en tanque a presión esférico [76].....	50
<b>Figura 1.24</b> Soporte en tanques a presión vertical: a) Piernas, b) Faldón, c) Agarradera [76] .....	50
<b>Figura 1.25</b> Soporte en tanques a presión horizontal [76].....	50
<b>Figura 1.26</b> Esfuerzos longitudinales: a) Entre silletas, b) En ubicación de silleta [76] .....	51
<b>Figura 1.27</b> Esfuerzos longitudinales en el tanque ejercidas por las silletas [82] .....	51
<b>Figura 1.28</b> Esfuerzos cortantes: a) Con anillo en plano de la Silleta, b) Con anillos a los costados [83] .....	52
<b>Figura 1.29</b> Esfuerzos circunferenciales: a) Con un solo anillo o sin anillo, b) Con anillos a los costados [83] .....	52
<b>Figura 1.30</b> Quinta Rueda y King pin [87] .....	54
<b>Figura 1.31</b> Acople Muelas y King pin [88]. .....	54
<b>Figura 1.32.</b> Distribución de Vigas [11].....	55
<b>Figura 1.33.</b> Contraste en la deflexión angular de perfiles [92].....	56

<b>Figura 1.34.</b> Contraste de deflexión en los amarres para el bastidor [92].	57
<b>Figura 1.35</b> Patines [93].	58
<b>Figura 1.36</b> Sistemas de amortiguación neumático y mecánico [95].	59
<b>Figura 1.37</b> Vibraciones de entrada y salida en suspensiones Neumática y Mecánica [96].	60
<b>Figura 1.38</b> Transmisibilidad de suspensiones [98].	60
<b>Figura 1.39</b> Simplificación Geométrica por MEF [102].	62
<b>Figura 1.40</b> Elementos: a) 1D, b) 2D, c)3D [103].	63
<b>Figura 1.41</b> Desplazamientos nodales del elemento barra [103].	63
<b>Figura 1.42</b> Sistema del resorte [104].	64
<b>Figura 1.43</b> Comparación entre elementos de mallado ideal y actual [188].	67
<b>Figura 1.44</b> Espectro de control para Oblicuidad [188].	68
<b>Figura 1.45</b> Empate de elementos de malla [188].	68
<b>Figura 1.46</b> Espectro de control para Ortogonalidad [188].	68
<b>Figura 1.47</b> Características del enfoque Implícito y Explicito [110].	70
<b>Figura 1.48</b> Esquema FSI [112], [113].	73
<b>Figura 1.49</b> Mallado Lagrangiano y Euleriano [119].	74
<b>Figura 1.50</b> Flujo de la operación de división en CEL [120].	77
<b>Figura 1.51</b> Superposición de mallas (Euler-Lagrange) en CEL [121].	77
<b>Figura 1.52</b> Tipos de partícula en el Dominio de soporte de la partícula “i” [20], [131].	82
<b>Figura 1.53</b> Esquema SPH en superficie libre [130].	85
<b>Figura 1.54</b> Tipos de partículas SPH en FSI con FEM [21].	86
<b>Figura 1.55</b> Intersección partícula-malla en FSI [100].	86
<b>Figura 1.56</b> Casos de intersección partícula-malla: a) Cero nodos en el Dominio de soporte, b) Un nodo en el Dominio de soporte, c) Dos nodos en el Dominio de soporte [132].	87
<b>Figura 1.57</b> Origen de subdominios en la intersección Partícula-Malla [100].	87
<b>Figura 1.58</b> Partículas Fantasma en interacción SPH-FEM [100].	88
<b>Figura 1.59</b> Interacción de fuerzas SPH-FEM por Partículas Fantasma [100], [138].	88
<b>Figura 1.60</b> Diagrama flujo del cálculo SPH-FEM [138].	90
<b>Figura 1.61</b> Relaciones incluidas en la Relación de aspecto [208].	92
<b>Figura 1.62</b> Esquema de un elemento tipo Carcasa en Abaqus [210].	93
<b>Figura 1.63</b> Diferencia entre el mallado por elemento sólido y carcasa [211].	93
<b>Figura 1.64</b> Conversión de Elemento solido (C3D8R) a Partículas (PC3D) en Abaqus [210], [213].	94
<b>Figura 2.1</b> Diagrama de flujo de la metodología de investigación [106, 107, 108].	95
<b>Figura 2.2</b> Diagrama de flujo del Tanque a presión.	97
<b>Figura 2.3</b> Unidades Vehiculares [1200-17000 USgal] en función de la capacidad del Tanque [147].	98
<b>Figura 2.4</b> Unidades Vehiculares [12900-15500 USgal] en función de la capacidad del Tanque [147].	99
<b>Figura 2.5</b> Top 5 Departamentos con presencia de Semirremolque tipo tanque GLP de 14000 USgal.	99
<b>Figura 2.6</b> Perfil de casco Semiesférico [150].	100

<b>Figura 2.7</b> Categorías de Juntas [150].....	104
<b>Figura 2.8</b> Diagrama de flujo del Rompeolas. ....	107
<b>Figura 2.9</b> Rompeolas de referencia.....	109
<b>Figura 2.10</b> Disposición de Rompeolas: Ortogonal y Oblicuo, en el Tanque.....	110
<b>Figura 2.12</b> Diagrama de flujo del Bastidor.....	111
<b>Figura 2.12</b> Vista de corte Posterior del semirremolque como referencia. ....	114
<b>Figura 2.13</b> Vista Lateral del semirremolque como referencia. ....	114
<b>Figura 2.14</b> Distancias longitudinales del semirremolque y el tracto .....	115
<b>Figura 2.15</b> Partes principales de suspensión neumática [191].....	118
<b>Figura 2.16</b> DCL del semirremolque tipo tanque GLP .....	120
<b>Figura 2.17</b> Ausencia de la 3 <sup>ra</sup> rueda izquierda-Caso asimétrico. ....	121
<b>Figura 2.18</b> Proceso del cuerpo estructural de Solido a Carcasa: a) Cuerpo tipo Solido, b) Transición de Plano medio, c) Cuerpo tipo Carcasa .....	122
<b>Figura 2.19</b> Enlace de cuerpo por interacción: Nodo-Superficie en Abaqus .....	125
<b>Figura 2.20</b> Caso critico de superficie libre en el tanque .....	126
<b>Figura 3.1</b> Vista isométrica del tanque a presión ensamblado .....	129
<b>Figura 3.2</b> Vista isométrica del conjunto de rompeolas en el ensamble: a) Ortogonales, b) Oblicuos .....	130
<b>Figura 3.3</b> Vistas isométricas del Tornamesa ensamblado .....	131
<b>Figura 3.4</b> Vista isométrica del Bastidor ensamblado.....	131
<b>Figura 3.5</b> Vistas isométricas del Semirremolque tipo Tanque GLP ensamblado.....	132
<b>Figura 3.6</b> Soportes del Tornamesa y Bastidor .....	133
<b>Figura 3.7</b> Soportes del Tornamesa y Bastidor .....	133
<b>Figura 3.8</b> Cargas internas aplicadas a la estructura .....	134
<b>Figura 3.9</b> Materiales utilizados en el semirremolque tipo tanque GLP de 14 000 US gal . ....	135
<b>Figura 3.10</b> Esfuerzos en la plancha base del Tornamesa.....	136
<b>Figura 3.11</b> Esfuerzos en el King pin, modelo KP-T-809-EF.....	136
<b>Figura 3.9</b> Esfuerzos máximos en perfil cerrado y abierto .....	137
<b>Figura 3.13</b> Vista lateral y detalle, del 3 <sup>er</sup> travesaño del bastidor .....	137
<b>Figura 3.14</b> Vista alzado y detalle, del 3 <sup>er</sup> travesaño del bastidor .....	138
<b>Figura 3.15</b> Esfuerzos máximos en el tornamesa y bastidor .....	139
<b>Figura 3.16</b> Calidades del mallado del Rompeolas .....	140
<b>Figura 3.17</b> Esfuerzos en el Rompeolas .....	140
<b>Figura 3.18</b> Calidades del mallado del caso simétrico .....	141
<b>Figura 3.19</b> Vistas general y detalle, del larguero del tornamesa.....	141
<b>Figura 3.20</b> Vistas alzado, del larguero del tornamesa .....	142
<b>Figura 3.21</b> Vistas Lateral y detalle, del larguero del bastidor .....	143
<b>Figura 3.22</b> Esfuerzos en las placas de refuerzos .....	143
<b>Figura 3.23</b> Esfuerzos en las costillas. ....	144
<b>Figura 3.24</b> Esfuerzos en el tanque a presión.....	145
<b>Figura 3.25</b> Esfuerzos en el tanque a presión.....	145
<b>Figura 3.26</b> Calidades del mallado del caso asimétrico .....	146

<b>Figura 3.27</b>	Vista isométrica de travesaños del bastidor .....	146
<b>Figura 3.28</b>	Vista general y detalle, del 3 <sup>er</sup> travesaño del bastidor.....	147
<b>Figura 3.29</b>	Vista alzado del 3 <sup>er</sup> travesaño del bastidor.....	147
<b>Figura 3.30</b>	Esfuerzos en los travesaños del tornamesa .....	148
<b>Figura 3.31</b>	Ensamble de dominios líquido y estructural para el Caso 1 .....	149
<b>Figura 3.32</b>	Enlace de dominio estructural: a) Soldadura de cuerpos estructurales, b) Conexión con RP .....	150
<b>Figura 3.33</b>	Condiciones frontera para casos FSI: a) Gravedad, b) Dirección de movimiento.....	151
<b>Figura 3.34</b>	Mallado de cuerpos para FSI en Abaqus .....	151
<b>Figura 3.35</b>	Caso 1 en FSI-0.03seg .....	152
<b>Figura 3.36</b>	Caso 1 en FSI-0.08seg .....	152
<b>Figura 3.37</b>	Caso 1 en FSI-0.1seg .....	152
<b>Figura 3.38</b>	Caso 1 en FSI-0.2seg .....	153
<b>Figura 3.39</b>	Caso 1 en FSI-0.4seg .....	153
<b>Figura 3.40</b>	Caso 1 en FSI-0.9seg .....	153
<b>Figura 3.41</b>	Caso 1 en FSI-1seg .....	153
<b>Figura 3.42</b>	Caso 1 en FSI-Dirección de flujos en rompeolas en 0.02seg .....	154
<b>Figura 3.43</b>	Caso 1 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Tanque .....	154
<b>Figura 3.44</b>	Tornamesa del Caso 1 en FSI-1seg.....	155
<b>Figura 3.45</b>	Enfoque de Tornamesa del Caso 1 en FSI-1seg .....	156
<b>Figura 3.46</b>	Caso 1 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Tornamesa .....	156
<b>Figura 3.47</b>	Bastidor posterior del Caso 1 en FSI-1seg.....	157
<b>Figura 3.48</b>	Caso 1 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Bastidor.....	158
<b>Figura 3.49</b>	Caso 2 en FSI-0.03seg .....	158
<b>Figura 3.50</b>	Caso 2 en FSI-0.1seg .....	159
<b>Figura 3.51</b>	Caso 2 en FSI-0.2seg .....	159
<b>Figura 3.52</b>	Caso 2 en FSI-0.4seg .....	159
<b>Figura 3.53</b>	Caso 2 en FSI-0.5seg .....	159
<b>Figura 3.54</b>	Caso 2 en FSI-0.7seg .....	160
<b>Figura 3.55</b>	Caso 2 en FSI-0.9seg .....	160
<b>Figura 3.56</b>	Caso 2 en FSI-1seg .....	160
<b>Figura 3.57</b>	Caso 2 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Tanque .....	161
<b>Figura 3.58</b>	Tornamesa del Caso 2 en FSI-1seg.....	162
<b>Figura 3.59</b>	Caso 2 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Tornamesa .....	162
<b>Figura 3.60</b>	Tornamesa del Caso 2 en FSI-1seg.....	163
<b>Figura 3.61</b>	Caso 2 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Bastidor.....	164
<b>Figura 3.62</b>	Vistas de los momentos críticos del chapoteo: a) Caso N°1-0.2seg, b) Caso N°2-0.12seg .....	165
<b>Figura A.1.</b>	Rombo y características de NFPA 704 [230].....	190
<b>Figura A.2</b>	Rombo y características DoT [58] .....	190
<b>Figura A.3</b>	Rombo NTP 399.015 [231] .....	190
<b>Figura A.4.</b>	Dimensiones de Laminas Retroreflectivas [2].....	195

<b>Figura A.5.</b> Ubicaciones de Laminas Retroreflectivas en Semirremolque [2].....	195
<b>Figura A.6.</b> Dimensiones de la defensa lateral [2]. .....	195
<b>Figura A.7.</b> Dimensiones del Dispositivo Antiempotramiento [2]. .....	196
<b>Figura A.8.</b> Impacto Lateral al Semirremolque [235]. .....	197
<b>Figura A.9.</b> Impacto Trasero al Semirremolque [236]. .....	197
<b>Figura A.10.</b> Dimensiones del Tracto Mack Anthem 6x4 Aire Dual Mecánico [237] .....	198

# ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: Reglamento Nacional de vehículos-Símbolos.....	190
ANEXO 2: Tipos de carrocerías con recipiente en Perú.....	191
ANEXO 3: Reglamento nacional de vehículos-Caracteres relevantes.....	192
ANEXO 4: Dimensiones de tracto y semirremolque .....	198

## RESUMEN

El Perú es un país con una demanda de Gas Licuado de Petróleo en constante crecimiento, ya que este recurso representa el 10% de su demanda energética y como tal el sector más promisorio en este sentido es el sector vehicular, ya que su tasa de crecimiento anual oscila en un 4% respecto a 2019. En base a esta premisa resulta recomendable considerar que la metodología preferida en la industria para distribuir el hidrocarburo (Gas Licuado de Petróleo-GLP) desde la planta de almacenamiento es mediante la flota vehicular: Rígida o Articulada. Por ello, el *Organismo Peruano de Consumidores y Usuarios (OPECU)* realizó una estadística demostrando que a nivel nacional circulan 1 523 unidades vehiculares para el transporte del GLP [1], sin embargo, ello enfrenta la irregularidad en cuando a la fabricación vehicular puesto que hasta el momento se carece de alguna regulación nacional tanto para el diseño como para la fabricación.

En tal sentido en este documento se presenta una propuesta optima de diseño del Semirremolque tipo tanque GLP (definición atribuida por la normativa peruana [2]), así como la descripción de conceptos físicos arraigados a la respuesta estructural en la dinámica del chapoteo ante un frenado inminente. Lo cual se realizó cumpliendo las regulaciones establecidas por entidades nacionales como el *Ministerio de Energía y Minas (MINEM)* y el *Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC)*, y complementado con especificaciones norteamericanas como el *Departamento de Transportes de los Estados Unidos (DoT)* y la *Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME)*.

### **PALABRAS CLAVES:**

Semirremolque tipo Tanque GLP; FEM; CEL; FSI; SPH; Chapoteo

## **ABSTRACT**

# **STRUCTURAL DESIGN OF AN LPG TANK TRAILER BY THE COUPLING OF FEM-SPH APPLYING PERUVIAN AND INTERNATIONAL STANDARDS**

Peru is a country with a demand for Liquefied Petroleum Gas in constant growth since this resource represents 10% of its energy demand and as such the most promising sector in this sense is the vehicle since its growth rate annual oscillates 4% compared to 2019 [1]. Therefore, it should be considered that the preferred methodology in the Peruvian industry to distribute the hydrocarbon (Liquefied Petroleum Gas-LPG) from the storage plant is through the vehicle fleet: Rigid or Articulated. For this reason, the *Peruvian Agency for Consumers and Users (OPECU)* carried out a statistic showing that 1,523 vehicular units circulate nationwide for the transport of LPG [1], however, this confront the irregularities when it comes to vehicle manufacturing since up to now there is no national regulation for both design and manufacturing.

In this sense, this document presents an optimal proposal for the design of the LPG tank semi-trailer (definition attributed by Peruvian regulations [2]), as well as the description of physical concepts rooted in the structural response in the dynamics of sloshing before imminent braking. Which was done in compliance with the regulations established by national entities such as the *Ministry of Energy and Mines (MINEM)* and the *Ministry of Transportation and Communications (MTC)* and complemented with North American specifications such as the *Department of Transportation of the United States (DoT)* and the *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*.

### **KEYWORDS:**

LPG Trailer; FEM; CEL; FSI; SPH; Sloshing.

# INTRODUCCIÓN

El transporte de carga pertenece a las actividades económicas peruanas que dinamizan exponencialmente la economía nacional, para lo cual se utilizan diversos tipos de vehículos, según el medio de transporte que se requiera, como son marítimo, aéreo, ferroviario y terrestre [3]; para atender la demanda en los diferentes sectores de la industria, como construcción, hidrocarburos, etc. El caso del transporte por carretera es el más relevante respecto a la accesibilidad y versatilidad frente a la población; es así como se moviliza la carga desde y hacia lugares recónditos del Perú, a pesar de las dificultades climáticas características del Perú.

Dentro de los medios de transporte terrestre, existen dos tipos de vehículos con capacidad para movilizar carga pesada por carretera, estos son: Vehículos Rígidos (de un solo cuerpo) o Vehículos Articulados (segmentados) [4]; este último es conocido popularmente como Tráiler, el cual consta de una cabeza tractora y la unidad de carga. A su vez, la unidad de carga también cuenta con dos divisiones en su tipología, que son: Remolque o Semirremolque [5]; ambos poseen la particularidad de brindar diferentes tipos de acondicionamiento en su estructura en función al estado físico del flete (sólido, líquido o gaseoso).

Para lograr un adecuado desarrollo del transporte de carga, es necesario tener cifras favorables del crecimiento económico del país, es así que para el año 2018, el PBI total alcanzó la cifra de US\$ 222 mil millones aproximadamente [6] donde al sector de Hidrocarburos se le atribuye haber contribuido con una cifra de 1.4%. Por su lado, la extracción de estos recursos naturales ha contribuido en el periodo Enero – Junio del año 2019 con el 37% de recaudaciones atribuidas al ISC<sup>1</sup>; además de ello, las regalías petroleras cobradas en el primer semestre del respectivo año fueron aproximadamente de USD 105.3

---

<sup>1</sup> ISC: Impuesto Selectivo al Consumo.

millones [7]. No obstante, tal crecimiento en el consumo de derivados del petróleo contribuye negativamente al déficit en la balanza volumétrica de los principales combustibles consumidos como: Diesel, Gasolinas y GLP. Siendo así, una característica relevante en la estructura económica del GLP es su incremento sucesivo; en base al mayor crecimiento de la demanda con 4% respecto con la oferta de 3.4% (en promedio anual); al punto que en el año 2019 la demanda nacional de GLP fue de 14 MBPD<sup>2</sup> más que la oferta, la cual se estimó en 47 MBPD [7].

En cuanto a las proyecciones de crecimiento en el sector de Hidrocarburos (PBI<sup>3</sup> primario), se estimaron que para el 2020 y 2021 serán de: 0.9% y 0.2% respectivamente; sin embargo, a causa de la pandemia mundial COVID-19, se alteraron las proyecciones en la economía nacional. No obstante, la tendencia positiva se presenta en la producción promedio mensual (Marzo-2020) fiscalizada de Gas Natural cayó un aproximadamente un 25% en comparación con Marzo-2019 que fue de 1 195 MMPCD<sup>4</sup> [8], adyacentemente la producción promedio mensual (Marzo-2020) de Petróleo retrocedió 1.6% en comparación a los 51 355 BPD<sup>5</sup> destinados en Marzo-2019 [9].

Sin embargo. la tendencia al crecimiento (detallada previamente) se viene dando desde el 2019 con 5.1% [10], lo cual se atribuye principalmente al incremento en las explotaciones de los lotes 95 y 192. Asimismo, existe una inversión privada distribuida en 15 proyectos del sector de Hidrocarburos para el periodo 2020-2021 de US\$ 1.6 mil millones. Donde los principales inversionistas son: Cálidda Gas Natural del Perú, Karoon Gas y Perenco [10].

Las condiciones del mercado nacional respecto a las empresas que ofrecen estos servicios de transporte de carga vía terrestre, tenemos que, en el año 2018, se registró un incremento de 7.5% de empresas dedicadas al transporte de carga por carretera a nivel nacional, con respecto al 2017; ello representa en términos absolutos 8,590 nuevas

---

<sup>2</sup> MBPD: Miles de Barriles Por Día.

<sup>3</sup> PBI: Producto Bruto Interno

<sup>4</sup> MMPCD: Millones de pies cúbicos por día

<sup>5</sup> BPD: Barriles Por Dia

autorizaciones otorgadas de las 115,156 existentes [3]. Entre los departamentos con mayor población de empresas dedicadas a esta actividad son: Lima (incluyendo a la provincia constitucional del Callao), Cusco y La Libertad. Ello motivo al MTC<sup>6</sup> a realizar un análisis estadístico del mercado vehicular peruano, donde se dio a conocer que aproximadamente el 16.09% (50,000 unidades) de la flota automotriz con disposición para el transporte de carga pesada a nivel nacional, son Remolques y Semirremolques; tal estudio reúne lo datos cuantitativos del año 2018, sobre un universo de 305 798 unidades vehiculares.

Lamentablemente, de este “universo” aproximadamente el 15.4% no son aptos para realizar su labor, este dato se dio a conocer en 2018 luego que la SUTRAN<sup>7</sup> realizará 231 888 fiscalizaciones a transportistas de carga y materiales peligrosos [3]; siendo la informalidad la mayor causa de ello, lo cual perjudica a la demanda exigida por el mercado nacional. Como resultado de los datos cualitativos y cuantitativos expuestos anteriormente, resulta conveniente aventurar en afirmar la necesidad de adquirir adecuadas propuestas tanto de diseño como de fabricación vehicular, utilizados para el transporte de hidrocarburos por carretera peruanas, específicamente de los Semirremolques de carrocería Tanque GLP<sup>8</sup>.

Paralelo a ello se encuentran entidades como “Asociación Europea de Transporte Químico” (ECTA<sup>9</sup>) perteneciente al “Acuerdo Europeo sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera” (ADR<sup>10</sup>) ellos son los encargados de normalizar los aspectos redactados previamente en Europa, asimismo en territorio norteamericano gobiernan organismos como: “Asociación Nacional de Protección contra el Fuego” (NFPA<sup>11</sup> 385) el cual se encuentra ligado al “Departamento de Transportes de los Estados Unidos” (DoT<sup>12</sup>), con finalidades similares a las europeas. Estos son breves ejemplos donde el diseño de un Semirremolque Tanque a diferencia de los casos en Perú, no son abordados por prueba y error (influencia del conocimiento empírico).

---

<sup>6</sup> MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones

<sup>7</sup> SUTRAN: Superintendencia de Transporte Terrestre de Personas, Carga y Mercancías

<sup>8</sup> GLP: Gas Licuado de Petróleo

<sup>9</sup> ECTA: European Chemical Transport Association

<sup>10</sup> ADR: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road

<sup>11</sup> NFPA: National Fire Protection Association

<sup>12</sup> DoT: Department of Transportation

En cuanto al mercado de oferta nacional, compañías como: Sateci, Fameca, Bullon, entre otras, proporcionan un buen abastecimiento de Semirremolques tipo Tanque GLP; pero los productos ofrecidos tienen la alternativa de optimizarse en su labor, acompañados con los adecuados parámetros consecuentes al concretar la física desempeñada; con ello se revelarán nuevos beneficios arraigados con el vehículo no motor.

En primer lugar, el peso del chasis, si se encuentra sobredimensionado afecta directamente proporcional al consumo de combustible por el motor y al costo de producción; en cuanto a la carga útil a transportar esta depende del peso seco vehicular. En tal sentido, la empresa SSAB analizó un prototipo de semirremolque con volquete de 40 toneladas, el resultado fue favorable a los parámetros expuestos precedentemente. En primer lugar, un ahorro de 0.055L/100Km por cada 0.1 toneladas de peso reducidas. Posteriormente el incremento en la capacidad de movilizar carga útil en 1 839 toneladas, seguido del aumento en la vida útil de 1.2 millones de kilómetros [11]. El efecto positivo generado por el ahorro de combustible en el medio ambiente predomina en 81.4 ton de emisiones de CO<sub>2</sub> conservadas, ello significa que se evitaron 30 620 litros de Diesel.

Es así como, el costo total de operación también disminuye, puesto que los costos variables disminuyen si el Semirremolque Tanque GLP diseñado y fabricado bajo las normativas correspondientes, por lo tanto, el mantenimiento que este vehículo requiera a futuro será menor al de los modelos actuales en el mercado peruano ofrecidos por las empresas nacionales. Para ello se utilizará la técnica de modelado computacional por métodos numéricos mediante el acople FEM-SPH, el cual trabaja por subdominios. Esto quiere decir que el análisis será abordado con perspectivas diferentes: estructural y fluido; las cuales tendrán como punto de enlace la interacción ocurrida entre esta en el instante del chapoteo (inducido por la maniobra de conducción). Esta novedosa técnica de simulado permitirá identificar los puntos críticos de la estructura y en base a ello proporcionar los comentarios correspondientes con la finalidad de optimizar el diseño en cuestión.

El presente documento se encuentra estructurado en tres capítulos globales, aperturando por el “Marco Teórico”, donde se detallan conceptos arraigados con el Gas Licuado de Petróleo y su situación social, política y económica en el Perú; posteriormente

las variables de diseño relacionadas con el vehículo (tanque y chasis) y finalmente se incorporan a detalle los conceptos técnicos propios de la metodología de modelado computacional mediante el acople algorítmico de FEM-SPH, correspondiente a la interacción por dinámica explícita.

Seguidamente el segundo capítulo “Metodología” abordará el proceso y lógica contemplada para ejecutar el diseño en cuestión. Este tendrá como tópicos locales: Configuración estructural del vehículo, Análisis Estático y Análisis Dinámico. Los cuales tendrán como objetivo el enlazar la teoría presentada previamente (Capítulo 1), con los criterios de cálculo considerados por el autor y así transmitirlos a la práctica presente en la simulación computacional. Para finalizar, el tercer capítulo “Resultados” presentará los valores obtenidos del capítulo previo. Dichos valores representan en sintaxis las conclusiones expuestas en el tópico final del documento. Cabe recalcar que el presente estudio también contribuye a la investigación del transporte de materiales peligrosos (Hidrocarburos) y a lo establecido en el Artículo 4 de la “Resolución de consejo directivo – organismo supervisor de la inversión en energía y minería – Osinergmin N°012-2020-OS/CD” [12].

## **Alcance**

El campo de estudio abarcado se enfoca en las matrices estructurales que soportan a el tanque a presión; por ende, la morfología de estas se ve influenciada por la geometría destinada para el tanque a presión. En tal sentido, se contempla la distribución estructural: tanque a presión-bastidor (incluyendo tornamesa), y posteriormente la interacción fluido estructura correspondiente al chapoteo del fluido, inducido por la maniobra de conducción.

Respecto al primer punto (análisis estático), se debe detallar que se consideran aspectos generales del tanque a presión, tales como dimensiones globales y la geometría de los rompeolas. Cabe señalar que, para dicho estudio, no se consideraron esfuerzos residuales algunos (ya sean provenientes del conformado del perfil estructural, entre otros). En cuanto al segundo caso (análisis dinámico) será abordado con la finalidad de conceptualizar la factibilidad de la metodología del acople numérico en el diseño por simulación

computacional: FEM-SPH; correspondiente a la repercusión física de la dinámica del fluido en la estructura. En tal sentido, se abordará una simulación de movimiento longitudinal (al eje del tanque a presión). Ambos estudios serán abordados por softwares CAE como ANSYS y ABAQUS, respectivamente, debido a sus facilidades computacionales arraigadas al objetivo correspondiente.

Las entidades nacionales legales que gobiernan en los parámetros de diseño del Semirremolque tipo tanque GLP son el MINEM<sup>13</sup> y MTC<sup>14</sup>, en tal modo se complementaran los conceptos con entidades internacionales como DoT-331 y ASME<sup>15</sup>. Por otro lado, resulta crucial destacar que el estudio realizado en este documento se encuentra limitado ante la construcción un prototipo vehicular, tampoco se realiza el análisis de los sistemas eléctricos y neumáticos.

## **Antecedentes**

La geología peruana presenta un abanico de relieves en sus rutas de transporte, como: pedregosos, arenosos, húmíferos, etc. Dichos parámetros geológicos influyen en las perturbaciones experimentadas por el vehículo, concretamente en este caso el semirremolque con recipiente a presión; ante la irregularidad del terreno surgen los siguientes movimientos propios de la inercia de la maquinaria: longitudinal, producido por la acción de frenado o conducción; lateral, ante un giro; y vertical, efecto de la suspensión y amortiguación del chasis [13].

Como punto de partida se toma el estudio realizado en el Perú (2009) por el ingeniero O. Bejarano [14], quien en su tesis de pregrado evidencia el diseño concreto para posteriormente ejecutar un plan de procedimientos de manufactura. Los objetivos fueron desarrollados en su tesis posteriormente fueron complementados por el método de elementos finitos, los cuales por medio de las normativas internacionales (ligadas con su enfoque de

---

<sup>13</sup> MINEM: Ministerio de Energía y Minas

<sup>14</sup> MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones

<sup>15</sup> ASME: American Society of Mechanical Engineer

estudio) arraigadas tanto al chasis y el tanque del semirremolque como: AWS, DoT– 406, ASME, AISC; y las normativas técnicas nacionales establecidas por entidades como: MTC y MINEM<sup>16</sup>.

En este también se evidencian con mayor enfoque los componentes críticos en el sistema de suspensión tales como: Balancines, Muelles, Ejes y Soportes; respecto a la distribución de esfuerzos experimentada por el cuerpo del tanque, se demuestra la zona crítica ubicada en el contacto con los rompeolas. Así como el sistema de descarga Bottom Loading perteneciente al tanque cisterna; finalmente se estima el costo total de un semirremolque cisterna, de 10 metros de longitud (aproximadamente) para el transporte de 6000 galones de Diesel, en 65 880.33 soles (cifra estimada en referencia al año del estudio).

Por otro lado, la empresa SSAB [11] realizó una breve guía para el diseño de semirremolques. En la cual presenta recomendaciones estructurales a tener en cuenta tanto en el diseño como en la manufactura del chasis; ello con la finalidad de mejorar el desempeño en carretera y las repercusiones hacia el medio ambiente (bajo la suposición de que la cabeza tractora utiliza un motor a combustión interna a base de Diesel), abarcando puntos tanto de soldadura, en la cual recomienda el diseño de cola de pez para conseguir zonas bajos niveles de esfuerzos; como de ahorro de combustible al cambiar el material utilizado comúnmente por un Acero Avanzado de Alta Resistencia (AHSS<sup>17</sup>) el cual logra reducir el peso en un rango de 500 a 2000 kg, dependiendo del tipo de estructura.

En tal sentido un principio fundamental a corregir es el peso de la dicha maquinaria, puesto que popularmente la fabricación de estos en la industria nacional contiene los siguientes aceros: ASTM A-36 y ASTM A-572 Gr 50 [15]. Un claro ejemplo de ahorro tanto en material como peso de la estructura fue el estudio realizado por C. Chagoyén, *et al* [16], donde consiguieron disminuir 600 kilogramos de peso bruto total en el chasis y eliminar cerca de 31 metros de soldadura a su prototipo de semirremolque con 3 ejes y 15.5 metros de longitud [16], por ende, en la construcción del semirremolque se requirió menos materia prima como de mano de obra para la soldadura.

---

<sup>16</sup> MINEM: Ministerio de Energía y Minas.

<sup>17</sup> AHSS: Advanced High-Strength Steels

En cuanto a la influencia de la carga líquida en la estructura V. D'Alessandro [17] realizó un profundo estudio numérico (CFD) y experimental acerca del comportamiento del fluido en un tanque lleno al 50% al ejecutar la maniobra de cambio de carril a 50 km/h. Los resultados obtenidos fueron comparados frente a realizar la misma maniobra, pero con carga rígida, en esta se estipuló que la carga vertical es un 6% mayor en el caso de carga líquida frente a la sólida. En base a ello se concluye que la estabilidad lateral de un vehículo con carga líquida se torna relevante a la volcadura frente al caso rígido.

A diferencia de una carga sólida, la carga líquida se caracteriza por tener el centro de gravedad dinámico; propio de los efectos inerciales al conducir, lo cual repercute en el umbral de volcadura. Afortunadamente, este fenómeno puede ser atenuado por medio de la geometría del recipiente contenedor. Estudios realizados por W-B. Shangguan, *et al.* [18], A. Kolaei, *et al* [19], señalan que la geometría apropiada atenua el movimiento del líquido es el "Triángulo de Reuleux", posteriormente la "Circular" y finalmente la "Ovalada modificada". En tal sentido sus resultados demuestran, una crítica disminución en el umbral de volcadura en volúmenes de llenado entre 50%-90%, atribuido por el desplazamiento lateral de la carga. Respecto a volúmenes de llenado menores (50%-30%), [19] señala que la fuerza de impacto por chapoteo incrementa; ello debido al volumen libre que dispone el líquido en su dinámica inercial.

Respecto a la interacción fluido-estructura procedente de la simulación acoplada por el Método de elementos finitos (FEM)-Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH), ha sido estudiada por diversas fuentes que aseguran la adecuada compatibilidad entre ambos métodos numéricos; en tal sentido X. Cui [20] en su estudio enfocado hacia el desempeño de la superficie libre corrobora la convergencia para este acople. En tal sentido, el estudio propuesto por Q. Yang [21] evaluó la respuesta de un rompeolas en un tanque de sección cuadrada (excitado por oscilaciones sinusoidales) ante el chapoteo de agua; capturando de este modo imágenes de la superficie libre.

Basándose en documentos relacionados con los estudios descritos, la presente tesis tiene como finalidad tanto entablar una opción adecuada de diseño (que incorpora el acople

estructural Tanque a presión-Bastidor, característicos del Semirremolque tipo Tanque GLP) como el presentar el análisis físico característico.

## **Justificación y motivación**

A nivel nacional, la demanda de GLP ha estado en desarrollo constante, siendo así que el crecimiento se había quintuplicado en el año 2018 con 1878 miles de toneladas, en referencia con el histórico del año 1998 con 344 miles de toneladas [22]; dicho progreso ocasiono que para el año 2020 este recurso represente el 10 % de su demanda energética nacional.

En tal sentido, según la SNMPE<sup>18</sup>, el GLP envasado representa aproximadamente 3/5 de la producción total; donde este beneficio energético alberga a 4 millones de hogares, en base al último censo realizado por el INEI<sup>19</sup> en el año 2017 [23]. Paralelamente, el GLP ha sido el segundo combustible más vendido (después del Diesel) en los años 2018 y 2019 con un 23% de demanda [24], [25]; de esta manera el GLP a granel dirigido al sector vehicular a experimentado una tasa de crecimiento anual de 4% en el año 2020 [26].

El transporte a granel (Midstream), es una parte fundamental de la cadena de valor del hidrocarburo, por medio del transporte se conecta el gas licuado de petróleo producido (Upstream) con el usuario (Downstream). Según la estadística realizada en el año 2020 por OPECU<sup>20</sup>, a nivel nacional circulan 1 523 unidades vehiculares para el transporte del GLP [1]; lamentablemente, se ausenta una entidad nacional reguladora del diseño para los semirremolques tipo tanque GLP.

Por tal motivo, la fabricación del vehículo no motor actualmente es caracterizada por una iteración empírica; donde al carecer del adecuado conocimiento físico puede ocasionar mayores perjuicios en la labor cotidiana. Por ende, resulta necesario que la flota nacional de vehículos destinados al transporte de combustible derivado de hidrocarburos, presenten una

---

<sup>18</sup> SNMPE: Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía

<sup>19</sup> INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática

<sup>20</sup> OPECU: Organismo Peruano de Consumidores y Usuarios

óptima estructura, en efecto ello no solo permitirá evitar mayor contaminación ambiental (en caso el motor sea a combustión interna) sino también otorgara una apropiada seguridad tanto primaria (enfocada en evitar accidentes producto de las maniobras y comportamientos del conductor y del vehículo) como secundaria (al mitigar las consecuencias post-accidente) [27].

Como se detalló previamente en nuestro país la exigencia industrial de ampliar el negocio del GLP ha tomado impulso exponencialmente, por ende, es necesario que el producto sea transportado en optimas circunstancias. Debido a ello, el presente documento expone los conceptos físicos característicos del desempeño vehicular, con la finalidad de contribuir teóricamente a la rama de la industria metalmecánica peruana y a la investigación del transporte de materiales peligrosos (Osinergmin [12]). Siendo este medio por el cual los fabricantes puedan apreciar desde otra perspectiva el diseño del semirremolque tipo tanque GLP y así mediante este perfeccionar sus prácticas de fabricación, disminuir costos en la cadena de suministro, atenuar las emisiones de gases con efecto invernadero, incrementar la vida útil vehicular, entre otros beneficios.

## **Objetivo general**

- Diseñar mediante el análisis computacional de métodos numéricos y la aplicación de normas peruanas e internacionales la estructura de un Semirremolque tipo Tanque GLP, que proporcione seguridad estructural al experimentar las cargas máximas de chapoteo, originadas por la maniobra de conducción crítica del tracto.

## **Objetivos específicos**

- Dimensionar geoméricamente el tornamesa y bastidor posterior del semirremolque tipo tanque GLP.
- Analizar la estructura del bastidor en general para el semirremolque, mediante la ejecución del análisis estático por FEM.
- Analizar la interacción estructural ante el chapoteo del GLP, mediante el análisis dinámico, al realizar el acople FEM-SPH.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

En este tópico se desarrollará el contexto teórico referente al proyecto en estudio. En primer lugar, se abordarán a detalle las características relacionadas con el GLP. Seguidamente se procede a presentar los componentes más relevantes del vehículo, tales como chasis y el tanque, en función a técnicas más recientes en el rubro. Finalmente serán presentados detalles (cuantitativos y cualitativos) del análisis numérico a ejecutar, para concluir con los beneficios y desventajas de este.

### 1.1 Gas Licuado de Petróleo

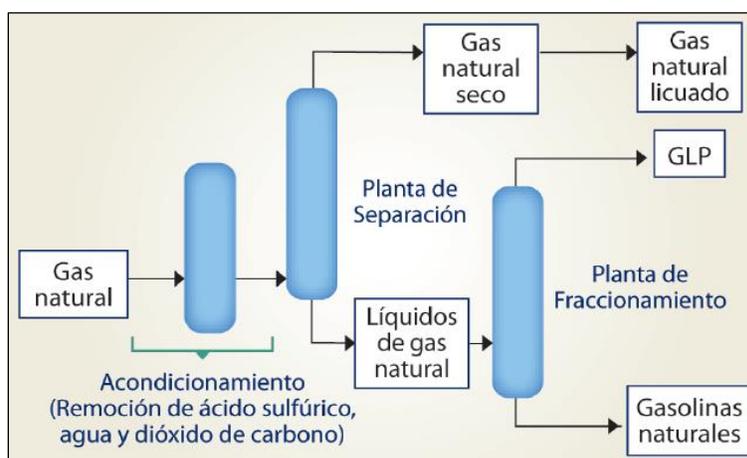
Perú cuenta con dos opciones de productos para ejecutar la comercialización del GLP, los cuales presentan un enfoque particular referente a su usuario final. Estos son: Gas Licuado de Petróleo a Granel (GLP-G), utilizado principalmente por consumidores directos como las gasolineras y por otro lado se encuentra el Gas Licuado de Petróleo para envasado (GLP-E), en este predomina la demanda doméstica y los negocios [28]. Resulta importante recordar que esta tesis dirige su estudio en el GLP a granel, no obstante, se nombrara brevemente detalles superficiales de la comercialización envasada del carburante.

#### 1.1.1 Proceso de Obtención

Para comprender el origen del GLP resulta necesario abarcar un breve contexto tanto del Gas Natural como del Petróleo, hidrocarburos base para su composición; no obstante, también se lo obtiene al importar componentes como Propano y Butano para posteriormente realizar el proceso químico de mezcla correspondiente [28]. Comenzando por la incidencia nacional del primer mineral combustible descrito previamente, este se encuentra en las tres zonas geográficas: Costa, Sierra y Selva. Por un lado, el yacimiento Camisea (Ucayali,

Cusco) fue diseñado para producir 1 160 MMPCD [29] siendo de esta manera la más relevante a nivel nacional, este recurso natural presente en este ambiente fue producto de la descomposición de materia orgánica como flora y fauna, por experimentar durante millones de años la temperatura y la presión de la corteza terrestre, dan origen al depósito geológico. Es así como, para conseguir al protagonista de esta tesis existe un proceso de elaboración posterior a la extracción del Gas Natural de sus reservorios subterráneos naturales, descrito a continuación.

Primeramente, el Gas Natural debe ser acondicionado, donde se eliminan las impurezas como: helio, oxígeno y vapor de agua [30] (cabe recalcar que la composición química del hidrocarburo varía en función a la ubicación geológica del yacimiento) para a continuación ejecutar la clasificación entre Gas Natural-Líquido (GN-L) y Gas Natural-Seco (GN-S). En el segundo caso (GN-S) predominan componentes químicos como Metano y Etano, del cual se obtiene el Gas Natural Vehicular (GNV) que puede ser utilizado en estado líquido como Gas Natural Licuado o gaseoso como Gas Natural Comprimido [31]; mientras que en el caso de GN-L se caracteriza por Pentano, Butano y Propano. Finalmente, estos deben pasar por un proceso de fraccionamiento, de tal manera que los productos adquiridos son GLP y gasolinas naturales. A continuación, se presenta gráficamente el curso descrito y las abreviaciones utilizadas para un mejor entendimiento.



**Figura 1.1** Proceso de obtención del GLP por GN [32]

De igual manera el Petróleo también se encuentra distribuido en las tres regiones del país, además de ello se encuentra un foco de extracción en el norte del mar peruano. En tal

sentido ahora se detallará brevemente el respectivo proceso de obtención: El complejo de refinación de petróleo crudo “La Refinería La Pampilla” (Callao, Lima) es el mayor productor nacional de este hidrocarburo, puesto que actualmente (2020) opera a una capacidad de 117 MBPD, siendo de esta manera 44% mayor que “La Refinería Talara” con 65 MBPD [33]. El Petróleo crudo se origina de igual manera que el Gas Natural, por putrefacción de masa orgánica, sin embargo, el proceso de obtención del GLP es totalmente diferente.

En primer lugar, el Hidrocarburo ingresa a un horno calefactor donde se varían sus propiedades fisicoquímicas; posteriormente se realiza la primera refinación por destilación fraccionaria, en donde ya es posible conseguir el producto anhelado. No obstante, también se adquiere el GLP al ejecutar procesos secundarios como: reformado catalítico, cracking térmico, entre otros [34]. De igual manera se expone gráficamente el proceso redactado para una mejor comprensión.

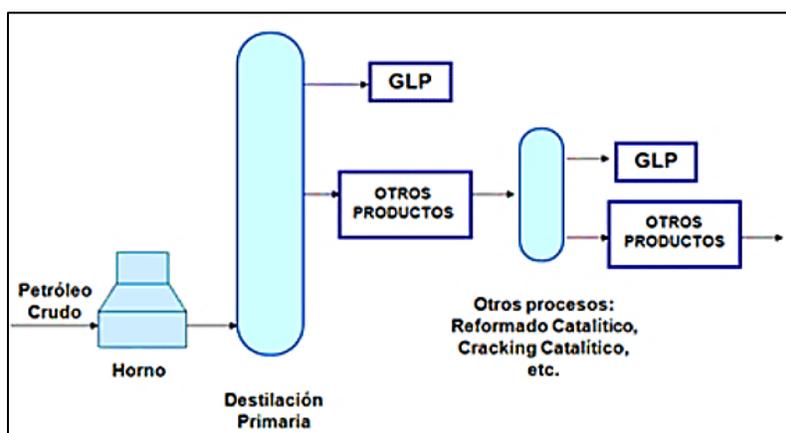


Figura 1.2 Proceso de obtención del GLP por Petróleo [34]

### 1.1.1.1 Cadena de Suministro

Las actividades que se realizan para la comercialización del GLP pueden iniciar con el producto importado o producido, para luego incorporarse a las plantas de almacenamiento para proceder con su envasado (GLP-E o GLP-G) y transportado; ello con la finalidad de expender el producto al usuario final. En tal sentido los agentes que intervienen en este trayecto son: productores, importadores, planta de abastecimiento, estaciones de venta, distribuidores tanto del GLP a granel como en cilindros y los usuarios (identificados en este rubro como el consumidor directo) [28]. Esta descripción puede ser conceptualizada a detalle gráficamente por la siguiente figura:



**Figura 1.3** Cadena de suministro del GLP [24]

Ante esta premisa se dispone a nombrar algunas firmas nacionales y extranjeras que se dedican al rubro de producción del GLP en Perú, estas son: Repsol, Petroperú, Pluspetrol, Graña y Montero, entre otras; asimismo empresas como Repsol y Zeta Gas también abarcan la importación del carburante [32].

### 1.1.1.2 Medios de Transporte

El estado físico del GLP en un ambiente cotidiano donde la presión es de 1 atm y la temperatura de 20 °C, es gaseoso. Lo cual no facilita su negocio puesto que su volumen ocupa

en promedio 250<sup>21</sup> veces más ante un estado líquido. Ante esta situación la industria opta por manejar el hidrocarburo como un fluido líquido acuoso [22]. A continuación, se exponen un conjunto de las opciones tecnológicas para movilizar el gas licuado de petróleo, ya sea a pequeña escala como los cilindros de 3 kg [32] o a gran escala como los barcos internacionales que transportan alrededor de 85 000 m<sup>3</sup> [35].

a. Buque interoceánico

Encabezando la lista se encuentra la disposición de almacenaje que presenta este navío es de alrededor de 70 – 85 000 m<sup>3</sup> [35], lo cual los categoriza como “Transportistas de Gas muy grandes” (VLGC<sup>22</sup>).



**Figura 1.4** Buque de GLP [36]

b. Contenedor de tanque

Dejando de lado el ámbito marítimo, se encuentra la modalidad de transporte por contenedores de tanque. La capacidad de depósito es aproximadamente 26 m<sup>3</sup> [37]. Estos a diferencia de un camión o semirremolque presentan la facilidad del desacople referente al chasis del vehículo, poniendo a disposición del usuario otras opciones de movilización y también facilidad en la gestión de su almacenaje por columnas gracias al marco que presenta el tanque.

---

<sup>21</sup> Es de valor se encuentra referenciado por Osinergmin [22], sin embargo, en otros documentos la relación considerada es de 270 veces [146].

<sup>22</sup> VLGC: Very Large Gas Carriers



**Figura 1.5** Contenedor de tanque transportado por tractocamión [38]

c. Vagones de tren

Asimismo, si otra opción presente en el transporte por tierra son los vagones acondicionados para el gas licuado de petróleo, en tal sentido la capacidad que ofrecen se estima en 65 – 127 m<sup>3</sup> [39].



**Figura 1.6** Vagón de carga acondicionado para LPG [40]

d. Tuberías

Al igual que el sistema de distribución en Perú del Gas Natural de Camisea, el MINEM propuso el proyecto “Sistema de abastecimiento de GLP para Lima y El Callao”. El recorrido aproximado es de 250 km, donde su punto de partida es la planta de producción en Pisco (Ica) hasta la terminal de abastecimiento en Lurín (Lima). Se estima que la capacidad de transporte será de 2800 Toneladas Métricas por día y con una inversión cercana a los US\$ 250 millones [29, p. 216].

e. Semirremolque tanque GLP

Este es un claro ejemplo acerca del vehículo que se dispone a diseñar en el presente documento científico. El vehículo articulado tiene una capacidad de almacenamiento que abarca los 40 m<sup>3</sup> [41], por otro lado, presenta disponibilidad para movilizar este hidrocarburo, ya que su alcance es cualquier carretera del país.



**Figura 1.7** Semirremolque Tanque GLP [42]

f. Camión Tanque GLP

De igual manera se encuentra el camión con recipiente a presión, no obstante, su categoría es diferente a la anterior por ser un vehículo rígido. En tal sentido este tiene una disponibilidad promedio de 20 m<sup>3</sup> [43].



**Figura 1.8** Camión Tanque GLP [43]

g. Cilindros

Finalmente se encuentra la viabilidad de transportar el fluido carburante por pequeños balones, cuyo tamaño varía en función al peso de almacenamiento; los comunes (a nivel nacional) son: 3 kg, 5 kg, 10 kg y 45 kg [32]. Ello le atribuye facilidad de acceso para zonas recónditas en su mayoría rurales del país, donde se torna complicado el medio vehicular. Dicho sea de paso, que estos balones al no

limitarse a un medio de transporte propio, pueden ser acoplados a una moto como a un burro de carga (el cual puede cargar cerca de 100kg [39]) o a una camioneta; donde lo primordial debe ser salvaguardar la seguridad del producto por tratarse un hidrocarburo a presión.



**Figura 1.9** Balones de 10 y 45kg [44]

### 1.1.1.3 Marco Legal

El rubro de los Hidrocarburos se encuentra gobernado por el MINEM y Osinergmin; cada uno de estos abarca compromisos diferentes, pero con una finalidad única (enfocada en este estudio): normalizar las actividades ligadas al GLP. Por un lado, se encuentra el MINEM, ente encargado de diseñar las políticas nacionales para lograr un óptimo desarrollo en actividades minero-energéticas contribuyendo al desarrollo humano y minimizando el impacto ambiental mediante el evaluar y manifestar políticas. Paralelo a ello se encuentra Osinergmin, con la finalidad de salvaguardar los parámetros preestablecidos por el MINEM, mediante la inspección en las actividades de las empresas (nacionales y extranjeras) en los sectores de minería, hidrocarburos y electricidad.

En tal sentido, como ejemplo la Ley N° 29852 [45] (citado en [29, p. 148]) que realiza la ejecución de mecanismos de compensación social y promoción, tales como el SISE<sup>23</sup> y FISE<sup>24</sup>, con el propósito de brindar un practico acceso al GLP, entre otras energías para zonas rurales y económicamente vulnerables del país. Asimismo, también se encuentra como ejemplo la “Política Energética Nacional del Perú 2010-2040” [46] (citada en [47, p. 231]) la

<sup>23</sup> SISE: Sistema de Seguridad Energética en Hidrocarburos

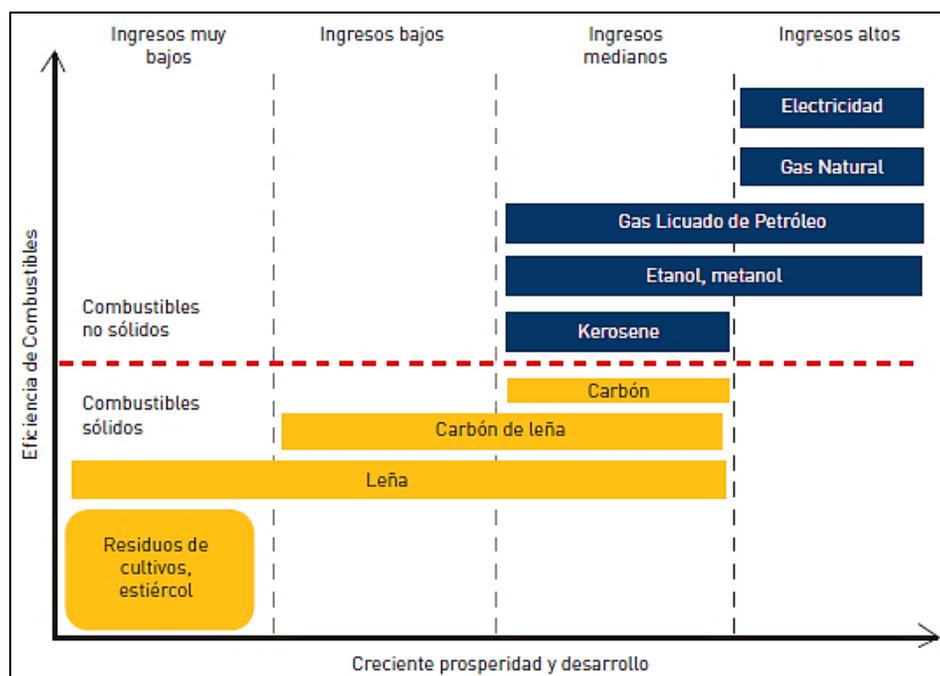
<sup>24</sup>FISE: Fondo de Inclusión Social Energético

cual promueve el comercio del GLP, con la finalidad de degradar el uso de combustibles como: leña, carbón, bosta, etc., por sus altos niveles de contaminación en CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono).

### **1.1.2 Aplicaciones del GLP**

Sus implicancias en nuestras vidas se encuentran enraizadas básicamente con cualquier aspecto en el que se requiera un combustible para ejecutar alguna acción de por medio. En tal sentido a continuación se expone resumidamente ejemplos de sus aplicaciones.

Por un lado, se encuentra el sector doméstico, en el cual su principal labor es la cocción de alimentos. En tal sentido, la prioridad nacional por el momento es sustituir el consumo de combustibles tradicionales (leña, carbón, bosta) con mayor incidencia en la población rural de bajos recursos económicos, ello no solo por el hecho de buscar un beneficio para la salud del usuario, sino también para reforzar la mitigación de gases contaminantes. Como resultado de este protocolo ecológico, se logró que el crecimiento promedio del gas licuado de petróleo fue de 20%, en contraste el consumo de carburantes como querosene, carbón o leña disminuyó en 23%; estadísticas realizadas en el 2015 respecto al año 2004 [47, p. 210]. Ante esta situación es conveniente nombrar brevemente una relación económica-social presente en la población peruana: la calidad energética utilizada se encuentra en función al desarrollo; esto se conoce como: Escalera energética. A continuación, se muestra una gráfica referente.



**Figura 1.10** Escalera Energética [29]

En esta se puede observar que' el GLP realiza la apertura hacia fuentes energéticas con mayor relevancia ecológica. Por ello los peruanos optimizarán las condiciones de vida al abandonar gradualmente el uso de fuentes carburantes con biomasa. Si bien es cierto que en el sector doméstico predomina el beneficio del GN, su costo de instalación (por ductos) no es muy amigable en cierto modo, es por ello que el GLP es una opción viable, puesto que su comercialización es realizada por medio de, relativamente, pequeños cilindros.

Por otro lado también se encuentra la industria metalmeccánica en la cual se lleva a cabo la soldadura a base a GLP, referente a ello se presenta el modelo de soldadora GX271 GLP la cual ejecuta procesos como: SMAW<sup>25</sup>, TIG<sup>26</sup>, MIG<sup>27</sup>, entre otros [48]. Resulta factible puesto que el hidrocarburo ante la presencia del aire u oxígeno se convierte en un combustible.

<sup>25</sup> SMAW: Shield Metal Arc Welding

<sup>26</sup> TIG: Tungsten Inert Gas

<sup>27</sup> MIG: Metal Inert Gas

Finalmente una aplicación de gran relevancia es el sector automotriz peruano, en el cual radica la la competencia de GLP frente a: Diesel, GNC y Gasolina. En primera instancia el tipo de vehiculo con motor de combustion interna con combustible alternativo es aquel que utiliza GLP (Autogas) [49]. En la siguiente grafica se muestra una breve reseña respecto a la categorización entre tipo de vehículo, tipo de motopropulsión y combustible.

Tipo de vehículo	Combustible		Tipo de grupo de motopropulsión
Vehículo convencional de motor de combustión interna	Gasolina		Mecánico
	Diésel		
Vehículo de motor de combustión interna con combustible alternativo	Autogás	Gas licuado de petróleo (GLP)	
	Gas natural	Gas natural comprimido (GNC)	
		Gas natural licuado (GNL)	
	Biocombustible	Bioalcohol	
		Biodiésel	
		Biogás	
Hidrógeno			
Vehículo eléctrico	Electricidad		

**Tabla 1.1** Categorización Vehicular [49]

Inicialmente el uso de carburantes como Gasoleo y Gasolina resultan poco amigables económicamente en comparación con el GLP puesto que este representa un 16% de ahorro [50]. Paralelo a ello en cuanto a factor ecológico se trata, bajo la premisa que que la densidad del Diesel 2 ( $850 \text{ kg/m}^3$ ) es 99.8% más alta respecto a la del GLP ( $1.7 \text{ kg/m}^3$ ) a los  $15^\circ\text{C}$  [51] presenta incidencia de  $\text{CO}_2$  con un mayor nocividad ambiental en 13.5% referente al GLP [52].

Asimismo, abarcando el combustible alternativo de GNC es claro que, si de implicancia en la contaminación ambiental se trata, este es el menos influyente puesto que emite un 40% menos  $\text{CO}$  que el GLP [53]. Sin embargo, el contraste se encuentra en el rendimiento energetico que presenta el GNC, ya que presenta menos cantidad de atomos de

carbono en su composición lo cual no beneficia al momento de realizar la combustión en el motor [54]. En resumen frente a las premisas expuestas previamente, resulta conveniente aventurar que el GLP realiza un adecuado punto de equilibrio tanto en eficiencia ecológica como en la combustión que resulta más favorable para el motor.

### 1.1.3 Características Técnicas

La catalogación numérica correspondiente del GLP para el sistema CAS<sup>28</sup> es 68476-85-7 y en el sistema UN<sup>29</sup> es 1075 [55], estas son codificaciones técnicas orientadas a productos químicos, para facilitar su reconocimiento globalmente. Respecto a la simbología correspondiente, en su transporte debe incorporarse los diamantes otorgados por la NFPA 704, NTP<sup>30</sup> 399.015 y DoT [56], [57]; estos por medio de códigos resumen características críticas del hidrocarburo. DoT clasifica al GLP como “Gas inflamable” específicamente corresponde a la sección 2.1 de una lista de 9 tipos de materiales peligrosos, cada cual con subíndices [58]. Paralelamente la NTP le otorga la categoría 2.2 nombrada (al igual que la DoT) como “Gas Inflamable”, cabe recalcar que la Figura A.3 (ver Anexo 1) debe tener un fondo “Rojo” según las especificaciones de ITINTEC<sup>31</sup> nombradas.

En cuanto a la composición de este, comercialmente consta de: 70% Propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) en y 30% Butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) [59]. Por ello el GLP se caracteriza por ser incoloro en ambas presentaciones tanto en su estado líquido como gaseoso, de igual manera es inoloro por ello en la industria se le incorpora Etilmercaptano (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>SH), componente químico que le atribuye la cualidad de poder ser percibido por el olfato humano. Por otro lado, su mayor cualidad es que no es tóxico, sin embargo, si el usuario se encuentra en un ambiente con elevadas cantidades del hidrocarburo, este puede ocasionar su asfixia. En tal sentido tampoco se comporta como un agente corrosivo, ello facilita su manipulación en la etapa de suministro, por medio de materiales como caucho sintético o metales (acero, cobre, aleaciones, entre otros.) [32].

---

<sup>28</sup> CAS: Chemical Abstracts Service

<sup>29</sup> UN: Naciones Unidas

<sup>30</sup> NTP: Norma Técnica Peruana

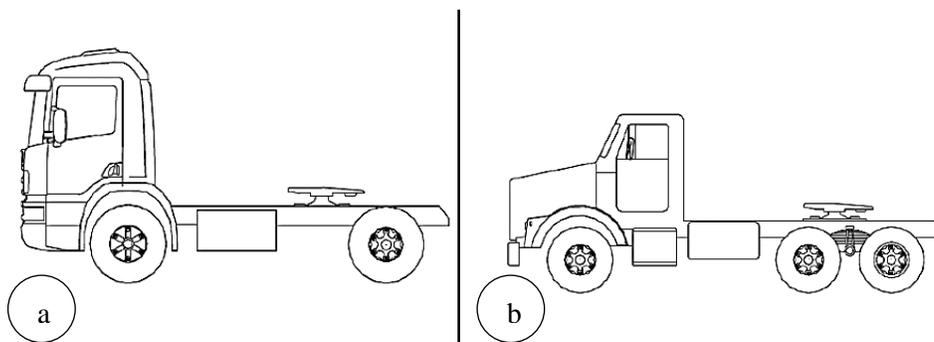
<sup>31</sup> ITINTEC: Instituto Nacional de Investigación Tecnología y Normas Técnicas.

## 1.2 Diseño Estructural

En esta sección se aborda el contexto referente a características del semirremolque en general, ello con la finalidad de caracterizar el tipo de vehículo en estudio. Asimismo, también se presentan los apartados teóricos característicos del recipiente a presión, tales como las silletas (soportes del tanque). Finalmente se exponen conceptos estructurales relacionados con el Bastidor, tipos de perfiles y características de la suspensión.

### 1.2.1 Variantes del Semirremolque

Un semirremolque al igual que un remolque logra transportar la carga mediante la “Cabeza Tractora” [60, p. 125]. Es preferible utilizar una de tipo “Chasis delantero completo” (Ver Figura 1.14), puesto que el conductor tiene un mayor rango de visión y una cabina amplia dado que la ubicación del motor es bajo su cabina; por otro lado, se encuentra el tipo “Convencional” (Ver Figura 1.12) donde el motor está en la parte delantera, reduciendo el espacio de cabina y la visión del conductor [61]. Debido a que estos son vehículos no motorizados, sin embargo, la gran diferencia estructural que radica en estos es respecto al medio de anclaje. En cuando al semirremolque deposita parte de su peso en la “5ta rueda” del tracto, en contraste el remolque únicamente se engancha al vehículo motor de tal forma que ninguna porción de su peso descansa en este.



**Figura 1.11** Cabezas tractoras: a) Chasis Delantero Completo, b) Convencional [62]

En tal sentido en Perú se encuentran clasificados los semirremolque y remolques (no obstante, este documento se enfoca en el primer elemento) por medio de la Directiva N° 002-

2006-MTC/15 [62] denominada como: “*Clasificación Vehicular y Estandarización de Características Registrables Vehiculares*”, dicho documento expone aproximadamente 24 tipos de carrocerías como: Volquete, Cama baja, Granelero, Furgón, Cigüeña entre otros. En el Anexo 2 se presentan las carrocerías de recipientes, en la cual “*GLP*” es el código correspondiente al tipo de carrocería en estudio.

La particularidad que presentan los tanques o cisternas va en función de cómo se encuentra dispuesto el recipiente su clasificación puede variar en tres opciones [63, p. 9], [14, p. 30] como:

A) Recipiente sobre Chasis.

Configuración estructural utilizada para camiones, se caracteriza por tener una baja maniobrabilidad en comparación con un semirremolque respecto al radio de giro. Una característica primordial radica en que, para mantener una adecuada tracción lateral de los neumáticos, la intersección de los ejes de las ruedas debe ser la ubicación del centro de giro del vehículo [14].



**Figura 1.12** Recipiente sobre Chasis [43]

B) Recipiente sobre Plataforma

Se caracterizan por un semirremolque o remolque, en contraste con la configuración anterior es por su independencia del chasis de la cabeza tractora. Una particularidad de este es su estabilidad lateral durante el viraje, puesto que la trayectoria de las ruedas del semirremolque es autónoma de las ruedas del tracto [14].



**Figura 1.13.** Recipiente sobre Plataforma [63]

C) Recipiente Autoportante

La diferencia de este modo con respecto al anterior es que el recipiente presenta una sección para el anclaje (por medio del King Pin) y otra para los patines; dejando así el chasis para la parte posterior donde se ubican los neumáticos [63], en tal sentido se reduce el peso de la estructura.



**Figura 1.14** Recipiente Autoportante [42]

## 1.2.2 Teoría enfocada en la Recipiente a presión

En los siguientes tópicos se describen parámetros relacionados con el recipiente a presión. Inicialmente se detallan características generales del tanque, así como detalles de fabricación. Posteriormente se aplica la teoría correspondiente a Placa Gruesa y Placa Delgada la cual se encuentra en el rango elástico (Ley de Hooke) [64].

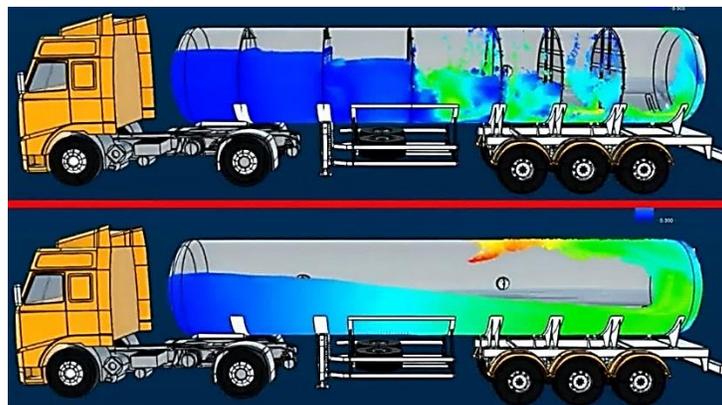
### 1.2.2.1 Características del Tanque a presión

Los componentes básicos del tanque a presión son el “Cuerpo” y los “Casos”; la unión de estos comúnmente se realiza por medio de procesos de soldadura como: Soldadura

de Arco Sumergido (SAW<sup>32</sup>), Soldadura de Arco Metálico Protegido (GMAW<sup>33</sup>) y Soldadura de Arco de Tungsteno Protegido por Gas (GTAW<sup>34</sup>) [65], [66]. Es recomendable evitar el procedimiento SMAW para largas longitudes como el caso de previo, ya que el electrodo no brinda un proceso continuo.

La geometría del tipo de casco a utilizar (cuadrangular, elíptica, circular, etc.) se encuentra relacionada con la estabilidad y resistencia a los esfuerzos. El centro de gravedad no se encuentra tan elevado en una sección transversal cuadrangular y elíptica como en una circular; sin embargo, la resistencia a la presión interna se encuentra relacionada directamente proporcional con la circunferencia de la sección transversal, puesto que en promedio el esfuerzo máximo es 56% menor en comparación con una sección cuadrangular [67], [68].

Por otro lado, es fundamental controlar el movimiento del fluido contenido en el tanque; puesto que ante un movimiento violento (Ver Figura 1.16) puede ocasionar una falta de estabilidad lateral o frontal, por ende, los componentes de sujeción (del tanque al chasis y del chasis a la quinta rueda) experimentan tensiones elevadas. Para ello se utilizan “Rompeolas” o “Mamparos”, la diferencia que radica en ellos es que el primero contiene aberturas que permiten el desplazamiento del producto en todo el tanque, en contraste los mamparos son placas solidas sin agujeros que también tiene la función compartimentar el tanque.



**Figura 1.15** Contraste dinámico del fluido ante la presencia de Rompeolas [69]

<sup>32</sup> SAW: Submerged Arc Welding

<sup>33</sup> GMAW: Gas Metal Arc Welding

<sup>34</sup> GTAW: Gas Tungsten Arc Welding

Para poder acceder al mantenimiento tanto de los rompeolas como otros dispositivos internos del tanque a presión, es necesaria una abertura por la cual el operario designado pueda introducirse, esta es conocida como “Entrada de hombre” o “Manhole”. En el caso de un Tanque GLP se caracteriza por ser de cierre empernado, no incorporar elementos complementarios (válvulas o niveles) y ubicarse comúnmente en la parte delantera, ventral o trasera. En la mayoría de los casos la superficie superior del tanque se encuentra cubierto por un “Parasol”. Este es una plancha curvada (concéntrica al recipiente a presión) de aluminio, que no se encuentra en contacto con el recipiente dejando así una “burbuja” de aire para evitar el calentamiento de la coraza por convección y radiación del ambiente. De esta manera se evita el incremento prematuro de las presiones internas [63], [70].

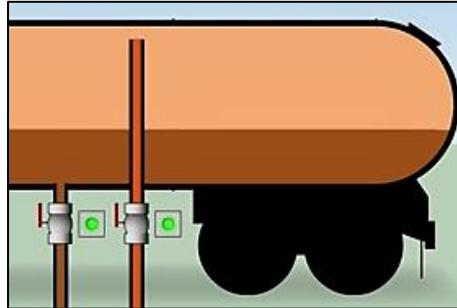


**Figura 1.16** Parasol y Manhole [70]

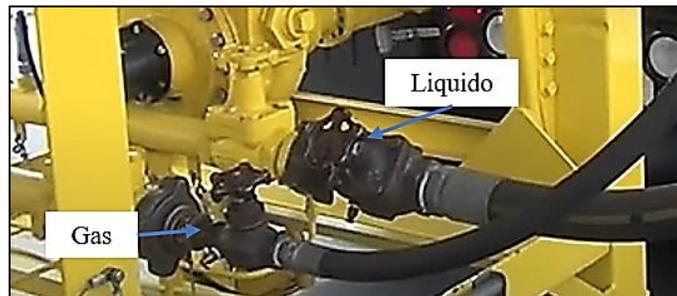
Los sistemas de carga y descarga populares en el mercado de fabricación de semirremolque tanque GLP son “Bottom Loading” o “Top Loading” (carga inferior o superior). Es preferible utilizar el primero ya que se evita el contacto del producto con el operario, por ser un sistema neumático además de ello el orificio de entrada y salida del material se encuentra “sellado” lo cual permite un bombeo rápido y canalizado [71]. En contraste el sistema Top Loading se caracteriza por ser un sistema mecánico, suele utilizarse en semirremolques cisterna para el transporte agua.

El Bottom Loading, consta de dos válvulas principales para realizar la carga en estado líquido y la descarga en estado gaseoso (Ver Figura 1.19). La diferencia radica en el diámetro de tubería puesto que la de estado líquido es mayor; en cuanto a la distribución del material,

la longitud de las tuberías internas al tanque (Ver Figura 1.18) va acorde a la densidad en la cual se encuentra el material [72].



**Figura 1.17** Tuberías internas de Gas y Líquido [72]



**Figura 1.18** Válvula de Gas y Líquido [73]

En cuanto al nivel de líquido dentro del tanque, se cuantifica el porcentaje por medio de una “Galga Rotativa”. Es ubicada en el lateral superficial a la coraza, para determinar una lectura confiable, el vehículo debe encontrarse en reposo y en superficie horizontal (sin pendiente) [63].

### **1.2.2.2 Pared delgada y Pared gruesa**

Un tanque a presión se ve sometido a: cargas estáticas y dinámicas, expansión térmica, presión interna, presión externa, entre otros [74]; ello ocasiona esfuerzos presentes en el material en función a la geometría que caracteriza (Figura 1.20). En tal sentido se exponen dos escenarios para realizar el cálculo, ello depende de parámetros geométricos como el grosor de la placa y el radio de la sección cilíndrica, expuestos a continuación:

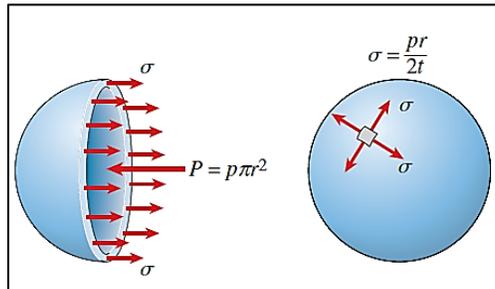
$$\frac{R_i}{t} \geq 10 \quad (1.1)$$

Donde:

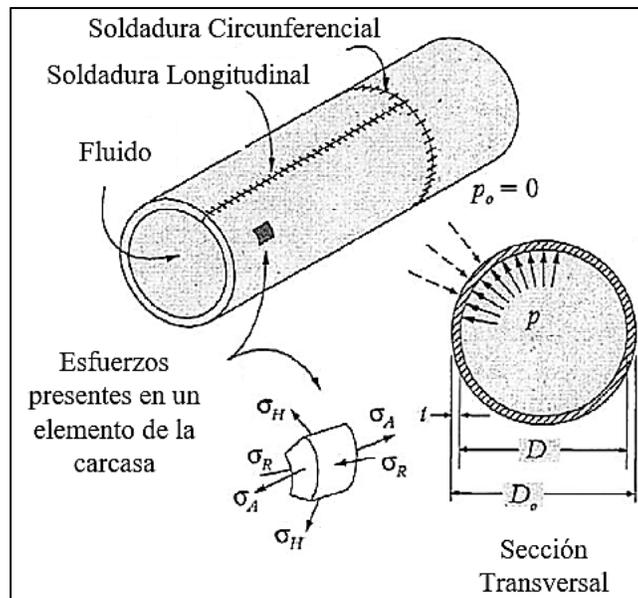
$R_i$  = Radio interno.

$t$  = Grosor de placa.

En caso se cumpla la condición, es conveniente utilizar la teoría de “Placa Delgada” (Thin Wall) de lo contrario se debe realizar el estudio por medio de “Placa Gruesa” (Thick Wall) [75] [76]. Cabe recalcar que cualquier recipiente a presión puede analizarse por medio de esta última teoría [77], sin embargo, por cuestiones prácticas se propone la primera, en breve se abordará el tema con mayor cautela.



**Figura 1.19** Esfuerzo presente en el casco semiesférico [78]



**Figura 1.20** Esfuerzos presentes en el cuerpo [79]

$$\sigma_H = 2 \cdot \sigma_A \quad (1.2)$$

$$\sigma_A = \frac{p \cdot D}{4 \cdot t} \quad (1.3)$$

$$\sigma_R = -p \quad (1.4)$$

Donde:

$p$  = Presión interna

$D$  = Diámetro interno

$\sigma_H$  = Esfuerzo Circunferencial

$\sigma_A$  = Esfuerzo Axial

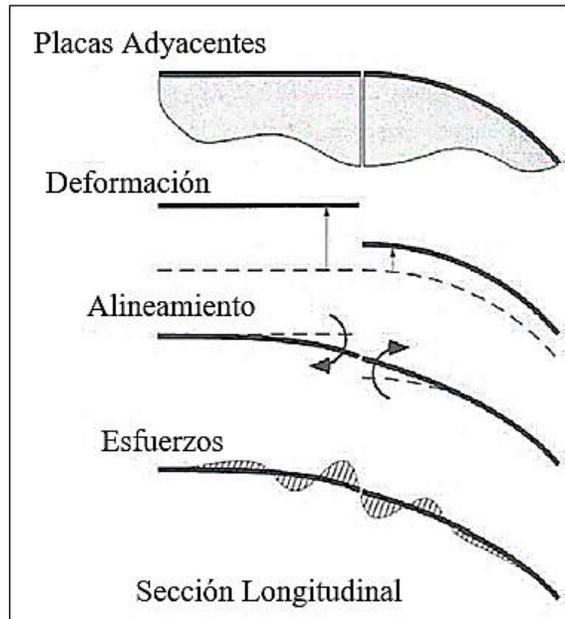
$\sigma_R$  = Esfuerzo Radial

$P^{35}$  = Fuerza de Presión Resultante

Los esfuerzos presentes en el casco del tanque son iguales al esfuerzo axial en el cuerpo ( $\sigma_A = \sigma$ ), es así como en un recipiente de placa delgada (también conocido como membrana) la magnitud del esfuerzo radial ( $\sigma_R$ ) es insignificante en comparación con los esfuerzos axiales ( $\sigma_A$ ) y circunferenciales ( $\sigma_H$ ). Ello quiere decir que, en este caso, la distribución de esfuerzos en el espesor de la placa se puede asumir como constante dado que la opone baja resistencia a la flexión perpendicular a la superficie, por tal motivo se recomienda un análisis biaxial ( $\sigma_H, \sigma_A$ ). En adición la expansión diametral de un cilindro es aproximadamente un 60% mayor al de la esfera, en tal sentido se presenta el contraste [79].

---

<sup>35</sup> Referente a la Figura 1.26



**Figura 1.21** Discontinuidad en frontera [79]

Resulta adecuado establecer que en este caso únicamente se priorizan los recipientes a presión interna ( $p$ ), por ende, en las ecuaciones se obvia la presión externa ( $p_o$ ) o del ambiente. Asimismo, las ecuaciones mostradas en esta sección no abordan efectos físicos ocasionados por la discontinuidad al presentarse un cambio de sección, o las concentraciones de esfuerzos originadas por las aberturas o accesorios incluidos en el recipiente a presión [78]. El análisis perteneciente a tales puntos es abarcado por los elementos finitos.

Dado que el esfuerzo circunferencial es el doble que el axial, este resulta ser el crítico y requerido para el diseño. En tal sentido la ASME (Secc.VII-Div.1) propone determinar el espesor del cuerpo en función al esfuerzo admisible por el material a utilizar [76]. Además de ello se considera un factor de seguridad ( $0.6 \cdot p$ ) [74], el cual incrementa el grosor de placa delgada en 40%.

$$t = \frac{p \cdot r}{S \cdot E - 0.6 \cdot p} \quad (1.5)$$

Para el espesor requerido por los cascos:

$$t = \frac{p \cdot r}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot p} \quad (1.6)$$

Donde:

$S$  = Esfuerzo admisible del material (Sec.II-Part.D)

$E$  = Eficiencia de junta

$r$  = Radio interno

Cabe recalcar que el esfuerzo admisible del material debe ser correspondiente a lo delimitado por ASME en la Sección II-Parte D. Por otro lado, el segundo caso (Placa Gruesa) se basa en las ecuaciones de Lamé, dado los esfuerzos radiales son relevantes, por ende, la distribución de esfuerzos varia a lo largo del grosor [75]. Estas relacionan a la presión interna y externa en el tanque, así como su grosor de pared en función de los radios. A continuación, se presentan las relaciones referentes al cuerpo:

$$\sigma_H = \sigma_A + \frac{a^2 \cdot b^2(p_o - p)}{r(b^2 - a^2)} \quad (1.7)$$

$$\sigma_A = \frac{p \cdot a^2 - p_o \cdot b^2}{b^2 - a^2} \quad (1.8)$$

$$\sigma_R = \sigma_A - \frac{a^2 \cdot b^2(p_o - p)}{r(b^2 - a^2)} \quad (1.9)$$

De igual manera las relaciones pertenecientes al casco semiesférico del tanque son:

$$\sigma_H = \frac{p \left(1 + \frac{b^3}{2 \cdot r^3}\right)}{\left(\frac{b^3}{a^3} - 1\right)} - \frac{p_o \cdot \frac{b^3}{a^3} \left(1 + \frac{a^3}{2 \cdot r^3}\right)}{\left(\frac{b^3}{a^3} - 1\right)} \quad (1.10)$$

$$\sigma_R = \frac{p \left(1 - \frac{b^3}{r^3}\right)}{\left(\frac{b^3}{a^3} - 1\right)} - \frac{p_o \cdot \left(\frac{b^3}{a^3}\right) \left(1 - \frac{a^3}{r^3}\right)}{\left(\frac{b^3}{a^3} - 1\right)} \quad (1.11)$$

Donde:

$p$  = Presión interna

$p_o$  = Presión externa

$a$  = Radio interno

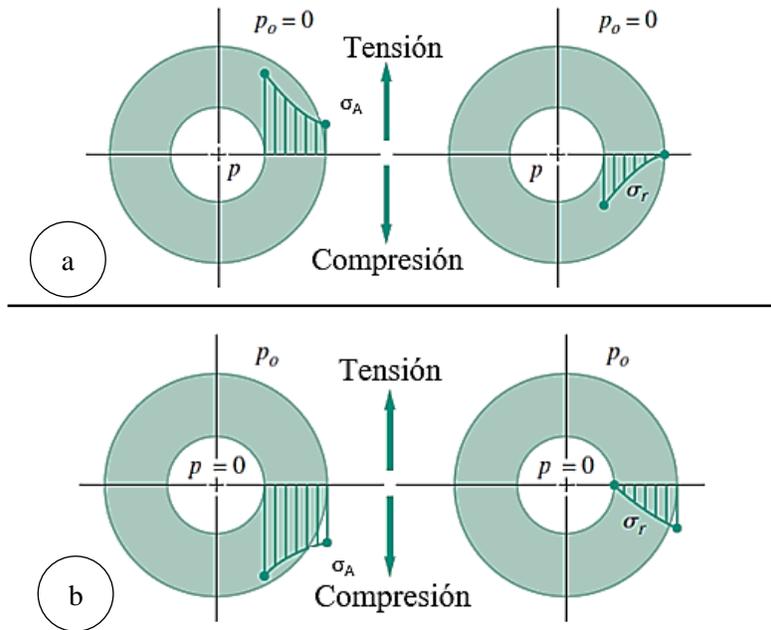
$b$  = Radio Externo

$r$  = Punto de análisis

Las ecuaciones de Lamé fueron la base para posteriores análisis realizados por ASME (Secc.VIII-Div.1, Div.2 y Div.3), para determinar el grosor de placa gruesa en base a el esfuerzo admisible del material. Dichas divisiones ofrecen relaciones distintas con resultados similares, la ecuación presentada en la Div.1 es la menos conservadora económicamente dado que el grosor de pared es aproximadamente un 6% y 4% mayor en comparación a la Div.2 y Div.3 respectivamente [76]. A continuación, dicha ecuación.

$$t = a \cdot \left( \left( \frac{S + p}{S - p} \right)^{0.5} - 1 \right) \quad (1.12)$$

Bajo la suposición de un grosor de pared constante, la deformación a lo largo de su longitud será constante y simétrica referente a su eje. Por otro lado, un caso especial en el cual se evalúa la distribución de esfuerzos en el grosor de la placa se debe tener en cuenta que el punto de análisis ( $r = a$ ) es el radio interno. En la Figura 1.27 se asume (idealmente) un recipiente a presión interna ( $p > 15$  psi [80]), como el caso de un avión; adyacentemente en la Figura 1.28 se presenta el caso (ideal) para un recipiente a presión externa ( $p \leq 15$  psi [80]), parecido al desempeño de un submarino el cual se somete a presiones cercanas a 100 MPa [79]. En ambos casos el comportamiento del esfuerzo radial cumple con dos condiciones: Es menor que el esfuerzo axial (aproximadamente 40%) y se encuentra en compresión [64].

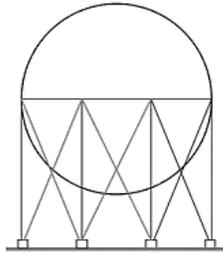


**Figura 1.22** Distribución de esfuerzos en recipiente sometido a presión: a) Interna, b) Externa [77]

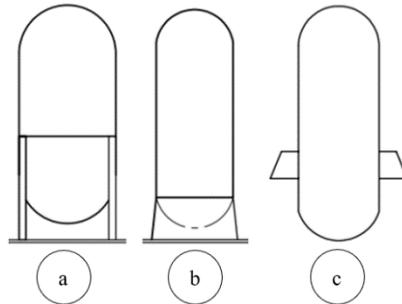
Referente a las figuras el comportamiento de descrito por “Placa Gruesa” es característico de elementos como: un cañón de tanque o de escopeta, un cilindro hidráulico de alta presión, engranes, etc. [64], [81]. En base a las ecuaciones presentadas en ambos casos (pared delgada y pared gruesa) se aprecia la relación jerárquica de los esfuerzos ( $\sigma_R < \sigma_A < \sigma_H$ ), donde que el esfuerzo predominante es el circunferencial (Hoop), factor clave que generalmente ocasiona la falla de los tanques a presión.

### 1.2.2.3 Silletas

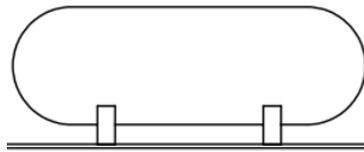
El tipo de soporte utilizado para un tanque a presión varía según su diseño geométrico, en cuanto a tanques esféricos se suelen utilizar “Piernas” (Legs) al igual que en los tanques verticales, sin embargo, este último también pueden utilizar tanto Faldones (Skirt) como Agarraderas (Lugs). En el caso particular de los tanques a presión horizontales, se emplean las Silletas (Saddle), componente a detallar en los siguientes párrafos [76].



**Figura 1.23** Soporte en tanque a presión esférico [76]



**Figura 1.24** Soporte en tanques a presión vertical: a) Piernas, b) Faldón, c) Agarradera [76]



**Figura 1.25** Soporte en tanques a presión horizontal [76]

El tanque horizontal experimenta esfuerzos al reposar en las silletas, estos se tornan influenciados no solo por la distribución a lo largo del tanque, sino también por su geometría y los característicos anillos de refuerzo, que otorgan rigidez estructural. A continuación, se indican características de estos fenómenos físicos.

- Esfuerzo Longitudinal

Radican entre las silletas y la ubicación de estas mismas (figura 1.27), viéndose influenciado por el pandeo del tanque. Asimismo, se caracterizan por ejercer tensión y compresión a lo largo del tanque (ver figura 1.28), el criterio de aceptación recomendado por ASME es:

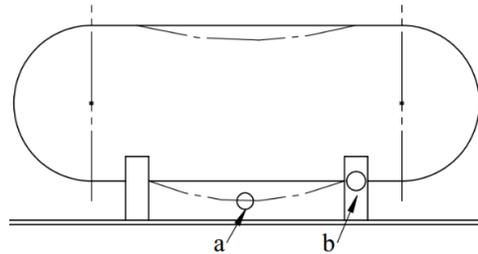
$$\sigma_l < S \cdot E \quad (1.13)$$

Donde:

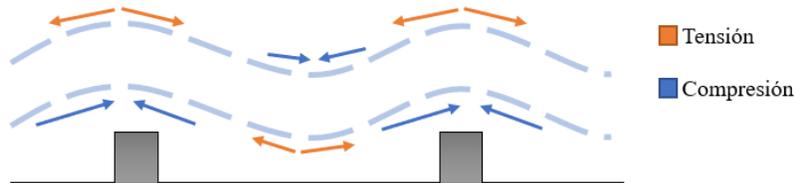
$\sigma_l$  = Esfuerzo longitudinal

$S$  = Esfuerzo último del material del tanque

$E$  = Eficiencia de soldadura



**Figura 1.26** Esfuerzos longitudinales: a) Entre silletas, b) En ubicación de silleta [76]



**Figura 1.27** Esfuerzos longitudinales en el tanque ejercidas por las silletas [82]

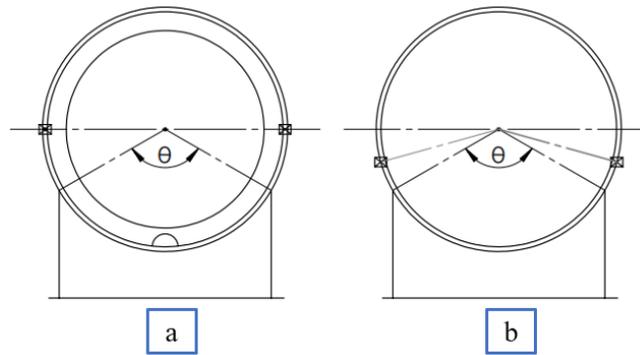
- Esfuerzo Cortante

Al igual que el anterior caso, se presenta en la ubicación de la silleta; no obstante, se diferencia por variar la posición según la ubicación de los anillos de refuerzo, en caso se sitúen en el plano de la silleta (ver figura 1.29) o los costados de esta (ver figura 1.33). El criterio de aceptación recomendado por ASME es:

$$\sigma_s < 0.8 \cdot S \quad (1.14)$$

Donde:

$\sigma_s$  = Esfuerzo cortante



**Figura 1.28** Esfuerzos cortantes: a) Con anillo en plano de la Silleta, b) Con anillos a los costados [83]

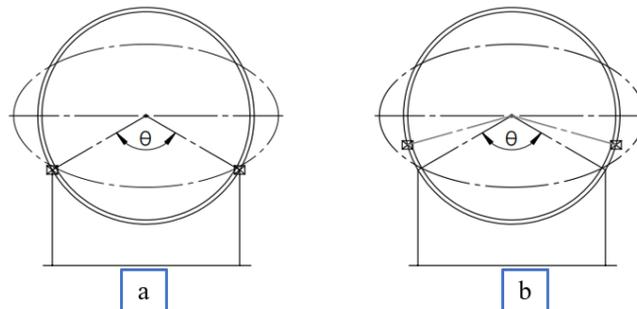
- Esfuerzo Circunferencial

Similarmente al caso anterior, estos se ven influenciados por los anillos de refuerzo. La ubicación de los esfuerzos cambia (ver figura 1.30) en caso se utilice dos anillos (a los costados de la silleta) o uno solo (siendo igual que ninguno). El criterio de aceptación recomendado por ASME es:

$$\sigma_c < S \quad (1.15)$$

Donde:

$\sigma_c$  = Esfuerzo circunferencial



**Figura 1.29** Esfuerzos circunferenciales: a) Con un solo anillo o sin anillo, b) Con anillos a los costados [83]

En cuanto a la geometría de la silleta debe configurarse para un soporte continuo del tanque con un ángulo mínimo permisible de 120° [83], en caso los esfuerzos sean excesivos D. Moss [76] recomienda.

- Incrementar el ángulo de la silleta
- Variar la ubicación longitudinal
- Aplicar anillos de refuerzo.

Adicionalmente, con la finalidad de atenuar la magnitud de los esfuerzos, ASME indica que se debe implementar una placa de refuerzo por cada silleta. Tanto el ancho mínimo como el ángulo de contacto de la placa están en función de la geometría de la silleta como se detalla a continuación.

$$\theta_1 = \theta + \frac{\theta}{12} \quad (1.16)$$

Donde:

$\theta_1$  = Angulo de contacto de la placa de refuerzo

$\theta$  = Angulo de contacto de la silleta

$$b_1 = b + 1.56\sqrt{R_m \cdot t} \quad (1.17)$$

Donde:

$\theta_1$  = Ancho de la placa de refuerzo

$\theta$  = Ancho de la silleta

$R_m$  = Radio medio del tanque

$t$  = Espesor de placa del cuerpo del tanque

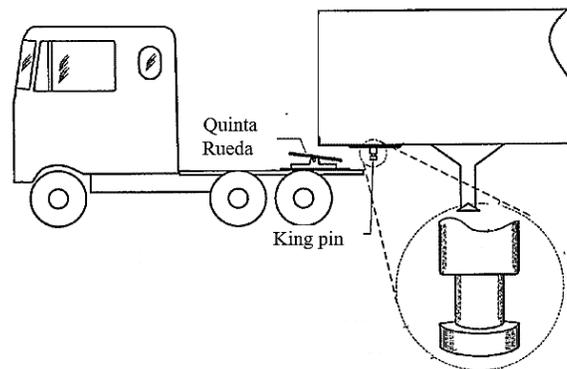
### 1.2.3 Características del Bastidor

La diferencia relevante entre el bastidor del semirremolque y el del tracto, es que no presenta una distribución adaptada para el motor. Respecto a las similitudes entre estos, por un lado, está el sistema de eléctrico, que suele usarse para funcionalidades propias del vehículo como el “Eje electrificado” (caso propuesto por Bosch [84]) siendo este un sistema

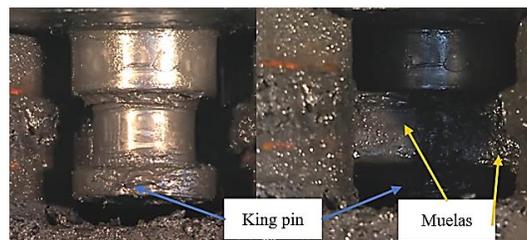
de tracción eléctrico auxiliar; y el sistema neumático gestiona los frenos, suspensión (en caso sea neumática), entre otros.

### 1.2.3.1 Elementos del Bastidor

Un componente icónico del bastidor de un semirremolque es el “King pin”. Este permite su acople a la cabeza tractora, uniéndose a la “Quinta Rueda” la cual pertenece al tracto. La Quinta Rueda, puede ser móvil o fija al chasis del tracto, en tal sentido su adecuada ubicación se encuentra en función a: distancia entre los ejes y tipo de chasis del tracto, magnitud de las cargas, entre otros; su ubicación influye en la maniobrabilidad del conjunto (tracto y semirremolque) [85], [86]. Paralelamente se encuentra el King pin, elemento pivote que va ubicado en el tornamesa en la parte delantera del chasis (Ver Figura 1.31); este debe acoplarse a las “muelas” (o mordazas) de la quinta rueda; este proceso es mecánico, sin embargo, el control de la elevación o descenso de la quinta rueda es neumático.



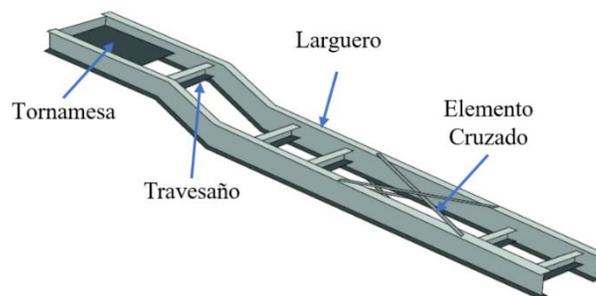
**Figura 1.30** Quinta Rueda y King pin [87]



**Figura 1.31** Acople Muelas y King pin [88].

Ante esta mecánica de acople (las muelas y el King ping) A. Hormazabal, et al. [89] determino que la maniobra crítica de carga es: el radio de giro mínimo; esta se presenta cuando la cabeza tractora gira reiteradas veces ortogonalmente respecto al cuerpo de carga, como consecuencia ocasiona un incremento exponencial en los esfuerzos mecánicos experimentados por el King-Pin.

Los principales elementos utilizados en el bastidor se ubican tanto longitudinalmente (Larguero) como transversalmente (Travesaño), aparte de ello es recomendable incorporar una distribución de vigas cruzadas con la finalidad de tener un mayor control para la rigidez torsional del chasis [11], [90]. Dicha configuración básica en la estructura del bastidor será evaluada (bajo consideraciones atribuidas) al ejecutar el diseño, este será implementado para un “Recipiente a presión Autoportante”. Asimismo, una de las funciones que presenta (el chasis) es la de unir el tracto con los ejes del semirremolque. Estos comúnmente se presentan en tres configuraciones (una simple y dos compuestas): Simple, un solo eje; Tándem, dos ejes y Trident, de tres ejes. Estos irán en función a parámetros legales y el peso de la carga como del recipiente[91].



**Figura 1.32.** Distribución de Vigas [11].

Resulta conveniente el considerara perfiles cuya sección transversal tenga gran resistencia a la torsión ( $R$ ), puesto que ello disminuye la deflexión angular, por ende, también los esfuerzos presentes; matemáticamente se relaciona por:

$$\theta = \frac{T \cdot L}{G \cdot R} \quad (1.18)$$

Donde:

$\theta$  = Deflexión angular

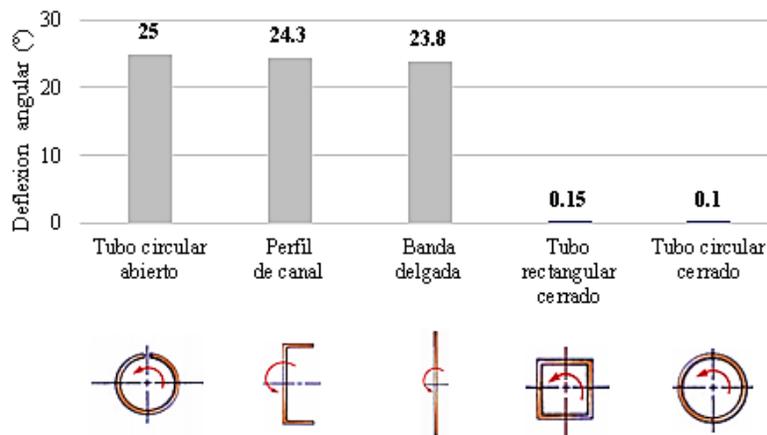
T = Par torsional

L = Longitud influyente en el par torsional

G = Modulo elástico en cortante del material

R = Constante de rigidez geométrica

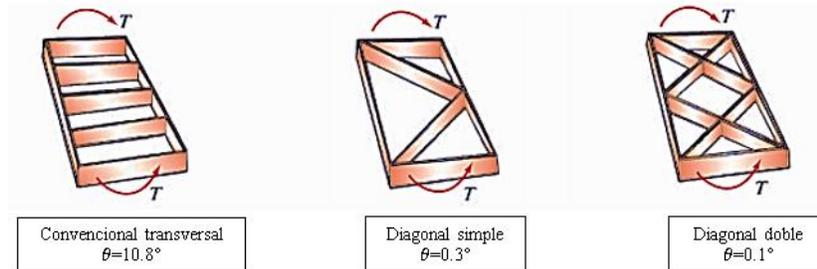
Por ello, la geometría ideal para contrarrestar la torsión debe ser cerrada y circular; como se presenta en la siguiente figura, bajo la consideración de: iguales espesores y perímetro, se presenta el contraste descrito.



**Figura 1.33.** Contraste en la deflexión angular de perfiles [92].

Sin embargo, el apartado teórico no siempre puede ser compatible con la práctica; ello se presenta en la manufactura de la matriz estructural. Dado que el bastidor es el esqueleto del vehículo, a este se le incorporan otros elementos como la suspensión, el motor, etc. Por ello en ocasiones se suelen aplicar perfiles con base plana para facilitar el ensamblaje de los componentes. Siendo este el caso, son 3 configuraciones básicas para el amarre del bastidor,

en función a la exigencia torsional en la labor del vehículo se deben unir los elementos, puesto que es diferente la dinámica de un semirremolque con carga basculante a uno con carga fija.



**Figura 1.34.** Contraste de deflexión en los amarres para el bastidor [92].

Consecuentemente, la relación de variables material-geometría, influyen al consumo de combustible del tracto; más aun tratándose de un motor a combustión interna, donde principalmente el ahorro de combustible incide en los siguientes puntos:

- Fatiga de llantas y componentes de suspensión
- Ahorro económico
- Salud ambiental (GHG<sup>36</sup>)

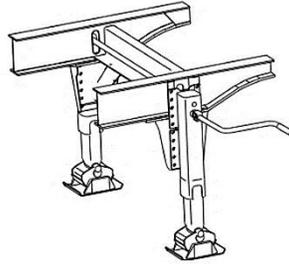
Es posible cuantificar los litros de combustible a favor para el caso de semirremolques, en base al informe de SSAB [11] al interactuar la data en el software; por cada 100kg de peso reducido, existe un ahorro de combustible según la velocidad característica (legalmente) al tipo de vía a transitar.

Ahorro específico en consumo de combustible	Autopista	Carretera Rural	Pista Urbana
$\frac{\text{Litros}}{(100km \cdot 100kg)}$	0.052	0.069	0.107

**Tabla 1.2** Ahorro de combustible según el tipo de vía [11].

<sup>36</sup> GHG= Greenhouse Gas

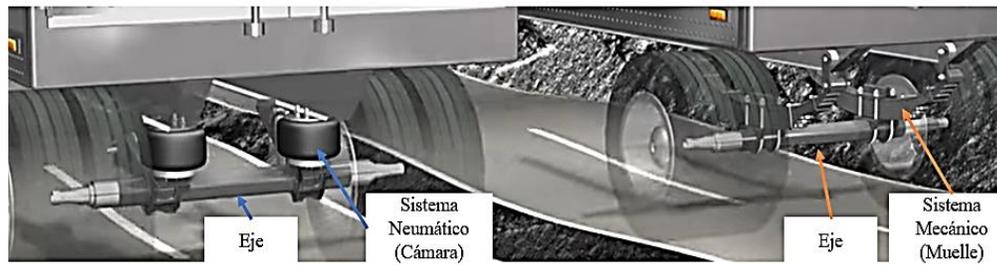
Por otro lado, cuando el vehículo se encuentra en reposo y no está conectada al tracto, se utilizan los “Patines” también conocidos como “Tren de aterrizaje telescópico”. Usualmente se encuentran empernadas al Bastidor o al recipiente de carga, para realizar un cambio del accesorio sin complicaciones; por otro lado, además al momento del accionamiento la velocidad alta se utiliza para guardar o expandir y la velocidad baja es útil para elevar el semirremolque cuando los patines contactan con la superficie [93].



**Figura 1.35** Patines [93]

### 1.2.3.2 Suspensión

El objetivo de toda suspensión es amortiguar las perturbaciones experimentadas por las irregularidades geológicas, por ende, se minimiza la fatiga experimentada en el chasis. Por un lado, se encuentra el sistema neumático, caracterizado por el aire comprimido en su interior en las cámaras; este presenta un desempeño más suave a comparación del sistema mecánico [94]. En tal sentido es recomendable utilizar una suspensión mecánica para labores donde no sea prioridad el cuidado de la carga como el transporte de leña por semirremolque; asimismo su mantenimiento y costo de adquisición son más amigables [14]. En contraste la suspensión neumática se caracteriza por su baja frecuencia de mantenimiento y su desempeño “silencioso”. Teóricamente estas se diferencian por la capacidad en la transmisibilidad de la carga inducida.



**Figura 1.36** Sistemas de amortiguación neumático y mecánico [95]

El concepto de transmisibilidad se puede expresar como la relación entre la vibración de salida y la vibración de entrada, ambas en función de la frecuencia [96], [97]; puede expresarse como:

$$T(f) = \frac{a_s(f)}{a_e(f)} \quad (1.19)$$

Donde:

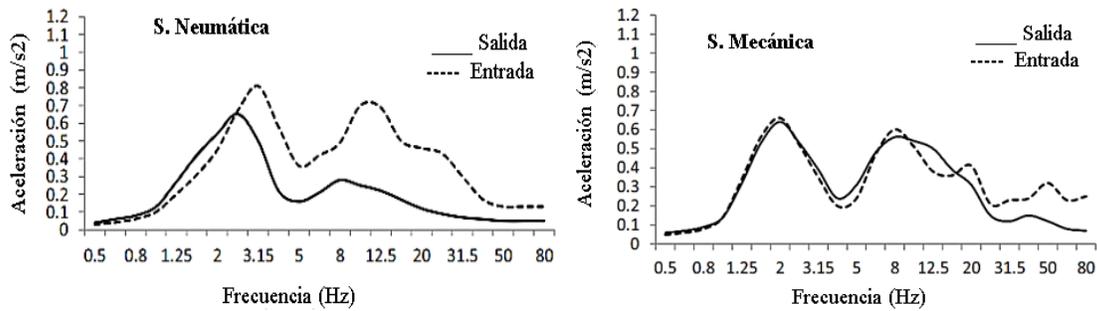
$T(f)$  = Transmisibilidad

$a_e(f)$  = Aceleración de entrada

$a_s(f)$  = Aceleración de salida

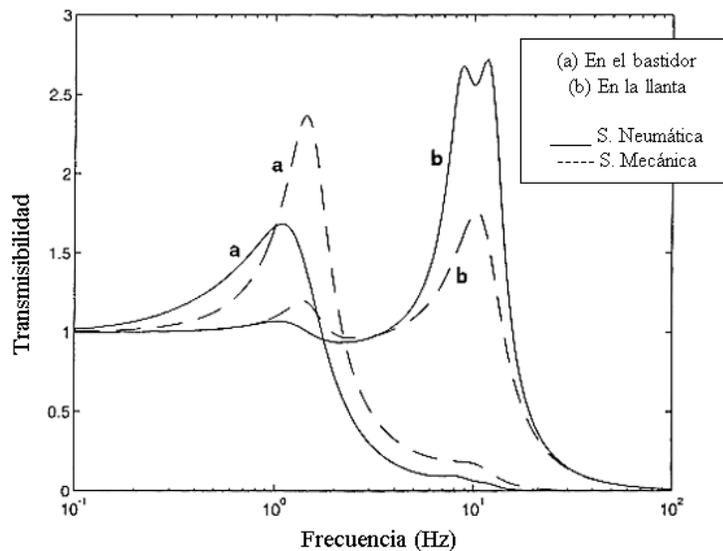
$f$  = Frecuencia

En la siguiente figura, [96] realiza el contraste vibracional de entrada y salida para una suspensión neumática y otra mecánica. Donde demostró que la vibración de salida del caso neumático es notoriamente menor que la vibración de entrada. Sin embargo, para el caso mecánico no ocurre esta atenuación vibracional.



**Figura 1.37** Vibraciones de entrada y salida en suspensiones Neumática y Mecánica [96]

Influenciado por estos conceptos, [98] cuantifica la transmisibilidad de la suspensión neumática y mecánica. Su grafica argumenta la ventaja y desventaja de cada sistema. En tal sentido, el sistema neumático atenúa la transmisibilidad referida al bastidor del vehículo, pero su efectividad no es destacable al reducir las vibraciones en las llantas; el sistema mecánico, contrata con estas cualidades.



**Figura 1.38** Transmisibilidad de suspensiones [98]

Al considerar el factor económico las consecuencias físicas atribuidas por cada sistema de suspensión, se puede concluir que es preferible la suspensión neumática dado que comúnmente es más asequible la restauración de las llantas frente al bastidor. Cabe recalcar que, al disminuir las vibraciones del bastidor, implica disminuir las perturbaciones oscilatorias en su respectiva carga.

### 1.3 Métodos Numéricos en simulación computacional

Un ejemplo de ramificación de los métodos numéricos se presenta en la tabla 1.2. Se apertura en dos grupos; en el cual el modelado Discontinuo, a diferencia del modelado Continuo donde se considera el dominio de control como un medio unificado, este considera el dominio de control como una serie finita de sistemas individuales (partículas) con interacciones frontera [99]. Una notable diferencia entre ambos es el costo de cómputo, agilizado en el modelado continuo; sin embargo, esta variable no define cual es mejor que el otro, ello radica en la aplicación.

La segunda ramificación radica en el método de cálculo utilizado al momento de describir los conceptos físicos que alberga el código computacional ya sea en el caso de CFD<sup>37</sup>, CSD<sup>38</sup> o la física computacional requerida. En algunos casos se usa el mallado: FEM<sup>39</sup> y FDM<sup>40</sup>, hay métodos que utilizan partículas en vez de malla: DEM<sup>41</sup> y SPH<sup>42</sup> y los híbridos que utilizan ambos (PFEM<sup>43</sup>) [100]. Se debe considerar que ningún método es mejor que el otro, dado que cada uno tiene ventajas y desventajas según el tipo de aplicación requerido.

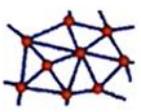
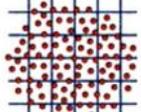
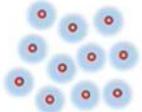
METODOS NUMERICOS			
CONTINUO		DISCONTINUO	
CON MALLA	HIBRIDO	SIN MALLA	
FEM, FDM...	PFEM...	SPH...	DEM...
			
<i>NIVEL DE DEFORMACIÓN</i> 			

Tabla 1.3 Ramificación de métodos numéricos [101].

<sup>37</sup> CFD= Computational Fluid Dynamics

<sup>38</sup> CSD= Computational Structural Dynamics

<sup>39</sup> FEM= Finite Element Method

<sup>40</sup> FDM= Finite Difference Method

<sup>41</sup> DEM= Discrete Element Method

<sup>42</sup> SPH= Smoothed Particle Hydrodynamics

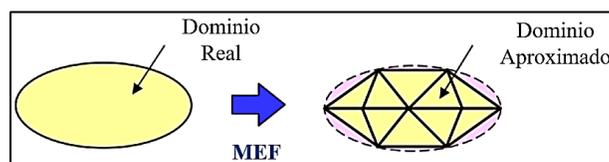
<sup>43</sup> PFEM= Particle Finite Element Method

Estos métodos son técnicas numéricas computacionales basada en el cálculo de ecuaciones diferenciales mediante el concepto de interpolación polinómica por partes y el uso de arreglos matriciales en la discretización del cuerpo en estudio [102], [103]. Cuya finalidad es tener soluciones aproximadas de los “problemas de campo”, donde, el campo es el dominio de interés (como fluido y/o estructura) y las variables de campo se gobiernan se gobiernan por las respectivas ecuaciones características del enfoque físico atribuido [104].

Si bien es cierto que el este caso de estudio demanda un código computacional que contemple las altas deformaciones; en función a la literatura se ha optado por aplicar SPH dado que su enfoque es la hidrodinámica, mientras DEM se especializa en partículas sólidas: moléculas y granos [101], [105]. En tal sentido, el estudio se realizará contemplando FEM para el análisis estático y SPH para el dinámico, el acople de ambas técnicas ayudará a comprender el comportamiento de la estructura tras la repercusión dinámica del fluido, conocido como chapoteo (sloshing).

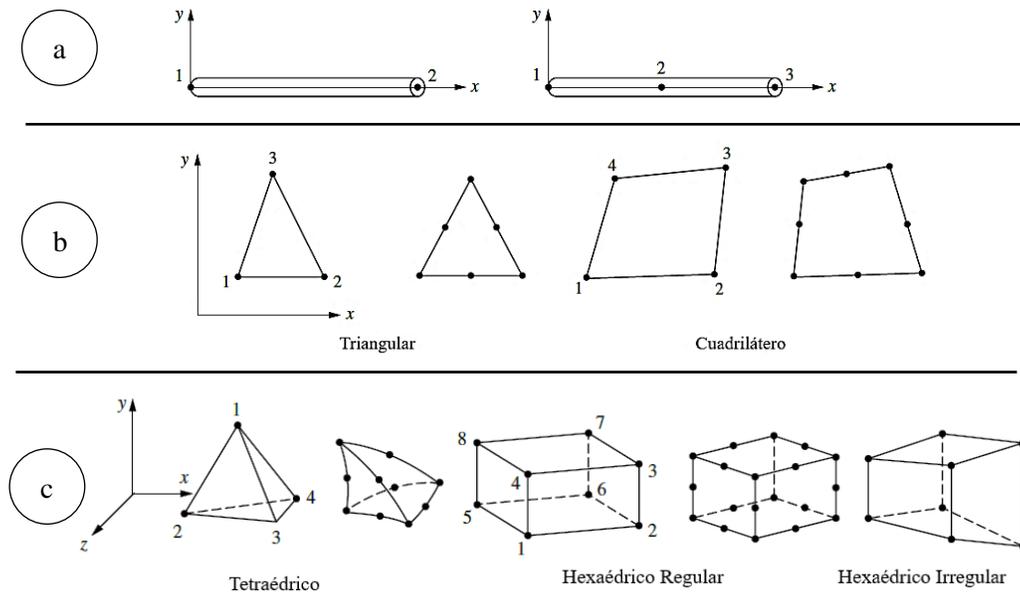
### 1.3.1 Análisis Estático

El cálculo se realiza mediante la técnica de técnica de discretización (mallado), esta busca dividir el dominio de interés en un número “finito” de elementos geométricos relacionados por nodos.



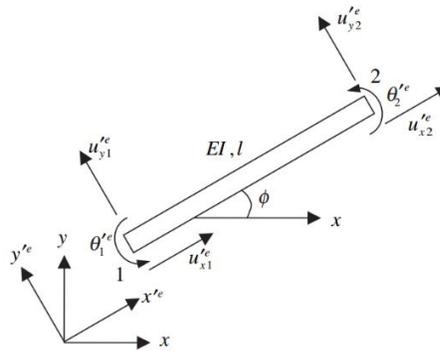
**Figura 1.39** Simplificación Geométrica por MEF [102]

Los elementos típicos del mallado pueden ser longitudes (1D), áreas (2D) o volúmenes (3D) en función a la aplicación requerida.



**Figura 1.40** Elementos: a) 1D, b) 2D, c)3D [103]

Estos elementos finitos tienen sus respectivos desplazamientos ya sean traslacionales o rotacionales, conocidos por: grados de libertad (DOF<sup>44</sup>). Donde la cantidad de DOF aumenta con la complejidad de la geometría finita, siendo un elemento Hexaédrico el de mayor numero (24 DOF).



**Figura 1.41** Desplazamientos nodales del elemento barra [103]

El proceso FEA es conocido por ser un proceso iterativo, incorporando por 3 tópicos globales y 6 locales (ver tabla). A grosso modo puede ser metaforizado como una “caja negra”, donde: el Preproceso es el input; el proceso, el cálculo numérico y el postproceso, el output.

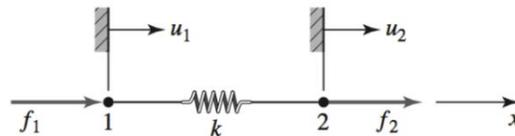
<sup>44</sup> DOF= Degrees of Freedom

Siendo tanto preproceso como postproceso, netamente dependientes del criterio del diseñador; y el proceso, del computador. En base a los resultados obtenidos e interpretados por el diseñador (usuario), se definirá si evaluar nuevamente modificando los parámetros de entrada o finalizar el estudio.

Tópico Global	Tópico Local
Preproceso	Dominio Geométrico (CAD)
	Propiedades del material
	Tipo de mallado
	Condiciones Frontera
Proceso	Calculo numérico computacional
Postproceso	Resultados cuantitativos

**Tabla 1.4** Proceso general del Análisis por elementos finitos [103], [106]

Se puede aperturar la física que domina el análisis estático, considerando como punto de partida el siguiente sistema:



**Figura 1.42** Sistema del resorte [104]

En este, el resorte se caracteriza por su constante de rigidez. Esta propiedad mecánica es propia del cuerpo en análisis dado que depende de su geometría y material; asimismo relaciona la cara aplicada con la deformación atribuida, mediante la siguiente ecuación:

$$f = k \cdot \delta \quad (1.20)$$

Donde:

$f$  = Fuerza neta

$k$  = Coeficiente de rigidez

$\delta$  = Deformación total

Asumiendo un sistema de coordenadas local (desplazamiento en “x”) y únicamente cargas axiales se tiene:

$$\delta = u_2 - u_1 \quad (1.21)$$

Donde:

$u_2$  = Desplazamiento del nodo 2

$u_1$  = Desplazamiento del nodo 1

Por lo tanto, el equilibrio se modela como:

$$f_1 = -f_2 \quad (1.22)$$

Al caracterizar las ecuaciones anteriores en términos nodales se tiene:

$$f_1 = -k(u_2 - u_1) \quad (1.23)$$

$$f_2 = k(u_2 - u_1) \quad (1.24)$$

Donde su forma matricial se expresa como:

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (1.25)$$

Es así como la matriz cuadrada de la izquierda modela para el elemento resorte (bajo las condiciones descritas) la matriz de rigidez; sin embargo, cabe recalcar que la matriz de rigidez varía según el elemento finito que se esté aplicando, ya sea unidimensional, bidimensional o tridimensional. En tal sentido, la ecuación que caracteriza el equilibrio en el análisis estático estructural es [106]:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (1.26)$$

Donde:

$K$  = Matriz cuadrada de Rigidez

$u$  = Matriz columna de Desplazamiento

$F$  = Matriz columna de Carga

Una vez que los desplazamientos ( $u$ ) son conocidos, los esfuerzos en la estructura se pueden determinar mediante (ecuación gobernante):

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1.27)$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo normal

$E$  = Módulo de Young

$\epsilon$  = Deformación unitaria

Para ello, la deformación unitaria en base a un elemento finito es:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (1.28)$$

Donde:

$\delta$  = Deformación total

$L$  = Longitud original

### 1.3.1.1 Mallado para análisis estático

Como se describió previamente a inicios del apartado “Análisis Estático”, se utiliza el mallado para discretizar el dominio de interés; los conceptos descritos a continuación se encuentran dirigidos hacia la lógica albergada por el software ANSYS (contemplado para el presente estudio). En tal sentido en el CAD se dividieron los elementos del tanque a presión tanto casco como cuerpo, para facilitar su mallado. El proceso de mallado local, fue básicamente abordado por el método del Barrido (“Sweep”) y posteriormente se aplicó una “perfección de mallado superficial” mediante la opción de “Face Meshing” a las caras admisibles por el software como “Mappable Faces”; como segunda opción viable se abordará el método de mallado Tetraédrico para los cuerpos que no pudieron ser barridos.

Las características relevantes del elemento hexaédrico es su capacidad para optimizar el espacio de mallado, mientras que el beneficio de un tetraédrico es su fácil adaptación a las

curvaturas (como los cambios de sección); no obstante, ello puede unirse como una buena aproximación al ejecutar un mallado híbrido [187], ello mediante las opciones disponibles en ANSYS; como es el caso del método de barrido, donde se pueden aplicar elementos “Quad/Tri”.

Asimismo, también se realiza la verificación de la calidad del mallado final, ello por medio de parámetros como la oblicuidad (Skewness) y ortogonalidad (Orthogonal Quality), En tal sentido, la oblicuidad determina cuan “cercana” se encuentra a un elemento ideal (Hexaedro o Tetraedro), este contraste es representado en la Figura 1.44. En ANSYS se contempla la siguiente ecuación para hallar la “Desviación de Volumen equilátero” es:

$$Oblicuidad = \frac{T_o - T'}{T_o} \quad (2.4)$$

Donde:

$T_o$  = Tamaño de celda óptimo.

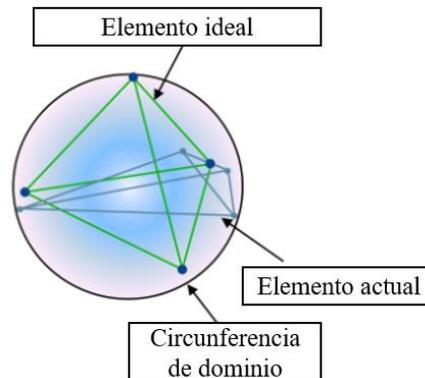
$T'$  = Tamaño de celda.

Y respecto a la “Desviación de Angulo Normalizada” se ejecuta:

$$Oblicuidad = \max \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (2.5)$$

Donde:

$\theta_e$ : Se considera: 90° para Hexaedros y 60° para Tetraedros.



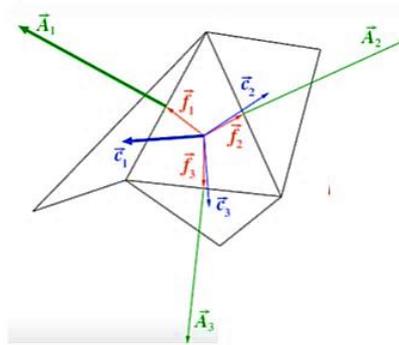
**Figura 1.43** Comparación entre elementos de mallado ideal y actual [188]

El espectro de control que el software ANSYS alberga es:

Excelente	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Inaceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

**Figura 1.44** Espectro de control para Oblicuidad [188]

Adyacentemente, la “Ortogonalidad” se encarga de caracterizar el “empate” entre elementos (ver Figura 1.46).



**Figura 1.45** Empate de elementos de malla [188]

Donde:

$\vec{A}_1$  = Vector normal de cara.

$\vec{f}_i$  = Vector del centroide de la celda al centroide de la cara.

$\vec{c}_i$  = Vector del centroide de la celda al centroide de la celda adyacente.

Para el caso, ANSYS contempla el siguiente espectro de control:

Inaceptable	Malo	Aceptable	Bueno	Muy Bueno	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

**Figura 1.46** Espectro de control para Ortogonalidad [188]

### 1.3.2 Análisis Dinámico

A diferencia del Análisis Estático, el enfoque presentado en los siguientes párrafos incluye la variable temporal. De este modo es posible un estudio con mayor detalle acerca del dominio de control; asimismo se incorporan más variables a la ecuación gobernante para complementar la presentada previamente (ecuación 1.26). A continuación, se presentan los conceptos generales de todo análisis estático, posteriormente es expuesta la parte relevante del presente estudio (bajo dos diferentes enfoques) en el tópico “Interacción Fluido Estructura”.

### 1.3.2.1 Conceptos Generales

Como se comentó previamente el estudio dinámico se caracteriza por estar en función al tiempo; ello otorga un enfoque más realista a la ecuación de equilibrio dinámico estructural [106], [107]:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (1.29)$$

Donde:

$M$  = Matriz cuadrada de masa

$\ddot{u}$  = Matriz columna de aceleración

$C$  = Matriz cuadrada de amortiguamiento

$\dot{u}$  = Matriz columna de velocidad

$K$  = Matriz cuadrada de rigidez

$u$  = Matriz columna de desplazamiento

$F_e$  = Matriz columna de Carga externa

Esta ecuación representa globalmente el equilibrio del cuerpo en estudio, al derecho las externas y al lado izquierdo están las fuerzas internas. Estas últimas se describen (localmente) como:

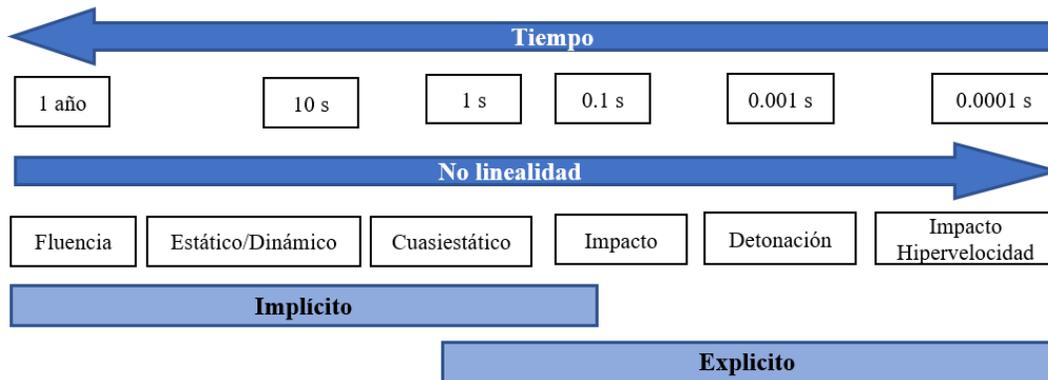
- $M\ddot{u}_{(t)}$ , fuerza inercial
- $C\dot{u}_{(t)}$ , fuerza de amortiguación
- $Ku_{(t)}$ , fuerza elástica

Tal modelo matemático se puede desarrollar con un enfoque implícito o explícito. Cada uno tiene ventajas y desventajas en base al tipo de estudio físico por realizar (ver figura

1.44), ninguno es mejor que el otro. Sus diferencias son varias, respecto al campo analítico y numérico (simulaciones); por ello se abordan puntualmente las siguientes:

Criterio	Enfoque	
	Implícito	Explícito
Discretiza la Ec. 1.27?	-	✓
	$\{u\} = [K]^{-1}(\{F\} - ([M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\}))$	$\{\ddot{u}\} = [M]^{-1}(\{F\} - ([K] \cdot \{u\} + [C] \cdot \{\dot{u}\}))$
Time Step conocido?	-	✓
	$y_{(t_{n+1})} = y_{(t_n)} + \Delta t \times y'_{(t_{n+1})}$	$y_{(t_{n+1})} = y_{(t_n)} + \Delta t \times y'_{(t_n)}$

**Tabla 1.5** Diferencias entre enfoque Implícito y Explícito [108], [109].



**Figura 1.47** Características del enfoque Implícito y Explícito [110].

En base a la tabla, queda expuesto que el caso implícito el time step no puede ser calculado directamente puesto que la derivada de la función es desconocida, donde es necesario métodos numéricos para su ejecución. En contraste el método explícito es factible su cálculo directo, dado que la función  $y_{(t_n)}$  es “conocida”. Puesto que el chapoteo se caracteriza por ser un fenómeno altamente no lineal, la bibliografía recomienda aplicar el enfoque explícito; en tal sentido su respectiva ecuación de movimiento (en base a la tabla 1.4) se puede reescribir como [111]:

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} \quad (1.30)$$

$$\dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)} \quad (1.31)$$

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1} \cdot (F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (1.32)$$

Donde:

$i$  = Numero de incremento

$u$  = Desplazamiento

$\dot{u}$  = Velocidad

$\ddot{u}$  = Aceleración

$M$  = Matriz cuadrada de masa

$F$  = Matriz columna de fuerza externa

$I$  = Matriz columna de fuerza interna

Donde se ha incluido el time step  $\Delta t$  y se asumen los efectos de amortiguamiento como despreciables o modelados en las relaciones constitutivas no lineales [106]. Abordando el time step, este debe cumplir con el concepto de estabilidad, cuyo principio se basa en la “Condición CFL<sup>45</sup>”. Esta declara que tan rápido puede viajar la información atreves de un elemento; por lo tanto, en un solo paso de tiempo la onda de información no debe viajar más allá de la longitud característica del elemento más pequeño [110]. Ello es modelado por la siguiente ecuación [111]:

$$\Delta t = \left( \frac{L_e}{c_d} \right)_{min} \quad (1.33)$$

Donde:

$L_e$  = Longitud del elemento

$c_d$  = Velocidad de propagación de la onda de sonido

Esta relación es evaluada (computacionalmente) para todos los cuerpos en análisis; además depende del tipo de elemento de malla a realizar por  $L_e$ , así como el material ( $c_d$ ). La velocidad de propagación de la onda de sonido se encuentra en función de las constantes de Lamé.

---

<sup>45</sup> CFL= Courant-Friedrichs-Lewy

$$c_d = \sqrt{\frac{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}{\rho}} \quad (1.34)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad

$\hat{\lambda}$  = Constante de Lamé

$\hat{\mu}$  = Constante de Lamé

Considerando un material: isotrópico y elástico, las constantes de Lamé se encuentran en función de propiedades mecánicas del material.

$$\hat{\lambda} = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \quad (1.35)$$

$$\hat{\mu} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.36)$$

Donde:

$E$  = Módulo de Young

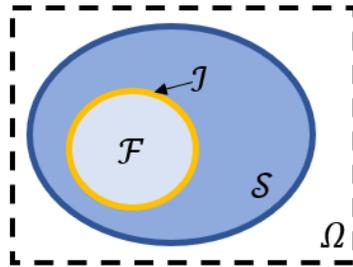
$\nu$  = Coeficiente de Poisson

### 1.3.2.2 Interacción Fluido Estructura (FSI)

Gracias a las simulaciones computacionales multifísicas es posible entender con un enfoque ciertamente más detallado el caso de estudio. La diversidad de estas se encuentra directamente relacionada con los fenómenos físicos en cuestión, ya sean térmicos, electromagnéticos, fluidos, estructurales, etc. Cabe recalcar que es recomendable priorizar las variables (fenómenos físicos) que tengan mayor repercusión en el estudio, pues si bien es cierto en la vida real se presenta una amplia gama de conceptos físicos, el código del

computador incrementa en función de estas y con ello el tiempo (costo) de cálculo. Por ende, en el presente caso de estudio aborda la Interacción Fluido Estructura (FSI<sup>46</sup>).

La siguiente figura, ayudara a comprender los principios que influyen en el acople de las dos fases (fluido y estructura) [112], detallados a continuación:



**Figura 1.48** Esquema FSI [112], [113].

Donde:

$\mathcal{F}$ = Dominio del Fluido

$\mathcal{S}$ = Dominio del Solido

$\mathcal{J}$ = Interfaz

$\Omega$ = Dominio de Global

1) Principio Geométrico (invariable en el tiempo)

- a) No hay superposición de cuerpos:  $\mathcal{F}_{(t)} \cap \mathcal{S}_{(t)} = \emptyset$
- b) La interfaz divide ambas fases:  $\mathcal{J}_{(t)} = \partial\mathcal{F}_{(t)} \cap \partial\mathcal{S}_{(t)}$
- c) Dominio Global incluye la interfaz:  $\Omega_{(t)} = \mathcal{F}_{(t)} \cup \mathcal{J}_{(t)} \cup \mathcal{S}_{(t)}$

2) Principio Cinemático

- a) La velocidad del fluido y el sólido son iguales en la interfaz (similar a la condición sin deslizamiento):  $v_f(x, t) = v_s(x, t)$  en  $\mathcal{J}_{(t)}$ , ( $x$  es un punto en la interferencia).

3) Principio Dinámico

- a) Balance de esfuerzos normales en la interfaz en términos de *actio et reactio*:  $\sigma_f = \sigma_s$  en  $\mathcal{J}_{(t)}$

---

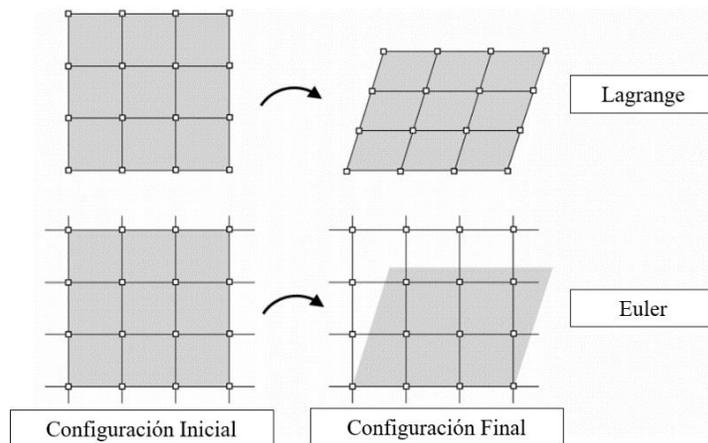
<sup>46</sup> FSI= Fluid-Structure Interaction

El presente estudio se desarrolla por medio de cálculos independientes (FEM-SPH, particionados), así se conserva tanto la eficiencia del volumen de fluido como la estructural. Un dato característico de FSI es su multifásica acoplada a superficie, puesto que a diferencia del caso multifísico acoplado a volumen (en interacciones entre flujos químicos reactivos), en este se consideran dominios independientes [112], [114].

Puesto que el enfoque es la repercusión hidráulica en la estructura; los métodos numéricos recomendados por la literatura [101], [105], [115], [116] son: CEL<sup>47</sup> y SPH, por su flexibilidad al modelar situaciones con deformaciones extremadamente altas. A continuación, se explicarán brevemente dichos conceptos realizando énfasis en SPH, por ser el método elegido por el autor (detallado posteriormente).

### 1.3.2.2.1 Acople Euler-Lagrange (CEL)

CEL es una técnica numérica que utiliza malla para el cálculo, fue propuesto en 1964 por F. Noh [117] y posteriormente desarrollado por D. Benson [118]. Como se comentó previamente, la finalidad de CEL es modelar el comportamiento dinámico en la interacción fluido-estructura (FSI). Por ello, aborda el método Lagrangiano (perspectiva local) para la estructura; y paralelamente el método Euleriano (perspectiva global) para el fluido. Por medio de la unión de ambas mallas es posible capturar el comportamiento no lineal del chapoteo.



**Figura 1.49** Mado Lagrangiano y Euleriano [119].

<sup>47</sup> CEL= Coupled Eulerian-Lagrangian

La figura anterior grafica el mallado con perspectiva “local” y “global” comentada previamente. Dado que esta técnica numérica acopla dos mallas diferentes, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento para fluidos newtonianos (fluido isotrópico con viscosidad lineal) compresibles e incompresibles, para cada malla son:

Ecuaciones de Conservación	Mallado	
	Lagrangiano	Euleriano
Masa	$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0$	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$
Momento	$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho b$	$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \nabla \cdot \sigma + \rho b$
Energía	$\frac{De}{Dt} = \sigma : D$	$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (ev) = \sigma : D$

**Tabla 1.6** Proceso general del Análisis por elementos finitos [105], [120]–[122].

Donde:

$\rho$  = Densidad

$v$  = Velocidad

$\sigma$  = Esfuerzo de Cauchy

$b$  = Fuerzas externas

$e$  = Energía interna

$D$  = Deformación por velocidad

$:$  = Doble producto punto

En las cuales  $\sigma$  se encuentra en función de la presión, velocidad y viscosidad dinámica del fluido. Respecto a las ecuaciones de Masa, estas son igualadas a cero, puesto que no se crea ni se destruye. Las ecuaciones de Momento, representa la lógica propuesta por la ecuación de Navier-Stokes (basado en el principio de la segunda ley de Newton); en la cual los términos de la izquierda representan: masa-aceleración; y los de la derecha: fuerzas internas-externas (aplicadas al volumen de control) [123], [124].

Cada malla tiene un enfoque en particular, el modelo Lagrangiano se deforma con el cuerpo, ello es caracterizado analíticamente como la derivada material respecto al tiempo; en contraste el modelo Euleriano se modela como la derivada espacial respecto al tiempo. Las mallas se relacionan mediante la siguiente ecuación [120]–[122]:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial\varphi}{\partial t} + v \cdot (\nabla\varphi) = \frac{\partial\varphi}{\partial t} + v \frac{\partial\varphi}{\partial x} \quad (1.37)$$

Donde:

$\varphi$  = Variable de solución arbitraria

$v$  = Velocidad del material

$\frac{d\varphi}{dt}$  = Derivada material respecto al tiempo

$\frac{\partial\varphi}{\partial t}$  = Derivada espacial respecto al tiempo

El termino convectivo ( $v \cdot (\nabla\varphi) = v \frac{\partial\varphi}{\partial x}$ ) describe la variación de la variable arbitraria en el espacio al pasar por la posición ( $x$ ). Para complementar la comunicación de mallas por la ecuación 1.37, se utiliza la Operación de División<sup>48</sup>, en la cual las ecuaciones Eulerianas de conservación de Masa y Energía presentan la siguiente forma general:

$$\frac{d\varphi}{dt} + \nabla \cdot \Phi = S \quad (1.38)$$

Donde:

$\Phi$  = Función de flujo

$S$  = Terminio fuente

La ecuación se divide en las siguientes relaciones, las cuales serán resueltas secuencialmente en el código.

- Para el Step Lagrangiano

$$\frac{d\varphi}{dt} = S \quad (1.39)$$

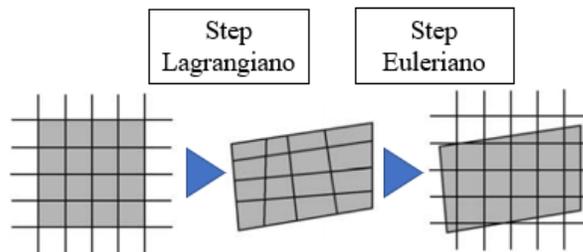
---

<sup>48</sup> También conocido como: Slipt operator

- Para el Step Euleriano

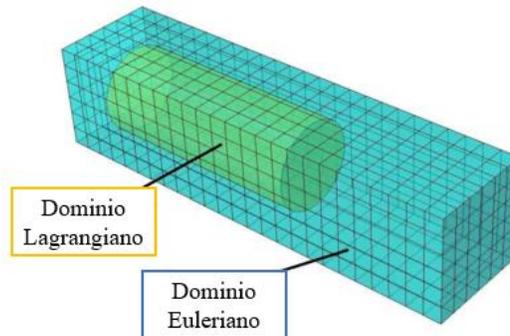
$$\frac{d\phi}{dt} + \nabla \cdot \Phi = 0 \quad (1.40)$$

Por medio de las presentes ecuaciones es posible el movimiento de la malla deformada del Step Lagrangiano a la malla fija del Step Euleriano. Este fenómeno se caracteriza por el recalcu tanto del volumen de material “transportado entre mallas” como las variables Lagrangianas (masa, esfuerzo y energía). La siguiente figura ejemplifica lo ejemplifica.



**Figura 1.50** Flujo de la operación de división en CEL [120].

Al alimentar el cálculo Euleriano con el material Lagrangiano en cada Time Step, se puede saber que fracción ocupa una malla en otra. Este modo de cálculo CEL, es conocido como método Zapotec, donde el enfoque es el calcular el volumen de superposición de cada elemento entre ambos dominios (Lagrange-Euler).



**Figura 1.51** Superposición de mallas (Euler-Lagrange) en CEL [121].

Es preciso recalcar que CEL no incorpora los efectos turbulentos, debido a que su “Core” es la FSI, donde se prioriza el impacto. Siendo este fenómeno altamente transitorio.

Por ello, los efectos de turbulencia no son tan relevantes para la carga estructural [125]. En tal sentido, debido a que el método FDM sufre ante extremas distorsiones de malla [126], no es recomendable para fenómenos altamente no lineales como el chapoteo.

#### 1.3.2.2.2 Ecuación de Estado de Mie-Grüneisen

Complementariamente, la ecuación de estado (EOS<sup>49</sup>) de Mie-Grüneisen en la forma lineal de  $U_s-U_p$  Hugoniot, es aplicada para modelar el flujo laminar viscoso compresible gobernado por las ecuaciones de conservación (descritas previamente) [125]–[127]. El enfoque de esta EOS es caracterizar la presión en función de la densidad y la energía interna por unidad de masa; lo cual se modela por la ecuación de Mie-Grüneisen de la siguiente forma:

$$P - P_H = \Gamma \rho (E_m - E_H) \quad (1.41)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad

$\Gamma$  = Relación de Grüneisen

$E_m$  = Energía interna por unidad de masa

$E_H$  = Energía de Hugoniot

$P_H$  = Presión de Hugoniot

Hugoniot relaciona directamente la presión con el volumen, para el cual sus términos presentados en la ecuación anterior son:

$$E_H = \frac{P_H \cdot \eta}{2\rho_0} \quad (1.42)$$

$$P_H = \frac{\rho_0 \cdot c_0^2 \cdot \eta}{(1 - s \cdot \eta)^2} \quad (1.43)$$

Donde:

$\rho_0$  = Densidad de referencia

---

<sup>49</sup> EOS= Equation of State

$\eta$  = Deformación compresiva volumétrica nominal

$c_o$  = Velocidad del sonido en el medio

$s$  = Viscosidad dinámica

Donde  $c_o$  relaciona las velocidades de choque y de particular, por medio de:

$$U_s = c_o + s \cdot U_p \quad (1.44)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad

Por lo tanto, la EOS de Mie-Grüneisen en la forma lineal de  $U_s$ - $U_p$  Hugoniot, se expresa como:

$$P = \left( \frac{\rho_o \cdot c_o^2 \cdot \eta}{(1 - s \cdot \eta)^2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\Gamma_o \cdot \eta}{2} \right) + \Gamma_o \rho E_m \quad (1.45)$$

Donde:

$\Gamma_o$  = Constante material

Si bien esta la EOS presentada, modela la presión de un fluido compresible al experimentar el choque, esta también es aplicable para fluidos incompresibles; puesto que  $\rho_o \cdot c_o^2$  es equivalente a el módulo de volumen elástico, el cual ante fluidos líquidos actúa como un parámetro de penalización [127].

### 1.3.2.2.3 Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH)

En 1977 J. Monaghan, *et al* [128] propuso el método numérico SPH, cuya perspectiva es Lagrangiana. A diferencia de CEL, este realiza el cálculo por medio de partículas (ver tabla 1.2). SPH puede abordar la física de los fluidos como la estructural; sin embargo, en este documento se ha optado por aplicarlo netamente al campo de fluidos como se detallará más adelante. Este método se caracteriza por los siguientes 6 conceptos [105]:

1. Sin Malla:

- a. Dominio global representado por un conjunto de partículas distribuidas arbitrariamente.
- 2. Representación de la Función Integral:
  - a. El método de representación integral (aproximación Kernel) se usa para la aproximación de funciones de campo.
- 3. Soporte Compacto:
  - a. Dominio local de partículas vecinas (aproximación de partículas) donde trabaja el Kernel.
- 4. Adaptativo:
  - a. La aproximación de partículas varía en función al Time Step.
- 5. Lagrangiano:
  - a. Al discretizar el dominio global, se generan los campos de funciones de PDE<sup>50</sup>; las cuales generan el conjunto de ODE<sup>51</sup> mediante la aproximación de partículas.
- 6. Compacto:
  - a. Las ODE se calculan mediante el algoritmo de integración explícita, ello para obtener la historia de los campos en las partículas.

Siendo así que por medio de la ecuación de Euler-Lagrange, se cuantifican la posición, velocidad y tiempo [129]:

$$\frac{D}{Dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \quad (1.46)$$

Donde:

$L$ = Lagrangiano

$\dot{q}$ = Velocidad

$q$ = Posición

$t$  = Tiempo

---

<sup>50</sup> PDE= Partial Differential Equation

<sup>51</sup> ODE= Ordinary Differential Equation

Se debe considerar que el Lagrangiano relaciona las energías cinética y potencial de la partícula. Al cumplir con el principio de la mínima acción, se busca el menor trabajo, por ello se iguala a cero; siendo así una ecuación de optimización. Esta relación se encuentra expresada en coordenadas generalizadas, por ello es sencillo de adaptar la relación a otro tipo (esféricas, cartesianas, etc.). De esta manera el cálculo se agiliza (frente a un enfoque newtoniano).

SPH trabaja por interpolación de partículas, las cuales se encuentran dispersas en el dominio del fluido. La interpolación está basada en el concepto de la función Delta de Dirac (función impulso) [130]:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x')\delta(x - x')dx' \quad (1.47)$$

Donde:

$x$  = Posición de punto fija

$x'$  = Posición de punto variable

$\delta$  = Delta de Dirac, evaluada en la posición  $(x - x')$

$\Omega$  = Dominio de calculo

$f(x)$  = Valor de la función en el punto fijo

$f(x')$  = Valor de la función en el punto variable

$dx'$  = Volumen infinitesimal

Sin embargo, debido a que la Delta de Dirac no satisface por completo las propiedades matemáticas requeridas, tales como la continuidad. Con la finalidad de ejecutar un cálculo eficiente, es remplazada por el Kernel [130], [131].

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x')W(x - x', h)dx' \quad (1.48)$$

Donde:

$W(x - x', h)$  = Kernel, evaluado en la posición  $(x - x')$

$h$  = Longitud de suavizado<sup>52</sup>

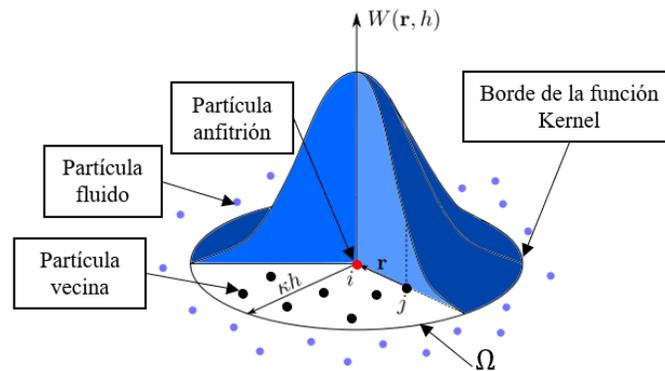
---

<sup>52</sup> Smoothing Length

$\langle f(x) \rangle =$  Valor aproximado de una función  $f$

$\Omega =$  Soporte compacto (Dominio de cálculo)

Por medio de la técnica estadística del Kernel, se estima el valor real de la función  $f(x)$  en base al promedio de información obtenida de las partículas existentes en el dominio. La siguiente imagen representa la distribución de partículas dentro (negro) y fuera (azul) del dominio. Donde  $h$  define el tamaño del dominio de cálculo.



**Figura 1.52** Tipos de partícula en el Dominio de soporte de la partícula “ $i$ ” [20], [131].

En la figura, se muestra la longitud de suavizado ( $h$ ) acompañada del factor  $k$ . Debido a que  $h$  varía temporal y espacialmente el tamaño del Dominio de Soporte también cambia. Este se encarga de agrupar la información (perspectiva global) de las partículas vecinas, para compartirla con la partícula anfitriona. Por otro lado, el enfoque del Dominio de Influencia (perspectiva local) se puede describir como la interacción entre cada partícula. Si la partícula  $j$  pertenece al Dominio de Soporte de la partícula  $i$ ,  $j$  influye en la información recibida por  $i$ , de esta manera  $i$  pertenece al Dominio de Influencia de  $j$  [105].

Dichos dominios intervienen en el proceso de: Búsqueda de las Partículas más Cercanas (NNPS<sup>53</sup>), a la partícula anfitriona  $i$ . El enfoque relevante para ejecutar el proceso NNPS es el Algoritmo de Búsqueda de Árbol<sup>54</sup>; puesto que es compatible con la longitud suavizada ( $h$ ) variable (temporal y espacial), para más detalles acerca de este proceso se

<sup>53</sup> NNPS= Near Nearest Particle Searching

<sup>54</sup> Tree Search Algorithm

recomienda revisar a Liu, et al [105]. Gracias al proceso NNPS se puede un incremento considerable en la precisión del modelo SPH; debido que, al no contemplar un método para regularizar la distribución de partículas, desafortunadamente el cálculo debería ser abortado [132].

En cuanto a la ecuación 1.48, la función  $f(x)$  representa las variables físicas de la partícula  $i$  como: masa, densidad y presión. No obstante, esa representación pertenece a un campo continuo; al tratarse de un método de interpolación por partículas, el volumen infinitesimal se iguala a la al volumen por partícula:  $dx' = V_j = \frac{m_j}{\rho_j}$ . Así la representación discreta de la función es:

$$f_i = \sum_{j=1}^n f_j \frac{m_j}{\rho_j} W(x_i - x_j, h) \quad (1.49)$$

Donde:

$f_i$ = Valor aproximado de la función en la posición de la partícula fija (anfitriona).

$f_j$  = Valor aproximado de la función en la posición de la partícula vecina.

$m_j$ = Masa de la partícula vecina

$\rho_j$ = Densidad de la partícula vecina.

$x_i$ = Posición de la partícula fija.

$x_j$ = Posición de la partícula vecina.

$n$ = Numero de las partículas vecinas.

La forma discretizada del proceso (sumatoria de las partículas en el dominio de soporte) define el concepto de interpolación. De esta manera se agiliza el cálculo en SPH convirtiéndolo en un método numérico sencillo, dado que no es necesario el concepto de mallado para la integración numérica. Cabe recalcar que las ecuaciones presentes en el documento son para CFD, por ende, varían en caso se aplique en CSD [130], [131], [133].

Respecto a las ecuaciones de conservación, la representación de estas en la forma SPH es la siguiente [105], [130], [131]:

1. Conservación de la Masa

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_j m_j v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (1.50)$$

2. Conservación del Momento

$$\frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_j m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + F_e \quad (1.51)$$

3. Conservación de la energía

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_j m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) v_{ij} \nabla_i W_{ij} + H_i \quad (1.52)$$

Donde:

$\rho_i$ = Densidad de la partícula

$m_j$ = Masa de la partícula

$v_{ij}$ = Diferencia de velocidades:  $(v_i - v_j)$

$\nabla_i W_{ij}$ = Gradiente de la función Kernel

$P_i$ = Presión de la partícula

$F_e$  = Fuerzas externas (gravedad, etc.)

$\Pi_{ij}$ =Viscosidad artificial

$H_i$ = Calor artificial de la partícula

$e_i$ = Energía interna de la partícula

La ecuación 1.50 se cuantifica adecuadamente el comportamiento de superficie libre, puesto mantiene constante la densidad cerca de los límites (contacto con estructura) y en la superficie libre [113]. En cuanto a la ecuación 1.51, se le adiciona la viscosidad artificial ( $\Pi_{ij}$ ) para disminuir las oscilaciones o variaciones bruscas (presentes en el material comprimido) en el flujo, así la energía (correspondiente en el proceso de convertir cinética en calor, en el choque de olas) es disipada. Similarmente la ecuación 1.52 contiene a su vez el calor artificial ( $H_i$ ), cuya finalidad es evitar el exceso de calor. Al adicionar dichos

conceptos, se mantienen al margen las divergencias numéricas y la interpenetración en la interacción de partículas[105].

La superficie libre es un concepto que aplica a aquellos fluidos cuyo movimiento no se encuentra restringido en alguna de sus fronteras. Con un enfoque en SPH, a causa de la inercia se origina la fuerza correspondiente, que actúa sobre las partículas; este concepto se incorpora a la variable  $F$  en la ecuación de conservación del momento. La siguiente ecuación describe la fuerza de tensión superficial en la partícula anfitriona [130], [134]:

$$FS_i = -\sigma \nabla^2 Cs_i \frac{n_i}{|n_i|} \quad (1.53)$$

Donde:

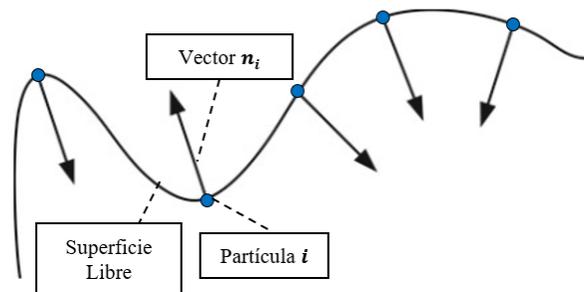
$Cs_i$ = Campo de color de la partícula anfitriona

$\sigma$  = Coeficiente de tensión superficial del fluido.

$n_i$ = Vector normal a la superficie, ubicado en la de la partícula anfitriona.

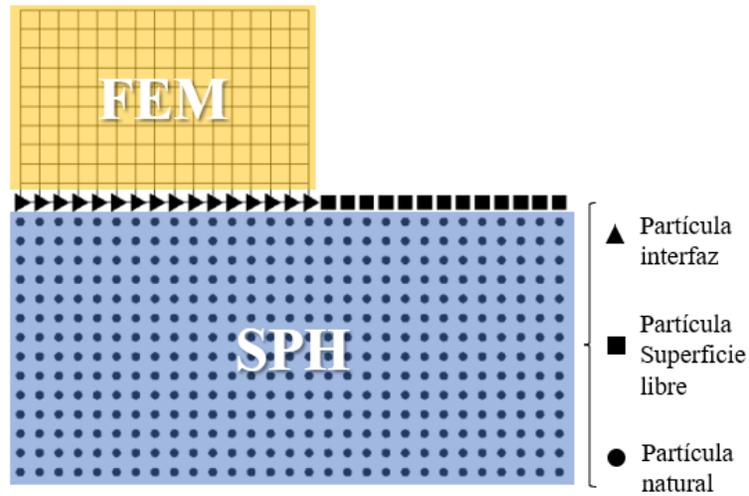
$\nabla$  = Gradiente de superficie

El campo de color y su gradiente detectan la partícula de superficie; así es posible calcular la normal  $n_i$ .



**Figura 1.53** Esquema SPH en superficie libre [130].

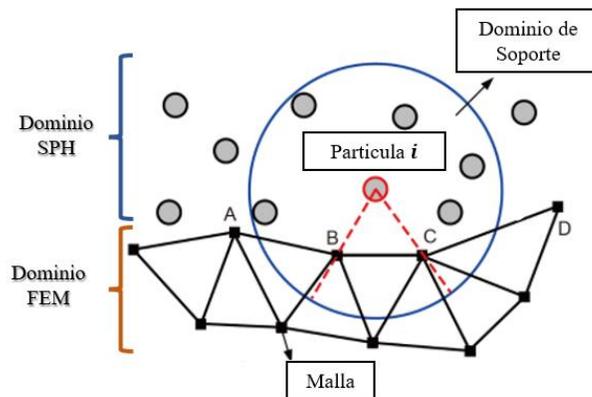
Como se mencionó previamente, los algoritmos en FSI serán abordados con enfoques particionados; es decir, para los fluidos CFD y la estructura con CSD. No obstante, es preciso detallar el acople entre estos conceptos, dado que el tipo de acople evita la superposición entre ambos dominios de cálculo. Se requiere una relación diferente a la presentada en FEM dado que es malla-malla, en contraste, este caso (SPH-FEM): partícula-malla [135], [136]. En tal sentido, la siguiente figura representa los tipos de partícula SPH presentes en FSI con FEM:



**Figura 1.54** Tipos de partículas SPH en FSI con FEM [21].

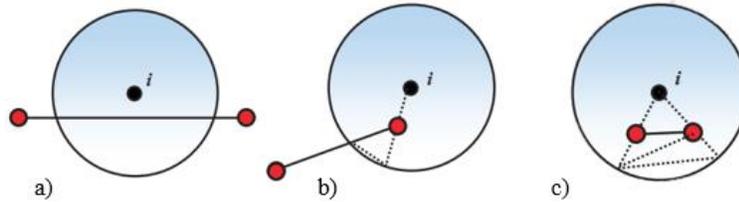
La comunicación entre partículas de superficie libre es similar a la de partículas naturales (ver figura 1.55). La técnica de acople: partícula-malla, fue propuesta por S. Attaway, et al [137], originada únicamente en las partículas interfaz. Posteriormente se perfecciono el enfoque originando métodos como: Paredes repulsivas, Corrección del Kernel y Partículas Fantasma (Ghost particles). No obstante, este último predomina dado que no solo es capaz de modelar geometrías complejas [105], también alberga sistemas bajo tensión, captura los esfuerzos cortantes (a diferencia del método: Paredes repulsivas) y satisface el criterio de conservación de la energía (a diferencia del método: Corrección del Kernel) [132].

Las partículas fantasmas nacen en la intersección entre el Dominio de soporte y la malla. Siempre que existan nodos dentro de esta área, como se muestra en la a continuación.



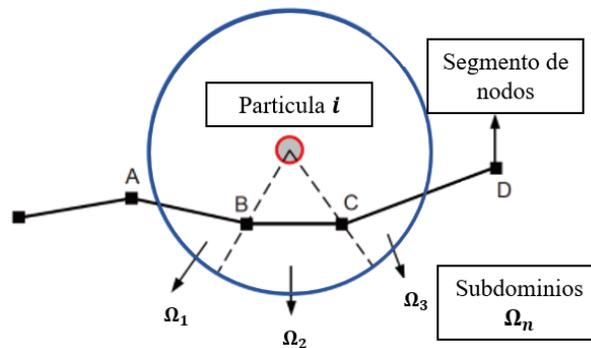
**Figura 1.55** Intersección partícula-malla en FSI [100].

Donde el área en común se divide en función al número de nodos que se encuentren bajo el dominio de soporte de la partícula anfitriona. Esta relación se esquematiza a continuación:



**Figura 1.56** Casos de intersección partícula-malla: a) Cero nodos en el Dominio de soporte, b) Un nodo en el Dominio de soporte, c) Dos nodos en el Dominio de soporte [132].

Como se muestra en los casos b) y c) de la figura 1.57 se originan los subdominios al en la interacción nodo-partícula, detallados en la siguiente figura.



**Figura 1.57** Origen de subdominios en la intersección Partícula-Malla [100].

El área originada (correspondiente al subdominio  $\Omega_n$ ) debe ser igual al 10% del área total del Dominio de soporte de la partícula  $i$ , caso contrario se realiza otra partición para satisfacer la condición [132] como se muestra en la siguiente figura. Las partículas fantasmas se originan en el centro de coordenadas de cada subdominio.



fuerza que actúa en el nodo B y en el nodo C es:  $F_{S_{BC}|F_i}/2$ ). Siendo así la sumatoria de fuerzas de las partículas fantasma:

$$\sum_{j \in \Omega_{BCMN}} F_{G_j|F_i} = m_i \left[ - \sum_{j \in \Omega_{BCMN}} m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_{j \in \Omega_{BCMN}} \frac{m_j (v_{oi} + v_{oj}) x_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{\rho_j (x_{ij}^2 + \eta^2)} + v_{ij} \right] \quad (1.55)$$

Donde:

$\sum_{j \in \Omega_{BCMN}} F_{G_j|F_i}$  = Sumatoria de fuerzas de la partícula fantasma  $j$  (bajo el dominio  $BCMN$ ) en la partícula natural  $i$ .

La fuerza de contacto interviene en las ecuaciones gobernantes de cada dominio. En tal sentido en la ecuación de conservación del momento, presentada previamente, la variable  $F_e$  (fuerzas externas) alberga los siguientes conceptos:

$$F_e = g + F_{S_i} - F_{S_{BC}|F_i} \quad (1.56)$$

Donde:

$g$  = Gravedad.

$F_{S_i}$  = Fuerza de tensión superficial en la partícula  $i$ .

$F_{S_{BC}|F_i}$  = Fuerza de la estructura hacia el fluido.

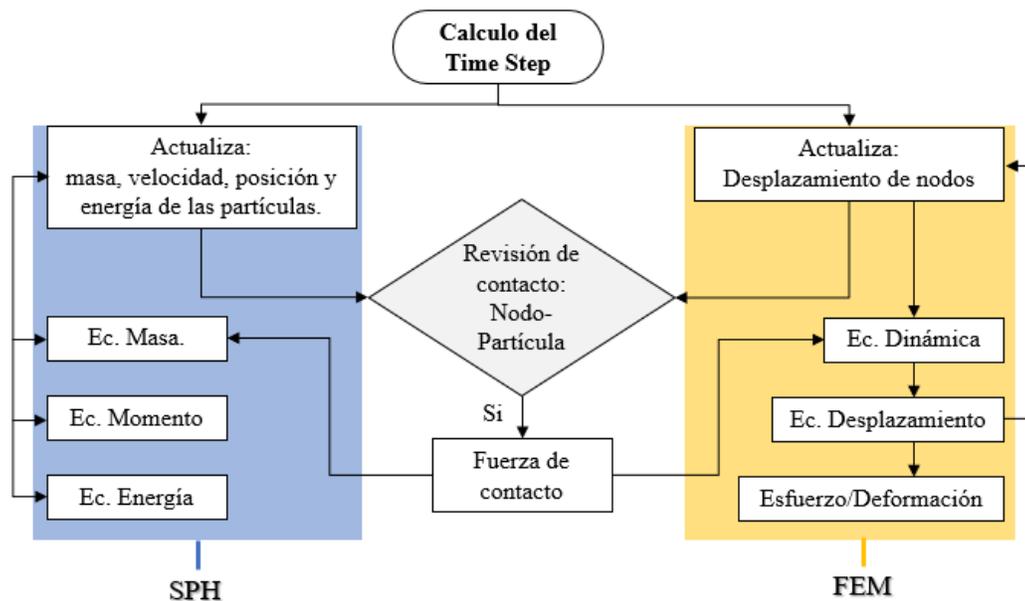
Similarmente, la fuerza externa en la ecuación gobernante de FEM (descrita previamente):

$$F_e = g + F_{F_i|S_{BC}} \quad (1.57)$$

Donde:

$F_{F_i|S_{BC}}$  = Fuerza del fluido hacia la estructura

En adición, en cada cálculo de Time Step la interacción FSI realiza el proceso mostrado en la siguiente figura. Donde el enlace es la revisión del contacto (Nodo-Partícula) y la retroalimentación: la fuerza de contacto.



**Figura 1.60** Diagrama flujo del cálculo SPH-FEM [138].

En base a la revisión bibliográfica [105], [115], [116], [139] se determinó que la opción más adecuada para simular el caso FSI en estudio es el acople SPH-FEM, dado que la particularidad brindada por el método numérico sin mallado puede describir fácilmente el fenómeno físico caracterizado por deformaciones extremadamente altas (comportamiento no lineal [19], [140]) a causa de la superficie libre del fluido. Ello quiere decir que la intervención de técnicas avanzadas para manipulación de malla es evitable; en contraste CEL requiere de estas técnicas (debido a la superposición de mallas) para así prevenir errores numéricos por una malla distorsionada [105].

La flexibilidad algorítmica que proporciona el acople: SPH-FEM, ha permitido su aplicación en diversos casos de estudio. Tal es el caso de [105] y [240] analizan la fractura que ocasiona un cuerpo sólido en el hielo y acero, respectivamente. Estos exámenes de balística facilitan la dinámica en estudio puesto que el cuerpo impactado es de dominio SPH por su minuciosa fragmentación sinérgica. Nuevamente se ve acotada la particularidad para estudiar la “superficie libre” en una amplia gama de casos físicos por medio de la tecnología SPH-FEM, en tal sentido ello también se ve cuantificado por las superficies de grandes deformaciones presentadas por el documento de [239]. Paralelo a ello, el presente documento abordará la problemática presentada con un enfoque físico arraigado al acople numérico en

cuestión. Siendo hasta la fecha, una propuesta de estudio innovadora en su campo, debido a la carencia de bibliografía con dicha similitud.

Respecto al tiempo de cálculo referente a cada método (SPH-FEM o CEL) es relativo para cada caso de estudio según lo visto en diversas fuentes. Se debe señalar que debido a los errores numéricos en CEL es frecuente el problema de terminación inesperada (unexpected termination) en el cálculo [115]. Adicionalmente, SPH también describe apropiadamente el fenómeno de la turbulencia (no obstante, ello escapa del dominio del presente estudio); para más detalles se recomienda revisar la bibliografía de [129], [130].

### 1.3.2.3 Mallado para análisis dinámico

De manera similar al caso previo “Mallado para análisis estatico”, este apartado tiene orientado los conceptos del mallado hacia el programa ABAQUS. Siendo el caso, se consideran caracteres para validar el mallado de los cuerpos, y así obtener resultados con una mejor precisión de cálculo. En el caso de las geometrías triangulares o tetraédricas, se caracterizan por evaluar el “Factor de forma” (Shape factor, SF); este tiene la lógica de relacionar la dimensión utilizada en el cuerpo respecto a la dimensión optima, ya sea de un triángulo o tetraedro equilátero:

- Elementos triangulares

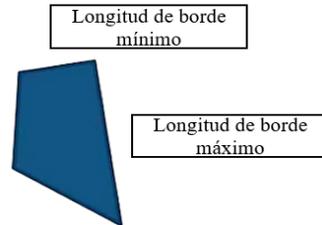
$$SF = \frac{\text{Area del elemento}}{\text{Area del elemento optimo}} \quad (1.58)$$

- Elementos tetraédricos

$$SF = \frac{\text{Volumen del elemento}}{\text{Volumen del elemento optimo}} \quad (1.59)$$

Paralelamente, la variable de “Ángulos de cara” (Face corner angle) representa la unión entre los vértices de cada elemento, ya sea para un caso 2D (triángulo, cuadrilátero) o 3D (Tetraédrico, Hexagonal). Dichas geometrías también son evaluadas por la “relación de aspecto” (Aspect Ratio), la cual tiene como lógica el comparar la longitud de borde máximo respecto al mínimo, en cada elemento [207], [208]:

$$AR = \frac{\text{Longitud de borde máximo}}{\text{Longitud de borde mínimo}} \quad (1.60)$$



**Figura 1.61** Relaciones incluidas en la Relación de aspecto [208].

En esta sección también se implementará un mapeado de caras con la finalidad de “uniformizar” el mallado, y el tamaño de malla será regulado por la herramienta “seeds”. De esta manera se evitará exceder los valores picos admisibles, que por defecto en este programa se encuentran detallados en la siguiente tabla.

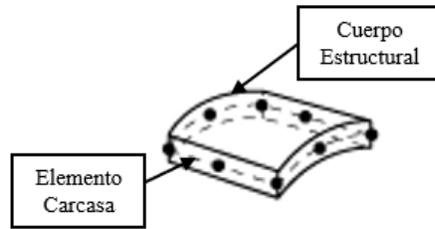
Criterio	2D		3D		Rangos	
	Quad	Tri	Hex	Tet	Óptimo	Pobre
Factor de Forma (mínimo)	-	1e <sup>-2</sup>	-	1e <sup>-4</sup>	1	0
Angulo de esquina de cara mínima	10	5	10	5	-	
Angulo de esquina de cara máxima	160	170	160	170	-	
Relación de aspecto (máxima)	10	10	10	10	1	10

**Tabla 1.7** Límites en los criterios de mallado de ABAQUS [209].

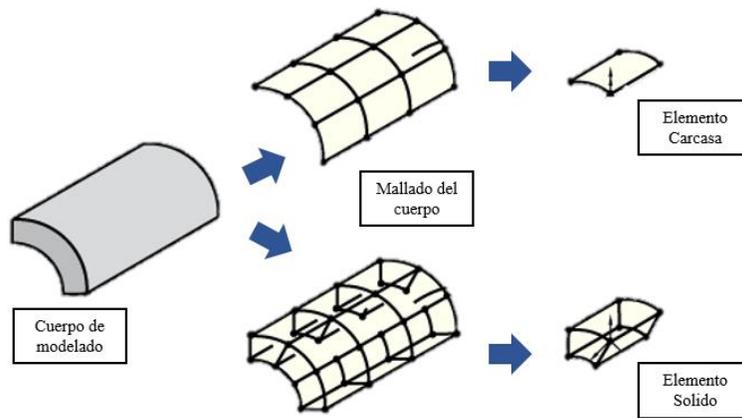
Es importante recordar que cada dominio global de estudio será modelado con dos tipos diferentes elementos de malla. Siendo la estructura modelada con elementos tipo Shell, donde a diferencia de un elemento sólido (ver figura 1.64) el espesor debe ser definido por el usuario, dado que el elemento en sí no genera espesor alguno. La nomenclatura que el programa le atribuye es: S4R [210]. Donde:

1. S= Carcasa convencional
2. 4= Numero de nodos

3. R= Integración reducida (precisión de resultados y menor tiempo de cálculo)



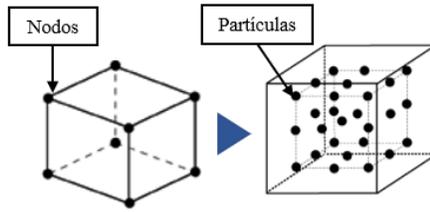
**Figura 1.62** Esquema de un elemento tipo Carcasa en Abaqus [210].



**Figura 1.63** Diferencia entre el mallado por elemento sólido y carcasa [211]

Respecto al modelamiento del fluido, se aplicaron elementos tipo C3D8R (Elemento ladrillo de 8 nodos con integración reducida), puesto que se consideró este cuerpo como sólido. No obstante, por medio de la técnica de Elemento Principal<sup>55</sup>, el elemento sólido se convierte a partículas tipo PC3D (Elementos de partículas continuas) perteneciente a SPH. En la técnica de elemento principal, cada nodo genera una partícula; sin embargo, se tiene la disponibilidad de programar hasta 7 partículas por nodo [212], lamentablemente en este caso ello elevaría exponencialmente el tiempo de cálculo [213]. Cabe recalcar que las partículas son generadas al inicio del análisis,

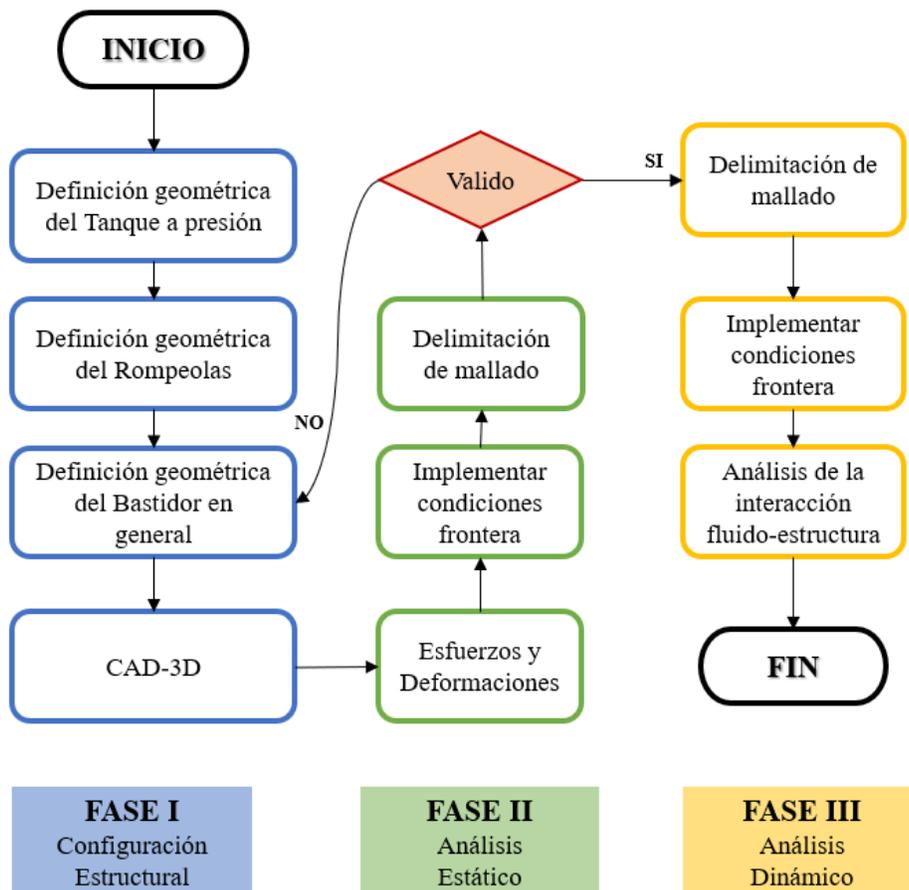
<sup>55</sup> Parent Element



**Figura 1.64** Conversión de Elemento solido (C3D8R) a Partículas (PC3D) en Abaqus [210], [213].

## CAPÍTULO II METODOLOGÍA

El presente capítulo llevará a cabo el procedimiento para la ejecución de los objetivos específicos, dicho conjunto logra el objetivo general de: “Diseñar mediante uso de normas peruanas y americanas la estructura de un Semirremolque Tanque GLP, capaz de brindar seguridad y ahorro de consumo de combustible al usar el tracto para mover el semirremolque”.



**Figura 2.1** Diagrama de flujo de la metodología de investigación [106, 107, 108]

El procedimiento propuesto se encuentra inspirado en metodologías de autores que comparten un diagrama de flujo centrado en la Ingeniería Mecánica; esta lógica según Benjamín Barriga [143]: “Tiene como finalidad ordenar la actividad creadora del diseñador y procurar acelerar esta actividad hasta límites deseados”.

Para modelar el proceso de diseño se ha optado por realizar un diagrama de flujo, el cual por medio de los bucles de retroalimentación busca optimizar y proponer una suerte de “validación” para el resultado obtenido por los análisis ejecutados. En tal sentido en la Figura 2.2 se implementan las tres primeras etapas básicas consideradas por Pahl et al. [141], tal estudio tiene como base el criterio propuesto por la “Asociación de Ingenieros Alemanes” (VDI<sup>56</sup>) en VDI-2222 y VDI-2221. Dichas etapas son descritas brevemente a continuación [144], [145]:

- 1- Clarificación de la tarea:
  - . Delimita las variables que interfieren en el estudio.
- 2- Diseño Conceptual:
  - . Origina las alternativas de solución y su posterior evaluación.
- 3- Diseño de Materialización:
  - . Establece la configuración “filtrada” en la etapa posterior, y así sus correspondientes (como planos de ingeniería básica).
- 4- Diseño de Detalle:
  - . Se ejecuta la documentación de mayor precisión, entre estas, los planos de ingeniería a detalle o la estimación económica.

## **2.1 Fase I: Configuración Estructural**

Dado que el peso máximo del semirremolque se encuentra regulado por la disposición legal peruana, es importante gestionar correctamente el peso de los componentes tanto del chasis como del tanque a presión. Al optimizar dicho parámetro (bajo las especificaciones y requerimientos del estudio) se puede incrementar la “Carga útil”. Por tal motivo a

---

<sup>56</sup> VDI: Verein Deutscher Ingenieure

continuación se procede a describir el proceso de diseño guiado en esencia por la RENAV, y DoT MC-331 (el apartado correspondiente al GLP [146, p. 581]). Los programas utilizados en este apartado son: PV Elite, para el espesor de plancha del tanque a presión y SolidWorks, para el CAD-3D a utilizar en las simulaciones CAE.

### 2.1.1 Definición geométrica del Tanque a presión

Debido a que se busca un adecuado comportamiento del fluido en el tanque a presión, (debido movimiento del semirremolque); a continuación, se procede a describir el proceso de diseño guiado en esencia por MINEM y DoT MC-331 (el apartado correspondiente al GLP [146, p. 581]). En tal sentido a continuación se detalla el diagrama de flujo derivado (ver Figura 2.2) correspondiente al apartado; cabe recalcar que el casillero “Retroalimentación” se refiere a la validación correspondiente a los análisis CAE.

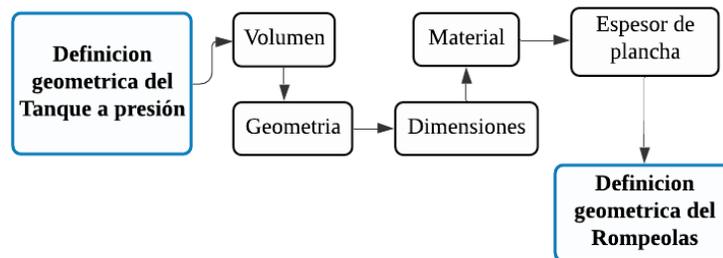


Figura 2.2 Diagrama de flujo del Tanque a presión.

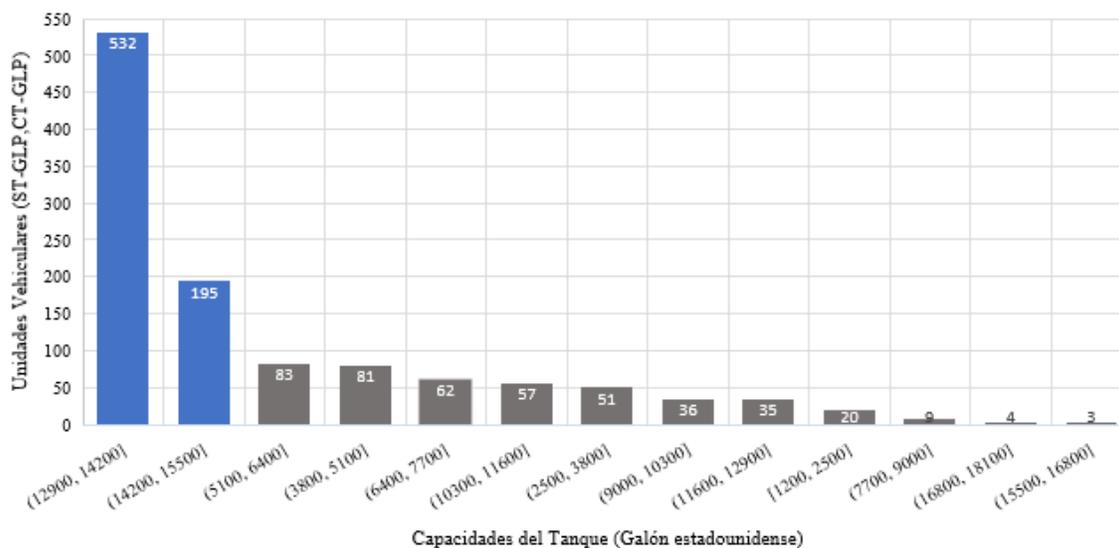
#### 2.1.1.1 Proceso para acotar el volumen del tanque

Osinergmin presenta en su página web una base de datos referente al “Transporte de GLP a Granel” [147]. En esta se incorpora información detallada tanto de los Camiones Tanque (CT-GLP), vehículo rígido, como de Camión Cisterna (según la nomenclatura utilizada en el Excel para hacer referencia a los Semirremolque tipo Tanque GLP) hábiles en Perú.

Debido a que el estudio realizado en este documento se dirige hacia la flota de Semirremolques tipo Tanque GLP (ST-GLP), los valores presentados a continuación

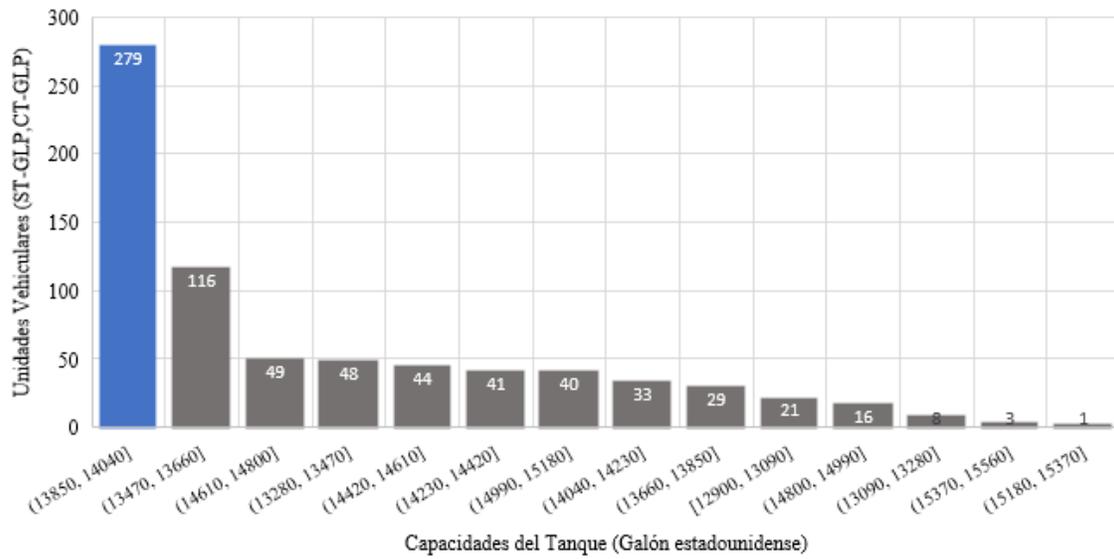
priorizan dicha característica. Dentro del universo<sup>57</sup> de 1168 unidades vehiculares (uv) destinados para ejercer el transporte del hidrocarburo en estado líquido, se divide en 880 ST-GLP y 288 CT-GLP; donde las capacidades (Galón estadounidense) varían desde 1200 a 17000 según el tipo de unidad. Los 3 departamentos que albergan mayor cantidad de uv, son Lima con 42% (sin incluir a la Provincia Constitucional del Callao), Arequipa con 16% y La Libertad con 15%.

En la Figura 1.14 se cuantifican las uv en función a la capacidad que disponen, siendo los rangos con mayor frecuencia de uso, de [12900-14200] con 532 uv y de [14200-15500] con 195 uv; de las cuales el mayor número se concentra entre [13850-14040] (ver Figura 1.15) donde la capacidad promedio es aproximadamente 14000 gal (13945). Analizando a nivel nacional la Figura 1.16 muestra los 5 departamentos con mayor influencia de uv con esta capacidad (14000 gal) de un total de 237 uv (ST-GLP); en base a los datos recopilados se define el volumen del tanque a presión.

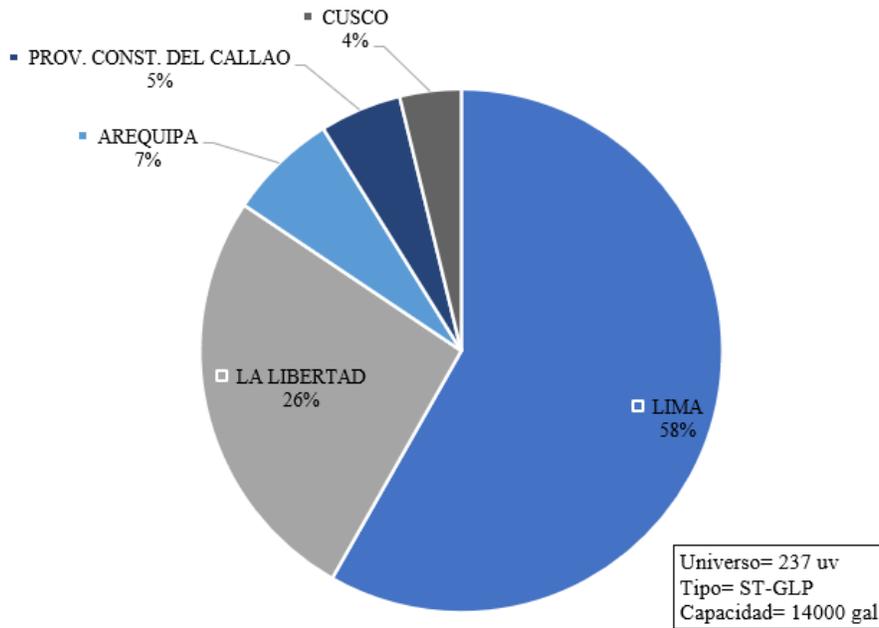


**Figura 2.3** Unidades Vehiculares [1200-17000 USgal] en función de la capacidad del Tanque [147]

<sup>57</sup> Información actualizada al 25.09.2020



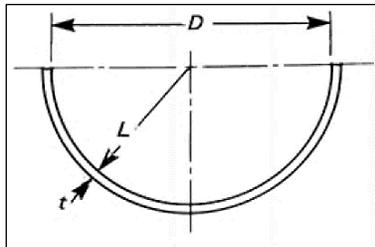
**Figura 2.4** Unidades Vehiculares [12900-15500 USgal] en función de la capacidad del Tanque [147]



**Figura 2.5** Top 5 Departamentos con presencia de Semirremolque tipo tanque GLP de 14000 USgal de capacidad [147]

### 2.1.1.2 Proceso de selección geométrica

Como se nombró previamente la geometría del tanque a presión será de “Cigarro” y de “Recipiente Autoportante”. En tal sentido, con respecto a la geometría del casco, es preferible llevar a cabo una Semiesférica (Hemisférica) no solo por su buen desempeño ante altas presiones (mayores a 15 psi), como lo corrobora C. Moore quien identifica que los mayores esfuerzos se ubican en el cambio de sección: Casco-Cuerpo [148]; sino también por otorgar un diseño más económico, ello quiere decir que el grosor de lámina a utilizar será un 46.8% y 51.5% más delgada que Elipsoidal y Toriesferica, respectivamente [149].



**Figura 2.6** Perfil de casco Semiesférico [150]

Adyacentemente, no se considerará la influencia de las boquillas (Manhole, válvulas, entre otros) en el tanque, debido a que el enfoque del estudio radica en su mayoría en la optimización del peso del chasis y su respuesta (estructural) al comportamiento del líquido en movimiento. Asimismo, el aislamiento térmico del tanque tampoco se incluirá en este estudio (debido únicamente se considera la estructura metálica del sistema sin influencia de transferencia de calor).

MC-331 especifica que el tanque a presión se encontrara aislado. Este material de aislamiento deberá tener un espesor limitado a la conductancia térmica, pues esta no debe ser mayor a  $0.454 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ; en tal sentido la temperatura para hallar el coeficiente térmico es de  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ . Respecto a la temperatura de servicio de diseño establece que debe de ser de  $-73 \text{ }^\circ\text{C}$  o menor al punto de ebullición del GLP de  $-42.2 \text{ }^\circ\text{C}$  [151] y en paralelo estará ligada a lo establecido por el Código ASME<sup>58</sup> (Secc VIII. Div 1) [152].

<sup>58</sup> En adelante para referirse a ASME Sección VII-División I.

### 2.1.1.3 Proceso de dimensionamiento del tanque

En base a las características descritas en los apartados “Volumen”, “Geometría” y respetando los límites establecidos por el MTC (ver Tabla A.4 en Anexo 3), se proponen las siguientes opciones en busca de la relación: Diámetro-Longitud, más adecuada. Para ello, se tuvo en cuenta los siguientes criterios:

- Diámetro “mínimo”, ocasiona un centro de gravedad bajo proporciona un mejor control ante el umbral de volcadura.
- Longitud total “mínima”, por la practicidad al ejecutar un “giro” como maniobra de conducción y reduce la probabilidad de pandeo del recipiente a presión.
- Relación L/D (relaciona la longitud *seam to seam*<sup>59</sup> con el diámetro) igual 4, según lo recomendado por D. Moss [76] para recipientes cuya presión oscila entre 250-500 psi.

Opc.	Diámetro (m)	Seam to Seam (m)	Long. Total (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Relación L/D
1	2.1	13.9	16.002	52.993	6.619
2	2.15	13.1	15.315	52.763	6.093
3	2.2	12.4	14.676	52.712	5.636
4	2.25	11.8	14.080	52.882	5.244
5	2.3	11.2	13.523	52.904	4.870
6	2.35	10.6	13.003	52.771	4.511
7	2.4	10.1	12.516	52.930	4.208
8	2.45	9.6	12.059	52.958	3.918
9	2.5	9.1	11.630	52.851	3.640

**Tabla 2.1** Opciones de medidas para el tanque a presión.<sup>60</sup> [2]

La tabla anterior resalta los 3 valores más cercanos a la lógica propuesta; no obstante, dado que el volumen de las dimensiones propuestas se encuentra cercano a lo ideal de 53m<sup>3</sup> no se considera como un criterio de evaluación. Se elige la Opción 7, si bien es cierto el

<sup>59</sup> Seam to Seam: Longitud de costura a costura.

<sup>60</sup> La longitud se encuentra en función al diámetro. Ante ello, el “paso” métrico considerado en el diámetro fueron de 5cm por facilidad en manufactura metalmecánica.

diámetro se encuentra entre los 3 más elevados, pero esto se compensa con una longitud total reducida y la Relación L/D.

#### 2.1.1.4 Técnica para definir el material del tanque

En cuanto al material a utilizar la DoT MC 331 estipula que se debe de cumplir con los requisitos del Código ASME. Estos serán asumidos como isotrópicos y homogéneos al momento de ejecutar el análisis [153]. Es por ello por lo que en base al análisis de propiedades mecánicas y su disponibilidad en el comercio peruano se procederá a elegir los materiales a utilizar en el diseño del tanque a presión y del chasis. Un detalle para considerar debe ser la escala de producción del vehículo puesto que en caso se realice una fabricación numerosa, será conveniente importar el material en caso no se encuentre disponible en Perú; por el contrario, será preferible adaptar las propiedades mecánicas requeridas en el diseño a la disponibilidad nacional con la finalidad de abaratar costos de producción.

En tal sentido ASME recomienda el uso de aceros de bajo carbono (menores a 0.35%) los cuales reúne en la tabla “UCS-23 Carbon and Low Alloy Steel”, de estos Osinergmin indica que los de uso común a nivel nacional son los de la siguiente tabla.

Opc.	No.	Tipo/Grado	Restricción
1	SA-36	-	-
2	SA-283	C	-
3	SA-285	C	-
4	SA-299	B	-
5	SA-515	70	-
6	SA-516	70	-
7	SA-455	-	$t \leq 3/8''$
8	SA-455	-	$3/8'' < t \leq 0.58''$
9	SA-455	-	$0.58'' < t \leq 3/4''$
10	SA-612	-	$1/2'' < t \leq 1''$
11	SA-612	-	$t \leq 1/2''$
12	SA-414	G	-

**Tabla 2.2** Medidas del tanque a presión [154].

### 2.1.1.5 Pasos para delimitar el espesor mínimo de plancha para el Tanque a presión

En cuanto a la presión de diseño para el recipiente a presión (conocida como MAWP<sup>61</sup>) MC-331 indica que el rango en el cual se debe encontrar es de 100 psi a 500 psi [155]. El valor comúnmente utilizado en la presión de operación para un tanque GLP es de 100 psi [156], [157], ante ello ASME indica que se debe de cumplir la siguiente relación ( $P_o$  = Presión de operación):

$$- P_o < 300 \text{ psi, } P_d = P_o + 300$$

$$- P_o > 300 \text{ psi, } P_d = 1.1 \cdot P_o$$

Donde:

$P_o$  = Presión de operación

$P_d$  = Presión de diseño

Sin embargo, se considerará lo indicado por MINEM (y regulado por Osinergmin), que el valor mínimo atribuido a la presión de diseño debe ser de 250 psi [158], este valor es un 92% mayor a lo recomendado por ASME (130 psi) y se encuentra en el rango establecido por MC-331.

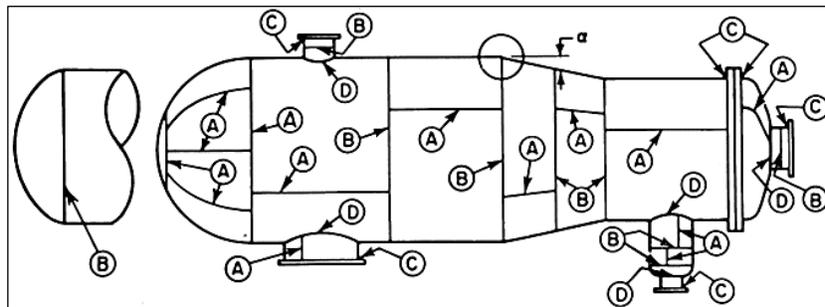
Por otro lado, en cuanto a las cargas que presenta el tanque a presión se excluyen las cargas por viento y sismo (por ende, también las vibraciones) debido a que son características principales por considerar en un tanque vertical (o torre alta) [66], [75]. Respecto a la eficiencia en la soldadura (circunferencia y longitudinal), se torna influenciada tanto por la “Categoría de junta” (ver Tabla 2.3) como el “Tipo de junta” ver (Tabla 2.4), apartados cubiertos por ASME en las secciones “UW-3” y “UW-12” respectivamente.

---

<sup>61</sup> Maximum Allowable Working Pressure

Categoría	Descripción
A	Longitudinales Espirales Conexiones: casco semiesférico-coraza Conformados de cabezal.
B	Circunferenciales Conexiones: casco no semiesférico-coraza Angulo <sup>62</sup>
C	Bridas
D	Cámaras comunicantes

**Tabla 2.3** Categoría en la soldadura de Junta [150].



**Figura 2.7** Categorías de Juntas [150]

Tipo de Junta	Descripción	Eficiencia en función al Tipo de Radiografía		
		Total	Por puntos	Ninguna
	Simple y doble tope	1	0.85	0.7

**Tabla 2.4** Tipo de junta para tanques a presión y eficiencias [76]

Sin embargo, en el diseño propuesto únicamente se presenta el tipo A debido a que asume la única unión presente es la del Casco semiesférico con la Coraza, asimismo se asume

<sup>62</sup> Es junta a tope si la bisectriz de  $\alpha$  es menor o igual a  $30^\circ$ , en contraste es una junta a ángulo.

un tipo de unión de doble tope totalmente radiografiado. Estas dos consideraciones (categoría-tipo) se conocen como RT-1 [159], y otorgan una eficiencia del 100% ( $E=1$ ).

En adición, resulta crucial tener en cuenta un espesor de material añadido al calculado, este se debe al efecto de corrosión<sup>63</sup> interna por el contacto: fluido-estructura. Lamentablemente ASME no especifica ningún valor ni cuantitativo ni cualitativo para este fenómeno [160], [161] debido a que en su mayoría se considera por criterio del diseñador, no obstante, en base a otros documentos con similar dirección de estudio se puede cubrir este “vacío”. En tal sentido, en [162] se especifica que los únicos factores que evitan el considerar margen de corrosión ( $mc$ ) son: Material del recipiente sea de Acero inoxidable o Titanio y/o que el espesor de pared mayor a 30 mm. Respecto a los aceros al carbono el mínimo  $mc$  a considerar es de 1mm.

Paralelamente a ello se encuentra el “Factor de desgaste”, este relaciona directamente proporcional:  $mc$ -rango de vida estimado para el recipiente (años); suele utilizarse para el caso un factor de desgaste de 0.127mm/año (0.005in/año) [160]. Se detalla que la vida de un recipiente a presión se encuentra entre 20-30 años, y específicamente el promedio de vida estimado de un recipiente a presión de GLP se encuentra en ese rango [163], [164]. Estas características son relacionadas mediante la siguiente ecuación [165]:

$$mc = F_d \cdot vu \quad (2.1)$$

Donde:

$mc$  = Margen de corrosión

$F_d$  = Factor de desgaste

$vu$  = Vida útil del tanque a presión.

En base a lo anterior se asume un  $mc$  de 3mm, lo cual otorga aproximadamente un poco más de 23 años de vida. Por lo tanto, el espesor total de la plancha será:

$$e = t + mc \quad (2.2)$$

---

<sup>63</sup> Respecto a la corrosión externa, se considera que es nula puesto que se lleva una capa de pintura [135].

Donde:

$e$  = espesor total de plancha

$t$  = espesor requerido (ver formula 1.5 o 1.6, según sea el caso)

$mc$  = Margen de corrosión

Finalmente, dichos valores (presión de diseño, eficiencia, mc material y geometría) serán ingresados al programa PV Elite (2018), en el cual por medio de la base de datos se estima el espesor de plancha requerido, y posteriormente se utilizará el espesor comercial en Perú. Cabe considerar que se utilizara este programa puesto que se considera de gran ayuda en la industria [149] dado que facilita la iteración de resultados, una muestra de ello es que la empresa “PETROPERU” también ejecuta sus cálculos por este medio [166]. La siguiente tabla presenta las 6 opciones (referente al apartado anterior) con menor dimensión del espesor mínimo admisible, calculado por el software.

Opc.	Calculado (mm)	
	Casco	Cuerpo
4	9.57	16.22
5	10.53	18.15
6	10.53	18.15
7	10.04	17.16
11	9.35	15.77
12	10.04	17.16

**Tabla 2.5** Medidas del tanque a presión

Sin embargo, la opción con el más relevante es la 11, por ello a continuación se presentan sus valores comerciales para el espesor mínimo de placa, estos serán base para el desarrollo estructural posterior. Cabe recalcar que el esfuerzo admisible utilizado en este caso fue de 159MPa (23.1ksi) aproximadamente.

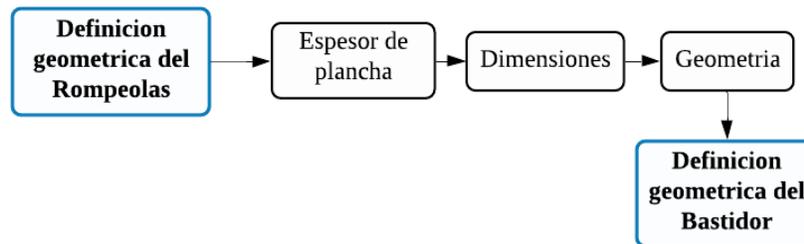
Opc.	Calculado (mm)		Comercial (in)	
	Casco	Cuerpo	Casco	Cuerpo
11	9.35	15.77	3/8	5/8

**Tabla 2.6** Medidas del tanque a presión

Según la investigación realizada a diversos documentos (a nivel nacional e internacional) orientados hacia el diseño de un tanque GLP [43], [160], [167]–[169], muestran que la popularidad radica en esta opción, asimismo recalcar que el espesor comercial se obtuvo en base a catálogos de empresas como: Minaceros, Miromina y PeruMetales.

### 2.1.2 Definición geométrica del Rompeolas

El diseño de este componente no se encuentra regulado por ASME [170], sin embargo, por medio de documentos que presentan una orientación de estudio similar se puede realizar una adecuada propuesta de diseño. Por ello a continuación se muestra el diagrama de flujo derivado (ver Figura 2.8) correspondiente al apartado.



**Figura 2.8** Diagrama de flujo del Rompeolas.

#### 2.1.3.1 Delimitación el espesor de plancha del Rompeolas

Contradictoriamente, ASME no brinda detalles de diseño respecto al rompeola para semirremolques de esta categoría; sin embargo, por medio de la bibliografía se puede concretar modelo para el estudio. Respecto al material a utilizar, suele utilizarse la opción 1 y 6 de la Tabla 2.2 [171], en tal sentido se considerará la opción 1. Respecto al grosor de plancha se indica que debe ser el mismo que el del taque a presión [170], específicamente

respecto al Casco [86], [142]. No obstante, en ello también debe intervenir el “Margen de corrosión” [76]; en este caso: espesor del casco y adicionalmente el margen de corrosión, debido a que ambas caras se encuentran en contacto con el fluido. De esta manera se establece el espesor mínimo de plancha requerido en 12.35mm, de igual manera se utilizará el comercial a nivel nacional de ½” (12.7mm), esta medida concuerda con lo estipulado en [172], donde se indica que la medida mínima para rompeolas de acero es de 2.5mm.

### **2.1.3.2 Proceso de dimensionamiento del Rompeolas**

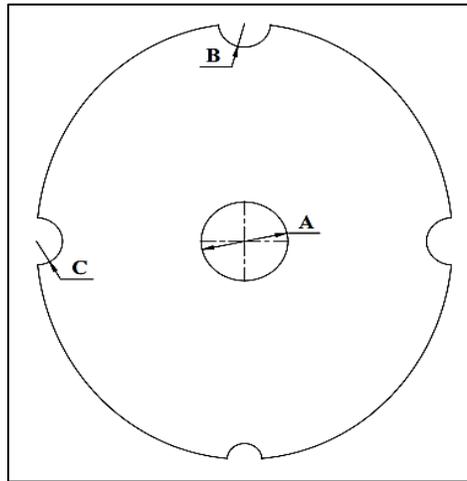
En primera instancia se debe considerar la legislación nacional, esta indica que el espaciamiento longitudinal entre los rompeolas no deberá ser mayor a 1.6 m [173, p. 1], (cabe recalcar que ello se encuentra dentro del rango establecido por la especificación DoT [174]). Adicionalmente la NMP<sup>64</sup> 023 indica que mínimo debe poseer tres aberturas, en la cual una de ellas permite el mantenimiento interno del tanque a realizar por el operario, y las otras dos ubicadas en la parte superior e inferior [175, p. 15].

En cuanto al área máxima de apertura ( $A_{ap}$ ) que presenta el Rompeolas, A. Dasgupta [176] indica que debe ser 20% del área total del deflector (basado en la CFR<sup>65</sup>), también es nombrada área mínima de cobertura de 80%. Considerando el agujero del “centro” se tomó como referencia lo recomendado por [14], [160], en cuanto los agujeros laterales, superior e inferior fueron regulados por lo establecido por [170]. Cabe recalcar que en el diseño propuesto se busca una geometría similar a una “X” dado que J. Bautista et al. [177] sugieren que es una de las más efectivas ante el empuje del líquido, y su desempeño es aproximadamente 2% mejor que una geometría de “cruz”. Cabe aclarar que los agujeros inferiores en la geometría del rompeolas permiten el flujo uniforme, a lo largo del tanque, en el proceso de llenado. La Figura 2.9 presenta las dimensiones límite consideradas para el diseño, las dimensiones se presentan en la siguiente Tabla.

---

<sup>64</sup> NMP: Norma Métrica peruana.

<sup>65</sup> Ello da muestra que es un 10% mayor a lo permitido por la legislación canadiense, la cual indica que debe ser máximo 30% [179].

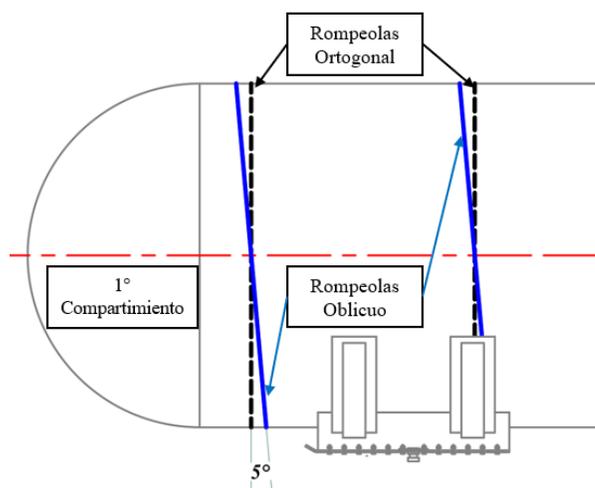


**Figura 2.9** Rompeolas de referencia.

Símbolo	Descripción	Valor	Ref.
A	Agujero “Central”	Mayor a 406 mm	[14], [160]
B	Agujeros superior-inferior	150-250 mm	[170]
C	Agujeros laterales	150-250 mm	[170]
-	Inclinación máxima	5°	[178]
-	Área máxima de apertura	20% del área total	[176]

**Tabla 2.7** Rango de dimensiones consideradas para el Rompeolas.

En la tabla anterior el concepto “Inclinación máxima” hace referencia al rompeolas Oblicuo. Este diseño proporciona alta resistencia al chapoteo en tanques de este tipo, gracias a la acumulación retardada de volumen líquido en el primer compartimiento. Tal efecto disminuye tanto la carga lateral como la longitudinal, por ende, las oscilaciones correspondientes se atenúan. En contraste los modelos tradicionales de rompeolas (sin inclinación) únicamente proporcionan resistencia longitudinal [174], [179]. En tal sentido, el estudio realizado por X. Zheng, *et al.* [178] demostró que el grado de inclinación influye críticamente en el diseño; puesto que, a mayor Angulo de inclinación, el cuerpo abarca más área y con ello requiere más material, lo cual aumenta su peso, afectando directamente a la carga útil del vehículo. Por ello se demuestra que el Angulo optimo es de 5°, teniendo un efecto similar al de 20° al contrarrestar el chapoteo.



**Figura 2.10** Disposición de Rompeolas: Ortogonal y Oblicuo, en el Tanque.

Las configuraciones presentadas previamente, se encuentran bajo las dimensiones establecidas; tanto en la geometría del Rompeolas como el distanciamiento menor a 1.6 m para rompeolas y casco-rompeolas.

### 2.1.3 Definición geométrica del Bastidor

En este apartado se detalla el procedimiento considerado para la optimización del Bastidor, esqueleto donde se reúnen el conjunto de elementos que conforman al Chasis [180]; en este diseño utiliza un bastidor delantero y otro posterior, la nomenclatura utilizada para referirse a ellos se grafica en la figura 2.12.

Como criterio de diseño se establece que la configuración estructural presentada, en los siguientes apartados, también se encuentra influenciada por buenas prácticas de ingeniería aplicadas en diseños previos, tanto en nivel nacional como internacional; en empresas como: Industrial Tubos SA, JR Group Carrocerías, Dragon Products.

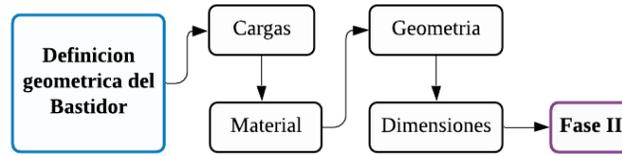


Figura 2.11 Diagrama de flujo del Bastidor.

### 2.1.3.1 Técnica para definir el material del Bastidor

Con el objetivo proporcionar un buen comportamiento físico del vehículo como los esfuerzos y la deflexión que este experimenta, se involucra la variable geométrica; sin embargo, ello se complementa con una adecuada elección de material. Por tal motivo es crucial analizar a detalle las propiedades mecánicas más relevantes en el asunto tales como: Modulo de Elasticidad ( $E$ ), Esfuerzo de ultimo ( $\sigma_u$ ), Esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ), y Peso específico ( $\gamma$ ).

Los materiales comúnmente utilizados en la fabricación del Bastidor suelen rondar entre: Compuestos, Aluminio y Acero. En el caso de un material compuesto como es la fibra de carbono, se caracteriza por su elevada rigidez y bajo peso; similarmente el aluminio o aleaciones (conocidas como HSLA<sup>66</sup>) comparte tanto esta última cualidad, como la característica de su buena resistencia a la corrosión. En el caso del acero usado para bastidores, suele aplicarse tanto los de mediana como los de alta resistencia (caracterizados por las siglas AHSS<sup>67</sup>), su popularidad se debe a la relación entre propiedades mecánicas-precio económico [181], [182].

Con la finalidad de “jerarquizar” la relevancia de los materiales propuestos, se incorpora en la siguiente tabla el criterio propuesto por R. Mott [92]. Al relacionar la resistencia específica ( $R_1$ ) y el módulo específico ( $R_2$ ), mediante:

- $R_1 = E/\gamma$
- $R_2 = \sigma_u/\gamma$

<sup>66</sup> HSLA: High Strength Low Alloy Steel

<sup>67</sup> AHSS: Advanced High Strength Steel

Material	$E$ (GPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$R_1 \cdot 10^6$ (m)	$R_2 \cdot 10^3$ (m)
Al-6061-T6	68.9	310	26.5	2.6	11.7
T300 Fibra de Carbono	240	3400	15.7	15.3	216.6
ASTM-A36	200	400	76.5	2.6	5.2
ASTM-A514.C	200	760	76.5	2.6	9.9
ASTM-A572.50	200	450	76.5	2.6	5.9
ASTM-A500.A	200	310	76.5	2.6	4.1
Strenx 700MC	210	780	76.5	2.7	10.2

**Tabla 2.8** Materiales populares para bastidor [92].

Según lo expuesto, teóricamente el material ideal para la fabricación del bastidor es la fibra de carbono T300, no obstante, en la práctica es diferente. Hasta la fecha, el método de fabricación más popular en la industria peruana es la soldadura; en tal sentido T300 requiere un proceso de manufactura diferente. Caso similar, ocurre con el aluminio dado que presenta un bajo desempeño ante la fatiga [181], a diferencia de los aceros. Adicionalmente, se debe considerar la disponibilidad comercial nacional, teniendo esta un rango más amplio tanto en perfiles estructurales como en tipos de acero.

En adición, suelen ser estas razones las que también intervienen en la fabricación del bastidor por formula SAE [183], en tal sentido queda establecido la predominancia por parte de los aceros al encontrar un “equilibrio” entre variables como: Económica-Manufactura-Propiedades mecánicas, se refiere. Complementariamente, el “Carbono Equivalente (C.E)” cuantifica la facilidad que otorga el material por su grado de soldabilidad; mediante la siguiente ecuación:

$$C.E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (2.3)$$

Donde las abreviaturas representan el porcentaje de:

$C$  = Carbono

$Mn$  = Manganeso

*Cr* = Cromo

*Mo* = Molibdeno

*V* = Vanadio

*Cu* = Cobre

*Ni* = Níquel

ASME recomienda valores óptimos menores o iguales a 0.3 para el CE, de esta manera se puede reducir la probabilidad a la fractura por pandeo o torsión. Sin embargo, ello es una variable guía, puesto que en el caso del material del tanque a presión (SA-612), para el cual [184] estimo un CE de 0.43; lo cual corrobora que en el ámbito de manufactura no es anormal el uso de materiales con CE ligeramente altos. Como es el caso de los materiales propuestos en la siguiente tabla.

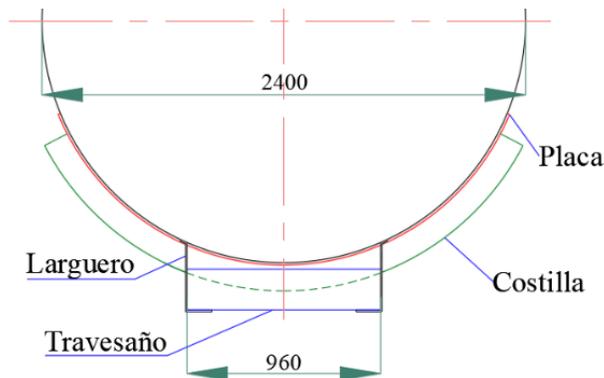
Opc	Material	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	Costo relativo	C.E (calculado)	Total
1	ASTM-A36	3	0	3	2 (0.435)	6
2	ASTM-A514.C	1	2	1	3 (0.313)	7
3	ASTM-A572.50	1	1	2	1 (0.455)	5
4	ASTM-A500.A	1	1	3	1 (0.455)	5
5	Strenx 700MC	1	3	0	0 (0.510)	4

**Tabla 2.9** Opciones de material a nivel nacional para bastidor [185], [186]

Esta tabla muestra características relevantes del material a aplicar tanto en el Tornamesa como el Bastidor. Con la finalidad de evitar el proceso iterativo desordenado en el análisis estático, se han cuantificado en una escala del 0 (bajo) al 3 (alto). Los aceros fueron elegidos por su disponibilidad en el comercio peruano por medio de empresas como: PeruMetales, Comercial del Acero, Aceros Arequipa y Tradi S.A.

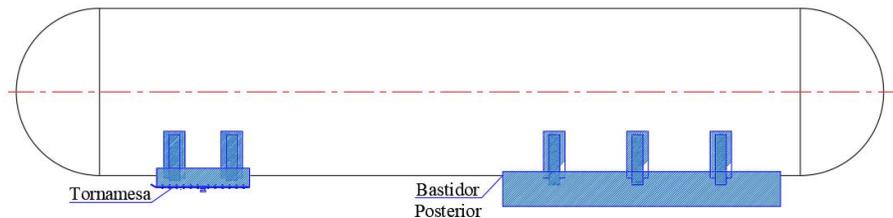
### 2.1.3.2 Proceso de dimensionamiento del Chasis

Según lo establecido por legislación peruana, se considerará el aplicar una configuración vehicular T3S3 (ver tabla A.5 Anexo 4), dado que permite un mayor rango de “Peso Bruto Máximo” de 48 ton. Respecto al “Angulo de agarre” entre las costillas y la placa de refuerzo, se respetarán las relaciones matemáticas dictadas por ASME (ver apartado “Silletas”) tales como la ecuación 1.16 y 1.17.



**Figura 2.12** Vista de corte Posterior del semirremolque como referencia.

Según la revisión bibliográfica respecto a la ingeniería aplicada al diseño de este vehículo, se establece una relación del 40% en la longitud del travesaño respecto al diámetro del tanque a presión. Similarmente el rango de la longitud de larguero posterior se encuentra entre 3.8m a 4m, en consecuencia, el larguero del Tornamesa oscila entre 1.2m a 1.4m; datos referentes al volumen de fluido a transportar (14 000 Gal).



**Figura 2.13** Vista Lateral del semirremolque como referencia.

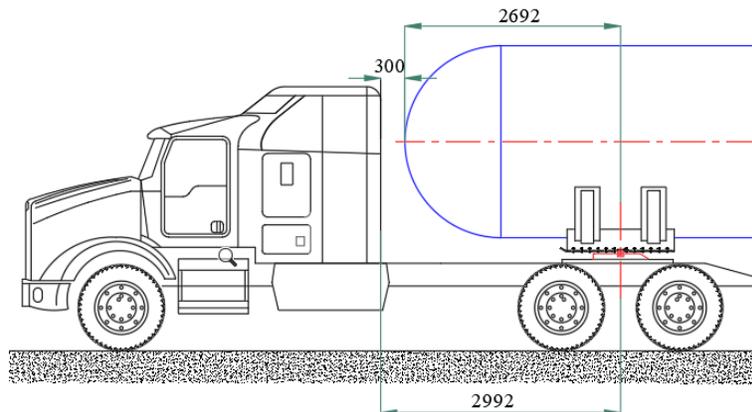
Paralelamente se considera la ubicación del el King Pin como un parámetro que influye en cuanto a la distancia máxima a considerar respecto a la ubicación del centro del Tornamesa con el Casco del tanque. Puesto que la unión: Tracto-Semirremolque tipo tanque

GLP, se debe considerar un “Espacio de oscilación” (EO); cuya finalidad es evitar una interferencia entre la cabina del conductor y el casco del tanque; para ello se recomienda una distancia mayor o igual a 300 mm [181];

. En base a lo sugerido por J. Calderón, se consideran las medidas de un tracto modelo: “Mack Anthem 6x4- Aire Dual Mecánico” (ver Anexo 4, figura A.10), para el dimensionamiento del Tracto-Semirremolque tipo tanque GLP. En la figura 2.14 se presentan las medidas máximas permisibles para el modelo de tracto y tanque de estudio

Descripción	Valor	Unidad
Espacio de oscilación	300	mm
Distancia máxima entre King Pin y Casco	2692	mm
Desplazamiento máximo de las muelas	2992	mm

**Tabla 2.10** Distancias longitudinales del semirremolque y el tracto [185]



**Figura 2.14** Distancias longitudinales del semirremolque y el tracto

### 2.1.3.3 Delimitación geométrica del Bastidor

Según las consideraciones detalladas previamente, se obtienen cómo geometrías de estudio las presentadas a continuación:

Elemento	Geometría
Placa de refuerzo	Plancha
Costilla	Perfil rectangular HSS
Travesaño	Perfil Z de alas atiesadas
Larguero	Perfil conformado

**Tabla 2.11** Perfiles geométricos considerados en el Chasis.

La característica predominante en la selección de los perfiles, es la inercia respecto al eje donde ocurre el momento flector crítico (o mayor). Por otra parte, la finalidad de incorporar la “Placa”, es de disminuir los esfuerzos en el tanque a presión, según lo estipulado por ASME [83],

## 2.2 Fase II: Análisis Estático

Esta etapa se establecerá el procedimiento a ejecutar para el análisis estático. Ello será validado en base a consideraciones descritas a continuación; de no cumplir, con el diagrama de flujo (ver Figura 2.1), se deben modificar las dimensiones del diseño. Como se comentó en el tópico “*Métodos numéricos en simulación computacional*” esta secuencia de modelado se encuentra en función a: Pre-Proceso, Proceso y Postproceso, cabe recalcar que los conceptos relacionados con el mallado de cuerpos se abordaron en el capítulo anterior en el apartado “Mallado para análisis estático”.

### 2.2.1 Cargas y soportes aplicados

En primera instancia se considera la presión hidráulica en función a la densidad del fluido, para ello se debe considerar un “Porcentaje de llenado” según la NFPA-58, la finalidad de este criterio es la seguridad; puesto que de esta manera se da un “espacio” a la expansión del fluido ante los gradientes de temperatura experimentados durante su transporte y por otro lado para evitar el rebose al momento de llenar el tanque [189]. En tal sentido MINEM (basado en NFPA-58) indica que para unidades con capacidad mayor a 1 050 galones es factible considerar 85% de llenado líquido [158]. Sin embargo, en el diseño se considera la unidad llena al 100%, puesto que es lo estipulado por ASME Sección XII (Apéndice Modal 1) [172]; por ello, en base a documentos previos los cuales suelen asimilarse las propiedades del GLP con la del Propano[151], [190], en tal sentido se considera una densidad<sup>68</sup> de 586.6 kg/m<sup>3</sup> para una presión interna de 250 psi y una temperatura interna de -45 °C.

En adición, según lo detallado previamente (ver apartado “*Pasos para delimitar el espesor mínimo de plancha para el Tanque a presión*”), se debe considerar una presión interna de 1.72 MPa (250 psi); estas cargas serán distribuidas en las caras internas del tanque a presión. Respecto al peso propio de los elementos, serán adicionados al análisis automáticamente al considerar “Standard Earth Gravity” en ANSYS.

La bibliografía recomienda aplicar perfiles de refuerzo a una de las caras del Rompeolas, en tal sentido, [14] recomienda perfiles “L” de 3”x3”x3/8” cubriendo laterales, cara superior e inferior. Las cargas aplicadas, se incluye la presión interna del tanque distribuida en todas las caras y otra que simule la desaceleración por el frenado; para ello influyen las variables:

$$F_f = \frac{m_l \cdot (0.3 \cdot g)}{N + 1} \quad (2.6)$$

Donde:

$m_l$  = Masa total del liquido

$g$  = Gravedad

---

<sup>68</sup> Por medio del software: Engineering Equation Solver (EES) versión 2015, por facilidad de cálculo.

$N$  = Numero de rompeolas

Se aplica una aceleración de 0.3g para simular el caso critico de frenado inminente; se suma un rompeolas más al divisor puesto que el casco de la cola simula influye en la dinámica [14]. En tal sentido la presión de frenado estimada para el estudio es de 2.86 kPa, determinada por:

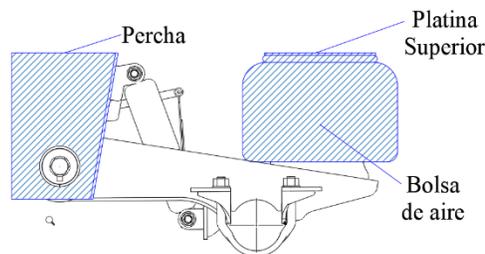
$$P_f = \frac{F_f}{A} \quad (2.7)$$

Donde:

$F_f$  = Fuerza de frenado

$A$  = Área de la cara del rompeolas

En base a lo detallado en párrafos previos se considera la base del Tornamesa como “Fixed Support”. Por el contrario, el bastidor ira sobre suspensiones neumáticas, dado que es lo recomendable para el tipo de semirremolque del estudio según F. Londoño [191]. Es así que se delimita el modelo TA300T20 de la marca Watson & Chalin [192]. Para ello se realiza la similitud de esta mecánica en el modelo computacional con un soporte fijo (Fixed Support), la Percha, y como resorte la Bolsa de Aire, en base a lo recomendado por [193].



**Figura 2.15** Partes principales de suspensión neumática [191]

En tal sentido es posible cuantificar teóricamente la rigidez estática del “resorte” aplicando la lógica termodinámica, en la cual se asume el aire como gas ideal, según [194], [195]; cabe recalcar que en ello no intervienen parámetros dinámicos como: la variación volumétrica, transferencia de calor y masa [196], [197], dado que ello varia la rigidez del elemento. En tal sentido R. Penzzoti, propone la siguiente relación para efectuar el cálculo [198]:

$$k = \frac{n \cdot A^2 \cdot (P_a - P_s)}{V} \quad (2.8)$$

Donde:

$n$  = Constante politrópica para aire (1.4)

$A$  = Área del resorte

$P_a$  = Presión atmosférica

$P_s$  = Presión interna en la bolsa de aire

$V$  = Volumen de la bolsa de aire

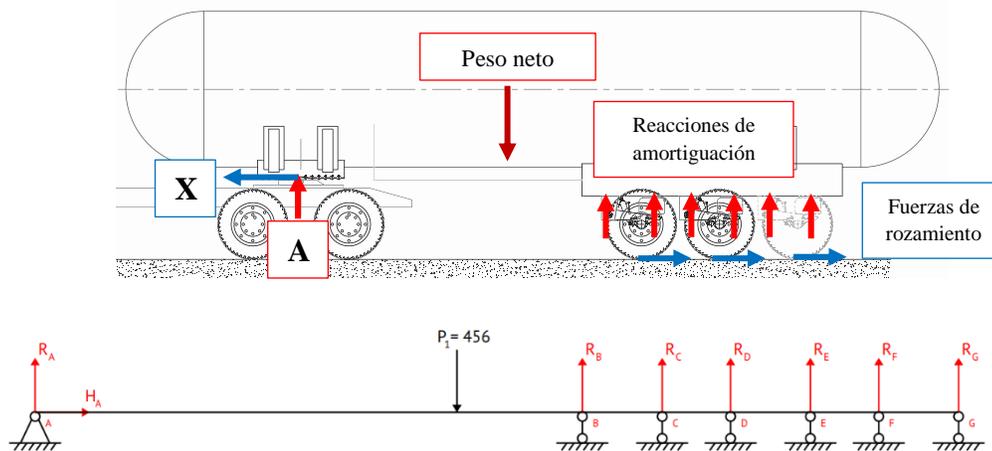
En base a la ecuación presentada, se determina la rigidez teórica de 340 kN/m, para el modelo señalado, considerando una presión interna de 5 bar y la atmosférica de 1bar. La presión interna se encuentra dentro del rango comercial señalado por D. Franz [199]. Adicionalmente se encuentra el valor practico señalado por la Watson & Chalin, donde se indica que el viaje es de 8” y la carga máxima es por bolsa de aire son 15000 lb [200], se obtienen 328 kN/m; en tal sentido el análisis será abordado considerando el valor practico puesto que el porcentaje de error es 3.3%.

Descripción	Símbolo	Valor
Rigidez Teórica	$k_t$	340 kN/m
Rigidez Practica	$k_p$	328 kN/m
Porcentaje de error	%e	3.28

**Tabla 2.12** Constante de rigidez para resorte en simulación

El resorte será simulado en ANSYS mediante el apartado de conexiones como “Spring Conection” de la forma “Body to Ground”.

Para definir el tipo de King pin a implementar se realiza el cálculo en base a los puntos de apoyo del tanque a presión. Por ende, considerando el peso neto del vehículo (45.6 tn) y los soportes correspondientes al Tornamesa y la amortiguación, se presenta el siguiente diagrama ejemplificando el caso.



**Figura 2.16** DCL del semirremolque tipo tanque GLP

Por medio este medio se busca obtener las reacciones “A” y “X” puesto que estas influenciarán directamente con la estructura del tornamesa. Cabe señalar que se considera un factor de rozamiento (caucho-asfalto) de 0.6 [14]. En consecuencia, se ha establecido una placa de refuerzo a la cual irá acoplado el King pin; en base a la bibliografía [14, 91] se ha delimitado la serie tipo Hongo-SAE 2”, procedentes de la marca “Holland”, cuyo material base es el acero bonificado AISI 8630 H. Debido a la aleación con Níquel, Cromo y Molibdeno y el tratamiento térmico aplicado, sus propiedades mecánicas le atribuyen una elevada tenacidad, adecuada para la aplicación en cuestión donde será sometido a fatiga e impacto.

## 2.2.2 Casos de Cargas

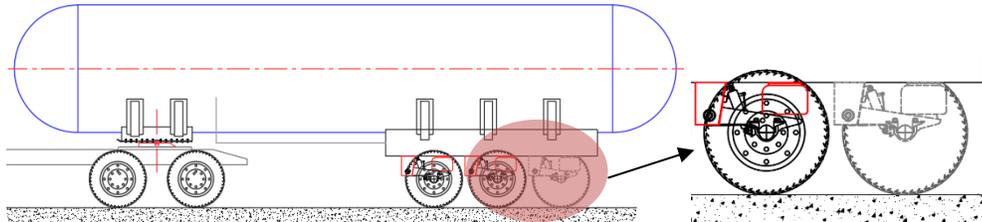
En esta sección, la finalidad es analizar el comportamiento de la estructura asimilando su desempeño eventos críticos característicos de su performance laboral. Según lo recomendado por G. Franck *et al* [201]. el caso de carga uniforme se debe complementar un evento donde la carga se comporte asimétricamente, estos son descritos a continuación:

- Distribución Simétrica

Viene a ser representada cuando el semirremolque se acopla directamente al tracto camión; donde las 6 suspensiones (para el caso evaluado) están en contacto por medio de los neumáticos, al terreno.

- Distribución Asimétrica

La intención de este caso no solo radica en los largueros, sino también en provocar esfuerzos en los travesaños del bastidor. Por ello se evalúa el caso previo sin una suspensión trasera; puesto que la ausencia de ello ocasiona un efecto torsor en el conjunto estructural [202], [203], simulando de esta manera al vehículo sobre una pista agujereada.



**Figura 2.17** Ausencia de la 3<sup>ra</sup> rueda izquierda-Caso asimétrico.

Finalmente, respecto a los casos de estudio, se espera un esfuerzo crítico, en el Larguero posterior, menor al esfuerzo de fluencia (debido a que el acero tiene un comportamiento dúctil) del material seleccionado. La relación de estas variables físicas se corroborará por medio del factor de seguridad (FOS<sup>69</sup>).

Por lo tanto, es preciso acotar el FOS adecuadamente, puesto que puede ocasionar un fallo estructural en el diseño, si es mínimo; o repercutir monumentalmente en el peso del diseño y ello en costos de material y tamaño, en caso sea muy grande [204]. En base a la literatura de estudio, los estándares internacionales carecen de la presencia de un FOS destinado al bastidor del semirremolque tipo tanque GLP. No obstante, T. Govender [182] recomienda que este factor debe encontrarse entre 1.2-2.5 en chasis de semirremolques como lo presentado por G. Franck [201], ello basado en [205], [206]. En adición se debe considerar

---

<sup>69</sup> FOS: Factor of Safety

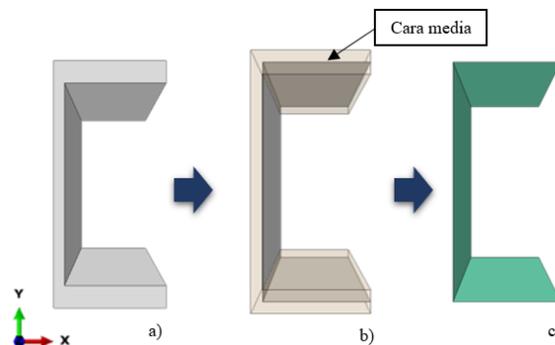
que a nivel nacional no se dispone de una normativa que regule con exactitud el FOS óptimo para diseños de esta clase (o con orientación similar), no obstante, en base a la investigación bibliográfica realizada por [91],[7],[201] resulta conveniente aventurar que con un valor incluido en el rango presentado ( $>1$ ) se puede validar el modelo de estudio.

### 2.3 Fase III: Análisis Dinámico

La finalidad de este ensayo radica en analizar el comportamiento del diseño, adquirido en el tópic anterior (Análisis Estático) al efectuar el movimiento del semirremolque con el fluido en su interior. Con este análisis se busca determinar las áreas del semirremolque con mayor esfuerzo y así proponer recomendaciones de diseño a futuro. Por ello se utiliza el programa ABAQUS CAE 2020; en base a los módulos presentados en su interfaz, se detallará el proceso.

#### 2.3.1 Configuración del CAD

Luego de importar el modelo CAD establecido en el Análisis Estático; es necesario convertir los cuerpos estructurales (no se incluye el dominio líquido) a un modelo de carcasa (Shell) para agilizar el cálculo debido a la complejidad del estudio. Para ello se optó por preservar el espesor de plancha referido a cada cuerpo, y aplicar un plano medio de representación; por medio de la herramienta “Geometry Edit” se ejecutó esta técnica. En tal sentido la representación de cada cuerpo fue similar a un estado laminar, como se ve en la siguiente figura:



**Figura 2.18** Proceso del cuerpo estructural de Sólido a Carcasa: a) Cuerpo tipo Sólido, b) Transición de Plano medio, c) Cuerpo tipo Carcasa

### 2.3.2 Propiedades de los materiales

Previamente se incorporaron los criterios de mallado (descritos en el apartado “Mallado para análisis dinámico”) enfocados en los cuerpos a modelar. Siendo el caso, se incorporan las propiedades de los materiales característicos del estudio; cabe recalcar que el material del dominio estructural será definido análisis estático, en base a ello se incluirán las propiedades correspondientes. Es en este módulo, donde se delimita el espesor de cada cuerpo, dado que, según lo comentado previamente, los elementos tipo carcasa requieren dicha configuración. En cuanto al fluido, se requieren las siguientes variables:

Material	Propiedad	Valor	Unidad
Propano Líquido	Densidad (-45°C)	586.6	Kg/m <sup>3</sup>
	Viscosidad Dinámica (-45°C)	201 e-6	Pa·s
	Velocidad del Sonido (-42°C)	1161	m/s

**Tabla 2.13** Propiedades del Propano requeridas en el análisis FSI [214], [215].

La velocidad del sonido en el medio es utilizada para la EOS, concepto detallado en el apartado “Ecuación de Estado de Mie-Grüneisen”. Para incluir características mecánicas y físicas al modelo, se considerará el sistema SI-milímetros. A continuación, se presentan las unidades consideradas por el programa.

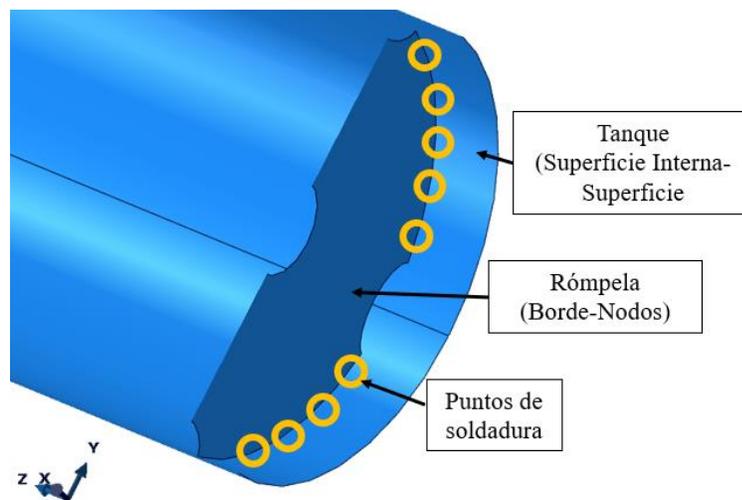
Parámetro	SI		US	
	Metros	Milímetros	Pies	Pulgadas
Longitud	m	mm	ft	in
Fuerza	N		lbf	
Masa	kg	tn	slug	lbf s <sup>2</sup> /in
Tiempo	s			
Esfuerzo	Pa	MPa	lbf/ft <sup>2</sup>	psi
Energía	J	mJ	ft lbf	in lbf
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	tn/mm <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	lbf s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>

**Tabla 2.14** Sistema de unidades en Abaqus [216]

Según la bibliografía [20], [21], [110], [217], [218] para este tipo de análisis se recomienda un periodo de tiempo de 1seg para evaluar el fenómeno FSI y así prevenir la interrupción en la memoria del computador; en tal sentido se programó el Time Period en el módulo Step.

### 2.3.3 Enlace de Dominio Estructural

A continuación, en el módulo de “Interacción” se define la interacción por contacto puesto que se consideran los desempeños Tangencial y Normal para ambos dominios (líquido y estructural)[219]. Posteriormente procede a “soldar” los cuerpos entre estos mismos por medio de la herramienta “Tie Constraint” con las técnicas de superficie y nodos según sea el caso. Por ejemplo: en el caso de los Rompeolas, el borde de estos será “soldado” (metafóricamente como puntos de soldadura, puesto que son puntos nodales) a la superficie interna del tanque, como se ve en la siguiente figura.

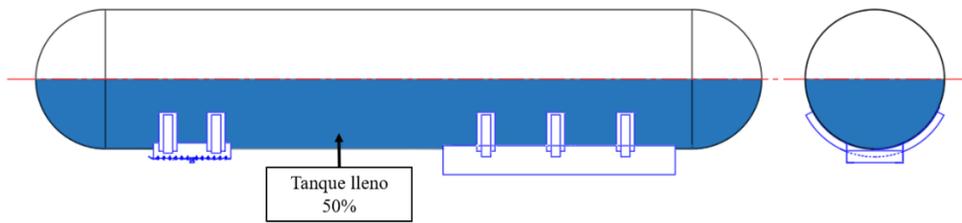


**Figura 2.19** Enlace de cuerpo por interacción: Nodo-Superficie en Abaqus

Posterior a este proceso de unir los cuerpos estructurales será incluido el tipo de contacto estándar en el apartado “Interaction Property manager”; de esta manera se define el contacto entre sólidos y líquido.

### 2.3.4 Casos de maniobra de conducción

Tanto la carga del dominio estructural como el fluido son incluidas en este modelo por medio de la gravedad. No obstante, en el fluido se debe detallar que la superficie libre, representa la independencia del fluido respecto al recipiente que lo contiene. El incremento en la magnitud de esta área repercute en un comportamiento más dramático del chapoteo, es decir, un incremento en la velocidad de la superficie libre [19], [140]. Por ello, el punto crítico para una sección transversal circular se ubica en el centro puesto que transversalmente es equivalente al diámetro. En tal sentido el volumen de llenado crítico a considerar en el estudio es de 50% [220].



**Figura 2.20** Caso crítico de superficie libre en el tanque

Respecto a la velocidad considerada se encuentra limitada por la legislación peruana, teniendo en cuenta lo estipulado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el DS-016-2009-MTC, se establece el límite máximo en zona urbana como 30km/hr; dado que el semirremolque tipo tanque GLP se define como un vehículo de transporte de mercancía peligrosa, la velocidad máxima por carretera es de 70km/hr [221]. En tal sentido bajo lo propuesto, el estudio se basa en la segunda premisa dado que una de las ventajas relevantes del transporte a granel de GLP es el llegar a lugares recónditos del Perú, para lo cual el vehículo utilizara carreteras de altas velocidades. Dicha velocidad será aplicada a ambos dominios, debido a que el modelo considera inicialmente al vehículo en movimiento y posteriormente el frenado.

Para ejecutar la maniobra de conducción, la velocidad inducida será parametrizada como una gráfica: amplitud-tiempo; donde el frenado se ejecutará a partir de 0.03 s. De esta forma, existe un amplio margen temporal para ser netamente utilizado en el análisis del chapoteo. Asimismo, este fenómeno físico altamente no lineal, alternara su dinámica respecto la configuración de rompeolas utilizada (ver figura 2.10). Por ello, los conceptos parametrizados previamente influenciaron en el modelo FSI en base a la disposición de rompeolas utilizada: Ortogonal (Caso 1) u Oblicuo (Caso 2).

Se recuerda que como objetivo principal del método sin malla no solo se tiene a la capacidad de describir deformaciones extremadamente altas o desprendimiento de malla (rotura<sup>70</sup>), también ahorra el tiempo del proceso de mallado. En tal sentido, es recomendable paralelizar el cálculo en función a la capacidad del computador utilizado; ello quiere decir,

<sup>70</sup> Fenomeno conocido como: Breakage.

se obtiene el mismo resultado, utilizando procesadores múltiples y así minimizar el tiempo de ejecución. Dado que la FSI implica gran cantidad de comunicación entre los dominios (liquido-estructural), resulta crucial el aplicar la programación paralela. Esta se caracteriza por compartir el código entre los procesadores, para evitar los cuellos de botella (que reducen la eficiencia del cálculo) [105]. Siendo así, finalmente se ejecutará el cálculo en el módulo “Job”; en este apartado será crucial el detallar el número de procesadores a utilizar.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS**

Tomando como punto de partida los datos propuestos en el “Capítulo II”, se realiza la apertura para los resultados obtenidos. En principio se deben considerar el software característico en cada fase, una de las variables implicadas para la elección de estos, es la comodidad del usuario. Ello se complementa con el performance de sus algoritmos para llevar a cabo su labor, en tal sentido SolidWorks fue utilizado para el diseño CAD, la etapa CAE consiste en: ANSYS para el análisis estático y ABAQUS, donde se gestionó el estudio dinámico. Como segunda variable para la elección de los softwares de CAE, se consideró la recomendación propuesta por T. Scheldt en su tesis de elementos finitos [99].

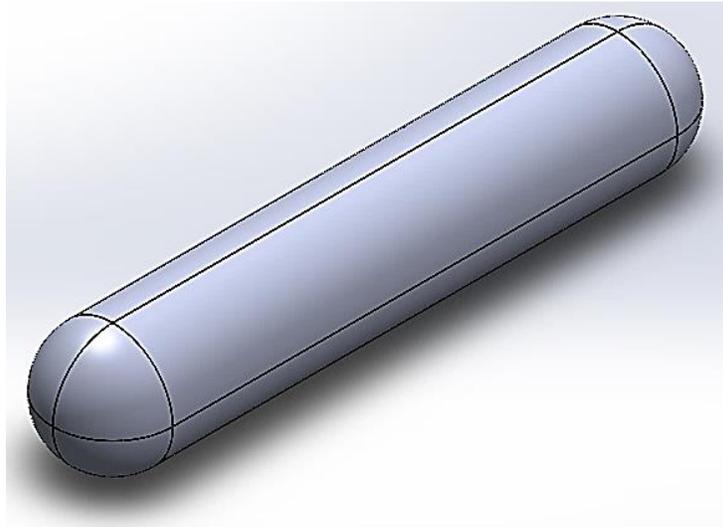
#### **3.1 Arreglo estructural del Bastidor**

Las dimensiones y configuración estructural del bastidor van en función al diseño del tanque a presión, por ello la apertura del “Capítulo II” la realizo dicho componente. A continuación, se presentan características finales del diseño CAD delimitado en base a los parámetros detallados en el capítulo previo.

##### **3.1.1 Tanque a presión**

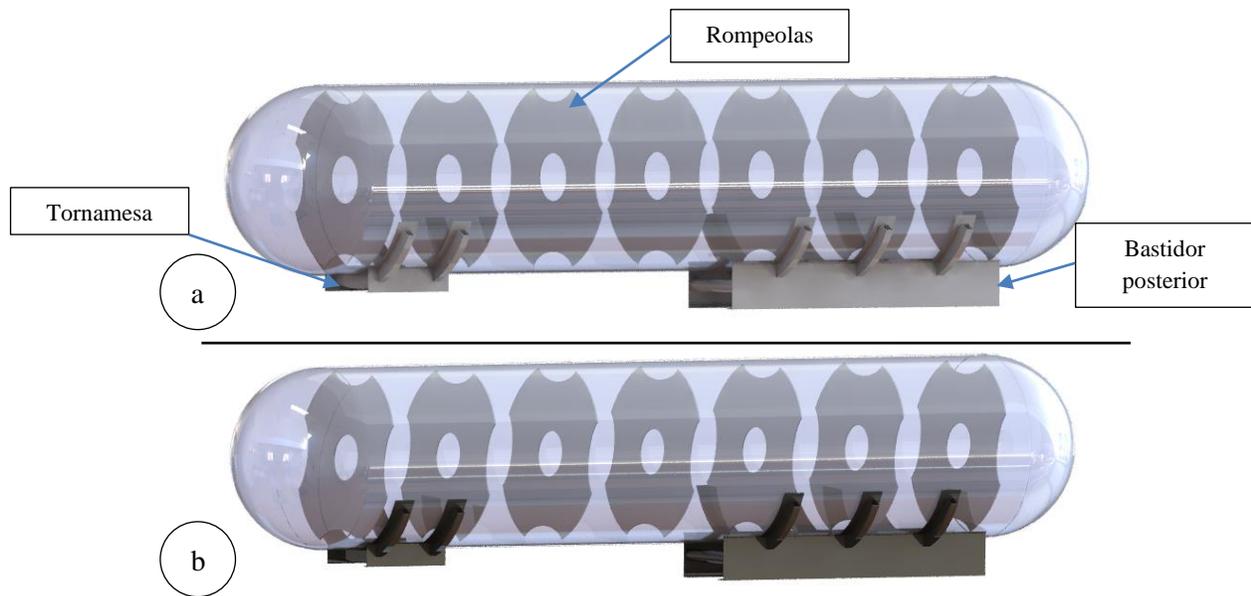
En base a los parámetros predefinidos en el apartado “2.1.1”, a continuación, se muestra presentan imágenes del tanque a presión considerado. Para el CAD, se consideró como medida externa el diámetro delimitado (2.4m), es decir, el espesor de plancha mínimo se dibujó como medida interna del recipiente a presión. Puesto que el estudio realiza simplificaciones con la finalidad de conseguir los resultados prematuros respecto a los objetivos específicos delimitados, las figuras no presentan relaciones de ensamblaje reales

en términos de manufactura. Comúnmente tanto “Casco” como “Cuerpo” suelen incluir varios segmentos de planchas, posterior a experimentar el proceso de rolado.



**Figura 3.1** Vista isométrica del tanque a presión ensamblado

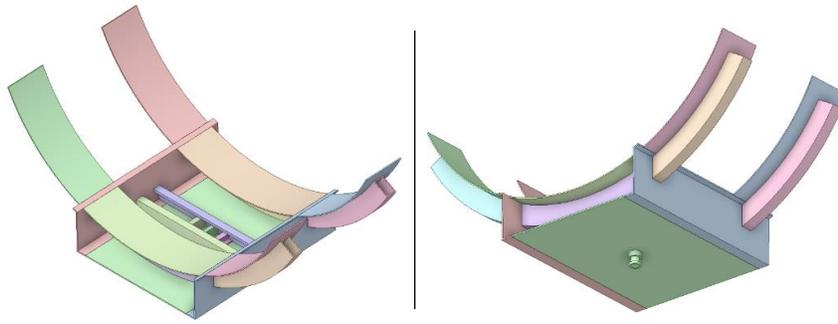
Respecto a la manufactura del ensamblaje tanque-rompeolas, se realiza mediante soldadura; debido a las largas longitudes por cubrir es poco usual el emplear el proceso SMAW, sino un proceso TIG o MIG, por la facilidad en el electrodo continuo. Las dimensiones detalladas en el apartado “*Definición geométrica de rompeolas*” son graficadas en la siguiente figura. Con un concepto de diseño similar al párrafo previo, se presentan la distribución de ambas opciones de rompeolas: Ortogonal y Oblicuo. Las dimensiones globales correspondientes al vehículo son: 12.5 m de largo, 2.4 m de ancho y 2.6 m de alto; cuyo peso en seco es de 14.6 tn.



**Figura 3.2** Vista isométrica del conjunto de rompeolas en el ensamble: a) Ortogonales, b) Oblicuos

### 3.1.2 Tornamesa y Bastidor

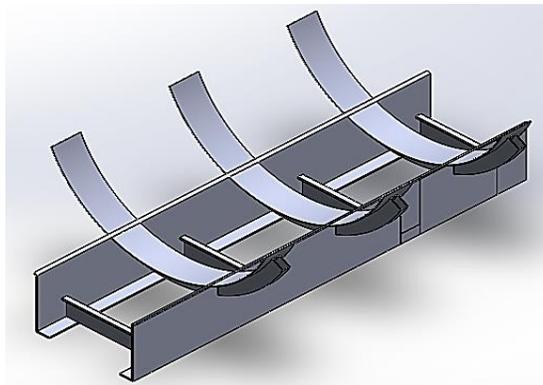
Se encuentran influenciado por las características detalladas en el apartado “2.1.3.2”, en cuanto a los componentes principales tanto del tornamesa como el bastidor son los presentados en la tabla 2.12. En la figura 3.3 se presenta la configuración estructural preliminar para dar inicio al análisis estático (Fase 2, según la figura 2.1). Según la literatura estudiada, a diferencia del Bastidor, es recomendable incluir un subconjunto estructural de largueros y travesaños para el Tornamesa; cuya finalidad es proporcionar rigidez (en la ubicación del King Pin) a la “plancha base” que se encuentra en contacto con la 5<sup>ta</sup> Rueda [14], [201]. Es esta plancha la que ira soldada a el King pin, donde en primera instancia se seleccionó el modelo “KP-T-809-EF” (marca Holland), basado en el espesor de plancha aplicado.



**Figura 3.3** Vistas isométricas del Tornamesa ensamblado

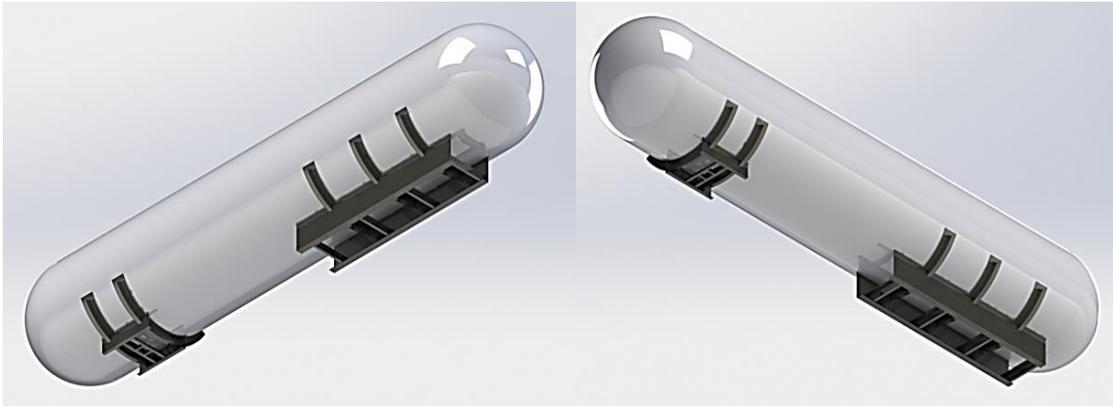
Con el mismo enfoque se presenta el ensamblaje realizado para el Bastidor. En ambas configuraciones la costilla también se desempeña como un travesaño en términos físicos (vista de ayuda figura 2.12); es decir que no solo se encarga de soportar el tanque, sino también evita el pandeo del larguero. Respecto al distanciamiento entre travesaños, fue influenciado por las dimensiones de llantas en base a los datos revisados ello se estableció como 1.2m. Consecutivamente, con la finalidad de mantener la simetría, las costillas se ubican a la mitad (60cm) de dicho espaciamiento.

Un detalle característico, viene a ser el perfil destinado al larguero. Se ha optado por una geometría conformada puesto que en función a los casos estructurales de estudio realizados virtual y presencialmente resulta fundamental el adecuar la “cresta” hacia el radio de curvatura del tanque a presión predefinido; ello con la finalidad de simplificar la manufactura de ensamblaje.



**Figura 3.4** Vista isométrica del Bastidor ensamblado

Finalmente, se reúne el conjunto de estructuras previamente descrito para componer el Semirremolque Tipo tanque GLP (ver figura 3.5). Donde la ubicación preliminar de tornamesa y bastidor en el tanque será influenciada por las relaciones establecidas en el apartado “2.1.3”; y establecida por los siguientes análisis numéricos a realizar. Para la siguiente imagen fue ocultado la plancha del tornamesa con la finalidad de mostrar la matriz de perfiles.



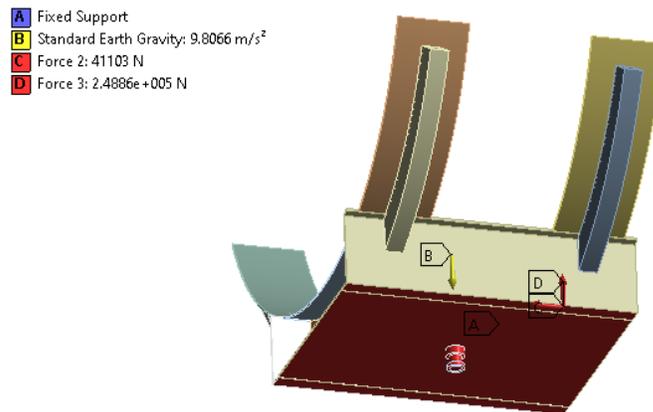
**Figura 3.5** Vistas isométricas del Semirremolque tipo Tanque GLP ensamblado

## **3.2 Análisis Estático**

Correlativamente a la figura 2.1, el presente tópico aborda la integridad estructural del vehículo, ello mediante la incorporación de las cargas y soportes descritos en el apartado “*Cargas y soportes aplicados*” y posteriormente se evalúa el comportamiento del cuerpo en los casos de carga descritos en el apartado “*Casos de cargas*”. En base a ello, se procede con las iteraciones que relacionan tanto geometría como material, puesto que dicha técnica busca la interacción óptima para el diseño.

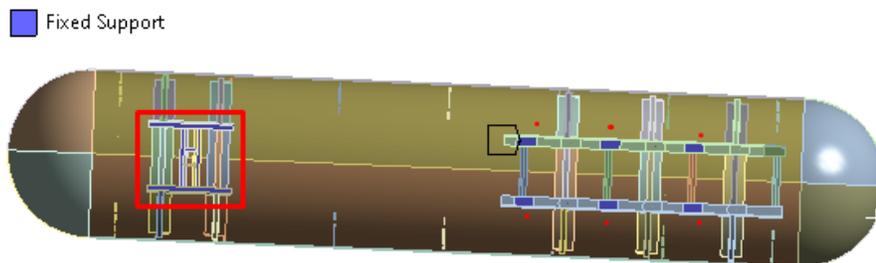
### **3.2.1 Cargas y soportes característicos del vehículo**

Posterior al cálculo de fuerzas, se determinaron las reacciones A y X correspondientes al tornamesa. Estas cargas serán aplicadas en ANSYS para su posterior modelamiento y corroborar si el modelo elegido de King pin, resulta adecuado.



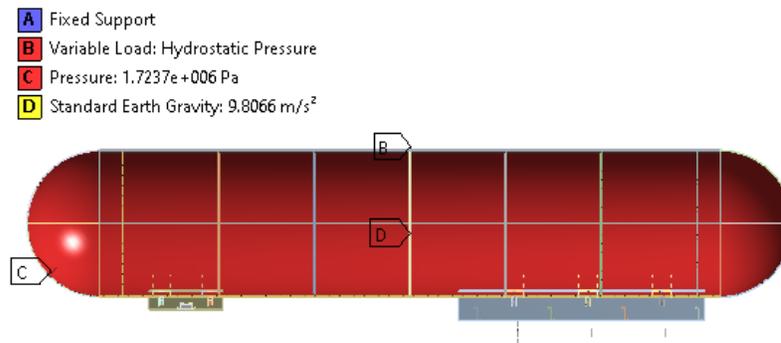
**Figura 3.6** Soportes del Tornamesa y Bastidor

Debido a que la base de los perfiles del tornamesa está plenamente apoyada en la quinta rueda, estos son simulados como soportes fijos; según los casos de estudio similares [15], [201], [222] se considera como una adecuada aproximación. Cabe señalar que en la imagen inferior se ha escondido la placa de refuerzo para apreciar el arreglo estructural correspondiente. En el caso del bastidor posterior, únicamente se consideran las superficies correspondientes a la percha (ver figura 2.19) de la suspensión neumática, los resortes abarcan la superficie correspondiente a la bolsa de aire, respetando las dimensiones propias del modelo [200].



**Figura 3.7** Soportes del Tornamesa y Bastidor

Asimismo, las cargas aplicadas como la presión interna y la presión hidráulica fueron incorporadas a las caras internas del tanque, cabe recalcar que la presión hidráulica varía referente a la altura de llenado y la distribución geométrica interna del recipiente a presión



**Figura 3.8** Cargas internas aplicadas a la estructura

### 3.2.2 Desempeño del arreglo estructural

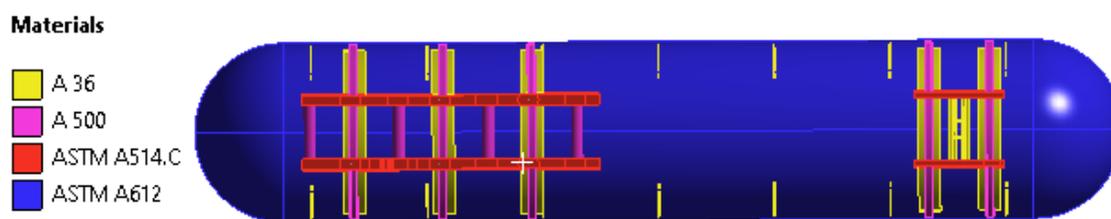
En función a documentos con estudios similares y las numerosas iteraciones realizadas inicialmente respecto a las dimensiones geométricas de los perfiles, se entabla como elemento crítico el larguero del bastidor posterior; ello principalmente por sus soportes “puntuales”. Puesto que, a diferencia del tornamesa, este elemento tiene áreas específicas, esta discontinuidad provocó un flujo de esfuerzos menos uniforme en todo el perfil, a comparación del larguero del tornamesa.

Respecto al aspecto geométrico de las costillas, se delimitó (en base a las fuentes y conceptos descritos en el apartado 2.1.3) en el perfil: LAC Rectangular 150x100, a partir de ello se realizaron las siguientes iteraciones con la finalidad de satisfacer el rango de factor de seguridad delimitado previamente. El perfil de los largueros es una geometría no estandarizada sin embargo sumamente común en la industria metalmecánica de semirremolques con tanque, dado que la cresta facilita la conexión entre la curvatura del recipiente y la estructura del bastidor.

Para este estudio, se definió como apertura del proceso, el enfoque en los largueros; es por ello que, según lo observado en los resultados iterativos, el desempeño del larguero depende tanto de la variable geométrica como de las propiedades mecánicas del material elegido. Inicialmente se tenía contemplado un espesor de 6.4mm (1/4”), peralte del perfil de 300mm y de material ASTM A36; sin embargo, estos parámetros fueron actualizados consecutivamente en el desarrollo del análisis, el esfuerzo máximo obtenido, superaba el dominio elástico del material y por ende no satisfacía el requerimiento del FOS. En ello

también influyo el tipo de soporte característico de un larguero, al simplificar la el caso, este es similar al de una viga con apoyos simples a los extremos.

Los materiales delimitados para el diseño definitivo, se le atribuyen al por el proceso de prueba y error, estos se muestran en la siguiente figura. Cabe recalcar que el material ASTM A36 también corresponde a los rompeolas (ver apartado 2.1.2, para más detalle) y la plancha base en el King pin (escondida para la imagen).



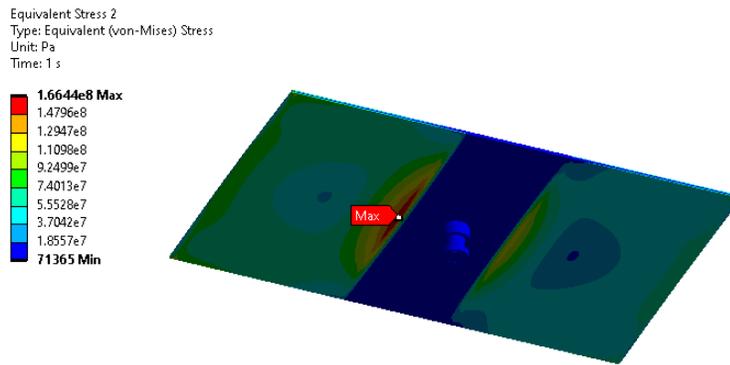
**Figura 3.9** Materiales utilizados en el semirremolque tipo tanque GLP de 14 000 US gal .

Color	Material (ASTM)	Elemento
Azul	A612	. Cuerpo . Cascos
Amarillo	A36	. Rompeolas . Plancha de refuerzo . Travesaño y arriostres
Rojo	A514.C	. Largueros
Fucsia	A500	. Travesaños del bastidor posterior . Costillas
-	A8630.H	. King Pin

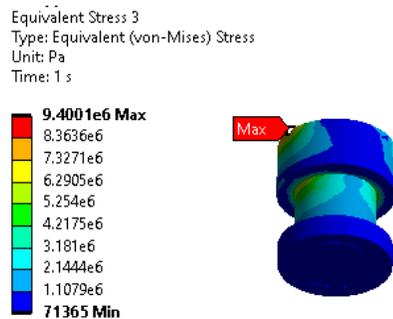
**Tabla 3.1** Materiales utilizados en el semirremolque tipo tanque GLP de 14 000 US gal.

Por otro lado, se consideró un amarre convencional transversal (ver figura 1.33), puesto que la labor que desempeña el bastidor de un semirremolque tipo tanque GLP no experimenta el caso de una carga basculante; por ello se puede prescindir de una matriz con amarres diagonales, a su vez en beneficio de aligerara la carga muerta.

Los esfuerzos se concentran en la unión de los arriostres con la plancha cuyo espesor es de 8mm, donde el esfuerzo máximo es de 166 MPa y su factor de seguridad correspondiente es de 1.5. Asimismo, el desempeño estructural del King pin, señala como punto crítico la base inferior de este. El factor de seguridad atribuido es de 114, lo cual lo califica notoriamente como óptimo para la ejecución. Se debe recordar que este elemento es punto base para las maniobras de conducción (tales como: giros, frenados, aceleración, etc.) del semirremolque.



**Figura 3.10** Esfuerzos en la plancha base del Tornamesa.

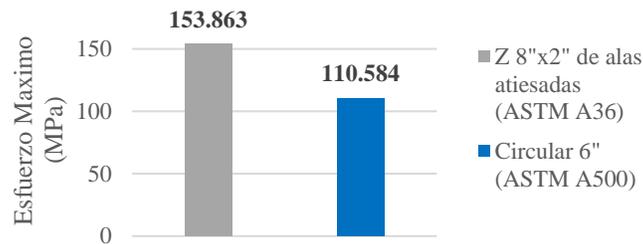


**Figura 3.11** Esfuerzos en el King pin, modelo KP-T-809-EF.

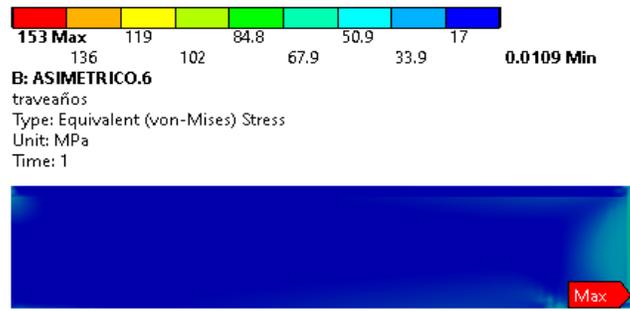
Teóricamente, las características recomendadas para el perfil de un travesaño son: sección circular y geometría cerrada [92]; dado que el elemento principalmente trabaja en torsión. La elevada rigidez a la torsión que proporciona la sección circular cerrada contribuye a disminuir la deflexión angular por torsión en el elemento, por ende, los esfuerzos experimentados son menores. En tal sentido, se priorizo esta lógica para el diseño del bastidor; no obstante, en el caso del tornamesa fue preferible el incorporar elementos con una

base plana, dado que no solo facilita el ensamblaje (en la práctica) con la placa y el King pin, a su vez también contribuye con elevar la rigidez de la matriz estructural.

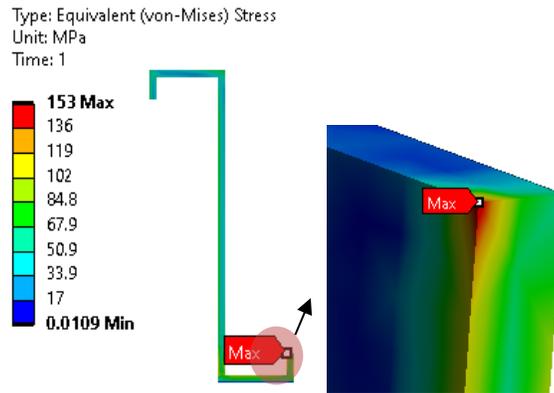
En base a los ensayos realizados, se corrobora dicha lógica; puesto que al ejecutar el cálculo con una sección abierta como el perfil *Z 8"x2"*, el esfuerzo máximo fue de 153MPa, siendo este un 39% mayor al experimentado por un perfil *Circular 6"* (110 MPa). En adición según la revisión bibliográfica, al considerar los extremos empotrados (soldados) al larguero, el momento flector del travesaño disminuye en un 50% en contraste con un apoyo simple (soportados en la base interna del larguero) [92]. Cabe recalcar que los ensayos realizados en el presente documento no contemplaron los esfuerzos residuales del cuerpo en estudio.



**Figura 3.12** Esfuerzos máximos en perfil cerrado y abierto



**Figura 3.13** Vista lateral y detalle, del 3<sup>er</sup> travesaño del bastidor



**Figura 3.14** Vista alzado y detalle, del 3<sup>er</sup> travesaño del bastidor

Como principio de desarrollo se establecieron 250mm de separación entre la cola del bastidor y la costura de la unión casco-cuerpo, en función a la literatura. Según lo delimitado en el apartado “*Proceso de dimensionamiento del chasis*” y en función a que el radio de casco para el tanque es de 1.2 m, se realizaron sucesivas iteraciones (con el módulo paramétrico en ANSYS) para identificar la adecuada ubicación del tornamesa. La siguiente tabla muestra los esfuerzos máximos correspondientes, donde se nota una ligera constancia en los esfuerzos del tanque, así como los vistos en las costillas.

Opc.	Ubicación Tornamesa (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)				
		Tornamesa	Bastidor	Tanque a presión	Travesaño	Costilla
A	850	550.27	478.07	224.37	78.18	181.35
B	900	602.99	476.64	224.36	78.02	181.36
<b>C</b>	1000	429.87	471.47	224.29	77.19	181.12
D	1050	455.01	474.25	224.28	77.60	181.11
E	1150	463.37	472.72	224.30	77.38	181.28
F	1200	469.89	469.66	224.31	76.97	181.47
G	1250	478.67	463.55	224.36	76.22	181.77
H	1300	485.94	457.47	224.36	75.49	182.16
I	1350	483.34	456.83	224.37	75.45	182.28
J	1400	485.46	453.97	224.36	75.07	182.26
K	1450	481.48	452.46	224.32	74.88	182.30

**Tabla 3.2** Parametrización en la estructura.  
Elaboración propia

El proceso iterativo inicio bajo el criterio de una proporción similar a la del bastidor. En cuanto a los valores obtenidos señalan una irregularidad al ubicar el King Pin a 900 mm de la costura, a ello se le atribuye la interferencia con la ubicación del rompeolas. Los esfuerzos en el bastidor son atenuados conforme el tornamesa se aleja de la costura, sin embargo, ello repercute contrariamente en lo experimentado por el tornamesa. En tal sentido se eligió como optima distribución la opción “C”, ya que los esfuerzos en el tornamesa son los mínimos y con ello el bastidor también cumple con el rango delimitado de FOS.

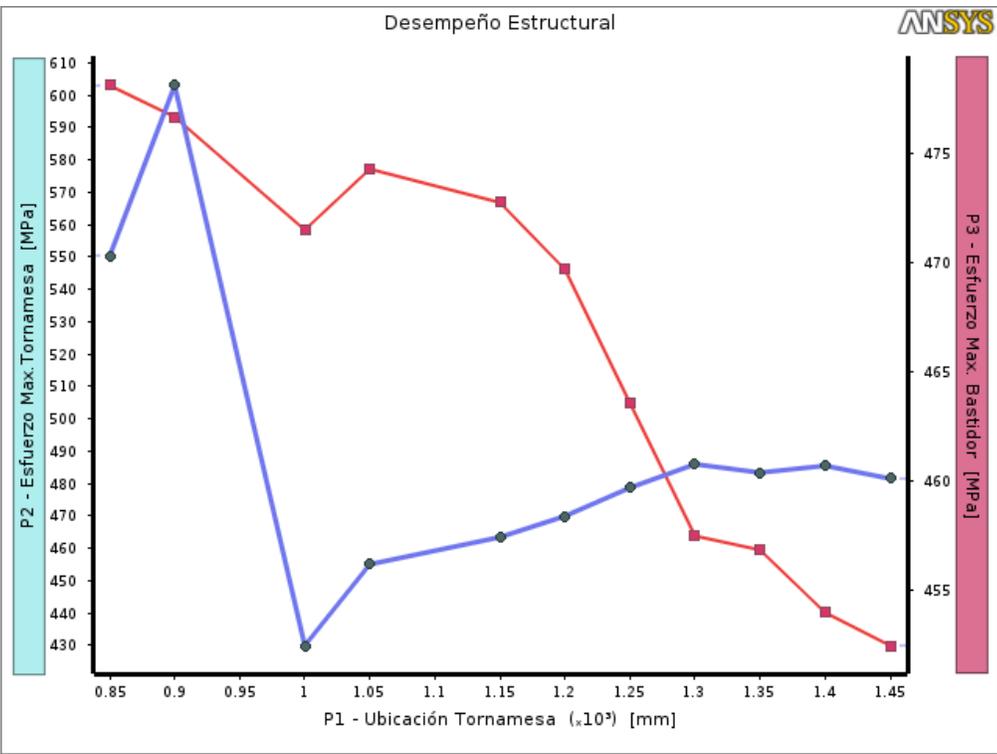


Figura 3.15 Esfuerzos máximos en el tornamesa y bastidor

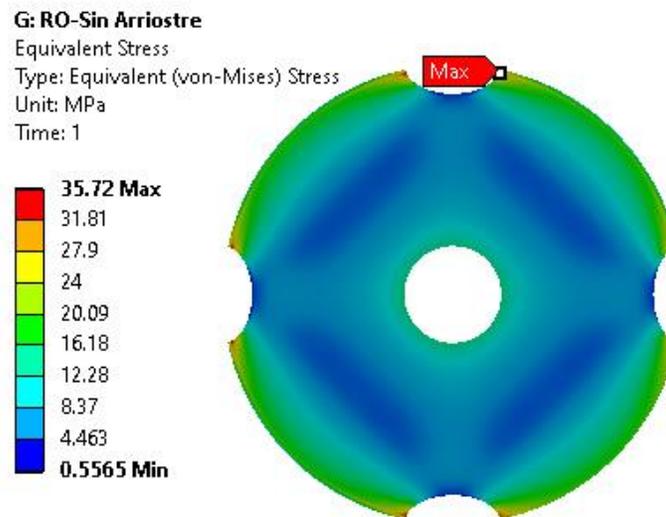
Por otro lado, se ejecutó el análisis del Rompeolas, para el cual la calidad de malla fue 0.008 y 0.999, para Oblicuidad y Ortogonalidad respectivamente. Ello cataloga como fuente confiable a los resultados obtenidos puesto que en base al espectro de las figuras 2.17 y 2.19 es un mallado “Excelente”.

Mesh Metric	Skewness	Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	1.3057e-010	<input type="checkbox"/> Min	9.541e-002
<input type="checkbox"/> Max	0.90459	<input type="checkbox"/> Max	1.
<input type="checkbox"/> Average	8.155e-003	<input type="checkbox"/> Average	0.99908

**Figura 3.16** Calidades del mallado del Rompeolas

Al incluir las cargas respectivas al Rompeolas, consideradas en el apartado “*Cargas y soportes aplicados*”, se obtienen la siguiente distribución de esfuerzos. En la cual es notoria la simetría circular orillas del arco en contacto con la pared del tanque (unión soldada), debido a que la carga de frenado busca la deformación cóncava del cuerpo partiendo del centro. Al realizar los agujeros laterales, superior e inferior, con dimensiones iguales, se origina la atenuación de esfuerzos a partir del arco.

El material utilizado fue ASTM A36, para el cual se atribuyen un FOS de 7. En base al análisis realizado se puede afirmar que el elemento se encuentra apto para ejercer su labor ante la ausencia de rigidizadores (como se indicó previamente en el capítulo 2). Para dicha particularidad a influenciado el tipo de estructura en análisis, en base a lo detallado en el apartado 2.1.3.1 se debe recordar que el espesor de plancha requerido es de ½”, siendo una variable relevante para su rigidez.



**Figura 3.17** Esfuerzos en el Rompeolas

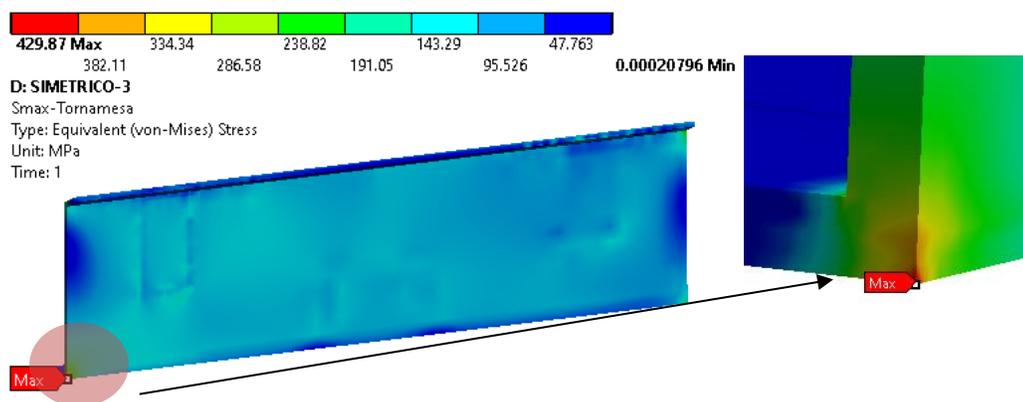
### 3.2.3 Caso 1: Carga simétrica

En función a la opción C, presentada previamente se obtuvieron los siguientes resultados. Por medio de las técnicas de mallado aplicadas, se obtuvieron valores favorables para validar la calidad de resultados del estudio. Según el espectro de control tanto en Oblicuidad como en Ortogonalidad, la calidad global de la malla se cataloga como “Muy Buena”.

Mesh Metric	Skewness	Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	2.2324e-003	<input type="checkbox"/> Min	3.3783e-002
<input type="checkbox"/> Max	0.97052	<input type="checkbox"/> Max	0.99989
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.35255	<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.78384

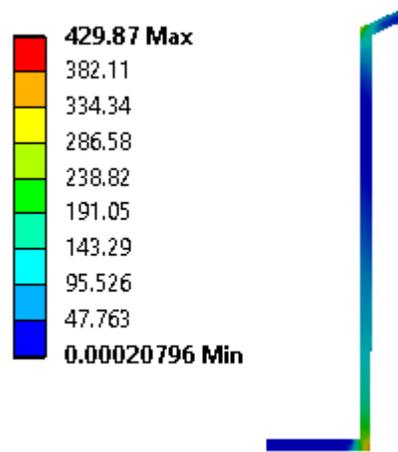
**Figura 3.18** Calidades del mallado del caso simétrico

En tal sentido, la conexión informática nodal resulta confiable. Los resultados del estudio, señalan puntos significativos de esfuerzos; en el caso del larguero del tornamesa, el esfuerzo crítico se ubica en la esquina de la base. Debido a que el tipo de soporte aplicado, cubre el 100% de su superficie inferior, no ocurre pandeo “vertical”; con lo el flujo de esfuerzos se dirige hacia los extremos. Asimismo, la geometría del perfil tiene un ángulo orthogonal, facilitando así la concentración de esfuerzos; por ello es preferible un redondeo, para aligerar la distribución del flujo.



**Figura 3.19** Vistas general y detalle, del larguero del tornamesa

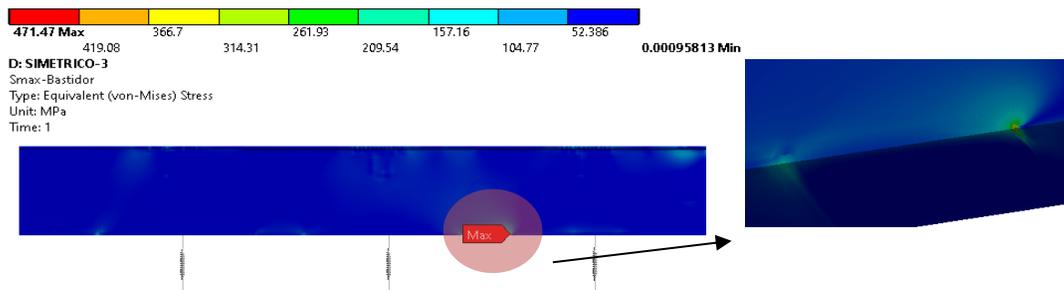
No obstante, este comportamiento es típico del larguero de un tornamesa según casos previos revisados [14], [223]; particularmente la matriz estructural de la figura 3.3 experimenta atenuación en el pandeo transversal, dado a la presencia de las costillas, como se muestra en la siguiente figura una “sombra” rectangular de un rango de esfuerzos entre 47.76 MPa 143.29 MPa. Respecto al FOS del elemento estructural, es de 1.61 aproximadamente, lo cual resulta óptimo para su desempeño.



**Figura 3.20** Vistas alzado, del larguero del tornamesa

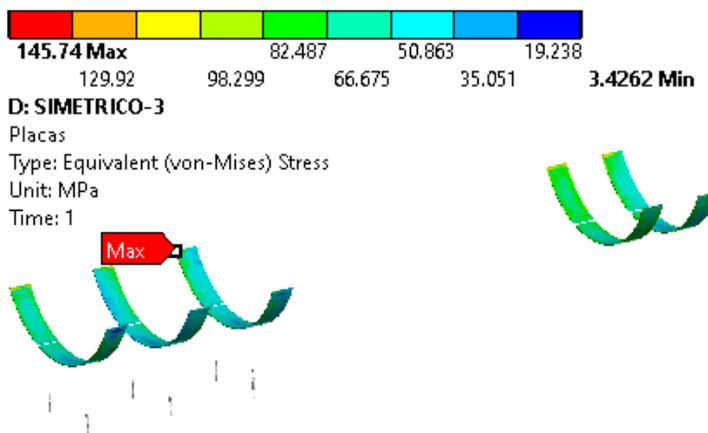
Para el caso del larguero en el bastidor, como se comentó previamente, se debe considerar que sus soportes son “locales” a diferencia del caso anterior, por ello, el flujo de esfuerzo crítico se direcciona a la percha de la tercera suspensión. En similitud con una barra libre con apoyo en los extremos, la tercera percha se asimila a uno de estos apoyos, siendo la carga total distribuida en el tanque la causante del esfuerzo flector. Dicho comportamiento fue también presenciado en el estudio estructural de un semirremolque tipo tanque realizado por [224].

Respecto a los flujos (de esfuerzo) ubicado en la parte superior del larguero, tanto en el tornamesa como el bastidor, son atribuidos a las presiones inducidas en el interior del tanque y el contacto con el rompeolas. Asimismo, este elemento estructural presenta un FOS de 1.46 aproximadamente lo cual cumple con lo delimitado en el apartado 2.2.4.



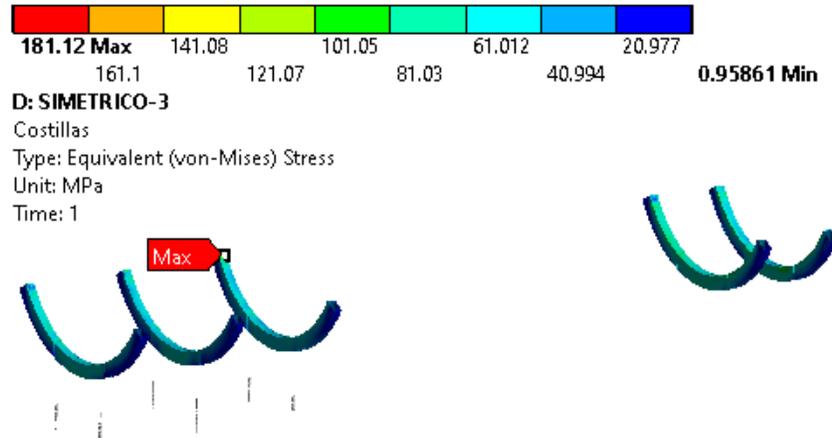
**Figura 3.21** Vistas Lateral y detalle, del larguero del bastidor

Por otro lado, las cargas aplicadas ocasionan un esfuerzo máximo de 145.74 MPa en la 3ra placa de refuerzo; caracterizándose por un FOS de 1.72. Debido al rango libre del tanque a presión que existe entre el tornamesa y el bastidor posterior, produce un esfuerzo predominante en este cuerpo. Según lo comentado en el tópico anterior, el material delimitado es ASTM A36; principalmente por su accesibilidad comercial a nivel nacional.



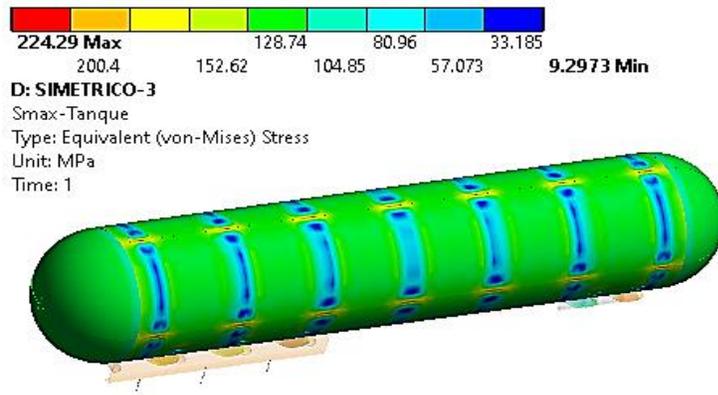
**Figura 3.22** Esfuerzos en las placas de refuerzos

Consecuentemente, dicho comportamiento trasciende en su respectiva “costilla”, siendo el esfuerzo crítico delimitado en 181.12 MPa, cuyo FOS correspondiente es de 1.27. Con una lógica similar, y según lo redactado en párrafos previos, este tipo de perfil se delimito en base al material ASTM A500.A, cuya aplicación comercial (a nivel nacional) se les atribuye a carrocerías vehiculares [225].



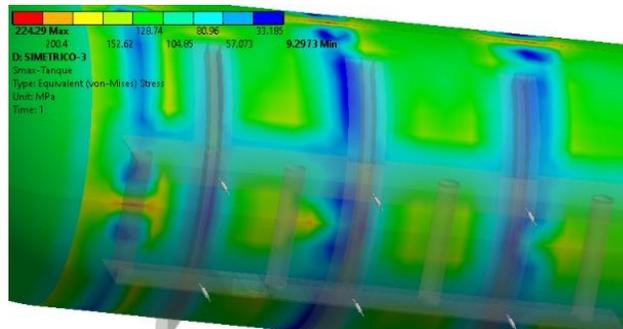
**Figura 3.23** Esfuerzos en las costillas.

Respecto a los esfuerzos experimentados en el cuerpo del tanque a presión, estos son mitigados por la presencia de los rompeolas. En el artículo TD-410.3 de ASME Sec. XII, se indica que los rompeolas también ejercen la labor de anillos rigidizadores puesto que refuerzan la estructura del recipiente a presión [172]; por ello, se mantiene un control del flujo de esfuerzos en el intervalo longitudinal de la estructura. Dicha rigidez favorece a la conexión cuerpo y casco.



**Figura 3.24** Esfuerzos en el tanque a presión

La concentración de esfuerzos es consecuente a los agujeros presentes en los rompeolas, ello debido a la propia geometría aguda de estos (ver apartado “*Definición geométrica del Rompeolas*”). El recipiente, presenta un esfuerzo crítico de 224 MPa, siendo el esfuerzo de fluencia del material 345 MPa le correspondiente a un FOS de 1.54. Dicho esfuerzo máximo se encuentra conforme con lo detallado en el apartado “*Silletas*” del capítulo 1 y también con lo indicado en el apartado 1-3.5.1 perteneciente al Artículo 3 de “*Tanques de Carga-Categoría 331*” en [172]. Cabe recalcar que los estos esfuerzos son atenuados notoriamente en la parte inferior del tanque, ello por medio de las costillas consideradas en la matriz del bastidor y tornamesa, alcanzando así valores menores a 80 MPa.



**Figura 3.25** Esfuerzos en el tanque a presión

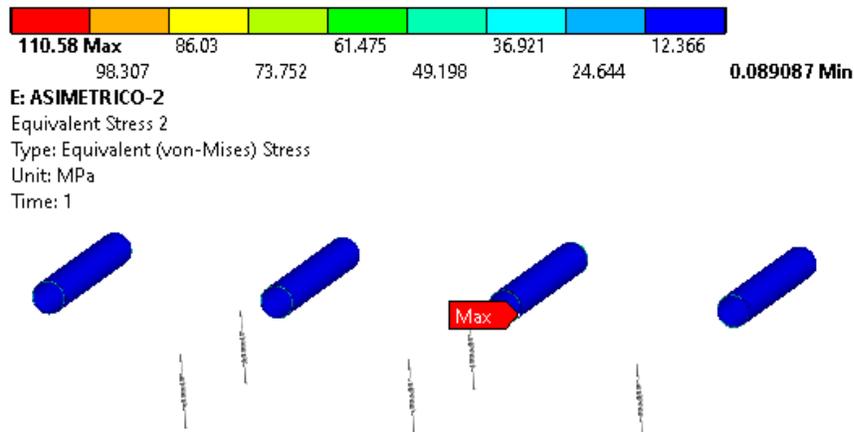
### 3.2.4 Caso 2: Carga asimétrica

Similarmente al caso previo, mediante las técnicas de mallado aplicadas, se obtuvieron valores adecuados para confirmar la calidad de resultados. Según el espectro de control tanto en Oblicuidad como en Ortogonalidad, la calidad global de la malla se cataloga como “Muy Buena”, corroborando una adecuada comunicación informática internodal.

Mesh Metric	Orthogonal Quality	Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	3.3783e-002	<input type="checkbox"/> Min	1.6766e-003
<input type="checkbox"/> Max	0.99999	<input type="checkbox"/> Max	0.97052
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.87969	<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.21138

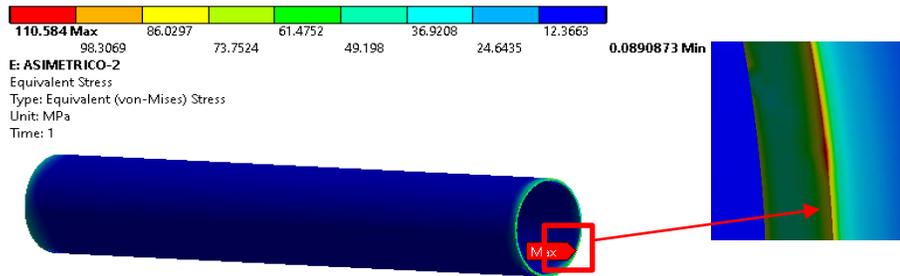
**Figura 3.26** Calidades del mallado del caso asimétrico

En base a las figuras obtenidos, queda clara la influencia de la torsión experimentada por el conjunto: tanque-bastidor, al repercutir en la esquina inferior del perfil; específicamente en el tercer travesaño. Debido a la ausencia de un soporte, el extremo apoyado del perfil, concentra el flujo de esfuerzos. No obstante, dichos eventos son usuales ante el caso ejemplificado, de tal modo que el esfuerzo crítico determinado es de 110.58 MPa, otorgando un FOS de 2.07 aproximadamente; ello es conforme al rango establecido en el apartado “Casos de cargas” (Capítulo 2).

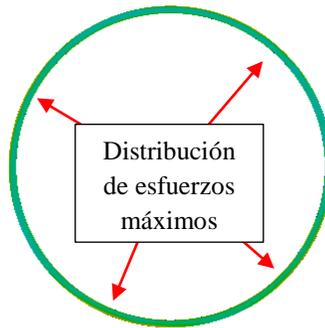


**Figura 3.27** Vista isométrica de travesaños del bastidor

En la siguiente figura, se muestra a detalle el flujo de esfuerzos en el travesaño crítico, uno de los beneficios de utilizar una sección circular es el evitar geométricas angulares. Prácticamente se puede definir en base a la figura con vista alzado, que se delimita una simetría ortogonal (90°) en el plano para el flujo de esfuerzos.

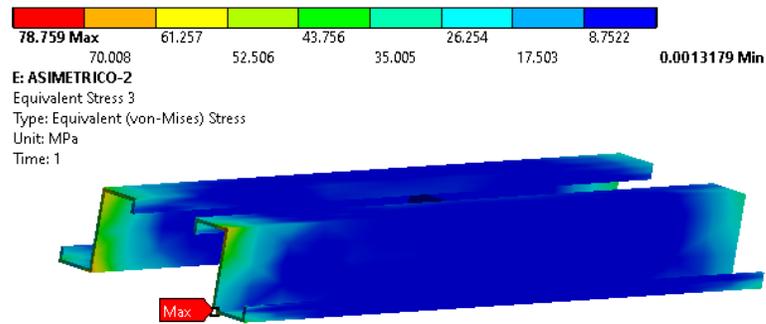


**Figura 3.28** Vista general y detalle, del 3<sup>er</sup> travesaño del bastidor



**Figura 3.29** Vista alzado del 3<sup>er</sup> travesaño del bastidor

Los esfuerzos para los travesaños correspondientes al tornamesa son menores a los del bastidor; esto se debe a que el tipo de soporte asumido en la simulación considera el contacto pleno con la base de cada perfil. Asu vez en la siguiente figura, se muestra que el flujo de esfuerzos se concentra en las esquinas del perfil; ello demuestra necesidad de un redondeo en esa área.



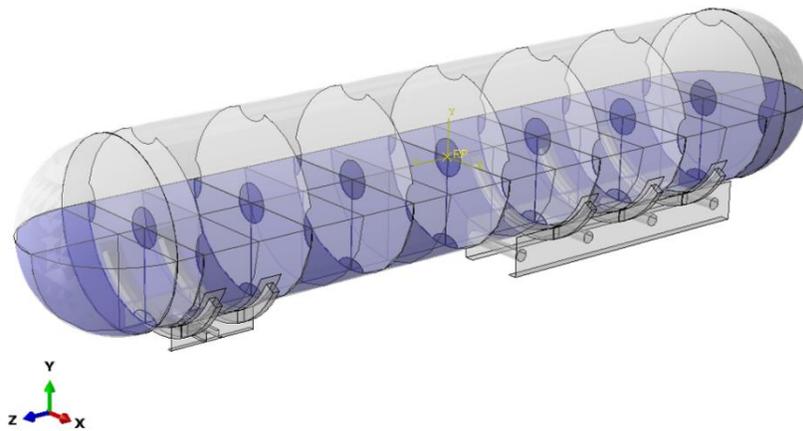
**Figura 3.30** Esfuerzos en los travesaños del tornamesa

### 3.3 Análisis Dinámico

Como se muestra en la figura 2.1, la Fase III tiene como objetivo el desarrollo de la interacción dinámica entre fluido y estructura. Por ello los siguientes tópicos muestran el proceso obtenido al ejecutar los conceptos descritos en el apartado 2.3. A continuación se muestran las características del Set up aplicado para ambos casos de estudio (Ortogonal y Oblicuo).

La siguiente figura muestra la unión del dominio líquidos con los cuerpos estructurales. En función al caso de estudio se realizaron las correspondientes particiones en el cuerpo líquido para evitar la superposición de cuerpo al momento del cálculo. Asimismo, bajo la técnica del Punto de Referencia<sup>71</sup> (RP, de color amarillo ubicado en el centro del cuerpo) fue posible agilizar el Set up, dado que en la dinámica este representaba todos los cuerpos.

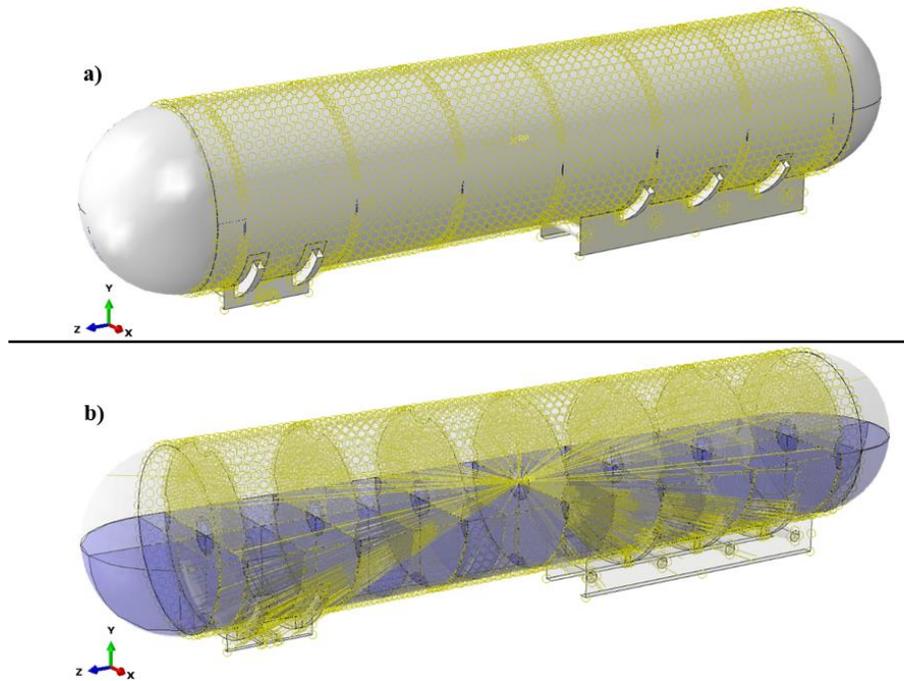
<sup>71</sup> RP= Reference Point



**Figura 3.31** Ensamble de dominios líquido y estructural para el Caso 1

Posteriormente se aplicó la técnica de “soldadura” de cuerpos estructurales, detallada en el apartado “*Enlace de dominio estructural*”. Como se muestra en siguiente imagen, los puntos amarillos representan el enlace tanto para los cuerpos internos como externos al tanque. En tal sentido, la figura 3.29-b muestra la conexión de cuerpos con RP; el punto de referencia para la dinámica y el ensamblado de cuerpos fue definido como el centro de gravedad del tanque a presión.

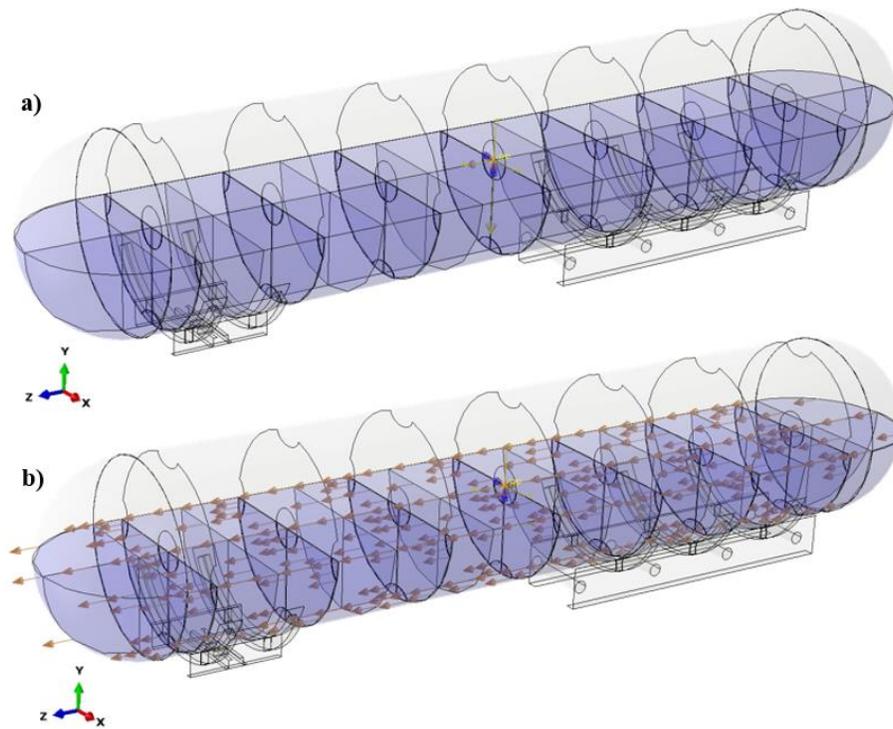
Donde es importante recalcar que la presente simulación únicamente contemplo en primera instancia el movimiento longitudinal, a causa de tener mayor incidencia en la física del estudio; con la finalidad de compactar el modelo de estudio y así atenuar la carga computacional a procesar.



**Figura 3.32** Enlace de dominio estructural: a) Soldadura de cuerpos estructurales, b) Conexión con RP

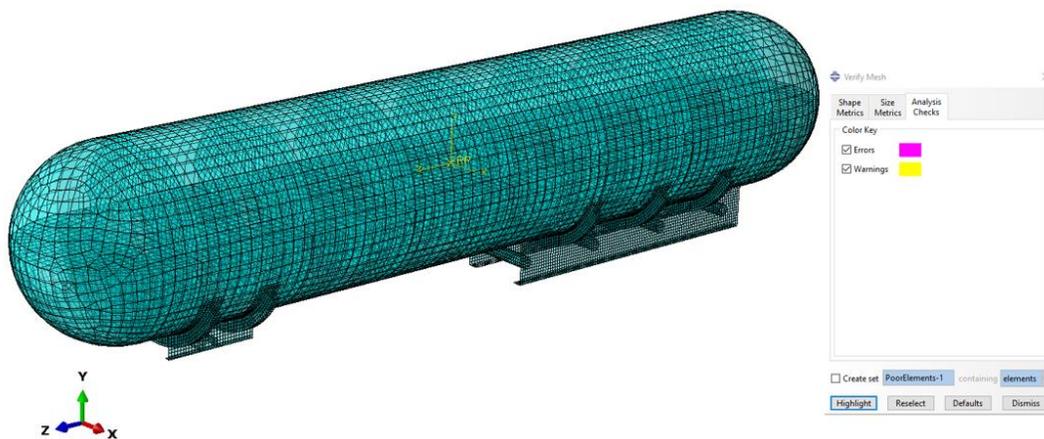
Las condiciones fronteras aplicadas parten de la premisa que el cuerpo inicia con una velocidad de 70km/hr y posteriormente el frenado inminente. En tal sentido, la figura 3.31-a muestra la carga de la gravedad y el vector de dirección de movimiento del vehículo en función de lo parametrizado en RP. Debido al uso de rompeolas, la torsión d los ejes X y Y (planos cartesianos globales representados en las imágenes) es mínima, por ende, se restringe el desplazamiento (U1, U2) y rotación (UR1, UR2) en estos. Tras dejar libre a desplazamiento (U3) y rotación (UR3) el eje Z, el algoritmo de cómputo se aligera.

Correspondientemente, en la figura 3.31-b se muestran los vectores de velocidad predefinidos aplicados al fluido. Respecto a la velocidad del dominio estructural, es representada por RP, según los grados de libertad parametrizados como se comentó previamente.



**Figura 3.33** Condiciones frontera para casos FSI: a) Gravedad, b) Dirección de movimiento

Finalmente, el mallado es corroborado por medio de la herramienta “Verify Mesh” la cual resalta los elementos de error en color fucsia y los de advertencia en amarillo. No obstante, el mallado aplicado no presenta dichas características; por ende, es adecuado para el cálculo.



**Figura 3.34** Mallado de cuerpos para FSI en Abaqus

### 3.3.1 Caso 1: Rompeolas Ortogonal

Del cálculo realizado por Abaqus, se extrajo el siguiente comportamiento correspondiente a la FSI. A continuación, se muestran los tiempos con mayor relevancia para el Caso N°1 en la simulación de 1 segundo; donde se detalla gráficamente la dinámica del líquido ejecutada en cada compartimiento. Posteriormente se describirá dicho análisis en base a los datos extraídos del programa.

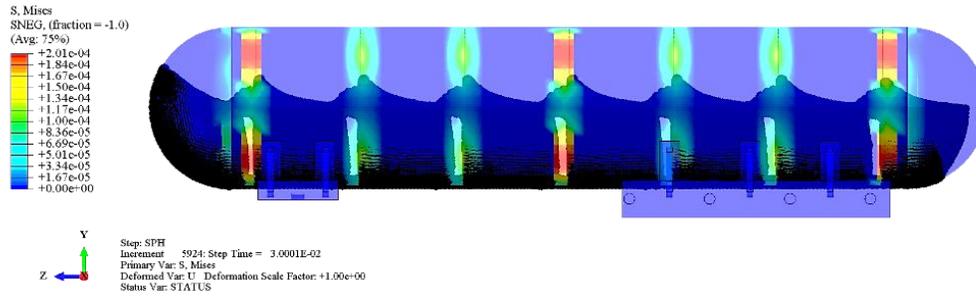


Figura 3.35 Caso 1 en FSI-0.03seg

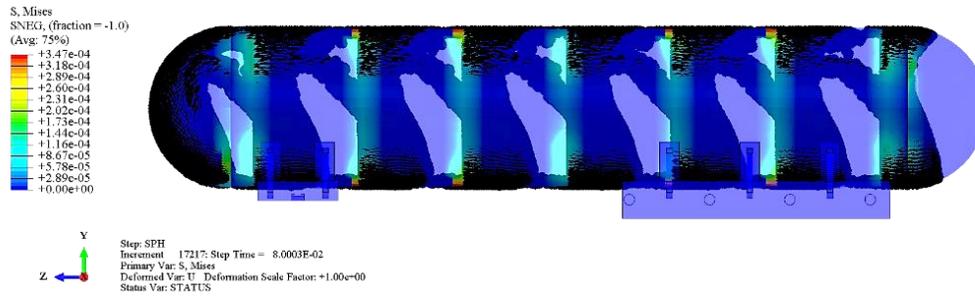


Figura 3.36 Caso 1 en FSI-0.08seg

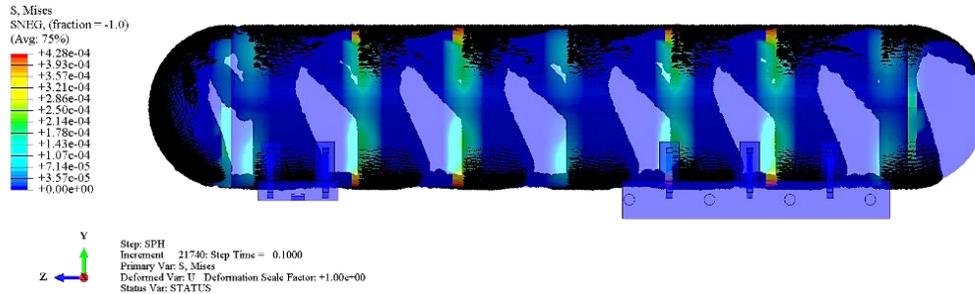


Figura 3.37 Caso 1 en FSI-0.1seg

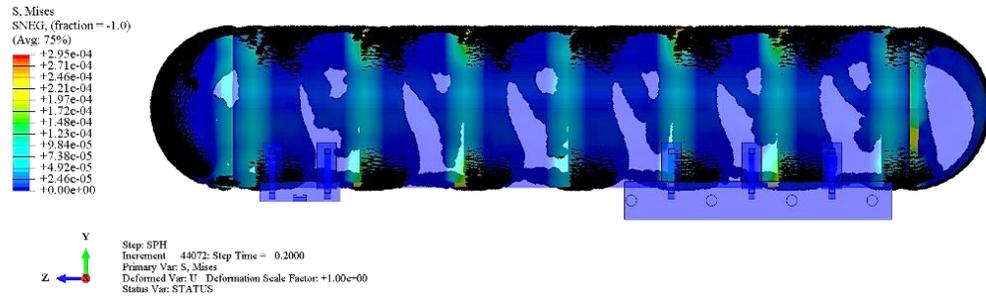


Figura 3.38 Caso 1 en FSI-0.2seg

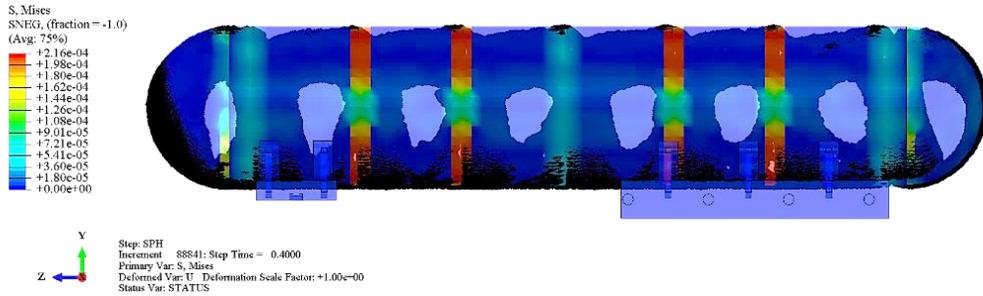


Figura 3.39 Caso 1 en FSI-0.4seg

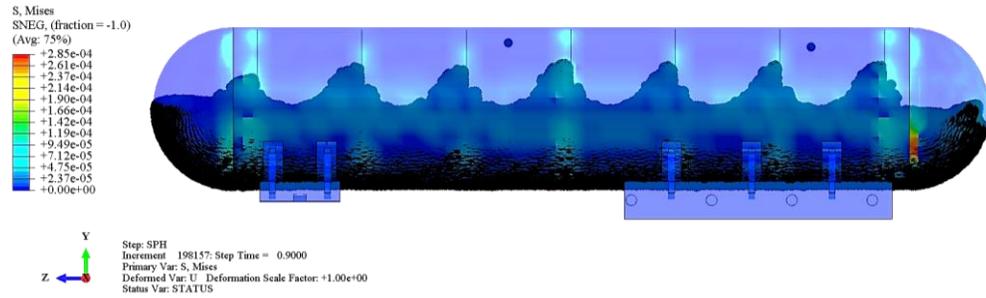


Figura 3.40 Caso 1 en FSI-0.9seg

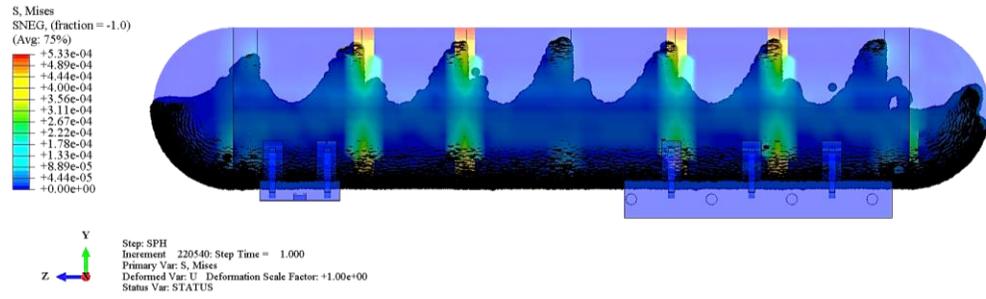
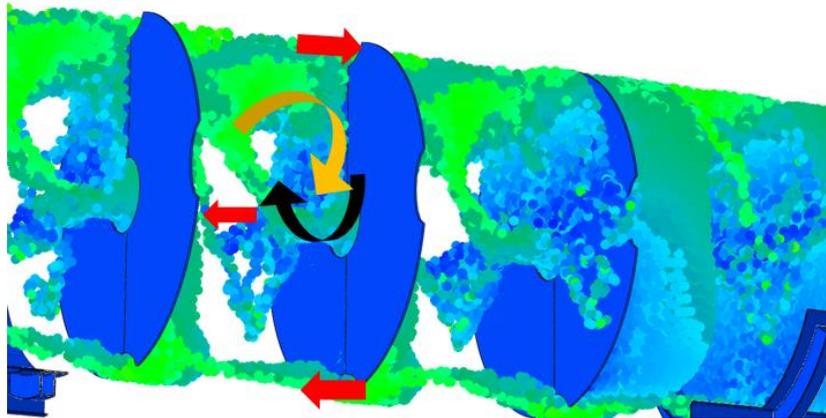


Figura 3.41 Caso 1 en FSI-1seg

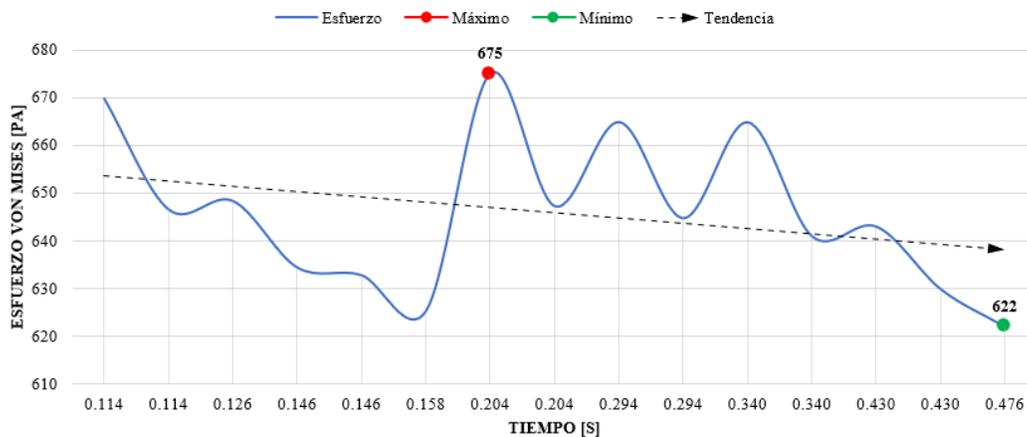
Posterior al frenado (0.03seg) se origina el oleaje como se muestra en la imagen 3.32, para el presente caso de rompeolas, la dirección de la ola es en dirección del movimiento

del vehículo. Seguidamente, la intercomunicación líquida de cada compartimiento, lo cual es posible gracias a los agujeros de los rompeolas, en cuanto a las figuras 3.33 y 3.34 siguen este proceso donde adicionalmente el líquido fluye por el compartimiento superior; cabe detallar la característica de esta maniobra es que la acumulación de volumen líquido en el 1<sup>er</sup> compartimiento decrece hasta el último compartimiento (8<sup>vo</sup>).



**Figura 3.42** Caso 1 en FSI-Dirección de flujos en rompeolas en 0.02seg

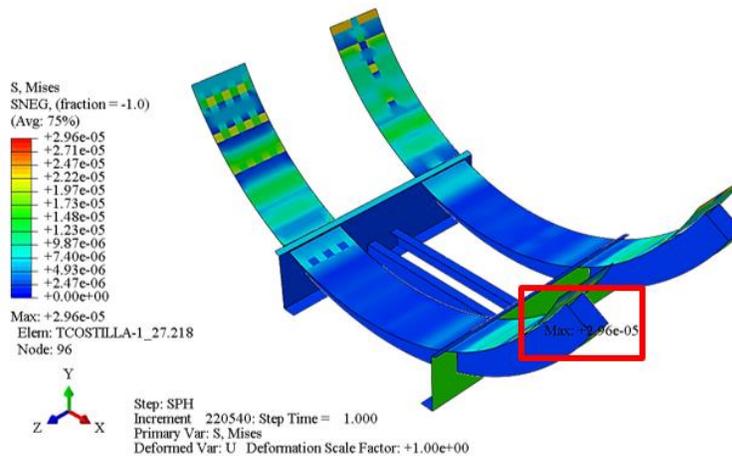
El momento cúspide del oleaje se representa característicamente en la figura 3.35 el oleaje negativo detallado en figura 3.39. Este concepto se le atribuye cuando el flujo que ingresa por los orificios se contrarresta con el flujo que repercute de los rompeolas. En la siguiente figura se detalla el flujo de esfuerzos respectivos a la zona inferior del tanque que se encuentra en contacto con la segunda silleta del tornamesa.



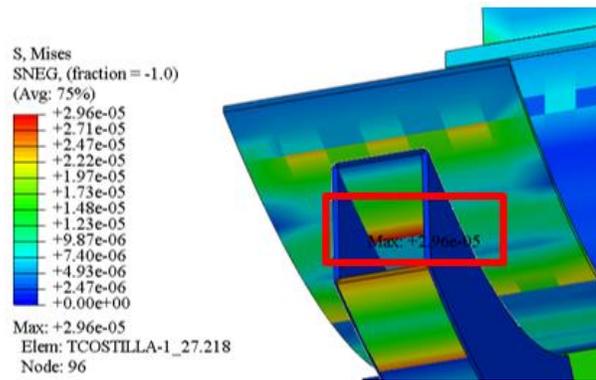
**Figura 3.43** Caso 1 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Tanque

Queda establecido que el momento crítico, en esfuerzos estructurales inducidos por la dinámica del fluido, es la figura 3.34 debido a que más del 50% del volumen líquido correspondiente al compartimiento se desplaza verticalmente hacia dicha zona. No obstante, no es el único punto crítico, puesto que al momento de iniciar el oleaje en la figura 3.35 (a los 0.1seg) se alcanza el 2<sup>do</sup> punto crítico como se muestra en la figura 3.39. De tal modo, luego de haber llegado al punto máximo a los 0.204seg, la tendencia decae.

No obstante, propio de la inercia del líquido es originado el suboleaje (figuras 3.37 y 3.38); el cual tiene incidencia en la estructura del vehículo mas no es un punto crítico en el tanque como señala la figura 3.40 al presentar menor impulso que el oleaje original, por ende, el volumen líquido correspondiente a cada compartimiento se encuentra en contacto con la superficie inferior de este. En esta misma figura se aprecia el pico de esfuerzos en el tanque, correspondiente al punto temporal representado en la figura 3.35, a causa de ser el momento cúspide del oleaje.

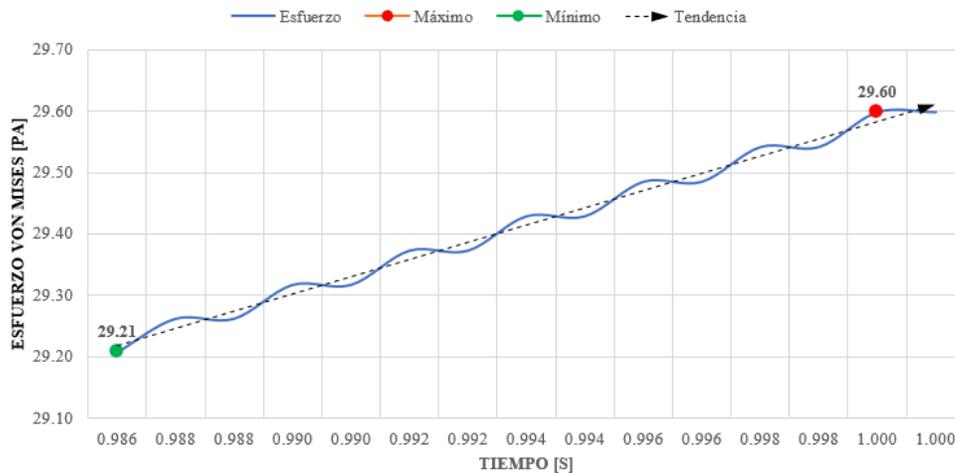


**Figura 3.44** Tornamesa del Caso 1 en FSI-1seg



**Figura 3.45** Enfoque de Tornamesa del Caso 1 en FSI-1seg

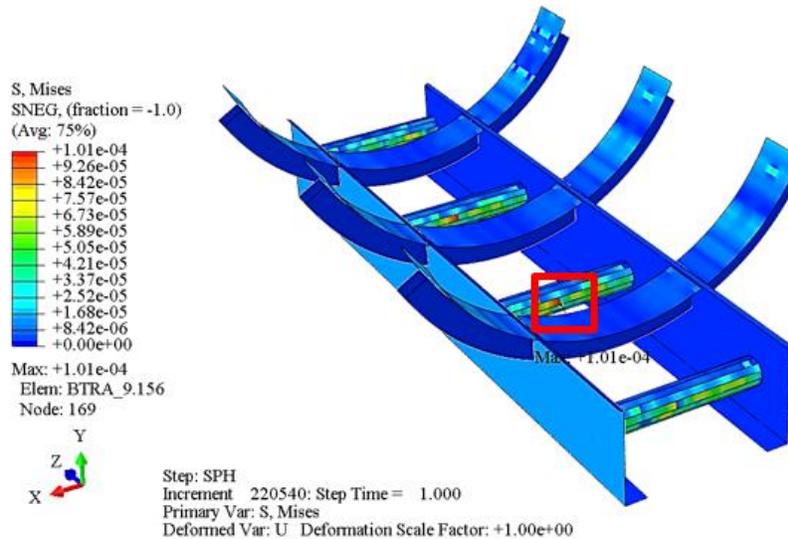
La repercusión del chapoteo en el arreglo estructural del Tornamesa se muestra en la figura 3.41 como se muestra a detalle en la figura 3.42 la mayor incidencia de esfuerzos radica en el conjunto de costillas inicial, al contacto con la placa de refuerzo; lo cual demuestra su utilidad al minimizar la exigencia en el perfil. En la siguiente figura se detalla el flujo de esfuerzos críticos en esta zona.



**Figura 3.46** Caso 1 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Tornamesa

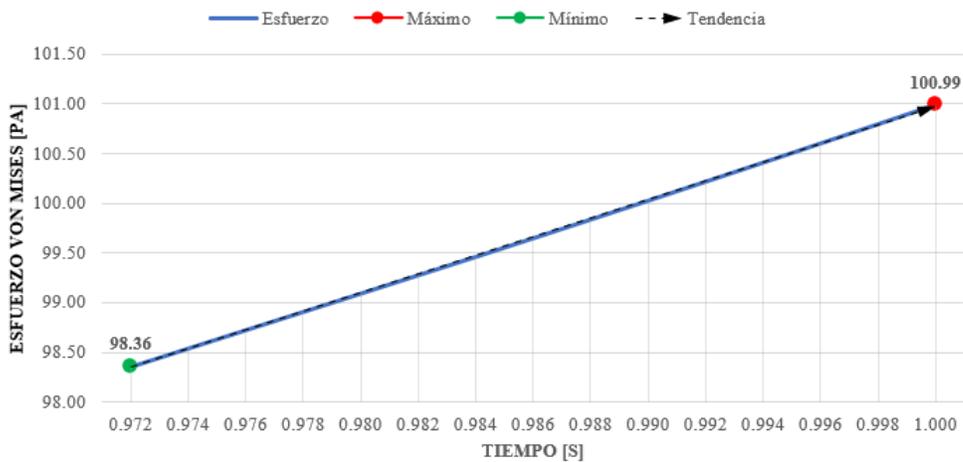
La exigencia máxima de la costilla ocurre en los últimos instantes de la simulación, quedando detallado que los esfuerzos estructurales en el perfil de la costilla incrementan hasta este límite. Como se comentó previamente, la respuesta mostrada en la figura 3.41 se debe a

la concentración de líquido en el 1<sup>er</sup> compartimiento, por ende, el peso de este volumen genera un momento los perfiles estructurales señalados.



**Figura 3.47** Bastidor posterior del Caso 1 en FSI-1seg

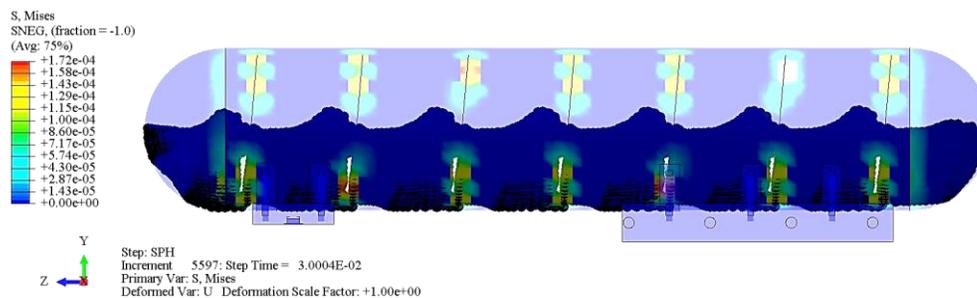
Respecto a el Bastidor posterior del vehículo en el Caso 1, se muestra como zona crítica el 3<sup>er</sup> travesaño. Como se en la siguiente figura el arreglo estructural muestra un comportamiento estructural similar al caso del Tornamesa; donde el máximo esfuerzo se presenta al finalizar la maniobra de conducción. No obstante, la distribución de esfuerzos máximos es lineal a diferencia de la figura 3.43. Cabe recalcar que al igual que el anterior caso, esta tendencia se revierte y los esfuerzos disminuirían al desarrollar el caso con más tiempo de acción. Ello debido a que la inercia hidráulica se detiene y el fluido encuentra el estado de reposo, donde entra en contacto pleno con la superficie inferior del tanque y se distribuye uniformemente en cada compartimiento por la presencia de los agujeros (inferiores, laterales y central) de los rompeolas.



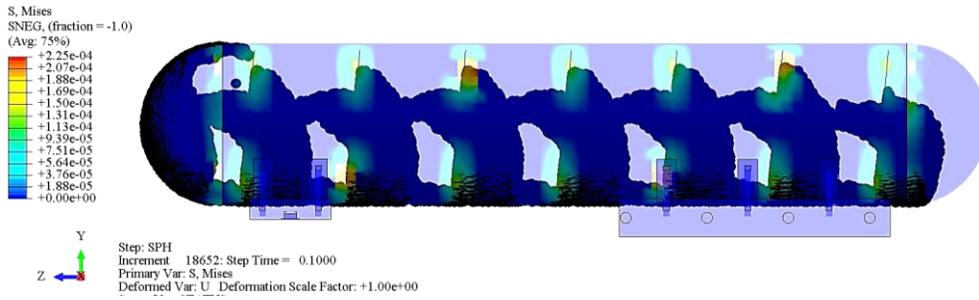
**Figura 3.48** Caso 1 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Bastidor

### 3.3.2 Caso 2: Rompeolas Oblicuo

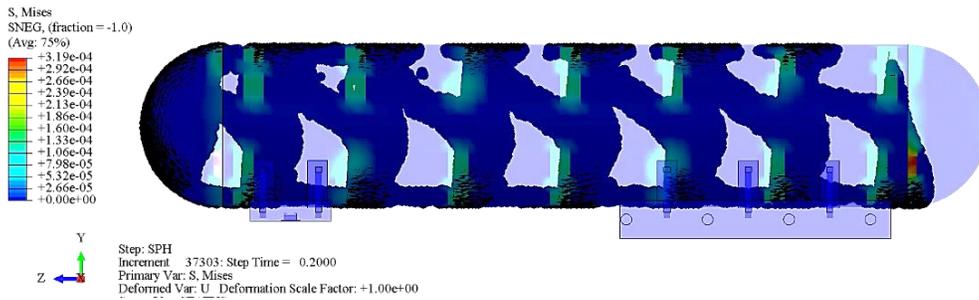
Similarmente, de la programación de Abaqus se extrajo el siguiente comportamiento correspondiente a la FSI. A continuación, se muestran los tiempos relevantes para el Caso N°2 en la simulación de 1segundo. De igual manera a lo expuesto previamente donde los rompeolas son ortogonales, en esta situación también se detalla gráficamente la dinámica del líquido ejecutada en cada compartimiento con rompeolas oblicuos. Posteriormente se describirá dicho análisis en base a los datos extraídos del programa, mostrando los puntos críticos geométrica y temporalmente.



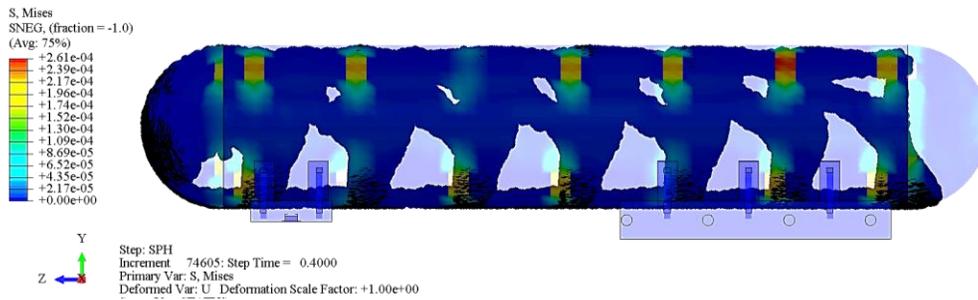
**Figura 3.49** Caso 2 en FSI-0.03seg



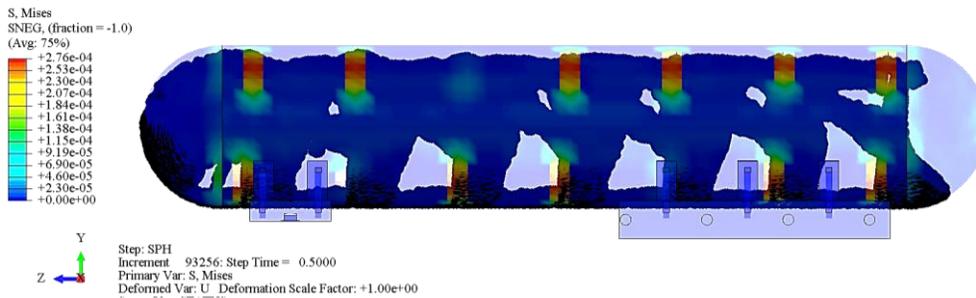
**Figura 3.50** Caso 2 en FSI-0.1seg



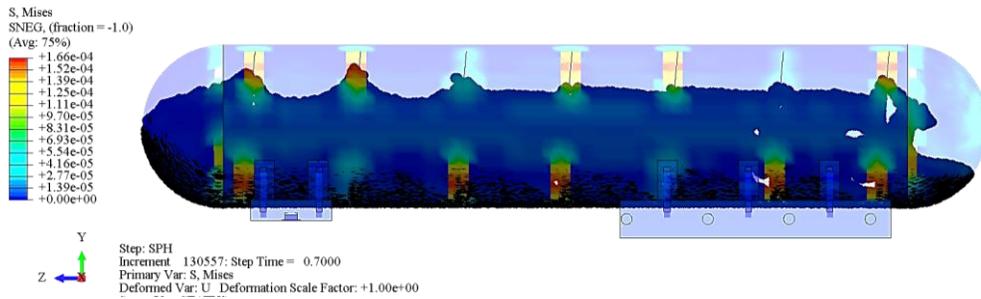
**Figura 3.51** Caso 2 en FSI-0.2seg



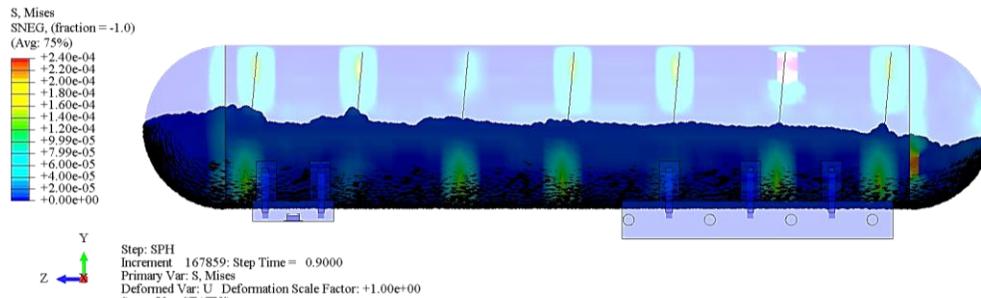
**Figura 3.52** Caso 2 en FSI-0.4seg



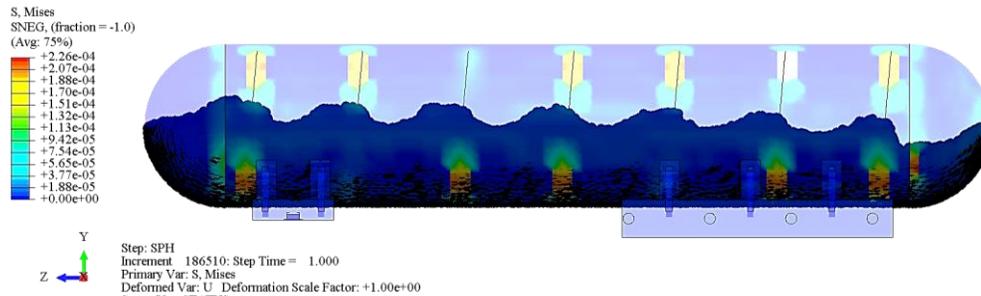
**Figura 3.53** Caso 2 en FSI-0.5seg



**Figura 3.54** Caso 2 en FSI-0.7seg

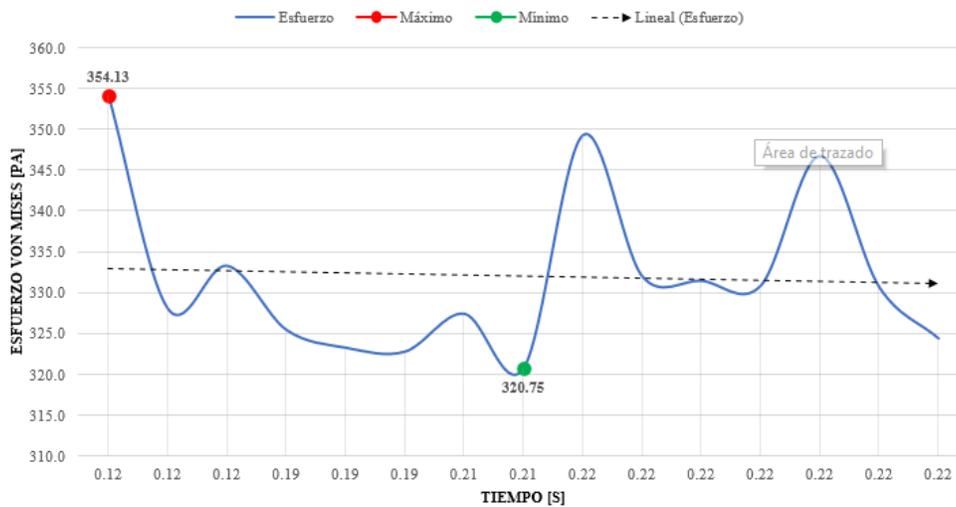


**Figura 3.55** Caso 2 en FSI-0.9seg



**Figura 3.56** Caso 2 en FSI-1seg

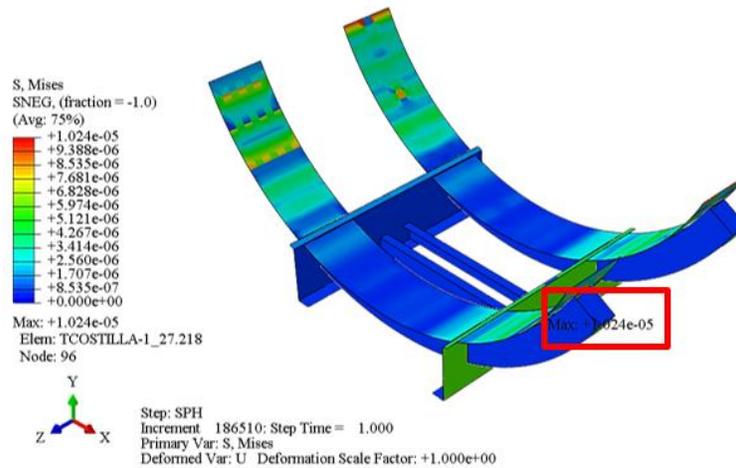
Al incluir los rompeolas con 5° de inclinación se desarrolla lo mostrado en la serie de figuras. Donde posterior al frenado inminente (0.03 seg) se origina el oleaje en dirección contraria al movimiento del vehículo (-Z, en coordenadas), como se muestra en la figura 3.46. Posteriormente por medio de la comunicación líquida entre cada compartimiento (agujeros laterales, central e inferior) el fluido interactúa con la estructura; siendo el caso particular del 1er compartimiento el cual sigue el proceso del oleaje debido a la geometría del casco. La intercomunicación por los agujeros superiores inicia en la figura 3.47 (aperturada por el 1er compartimiento), luego en el tiempo de la figura 3.48 inicia el proceso de flujo negativo (detallado en el apartado anterior) partiendo desde el primer compartimiento.



**Figura 3.57** Caso 2 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Tanque

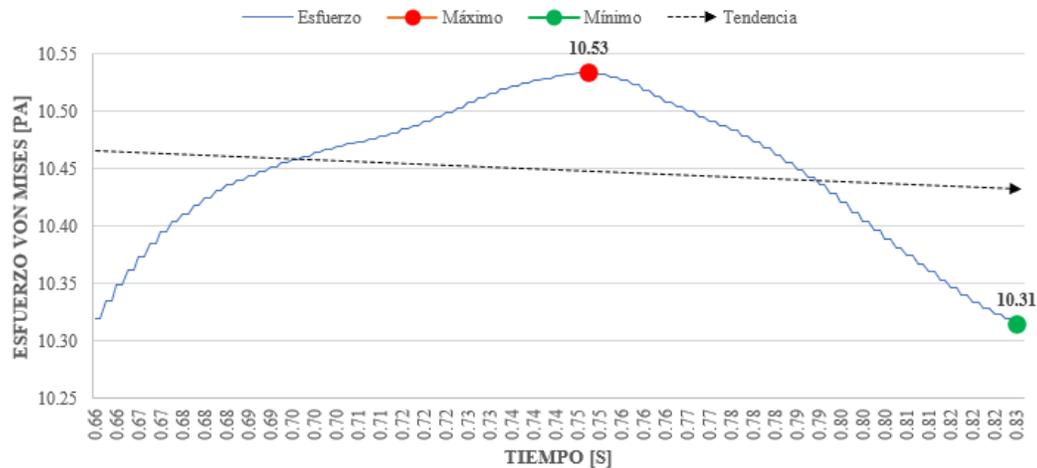
La figura 3.54 muestra el flujo de esfuerzos máximos ocurridos en la misma zona del crítica del apartado anterior. Donde la figura 3.47 muestra el punto temporal de esfuerzo estructural máximo, este se manifiesta en la costura: tanque-casco de la parte trasera, consecuente de la acumulación de volumen líquido en la parte inferior del rompeolas. Los otros 2 picos de la gráfica se muestran en el tiempo de la figura 3.48, debido a que el líquido es esparcido en la superficie del rompeolas se atenúa la exigencia estructural. La tendencia de la gráfica (pendiente negativa) indica que los esfuerzos disminuyen a lo largo del proceso de simulación.

Respectivamente, en la figura 3.49 (momento cúspide del proceso) se encuentra el degrade de oleaje, puesto que a diferencia del 1<sup>er</sup> el 8<sup>vo</sup> presenta menor volumen líquido; no obstante, ello es nivelado en a lo largo del proceso como es el caso de la figura 3.50 donde se presenta el oleaje negativo enfocado al agujero central y laterales. Como se sigue detallando en las figuras 3.51 y 3.53 la acumulación de líquido desde el 1<sup>er</sup> hasta el 8<sup>vo</sup> compartimento se nivela gradualmente. Finalmente, similar al caso previo (ver figura 3.36), por inercia nace el suboleaje, figura 3.53. A diferencia del oleaje inicial, en este caso las paredes (internas) inferior del tanque se encuentra en contacto pleno con el fluido.

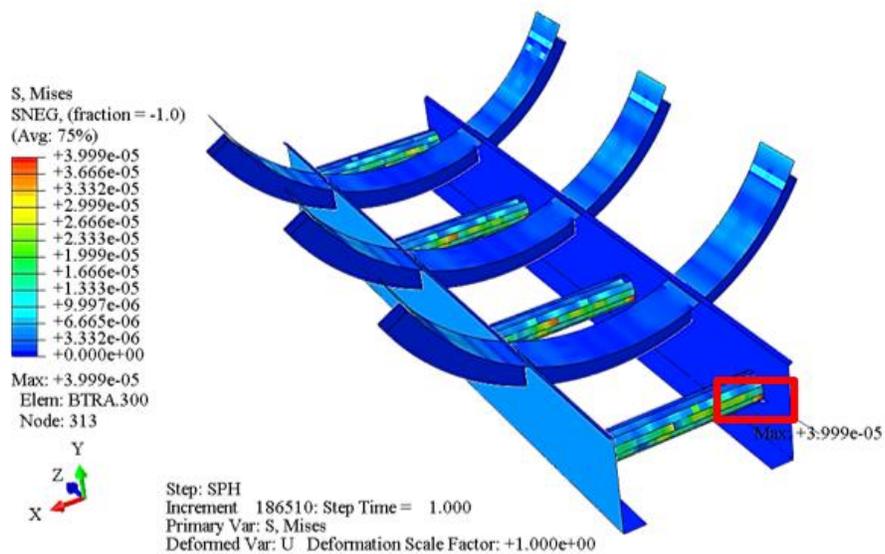


**Figura 3.58** Tornamesa del Caso 2 en FSI-1seg

Al igual que el caso anterior (rompeolas ortogonales), las costillas del tornamesa son las que experimentan mayor exigencia estructural en el conjunto de perfiles. Siendo los extremos de estas las del esfuerzo crítico. De igual manera la placa de refuerzo atenúa este fenómeno. La siguiente figura detalla el grafico de esfuerzos máximos en la costilla de la presente matriz estructural, este ocurre en el intervalo de tiempo entre la figura 3.50 y la figura 3.52; debido a la tendencia con pendiente negativa, posteriormente al atenuarse el oleaje los esfuerzos se minimizan.

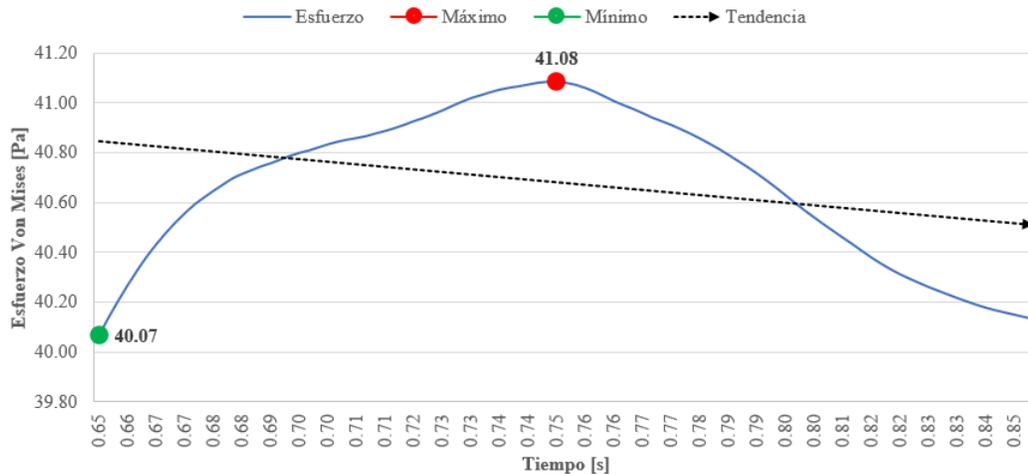


**Figura 3.59** Caso 2 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Tornamesa



**Figura 3.60** Tornamesa del Caso 2 en FSI-1seg

Respecto al Bastidor Posterior, nuevamente la exigencia estructural se manifiesta en los travesaños; no obstante, esta vez se enfoca en los extremos de este perfil. En base a lo detallado en el flujo de esfuerzos máximos de la figura 3.58, el pico radica en el intervalo de tiempo entre las figuras 3.50 y 3.52; donde la el oleaje decae e inicia a uniformizarse el volumen líquido por compartimientos. La tendencia con pendiente negativa indica que el flujo de esfuerzos en esta zona decae con el tiempo restante. A diferencia del arreglo estructural del tornamesa, en este caso no se manifiesta el esfuerzo crítico en las costillas debido a la ubicación del mismo; ello se relaciona directamente con la acumulación de líquido en el 1<sup>er</sup> compartimiento (como se comentó previamente).



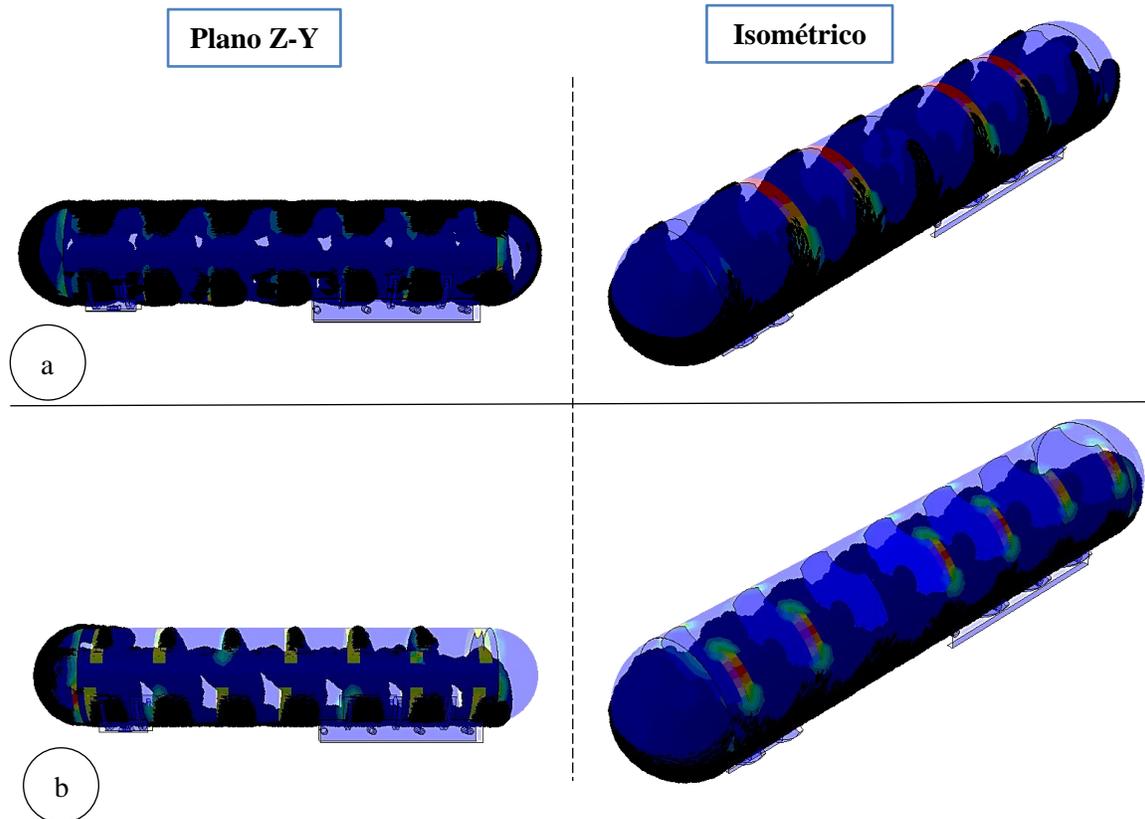
**Figura 3.61** Caso 2 en FSI-Distribución de esfuerzos en el Bastidor

### 3.3.3 Versus de casos

En base a lo detallado previamente, los siguientes párrafos se encuentran orientados a contrastar ambos casos; ello con la finalidad de concretar que opción tiende a proporcionar mejores prácticas en la industria. En función al flujo de esfuerzos máximos detallado en las figuras 3.40 y 3.54, el Caso 2 presenta el pico de esfuerzos 0.08 segundos antes que el Caso 1; asimismo el valor representa una fracción del Caso 1 experimentando esfuerzos de 48% menores. Ello corrobora la premisa de que los 5° de inclinación inducidos en los rompeolas, anticipan la dinámica del oleaje lo cual refuerza la estabilidad dinámica del vehículo. Siendo el caso, se recomienda implementar esta tecnología en futuras prácticas de manufactura metalmeccánica.

La dinámica desempeñada por el líquido varía en su totalidad por la geometría del rompeolas. En tal sentido, al aplicar los rompeolas oblicuos el inicio del oleaje fluye en contra de la dirección del movimiento (ver figura 3.46), mientras con rompeolas ortogonales va en dirección del movimiento del vehículo (ver figura 3.32). A causa de ello el chapoteo descrito por el Caso N°2 no es tan “brusco” en contraste con el Caso N°1, como detallan las figuras 3.36 y 3.49; a los 0.4 segundos el Caso N°1 se encuentra en la cúspide del oleaje para todos los compartimientos, mientras el Caso N°2 se encuentra aperturando el oleaje sin incluir el

8<sup>vo</sup> compartimiento (inicia el chapoteo 0.2 segundos más tarde). La ventaja que representan los 5° de oblicuidad se detalla al contrastar la figura 3.53 frente a la figura 3.38 puesto que el suboleaje inercial ha sido prácticamente nulo en comparación con el Caso N°1.



**Figura 3.62** Vistas de los momentos críticos del chapoteo: a) Caso N°1-0.2seg, b) Caso N°2-0.12seg

Al contrastar los datos presentados en los gráficos 3.43 y 3.56 queda claro que la repercusión experimentada en el Tornamesa fue 180% mayor en el Caso N°1 en comparación con el Caso N°2. Adicionalmente es notorio el retardo en atenuar este fenómeno en el Caso N°1; puesto que, a diferencia, al incluir los rompeolas oblicuos, el punto crítico se manifiesta 0.25 segundos antes. Por tal motivo la tendencia del 2<sup>do</sup> caso es negativa. Bajo el mismo concepto en, las figuras 3.45 y 3.58 pertenecientes al Bastidor posterior el comportamiento estructural es similar; siendo 40% menor el esfuerzo crítico del Caso N°2 frente al caso de

rompeolas ortogonales. Igualmente, el pico se manifiesta 0.25 segundos previos al finalizar el cálculo; precisamente al estabilizarse el volumen líquido entre los compartimientos (como se describió en el apartado anterior).

Cabe recalcar que el desempeño de disipación de energía cinética al aplicar los rompeolas es del 88% en contraste con el caso de un recipiente “desnudo” [238]. Asimismo, esta energía cinética repercute en el umbral de volcadura lateral del vehículo se encuentra estrechamente relacionado con la carga lateral experimentada. Según la bibliografía para un llenado parcial (50%) el estimado característico para una sección circular es de 0.35g – 0.4g [226], [227]; no obstante, se debe tener en cuenta que dicho dato varía inversamente proporcional en función al porcentaje de llenado [228], [229]. En tal sentido los resultados presentados en este capítulo corroboran lo expuesto previamente en el apartado “Proceso de dimensionamiento del Rompeolas”, donde se explica que la matriz oblicua de Rompeolas proporciona estabilidad lateral y longitudinal al vehículo al atenuar las cargas del chapoteo [174], [178], [179]. De este modo, queda corroborado el beneficio de los rompeolas con 5° de inclinación postulado en la tesis de X. Zheng [178].

## CONCLUSIONES

En base a los resultados detallados en el 3<sup>er</sup> capítulo, a continuación, se presentan los siguientes comentarios característicos de cada Fase del estudio en el documento (ver figura 2.1).

1. Se diseñó el semirremolque tipo tanque GLP, cumpliendo los requisitos legales estipulados por organismos peruanos como: Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (MTC); así mismo estos estuvieron ligados directamente con entidades internacionales como: Departamento de Transportes de los Estados Unidos (DoT), Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME); asimismo el diseño presentado se encuentra influenciado por el comercio metálico peruano. Asimismo, se cumple factor de seguridad establecido mayor a 1.
2. En el presente documento, continuo con el caso de estudio presentado por G. Franck [201] mediante la Fase II, se comprobó el beneficio estructural al incorporar perfiles cerrados y circulares como travesaños en lugar de un perfil tipo *Z de alas atiesadas*. Dicha sustitución redujo los esfuerzos en 39%, atribuidos por las geometrías angulares del perfil. Este fenómeno permite al diseñador aplicar un material de menor exigencia para el esfuerzo de fluencia. En adición, se contribuye a reducir el diseño estructural empírico de vehículos no motores similares, al proporcionar un rango entre 1.2-2.5 para el factor de seguridad del tornamesa y bastidor de un semirremolque.
3. Resulta preferible incorporar la matriz de rompeolas oblicuos ( $5^\circ$ ) en contraste con el conjunto de rompeolas convencionales, puesto que los esfuerzos experimentados por los arreglos estructurales del Tornamesa y el Bastidor posterior son atenuados en 49% y 40%, respectivamente. Por ello, con esta novedosa matriz oblicua de rompeolas se espera que la vida útil del equipo supere el 30% respecto al caso convencional, debido a que los esfuerzos máximos manifestados en la estructura ante el caso crítico de estudio disminuyen en más de la tercera parte salvaguardando la integridad estructural del

conjunto. Adicionalmente, se presentó los modelos factibles de Rompeolas (para semirremolque tipo tanque GLP) con sus respectivos parámetros de diseño influenciados por normativas peruanas (MTC) e internacionales (DoT).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gestión, “Son 1,157 camiones cisterna y 366 tanques que transportan GLP a granel en el Perú, señala Opecu,” 2020. Accessed: Mar. 15, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2LXa0bN>
- [2] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “Decreto Supremo N° 058-2003-MTC,” Perú, 2003. Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dDnaa6>
- [3] Ministerio de transporte y comunicaciones del Perú, “Anuario Estadístico 2018,” MINCETUR, Perú, 2015. Accessed: Mar. 02, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2y5u8VS>
- [4] P. Ruiz, “Planificación del mantenimiento preventivo para los neumáticos de la flota de tractocamiones para optimizar su disponibilidad de la empresa Grupo Transpesa S.A.C.,” Facultad de Ingeniería Mecánica, Perú, 2018. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2zFQ229>
- [5] M. Lucana. et al, “Guía de orientación al usuario del transporte terrestre,” MINCETUR, Perú, 2015.
- [6] Banco Mundial., “Perú,” 2020. Accessed: Apr. 13, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2T2gAS4>
- [7] A. Rodríguez. et al, “Reporte Semestral de Monitoreo del Mercado de Hidrocarburos,” Osinergmin, Perú, 2019. Accessed: Apr. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2LquCbZ>
- [8] Ministerio de Energia y Minas, “Producción fiscalizada de Gas Natural. Marzo-2020 (MMPCD),” MINEM, Perú, 2020. Accessed: May 31, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2XkZEce>
- [9] Ministerio de Energia y Minas, “Producción de Petroleo. Marzo-2020 (Barriles Por Día),” MINEM, Perú, 2020. Accessed: May 31, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2U1KC9b>
- [10] Banco central de la reserva del Perú, “Reporte de inflación - Panorama actual y proyecciones macroeconómicas 2019 - 2021,” BCRP, Perú, 2019. Accessed: Apr. 13, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Wto9n8>

- [11] SSAB, “Trailer design guideline-STRENX: The fastest route to efficient transport,” Suecia, 2015. Accessed: May 24, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ej15h6>
- [12] G. Cadillo. et al, “Resolución de consejo directivo - Organismo supervisor de la inversión en Energía y Minería - Osinergim N° 012-2020-OS/CD,” Osinergmin, Perú, 2020. Accessed: Feb. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WZIJUG>
- [13] Seminersonly, “Commercial vehicle frame design,” 2019. Accessed: Mar. 17, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2y13MnQ>
- [14] O. Bejarano, “Diseño de una cisterna de 6000 galones para transportar Diesel 2, normado por los ministerios de transportes y comunicaciones – Energía y Minas,” Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2009. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WUbkRQ>
- [15] H. Vargas, “Mejora del diseño de un semirremolque volquete encapsulado para incrementar la carga útil en el transporte de mineral a granel,” Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú, 2018. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2O08K8Q>
- [16] “C. Chagoyén et al., ‘Propuesta de chasis de semi-remolque de 3 ejes de 15.5m que reduce el impacto Ambiental’, paper, Brasil, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/36apy5r>. [Accedido: 30-Abr-2020]”.
- [17] v. D’Alessandro, “Modeling of tank vehicle dynamics by fluid sloshing coupled simulation,” Italia, 2011. Accessed: Jul. 05, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3izXFtc>
- [18] W.-B. et al Shagguan, “Simulation of a partly filled tank vehicle combination in TruckSim and tank design optimisation,” China, 2016. doi: <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2016.077329>.
- [19] A. Kolaei, “Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll stability of a partly-filled tank truck,” 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.01.008>.
- [20] X. Cui, “Simulating Fluid-Structure Interaction in Smoothed Particle Hydrodynamics Method,” 2018. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3ULITCO>
- [21] Q. Yang, C. Roy, and D. Tafti, “SPH Simulation of Fluid-Structure Interaction Problems with Application to Hovercraft,” 2011. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3G4WksE>

- [22] J. Tamayo. et al, “Industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú – 20 Años de aporte al desarrollo del país,” Osinergmin, Perú, 2017. Accessed: Apr. 02, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2T2eNwE>
- [23] Instituto Nacional de Estadística e Informática, “Perú: Características de las viviendas particulares y los hogares. Acceso a servicios básicos,” Perú, 2017. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bvHzMy>
- [24] Ministerio de Energía y Minas, “Anuario Estadístico 2019-Subsector Hidrocarburos,” Perú, 2020. Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dDKtIZ>
- [25] Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, “Reporte Estadístico Minero Energético 2019,” Perú, 2020. Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3hghIhK>
- [26] Gestión, “En tres años, consume de GLP vehicular será mayor al domiciliario,” Perú, 2020. Accessed: Mar. 19, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2A6l83u>
- [27] G. Paquerul, “Sistemas de Seguridad Primaria,” Instituto de Investigación sobre Vehículos S.A., España, 2009. Accessed: May 24, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bxow4m>
- [28] A. Vásquez. et al, “Análisis del mercado del GLP para dos regiones del Perú: Lima y Lambayeque,” Osinergmin, Perú, 2017. Accessed: Mar. 13, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Z5YrGY>
- [29] J. Tamayo. et al, “La industria del Gas Natural en el Perú – A diez años del proyecto Camisea,” Osinergmin, Perú, 2014.
- [30] Ministerio de Energía y Minas, “Preguntas Frecuentes en Relación al Gas Natural en el Perú,” MINEM, Perú, 2017. Accessed: Mar. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2T91MBv>
- [31] H. Talavera, “Que es el Gas Natural, GNV, GNC, GNL,” Quora, 2017. Accessed: Mar. 15, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WXVq90>
- [32] v. Ormeño. et al, “El Gas Natural y sus diferencias con el GLP,” Osinergmin, Perú, 2012. Accessed: Mar. 13, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WY1b6x>
- [33] Gestión, “Las siete refinerías que abastecen de combustible en el Perú,” Perú, 2020. Accessed: Mar. 19, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bZMmWv>

- [34] Osinergmin, “Producción del GLP,” Perú, 2010. Accessed: Mar. 15, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2y8Xhzx>
- [35] Riviera, “Large carries lead global LPG trade surge,” 2017. Accessed: Mar. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3cOytvA>
- [36] Splash 247.com, “Naftomar snaps up BP shipping VLGC,” 2018. Accessed: Mar. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3cQoQwG>
- [37] M&S Logistics, “Tank Container,” 2020. Accessed: Mar. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2z6c4LU>
- [38] Tank News International, “Suttons International has made significant fleet investments,” 2019. Accessed: Mar. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3g6SAHy>
- [39] el Gas, “Transporting Gas Cylinders: How LPG is Transported - LPG Gas Transportation - LPG Transport,” 2019. Accessed: Mar. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bNjbpI>
- [40] VTG, “Gas rail tank cars for LPG,” 2020. Accessed: Mar. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WKbSuH>
- [41] Transcourt Tank Leasing, “How much gas does a tanker truck hold?,” 2018. Accessed: Mar. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2XhugdG>
- [42] Alura Trailer, “LPG Tank,” 2020. Accessed: Mar. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3e3ESDy>
- [43] J&J Truck Bodies & Trailers, “Bobtail tanks-LPG,” USA, 2008. Accessed: Mar. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3e6MzsF>
- [44] Nova Gas, “Lista de productos,” 2018. Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/2SOGyMc>
- [45] Osinergmin, “Ley que crea el Sistema de Seguridad Energética en Hidrocarburos y el Fondo de Inclusion Social Energetico,” Perú, 2012. Accessed: Mar. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3g0MQ1N>
- [46] Ministerio de Energia y Minas, “Política Energética nacional del Perú 2010-2040/DS N° 0.64-2010-EM,” MINEM, Perú, 2010. Accessed: Mar. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2X8hLke>

- [47] A. Vásquez et al., “La Industria de la Energía Renovable en el Perú – 10 Años de contribuciones a la mitigación del cambio climático,” Perú, 2017. Accessed: Mar. 14, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WAETc1>
- [48] Red-D-Arc Welderentals, “GX271 LPG,” 2020. Accessed: Mar. 17, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3cJgS8u>
- [49] D. Schmerler. et al, “Electromovilidad – Conceptos, Políticas y Lecciones aprendidas para el Perú,” Osinergmin, Perú, 2019. Accessed: Mar. 14, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3670ewT>
- [50] Coches.net, “Comparativa combustibles: gasolina, diésel, híbrido, GLP y GNC,” 2015. Accessed: Mar. 17, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3cLvpAp>
- [51] The Engineering ToolBox, “Fuels-Densities and Specific Volume,” 2003. Accessed: Mar. 17, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bIwhV6>
- [52] R. Hameed. et al, “Comparative Analysis of Emissions from Motor Vehicles Using LPG, CNG and Petrol as Fuel in Lahore,” Pakistan Institute of Chemical Engineers, Pakistan, 2013. Accessed: Mar. 17, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2XnozLd>
- [53] A. Yasar. et al, “Short communication a comparison of engine emissions from heavy, medium, and light vehicles for CNG, diesel, and gasoline fuels,” 2013. Accessed: Mar. 11, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3cKHmX8>
- [54] The 7 Motor Magazine, “Diferencias entre vehículos que funcionan con GLP y GNC,” 2018. Accessed: Mar. 17, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/369eO7e>
- [55] Ispat Guru, “Liquefied Petroleum Gas- its Characteristics and Safety Requirements,” 2015. <https://bit.ly/2XdPKId> (accessed Mar. 19, 2020).
- [56] Buenaventura, “Material Safety Data Sheet-Gas Licuado de Petroleo-GLP.” Accessed: Jun. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2zLuLVu>
- [57] R. Balcazar, “Reglamento de seguridad para instalaciones y transporte de GLP,” Perú, 2011. Accessed: Jun. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dd7Dgf>
- [58] SafetySign.com, “UN#1075 Flammable Gas Class 2 Placard,” 2020. Accessed: Jun. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fx7PII>
- [59] Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, “Reporte semanal PPI / Lunes 21 de Junio de 2021,” Perú, 2021. Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dIcrNI>

- [60] T. Gomez. et al, “Elementos Automoviles y fijos no estructurales,” 3ra edición, Paraninfo, España, 2016. Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3eMZGzw>
- [61] Mechanical Tech Hindi, “Automobile Chassis & it’s types,” 2018. Accessed: Jun. 15, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3hz1XAD>
- [62] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “Directiva N° 002-2006-MTC/15,” MTC, Perú, 2006. Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3eVnjG0>
- [63] M. Blesa, “MMPP-Informacion y reconocimiento de cisternas.” Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2MyapSb>.
- [64] D. Fryer and J. Harvey, “High Pressure Vessels,” USA, 1998. Accessed: Jun. 08, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/2XS2S7r>
- [65] K-TIG, “Processes for Welding Tanks & Pressure Vessels - K-TIG, GTAW and Plasma Welding,” 2017. Accessed: Jun. 10, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/37pg0Up>
- [66] A. Iza, “Diseño y simulación de un tanque hidroneumático vertical para el almacenamiento de agua, con capacidad de 400 gl para la empresa Pmec S.A. según la norma ASME Sección VIII División 1,” Ecuador, 2015. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2XRYAN6>
- [67] “D. Koulocheris y C. Vossou, ‘Alternative design for a semi-trailer tank vehicle’, Mobility & Vehicle Mechanics, Serbia, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2WWKwAs>. [Accedido: 30-Abr-2020]”.
- [68] A. Herrán, “Manual de riesgos Tecnologicos y asistencia tecnica,” España. Accessed: Jun. 10, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2XRF57A>
- [69] Scanscot Technology AB, “SIMULIA XFlow -Tank Sloshing Simulation,” 2019. Accessed: Jun. 10, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YG3E6L>
- [70] OKT Trailer, “LPG Tanker-Semitrailer,” 2018. Accessed: Jun. 10, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3hjQ15A>
- [71] R. Neukamp, “Top Loading x Bottom Loading,” 2017. Accessed: Jun. 11, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2XUFAXr>

- [72] CORKEN, "LPG Transport Unloading Application (Liquefied Gas Transfer & Vapor Recovery)," 2016. Accessed: Jun. 11, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2MOlb70>
- [73] J. Jordan, "Propane Plus Trip to the Terminal pt 4," 2013. Accessed: Jun. 11, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2AkObRp>
- [74] L. Guzman. et al, "Diseño Mecanico de recipientes a presión bajo el codigo ASME SECC. VII, Div.1," Venezuela, 2006. Accessed: Jun. 11, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3hanHTf>
- [75] K. Grote and E. Atonsson. et al, "Springer Handbook of Mechanical Engineering," Springer, USA, 2008. Accessed: Jun. 07, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/37fwvCH>
- [76] D. Moss, "Pressure Vessel Design Manual," USA, 2013. Accessed: Jun. 08, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2AfjuwW>
- [77] J. Collins, "Mechanical Design of Machine Elements and Machines," USA, 2010. [Online]. Available: <https://amzn.to/3e21ynO>
- [78] J. Gere and B. Goodno, "Mechanics of Materials," USA, 1999. Accessed: Jun. 08, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/2MIIE36>
- [79] A. Samuel and J. Weir, "Introduction to Engineering Design," USA, 1999. Accessed: Jun. 08, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dODkxm>
- [80] F. Diaz del Castillo, "Recipientes a Presion," Mexico, 2018. Accessed: Jun. 10, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3cPiLzC>
- [81] O. Gonzalez, "Curso de diseño de maquinas.," 2020. Accessed: Jun. 09, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/30sIprn>
- [82] Hexagon PV Elite Documentation, "CodeCalc Help V2020," USA, 2020. Accessed: Nov. 10, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3nhwEfH>
- [83] American Society of Mechanical Engineers, "ASME Section VIII Division 2," USA, 2019. Accessed: Nov. 08, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/35dNhT7>
- [84] Bosch, "Bosch presents electromobility for semitrailers," 2018. Accessed: Jun. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ztW9qH>
- [85] A. Hurtado, "Camion cisterna GLP," España, 2013. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Cdjy0s>

- [86] J. Caravaca, “Proyecto de diseño, calculo y fabricacion de una cisterna destinada al transporte por carretera de Acido Sulfúrico,” Colombia, 2015. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gwIU9S>
- [87] S. William, “Fifth Wheel coupling assembly with removable locking mechanism,” USA, US2011/0042920A1 24, 2011. Accessed: Jun. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3d017M3>
- [88] Nick James Productions, “Simplex 5th Wheel in Action/Fifth Wheel Coupling,” 2013. Accessed: Jun. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3e6ZdIE>
- [89] A. Hormazabal. et al, “Análisis estructural de tanque cisterna semirremolque fabricado en aleación de aluminio para transporte de combustibles líquidos,” CONICET, Argentina, 2016. Accessed: Mar. 10, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2LuFLbP>
- [90] M. Marks, “Chassis Frame Construction - Automobile Engineering,” 2013. Accessed: Jun. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2UEDUGE>
- [91] J. Andrade, “Diseño de una plataforma Cama-Alta acoplable a cabezales de transporte pesado para el traslado de contenedores,” Ecuador, 2007. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/38ueRM0>
- [92] R. Mott et al., “Machine Elements in Mechanical Design,” Pearson Education, USA, 2018. Accessed: Sep. 19, 2020. [Online]. Available: <https://amzn.to/35XyZa9>
- [93] Chereau, “Manual de Semirremolque y Remolque,” Francia, 2020. Accessed: Jun. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/37A4Xbm>
- [94] BPW-Gruppen, “Comparison of Mechanical to Air suspension.” Accessed: Jun. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/30FZb6k>
- [95] HENDRICKSON [Official], “ZMD® Air Springs: ZERO MAINTENANCE DAMPING® for Trailer Suspensions,” 2020. Accessed: Jun. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3e0sh4n>
- [96] Bibhuti.B, “A comparative study of transmissibility factors of traditional and pneumatic dumper seats using one-third octave band analysis,” India, 2020. doi: <https://doi.org/10.1177/0957456520924816>.
- [97] EAR. Aero Technologies LLC, “Designing a Vibration Isolation Solution (Part 3): Transmissibility,” USA, 2018. Accessed: Jun. 19, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/2SFviBT>

- [98] G. Belforte, "DESIGN ANALYSIS AND DYNAMIC BEHAVIOUR OF A PNEUMATIC SUSPENSION," Torino, Italia, 1996. doi: <https://doi.org/10.5739/isfp.1996.133>.
- [99] T. Scheldt, "Comparison of Continuous and Discontinuous Modelling for Computational Rock Mechanics," 2002. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3zYxBIW>
- [100] T. Long, Z. Zhang, and M. Liu, "Multi-resolution technique integrated with smoothed particle element method (SPEM) for modeling fluid-structure interaction problems with free surfaces," *Sci China Phys Mech Astron*, vol. 64, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.1007/s11433-021-1694-8.
- [101] H. Bui, "Doctoral School 2020 - Ha Bui - Introduction to SPH in Geomechanics: Fundamental Theory (Part 1)," 2020. <https://bit.ly/3EfS8F0> (accessed Nov. 08, 2022).
- [102] O. Weck and I. Kim, "Finite Element Method-Engineering Design and Rapid Prototyping Engineering Design and Rapid Prototyping," MIT, USA, 2004.
- [103] D. Logan, "A First Course in the Finite Element Method," USA, 2007. Accessed: Jun. 15, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2zzFIsX>
- [104] University of Victoria, "Introduction to Finite Element Analysis (FEA) or Finite Element Method (FEM)," Canda. Accessed: Jun. 05, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3wakbPu>
- [105] G. R. et al Liu and et al., *Smooth Particles Hydrodynamics a meshfree particle method*. 2003. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3DSF72D>
- [106] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures," USA, 2016. Accessed: Jun. 05, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3v3nGGs>
- [107] Hexagon, "Fundamentals of Dynamic Analysis | MSC Nastran," USA. Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ppMpDI>
- [108] N. Phadke, "Implicit and Explicit Analysis in FEA, Part - 01 (Differences & Application)," 2019. Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3wZhccP>
- [109] ANSYS Learning, "Implicit and Explicit Time Integration," 2021. Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/34P4u4z>

- [110] H. Norrgard, “Explicit Dynamics in Ansys Workbench at a Glance,” 2021. Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3uUNTGU>
- [111] ABAQUS, “Explicit dynamic analysis.” Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3g6xMkg>
- [112] T. Richter and et al., *Fluid-structure Interactions Models, Analysis and Finite Elements*. 2017. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3UtD9NI>
- [113] K. Pan, “Simulating Fluid-Solid Interaction Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method,” 2012. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3DUjD5J>
- [114] J. Sigrist, *FLUID-STRUCTURE INTERACTION*. 2015. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3EsFpix>
- [115] S. Xiaoying, M. Jian, and Z. Chunlong, “Fluid-Structure Interaction Analysis Using Finite Element Methods for IRWST of Reactor Building,” in *Energy Procedia*, 2017, vol. 127, pp. 225–233. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.123.
- [116] H. Khochtali, I. BenBelgacem, F. Zemzemi, and W. Bensalem, “Comparison of Coupled Eulerian–Lagrangian and Coupled Smoothed Particle Hydrodynamics–Lagrangian in Fluid–Structure Interaction Applied to Metal Cutting,” *Arab J Sci Eng*, vol. 46, no. 12, pp. 11923–11936, Dec. 2021, doi: 10.1007/s13369-021-05737-x.
- [117] Noh WF, “CEL: A. TIME DEPENDENT, TWO SPA.CE DIMENSIONAL, COUPLED EULER1A.N-LA.GRA.NGE CODE,” 1963. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3NVNGyA>
- [118] D. J. Benson, “Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes,” 1992. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3A1TVuZ>
- [119] A. Yerro, “MPM modelling of landslides in brittle and unsaturated soils,” España, 2015. Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/2TOml9z>
- [120] D. J. Benson and S. Okazawa, “Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation,” *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 193, no. 39-41 SPEC. ISS., pp. 4277–4298, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.cma.2003.12.061.

- [121] A. Skrzat, “Application of coupled Eulerian-Lagrangian approach in metal forming simulations,” Polonia, 2012. Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pnAXbB>
- [122] S. Lindberg .et al, “A comparison of finite element formulations for analysis of the converting process of packaging materials,” Suecia, 2015. Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pnAXbB>
- [123] NASA, “Navier-Stokes Equations 3-dimensional-unsteady,” USA, 2015. Accessed: Jul. 15, 2020. [Online]. Available: <https://go.nasa.gov/2C9v5yx>
- [124] F. Irgens, “Continuum Mechanics,” Alemania, 2008. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74298-2>.
- [125] H. Taghizadeh, “Numerical Investigation of Water Entry Problem of Pounders with Different Geometric Shapes and Drop Heights for Dynamic Compaction of the Seabed,” 2018. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/5980386>.
- [126] G. Arena, “Adaptive Nonlinear Structures for Flow Regulation: Modelling Fluid-Structure Interactions with Coupled Eulerian-Lagrangian Meshes,” Inlaterra, 2016. Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/2T218s6>
- [127] ABAQUS, “Equation of state.” Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fSGVy0>
- [128] J. Monaghan and et al, “Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars,” 1977. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3WNbFDZ>
- [129] Violeau D, *Fluid mechanics and the SPH method- Theory and Applications*. 2012. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3NSB4Ik>
- [130] A. Dutra, *Smoothed Particle Hydrodynamics Fundamentals and Basic Applications in Continuum Mechanics*. 2019. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3hvxPm8>
- [131] Z. Li, J. Leduc, J. Nunez-Ramirez, A. Combescure, and J. C. Marongiu, “Meshfree Particle Methods,” *Comput Mech*, vol. 55, no. 4, pp. 697–718, Apr. 2015, doi: 10.1007/s00466-015-1131-8.
- [132] T. Long, D. Hu, D. Wan, C. Zhuang, and G. Yang, “An arbitrary boundary with ghost particles incorporated in coupled FEM–SPH model for FSI problems,” *J Comput Phys*, vol. 350, pp. 166–183, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jcp.2017.08.044.

- [133] X. Hu, “SPH modeling of fluid-structure interaction,” 2017. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tft5eK>
- [134] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach, “A Continuum Method for Modeling Surface Tension,” 1992. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Ekj46u>
- [135] A. E. Dinçer, A. Demir, Z. Bozkus, and A. S. Tijsseling, “Fully Coupled Smoothed Particle Hydrodynamics-Finite Element Method Approach for Fluid-Structure Interaction Problems With Large Deflections,” *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 141, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.1115/1.4043058.
- [136] B. Horton, Y. Song, J. Feaster, and J. Bayandor, “Benchmarking of Computational Fluid Methodologies in Resolving Shear-Driven Flow Fields,” *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 139, no. 11, Nov. 2017, doi: 10.1115/1.4036590.
- [137] S. Attaway, M. Heinstejn, and J. Swegle, “Nuclear Engineering and Design Coupling of smooth particle hydrodynamics with the finite element method,” 1994. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3TknMp3>
- [138] Z. Zhang, H. Qiang, and W. Gao, “Coupling of smoothed particle hydrodynamics and finite element method for impact dynamics simulation,” *Eng Struct*, vol. 33, no. 1, pp. 255–264, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.10.020.
- [139] Simulia, “Fluids Modeling in Abaqus CEL and SPH in Abaqus Explicit,” 2021. <https://bit.ly/3G1tr0a> (accessed Nov. 08, 2022).
- [140] M. Faltisen, “A multimodal method for liquid sloshing in a two-dimensional circular tank,” 2010. doi: <https://doi.org/10.1017/S002211201000412X>.
- [141] G. Pahl et al., “Engineering Design a Systematic Approach,” Springer, USA, 2007. Accessed: Sep. 19, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3iYSv9J>
- [142] A. Tejada, “Diseño de tanque isotermico de 9500 Galones para transporte de Leche,” UCV, Trujillo, Perú, 2016. Accessed: Sep. 19, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3iZjJ01>
- [143] B. Barriga, “Métodos de diseño en ingeniería mecánica,” Perú, 2017. Accessed: Jun. 19, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ATae1H>

- [144] A. Alvarez, “Metodo para el diseño conceptual mecanico basado en la trazabilidad de los requerimientos funcionales,” UNAH, Mayabeque, Cuba, 2016. Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3kIS0Bq>
- [145] E. Blanco, “Metodología para el diseño de máquinas adaptadas a comunidades en desarrollo,” UPC, Barcelona, España, 2015. Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2RRrE3D>
- [146] “G. Corbett et al., ‘Fire Engineering’s HandBook for Firefighter I and II’, HandBook, PennWell Corporation, USA, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2Xqfxge>. [Accedido: 23-Abr-2020]”.
- [147] Osinergmin, “Registro de Hidrocarburos Habiles,” Perú, 2020. Accessed: Sep. 24, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/337Ixxf>
- [148] C. Moore et al., “Comparison Between Head Types: Hemi, SE, F&D and Flat,” PV Eng, 2020. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3iWKGAL>
- [149] M. Abdulrazzaq, “Optimization thickness of head type for horizontal LPG pressure vessels according to ASME,” 2018. Accessed: Jun. 27, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gdwwdH>
- [150] American Society of Mechanical Engineers, “ASME Section VIII Division 1,” 2019. Accessed: Jun. 27, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2BKcV5U>
- [151] The Engineerin ToolBox, “Propane - Density and Specific Weight,” Web Page, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2FVI9t2>
- [152] Code of Federal Regulations, “§173.315 Compressed gases in cargo tanks and portable tanks.,” CFR-DOT MC-331, USA, 2020, 2020. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2GO7fe5>
- [153] Code of Federal Regulations, “§178.337-2 Material,” CFR-DOT MC-331, USA, 2020. Accessed: Jun. 27, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ill8OD>
- [154] Osinergmin, “Materiales especificos para instalaciones de GLP-Sesión 2. Parte I-,” Perú, 2012. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/316yzuV>
- [155] Code of Federal Regulations, “§178.337-1 General requirements,” CFR-DOT MC-331, USA, 2020. Accessed: Jun. 27, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2BTfKX8>

- [156] J. Jamanca et al., “Estudio y diseño de ampliación de un grifo a estación de servicio con gasocentro de glp de uso vehicular de 3200 galones de capacidad,” Perú, Chimbote, Universidad Nacional del Santa, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jVsQiY>
- [157] F. Aboytes, “Aplicación de la norma oficial mexicana NOM-122-STPS-1996 para recipientes sujetos a presión,” Mexico, IPN, 2010. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2lu2PcH>
- [158] Ministerio de Energia y Minas, “Decreto Supremo N° 027-94-EM,” Perú, MINEM, 2020. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/313Yjrz>
- [159] PV Eng, “Joint Efficiency,” PV Eng, 2020. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2SUg48y>
- [160] L. Ortega, “Análisis y diseño de recipientes a presión para el almacenamiento de GLP,” Perú, UNI, 2015. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2SQZmqD>
- [161] Explore the Word of Piping, “Effects & Economic impact of Corrosion,” EWP, 2020. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jWoWGB>
- [162] DNV. GL, “Rules for classification-Part 4 System and components-Chapter7 Pressure equipment,” 2017. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dnF0Pb>
- [163] S. Schmidt, “What Is the Average Life Expectancy of a Propane Tank?,” Hunker, 2020. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/34UpPZZ>
- [164] D. Venegas et al., “Mantenimiento necesario en instalaciones de GLP,” España, AEIM, 2016. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3nLxvGp>
- [165] J. Tirenti, “Static Equipment Part II:External Pressure Vessel Design,Cones, Self-Reinforced Nozzles,” International Institute of Plant Engineering and Design, 2014. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2IsCJqu>
- [166] PETROPERU, “Informe Tecnico N° GOPC-RH-0005-2012,” Perú, Conchán, 2012. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3iYiXQ0>
- [167] J. Carranza, “Diseño de un Recipiente Knock-Out Drum según la Norma ASME, para el Sistema de Descarga de las Válvulas de Alivio de los Separadores y Tratadores de la Plataforma Muzhil-Egipto,” Perú, UTP, 2019. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3lKyCVa>

- [168] M. Rondinel, “Diseño de un plan de mantenimiento preventivo en recipientes de alta presión de 250 PSIG para el almacenamiento, transporte de GLP y su certificado de conformidad Planta Zinsac del Perú- Puente Piedra,” Perú, Universidad Nacional del Callao, 2018. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dx9uOM>
- [169] Arcosa, “Semirremolques para Gas L.P., Amoniaco y Propileno,” Mexico, Arcos, 2020. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2H0h8Vy>
- [170] R. Ervin et al., “Liquid Cargo Shifting and the Stability of Cargo Tank Trucks,” USA, Michigan, UMTRI, 1985. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2GWSs0n>
- [171] N. E. F, “ASME Material Selection in Pressure Vessels,” Video, 2020. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/372NVnT>
- [172] American Society of Mechanical Engineers, “ASME Section XII,” USA, 2019. Accessed: Nov. 08, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/38pGgRI>
- [173] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “Decreto Supremo N° 002-2005-MTC,” 2005. Accessed: Jun. 28, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Zjq10B>
- [174] T.Kandasami. et al, “An Analysis of Baffles Designs for Limiting Fluid Slosh in Partly Filled Tank Trucks,” 2010. Accessed: Jun. 27, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ilAPFE>
- [175] Norma Metrológica Peruana 023, “Vehiculos y Vagones Tanque - Requisitos y Método de Ensayo,” 2017. Accessed: Jun. 28, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3il1NgH>
- [176] A. Dasgupta, “Effect of Tank Cross-Section and Longitudinal Baffles on Transient Liquid Slosh in Partly-Filled Road Tankers,” Canada, Concordia University, 2011. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2FqwphV>
- [177] J. Bautista et al., “Effect of Baffles on the Sloshing in Road Tankers Carrying LPG: A Comparative Numerical Study,” Mexico, Hindawi, 2015. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/313IDG5>
- [178] X. L. Zheng, X. S. Li, Y. Y. Ren, Y. N. Wang, and J. Ma, “Effects of transverse baffle design on reducing liquid sloshing in partially filled tank vehicles,” *Math Probl Eng*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/130570.

- [179] N. Lloyd et al., “The Effect of Baffle Design on Longitudinal Liquid Movement in Road Tankers: An Experimental Investigation,” Australia, IChemE, 2002. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2IsGYIU>
- [180] A. Paz, *Manual de Automoviles*, 49th ed. España, 1989.
- [181] S. Cowling, “Design optimisation of a cane haulage vehicle,” Universidad de KwaZulu-Nata, Sudáfrica, 2008. Accessed: Oct. 22, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/35qW8zN>
- [182] T. Govender, “Design and Analysis of a Multi-Trailer System for the Durban Container Terminal,” Universidad de KwaZulu-Natal, Sudáfrica, 2018. Accessed: Oct. 22, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dNK7IC>
- [183] A. Calvo, “Diseño y analisis de un chasis para un prototipo de formula SAE,” Universidad Pontificia de Comillas, España. Accessed: Oct. 22, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3413jKr>
- [184] L. Castillo, “Evaluación del procedimiento de soldadura para el soldeo del acero SA612 utilizado en la fabricación de tanques de almacenamiento de glp según ASME IX,” Universidad Nacional de Trujillo, Perú, 2019. Accessed: Oct. 22, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3okEFS7>
- [185] “MatWeb-Material Property Data,” 2020. <http://www.matweb.com/> (accessed Oct. 22, 2020).
- [186] et al L. Brockenbrough, “STRUCTURAL STEEL DESIGNER’S HANDBOOK,” USA, 1999. Accessed: Jul. 12, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ec7YD4>
- [187] A. Toba, “Tutorial ANSYS Workbench Estrategias de Mallado I (Parte 1/2),” 2015. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ZD07q4>
- [188] ANSYS. Inc., “Lecture 7: Mesh Quality & Advanced Topics,” 2015. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ACTkEw>
- [189] Ministerio de Energia y Minas, “Decreto Supremo N° 052-93-EM,” MINEM, Perú. Accessed: Oct. 23, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3js3Bng>
- [190] Selectra, “PropanoGas,” España. Accessed: Oct. 23, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/31EiZa8>
- [191] Implementos Perú, “Capacitación Suspensión Neumatica,” 2020. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3hjzXDp>

- [192] Watson & Chalin, "Trailer Air Suspension System," USA, Texas, 2019.
- [193] T.V. Esquerdo, "Modelización de suspensiones en vehículos pesados: efecto sobre la resistencia," España, Valencia, 2006.
- [194] Muy. et al. O, "Estudio e implementacion de un sistema de suspension neumatica en un vehiculo 4x4 GMC modelo JYMMI," Ecuador, Cuenca, 2010.
- [195] D. Franz, "Simulink Control Model Of An Active Pneumatic Suspension System In Passenger Cars," Italia, Torino, 2019.
- [196] Y. Chen, "Modeling, Control, and Design Study of Balanced Pneumatic Suspension for Improved Roll Stability in Heavy Trucks," USA, Virginia, 2017.
- [197] R. Penzotti, "Pneumatic vehicle suspension system with variable spring stiffness," Canada, 2000.
- [198] R. Penzotti, "Pneumatic vehicle suspension system with variable spring stiffness," Canada, 2000.
- [199] D. Franz, "Simulink Control Model Of An Active Pneumatic Suspension System In Passenger Cars," Italia, Torino, 2019.
- [200] Watson & Chalin, "Trailer Air Suspension System," USA, Texas, 2019.
- [201] G. Franck, "Análisis Diámico de un chasis de semirremolque de servicio pesado," Argentina, 2009. Accessed: Jun. 15, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3hvjA48>
- [202] J. Galos, "Lightweight Composite Trailer Design," England, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3wIDxvh>
- [203] P. Naar, "Lightweighting of a trailer chassis," 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3uo9rLL>
- [204] A. Desrochers. et al., "Engineering Design from Safety Prespective," Canadian, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3c0YpG1>
- [205] A. Ugural, "Mechanical Design An Integrated Approach," 2004. [Online]. Available: <https://bit.ly/3wDnmz9>
- [206] J.P.Vidosic, "Machine Design Projects," New York, 1957.
- [207] Skill-Lync, "What is Mesh Quality?," 2019. Accessed: May 31, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fGxzW4>

- [208] Sim Tech05, “Element Quality Check & Quality Improvement (Part – 1),” 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/34z93zM>
- [209] ABAQUS, “Verifying your mesh,” 2010. Accessed: May 31, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3caKwoS>
- [210] Abaqus, “Element library: overview.” <http://bit.ly/3E8rvR3> (accessed Nov. 13, 2022).
- [211] Abaqus, “Shell elements: overview”, Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3WZlhKS>
- [212] Abaqus, “Section controls”, Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3GwcuF>
- [213] Abaqus, “ Finite element conversion to SPH particles”, Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3UfKp98>
- [214] The Engineerin ToolBox, “Speed of Sound in Liquids.” Accessed: Jun. 05, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pq9Ht1>
- [215] The Engineering ToolBox, “Propane - Dynamic and Kinematic Viscosity.” Accessed: Jun. 05, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/2SZJSDU>
- [216] ABAQUS, “ABAQUS UNITS,” 2021. Accessed: Jul. 17, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3exFYi5>
- [217] Z. Li, J. Leduc, J. Nunez-Ramirez, A. Combescure, and J. C. Marongiu, “A non-intrusive partitioned approach to couple smoothed particle hydrodynamics and finite element methods for transient fluid-structure interaction problems with large interface motion,” *Comput Mech*, vol. 55, no. 4, pp. 697–718, Apr. 2015, doi: 10.1007/s00466-015-1131-8.
- [218] J. Bonet and T.-S. L. Lok, “Variational and momentum preservation aspects of Smooth Particle Hydrodynamic formulations,” 1998. [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/cma](http://www.elsevier.com/locate/cma)
- [219] Abaqus, “Defining a contact interaction property”, Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3tsokyI>
- [220] A. Rahmati, “Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD-MBD method,” 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s11044-019-09715-y>.

- [221] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “TUO del Reglamento Nacional de Tránsito,” Lima, 2021. Accessed: Jul. 12, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3hBovTp>
- [222] C. Chandrakant, “Semi-Trailer Structural Failure Analysis Using Finite Element Method,” New Zealand, 2010. Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qJIR0y>
- [223] A. Rodríguez, “Diseño de un semi-remolque de dos niveles para la transportación de pallets,” Ecuador, 2016. Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/2UVBlmj>
- [224] A. Borella, “Probabilistic structural analysis applied to spring leaf suspension assembly of semi-trailer tank vehicle,” 2003. Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/2TBVIEX>
- [225] FIERRO TRADI SA, “TUBOS REDONDOS LAC NEGROS Y GALVANIZADOS,” Lima, 2021. Accessed: Jul. 12, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/36w6eAm>
- [226] A. Kolaei, S. Rakheja, and M. J. Richard, “Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll stability of a partly-filled tank truck,” *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, vol. 46, pp. 46–58, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.euromechflu.2014.01.008.
- [227] R. Ranganathan, “Rollover threshold of partially filled tank vehicles with arbitrary tank geometry,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 207, no. 3, pp. 241–244, 1993, doi: 10.1243/PIME\_PROC\_1993\_207\_185\_02.
- [228] S. Rakheja, S. Sankar, and R. Ranganathan, “Influence of Tank Design Factors on the Rollover Threshold of Partially Filled Tank Vehicles,” 2018. Accessed: Dec. 02, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gUIxL4>
- [229] C. Winkler, “Rollover of Heavy Commercial Vehicles,” 2000. Accessed: Dec. 02, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3F1Bt78>
- [230] NFPA 704, “Diamante de fuego,” 2020. Accessed: Jun. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3d6E5k9>
- [231] Norma Técnica Peruana NTP 399.015, “Símbolos Pictóricos para Manipuleo de Mercancía Peligrosa,” Perú, 2014. Accessed: Jun. 16, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/30PS23s>

- [232] SUTRAN, “Pesos y Medidas,” Perú, 2020. Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gVuekp>
- [233] E. Tarazona, “RENAV y control de Pesos y Medidas Vehiculares,” AAP, Perú, 2018. Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/30d8udK>
- [234] Code of Federal Regulations, “§178.337-10 Accident damage protection,” CFR-DOT MC-331, USA, 2020. Accessed: Jun. 27, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2ZHXiEr>
- [235] #CdRas, “INAGA - Protecciones Traseras y sistema de antiempotramiento en camiones,” 2018. Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2zXvpPT>
- [236] IIHS, “Benefits of side underride guards for semitrailers,” 2020. Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2A55hm1>
- [237] Volvo Group Perú, “Mack Anthem 6x4 Aire Dual Mecánico,” Perú, 2020.
- [238] E. Demirel, et al., “Liquid Sloshing damping in an accelerated tank using a novel slot baffle Design”, MDPI, 2018.
- [239] I. Martínez, et al, “Coupling an SPH-based solver with an FEA structural solver to simulate free surface flows interacting with flexible structures”, Spain, 2023. Accessed: Sept. 25, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00366-023-01856-1>
- [240] Das, J., et al., “On the improvement of computational efficiency of smoothed particle hydrodynamics to simulate flexural failure in ice”, USA, 2018. Accessed: Sept. 25, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40722-018-0114-1>.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1: Reglamento Nacional de vehículos-Simbolos



Figura A.1. Rombo y características de NFPA 704 [230]

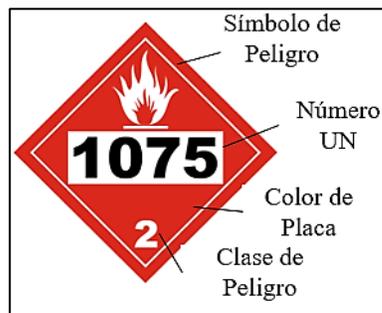


Figura A.2 Rombo y características DoT [58]

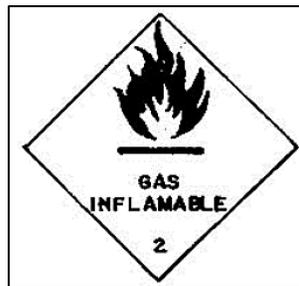


Figura A.3 Rombo NTP 399.015 [231]

## ANEXO 2: Tipos de carrocerías con recipiente en Perú

Carrocería	Características	Código
Cisterna	Carrocería cerrada herméticamente, destinado a transportar mercancías líquidas	CIS
Tanque GLP	Carrocería cerrada herméticamente, destinado a transportar únicamente GLP a granel puesto que presenta un tanque a presión	GLP
Tanque GNC	Equipado con recipientes a presión para el transporte de GNC.	GNC
Tanque Isotérmico	Carrocería cerrada herméticamente y asilado térmicamente para así mantener a temperatura constante la mercancía líquida a transportar	TIS
Tanque Frigorífico	Carrocería cerrada herméticamente y asilado térmicamente con la particularidad de poder disminuir la temperatura mediante el sistema de refrigeración.	TFR
Tanque Calorífico	Carrocería cerrada herméticamente y asilado térmicamente presenta la característica de poder aumentar la temperatura mediante el sistema de calefacción.	TCA
Tanque Corrosivo	Vehículo de carrocería cerrada herméticamente destinado a movilizar ácidos o líquidos corrosivos	TCO
Tanque criogénico	Vehículo de carrocería cerrada herméticamente destinado a movilizar Gas Natural Licuado (GNL).	CRI
Bombona	Vehículo de carrocería cerrada. Su parte inferior puede ser de sección cónica o trapezoidal, para transportar mercancía a granel como cemento, harina, cal, entre otros.	BOB

**Tabla A.1** Carrocerías de recipiente [62]

## **ANEXO 3: Reglamento nacional de vehículos-Caracteres relevantes**

Mediante el Decreto Supremo N.º 058-2003-MTC [2] vigente actualmente (2020) [232] se establecen las políticas para el transporte terrestre por carretera (no incluye los vehículos de tracción a sangre como bicicleta, caballos, etc. [233])

Dicho documento establece que cada unidad vehicular debe tener un VIN<sup>72</sup>, este debe seguir los parámetros otorgados por la Norma Técnica ITINTEC<sup>73</sup> 383.030 o la norma ISO 3779; además este código alfanumérico de 17 caracteres debe ser asignado por el fabricante de la maquinaria. Consta de tres secciones detalladas brevemente:

A) WMI (World Manufacturer Identifier)

Son los primeros tres caracteres, conciernen a la identificación mundial del fabricante. En caso sea un producto nacional, PRODUCE<sup>74</sup> gestiona el código.

B) VDS (Vehicle Description Section)

Ubicado entre el 4to al 9no carácter, sección descriptiva del vehículo.

C) VIS (Vehicle Identification Section)

Ubicado entre el 10mo y el 17vo carácter, es la sección indicativa del vehículo.

---

<sup>72</sup> VIN: Vehicle Identification Number.

<sup>73</sup> ITINTEC: Instituto Nacional de Investigación Tecnología y Normas Técnicas.

<sup>74</sup> PRODUCE: Ministerio de la Producción.

1A2E3TG45LRG67001		
Carácter	Descripción	Sección
1A2	No cambia	WMI
E3	Numero de ejes	VDS
T	Tolva	
G	Granelero	
45	Peso Bruto	
L	Año de fabricación: 2020	VIS
R	Empresa: Rueda	
G67	No cambia	
001	Consecutivo a la unidad	

**Tabla A.2** Ejemplo de numero VIN

Asimismo, el RENAV otorga la clasificación “O” para el semirremolque, la cual se encuentra en función al peso bruto vehicular (PBV) en toneladas (ton) del vehículo como se observa en la siguiente tabla.

Clasificación	PBV
O1	Menor o igual a 0.75 ton.
O2	0.75-3.5 ton.
O3	3.5-10 ton
O4	Mayor a 10 ton.

**Tabla A.3** Clasificación vehicular del Semirremolque [2]

Como también establece las dimensiones máximas a considerar:

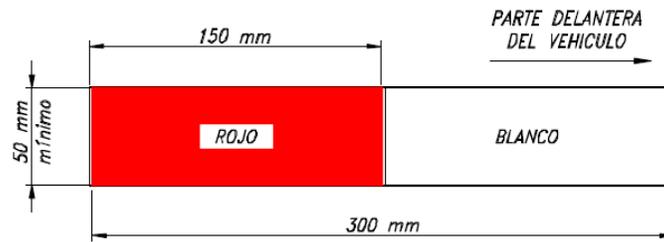
Parámetros máximos	Valor
Ancho	2.6 m
Altura	4.3 m
Longitud	14.68 m

**Tabla A.4** Medidas máximas de la categoría “O” [2]

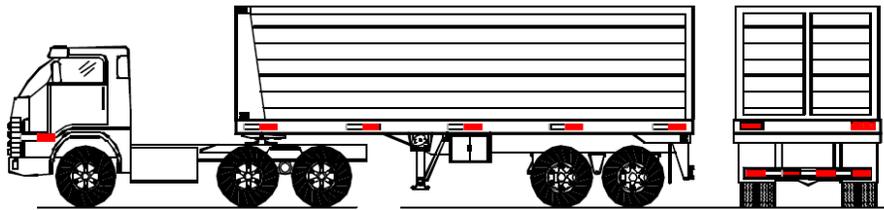
Asimismo, esta clasificación atribuye requerimientos como el alumbrado y el sistema de frenos requeridos por cada categoría “O” en el Anexo III. No obstante, este documento no aborda dichos apartados. Cabe recalcar, por el hecho que el Semirremolque no es un equipo automotor carece de formula rodante ( $N^{\circ}$  ruedas en total x  $N^{\circ}$  ruedas motoras).

Otra de las exigencias solicitadas por el RENAV son las láminas retroreflectivas, estas deberán cumplir las siguientes especificaciones:

- A) La ubicación de las láminas será tanto en los laterales como en la parte posterior del vehículo.
- B) Se colocarán a no menos de 300 mm y no más de 1.6 m de la superficie de carretera.
- C) Se colocarán en las superficies verticales del vehículo, de ser posible por el diseño.
- D) El método de fijación a la carrocería debe asegurar su permanencia, así como: tornillos, pegamento o remaches.
- E) Deben distribuirse equitativamente en los laterales a fin de cubrir un 25% del largo total, de ser posible por el diseño.
- F) En la parte posterior se deben acoplar al elemento más ancho del vehículo como: parachoques, dispositivo de antiempotramiento o algún otro.



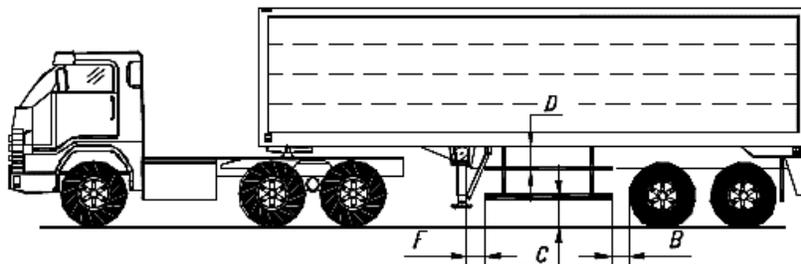
**Figura A.4.** Dimensiones de Laminas Retroreflectivas [2].



**Figura A.5.** Ubicaciones de Laminas Retroreflectivas en Semirremolque [2].

Por otro lado, también se encuentran las defensas laterales, estas deben cumplir las siguientes especificaciones y las dimensiones detalladas:

- A) Su implicancia, no debe aumentar la longitud vehicular.
- B) Ubicadas a máximo 120 mm del riel de roce del vehículo o al borde exterior de las ruedas.
- C) Los ángulos serán redondeados, además evitar los bordes cortantes.
- D) Superficie lisa
- E) Los tanques combustibles y cajas de herramientas son considerados como defensas laterales.



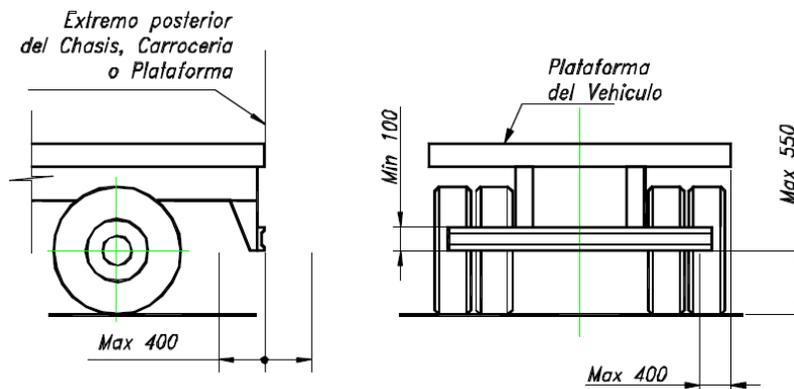
**Figura A.6.** Dimensiones de la defensa lateral [2].

Cota	Descripción	Valor
B	Distancia desde la banda de rodamiento del neumático hasta el extremo posterior de la defensa	= 300 mm
C	Distancia desde el borde inferior de la defensa hasta el nivel de carretera	= 550 mm
D	Distancia desde el borde superior de la defensa hasta el borde inferior de la plataforma o carrocería	= 350 mm
F	Distancia desde el pie de apoyo del semirremolque hasta el extremo delantero de la defensa.	= 300 mm

**Tabla A.5** Clasificación vehicular del Semirremolque [2].

El dispositivo de antiempotramiento solicitado debe de cumplir con los siguientes topicos:

- A) Conformado en frío
- B) La sección puede ser rectangular, en “C” o similar.
- C) Los bordes no serán cortantes ni dirigidos hacia el exterior.
- D) Los soportes y la barra serán de Acero estructural ASTM A36 o del material de fábrica.
- E) El espesor: de 3 mm a 6.4 mm; Ancho mínimo: 100 mm; Longitud máxima de los extremos del dispositivo al extremo de la carrocería: 400mm; Variación máxima delantera y posterior al plano borde de la carrocería: 400 mm.



**Figura A.7.** Dimensiones del Dispositivo Antiempotramiento [2].

Las mayorías de las medidas detalladas en este apartado son compatibles con las otorgadas por la especificación DoT MC-331 [234]; a excepción de la altura máxima, en esta

situación el fabricante deberá restringirse a al reglamento peruano el cual detalla 10 mm menos que el americano. Cabe recalcar que el objetivo tanto de las defensas laterales como el dispositivo de antiempotramiento es de proteger a los componentes inferiores del semirremolque y al conductor del vehículo impactado o impactado, como se puede observar en las siguientes imágenes referentes a pruebas realizadas por el “Instituto de Seguros para Seguridad Vial (IHSS<sup>75</sup>, por sus siglas en ingles).



**Figura A.8.** Impacto Lateral al Semirremolque [235].



**Figura A.9.** Impacto Trasero al Semirremolque [236].

---

<sup>75</sup> IHSS: Insurance Institute for Highway Safety

## ANEXO 4: Dimensiones de tracto y semirremolque

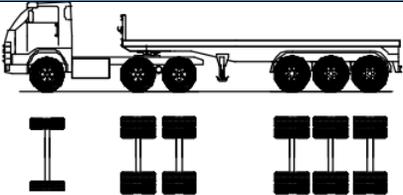
Conf.	Grafico	Long. Max (m)	Peso Máximo (t)		Peso Bruto Máximo	
			Eje delantero	Eje posterior		
				1°		2°
T3S3		20.5	7	18	25	48

Tabla A.6 Configuración Vehicular T3S3 [2].

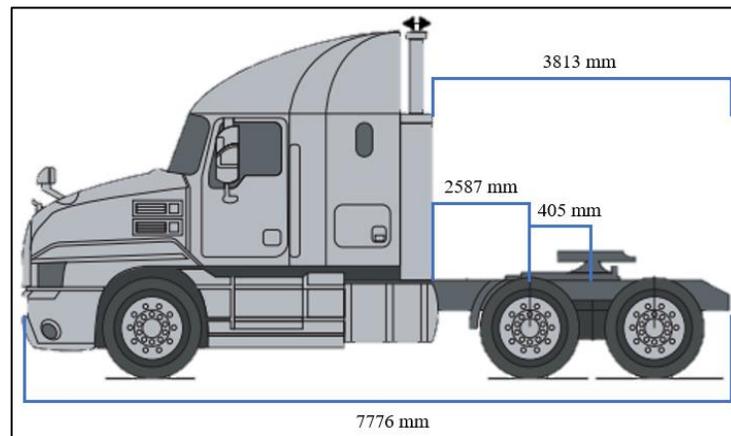


Figura A.10. Dimensiones del Tracto Mack Anthem 6x4 Aire Dual Mecánico [237]