UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA NAVAL

ANÁLISIS DE JAULA CIRCULAR DE HDPE MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Tesis para optar al título de
Ingeniero Naval, mención
Arquitectura Naval

PROFESOR PATROCINANTE
Sr. Richard Luco Salman
Dr. Ingeniero Naval

CLAUDIO ENRIQUE TRONCOSO PAREDES

Valdivia, Chile
2006

Esta tesis ha sido sometida para su aprobación a la Comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

La tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de Ingeniero Naval, con mención Arquitectura Naval.

EXAMEN DE TITULO

Nota de Presentación	(Ponderado) (1)	:	.....
Nota de Examen	(Ponderado) (2)	:	.....
Nota Final	(1 + 2)	:	.....

COMISION EXAMINADORA

.....	.....
DECANO	FIRMA
.....	.....
EXAMINADOR	FIRMA
.....	.....
EXAMINADOR	FIRMA
.....	.....
EXAMINADOR	FIRMA
.....	.....
SECRETARIO ACADEMICO	FIRMA

Valdivia,.....

Nota de Presentación	=	NC / NA * 0,6 + Nota de Tesis * 0,2
Nota Final	=	Nota de Presentación + Nota de Examen * 0,2
NC	=	Sumatoria de notas de curriculum, sin tesis
NA	=	Número de asignaturas cursadas y aprobadas

Agradecimientos

Agradezco el apoyo y colaboración recibida departe del equipo de trabajo de NavTec. Ltda., en el desarrollo de este trabajo, de quien sume conocimiento y fueron un gran aporte a la hora de solucionar problemas en este proceso.

Este logro se la dedico a mi hijo Vicente, a quien espero dedicarle otros en mi vida y acompañe en cada unos de ellos.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN. 7

1.1. GENERALIDADES. 7

1.2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS. 8

1.3. Descripción de los sistemas de jaulas existentes. 9

1.3.1. Jaulas flotantes 11

1.3.2. Jaulas semi-sumergibles. 13

1.3.3. Jaulas sumergibles. 14

1.3.4. Diseño utilizados por la industria acuícola Chilena. 14

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. 15

2.1. INTRODUCCIÓN. 15

2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO Y PASOS DEL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS. 15

2.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. 17

2.3.1. Conceptos generales sobre elasticidad. 17

2.3.2. Tensión 17

2.3.3. Deformación 20

2.3.4. Relación esfuerzo – deformación 21

2.4. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS. 23

2.4.1. Elementos de placa. 23

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES QUE AFECTAN AL SISTEMA DE JAULAS Y DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS A REALIZAR. 27

3.1. INTRODUCCIÓN 27

3.2. CALCULO DE LAS FUERZAS INCIDENTES SOBRE UNA ESTRUCTURA FLOTANTE. 27

3.2.1. Viento. 28

3.2.2. Corrientes. 31

3.2.3. Olas. 34

3.3. DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS A REALIZAR. 37

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE FEM DE JAULA CIRCULAR DE HDPE. 39

4.1. INTRODUCCIÓN. 39

4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA. 41

4.3. PROPIEDADES DEL MATERIAL. 42

4.4. IDEALIZACIÓN DEL PROBLEMA..... 45
4.5. CONDICIONES DE CONTORNO A ANALIZAR. 47
4.6. RESUMEN DE RESULTADOS..... 49
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES..... 56
REFERENCIAS..... 57

Tabla de símbolos y abreviaciones

σ	: tensión normal
τ	: tensión tangencial
E	: módulo de elasticidad
G	: módulo de corte
ν	: coeficiente de Poisson
ε	: deformación
δ	: desplazamiento
ρ	: densidad
API	: American Petroleum Institute
Bracket	: Abrazadera flotadores.
FEM	: Finite element method
HDPE	: High density polyethylene
PP	: Polypropylene
ROM	: Recomendaciones para Obras Portuarias
kn	: nudos

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo del cálculo de tensiones y deformaciones de una jaula circular de HDPE mediante un análisis estático lineal, utilizando el método de elementos finitos mediante el programa computacional Algor V17. La determinación de las cargas ambientales actuantes sobre el sistema se realizo en base a formulaciones empíricas desarrolladas por diversos autores.

Abstract

This work presents the calculation development of tensions and deformations of a HDPE's circular cage through a linear static analysis using the finite-element method by means of software Algor V17. The determination of the environmental acting loads on the system was done on the basis of empiric formulations developed by various authors.

Capítulo 1:
Introducción.

1.1. Generalidades.

Uno de los escenarios más complejos de la industria salmonera es aquel que se configura en todo el proceso de engorda de los salmones hasta el momento de la cosecha. Su importancia es suprema ya que es precisamente en esta etapa en la que se sustenta el éxito de esta actividad. Esta etapa transcurre mientras los peces permanecen en el mar, cuyo período puede durar hasta 16 meses (la cosecha hoy comienza en el mes 12 y termina en el mes 16). La infraestructura y servicios básicos para la configuración de un centro de cultivo en el mar son, las jaulas, el sistema de fondeo, el sistema de redes (peceras y loberas) y las plataformas adicionales orientadas al almacenaje del alimento, sistemas de distribución y habitabilidad para los operarios.

Existe una amplia gama de sistemas de jaulas disponibles para la acuicultura, sin embargo no todas poseen igual comportamiento ante las condiciones ambientales y los regímenes de producción existente en los distintos sitios disponibles, es por esto que para poder tomar la decisión en la selección de un sistema de jaulas cobra gran importancia el conocer como se comportara frente a las condiciones ambientales y así prever si existe la posibilidad de que ocurra un siniestro en estas condiciones. Los costos de instalación y operación son también un factor crítico a la hora de seleccionar un sistema de jaulas, que pueda maximizar las ganancias de la empresa.

1.2. Motivación y objetivos de la tesis.

La motivación de este trabajo es el proveer una visión general de los sistemas de jaulas actualmente disponibles en el país, determinar los factores ambientales más importantes que afectan al sistema de balsas jaulas, de manera que las cargas ambientales sean traducidas a una carga aplicada sobre la estructura.

Los objetivos principales de este trabajo son el análisis de tensiones y deformaciones mediante el método de los elementos finitos, a través de un análisis estático lineal, para así poder predecir el comportamiento bajo las condiciones de operación a la que se ve sometido un sistema de estas características, siendo éste el parámetro de selección de disposición estructural, materialidad, tamaños máximos, etc.

1.3. Descripción de los sistemas de jaulas existentes.

Una gran variedad de diseños de jaulas ha surgido como resultado del intento de dar solución a un grupo de objetivos o necesidades (a veces contrapuestos), que involucra el cultivo de peces en el mar, entre estos objetivos se encuentran los siguientes:

i Proveer una forma de jaula razonablemente estable, para evitar situaciones que puedan estresar a los peces y para proveer unas condiciones de trabajo seguras.

ii Proveer una adecuada renovación o circulación de agua para satisfacer los requerimientos metabólicos de los peces y permitir la circulación de los residuos del área de la jaula.

iii Absorber y/o desviar las fuerzas ambientales, para mantener la integridad estructural del conjunto.

iv Proveer un ambiente de trabajo óptimo, y donde los equipos y materiales puedan ser manipulados de manera expedita y segura.

v Mantener la posición, para proveer una posición segura.

vi Tener bajo costo inicial y mantener los gastos de operación tan bajos como sea posible.

Un sistema de jaulas tiene un comportamiento dinámico, las fuerzas que afectan a la red son transmitidas al marco estructural, del mismo modo las fuerza que afectan al marco estructural son transferidas al sistema de fondeo. Esto afecta la durabilidad del sistema y la seguridad de los peces.

Los elementos de las jaulas tienden a diseñarse flexibles o rígidos, siendo generalmente una combinación de estos. Físicamente dos niveles de cargas de diseño deben ser considerados; (I) **Normal**, la rutina y las fuerzas recurrentes y sus efectos, que típicamente implican efectos de desgaste; e (II) **inusual**, la máximas fuerzas posible.

Actualmente aunque existe una amplia gama de jaulas disponibles, estas pueden clasificarse según la naturaleza de la estructura usada para soportar la red (ver tabla 1). Esta divide los diseños en tres categorías, **flotantes**, **semi-sumergibles** y **sumergible** y dos tipos mecánicos; **flexible** y **rígido**.

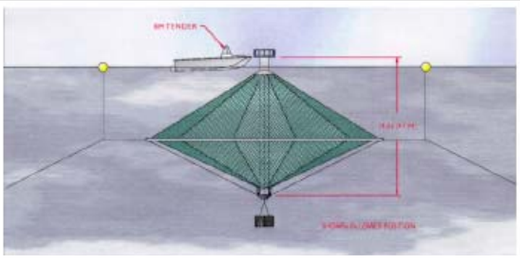
Tabla 1: Tipos de jaulas

Tipo de estructura
Flotadores flexibles
Flotadores rígidos
Semi-sumergibles flexibles
Semi-sumergibles rígidas
Sumergibles rígidas

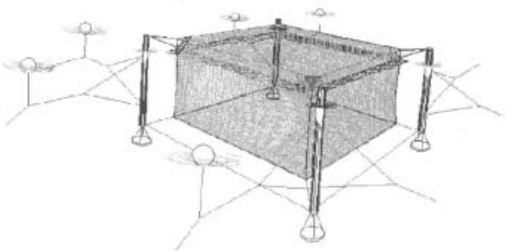
Tempestad 2 jaulas Dunlop

Sistema costa afuera semi-sumergible
de Farmocean international AB

Plataforma de jaula de peces de sistemas marinos
Iberia



Estación oceánica de
"Ocean Spar Technologies", LLC



Sistema de jaulas oceánico de
"Ocean Spar Technologies", LLC

"Refa"
Jaulas

Granja pecera costa afuera de
"Campbelttown Developments Ltd."

Fig. 1: Sistema de jaulas (3).

1.3.1. Jaulas flotantes

1.3.1.1. Jaulas flotantes flexibles.

Este tipo de jaulas utiliza tuberías plásticas (HDPE) originalmente diseñadas para el traslado de fluido. El objetivo que persigue este diseño es que la jaula "cabalgue" sobre la ola, adaptándose a la forma de la misma. Al aumentar la distancia de los centros de cultivo desde la costa, los fabricantes se han visto obligados a diseñar jaulas que se adapten mejor a las condiciones en mar abierto: olas de mayor tamaño, fuertes corrientes, viento, etc.

Fig. 2: Jaulas circulares de HDPE (15).

La forma del anillo está diseñada esencialmente para mantener la forma de la red y no para operaciones de trabajo, las que son ejecutadas desde balsas o botes.

Tabla 2: Ventajas y desventajas de las jaulas flotantes flexibles

Ventajas	Desventajas
Sistema efectivo y probado para la suspensión de la red	Limitaciones de acceso para el personal.
Posibilita una gran variedad de configuraciones.	Dificultad en la instalación de los sistemas de alimentación
Relativamente barato en gran volumen	Requiere de grandes embarcaciones de servicio.
Es el sistema comercial más ampliamente usado costa afuera.	

1.3.1.2. Jaulas flotantes rígidas

A diferencia de las jaulas flexibles, éstas son diseñadas con una rigidez estructural suficiente para resistir sin grandes deformaciones la acción producida por las olas siendo construidas generalmente de acero estructural. La boyantés en estos sistemas es provista por flotadores de poliestireno expandido ubicado en los pasillos de la jaula. A demás la gran mayoría de los diseños son ideados para facilitar el manejo de los peces así como las distintas operaciones a realizar. Algunos sistemas están equipados con propulsión.

Fig. 3: Sistema de jaulas metálicas. (15).

Tabla 3: Ventajas y desventajas de las jaulas flotantes rígidas.

Ventajas	Desventajas
Plataforma de trabajo estable para la mano de obra y operaciones de mantenimiento.	Las estructuras grandes y pesadas requieren de buenas instalaciones portuarias y/o remolque para su instalación.
Posibilidad de integración a la jaula de los sistemas de alimentación y cosecha	El mayor peso de la estructura requiere de sistemas de fondeo de mayor resistencia.
Provee de mejor seguridad para el trabajador y mejora su eficiencia.	Mayores costos de operación; debido a que las estructuras de acero requieren de mantención/mantenimiento.

1.3.2. Jaulas semi-sumergibles.

El diseño de este grupo de jaulas se caracteriza por su habilidad de sumergirse por periodos de tiempo en los cuales se presentan condiciones climáticas adversas. Por tanto ofrece la ventaja de que su diseño puede ser más liviano y su estructura más simple, así si son sumergidas durante las malas condiciones de mar, se pueden reducir considerablemente la exposición y por tanto se producirá menor tensión sobre la estructura y los fondeos, reduciendo de este modo la posibilidad de que ocurra un siniestro en el centro de cultivo. La reducción del movimiento de igual modo reduce considerablemente la posibilidad de que los peces puedan sufrir algún tipo de daño y disminuye su nivel de stress provocado por el movimiento. El objetivo de este tipo de sistemas de jaulas se encuentra en aumentar la seguridad y disminuir los costos del sistema. Sin embargo la implementación de los dos modos, superficie y bajo la superficie, y la necesidad de controlar las secuencia de inmersión en el tiempo correcto, añade un riesgo potencial y complejidad al sistema. De igual modo a las jaulas flotantes hay dos clases estructurales flexibles y rígidas, según el tipo de material de fabricación y su disposición.

Fig. 4: Jaula circular de HDPE semi-sumergible.
(Sitio web Prona)

1.3.3. Jaulas sumergibles.

Para el cultivo oceánico de peces, donde las alturas de olas son considerables, las jaulas sumergibles son la única forma de evitar los efectos de las condiciones climáticas de la superficie, donde la operación normal de la jaula estaría a una profundidad adecuada bajo la columna de agua "peligrosa". De igual modo la presencia de hielo en invierno es otro factor que a hecho necesario el diseño de este tipo de jaulas. Estos sistemas según se requiera pueden emerger a la superficie para procedimientos de mantención y/o inspección.

Fig. 5: Jaula sumergible (15).

1.3.4. Diseño utilizados por la industria acuícola Chilena.

Dentro de los principales proveedores de jaulas para la industria acuícola Chilena se encuentra: Aqua cards, PolarCirkel, Prona y WaveMaster Chile. Los cuales ofrecen principalmente las jaulas flotantes, regidas (metálicas) y flexibles (jaulas circulares HDPE).

Capítulo 2:
Descripción del método de los elementos finitos.

2.1. Introducción.

El método de los elementos finitos es un método numérico versátil ampliamente utilizado para resolver problemas que cubren un amplio espectro de los análisis en ingeniería. Aplicaciones comunes incluyen análisis estáticos, dinámica y comportamiento térmico de sistemas físicos, fluidos, etc. Los avances en hardware computacional han hecho más fácil y eficiente el uso de software de elementos finitos para la solución de problemas complejos de ingeniería en computadores personales.
Es importante tener presente que la "realidad" es más compleja que cualquier modelo que los científicos y matemáticos puedan generar; por tanto, los modelos son solo aproximaciones de la realidad, idealizaciones sobre las cuales no se puede establecer una validez absoluta sino una valides relativa y estadística. Por lo que el uso de los programas de elemento finito necesita de un conocimiento profundo de sus bases teóricas y un permanente estado de alerta y de crítica durante su aplicación.

2.2. Descripción general del método y pasos del análisis de elementos finitos.

El cálculo de deformaciones, y esfuerzos con métodos clásicos de análisis es logrado a través de soluciones analíticas de ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno y condiciones de contorno que describen el problema. El uso de métodos clásicos es probablemente el mejor camino para analizar una estructura simple; sin embargo, su uso es prohibitivo cuando los sistemas físicos son muy complejos. En tales casos la mejor alternativa es una solución obtenida con el método de los elementos finitos.
El método de los elementos finitos considera la estructura como un ensamble de pequeñas elementos de tamaño finito. El comportamiento de los elementos y de la estructura completa es obtenido por la formulación de un sistema de ecuaciones algebraicas que puede ser resuelto con un computador. Los puntos donde los elementos finitos están interconectados son llamados ***nodos o puntos nodales*** y el procedimiento de generación de nodos es llamado ***discretización o modelación***.

Generalmente, el análisis de elementos finitos involucra siete pasos que requieren de la decisión tomada por el usuario del programa. El resto de los pasos son automáticamente realizados por el programa computacional.

Las validaciones de estos programas están ampliamente descritas y documentadas.

Pasos del Análisis de Elemento Finito.

i. **Discretización o modelación de la estructura:** La estructura es dividida en elementos finitos. Este paso es uno de los más importantes en la determinación de la precisión de la solución del problema.

ii. **Definición de las propiedades del elemento:** En este paso, el usuario puede definir las propiedades del elemento y seleccionar los tipos de elementos finitos que es el más apropiado para modelar el sistema físico. En esto influye el tipo de problema, para seleccionar el elemento que mejor se ajuste a la respuesta estructural del sistema.

iii. **Ensamble de la matriz de rigidez del elemento:** La matriz de rigidez de un elemento consiste de coeficientes que pueden ser derivados a través del método de equilibrio, carga residual o el método de la energía. La matriz de rigidez del elemento describe los desplazamientos nodales con las fuerzas aplicadas a los nodos. El ensamble de la matriz de rigidez del elemento implica la aplicación de equilibrio para toda la estructura. Lo que es resuelto de manera automática por el programa.

iv. **Aplicación de las cargas:** Las fuerzas externas aplicadas puntuales o distribuidas, momentos y movimientos son proporcionados en este paso.

v. **Definición de las condiciones de contorno:** Las condiciones de contorno son aplicadas para impedir el desplazamiento solidó rígido del modelo, esto implica restringir los desplazamientos nodales de la zonas que poseen una cierta restricción, lo que permitirá reacciones y mantendrá el equilibrio estático de la estructura.

vi. **Solución del sistema de ecuaciones algebraico lineal:** La aplicación secuencial de los pasos mencionados conduce a un sistema de ecuaciones simultáneas donde los desplazamientos nodales son la incógnita.

vii. **Cálculo de esfuerzo:** con el adecuado desarrollo del proceso, los programas de elemento finito pueden calcular las tensiones, reacciones, formas modales u otra información pertinente.

2.3. Fundamentos teóricos del método de los elementos finitos.

Como parte de los pasos para el análisis mediante el método de los elementos finitos es importante incluir que el uso de este método requiere del conocimiento de algunos conceptos básicos, siendo la teoría de la elasticidad, el punto de partida para ello.

2.3.1. Conceptos generales sobre elasticidad.

Todo cuerpo se deforma bajo la acción de fuerzas aplicadas, al cesar éstas, tiende a recuperar su forma primitiva. Esta tendencia, que en mayor o menor grado, tienen todos los cuerpos, se denomina ***elasticidad.***

La teoría de la elasticidad permite describir el comportamiento de un cuerpo que está sometido a un sistema de cargas externas. El cuerpo se deforma de tal manera que las fuerzas internas están en equilibrio con fuerzas externas. Los conceptos de esfuerzo y deformación son usados para describir el comportamiento de los cuerpos deformables. La tensión está relacionada con la deformación a través de una relación constitutiva que depende del comportamiento del material. En la elasticidad lineal la relación esfuerzo-deformación está expresada por la ley de Hooke.

2.3.2. Tensión

Se conoce como tensión a la reacción que experimentan las fibras internas de un cuerpo, producto de la aplicación de un sistema de cargas externas. Considere el solidó de la fig. 6., que está sometida a un sistema de cargas externas. Un plano arbitrario pasa a través de punto **P** y divide el cuerpo en dos partes, una de las cuales es removida y el equilibrio de las fuerzas es examinada en la parte restante. El esfuerzo se desarrolla para equilibrar las fuerzas externas. Considere un área infinitesimal área dA en el plano que incluye el punto **P**. La resultante de las fuerzas internas actuando en el área dA es denominada dF y puede ser analizada en dos componentes: un normal al plano dF_n y otra tangente al plano dF_S. La tensión normal (σ) y tensión tangencial (τ) son definidos por:

$$\sigma = \frac{dF_n}{dA} \tag{2.1}$$

$$\tau = \frac{dF_s}{dA} \tag{2.2}$$

Respecto al concepto de tensión pueden hacerse las siguientes observaciones:

i. Las dimensiones de la tensión son $\left(F \cdot L^{-2}\right)$, o sea fuerza por unidad de superficie.
ii. La tensión depende del punto y la orientación de la sección elegida. Así en un punto dado se tendrán diferentes tensiones según la orientación considerada y para una sección dada se tendrán tensiones diferentes para puntos distintos.
iii. En general, la tensión no es normal al plano de corte considerado, sino que puede descomponerse según dos componentes: la tensión normal al plano de la sección (σ), y la tensión tangencial a dicho plano, (τ).

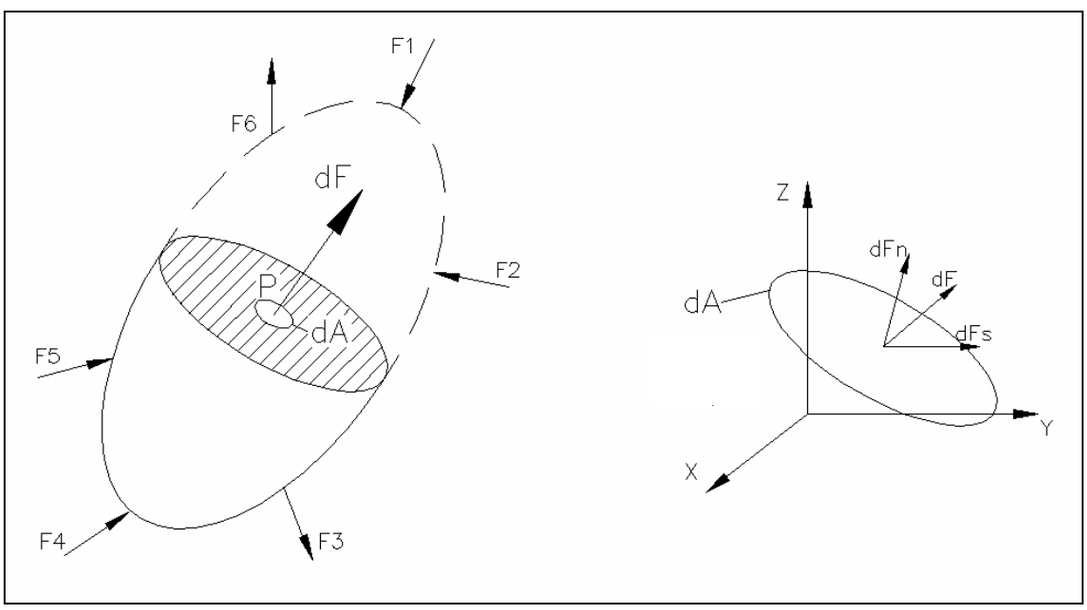


Fig. 6: Concepto de Tensión.

Para especificar las componentes de la tensión que actúa en el punto **P** en los planos ortogonales x-y, y-z y x-z pasando a través de punto. Adoptando un sistema de coordenadas cartesiano ortogonal x-y-z y analizando la tensión normal σ y de corte τ en sus nueve componentes como muestra la fig. 6. Las componentes normales son indicadas como σ_x, σ_y y σ_z, mientras que las componentes de las tensiones de corte son indicados como τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yx}, τ_{yz}, τ_{zx} y τ_{zy}.

El subíndice de las tensiones normales representa el eje coordenado al que es normal la superficie sobre la que actúan. Los dos subíndices de las tensiones de corte de una superficie indican, el primero, el eje al cual es normal la superficie sobre las que actúan y, el segundo el eje al que es paralela la componente tangencial. En las caras que no forman los ejes coordenados, se consideran componentes positivas las que tienen los sentidos de los ejes. En las caras que si forman los ejes coordenados, se consideran los ejes positivos opuestos. De esta forma, las tensiones de tracción son tensiones normales positivas y negativas las de compresión.

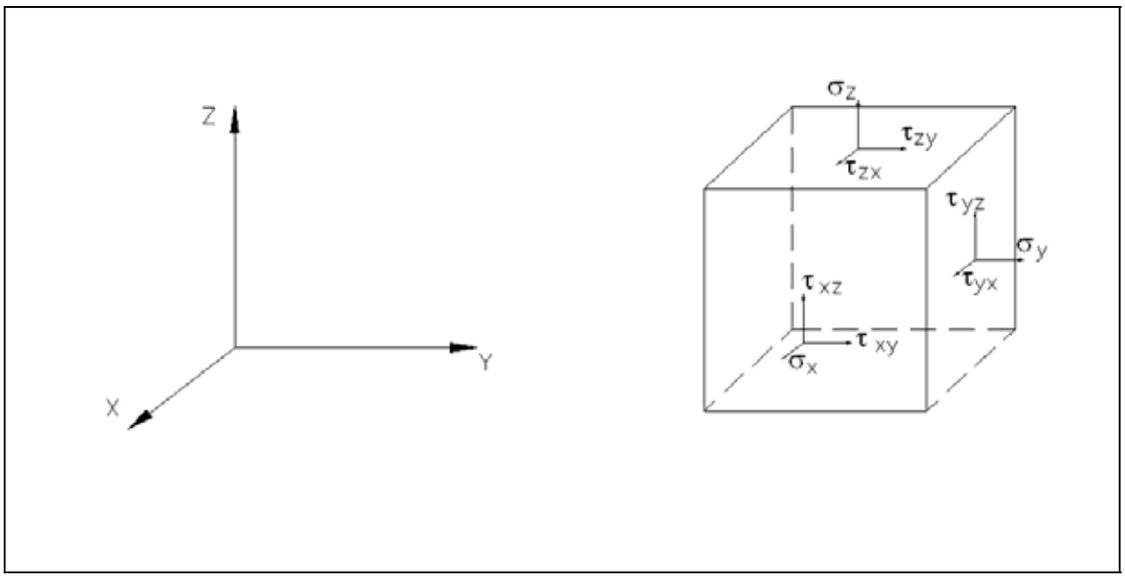


Fig. 7: Componentes cartesianas de la tensión.

El estado tensionad del punto **P** esta completamente definido por las nueve componentes:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \text{(tensor)} \qquad (2.3)$$

Los nueve términos pueden ser reducidos a seis, por la naturaleza complementaria de la fuerza de corte.

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} \end{aligned} \qquad (2.4)$$

2.3.3. Deformación

La deformación definida para una barra bajo tensión como la relación de deformación. Considere el solidó mostrado en la fig. 6. El esfuerzo produce deformación que puede ser analizada en nueve componentes. Tres son normal al plano x-y, y-z y x-z, son llamadas *deformación normal* y son indicadas como ε_x, ε_y y ε_z mientras las restantes son llamadas *deformación de corte* y son indicadas como γ_{xy}, γ_{xz}, γ_{yx}, γ_{yz}, γ_{zx} y γ_{zy}. La deformación normal produce dilatación, ej., cambio en el volumen pero no en la forma del cuerpo, mientras que la deformación de corte produce distorsión, ej., cambio en la forma pero no en el volumen. Las nueve componentes para un sistema coordenado x-y-z son:

$$\begin{matrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{matrix} \tag{2.5}$$

Notar que los desplazamientos componentes a lo largo de x, y, y z son indicados como $u(x,y,z)$, $v(x,y,z)$ y $w(x,y,z)$, respectivamente. Si los desplazamientos son pequeños comparado a las dimensiones de cuerpo, pueden ser descritos por la formulación de las siguientes expresiones lineales:

$$\begin{matrix} \varepsilon_x = \dfrac{\partial u}{\partial x} & \gamma_{xy} = \dfrac{\partial u}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{xz} = \dfrac{\partial u}{\partial z} + \dfrac{\partial w}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \dfrac{\partial v}{\partial y} & \gamma_{yx} = \dfrac{\partial v}{\partial x} + \dfrac{\partial u}{\partial y} & \gamma_{yz} = \dfrac{\partial v}{\partial z} + \dfrac{\partial w}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \dfrac{\partial w}{\partial z} & \gamma_{zx} = \dfrac{\partial w}{\partial x} + \dfrac{\partial u}{\partial z} & \gamma_{zy} = \dfrac{\partial w}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial z} \end{matrix} \tag{2.6}$$

La relacione deformación – desplazamiento (2.6) corresponde a la teoría de pequeñas deflexiones y es válida para un gran numero de aplicaciones comúnmente encontradas en ingeniería. En casos especiales donde la deformación es grande comparada con las dimensiones del cuerpo, las ecuaciones (2.6) son modificadas y un análisis no-lineal debe ser realizado.

2.3.4. Relación esfuerzo – deformación

Para cuerpos en los que las deformaciones son pequeñas y una vez que han sido retiradas las cargas recupera su forma primitiva, este comportamiento del cuerpo puede ser descrito a través de la elasticidad.

En la elasticidad, la relación esfuerzo – deformación puede ser definida por la ley de Hooke. Para casos generales, la ley de Hooke puede ser indicada por:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \tag{2.7}$$

Donde la matriz $[C]$ contiene las constantes elásticas del material, el vector $\{\sigma\}$ contiene las seis componentes de la tensión y el vector $\{\varepsilon\}$ contiene las seis componentes de la deformación.

Para materiales isótropos, las tres constantes elásticas son relacionadas a dos propiedades del material: el modulo de elasticidad (E) y el modulo de corte (G). Alternativamente el coeficiente de Poisson (v) puede ser usado. Para pequeñas deflexiones, las siguientes relaciones son validas para el esfuerzo y la deformación en materiales isótropos.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E}\left[\sigma_x - v\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right] \\
\varepsilon_y &= \frac{1}{E}\left[\sigma_y - v\left(\sigma_x + \sigma_z\right)\right] \\
\varepsilon_z &= \frac{1}{E}\left[\sigma_z - v\left(\sigma_x + \sigma_y\right)\right] \\
\gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\
\gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G} \\
\gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Usando el sistema de ecuaciones (2.8) podemos expresar el esfuerzo con respecto a la deformación y escribir la ecuación (2.7) en forma matricial

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

Donde las constantes elásticas C_{11}, C_{12} y C_{66} son dadas por:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{(1-v)E}{(1+v)(1-2v)} \\ C_{12} &= \frac{vE}{(1+v)(1-2v)} \\ C_{66} &= \frac{E}{2(1+v)} \equiv G \end{aligned} \tag{2.10}$$

2.4. Definición de los Elementos.

2.4.1. Elementos de placa.

El uso de las placas es amplio, incluyendo estructuras arquitectónicas, aviones, barcos y partes de maquinas entre otras. Superficies estructurales con espesor que es mucho más pequeños comparados a las otras dimensiones, pueden modelarse como placas.

Relación geométrica de elemento de placa.

$$\frac{h}{l} \leq \frac{1}{10} \tag{2.11}$$

Donde:

h = espesor de la placa.

l = la menor de las otras dos dimensiones de la placa.

Las placas soportan cargas transversales por acción de flexión y cargas en el plano por acción de membrana. En el análisis de placas con deformaciones pequeñas, las acciones de membrana y flexión son desacopladas, esto es, el mecanismo por el cual se manifiesta no tiene relación el uno con el otro y como tal pueden ser estudiados independientemente.

La acción de membrana puede ser analizada como una tensión plana y el comportamiento de flexión de placas delgadas con la teoría clásica de Kirchhoff.

2.4.1.1. Teoría clásica de flexión de placas.

El comportamiento de placas hechas de material elástico lineal homogéneo e isótropo que experimenta pequeñas deformaciones es introducido con la teoría clásica de flexión de placas (Kirchhoff). La teoría se basa en las siguientes suposiciones:

i. Las deflexiones son pequeñas comparadas con el espesor de la placa.
ii. La pendiente de deflexión de la superficie media es pequeña.
iii. Los puntos del plano medio solo se desplazan verticalmente.
iv. La sección plana inicialmente normal a la superficie media permanece plana y normal a la superficie deformada.

v. La deformación de corte transversal es despreciado.

vi. El esfuerzo normal a la superficie media es despreciada.

Basados en las suposiciones para la flexión de placas, las ecuaciones de deformación – desplazamientos pueden ser escritas de la siguiente manera:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \qquad (2.12)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

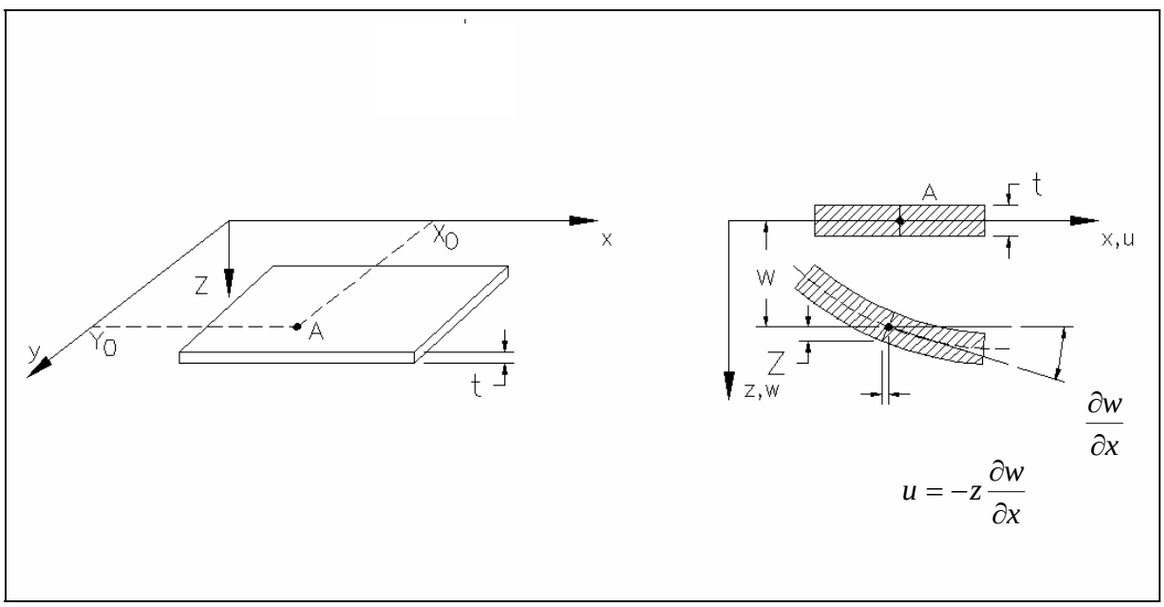


Fig. 8: Placa antes y después de la deformación.

2.4.1.2. Tensión plana.

Los problemas tridimensionales pueden ser reducidos a dos dimensiones si satisfacen las condiciones del estado de tensión plana, deformación plana o axisimetría. En ambos casos la modelación de la estructura se simplifica enormemente y el esfuerzo computacional se reduce sustancialmente.

Una estructura prismática se encuentra en tensión plana si una de sus dimensiones (espesor) es mucho menor que las otras dos, y sobre ella actúan cargas en cualquiera de sus bordes.

Uno de los problemas de tensión plana es el de una placa delgada cargada uniformemente en cualquiera de sus bordes ver fig. 9. En este caso debido al pequeño espesor de la placa, se puede considerar que no se desarrolla esfuerzos en el eje x, por ser estos de un valor despreciable.

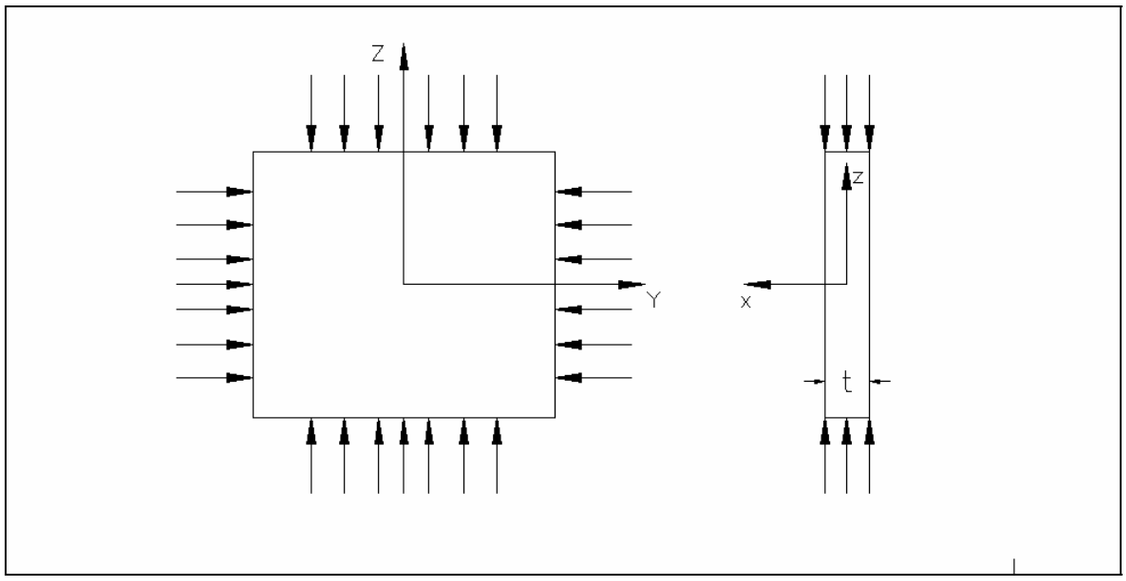


Fig. 9: Placa bajo tensión plana.

$$\sigma_x = \tau_{yx} = \tau_{zx} = 0 \tag{2.13}$$

Los esfuerzos distintos de cero que se desarrollan en un punto son mostrados en la fig.10. Aquí se pueden apreciar que la elongación de corte a lo largo del eje X son cero, mientras que la deformación normal a lo largo de eje X es distinto a cero debido a los efectos de Poisson.

$$\gamma_{yx} = \gamma_{zx} = 0 \tag{2.21}$$

$$\varepsilon_x = -\frac{v}{E}\left(\sigma_y + \sigma_z\right) \tag{2.22}$$

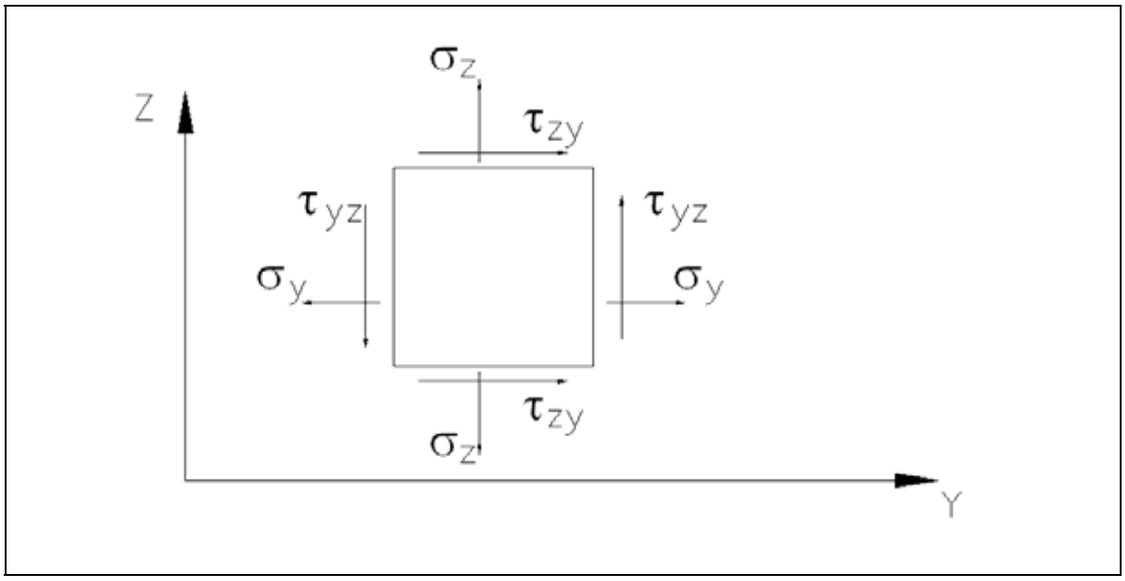


Fig. 10: Tensiones distintas de cero.

Capítulo 3:

Análisis de las condiciones ambientales que afectan al sistema de jaulas y descripción del tipo de análisis a realizar.

3.1. Introducción

Generalmente la selección del sitio de instalación del centro de cultivo depende de aspectos políticos, legales y económicos. Otros aspectos serán por ejemplo las facilidades de instalaciones portuarias y las condiciones necesarias que debe tener el medio acuático para el cultivo de peces.

La identificación del sitio adecuado para la instalación del centro del cultivo es un elemento de gran importancia en el éxito de la operación del centro. Muchos estudios serán llevados a cabo antes de la instalación de un centro de cultivo, todos estos tienen como objetivo determinar si existen condiciones adecuadas para el cultivo de peces y la determinación de las fuerzas o cargas a las cuales estará sometido el sistema de jaulas.

Los sitios para centros de cultivo de peces instalados en el mar, puede ser clasificados en, aguas interiores o protegidas y costa afuera.

3.2. Cálculo de las fuerzas incidentes sobre una estructura flotante.

La cuantificación de las fuerzas ambientales incidentes sobre el sistema de jaulas es un punto importante para el cálculo y selección del tipo de jaulas, estas fuerzas son calculadas en base a los datos ambientales recopilados del sitio en el cual se instalará el centro de cultivo, a saber:

i. Viento.
ii. Corriente.
iii. Olas.
iv. Hielo y nieve.

Donde los principales factores ambientales a considerar son el viento, la corriente y las olas.

3.2.1. Viento.

El viento es la variable de estado de movimiento del aire. Es causado por las diferencias de temperatura existentes al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la tierra y de la atmósfera. Se denomina propiamente "viento" a la corriente de aire que se desplaza en sentido horizontal, reservándose la denominación de "corriente de convección" para los movimientos de aire en sentido vertical que son los que caracterizan a los fenómenos atmosféricos locales, como la formación de nubes de tormenta.

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (depresiones) y su fuerza es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones. En su movimiento, el viento se ve alterado por diversos factores tales como el relieve y la aceleración de Coriolis.

En la superficie el viento viene definido por dos parámetros: la dirección en el plano horizontal y la velocidad.

La dirección del viento viene definida por el punto del horizonte del observador desde el cual sopla. En la actualidad, se usa internacionalmente la rosa dividida en 360°. El cálculo se realiza tomando como origen el norte y contando los grados en el sentido de giro del reloj. De este modo, un viento del SE equivale a 135°, uno del S a 180°, uno del NW, a 315°, etc.

La velocidad del viento se mide preferentemente en náutica en nudos y mediante la escala Beaufort. Esta escala comprende 12 grados de intensidad creciente que describen el viento a partir del estado de la mar. Esta descripción es inexacta pues varía en función del tipo de aguas donde se manifiesta el viento.

Con la llegada de los modernos anemómetros, a cada grado de la escala se le ha asignado una banda de velocidades medidas por lo menos durante 10 minutos a 10 metros de altura sobre el nivel del mar.

La unidad del viento en el sistema Internacional es m/s, sin embargo aún se usan los nudos (kn) y km/h.

$$1 \text{ kn} = 1.852 \text{ km/h} \quad \text{ó} \quad 1 \text{ kn} = 0.514 \text{ m/s}$$

El aparato tradicionalmente empleado para medir la dirección del viento es la veleta que marca la dirección en grados en la propia rosa. Debe ser instalado de acuerdo a los procedimientos internacionales vigentes para evitar las perturbaciones.

Se considera que a partir de los 10 metros de altura sobre el nivel del mar las perturbaciones no afectan de forma notable a la medida.
La velocidad del viento se mide con el anemómetro, que es un molinete de tres brazos, separados por ángulos de 120º, que se mueve alrededor de un eje vertical. Los brazos giran con el viento y permiten medir su velocidad.

3.2.1.1. Metodología general para el cálculo.

La expresión general para el cálculo de la acción del viento sobre cualquier estructura situada en el mar viene dada por:

$$F_V = C_V \times \frac{1}{2}\rho \times V^2 \times A \qquad (3.1)$$

Donde:

F_V : Fuerza del viento (N)
C_V : Coeficiente eólico
A : Área proyectada de las superficies a las que se enfrenta (m^2)
$1/2 x \rho x V^2$: término conocido como "presión dinámica" del viento, tabulable para cada velocidad, en la que:
ρ : Densidad del aire (1,222 – 1,226 kg/m^3).
V: velocidad del viento a 10 de altura sobre la superficie (m/s).

Para calcular la fuerza que ejerce el viento sobre una estructura deberá subdividirse la misma en todas sus partes diferenciadas, aplicando el coeficiente eólico que corresponda a cada una de las superficies. La fuerza total será la sumatoria de la acción del viento sobre las diferentes partes:

i Valores del coeficiente eólico (C_V)

Estos valores varían ligeramente para las distintas fuentes consultadas. De forma general el coeficiente eólico se descompone en dos partes, representando una un factor de forma de la estructura y la otra un factor dependiente de la altura a la que está dicha parte de la estructura, es decir:

$$C_V = C_s \times C_h \qquad (3.2)$$

Donde:

- C_s= coeficiente de forma
- C_h= coeficiente de altura.

La ROM (17) establece un factor de forma o coeficiente eólico de fuerza (C_f), este coeficiente es variable en función de la dirección de actuación del viento. Sus valores se estipulan para un viento actuando en la dirección principal de los ejes de la estructura, a pesar de esto, entregan la posibilidad de calcular la fuerza resultante para viento actuando en cualquier dirección, con estos mismos coeficientes bajo una nueva formulación estipuladas en sus manuales.

De la bibliografía estudiada la ROM, ABS (9) y la API (16), entre otras como la Lloyd's Register y Det Norske Veritas (DNV) , tienen estos valores tabulados. La ABS y API tienen valores casi homologados.

Tabla 4: Valores de coeficientes de forma según ABS (9)

Valores para C_s	
Formas	C_s
Esféricas	0,4
Formas cilíndricas	0,5
Superestructuras	1,0
Estructuras aisladas (Grúas, vigas, puentes, etc.	1,5
Pescantes, aparejos de grúas	1,3

Tabla 5: Valores de corrección por altura según ABS (9)

Valor para C_h	
Altura (m)	C_h
0,0-15,3	1,00
15,3-30,5	1,10
30,5-46,0	1,20
46,0-61,0	1,30
76,0-91,5	1,37
91,5-106,5	1,43

La altura considerada es la distancia vertical desde la superficie del agua al centro del área definida.

3.2.2. Corrientes.

Las corrientes marinas son movimientos de arrastre o traslado de aguas oceánicas producidas por la acción combinada del viento, las mareas y la densidad del agua, las que a su vez se originan por las variaciones de temperatura de las masas de agua de diversas latitudes, como el ecuador o el polo, no constituyendo un fenómeno de carácter periódico. La dirección de una corriente marina se indica siempre por la dirección de su desplazamiento.

Su origen puede ser atribuido a tres causas principalmente:

- Variación de la densidad de los senos de las olas
- Vientos sobre la superficie de los mares
- Desplazamiento de aguas producto de mareas y ondas internas

Para la acuicultura es de gran interés las corrientes locales, ósea, las que se dan cerca de las costas, estás pueden ser inducidas o influenciadas por múltiples factores como las características del lugar, perfiles de las costas, topografías del lugar o régimen local de vientos.
Según su origen, se pueden clasificar en:

- Corrientes termohalinas o corrientes profundas. (En estas el agua se desplaza por las diferencias de densidad)
- Corrientes de arrastre o de viento
- Corrientes de gradientes o de mareas

En la metodología en revisión, se considera para un cálculo teórico, que las fuerzas producidas por las corrientes afectan principalmente a la red y a los flotadores, lo que es lógico por la cantidad de área que significa, comparada con el área de la estructura sumergida. Podemos descartar al sistema de fondeo, si se considera como un sistema independiente y teniendo presente que los esfuerzos máximos que se producen en él, son producto del oleaje y de las corrientes desplazando la estructura, ejerciendo tensiones en sus líneas.

Lo ideal es medir la corriente con métodos instrumentales adecuados y para éste caso, a diferencia de los fenómenos viento y olas, ésta si se puede medir instrumentalmente.

En la práctica se realizan dos tipos de mediciones:

- Correntometría Euleriana o Fija
- Correntometría Lagrangeana.

La correntrometría Euleriana considera su estudio en función de un volumen o espacio por el cual entra y sale el fluido. En la práctica, consiste en una medición hecha por un instrumento que se sumerge y se fondea (ó invertido en superficie), luego emite señales sonoras definiendo el perfil de velocidades de las corrientes de un volumen de agua en forma cónica. Este instrumento se conoce como correntómetro acústico Doppler ó ADCP "Acoustic Doppler Current Profiler".

La correntometría Lagrangeana, sigue un volumen de agua en su desplazamiento por el espacio. Para estas mediciones se utilizan derivadores, aparatos que navegan por el mar, río, estuario o lago y que se construyen con distintas geometrías y para trabajar a distintas profundidades, describiendo sus trayectorias mediante el sistema de posicionamiento global ó GPS.

La velocidad de la corriente es preponderante en el cálculo de las fuerzas inducidas por corrientes, ésta puede variar a lo largo de la columna de medición, o sea en el sentido de la profundidad, pero también varia en orden decreciente en el sentido de la superficie o paralela a ella, producto del denominado efecto "sombra", que no es más que la disminución de la intensidad de la corriente al encontrar oposición en su camino.

3.2.2.1. Metodología general para el cálculo.

Las fuerzas hidrodinámicas generadas por el flujo sobre un cuerpo son divididas en dos componentes, fuerza de arrastre (drag) y de sustentación (lift). La fuerza de arrastre es paralela a la dirección del flujo mientras ($F_D || V_C$), mientras que la fuerza de sustentación es perpendicular a la dirección del flujo ($F_L \perp V_C$). En el caso de las jaulas en mar abierto, la rede es la parte principal de la estructura que se encuentra expuesta a la corriente, la cual genera una fuerza importante sobre la misma. En este caso la fuerza de sustentación generada es omitida debido a su magnitud insignificante.

La expresión general para la estimación de la fuerza de arrastre, pertenece a la fórmula clásica de mecánica de los fluidos para un elemento sumergido que se muestra a continuación:

$$F_D = \frac{1}{2} \times \rho \times C_D \times A \times V_C^{\ 2} \qquad (3.3)$$

Donde:

- F_D : fuerza de arrastre (N)
- C_D : coeficiente de arrastre
- ρ : densidad del agua (1.025 – 1.040 kg/m^3)
- A : área de la superficie que se oponen a la corriente (m^2)
- V_C : velocidad de la corriente (m/s)

i Valores de coeficiente de arrastre (C_D)

El coeficiente de arrastre es un parámetro que depende de los siguientes factores:

1. Forma del objeto sumergido.
2. Superficie mojada.
3. Rugosidad de dicha superficie.

El coeficiente de arrastre y sustentación puede ser calculado usando las fórmulas propuestas por "Aarsnes" (18), basadas en un trabajo teórico y estudio de pruebas de modelos.

$$C_D = 0.04 + (-0.04 + S - 1.24S^2 + 13.7S^3)\cos(\alpha) \qquad (3.4)$$

Donde:

S : factor de solidez que relaciona el diámetro de las fibras de la red (A_P) con el tamaño de la malla (A): $S=A_P/A$. Para redes peceras S= 18% -35%

α : ángulo de ataque y es definido por la dirección del vector de velocidad del flujo y vector perpendicular al plano de la red.

(Las fórmula no debe ser usada para un factor de solidez mayor a 0.35.)

Se debe considerar que para estructuras flexibles, como es el caso de una red en forma de cilindro, las fuerzas globales no son proporcionales al cuadrado de la velocidad para todas las velocidades. Esto es debido a la deformación del cilindro, que comienza a

ocurrir a mayores velocidades de flujo, para poder obtener este efecto en un análisis numérico mediante el método de elementos finitos sería necesario modelar la red y realizar un análisis dinámico. Como la estructura es flexible la relación entre la velocidad de corriente y las fuerzas globales es compleja debido a que las fuerzas y la deformación dependen unas de otras. Los coeficientes de fuerza dependen del factor de solides de la malla y el ángulo de ataque, pero ambas propiedades de la geometría de la malla y su deformación. Es por esto que para este análisis se supondrá a la malla en su máxima deformación y con una forma conocida con si en ese instante se le "congelará" la situación.

3.2.3. Olas.

Las olas se generan en el límite de dos fluidos como en el caso del agua y el aire, cuando por el cambio de la presión, la superficie calma del agua se pone en movimiento rítmico y ondulatorio. Debemos enfatizar que las olas no son un traslado de las masas del líquido, sino que una propagación del movimiento, o sea solo transferencia de energía a través del agua.

Al "soplar" el viento sobre la superficie del mar y dependiendo de su intensidad podrá formar olas desde unos cuantos centímetros hasta varios metros. Estas ondas generadas en el mar quedan definidas por las siguientes características:

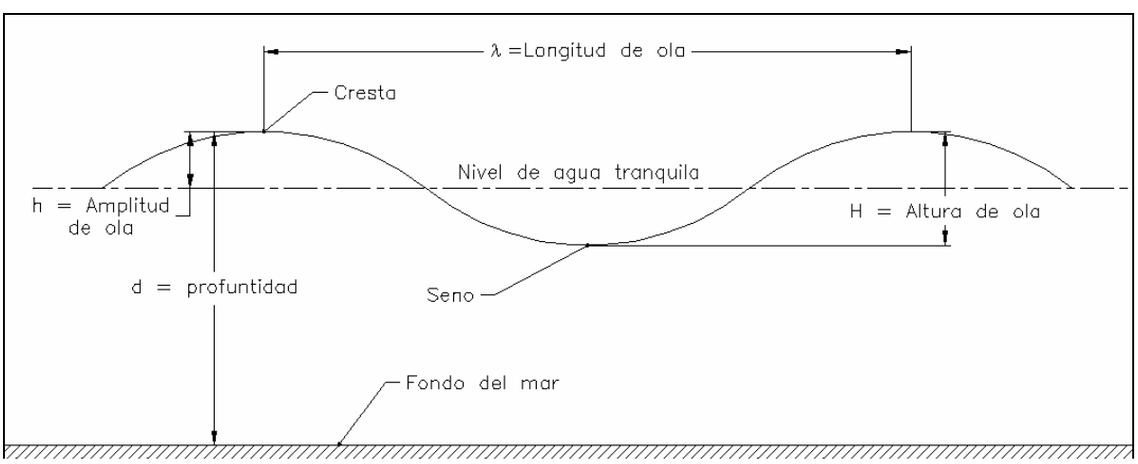


Fig. 11: Características de una ola teórica

- *Altura de ola (H)* : es la distancia vertical que existe entre una cresta y un valle o seno.

- *Longitud de Ola (λ)* : es la distancia horizontal que existe entre dos crestas o dos valles consecutivos.

- *Periodo de la Ola (T)* : tiempo que transcurre entre el paso consecutivo de dos crestas o dos valles por el mismo punto.

Estas características en un sitio cualquiera del océano quedan determinadas por tres variables principalmente:

a). *Fetch* : es la distancia en la que actúa el viento sobre la superficie "libre" del mar.
b). *Distancia de decaimiento* : es la distancia que viaja la ola después de dejar la zona de generación.
c). *Velocidad del viento*
d). *Profundidad*
Podríamos realizar una clasificación de las ondas que se presentan en el océano. Según el período, podemos obtener la siguiente tabla:

Tabla 6: Clasificación de ondas según su periodo (11).

Periodo	Tipo	Fuerza que la produce	Fuerza que la restaura
< 0.1 seg	Capilares	Viento	Tensión superficial
0.1 a 1 seg	Ultragravedad	Viento	Tensión superficial, Fza de grav.
1 a 30 seg	Gravedad	Viento	Gravedad
30 seg a 5 min	Infragravedad	Viento	Gravedad
5 min a 12 hr	Largo periodo	Tormentas y Tsunamis	Fuerza de Coriolis
12 hr a 24 hr	Largo periodo	Sol y Luna	Fuerza de Coriolis
> 24 hr	Muy largo periodo	Sol y Luna	Fuerza de Coriolis

La relación viento y estado mar se mide tradicionalmente con dos escalas, una mide la fuerza del viento y se denomina escala *"beaufort"* y la otra, caracteriza los estados de la mar y se le conoce como escala *"Douglas"*. En forma general estas constan de una graduación, de los nombres de cada grado y de la valorización correspondiente, siendo para el viento la velocidad y para la mar la altura de olas.

Las dos escalas se relacionan en la tabla siguiente:

Tabla 7: Escala Beaufort y Douglas (11).

ESCALA DE BEAUFORT			ESCALA DE DOUGLAS		
Grado	**Nombre**	**Velocidad Viento (m/s)**	**Grado**	**Nombre**	**H⅓ m**
0	Calma	0,0 - 0,2	0	Calma	0
1	Ventolina	0,3 - 1,5	1	Llana	0,1 - 0,2
2	Flojito	1,6 - 3,3	2	Rizada	0,3 - 0,5
3	Flojo	3,4 - 5,4			0,6 - 1,0
4	Bonancible	5,5 - 7,9	3	Marejadilla	1.5
5	Fresquito	8,0 - 10,7	4	Marejada	2.0
6	Fresco	10,8 - 13,8	5	Gruesa	3.5
7	Frescachón	13,9 - 17,1	6	Muy gruesa	5.0
8	Duro	17,2 - 20,7			7.5
9	Muy duro	20,8 - 24,4	7	Arbolada	9.5
10	Temporal	24,5 - 28,4	8	Montañosa	12.0
11	Borrasca	28,5 - 32,7	9	Confusa	15.0
12	Huracán	> 32,7			> 15

3.2.1.2. Revisión de la teoría potencial de las olas regulares progresivas.

La teoría potencial de olas supone que la forma de las olas en el mar es una función senoidal (o cosenoidal), es decir:

$$\eta = h_a \times e^{\frac{-2\pi y}{\lambda}} \times sen(m(x-ct)) \,. \qquad (3.5)$$

En la superficie libre del agua y=0.

Esta ecuación corresponde a una ola que avanza de izquierda hacia la derecha.

Para esta teoría dada las dificultades de incluir en su desarrollo, los efectos viscosos, de rotacionalidad, de compresibilidad del agua etc. Se supone que:

- Viscosidad nula: $\mu = 0$
- Incompresibilidad del agua.
- Flujo irrotacionalidad en olas.

3.2.1.3. Metodología de cálculo.

Las fuerzas actuando sobre una estructura en cierto estado de mar, es una materia compleja, debido al carácter dinámico del problema y a menudo imposible de desarrollar con métodos analíticos.

Las instalaciones fondeadas permanentemente se diseñan con el temporal de retorno de 50 años, sin embargo tanto la mayor altura de ola probable bajo esa condición como las condiciones media son importantes. La mayor altura probable de ola, sirve para diseñar las condiciones del sistema de fondeo, para evitar la rotura instantánea de las líneas de fondeo.
Si pensamos en prolongar la vida útil de la instalación, los estudios que podamos realizar con los datos medios de las olas nos entregarían la posibilidad de comprobar los efectos probables de la fatiga, por ello ambos datos son importantes.

Las fuerzas a considerar para un artefacto de superficie flotando en el mar, es el producido por la diferencia entre la distribución de peso propio y el empuje, esta diferencia se ve puede ver aumentada al flotar el artefacto sobre las olas.

La presencia de las olas genera además una variación en la velocidad del flujo que se encuentra con la red.

3.3. Descripción del tipo de análisis a realizar.

Los objetivos de este trabajo se centra en determinar el estado de tensiones y deformaciones mediante el método de elementos finitos, con el programa computacional comercial ALGOR, para esto se realizará un análisis estático lineal en el que se idealiza el problema y se estudia una situación particular en que se "congela" la posición y las variables o condiciones ambientales que afecta a la estructura en análisis.

El análisis estático lineal puede ser usado en casos donde todas las cargas aplicadas son estáticas y las deformaciones del material están dentro del rango elástico, este tipo de análisis permite el estudio de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y fuerzas axiales y de corte. Para realizar el estudio de la jaula bajo este tipo de análisis todas las cargas ambientales fueron traducidas a cargas estáticas ya sean puntuales y/o de presión.

El tipo de elemento utilizado en el análisis es el elemento de placa, el cual consta de 3 o 4 nodos formulado en 3 dimensiones, cada nodo posee 5 grados de libertad 3 desplazamientos y dos rotaciones, la rotación con respecto a la dirección normal al plano está limitada. Este elemento soporta cargas nodales, momentos nodales (excepto

cuando son respecto a un eje normal a la cara del elemento), presión (perpendicular a la cara del elemento), aceleración de gravedad y cargas centrifugas y térmicas.

Pasos típicos usando ALGOR.

En un análisis estático lineal típico, hay una serie de pasos que se siguen usualmente durante el análisis:

1. Generación de la malla (una parrilla de nodos y elementos) que definen el modelo.
2. Definición del sistema de unidades.
3. Definición de los parámetros de análisis del modelo.
4. Definición de los tipos de elementos y parámetros.
5. Aplicación de cargas y restricciones.
6. Ensamble de la matriz de rigidez del elemento.
7. Solución del sistema de ecuaciones algebraico lineal.
8. Calculo de los resultados.
9. Revisión de los resultados.
10. Generación de un informe de los resultados del análisis.

Estos pasos son usualmente divididos en tres etapas:

1. Definición del modelo: Pasos 1-5.
2. Análisis de modelo: Pasos 6-8 (Estos pasos son automáticamente realizados por ALGOR).
3. Evaluación de los resultados: Pasos 9 y 10.

Capítulo 4:

Análisis estructural mediante FEM de jaula circular de HDPE

4.1. Introducción.

Para la determinación del modelo de jaula a analizar se revisaron los existentes en el mercado nacional, de los cuales se pudo extraer sus dimensiones y el tipo de material del que están fabricados para un modelo de jaula Standard.

La jaula en análisis corresponde a una jaula circular de 30 (mts.) de diámetro construida de HDPE con bracket de polypropylene, con se muestra en la fig.(12).

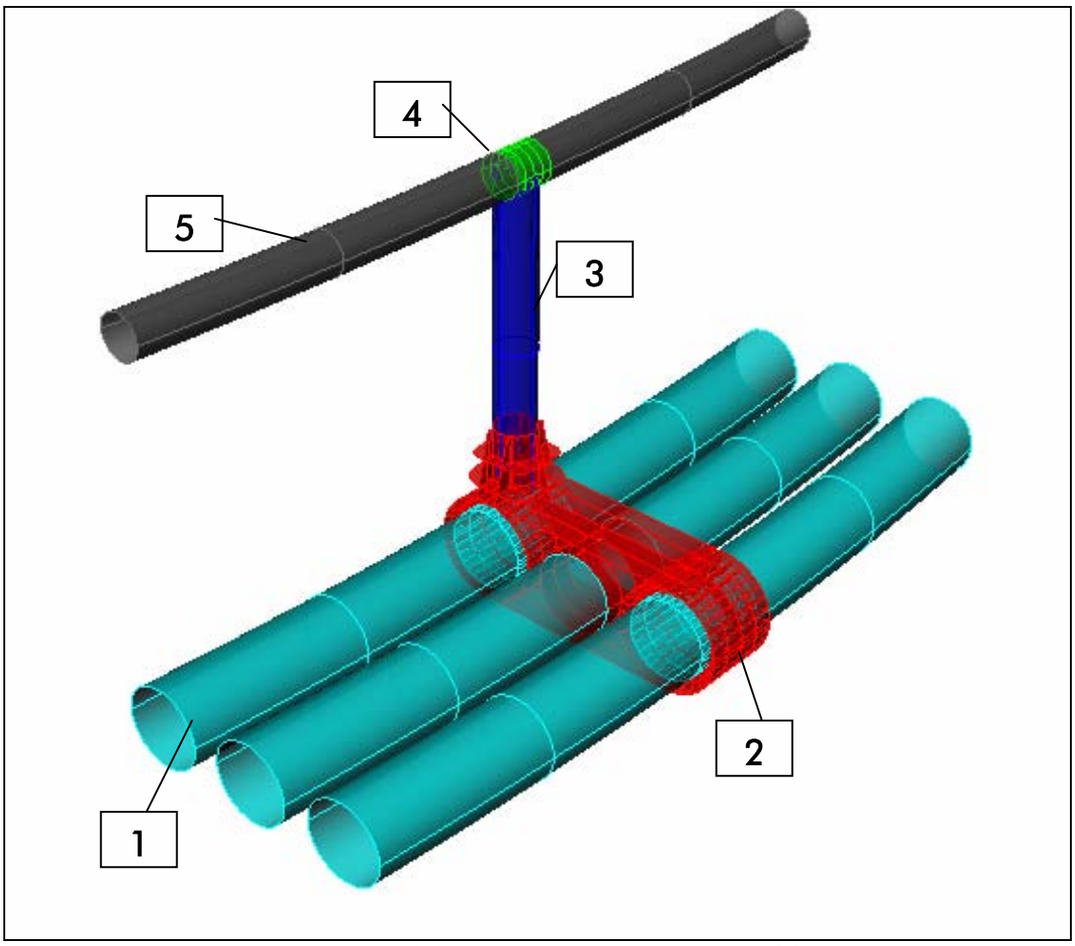


Fig. 12: Isométrica sección jaula circular de HDPE

Tabla 8: Especificación materialidad balsas jaulas circular de HDPE

Especificaciones técnicas			
Item		Material	Tipo
1	Tubería Flotadores	HDPE	Ø250 x 13 mm
2	Bracket	PP	Espesor 6 mm
3	Soporte pasamano	HDPE	Ø125 x 9 mm
4	Conexión pasamano	HDPE	Ø130 x 9 mm
5	Pasamano	HDPE	Ø125 x 9 mm

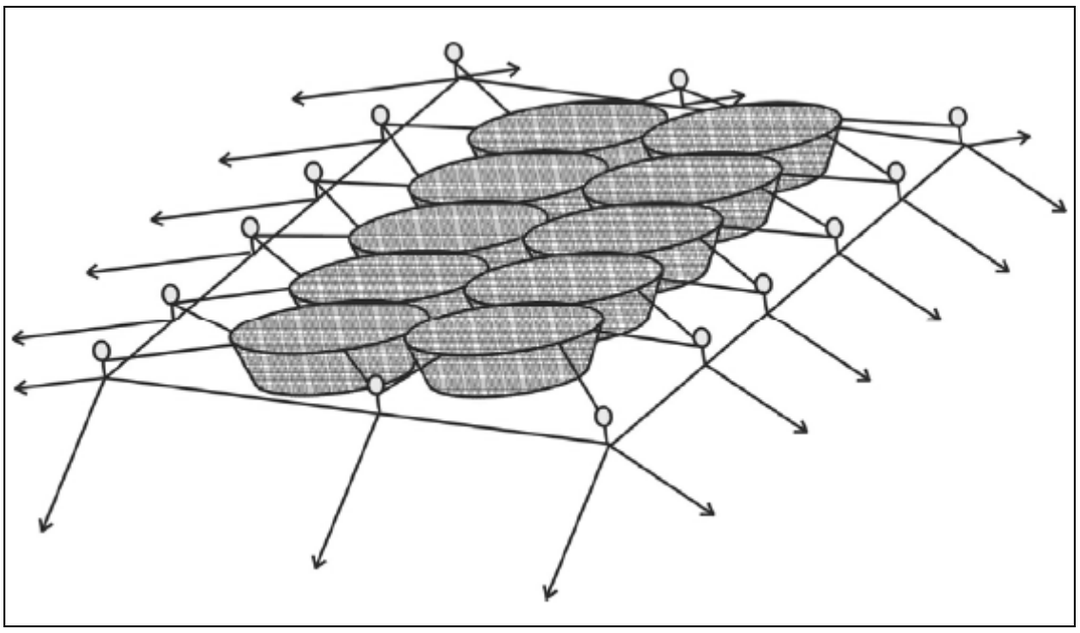


Fig. 13: Set de jaulas circulares de HDPE 2x5

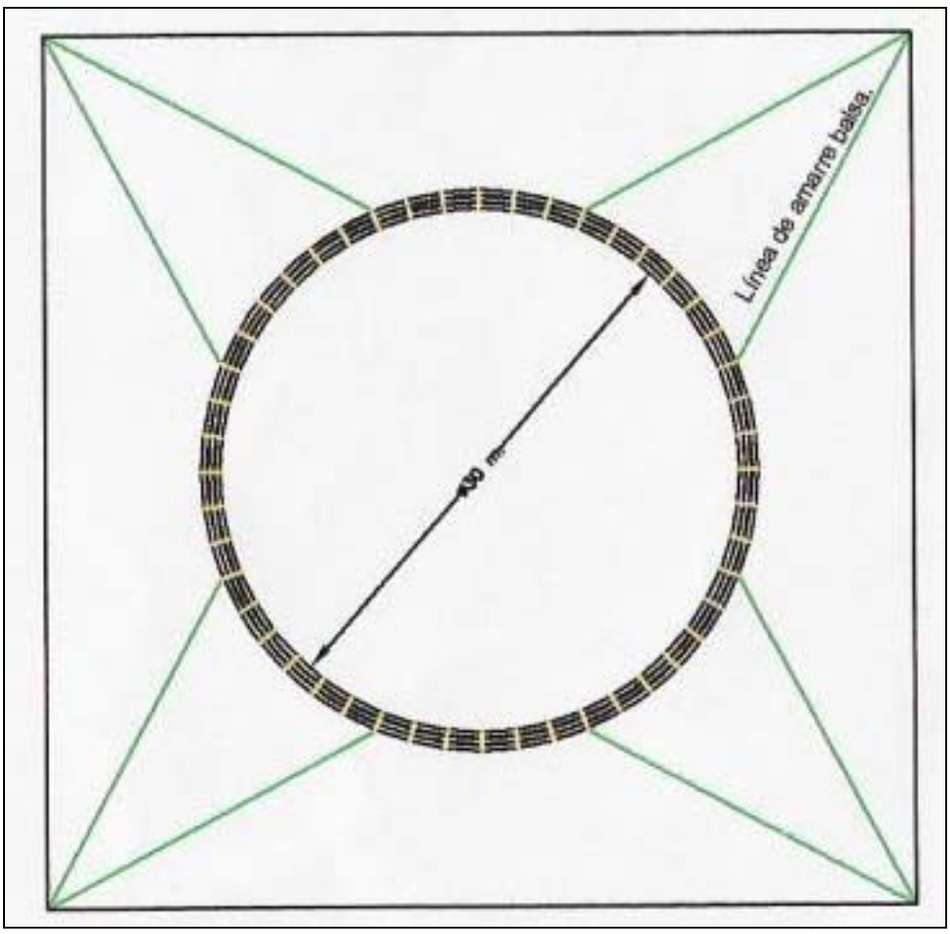


Fig. 14: Vista planta líneas de fondeo jaula circular de HDPE Ø30 (m).

4.2. Descripción del problema.

El objetivo principal de este análisis es la determinación las deformaciones y tensiones de los distintos elementos de una jaula circular de 30 (mts.) de diámetro, bajo la acción de cargas ambientales.

Se analizan dos modelos de la configuración, uno global, con el propósito de obtener información del estado tensional y deformaciones de la balsa en conjunto y un segundo modelo que contempla la zona de brackets, considerando su estructura, posición y respuesta a las cargas externas a los que se somete.

Fig. 15: Fotografía que muestra el comportamiento de jaulas circulares de HDPE en olas. (Sitio web Polar Cirkel)

Una estructura flotante es afectada por varios tipo de carga (ver Cap. 3), tales como la acción del viento, corriente y olas. Las olas son la causa más importante del movimiento y la consecuente respuesta estructural en un estado de mar dado.

Debido a las propiedades mecánicas del material (HDPE) que determinan su comportamiento, la excitación producida por las olas será omitida en este análisis ya que para la descripción teórica de una estructura flotante, la que es afectada por cargas dinámicas impuestas por las olas se requiere de la realización de un análisis hidroelastico, que es una parte de la ciencia que investiga fenómenos relacionados con la interacción entre fluidos y estructuras flexibles.

4.3. Propiedades del material.

La materialidad corresponde a polietileno de alta densidad (HDPE) en los flotadores y polypropylene (Barckets)

Naturaleza del material.

El comportamiento del material se ve determinado por sus propiedades mecánicas las cuales varían de un tipo de material a otro, en el caso de los plásticos estos presentan propiedades visco elásticas (o dependencia del tiempo). Uno de los conceptos equivocados sobre el plástico, particularmente el polietileno, es que pierde su resistencia con el tiempo, esta idea resulta de aplicar criterios elásticos de comportamiento a un material visco elástico. Cuando una probeta de polietileno es flexionada o tensada en el laboratorio, la curvatura de esfuerzo deformación que resulta tiene módulo de elasticidad alto que inmediatamente comienza a decrecer como muestra la fig. 16.

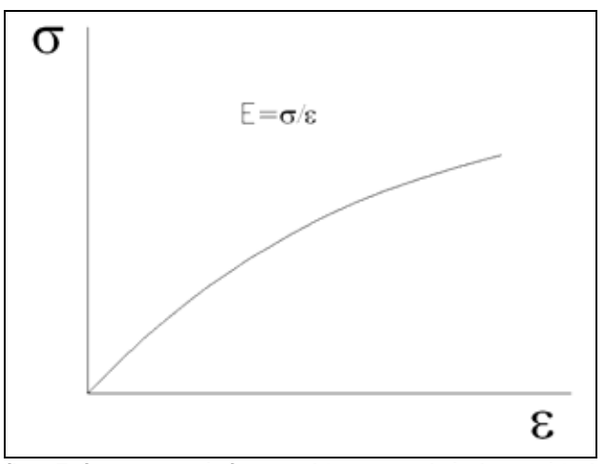


Fig. 16: Grafico Esfuerzo vs deformación material visco elástico (plástico).

Para la obtención del módulo de elasticidad es recomendable la realización de una prueba en un laboratorio, como la que se muestra a continuación.

Experimento realizado por David Fredriksson (profesor asistente) y Judson Decew (Ingeniero investigador), Universidad de "New Hampshire", Dirham, Inglaterra (8).

Fig. 17: Probeta de HDPE antes de ser probada, largo 125 mm (8).

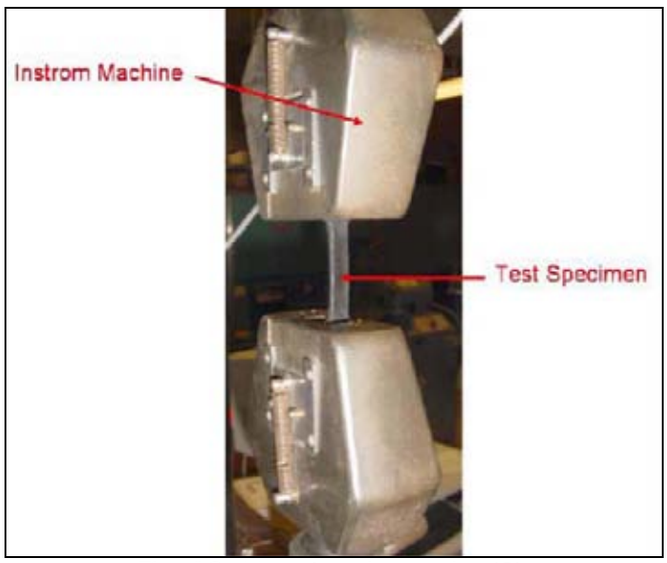


Fig. 18: Maquina de prueba (8).

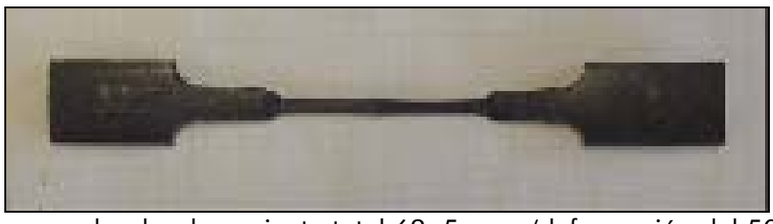


Fig. 19: Probeta ensayada, desplazamiento total 63, 5 mm. (deformación del 50% de su longitud inicial) (8)

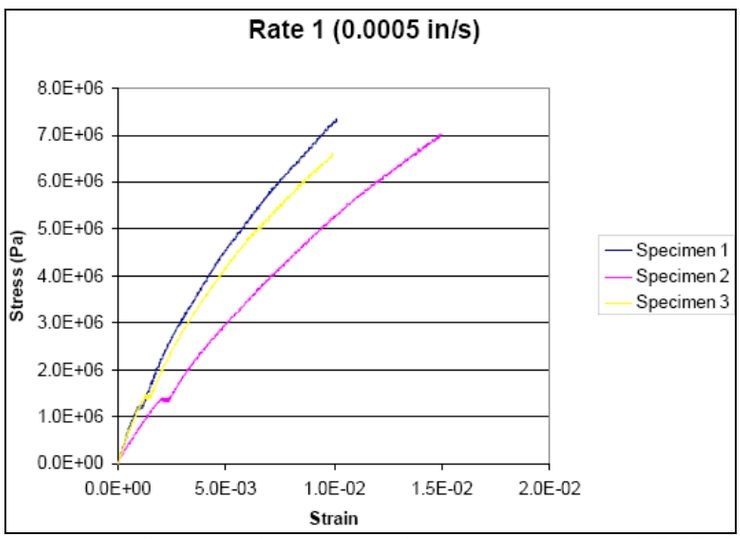


Fig. 20: Gráfico de esfuerzo vs deformación probeta HDPE (8).

Tabla 9: Módulos de elasticidad obtenidos de los experimentos. (8)

Valores de modulo de elasticidad obtenidos del experimento			
Prueba	Modulo de elasticidad (E)	Modulo de elasticidad (E)	Modulo de elasticidad (E)
	Tasa 1 0,00127 m/s	Tasa 2 0,0127 m/s	Tasa 3 0,127 m/s
1	$7{,}794 \times 10^{8}$ Pa	$9{,}524 \times 10^{8}$ Pa	$1{,}179 \times 10^{9}$ Pa
2	$5{,}090 \times 10^{8}$ Pa	$6{,}728 \times 10^{8}$ Pa	$7{,}717 \times 10^{9}$ Pa
3	$7{,}126 \times 10^{8}$ Pa	$9{,}267 \times 10^{8}$ Pa	$1{,}165 \times 10^{9}$ Pa
Promedio	$6{,}670 \times 10^{8}$ Pa	$8{,}373 \times 10^{8}$ Pa	$1{,}039 \times 10^{9}$ Pa

Estos resultados fueron utilizados para validar el módulo de elasticidad del material de las jaulas de HDPE proporcionado por los fabricantes.

i Propiedades del HDPE.

El material a usar es Polietileno de alta densidad (HDPE), el Polietileno es un material termoplástico con diferentes características, las cuales dependen de su estructura molecular y se definen como polietilenos de baja, media y alta densidad, definido bajo las normas ASTM. Las densidades son 0.91-0.93 gr/cm3, 0.93-0.94 gr/cm3 y 0.96 gr/cm3 respectivamente.

El polietileno de alta densidad se destaca por su excelente resistencia química, mecánica a la abrasión y a los rayos ultra violeta, si embargo el material posee una baja resistencia a la flexión.

Tabla 10: Propiedades HDPE

Propiedades físicas HDPE		
Propiedad	Unidad	Valor
Densidad (ρ)	kg/m^3	1382,9
Propiedades mecánicas		
Módulo de elasticidad (E)	N/m^2	8,1358e+08
Coeficiente de Poisson		0,37
Módulo de elasticidad de corte (G)	N/m^2	2,9693e+08
Tensión límite de flexión	N/m^2	2,8e+07
Tensión de tracción (Rango elástico)	N/m^2	2,2e+07
Elongación límite (Rango elástico)	%	15

ii Propiedades Polypropylene

Tabla 11: Propiedades PP.

Propiedades físicas PP		
Propiedad	Unidad	Valor
Densidad (ρ)	kg/m^3	950
Propiedades mecánicas		
Módulo de elasticidad (E)	N/m^2	1e+09
Coeficiente de Poisson		0,37
Módulo de elasticidad de corte (G)	N/m^2	5E+08
Tensión límite de flexión	N/m^2	5,0e+07
Tensión de tracción (Rango elástico)	N/m^2	5,5e+07
Elongación límite (Rango elástico)	%	110

4.4. Idealización del problema.

Con el objeto de poder realizar el análisis se generó un modelo numérico basado en la teoría de los elementos finitos, que basa su principio básico en el análisis de "elementos" unidos entre si mediante nodos. El conjunto estructural obedece a las excitaciones externas (cargas) que producen fenómenos de deformación y tensión en la estructura, pudiendo obtenerse información en cada nodo componente del continuo discretizado.
En el modelo se reflejan de manera fiel, aunque idealizadas, las geometrías involucradas en la estructura, lo que se muestra en las figuras, 21, 22 y 23.

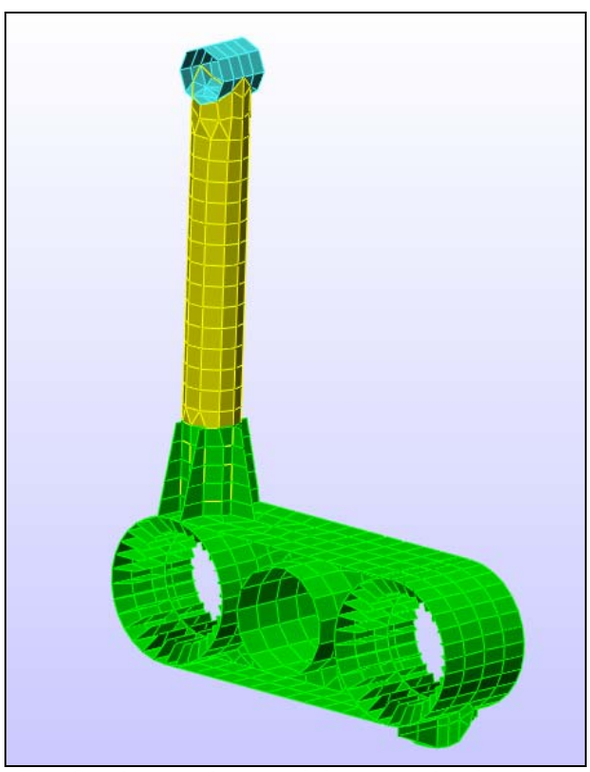


Fig. 21: Isométrica modelo numérico bracket.

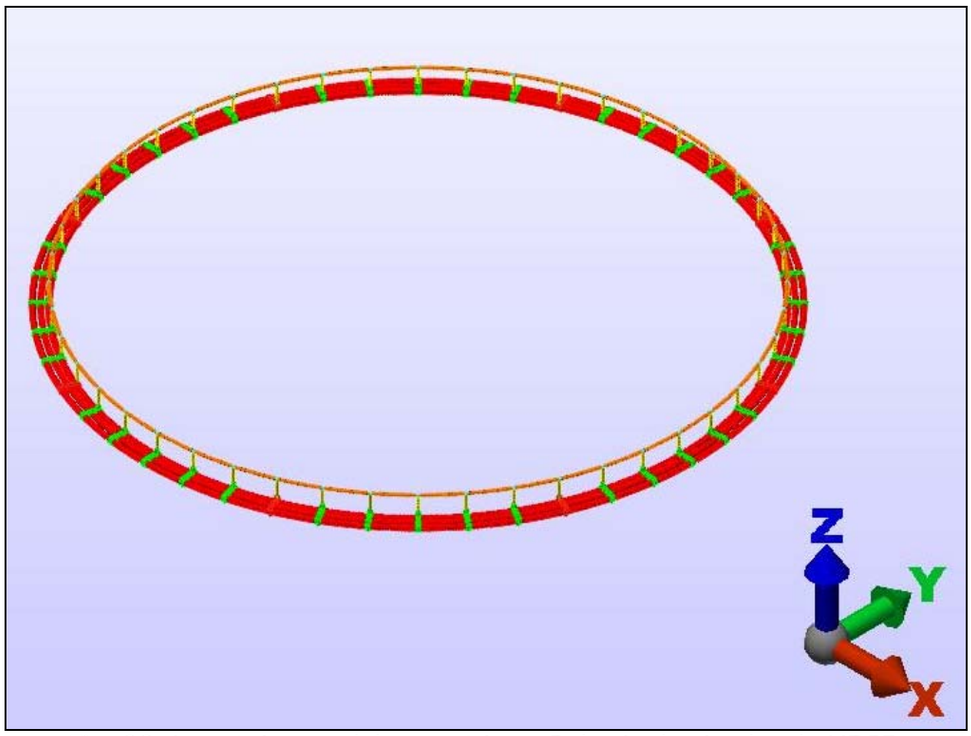


Fig. 22: Isométrica modelo numérico – Balsa jaula circular de HDPE.

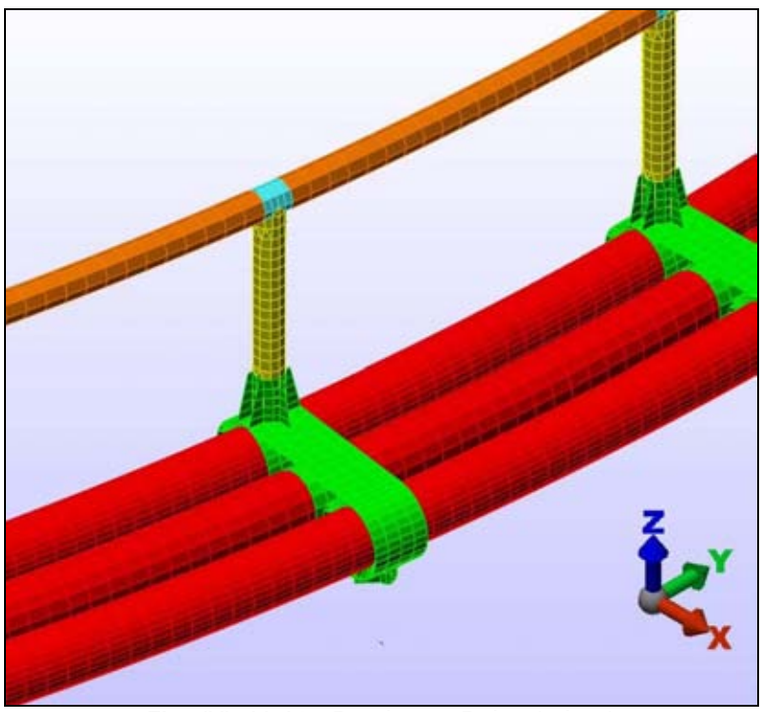


Fig. 23: Unión Bracket + Balsa (tubos)

4.5. Condiciones de contorno a analizar.

Las condiciones de contorno en el sistema definen la **condición de carga y apoyo** presentes. En este análisis se consideró la carga generada por la corriente actuando sobre la red pecera como muestra la fig. 24 y las boyantes producida por los flotadores constituidos por 3 tuberías de HDPE de 250 mm de diámetro.

Se consideró como representativa una velocidad de corriente de 2 kn, transformándola en carga actuante sobre la estructura. La tabla n° 12 muestra la carga sobre la balsa de diámetro 30 m.

Tabla 12: Condición de carga.

Cargas por corriente en redes circulares	
Intensidad de corriente (Nudos)	Jaula Ø30
2	14,47 ton.

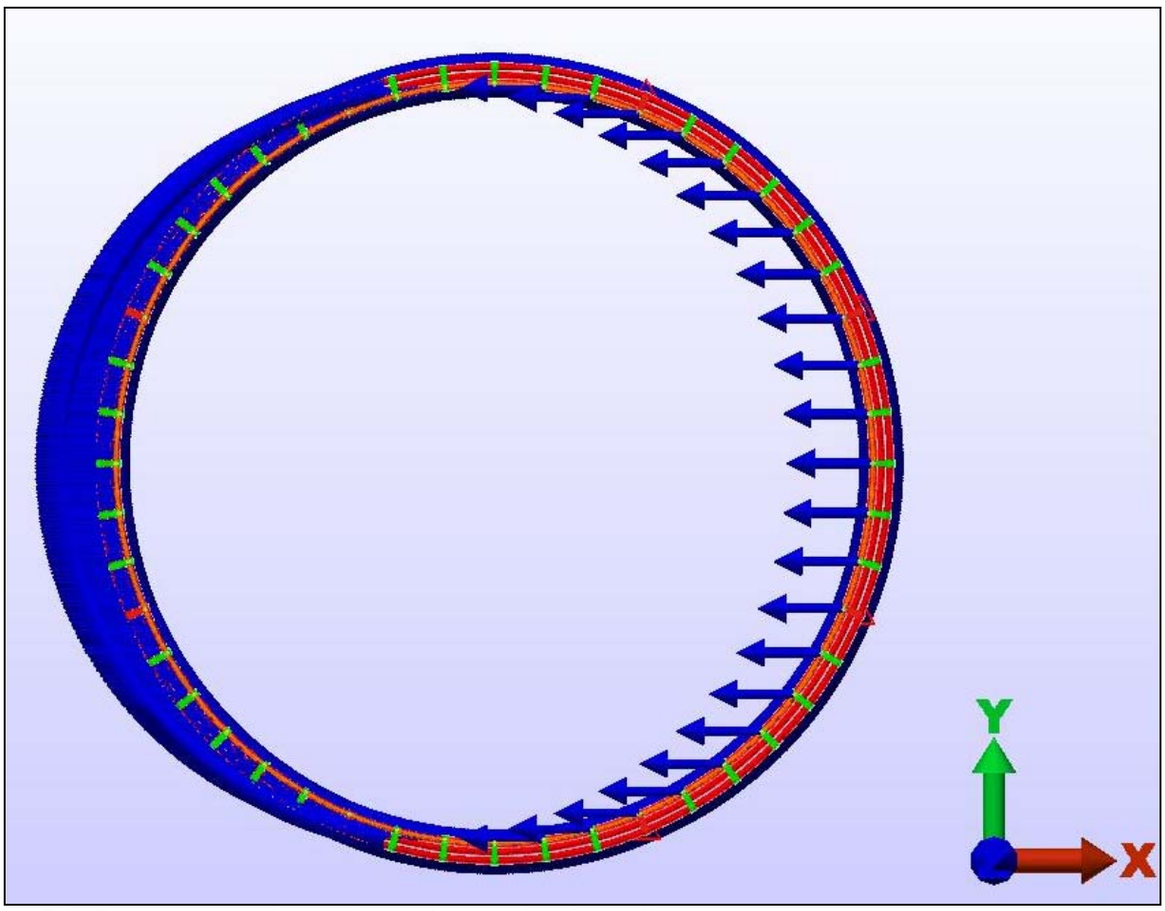


Fig. 24: Carga generada por la corriente sobre la malla.

La carga generada por la corriente sobre la malla es aplicada a la balsa jaula como carga distribuida ver fig. 24, actuando en la totalidad de la balsa, incluyendo su factor de transparencia.

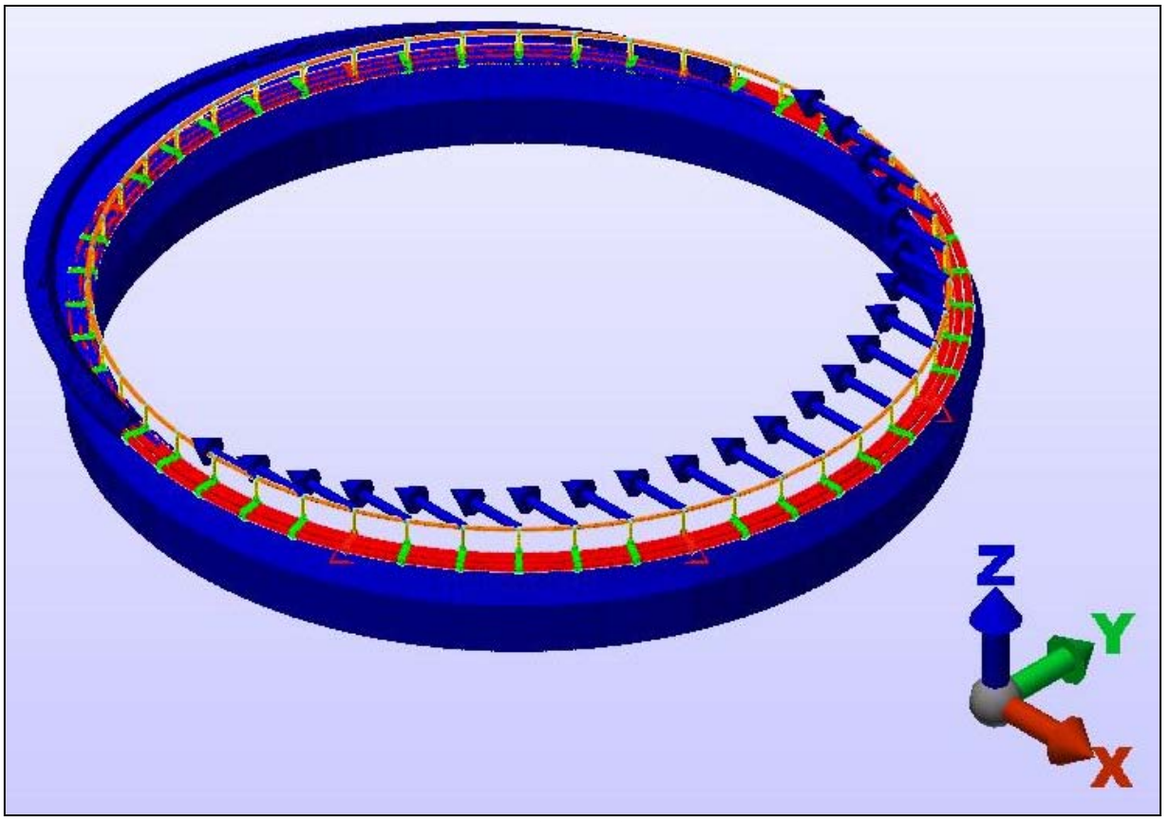


Fig. 25: Carga generada por la corriente + boyantes.

Como condición de contorno además se define el estado en el que se encuentran las líneas de fondeo (restricciones), según la dirección y sentido de la corriente aplicándose una condición de contorno en las "orejas" de fondeo, que en este caso corresponde a un empotramiento, es decir, restringir todos los desplazamiento y rotaciones en los puntos en donde existen puntos de amarre de fondeo.

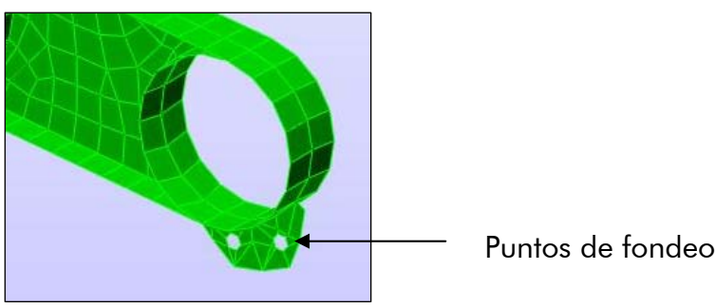


Fig. 26: Condición de contorno

Orejas de fondeo

4.6. Resumen de resultados.

Los resultados se han dividido en dos etapas, la primera muestra las tensiones y deformaciones del modelo global y la segunda la de los brackets, como elemento estructural soportante y de unión en la balsa jaula, con unas condiciones de contorno y carga similares a la balsa como modelo global.

Los resultados se muestran en una serie de figuras (con sus respectivos comentarios), facilitando la lectura de los mismos

Estados tensionales flotadores y pasamanos HDPE

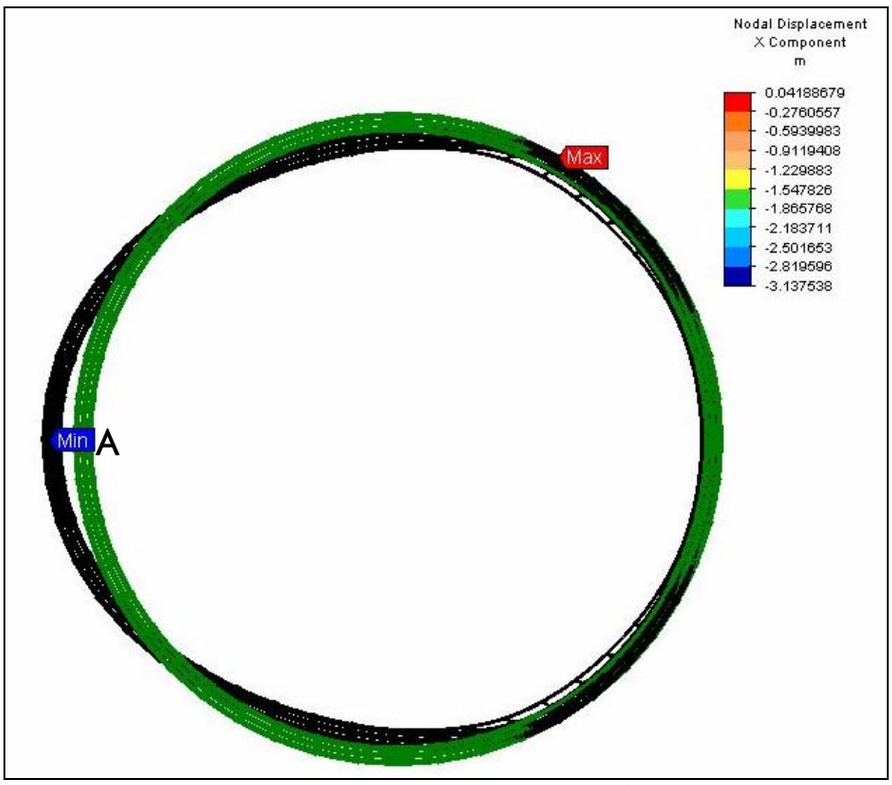


Fig. 27: Deformaciones máximas del modelo global. // El valor máximo llega a 3.13m, en la zona indicada con la letra A.

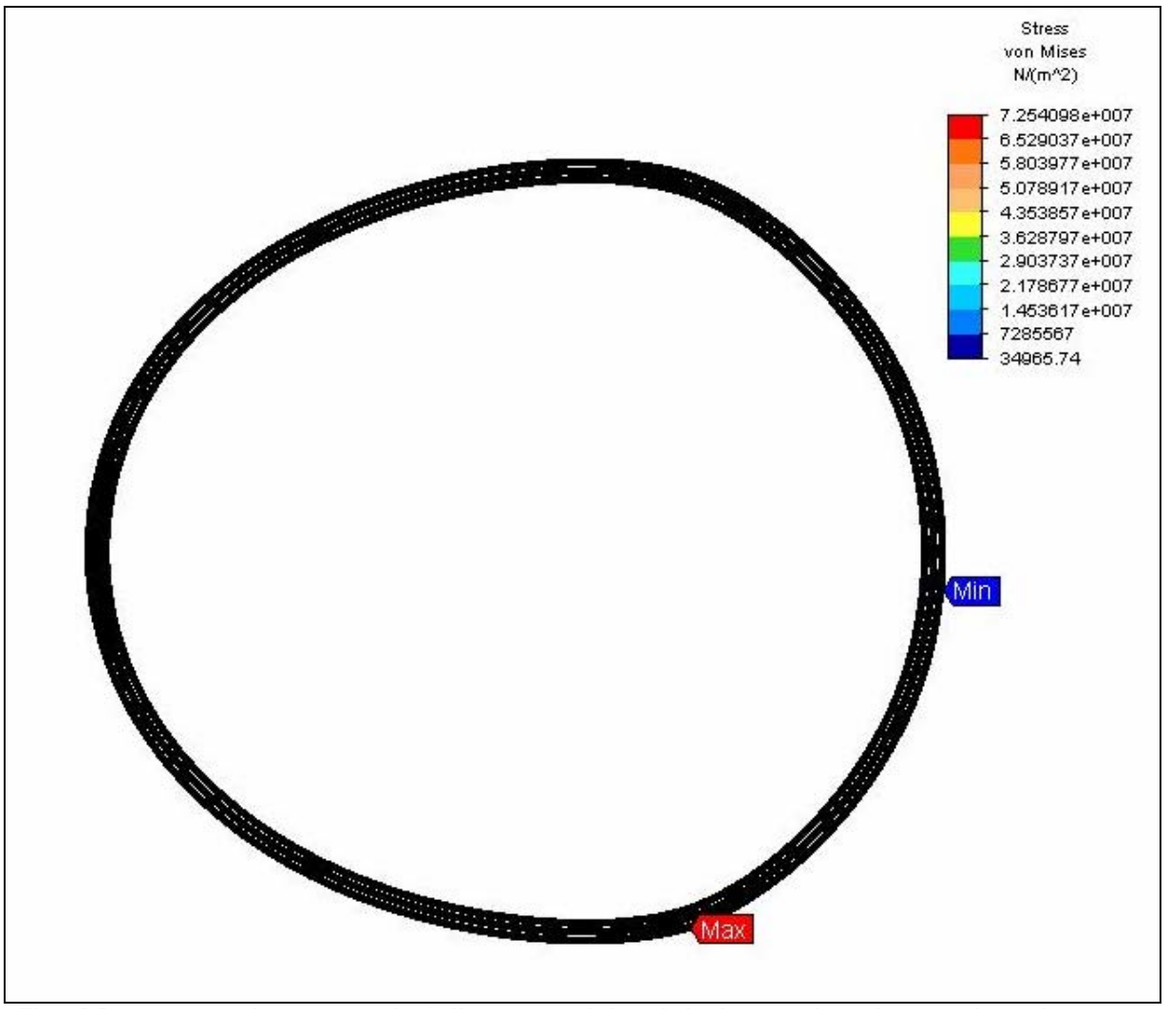


Fig. 28: Tensión de criterio de falla en modelo global considerado en tubos de HDPE

Se debe considerar que la tensión de criterio de falla en las zonas de HDPE no debe superar los 2,2e+07 N/m^2

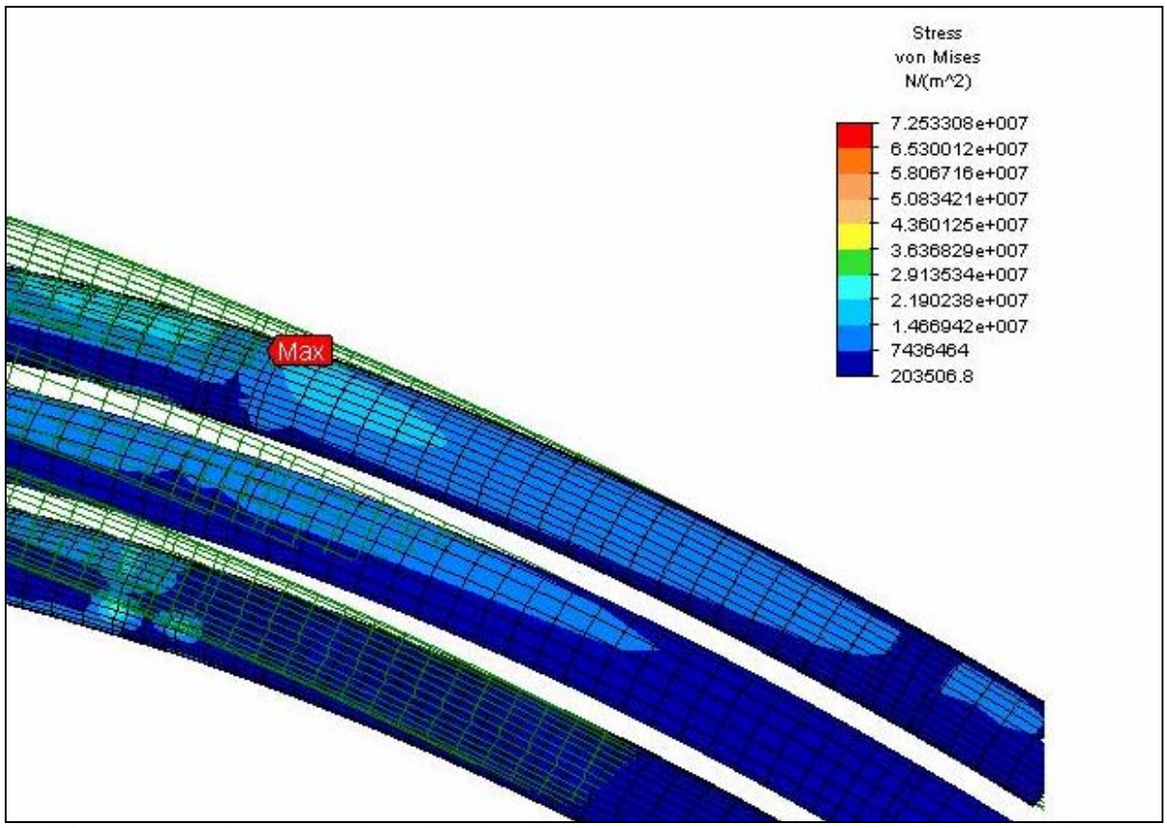


Fig. 29: Tensión de criterio de falla, detalle de zona cercana a los puntos de fondeo.

Se debe indicar que existirán zonas de estudio en que las tensiones serán altas, convirtiéndose en puntos de concentración de tensiones, pero no indica zona de falla aunque la tensión supere los límites del material. Esto se explica al considerar puntos cercanos a las condiciones de contorno, que al no permitir desplazamientos ni rotaciones, sobre tensionan la estructura. Esto no se aplica cuando la tensión es generalizada y no puntual y además se encuentra alejada de puntos de condiciones de contorno.

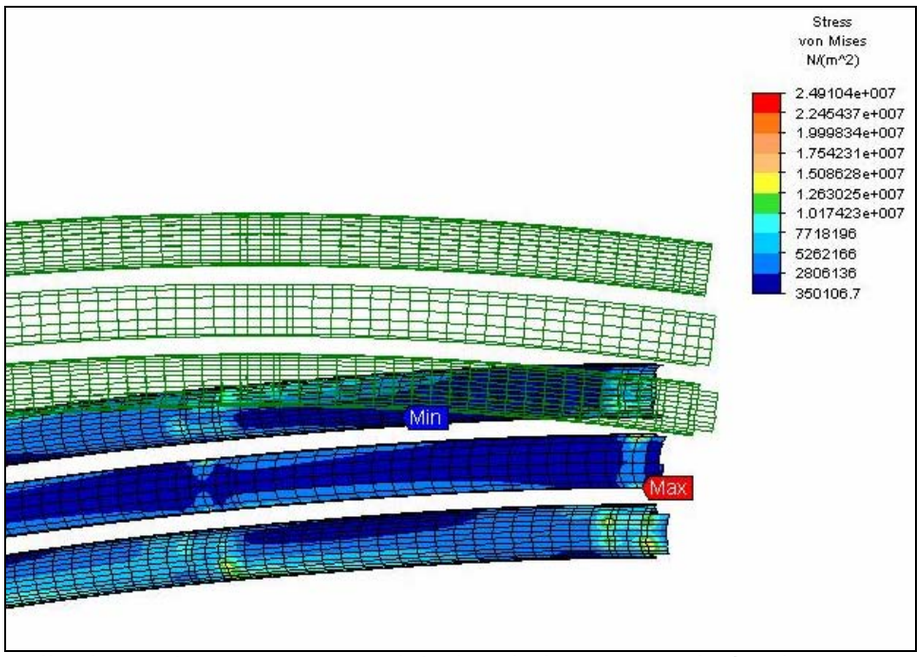


Fig. 30: Detalle de tensiones en zonas alejadas de los puntos de fondeo

En la fig. 30 se aprecia que la tensión supera los 2.2 E+7 N/m^2 encontrándose fuera del rango del criterio de falla.

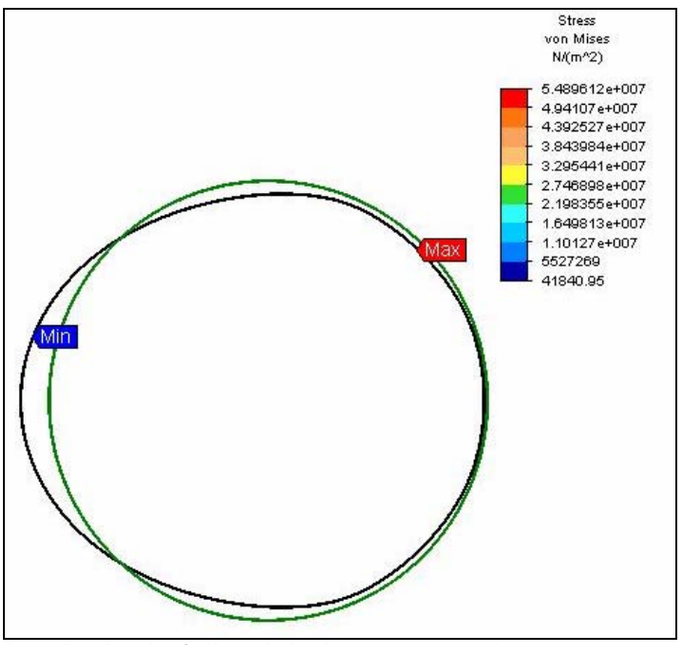


Fig. 31: Tensiones de criterio de falla globales en zona de pasamanos.

La tensión en el pasamano superando los valores permitidos por el material, alcanzando una tensión máxima de 5.48E+7 N/m^2.

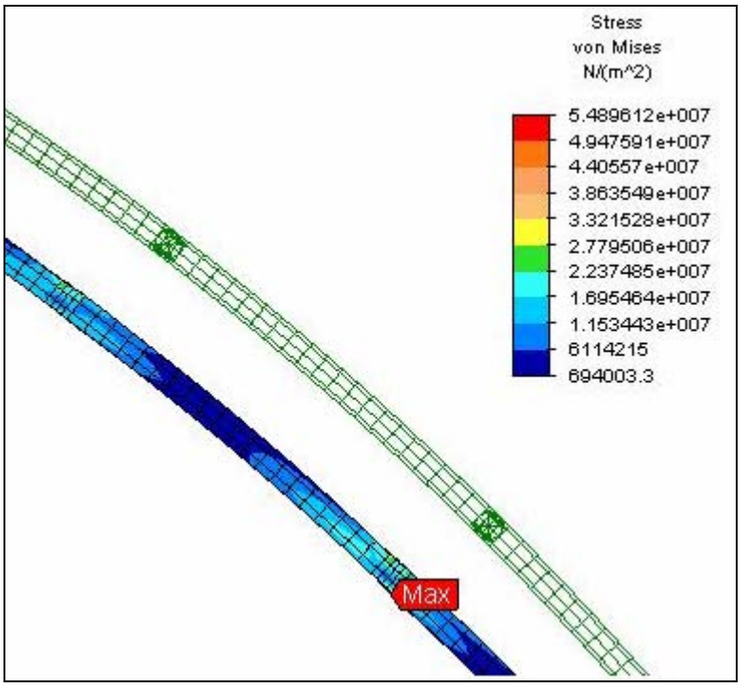


Fig. 32: Tensiones de criterio de falla en zona pasamanos.

Estados tensionales Brackets

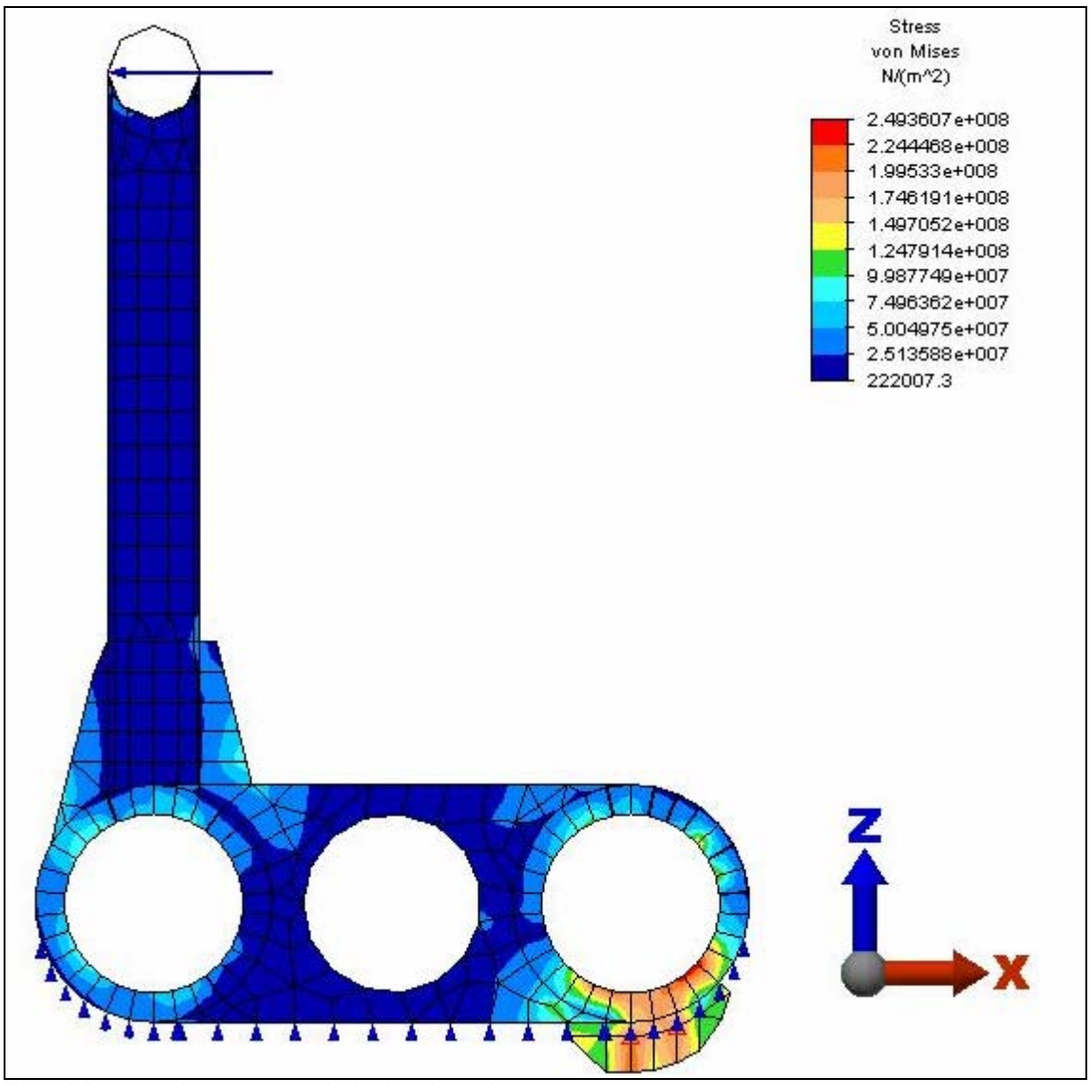


Fig. 33: Estado tensional de los brackets

El estado tensional en los brackets (fig. 33) se debe medir en función de la solicitación puntual a la que se ven afectados y a los valores de criterio de falla que el material permiten, en este caso, 5.5 e 7 N/m^2. En este caso se puede observar en la fig. 33 que el nivel de tensión supera el nivel del criterio de falla en un porcentaje importante de la pieza, incluso en zonas alejadas del punto de fondeo esto se puede observar de mejor manera en la fig. 34.

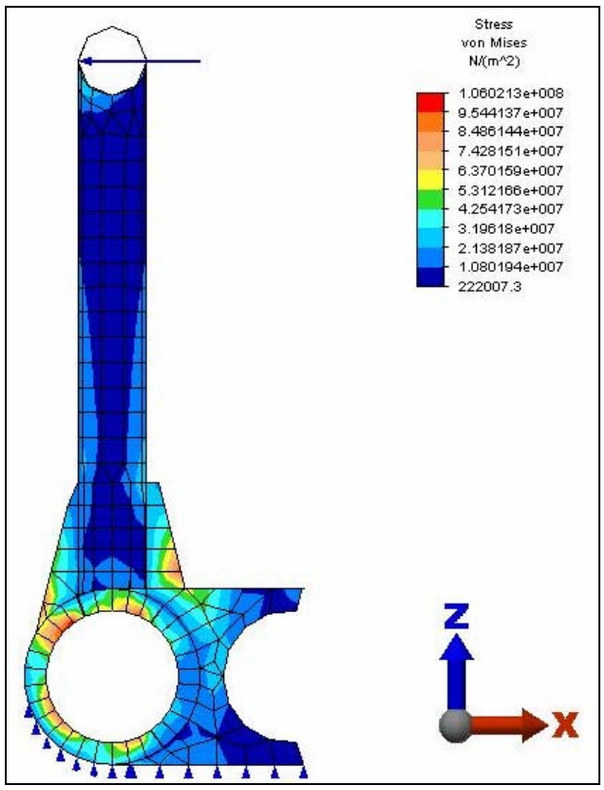


Fig. 34: Estado tensional pie soporte pasamano, tensión máxima 1,05e8N/m^2

La tabla n° 13 muestra un resumen de los resultados obtenidos del cálculo.

Tabla 13: Resume de resultados

Resumen de resultados jaula HDPE Ø30 m			
	Jaula Ø30		σ_a
PARTES	σ von Mises	δ	σ_a
	N/m^2	m	N/m^2
Bracket PP (Fondeo)	2.49e+08		5.5e+07
Bracket PP	1.06e+08		5.5e+07
Tubería HDPE Ø250x13 mm (Fondeo)	7.25e+07		2,2e+07
Tubería HDPE Ø250x13 mm	2.40e+07	3.13	2,2e+07
Tubería HDPE Ø125x9 mm	5.48e+06		2,2e+07

σ_a = Tensión de tracción rango elástico.

Comentarios:

- Los niveles de deformación corresponden a lo esperado en este tipo de configuración estructural y material utilizado (HDPE y PP).
- Los valores de tensión indican que existe riesgo de falla de la balsa jaula de Ø30 (m), bajo la carga provocada por una corriente de 2 nudos.
- Si bien existen alternativas de mejora, implicaría modificar el diseño de la balsa, cuestión que no está dentro del alcance de este trabajo.

Capítulo 5:

Conclusiones.

En el presente trabajo se ha efectuado un cálculo de deformaciones y tensiones, mediante un análisis estático lineal con el método de elementos finitos de una jaula circular de HDPE.

Se estudio una situación de carga particular determinada para un sitio de instalación posible, se utilizó el programa *Rhinoceros 3.0* para la generación de la geometría y el programa Algor para el mallado y posterior cálculo de la estructura.

Las metodología para la determinación de las cargas ambientales muestran una certeza aceptable en el caso del viento y la corriente, resultados que se pueden contrastar con los obtenidos por diferentes ensayos experimentales (6) (7), en el caso de las excitación producida por las olas la transformación de su efecto en una carga estática resulta impracticable debido a la complejidad del fenómeno y lo poco fiable de su estimación.

Al traducir las cargas dinámicas del viento y la corriente a una carga estática es posible realizar una análisis estático lineal que permite determinar el estado tensional de la estructura, con lo que se puede evaluar la factibilidad de instalar un sistema de estas característica en un sitio determinado, ya que se puede prever su comportamiento y así disminuir el riesgo de falla, sin embargo es importante recalcar que para un análisis más certero y acabado se debería realizar la validación de los resultados mediante la realización de ensayos experimentales y para la consideración de la acción producida por las olas sobre la estructura de la jaula se debe realizar un análisis hidroelastico

Referencias

1. [R. Turner] **R. Turner,** Offshore mariculture: Mooring system design. Seawork, Dunstaffnage Yacht Haven, by Dunbeg, Oban, Argyll PA37 1PX, Scotland, UK

2. [R. Turner] R. Turner, Offshore mariculture: Site evaluation. Seawork, Dunstaffnage Yacht Haven, by Dunbeg Oban, Argyll PA37 1PX, Scotland, UK

3. [D.C.B. Scott and J.F. Muir] **D.C.B. Scott and J.F. Muir,** Offshore cage system: A practical overview. Institute of Aquaculture, University of Stirling, Stirling, Scotland, UK

4. [I. Christensen] **I. Christensen,** Practical development of offshore mariculture system: The Irish experience. I.C. TRAWL Ltd, West Pier, Howth, Co., Dublin, Ireland

5. [Geir Ágústsson 2004] **G. Ágústsson,** Design considerations and loads on open ocean fish cages south of Iceland. Faculty of Engineering University of Iceland June 2004

6. [P.F. Lader and B. Enerhaug] **P.F. Lader and B. Enerhaug**, Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow. IEEE journal of oceanic engineering, vol. 30, NO. 1, January 2005.

7. [P.F. Lader and A. Fredheim] **P.F. Lader and A. Fredheim,** Modelling of Net Structures Exposed to 3D Waves and Current. Proceedings of OOA IV Open Ocean Aquaculture IV Symposium June 17-20, 2001 - St. Andrews, New Brunswick, Canada

8. [D Fredriksson y J Decew] The structural model of HDPE fish cage using the FEA Package MSC/Marc

9. [ABS 2001] **American Bureau of Shipping**, "Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units".

10.[LR 1992] **Lloyd's Register**, "Provisional Rules and Regulations for the Classification of Fish Farm".

11.[N. Pérez] **N. Pérez,** Elementos de Hidrodinámica Naval I y II. Universidad Austral de Chile

12.[J. Nuñez] José Núñez Basáñez (Universidad Politécnica de Madrid), Seminario Ingeniería y Acuicultura (UACH). Valdivia, Chile. Noviembre 2004.

13.[C. C. Spyrakos 1996] **Constantine C. Spyrakos**, Finite element modeling in engineering practice. Distributed by Algor Publishing Division, Pittsburgh, PA.

14.[C. C. Spyrakos 1997] Linear and nonlinear finite element analysis in engineering practice. Distributed by Algor Publishing Division, Pittsburgh, PA.

15. [J. F. Núñe Basáñez 2006] Incidencia de la ingeniería naval y oceánica en la acuicultura marina. Área de ingeniería de los recursos oceánico. Escuela técnica superior de ingenieros navales universidad politécnica de Madrid.

16.[API 1996] American Petroleum Institute
Recommended practice for design and analysis of stationkeeping systems for floating structure.

17. [ROM] Recomendaciones para Obras Portuarias
Manual Español para Obras portuarias.

18. [Aarnes 1990] Current Forces on Cage, Nett Deflection. *Engineering for offshore fish farming*: Proceedings of the Conference Organized by the Institution of Civil Engineers, Glasgow, 17-18 October, 1990, pp. 137-152.