

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

“Análisis y optimización mediante simulación numérica de la estructura de la compuerta segmento ubicada en el alivió N°4 de la presa Tablachaca-Electroperu para mejorar el diseño actual”

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por

Yossmar Aquiles Baldeon Carlos

 [0009-0005-9352-2389](https://orcid.org/0009-0005-9352-2389)

Asesor

Mg. Ing. Máximo Obregón Ramos

 [0000-0003-1529-3742](https://orcid.org/0000-0003-1529-3742)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Baldeon, 2025)
Referencia/Reference	Baldeon, Y. (2025). <i>“Análisis y optimización mediante simulación numérica de la estructura de la compuerta segmento ubicada en el alivio N°4 de la presa Tablachaca-Electroperu para mejorar el diseño actual”</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un análisis computacional usando el método de elementos finitos (MEF). La estructura a analizarse es la compuerta radial ubicada en el alivió N°4 de la presa Tablachaca perteneciente al complejo Hidroeléctrico Mantaro.

Para el desarrollo de la tesis se estudió las propiedades mecánicas de los aceros con los que se fabricó la compuerta, se analizó las condiciones de operación y accionamiento. Del análisis de las condiciones se procede a desarrollar la simulación en dos estados estáticos lineales en el software Ansys versión estudiante. La primera donde se simula la condición de operación y la segunda donde se simula el inicio de accionamiento de apertura de la compuerta. Se obtuvo resultados en las deformaciones y el campo tensorial, siendo estas analizadas.

Con estos resultados se procede a optimizar la compuerta, manteniendo sus condiciones de operación y de accionamiento. Para los cuales se modificó parte de la geometría y se realizaron cambios en los materiales.

Palabras Clave: MEF; Simulación; Optimizar; Geometría.

Abstract

In the present work, a computational analysis is developed using the finite element method (FEM). The structure to be analyzed is the radial gate located in relief number four of the Tablachaca dam belonging to the Complejo Hidroelectrico Mantaro.

For the development of the thesis, the mechanical properties of the steels with which the gate was manufactured were studied, and the operating and driving conditions were analyzed. From the analysis of the conditions, the simulation is developed in two linear static states in the Ansys student version software. The first where the operating condition is simulated and the second where the start of the gate opening drive is simulated. Results were obtained in the deformations and the tensor field, being these analyzed.

With these results, we proceed to optimize the gate, maintaining its operating and drive conditions. For which part of the geometry was modified and changes were made in the materials.

Keywords: FEM; Simulation; Optimize; Geometry.

Tabla de Contenidos

Resumen	iii
Abstract	iv
Tabla de Contenidos.....	v
Lista de Tablas	ix
Lista de Figuras	x
Introducción	xiv
Capítulo I: Generalidades	1
1.1 Antecedentes de la Investigación.....	1
1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio.....	4
1.3 Formulación del problema.....	4
1.3.1 Problema principal.....	5
1.3.2 Problemas secundarios.....	5
1.4 Justificación e importancia	5
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivos generales.....	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
1.6 Hipótesis.....	6
1.6.1 Hipótesis general.....	6
1.6.2 Hipótesis Específicas.....	7
1.7 Variables y Operacionalización de variables	7
1.7.1 Variables	7
1.7.2 Operacionalización de variables	8
1.8 Metodología de la investigación	8
1.8.1 Unidades de Análisis.....	8
1.8.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación.....	8
1.8.3 Diseño de la Investigación.....	8
1.8.4 Fuentes de Información.....	9

1.8.5	Población y Muestra.....	9
1.8.6	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	9
1.8.7	Análisis y Procesamiento de Datos.....	9
1.8.8	Tipo y diseño de la investigación	10
1.8.9	Unidad de análisis.	10
1.9	Etapas de la investigación.....	10
Capítulo II. Marco teórico y conceptual		12
2.1	Marco teórico	12
2.1.1	Presa Tablachaca.....	12
2.1.2	Desagües	13
2.1.3	Compuertas de tipo segmento.....	15
2.1.4	Fuerzas hidrostáticas.....	17
2.2	Marco conceptual	21
2.2.1	Fundamentos de la elasticidad	21
2.2.2	Aceros	28
2.2.3	Método de elementos finitos	33
2.2.4	Criterios de diseño.....	45
Capítulo III. Desarrollo de la Tesis		53
3.1	Compuerta Radial.	53
3.2	Material de la compuerta radial	53
3.2.1	Aceros usados en la fabricación de la compuerta.....	54
3.3	Dominio.....	55
3.3.1	Preparación de la geometría.....	56
3.3.2	Análisis de la geometría para el mallado.	59
3.4	Análisis de las condiciones de contorno	63
3.4.1	Peso de la compuerta	65
3.4.2	Carga hidráulica	65
3.4.3	Modelado de cojinete.....	67

3.4.4	Definición de contactos.....	68
3.4.5	Contacto inferior.	69
3.4.6	Contactos laterales.....	70
3.4.7	Condición de simetría.	71
3.4.8	Carga sísmica.....	72
3.5	Mallado del dominio	73
3.6	Análisis del modelo.	75
3.6.1	Condición de operación (D).	76
3.6.2	Condición de operación y carga sísmica (D+E).	77
3.6.3	Condición de apertura (D).....	78
3.6.4	Condición de apertura y carga sísmica (D+E).....	79
Capítulo IV Análisis y discusión de resultados		80
4.1	Análisis de malla	80
4.1.1	Análisis de Deformaciones.	81
4.1.2	Análisis de Esfuerzos	82
4.1.3	Análisis de singularidad.	82
4.2	Resultados y análisis de la compuerta radial.....	84
4.2.1	Resultados: Condiciones de operación (D).....	85
4.2.2	Resultados: Condición de apertura (D).....	90
4.2.3	Resultados: Condiciones de operación (D+E)	94
4.2.4	Resultados: Condición de apertura (D+E).....	97
4.2.5	Análisis de resultados.....	101
4.3	Optimización.	103
4.3.1	Modificaciones en la geometría.	103
4.3.2	Generación del modelo.....	109
4.3.3	Evaluación de materiales.....	111
4.3.4	Resultados: Condición de operación (D).....	111
4.3.5	Resultados: Condición de apertura (D).....	115

4.3.6 Resultados: Condición de operación (D+E)	118
4.3.7 Resultados: Condición de apertura (D+E).....	122
4.3.8 Análisis de resultados.....	125
CONCLUSIONES	127
RECOMENDACIONES.....	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
ANEXOS	132

Lista de Tablas

Tabla 1	Operación de variables:	8
Tabla 2	Especificaciones Aplicadas a la ASTM a Perfiles Estructurales	32
Tabla 3	Grados de Libertad y Vectores de Carga en FEA	37
Tabla 4	Coeficientes para Esfuerzos admisibles. Elementos Estructurales.	47
Tabla 5	Factores de Zona “Z”	50
Tabla 6	Compuerta Radial.....	53
Tabla 7	Materiales de Fabricación de la Compuerta.....	54
Tabla 8	Datos del Análisis de Convergencia de Malla.	80
Tabla 9	Reacciones en el cojinete en la condición de operación (D).	86
Tabla 10	Reacciones en el cojinete en la Condición de operación (D+E).	94
Tabla 11	Deformaciones direccionales máximas y mínimas.....	103
Tabla 12	Reacciones en el cojinete.	104
Tabla 13	Reacciones en el cojinete en la condición de operación (D)	111
Tabla 14	Reacciones en el cojinete en la Condición de operación (D+E).....	118
Tabla 15	Deformaciones direccionales máximas y mínimas.....	126

Lista de Figuras

Figura 1	Vista aguas arriba de la Presa Tablachaca.....	12
Figura 2	Desagües Intermedio y Desagües de Fondo	15
Figura 3	Compuerta de Segmento en Superficie.	16
Figura 4	Compuerta de Segmento Sumergida.....	17
Figura 5	Presión Manométrica.....	18
Figura 6	Fuerza hidrostática	19
Figura 7	Fuerza hidrostática en una superficie curva.....	20
Figura 8	Componentes Cartesianas de la Tensión	22
Figura 9	Equilibrio de Momentos en un Elemento Diferencial	23
Figura 10	Reciprocidad de las tensiones tangenciales	24
Figura 11	Estado de Tensiones	28
Figura 12	Curva Características de los Aceros A36, A572 y A514.	29
Figura 13	Método de Elementos Finitos	33
Figura 14	Etapas de un Análisis de Elementos Finitos.	34
Figura 15	Modelo de elementos finitos de un soporte.....	35
Figura 16	División del Dominio en Subdominios	36
Figura 17	Elementos Típicos para Discretización	37
Figura 18	Relación de Aspecto.....	38
Figura 19	Relación de aspecto de un cuadrilátero.	39
Figura 20	Relación Jacobiana	39
Figura 21	Desviación paralela.	40
Figura 22	Asimetría u oblicuidad.	40
Figura 23	Calidad ortogonal.	41
Figura 24	Discretización de un soporte L con elementos 2D.	43
Figura 25	Divergencia del Esfuerzo Máximo.....	43
Figura 26	Tensión máxima del Soporte L	44

Figura 27	Compuerta Radial.....	48
Figura 28	Comportamiento de una viga horizontal en una compuerta radial.....	49
Figura 29	Comportamiento de una viga vertical en una compuerta radial.....	49
Figura 30	Zonas Sísmicas	51
Figura 31	Dominio de la compuerta Radial.	56
Figura 32	Singularidad en la unión Línea de viga y Superficie.....	58
Figura 33	Procedimiento de mallado para la compuerta.	59
Figura 34	Estructura constituida por Segmentos y Superficies.	60
Figura 35	Vinculación del dominio.	60
Figura 36	Malla en el dominio de superficies y segmentos	61
Figura 37	Estructura Constituida por Superficies.	62
Figura 38	Vinculación del Dominio	62
Figura 39	Malla en el Dominio de superficies.	63
Figura 40	Conexión entre el sistema de accionamiento y la compuerta.....	64
Figura 41	Asignación de Peso.....	65
Figura 42	Asignación de Carga Hidráulica.....	66
Figura 43	Grados de libertad de Cylindrical Support.....	67
Figura 44	Asignación de Soporte en el Origen	68
Figura 45	Definición de contactos.....	69
Figura 46	Restricción de Contacto con la Base del Alivio.	70
Figura 47	Restricción de los Contactos Laterales	71
Figura 48	Condición de borde de simetría	72
Figura 49	Carga sísmica.....	73
Figura 50	Mallado Según Tamaño de Elemento.....	74
Figura 51	Primera Condiciones de Análisis de la Compuerta Radial - 1.....	77
Figura 52	Primera Condiciones de Análisis de la Compuerta Radial - 2.....	77
Figura 53	Segunda Condiciones de Análisis de la Compuerta Radial.....	78
Figura 54	Primera Condiciones de Análisis de la Compuerta Radial - 3.....	79

Figura 55	Deformaciones Máximas	81
Figura 56	Deformaciones Máximas vs La Inversa del tamaño de elemento.....	81
Figura 57	Esfuerzo máximo vs la inversa del tamaño de elemento	82
Figura 58	Singularidad de la compuerta.	84
Figura 59	Resultados en la Compuerta Radial.	86
Figura 60	Resultados en la Lámina de contacto- Factor de seguridad.....	87
Figura 61	Estructura principal	88
Figura 62	Contacto Inferior	88
Figura 63	Contacto Superior.....	88
Figura 64	Deformación Direccionales	89
Figura 65	Resultados en la Compuerta Radial.	90
Figura 66	Lámina de contacto. -Factor de seguridad.....	91
Figura 67	Resultados en la Lámina de contacto. - Factor de seguridad.....	91
Figura 68	Contacto Superior- Factor de seguridad.	92
Figura 69	Resultados en la Estructura de accionamiento.	92
Figura 70	Deformación Direccionales	93
Figura 71	Resultados en la Compuerta Radial.	94
Figura 72	Resultados en la Lámina de contacto. -Factor de seguridad.....	95
Figura 73	Estructura principal	96
Figura 74	Contacto Superior- Factor de seguridad.	96
Figura 75	Deformación Direccionales	96
Figura 76	Resultados en la Compuerta Radial.	97
Figura 77	Resultados en la Lámina de contacto. - Factor de seguridad.....	98
Figura 78	Contacto Superior.....	99
Figura 79	Estructura de accionamiento.	99
Figura 80	Deformación Direccionales	100
Figura 81	Deformación y Estado de Tensiones en el Refuerzo Inferior.	105
Figura 82	Factor de seguridad en la Cara de Contacto.....	106

Figura 83	Optimización de la Estructura de Contacto	107
Figura 84	Optimización de la Estructura de Refuerzo de Brazo.....	108
Figura 85	Optimización de la Estructura de Refuerzo de Accionamiento.....	109
Figura 86	Dominio de nueva compuerta optimizada.....	110
Figura 87	Discretización del dominio.....	111
Figura 88	Resultados en la Compuerta Radial.....	112
Figura 89	Estructura principal.....	113
Figura 90	Resultados en la Compuerta Radial.....	114
Figura 91	Deformación Direccionales.....	114
Figura 92	Resultados en la Compuerta Radial.....	115
Figura 93	Estructura principal.....	116
Figura 94	Deformación Direccionales.....	117
Figura 95	Resultados en la Compuerta Radial.....	118
Figura 96	Estructura principal.....	119
Figura 97	Resultados en la Compuerta Radial.....	120
Figura 98	Deformación Direccionales.....	121
Figura 99	Resultados en la Compuerta Radial.....	122
Figura 100	Estructura principal.....	123
Figura 101	Resultados en la Compuerta Radial.....	124
Figura 102	Deformación Direccionales.....	124

Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo analizar y optimizar la compuerta radial mediante un análisis estático lineal por elementos finitos, de una compuerta radial ubicada en el alivió N°4 de la presa Tablachaca. El punto más bajo del alivió está ubicado a 42 m de profundidad de agua. Importante para la tesis la evaluación de una compuerta diseñada en los años 1960, el cual se encuentra operativa, pero presenta problemas de corrosión en toda la estructura.

Analizar el diseño de una compuerta operativa con 65 años de operación fue una motivación importante para el desarrollo de la tesis, donde se busca mejorar el diseño de la compuerta usando elementos finitos.

El método de elementos finitos es aplicable a cualquier problema de ingeniería, pero es necesario conocer las ecuaciones que gobiernan el problema físico y las condiciones del estudio a realizar. Para el análisis de la compuerta, se realizó un modelo 3D y una evaluación de los materiales de fabricación según los planos, además se evaluó las condiciones de contorno en la condición de operación y de apertura donde se considera la carga sísmica como parte de las combinaciones de carga. Luego se procedió a generar un dominio y a realizar un análisis de malla. Con los resultados del análisis se procede a realizar optimizaciones en los materiales y geometría obteniendo mejoras en los pesos y propiedades mecánicas.

En el Capítulo I. Se desarrolló la metodología de investigación, donde se evaluaron los antecedentes y se definieron los objetivos y las hipótesis.

En el Capítulo II contiene el Marco teórico, inicia con la descripción de la presa, desagües de operación, compuertas de tipo segmento. En el Marco conceptual nos enfocamos en propiedades mecánicas de los aceros, el método de elementos finitos y los criterios de diseño.

En el Capítulo III contiene el desarrollo de la tesis, donde se define la compuerta radial, materiales de fabricación, se genera el dominio, se analiza las condiciones de contorno, se genera la malla del dominio y se hace un análisis del modelo.

En el Capítulo IV contiene el análisis y discusión de resultados, Inicia por el análisis de la malla donde se evalúan singularidades, continua con los resultados de las simulaciones. Finalmente se realizan las optimizaciones donde se modifica la geometría y los materiales.

Capítulo I: Generalidades

1.1 Antecedentes de la Investigación.

En el año 2018, se realizó el Estudio de mantenimiento Integral del Complejo Hidroeléctrico Mantaro desarrollado por TRACTEBEL-ENGIE. El cual permitió conceptualizar el estado actual de los equipos hidromecánicos y estructuras civiles de la Presa Tablachaca. Estos equipos hidromecánicos fueron fabricados por Riva Calzoni en el año 1969. Si bien en la actualidad estos equipos se encuentran en funcionamiento, pero presentan incertidumbre en su continuidad. La rehabilitación de la compuerta radial del aliviadero de fondo número 04 fue descartada por TACTEBEL debido a su estado de conservación y de sus componentes auxiliares. La estructura presenta incertidumbre debido al alto grado de degradación, porque cualquier alteración de la estructura podría afectar a su seguridad estructural y operacional.

Edison Vladimir (2006) en su investigación “Diseño de una compuerta Hidráulica Tipo Segmento para un Nivel máximo de aguas arriba de 2m y un nivel máximo de aguas debajo de 2,3m”

Tiene como objetivo diseñar una compuerta segmento radial con fin de evitar que el agua de mar se mezcle con el agua de río cuando sube la marea y abrirse cuando crece el río producto de las lluvias. En lo que incluye factores de seguridad indicados por la norma NBR 8883, en el caso de elementos estructurales se ocupa superiores a 1.35, adicionalmente considera una deflexión permitida de 1:1000. Para la estructura obtiene un factor de seguridad de 3.18, concluye que con la norma NBR 8883, libros de compuertas hidráulicas y catálogos de compuertas se puede realizar diseños sin ningún problema.

Para el desarrollo de las tesis realiza la evaluación focalizada de los factores de seguridad para el cual se usará el valor superior a 1.35, con sus modificaciones según normativa.

David Mera (2015) en su Investigación "Análisis, Simulación y Evaluación de los Esfuerzos y Deformaciones, entre el Método Analítico y el Método de Elementos Finitos, de una Compuerta Tipo Vagón para Desagüe de Fondo"

Tiene como objetivo demostrar la precisión entre el método analítico y el método de elementos finitos, se verá afectada directamente por el tipo y calidad de mallado. Para el método analítico usa la norma NBR8883 y la norma DIN 19704. Tiene como conclusión que la compuerta está diseñada para soportar las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas. Importante destacar que la precisión entre el método analítico y el método por elementos finitos se ve afectado directamente por el tipo y la calidad del mallado, también hace una evaluación entre un mallado tetragonal y hexagonal para determinar con qué tipo de malla podría representar de manera correcta el modelo. Para el desarrollo de la simulación uso el Software Ansys. El aporte del de este antecedente es la evaluación de la calidad de malla que se evaluara en tesis.

Daniel Lavayen (2014) en su tesis "Análisis de los componentes estructurales de un aerogenerador de 3 kW mediante simulación numérica"

Tiene como objetivo Realizar el análisis estructural de la torre, chasis, cola, y tornamesa de un aerogenerador de 3kW mediante simulación numérica por método de elementos finitos y define un procedimiento para el análisis estructural mediante simulación numérica. Obtuvo como resultados una diferencia máxima de 6% entre el método analítico y método por elementos finitos, y concluyo que, Mediante la comparación de los resultados por simulación con respecto a los resultados analíticos de la torre, se obtuvo un error porcentual de 2.79% y 0.17% para el modelo lineal y sólido respectivamente, quedando de esta manera validados los modelos utilizados. Mientras que los resultados del chasis, tornamesa, eje principal y cola, mostraron un mayor error porcentual de hasta 6%.

Para el diseño de estructuras es importante las normas de diseño, esta tesis aplica las normas incluidas en el RNE y AISC 342, con lo cual realiza las combinaciones de cargas por el método LRFD.

Joaquin Rojas (2017) en su Tesis “Diseño y cálculo de una compuerta tipo segmento radial para el control de represamiento de agua en el sistema de irrigación Yocara San Román Juliaca”.

Tiene como objetivo el diseño y cálculo de una compuerta tipo segmento radial para el control de represamiento de agua en el sistema de irrigación Yocara San Roman Juliaca. El análisis de la compuerta es básicamente analítico y hace un análisis por elementos finitos usando el software SolidWorks. Importante el uso la norma NBR8883 del año 2008, el esfuerzo máximo en las caras de la compuerta radial usando el método de elementos finitos es de 23MPa, el acero usado es un A36 cuyo límite de fluencia considerado es de 250MPa, tiene una deformación máxima de 0.31mm. Concluye que mediante el análisis computacional se pudo comprobar que los materiales seleccionados por el método analítico son lo suficientemente estables para el trabajo. Para el proceso de optimización del desarrollo de la tesis, el factor de seguridad de la estructura es muy alto.

Martha Encalada (2018) en su investigación “Metodología de cálculo de un sistema de compuerta de obras hidráulicas de captación”.

Tiene como objetivo desarrollar una metodología para el cálculo y diseño de compuertas. Donde realiza la selección de materiales, cálculos hidráulicos, cálculos de esfuerzos y evalúa el sistema de accionamiento. En el análisis por elementos finitos usando el software Autodesk Inventor obtiene como resultados un esfuerzo máximo de 209MPa; deformaciones de 4.7mm y factores de seguridad de 1.24. Importe destacar la búsqueda de un procedimiento para el diseño de compuertas en general. Concluye en forma general que la compuerta que diseño reúne las condiciones más adecuadas.

Paulo C.F Erbisti en su Libro “Desing of Hydraulic Gate”

Tiene como objetivo diseñar compuertas hidráulicas, para el diseño se apoya en la norma DIN-19704 y La Norma NBR-8883.La norma NBR-8883 en su versión original de 1985 se establecían límites para las tensiones resultantes en el eje principal, paralelamente

a una comprobación de las tensiones combinadas. Sin embargo, según la teoría de Hencky-von Mises, en un estado de tensiones múltiples es suficiente comprobar las tensiones combinadas en el punto, incluso en el caso en que las tensiones resultantes en cada eje principal alcancen valores elevados. Basado en este concepto, se han eliminado los límites para la tensión axial resultante. En el desarrollo de la tesis se trabajará con esfuerzos combinados por Von Mises, para obtener esfuerzos máximos y factores de seguridad.

1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio.

Electroperu S.A es una empresa estatal con derecho privado que cuenta con dos centrales hidroeléctricas y la represa Tablachaca, que conforman el Complejo Hidroeléctrico Mantaro.

La represa Tablachaca” consta cuatro aliviados ubicados en diferentes profundidades y distribuidas en toda superficie. Estos aliviados son usados para el proceso de purga (eliminación de sedimentos) y control de nivel del embalse, por lo que están sometidos a las diferentes colisiones con rocas, troncos y todo el material arrastrado por el agua. Estas estructuras sufren desgaste por erosión y abrasión. Cada aliviado consta de una compuerta radial con su sistema de accionamiento hidráulico que se encarga de la apertura y cierre de la compuerta.

1.3 Formulación del problema.

La compuerta del aliviado de fondo cuatro (04) es el que más opera y es la que encuentra a mayor profundidad, por estas razones se encuentra en peor condición de operación. La estructura de la compuerta del aliviadero de fondo cuatro (04) es estable, pero presenta muchos puntos de corrosión producto de los años y las condiciones de funcionamiento. Lo que genera incertidumbre en su seguridad estructural y operacional.

De presentarse una falla en la compuerta de los aliviós, tendría como consecuencia una inminente parada de todo el Complejo Hidroeléctrico el Mantaro.

1.3.1 Problema principal

¿Se podrá realizar optimizaciones en la estructura de la compuerta radial del alivio cuatro de la Presa Tablachca mediante simulación numérica, para desarrollar un nuevo diseño respetando las condiciones iniciales de fabricación y operación?

1.3.2 Problemas secundarios.

- No se tiene un detalle exacto las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación
- Evaluación de las condiciones de operación de la compuerta para ingresarlo en el modelo matemático

1.4 Justificación e importancia

La evaluación nos permitirá analizar el diseño de una compuerta fabricada en los años 1969, usando el método de elementos finitos en el cual se buscará realizar optimizaciones para el nuevo diseño de compuerta.

Es importante también porque nos permite desarrollar un procedimiento de evaluación y diseño de compuertas siguiendo las normativas. Sale la necesidad de evaluar las normativas de diseño, ingresarlas en el dominio y evaluar los resultados usando el método de elementos finitos.

1.5 Objetivos

El diseño por elementos finitos permite una visualización de esfuerzos y deformación en toda la estructura analizada, las cuales posteriormente son evaluadas. Los elementos finitos introducen pequeños errores en las diferentes etapas, que pueden

producir seguridades; estas si no son analizadas de la manera correcta pueden inducir a un error en el diseño. Lo mencionado anteriormente se evaluará en el desarrollo de la tesis.

1.5.1 Objetivos generales.

- Analizar y optimizar la compuerta radial mediante un análisis estático lineal por elementos finitos.

1.5.2 Objetivos específicos.

- a) Definir un procedimiento para analizar y optimizar el diseño por elementos finitos de la compuerta radial
- b) Analizar los materiales de fabricación de la compuerta radial de acuerdo a los planos.
- c) Definir un dominio de análisis que represente de manera efectiva a la compuerta.
- d) Definir las condiciones de contorno para la operación y accionamiento de la compuerta.
- e) Ejecutar un análisis de malla del dominio definido, en el estado de operación de la compuerta.
- f) Ejecutar el análisis por elementos finitos en las condiciones de operación y accionamiento.
- g) Optimizar la compuerta acorde a los resultados obtenidos.

1.6 Hipótesis.

1.6.1 Hipótesis general

- El análisis por elementos finitos de la compuerta radial existente, permite desarrollar optimizaciones para el diseño de una nueva compuerta radial manteniendo las condiciones de operación y accionamiento.

1.6.2 Hipótesis específicas

- a) ¿Es posible realizar un procedimiento para el análisis por elementos finitos de modelo en específico?
- b) Se conocen todas las propiedades mecánicas de los aceros de la norma UNI, de la fabricación original de la compuerta.
- c) El dominio será por elementos de tipo superficie 2D.
- d) En los resultados de la condición de operación se espera obtener mayor rigidez
- e) Al ejecutar el análisis de malla no se encontrarán singularidades.
- f) Se espera obtener factores de seguridad superiores a los 1.5 respecto al límite de fluencia en las estructuras principales
- g) La nueva compuerta radial tendrá una mayor rigidez y mayor resistencia mecánica.

1.7 Variables y operacionalización de variables

El análisis por elementos finitos de una estructura requiere del análisis de la geometría, propiedades mecánicas, malla, condiciones de operación y la evaluación de resultados en forma cíclica. En los resultados se evalúan principalmente deformaciones, esfuerzos y factores de seguridad.

1.7.1 Variables

Las variables para el desarrollo de tesis, por los conceptos de diseño y análisis son:

- Método elementos finitos (FEM)
- Criterios de diseño
- Propiedades mecánicas de los Acero.

1.7.2 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operación de variables:

Análisis y optimización mediante simulación numérica de la estructura de la compuerta segmento

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Método de Elementos Finitos. (FEM)	Método numérico que permite resolver problemas de ingeniería mediante la discretización del dominio en elementos finitos.	Proceso computacional que nos permite simular el comportamiento estructural mediante la división de pequeños elementos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tipo de geometría (1D, 2D, 3D) 2. Análisis de malla 3. Propiedades mecánicas. 4. Condiciones de frontera. 5. Resultados de análisis. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elementos tipo segmento, superficie y volumen. 2. Numero de nodos y elementos 3. Errores de convergencia. 4. Esfuerzos máximos y mínimos. 5. Factores de seguridad
Criterios de Diseño.	Conjunto de principios, normas técnicas y requisitos que deben considerarse durante el análisis, dimensionamiento y construcción.	Lineamientos que definen combinaciones de carga, tensiones admisibles de para el diseño y evaluación de estructuras	<ol style="list-style-type: none"> 1. Norma (E.020) 2. Diseño Sismorresistente (E.030) 3. Norma NBR 8883 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cargas aplicadas (Vivas y muertas) y combinación de carga. (Método ASD) 2. Coeficiente sísmico. 3. Tensionas admisibles,
Propiedades Mecánicas del Acero.	Conjunto de características físicas del Acero estructural que definen su comportamiento ante cargas.	Propiedades ingresadas al software de análisis de elemento finitos para modelar el comportamiento del acero.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Módulo de elasticidad (E) 2. Coeficiente de Poisson (ν) 3. Densidad 4. Límite de fluencia. 5. Resistencia de diseño según norma 	<ol style="list-style-type: none"> 1. $E=210\text{GPa}$ 2. $\nu = 0.3$ 3. Densidad $\approx 7850 \text{ kg/m}^3$ 4. Esfuerzo de fluencia. 5. Esfuerzo máximo

1.8 Metodología de la investigación

1.8.1 Unidades de Análisis.

La investigación considera como unidad la compuerta radial del alivio cuatro (04), ubicado en la Presa Tablachada, Ubicada en localidad de Quichuas, provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica.

1.8.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación.

Aplicada, Cuantitativo, Correlación o Explicativo, Experimental

1.8.3 Diseño de la Investigación.

Investigación cuasi-experimental, puesto que es similar a la experimental, pero sin el control y la manipulamos variables independientes para obtener resultados.

1.8.4 Fuentes de Información.

Libros citados en el Anexo, Tesis y Expedientes de evaluación.

1.8.5 Población y Muestra.

La población son los posibles diseños de las nuevas compuertas en el proceso de optimización de la malla y la geometría. Las que cumplan con las restricciones asumidas.

La muestra es la compuerta con mejor respuesta a los procesos de optimización de la malla y de la optimización.

1.8.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

La fuente principal son los planos de fabricación de la compuerta radial. Posterior a eso es necesario conocer las propiedades mecánicas de los materiales por lo que se busca en la base de datos de los materiales.

En el proceso de optimización se realiza simulaciones programadas continuas para con los diferentes tamaños de mallas para determinar el tamaño de malla óptimo.

Para la evaluación de las diferentes cargas, se hace un análisis de la condición de operación, para la carga sísmica se utiliza los datos la ubicación de la compuerta acorde a la zona sísmica.

1.8.7 Análisis y Procesamiento de Datos.

Los primeros análisis para determinar el dominio que representa de manera correcta al modelo, se evalúa el número de elementos finitos y resultados obtenidos en la simulación.

Los datos obtenidos en el análisis de malla producto de simulaciones continuas con diferentes tamaños de malla, te permite análisis el tamaño de malla óptimo para el desarrollo de las simulaciones.

La modificación de la geometría y dominio, bajo una misma condición de operación se analiza la distribución de esfuerzos y deformaciones. Para el proceso de optimización es necesario evaluar los resultados acordes a la combinación de cargas.

1.8.8 Tipo y diseño de la investigación

Diseño cuantitativo, pre experimentales

Se espera realizar análisis del modelo original de la compuerta para realizar un proceso de optimización de esta compuerta, para lo se realizará una serie simulaciones usando elementos finitos.

1.8.9 Unidad de análisis.

La investigación considera como unidad la compuerta radial del alivio cuatro (04), ubicado en la Presa Tablachada, Ubicada en localidad de Quichuas, provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica.

1.9 Etapas de la investigación

Fase A: Formulación del problema.

Se realizó la formulación de un problema, en esta etapa se busca una propuesta de mejora de diseño para la compuerta radial ubicada en el alivio 04 de la Presa Tablachaca para el proyecto de rehabilitación del alivio 04.

Fase B: Planificación del trabajo de investigación. (conceptualización de un diseño de investigación)

La planificación del trabajo de investigación, se desarrolló un plan para el proceso de optimización de la compuerta radial mediante elemento finitos.

Fase C: Realización del trabajo de investigación (procesamiento y visualización de datos)

Realización del trabajo de investigación, se usará el software de elementos finitos llamado ANSYS 19.0 versión estudiante, para el proceso de modelamiento y simulación de la compuerta radial.

Fase D: Recomendaciones y conclusiones.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

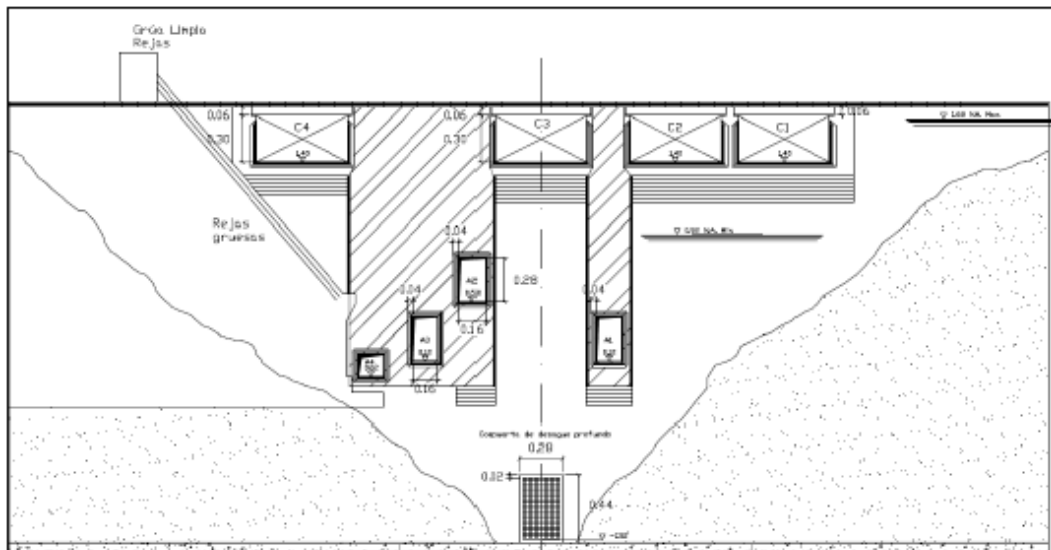
2.1.1 Presa Tablachaca

Es una presa de tipo arco-gravedad de aproximadamente 77m de altura ubicada en la región de Huancavelica, provincia de Tayacaja y distrito de Colcabamba, con capacidad de embalse de 8 millones de m³, en la que se almacena el agua proveniente del río Mantaro. (Electroperu, s.f.)

El control de niveles de operación de la presa Tablachaca y la gestión de avenidas de la Presa Tablachaca se efectúa a través de cuatro vertederos de superficie, cada una de ellas con sus respectivas compuertas radiales. Y con cuatro desagües de fondo, las cuales están ubicadas en diferentes niveles facilitando así la evacuación de sedimentos

Figura 1

Vista aguas arriba de la Presa Tablachaca



Nota: Los cuatro vertederos de superficie y los cuatro aliviaderos de desagüe. (Córdova Carmen, 2015, pág. 124)

El aliviadero 4 se encuentra en el borde inferior izquierdo de la Presa Tablachaca de vista aguas arriba. La base de la entrada del aliviadero 4 se encuentra ubicada en la cota

2653.5msnm y la coronación de la Presa está en la cota 2695msnm. El alivio 4 es el que tiene mayor carga hidráulica puesto que esta mayor profundidad de los otros tres alivios.

Estos alivios son generalmente usados para el proceso de purga, (eliminación de sedimentos) las cuales están sometidos a las diferentes colisiones con rocas, troncos y todo el material arrastrado por las aguas sufriendo desgaste por erosión y abrasión.

2.1.2 Desagües

Las presas requieren ciertas estructuras e instalaciones complementarias para realizar sus funciones operacionales en forma segura y efectiva. En particular, debe tenerse en cuenta el paso seguro de las crecientes extremas, el nivel de vaciado controlado y la descarga de agua en cumplimiento de los propósitos del embalse. Los vertederos y los alivios son, por tanto, obras esenciales. Otras instalaciones complementarias se incorporan cuando sea necesario para el propósito de la presa y de acuerdo con su tipo. (Novak, Moffat, & Nalluri, 2001)

a) Desagües intermedios

Aunque la función intrínseca de estos desagües es el control del nivel del embalse por abajo del umbral del aliviadero de superficie, de hecho, cumplen otras misiones que pueden ser más importantes, como son la limpieza de sedimentos, la evacuación de avenidas y la regulación del llenado del embalse.

En presas de pequeña o mediana altura (por debajo de 60m) suele bastar el desagüe de fondo para las misiones específicas de los desagües profundos citadas anteriormente; con grandes alturas de presa, o cuando estos desagües colaboran de forma notable en la evacuación de avenidas, puede resultar aconsejable disponer de otro u otros desagües intermedios para fraccionar el desagüe y la carga de trabajo de los elementos de cierre. Lo más frecuente es que solo exista el desagüe de fondo, y resulta más bien

excepcional que haya más de un desagüe de medio fondo. (Comité Nacional Español de Grandes Presas)

b) Desagües profundos

Se considera como desagües profundos los situados en los dos tercios inferiores del embalse.

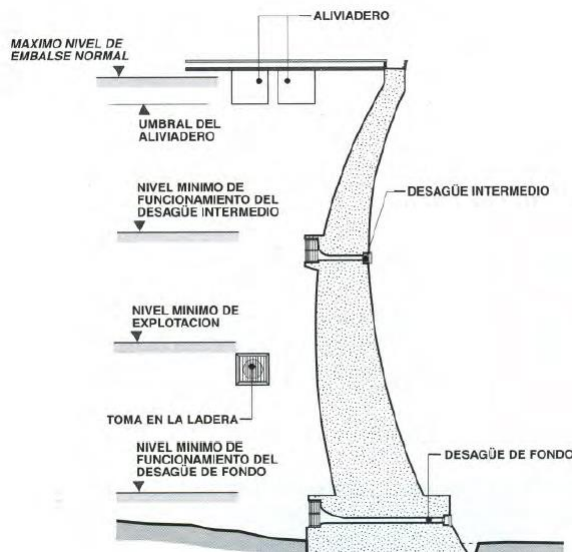
Los desagües profundos son de dos tipos:

- Los que tienen como misión derivar del embalse el caudal destinado a los usos de éste, que se llaman tomas de explotación, o simplemente tomas. Se caracterizan por su uso relativamente continuo, al menos en largos periodos de tiempo, y caudales próximos, aunque con frecuencia concentrados en ciertas horas (centrales hidroeléctricas) o meses (riesgos).
- Los destinados al control de nivel del embalse y su eventual vaciado por debajo del umbral del aliviadero de superficie o al desagüe de caudales excepcionales, o de sólidos depositados en el fondo del embalse. Estos son los que se denominarán desagües profundos propiamente dichos. Puede estar a distintas alturas, pero, salvo excepciones muy contadas, hay al menos uno más profundo, llamado desagüe fondo. Los otros, si existen, se denominan desagües intermedios o de medio fondo. (Comité Nacional Español de Grandes Presas)

En la Figura 2 se muestra una vista de corte de una presa, se observa las obras complementarias que permiten el funcionamiento adecuado cada una con función específica ya antes mencionada.

Figura 2

Desagües Intermedio y Desagües de Fondo



Nota: Esquema referencial de obras complementarias de una presa (Comité Nacional Español de Grandes Presas, pág. 118)

2.1.3 Compuertas de tipo segmento.

La compuerta de segmento, en su forma más simple, consiste en una placa de revestimiento curvada formada en un segmento de cilindro, sostenida por brazos radiales comprimidos que transfieren las fuerzas hidráulicas a los cojinetes fijos como se muestran en la Figura 3 y Figura 4. La compuerta del segmento gira alrededor de un eje horizontal, que pasa por el centro del cojinete y generalmente coincide con el centro del radio de curvatura de la placa. Mediante esta disposición, el empuje resultante de la presión del agua pasa a través del punto de rotación y no tiene tendencia a abrir o cerrar la compuerta. En algunos casos, el centro de curvatura de la placa de revestimiento se encuentra por encima del eje del cojinete para proporcionar un momento de elevación, lo que ayuda a la apertura de la puerta. Este momento producido por el empuje debe ser menor que el debido al peso de la puerta para asegurar un cierre producto de la gravedad. (Erbisti, Design of Hydraulic Gates, 2014)

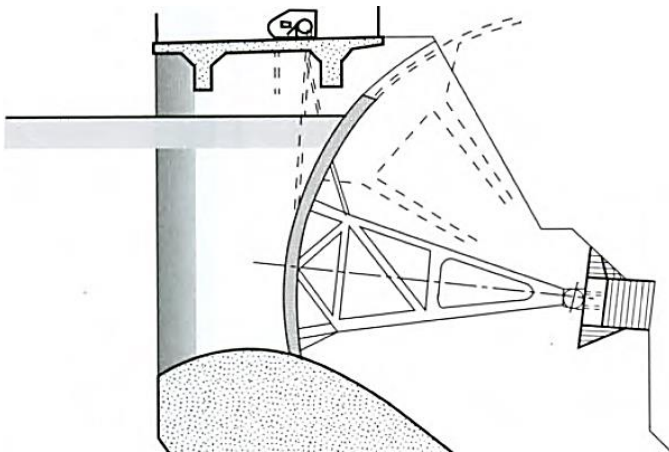
a) Compuertas de segmento en superficie

Este tipo de compuertas es el más adecuado en aliviaderos de superficie ya que pueden emplearse para grandes secciones alivio permitiendo así la regulación de caudales. El accionamiento de estas compuertas está dado por sistemas hidráulicos o neumáticos. Antiguamente eran accionados por cadenas mediante dispositivos instalados en la coronación de la presa como se muestra en la Figura 3.

Las compuertas deben ser diseñadas para un cierre exclusivamente por gravedad, con agua fluyente y a máxima carga de hidráulica. (Comité Nacional Español de Grandes Presas)

Figura 3

Compuerta de Segmento en Superficie.



Nota. Compuerta de segmento ubicada en uno de los aliviaderos superiores. (Comité Nacional Español de Grandes Presas)

b) Compuerta de segmento sumergidas

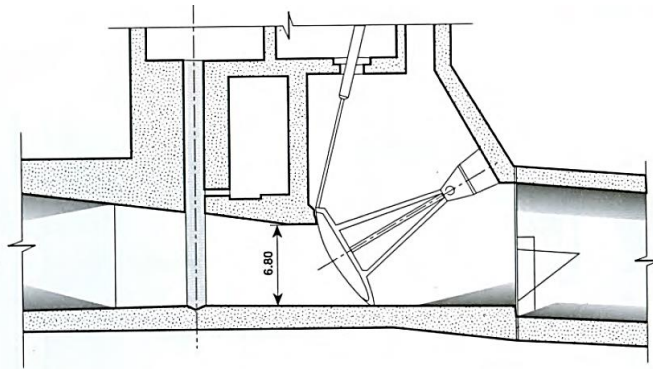
Las compuertas de segmento son muy apropiadas como órganos de regulación en desagües bajo gran carga de agua, o por las cuales deban evacuarse grandes caudales. Por esta razón se emplean en desagües de fondo, desagües intermedios, en tomas de agua y en aliviaderos sumergidos.

Las compuertas de segmento sumergidas deben proyectarse preferiblemente para el cierre por gravedad con agua fluyente y la máxima carga del embalse. En determinadas

circunstancias la condición anterior obligaría a diseñarlas con un excesivo peso; en este caso es admisible que el cierre se efectuó con ayuda del empuje mecánico de accionamiento. (Comité Nacional Español de Grandes Presas)

Figura 4

Compuerta de Segmento Sumergida



Nota. Aliviadero de fondo con una compuerta segmento encargada de la regulación. (Comité Nacional Español de Grandes Presas)

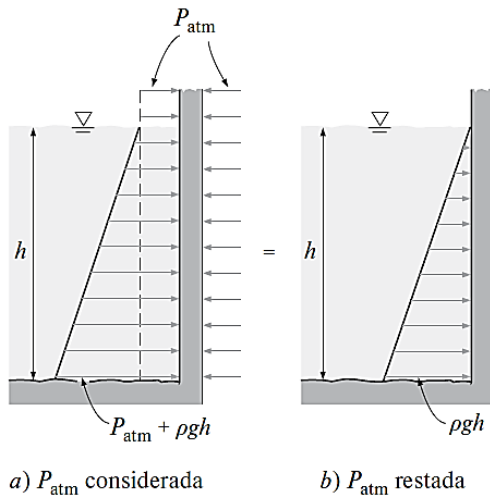
2.1.4 Fuerzas hidrostáticas

a) Fuerzas hidrostáticas sobre superficies planas sumergidas

Una placa expuesta a un líquido (como una compuerta en una presa, la pared de un tanque de almacenamiento de líquidos o el casco de un barco en reposo), queda sometida a la presión del fluido distribuida sobre su superficie. Sobre una superficie plana las fuerzas hidrostáticas forman un sistema de fuerzas paralelas y, a menudo, se necesita determinar la magnitud de la fuerza y su punto de aplicación, el cual se llama centro de presión. En la mayoría de los casos, el otro lado de la placa está abierto a la atmósfera (como el lado seco de una compuerta) y, donde, la presión atmosférica actúa sobre los dos lados de la placa y conduce a una resultante cero como se muestra en la Figura 5-a. En esos casos conviene restar la presión atmosférica y trabajar solo con la presión manométrica. Por ejemplo, la presión manométrica en fondo del lago como muestra en la Figura 5-b, $P_{man} = \rho gh$.

Figura 5

Presión Manométrica



Nota. Presión manométrica en el fondo de un lago a una altura h . (Cengel & Cimbala, 2018, pág. 92)

Considérese la superficie superior de una placa plana de forma arbitraria, sumergida totalmente en un líquido, como se muestra en la figura 8 junto con su vista desde arriba. El plano de esta superficie (normal al plano de la página) se interseca con la superficie libre horizontal y forma un ángulo θ , y la línea de intersección se toma como el eje x (fuera de plano). La presión absoluta arriba del líquido es P_o , la cual es la presión atmosférica local P_{atm} si ese líquido está abierto a la atmosfera (pero P_o puede ser diferente de P_{atm} si se crea un vacío en el espacio que está arriba del líquido o se presuriza). Entonces la presión absoluta en cualquier punto de la placa es

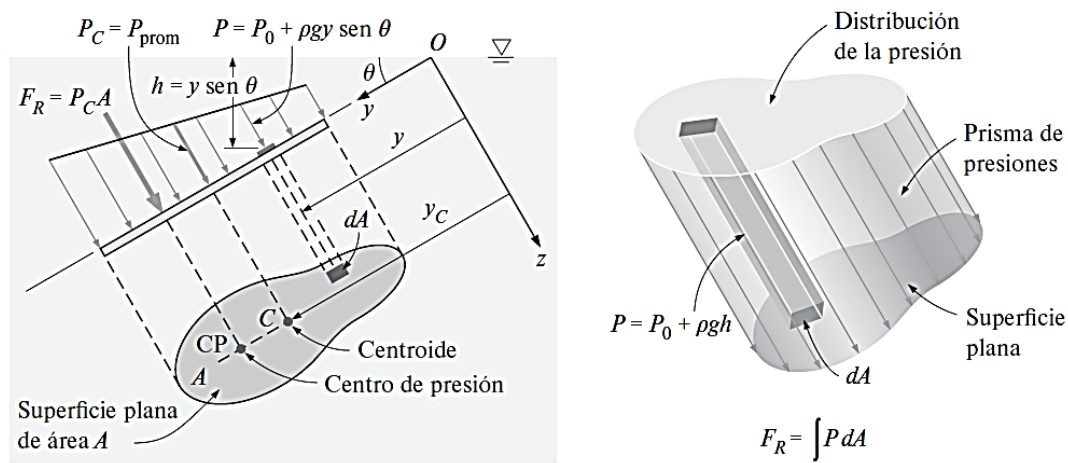
$$P = P_o + \rho gh = P_o + \rho gy \sin \theta \quad (1)$$

Donde h es la distancia vertical del punto a la superficie libre y y es la distancia del punto al eje x (al punto O en la figura 8). La fuerza hidrostática resultante F_R que actúa sobre la superficie se determina cuando se integra la fuerza PdA que actúa sobre un área diferencial dA sobre toda el área superficial,

$$F_R = \int_A PdA = \int_A (P_o + \rho gy \sin \theta) dA = P_o A + \rho g \sin \theta \int_A y dA \quad (2)$$

Figura 6

Fuerza hidrostática



Nota. Fuerza hidrostática sobre la superficie de un plano inclinado totalmente sumergido en un líquido (Cengel & Cimbala, 2018, pág. 92)

Para mayor detalle revisar el libro “Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones” de los autores Cengel, Yamus A.; Cimbala, John M.; en las páginas 92-94.

b) Fuerzas hidrostáticas sobre superficies curvas sumergidas

En muchas aplicaciones prácticas, las superficies sumergidas no son planas. Para una superficie curva sumergida, la determinación de la fuerza hidrostática resultante es más complicada, en virtud de que es común que se necesite la integración de las fuerzas de presión que cambian de dirección a lo largo de la superficie curva. En este caso, el concepto de prisma de presiones tampoco es de mucha ayuda debido a las configuraciones complicadas con las que se trata.

La manera más fácil de determinar la fuerza hidrostática resultante F_R que actúa sobre una superficie curva bidimensional es determinar las componentes horizontal y vertical F_H y F_V por separado. Esto se realiza cuando se considera el diagrama de cuerpo libre del bloque de líquido encerrado por la superficie curva y las dos superficies planas (una horizontal y la otra vertical) que pasan por los dos extremos de la superficie curva, como se muestra en la figura 7. Note que la superficie vertical del bloque considerado de líquido es sencillamente la proyección de la superficie curva sobre un **plano vertical**, y la

horizontal es la proyección de la superficie curva misma sobre un **plano horizontal**. La fuerza resultante que actúa sobre la superficie sólida curva es igual y opuesta a la que actúa sobre la superficie líquida curva (tercera ley de Newton).

Se pueden determinar la fuerza que actúa sobre la superficie plana imaginaria, horizontal o vertical, y su línea de acción como se comentó en la sección 3-4. El peso del bloque de líquido de volumen V es sencillamente $W = \rho g V$, y actúa hacia abajo pasando por el centroide de este volumen. Cuando se observa que el bloque de fluido está en equilibrio estático, los balances de las fuerzas en las direcciones horizontal y vertical dan:

Componente horizontal de la fuerza sobre la superficie curva:

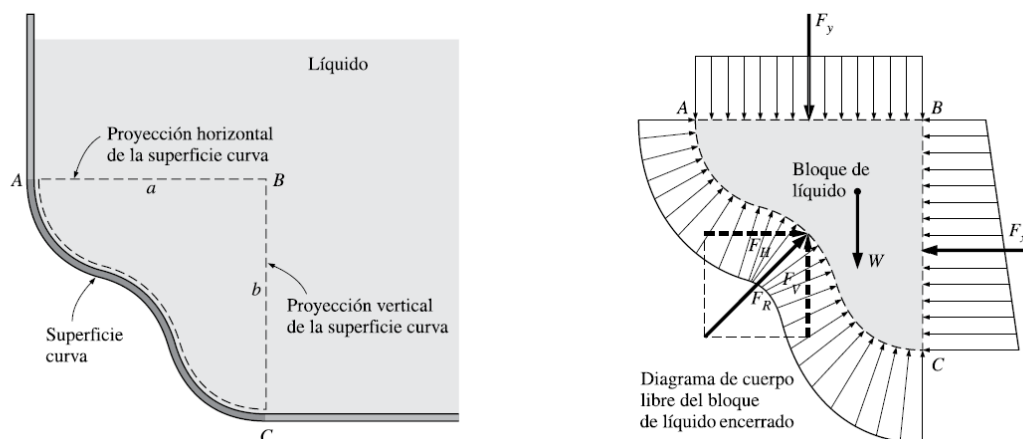
$$F_H = F_X \quad (3)$$

Componente vertical de la fuerza sobre la superficie curva:

$$F_V = F_Y \pm W \quad (4)$$

Figura 7

Fuerza hidrostática en una superficie curva



Nota. Determinación de la fuerza hidrostática que actúa sobre una superficie curva sumergida (Cengel & Cimbala, 2018, pág. 97)

De la ecuación (3) y (4) se deduce que:

- La componente horizontal de la fuerza hidrostática que actúa sobre una superficie curva es igual (en magnitud y respecto a la línea de acción) a la fuerza hidrostática que actúa sobre la proyección vertical de esa superficie curva.

- La componente vertical de la fuerza hidrostática que actúa sobre una superficie curva es igual a la fuerza hidrostática que actúa sobre la proyección horizontal de esa superficie curva, más (menos, si actúa en la dirección opuesta) el peso del bloque de fluido.

La magnitud de la fuerza hidrostática resultante que actúa sobre la superficie curva es $F_R = \sqrt{F_H^2 + F_V^2}$ y la tangente del ángulo que forma con la horizontal es $\alpha = \frac{F_V}{F_H}$. Se puede determinar la localización exacta de la línea de acción de la fuerza resultante (por ejemplo, su distancia a uno de los puntos extremos de la superficie curva) tomando un momento respecto a un punto apropiado. Estas observaciones son válidas para todas las superficies curvas, sin importar si se encuentran arriba o abajo del líquido. Note que en el caso de una superficie curva que está arriba de un líquido, el peso del líquido se resta de la componente vertical de la fuerza hidrostática, porque actúan en direcciones opuestas (Fig. N° 12). (Cengel & Cimbala, 2018, págs. 97-98)

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Fundamentos de la elasticidad

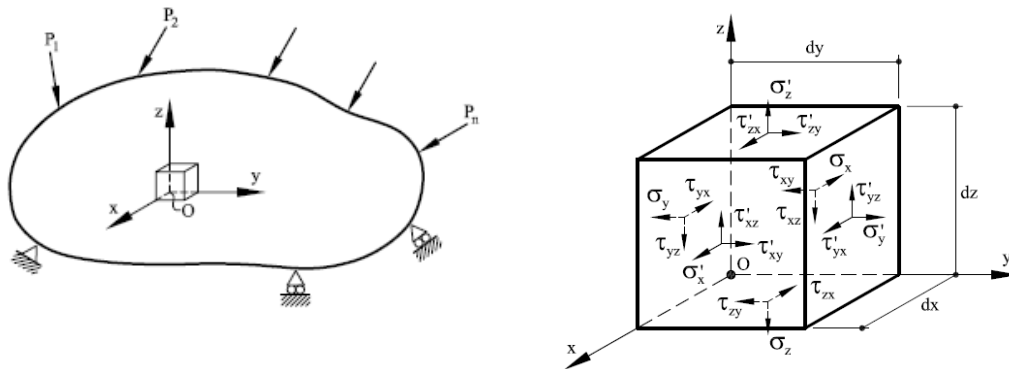
La resistencia de materiales y la teoría de la Elasticidad, como partes integrantes de la Mecánica de Sólidos Deformables, son dos disciplinas con objetivos comunes ambas abordan el estudio de la resistencia (estado de tensiones) y la rigidez (estado de deformaciones) de cuerpos sólidos deformables sometidos a la acción de sistemas de fuerzas en equilibrio estático. Asimismo, ambas parten del principio de linealidad entre acción y respuesta; esto implica que el comportamiento de los materiales se supone “elástico” y que los movimientos que se suponen “pequeños”. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2001, pág. 1)

a) Componentes de tensión

Consideremos un cuerpo sometido a la acción de un sistema de fuerzas en equilibrio como se muestra en la Figura 8-a. Sea O un punto de su interior en el que se desea determinar el estado tensional como muestra la Figura 8-b, es decir conocer la tensión que actúan según un plano de orientación arbitraria que pase por dicho punto.

Figura 8

Componentes Cartesianas de la Tensión



a) Sistema cartesiano de referencia

b) Componentes cartesianas de la tensión

Notas. En la Figura 6-a) se muestra un sólido en estado de equilibrio y en la Figura 6-b) se muestra un estado tensional. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2001, pág. 4)

b) Ecuación de equilibrio de Cauchy

Supongamos que sobre el elemento diferenciado mostrando en la Figura 6-b actúa una fuerza por unidad de volumen \vec{b} , cuyas componentes cartesianas son \vec{b} (b_x, b_y, b_z). Planteamos ahora las condiciones de equilibrio estático del elemento o diferencial aislado. Del equilibrio de fuerzas según las tres direcciones cartesianas se obtienen las ecuaciones de equilibrio interno o de Cauchy:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \vec{b}_x = 0 \quad \left(\sum F_x = 0 \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \vec{b}_y = 0 \quad \left(\sum F_y = 0 \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \vec{b}_z = 0 \quad \left(\sum F_z = 0 \right) \quad (7)$$

Por otra parte, del equilibrio de momentos se obtiene el principio de reciprocidad de las tensiones tangenciales, que permiten reducir a la mitad el número de componentes

independientes de las tensiones tangenciales, de seis a tres. En efecto, si se toman momentos respecto al eje x de las fuerzas que actúan sobre el volumen diferencial, la suma debe ser nula. Tal como se ve en las ecuaciones 10 y despreciando el efecto de las fuerzas de volumen y de los diferenciales de tensión por ser infinitésimos de cuarto orden, sólo las resultantes de las componentes τ_{yz} y τ_{zy} producen momento neto según el eje x :

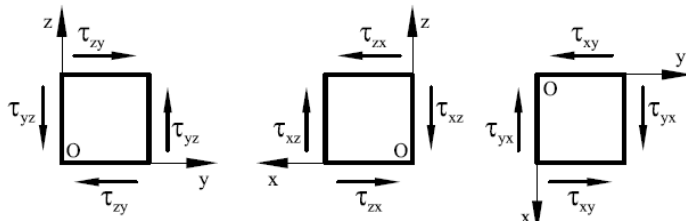
$$(\tau_{yz} dx dz) dy - (\tau_{zy} dx dy) dz = 0 \quad \left(\sum M_x = 0 \right) \quad (8)$$

O sea,

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \left(\sum M_x = 0 \right) \quad (9)$$

Figura 9

Equilibrio de Momentos en un Elemento Diferencial



Nota: Momentos en los x , y , z en una condición de equilibrio estático.

De forma análoga se obtiene que:

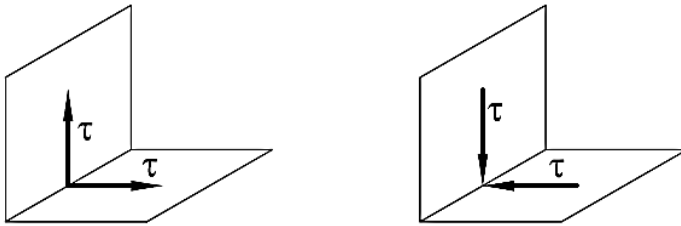
$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \left(\sum M_y = 0 \right) \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \left(\sum M_z = 0 \right) \quad (11)$$

Por lo tanto, el principio de reciprocidad de tensiones tangenciales establece que “en dos planos perpendiculares entre sí, las componentes de las tensiones tangenciales normales a la arista en común en un punto son iguales en módulo, y ambas concurren o se separan simultáneamente de la arista” tal como se muestra en la Figura 8. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2001)

Figura 10

Reciprocidad de las tensiones tangenciales



Nota. Las tensiones tangenciales son en un punto en común son iguales en modulo. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2001, pág. 7)

c) Tensión límite, tensión admisible y coeficiente de seguridad.

El lógico requisito de seguridad exigible a las estructuras que se proyectan y se construyen conlleva la definición de un valor superior de la tensión que el material puede alcanzar sin que exista riesgo que se produzca un fallo estructural, ya sea este total o parcial. Así, se define tensión límite, σ_{lim} , como aquel valor de la tensión al cual el material alcanza su límite de resistencia, y por debajo del cual no se producen ni deformaciones excesivas ni, por supuesto, la rotura del mismo. En los materiales dúctiles, tales como el acero, es habitual considerar como tensión límite la tensión de fluencia ($\sigma_{lim} = \sigma_f$), mientras que, en los materiales frágiles, como el hormigón, se suele considerar como tensión límite la tensión de rotura ($\sigma_{lim} = \sigma_r$).

En consecuencia, se define tensión admisible, σ_{adm} , de la forma

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lim}}{n} \leq \sigma_{lim} \quad (12)$$

Donde σ_{lim} es la tensión límite del material y n es un coeficiente mayor (o excepcionalmente igual) que la unidad denominado coeficiente de seguridad. Las estructuras se diseñan, por tanto, con el criterio de la tensión en cualquier punto sea inferior al valor de la tensión admisible; es decir, si σ_{max} es el valor máximo de la tensión en la estructura, debe cumplirse que

$$\sigma_{max} = \sigma_{adm} \leq \sigma_{lim} \quad (13)$$

La determinación del coeficiente de seguridad depende de un gran número de factores, pero éste debe ser mayor cuanto mayor sea el grado de incertidumbre en la fase de proyecto o cuanto mayor sea el impacto, en términos socio-económicos, que acarrearía un eventual fallo estructural. El coeficiente de seguridad puede reducirse en estructuras de poca complejidad o de vida útil reducida. En cualquier caso, este coeficiente se fija según la experiencia adquirida en estructuras análogas y en el nivel tecnológico aplicable. En edificación e ingeniería de la construcción se usan coeficientes de seguridad entre 2 y 5, adoptándose valores más altos para la construcción in situ que para la prefabricación. En ingeniería aeronáutica se usan, necesariamente, coeficientes de seguridad menores, entre 1.5 y 2, pero asociados a métodos de análisis, construcción, conservación y control mucho más complejas. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2001, págs. 29-31)

d) Tensión equivalente y criterios de resistencia

Se define como tensión equivalente (o de comparación) de un estado multiaxial de tensiones a un valor escalar, función de las componentes del tensor de tensiones (o de los valores de las tensiones principales de éste), que puede correlacionarse con los valores de tensión en un ensayo uniaxial. Así, dos estados multiaxiales de tensión son equivalentes a efectos de resistencia si les corresponde idénticas tensiones equivalentes. En particular, un estado multiaxial es equivalente a un estado uniaxial en el actúa una tensión igual a la tensión equivalente del primero.

El concepto de tensión equivalente permite aplicar a los estados multiaxiales los mismos criterios de seguridad que en estados uniaxiales. Así, se exige que la máxima tensión equivalente en la estructura no supere el valor de la tensión admisible, definida aplicando un determinado coeficiente de seguridad a la tensión límite uniaxial:

$$(\sigma_{eq})_{max} \leq \sigma_{adm} \leq \frac{\sigma_{lim}}{n} \quad (14)$$

De esta forma, el problema de dimensionar estructuras sometidas a estados generales de tensión se reduce a definir adecuadamente las tensiones equivalentes, evaluarlas y compararlas con el valor admisible.

En la práctica ingenieril se usan diversas definiciones empíricas de la tensión equivalente, que se adecuan en mayor o menor grado a los diferentes materiales empleados. A estas definiciones se les denomina criterios de resistencia. Los más habituales son los siguientes:

- **Criterio de Rankine**

Según este criterio, el material falla cuando el máximo valor absoluto de una de las tensiones principales alcanza un valor igual a la tensión límite. Es decir, si las tensiones principales son $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, la tensión equivalente es

$$\sigma_{eq} = (|\sigma_i|)_{max} \quad i = 1,2,3 \quad (15)$$

Este criterio suele emplearse para materiales como el hormigón, en aquellas situaciones en que el fallo del material se produce predominantemente a tracción, según el llamado modo I de fractura.

- **Criterio de Tresca**

Según este criterio, el material falla cuando la tensión tangencial máxima alcanza el valor correspondiente a la tensión tangencial máxima en el ensayo uniaxial. Es decir, si las tensiones principales son $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, entonces la tensión tangencial máxima debe ser

$$\tau_{max} \leq \frac{\sigma_{eq}}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (16)$$

O sea, la tensión equivalente se define como

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (17)$$

- **Criterio de Von Mises**

Según este criterio, el material falla cuando la energía de deformación asociada a procesos de deformación de distorsión alcanza el valor correspondiente a la energía de distorsión límite en el ensayo uniaxial. Según esta hipótesis, la tensión equivalente es

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (18)$$

Este criterio es adecuado para materiales dúctiles como los aceros de construcción, que son insensibles al nivel de presión hidrostática, en aquellas situaciones en que el fallo del material se produce predominantemente por cizalladura.

- **Criterio de Mohr – Coulomb**

Este criterio puede considerarse una generalización del criterio de Tresca para aquellos materiales que son sensibles al nivel de confinamiento, o sea, a la presión hidrostática.

La tensión equivalente se define como

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - k\sigma_3 \quad (19)$$

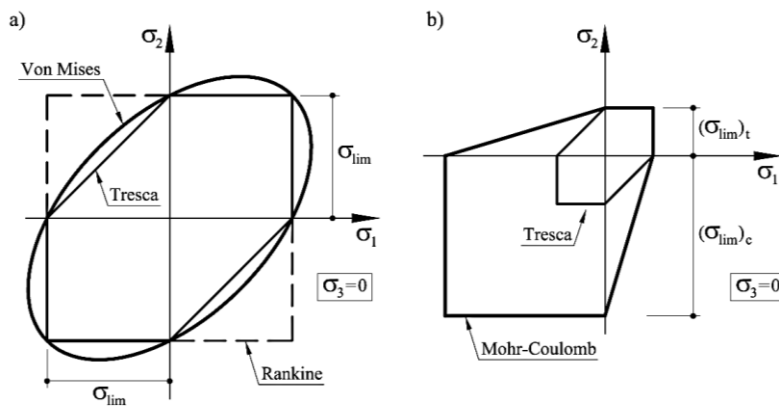
Donde $k = (\sigma_{lim})_t / (\sigma_{lim})_c$ es la relación entre las tensiones límite a tracción y compresión. Este criterio es adecuado tanto para materiales frágiles como dúctiles, y se suele aplicar a los geomateriales o materiales friccionales, tales como el hormigón o los suelos, que presentan una marcada diferencia entre la resistencia a tracción y compresión.

En la Figura 11 se muestra las diferencias entre los diversos criterios de fallo introducidas. Para un estado plano de tensiones, $\sigma_3 = 0$, se representa los lugares geométricos de las combinaciones de valores de tensiones principales σ_1 , σ_2 que determinan un valor límite de la correspondiente tensión equivalente. Puede decirse que el “interior” de las curvas así definidas corresponden a situaciones elásticas, es decir, sin riesgo de fallo. El “exterior” de dichas curvas corresponde a estados de tensión imposibles de alcanzar por el material en cuestión.

En la Figura 11 a se comparan los criterios de Rankine, Tresca y Von Mises para un mismo valor de la tensión límite. Se observa que los criterios de Rankine y Tresca coinciden en los cuadrantes de tracción compresión, con cizalladura predominante. El criterio de Von Mises puede verse como una versión “redondeada” del criterio de Tresca y Mohr Coulomb para un mismo valor de tensión límite de tracción. El criterio de Mohr Coulomb puede verse como una generalización del criterio de Tresca mucho más aproximada al comportamiento real. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2001, págs. 31-34)

Figura 11

Estado de Tensiones



Nota. Estado de tensiones por Von Mises, Tesca y Rankine.

2.2.2 Aceros

El acero es una aleación que está compuesta casi por completo de hierro (generalmente más del 98%). Contiene también pequeñas cantidades de carbono, silicio, manganeso, azufre, fósforo y otros elementos. El carbono es el elemento que tiene la mayor influencia en las propiedades del acero. La dureza y la resistencia del acero aumentan con el porcentaje de carbono. Un incremento del 0.01 por ciento del contenido de carbono causará que la resistencia de fluencia del acero se eleve aproximadamente 0.5 klb/plg² (ksi). Desafortunadamente, sin embargo, una mayor cantidad de carbono hará que el acero sea más frágil y afectará adversamente su soldabilidad. Si se reduce el contenido de carbono, el acero se hará más suave y más dúctil, pero también más débil. La adición

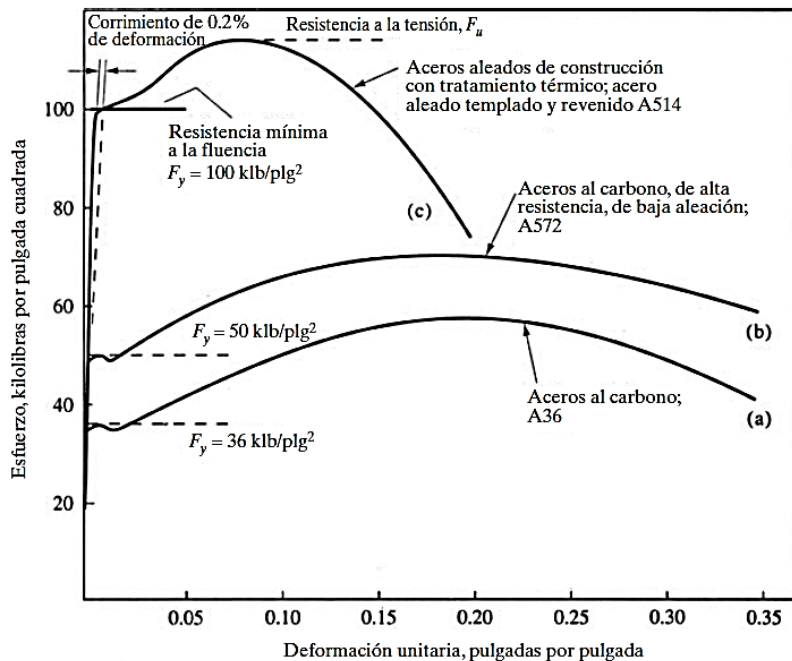
de elementos tales como cromo, silicio y níquel produce aceros con resistencias considerablemente más altas. Aunque con frecuencia son muy útiles, estos aceros son considerablemente más caros y con frecuencia no son tan fáciles de fabricar. (C. McCORMAC & F. CSERNAK, 2013, pág. 18)

Los aceros estructurales generalmente se agrupan en varias clasificaciones principales de la ASTM: los aceros al carbono A36, A53, A500, A501 y A529; los aceros de baja aleación y de alta resistencia A572, A618, A913 y A992, y los aceros de baja aleación y alta resistencia y resistentes a la corrosión A242, A588 y A847. (21).

En la figura 12 se muestran las curvas características de los aceros donde indica los límites de fluencia

Figura 12

Curva Características de los Aceros A36, A572 y A514.



Nota. Curva características del acero al carbono a36, Acero al carbono de alta resistencia de baja aleación A572y Acero aleados de construcción con tratamiento térmico A514 (C. McCORMAC & F. CSERNAK, 2013, pág. 19)

a) Aceros al carbono

Estos aceros tienen como principales elementos de resistencias al carbono y al manganeso en cantidades cuidadosamente dosificadas. Los aceros al carbono tienen sus

contenidos limitados a los siguientes porcentajes máximos: 1.7% de carbono, 1.65% de manganeso, 0.60% de silicio y 0.60% de cobre. Estos aceros se dividen en cuatro categorías, dependiendo del porcentaje de carbono:

- Acero de bajo contenido de carbono: 0-0.15%.
- Acero dulce: 0.15 a 0.29%. (Los aceros estructurales al carbono quedan dentro de esta categoría.)
- Acero medio al carbono: 0.30 a 0.59%.
- Acero con alto contenido de carbono: 0.60 a 1.70%.

b) Aceros de alta resistencia y baja aleación.

Existe un gran número de aceros de este tipo clasificados por la ASTM. Estos aceros obtienen sus altas resistencias y otras propiedades por la adición, aparte del carbono y manganeso, de uno a más agentes de aleación como el cromo, vanadio, cromo, silicio, cobre y níquel. Se incluyen aceros con esfuerzos de fluencia comprendidos entre 40 klb/plg² y 70 klb/plg². Estos aceros generalmente tienen mucha mayor resistencia a la corrosión atmosférica que los aceros al carbono.

c) Aceros estructurales de alta resistencia, baja aleación y resistentes a la corrosión atmosférica.

Cuando los aceros se alean con pequeños porcentajes de cobre, se vuelven más resistentes a la corrosión. Cuando se exponen a la atmósfera, las superficies de estos aceros se oxidan y se les forma una película adhesiva muy comprimida (conocida también como “pátina bien adherida” o “capa de óxido”), que impide una mayor oxidación y se elimina así la necesidad de pintarlos. Después de que ocurre este fenómeno (en un periodo de 18 meses a 3 años, depende del tipo de exposición, por ejemplo, rural, industrial, luz solar directa o indirecta, etc.), el acero adquiere un color que va del rojo oscuro al café y al negro.

Estos aceros tienen gran aplicación, particularmente en estructuras con miembros expuestos y difíciles de pintar como puentes, torres de transmisión eléctrica, etc., sin embargo, no son apropiados para usarse en lugares donde queden expuestos a brisas marinas, nieblas o que estén continuamente sumergidos en agua (dulce o salada) o el suelo, o donde existan humos industriales muy corrosivos.

La Tabla 2 que se presenta aquí, que corresponde a la Tabla 2-4 en el Manual del Acero, en lista los 12 aceros de ASTM mencionados anteriormente en esta sección, junto con sus resistencias a la fluencia mínimas especificadas (F_y) y sus resistencias a la tensión mínimas especificadas (F_u). Además, las columnas a la derecha de la tabla suministran información con respecto a la disponibilidad de los perfiles en los diversos grados de aceros, así como el grado recomendado para usarse para cada uno. En cada caso, se muestra el acero recomendado con un cuadro negro.

Aunque los precios de los aceros aumentan con el incremento de los esfuerzos de fluencia, el porcentaje de incremento en los precios no es mayor que el porcentaje de incremento de los esfuerzos de fluencia. En consecuencia, el uso de aceros más resistentes resultará económico en miembros a tensión, vigas y columnas.

Tal vez la mayor economía se obtendrá con los miembros a tensión (sobre todo en aquellos sin agujeros para tornillos y remaches). Pueden producir ahorros considerables en vigas si las deflexiones no son de importancia o si éstas pueden controlarse (con los métodos descritos en capítulos posteriores). Además, pueden lograrse ahorros sustanciales con los aceros de alta resistencia en columnas robustas de longitudes corta y mediana. Otra fuente de ahorro lo proporciona la construcción híbrida. En este tipo de construcción se usan dos o más aceros de diferentes resistencias, empleando los aceros más débiles en donde los esfuerzos son menores, y los aceros más resistentes en donde los esfuerzos son mayores. (C. McCORMAC & F. CSERNAK, 2013, págs. 19-23)

Tabla 2

Especificaciones Aplicadas a la ASTM a Perfiles Estructurales

Tipo de acero	Designación de la ASTM	Esfuerzo mínimo de fluencia F_y (klb/plg ²)	Esfuerzo ^a de tensión F_u (klb/plg ²)	Serie de perfiles aplicables											
				W	M	S	HP	C	MC	L	HSS		Tubo		
											Rect.	Redondo			
Al carbono	A36	36	58-80 ^b	■	■	■	■	■	■	■	■				
	A53 Gr. B	35	60											■	
	A500	Gr. B	42	58										■	
			46	58									■		
		Gr. C	46	62										■	
	A501	Gr. A	36	58										■	
		Gr. B	50	70										■	
	A529 ^c	Gr. 50	50	65-100	■	■	■	■	■	■	■	■			
Gr. 55		55	70-100	■	■	■	■	■	■	■	■				
Baja aleación alta resistencia	A572	Gr. 42	42	60	■	■	■	■	■	■	■				
		Gr. 50	50	65 ^d				■	■	■	■				
		Gr. 55	55	55	■	■	■	■	■	■	■				
		Gr. 60 ^e	60	60	■	■	■	■	■	■	■				
		Gr. 65 ^e	65	65	■	■	■	■	■	■	■				
	A618 ^f	Gr. I & II	50 ^g	70 ^g										■	■
		Gr. III	50	50										■	■
	A913	50	50 ^h	60 ^h	■	■	■	■	■	■	■	■			
		60	60	75	■	■	■	■	■	■	■	■			
		65	65	80	■	■	■	■	■	■	■	■			
70		70	90	■	■	■	■	■	■	■	■				
A992	50	65 ⁱ	■	■	■	■	■	■	■	■					
Baja aleación alta resistencia resistente a la corrosión	A242	42 ^j	63 ^j	■	■	■	■	■	■	■	■				
		46 ^k	67 ^k					■	■	■	■				
		50 ^l	70 ^l	■	■	■	■	■	■	■	■				
	A588	50	70	■	■	■	■	■	■	■	■				
	A847	50	70										■	■	

■ = Especificación recomendada para el material
 ■ = Otra especificación de material aplicable, cuya disponibilidad deberá confirmarse antes de la especificación
 □ = La especificación de material no aplica

Nota. Lista de aceros con sus límites de fluencia y rotura ordenas según el tipo de acero según ASTM (C. McCORMAC & F. CSERNAK, 2013, pág. 20)

d) Propiedades generales de los aceros

Las siguientes características son comunes a todos los aceros:

Módulo de Elasticidad (E)	210.000 N/mm2
Módulo de Elasticidad Transversal (G)	81.000 N/mm2
Coefficiente de Poisson	0.3
Coefficiente de dilatación térmica	1.2 x 10 ⁻⁵ (°C) ⁻¹
Densidad	7850 kg/m3

G: Modulo de cizalladura

E: Modulo de elasticidad

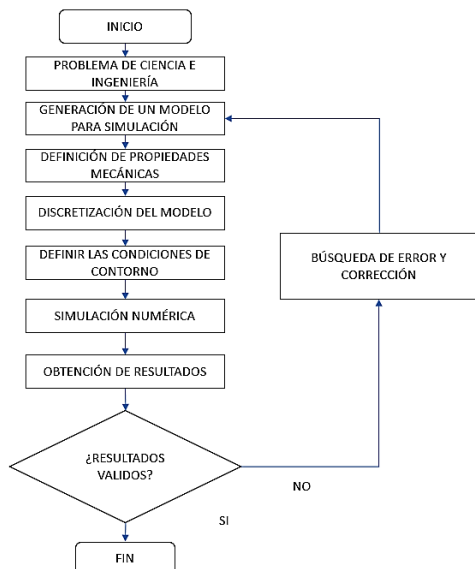
2.2.3 Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos es una técnica numérica para encontrar soluciones aproximadas de problemas en ciencia e ingeniería. Estos problemas se rigen por los tres componentes las cuales son las ecuaciones diferenciales, condiciones de contorno y geometrías.

El método comienza dividiendo el dominio del problema o la geometría en varios elementos pequeños. Estos elementos están conectados a través de nodos donde se deben determinar las incógnitas. Las ecuaciones de elementos finitos para cada elemento se derivan de las ecuaciones diferenciales gobernantes que describen la física. Estas ecuaciones de elementos finitos se ensamblan en un gran conjunto de ecuaciones algebraicas. Las condiciones de contorno se imponen al conjunto de ecuaciones algebraicas para resolver las soluciones en cada nodo. (Dechaumphai & Sucharitpwatskul, 2018)

Figura 13

Método de Elementos Finitos



Nota. Resumen del método de elementos finitos.

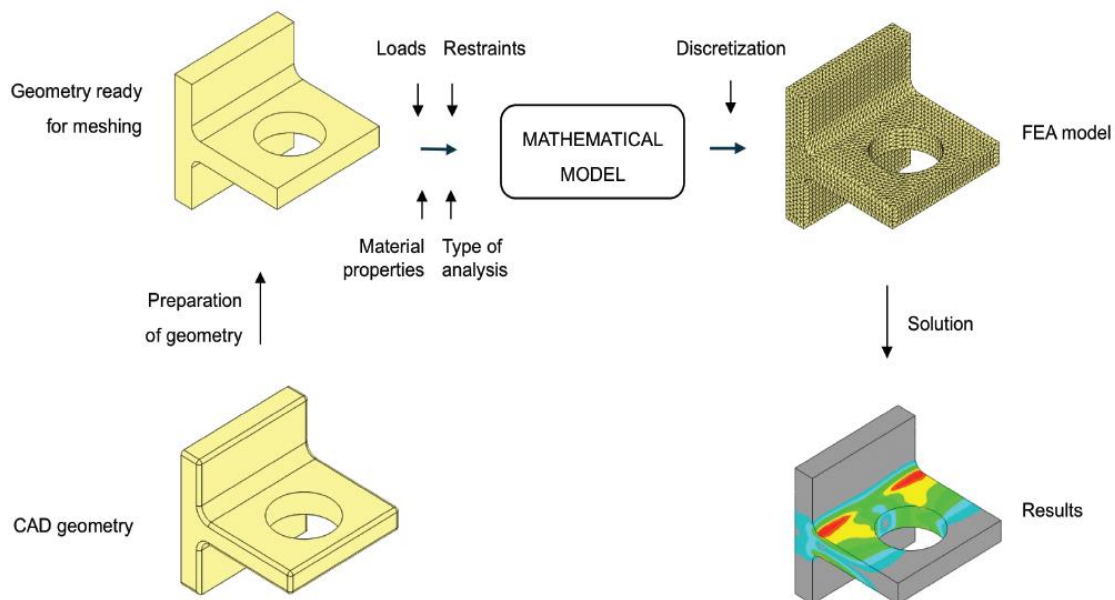
a) Procedimiento del método de elementos finitos

Kurowski, Paul M. en el libro "Finite Element Analysis for Design Engineers" define cuatro pasos para el análisis por elementos finitos

Para tener un modelo FEA (Modelo de elementos finitos) listo para proceder a solucionar y posteriores análisis de resultados, es necesario seguir una serie de procedimientos como se indica en la Figura 14. En cada paso se introducen pequeños errores que podrían distorsionar los resultados o generar singularidades.

Figura 14

Etapas de un Análisis de Elementos Finitos.



Nota. Se muestra un proceso lineal de la metodología de elementos finitos, en cada etapa se agregan elementos como: la preparación de la geometría, definir el tipo de análisis, asignación de cargas y materiales, discretización y los respectivos resultados. (Kurowski, 2017, pág. 12)

b) Paso 1: Generación de un modelo geométrico para simulación (Dominio).

Comenzamos con un modelo CAD que representa la geometría de la vida real. Supongamos que la geometría CAD está "limpia"; no hay errores de modelado CAD. Es necesario simplificar la geometría antes de mallar. La generación de un modelo geométrico para simulación específica casi siempre requiere simplificaciones que pueden tomar forma de idealizaciones (por ejemplo, usar líneas, usar superficies o curvas en lugar de volúmenes) y suprimir o eliminar detalles de la geometría que consideremos innecesarios

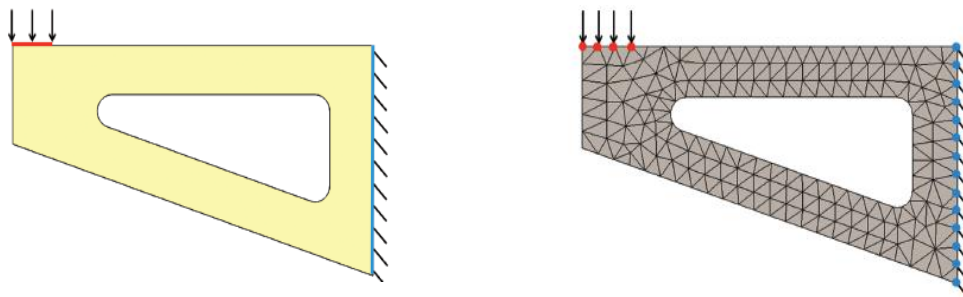
para el análisis, Esta geometría simplificada se denomina Dominio. Por ejemplo, la Figura 14 muestra que se han eliminado los chaflanes exteriores. Una geometría simplificada es la primera etapa de la construcción de un modelo matemático. La carga, las condiciones de contorno y las propiedades del material se aplican a esa geometría y se define el tipo de análisis. De esta forma se crea un modelo matemático. El paso 1 introduce errores de modelado. (Kurowski, 2017)

c) Paso 2: Discretización

Primero necesitamos dividir el dominio de la solución en subdominios de forma simple llamados elementos finitos, también denominado mallado. Tener en cuenta que la discretización se realiza tanto en la geometría como en las condiciones de contorno.

Figura 15

Modelo de elementos finitos de un soporte.



a) Modelo matematico.

b) Discretización

Nota. Un modelo de elementos finitos de un soporte definido en un dominio 2D donde se ha discretizado el dominio 2D y las condiciones de contorno. (Kurowski, 2017, pág. 12)

La geometría mallada de la Figura 15 -b es el resultado de la discretización, pero la discretización no se limita solo a la geometría. Todo en el modelo matemático originalmente continuo está discretizado; esto incluye masa, cargas y restricciones. Como se muestra en la Figura 15, las condiciones de contorno originalmente continuas (cargas y restricciones) ahora están representadas por cargas y restricciones aplicadas a los nodos del elemento. Este proceso de discretización introduce errores. (Kurowski, 2017)

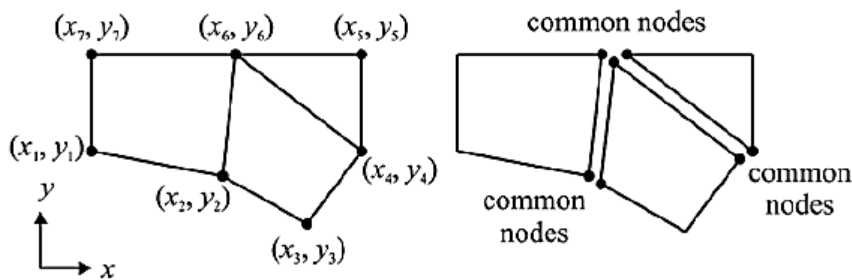
Para continuar con el proceso es necesario conocer los elementos de constitución de la malla y como interactúan entre ellas.

- **Nodos**

Como se muestra en la Figura 15, la transformación del problema práctico de ingeniería en una representación matemática se logra discretizando el dominio de interés en elementos (subdominios). Estos elementos están conectados entre sí por sus nodos "comunes" como se muestra en la Figura 16. Un nodo especifica la ubicación de las coordenadas en el espacio donde existen grados de libertad y acciones del problema físico. Las incógnitas nodales en el sistema de ecuaciones matriciales representan una (o más) de las variables de campo primarias. Las variables nodales asignadas a un elemento se denominan grados de libertad del elemento.

Figura 16

División del Dominio en Subdominios



Nota. Subdominio con nodos en común. (Madenci & Guven, 2015, pág. 3)

Los nodos comunes que se muestran en la Figura 16 proporcionan continuidad para las variables nodales (grados de libertad). Los grados de libertad (DOF) de un nodo vienen dictados por la naturaleza física del problema y el tipo de elemento. La Tabla 3 presenta la DOF (Degrees of freedom) y las "fuerzas" correspondientes utilizadas en FEA para diferentes problemas físicos.

Tabla 3*Grados de Libertad y Vectores de Carga en FEA*

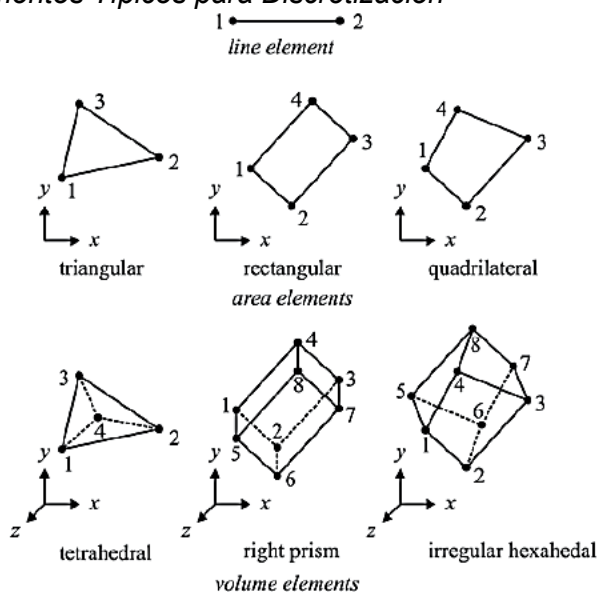
Disciplina	Grados de libertad (DOF)	Vector de Carga
Estructural / Solidos	Desplazamiento	Fuerzas mecánicas
Transferencia de calor	Temperatura	Flujo de calor
Fluido acústico	Desplazamiento Potencial	Velocidad de partículas
Fluidos en general	Velocidad	Flujos
Electroestática	Potencial eléctrico	Densidad de carga

Nota: Se muestra diferentes disciplinas de ingeniería que en lo se aplica FEA. (Madenci & Guven, 2015)

- **Elementos**

Dependiendo de la geometría y la naturaleza física del problema como se indicó en la Tabla 3, el dominio de interés puede discretizarse empleando elementos de línea, superficie o volumen. Algunos de los elementos comunes en FEA se muestran en la Figura 17. (Madenci & Guven, 2015)

Los elementos usados pueden ser lineales o de orden superior, dependiendo si existen nodos intermedios dentro del elemento. En base a la malla que construirá la matriz de rigidez del sistema.

Figura 17*Elementos Típicos para Discretización*

Nota. Elementos en forma de línea, área y volumen. (Madenci & Guven, 2015, pág. 4)

- **Calidad de malla**

Los resultados obtenidos en un análisis computacional por elementos finitos dependerán del tamaño de malla y del tipo de elementos usados. Lo que influyera en la calidad del modelo y la precisión de los resultados serán determinadas por calidad de la malla.

Por lo anterior expuesto, se define ciertos parámetros adimensionales con los que se puede conocer si la malla es apta para el cálculo o si debe ser mejorada.

La calidad de la malla puede variar según el estudio que se esté realizando.

Los parámetros más usados por el software ANSYS para evaluar la calidad de malla son:

a) Calidad de elemento (Element quality):

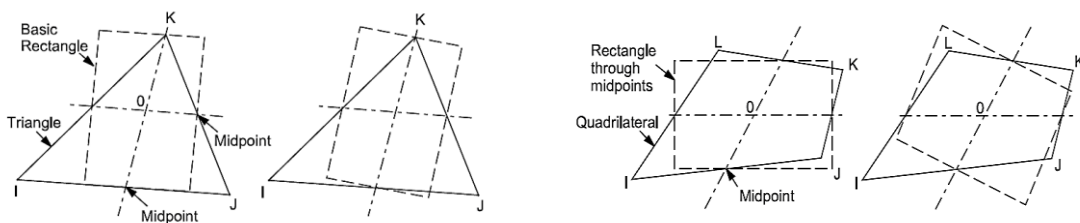
Proporciona una métrica de calidad que oscila entre 0 y 1, Un valor de 1 indica que el elemento o subdominio es un cubo o cuadrado perfecto mientras que un valor 0 o próximo a cero indica que un lado del triángulo o cuadrilátero presenta un alto grado de deformación. (ANSYS, 2015, pág. 129)

b) Relación de Aspecto (Aspect Ratio.)

Es la relación entre los lados de un cuadrilátero, se genera al trazar por los puntos medios de los lados de un elemento como se muestra en la figura 18 a) y b), ya sea un triángulo o cuadrilátero,

Figura 18

Relación de Aspecto.



a) Relación de aspecto en una malla triangular.

b) Relación de aspecto en una malla cuadrada.

Nota: Relación de aspecto en mallas triangulares y cuadradas. (ANSYS, 2015, pág. 30).

La relación de aspecto inicia de 1 en adelante, donde 1 es un cuadrado y 20 es rectángulo como se muestra en la Figura 19.

Figura 19

Relación de aspecto de un cuadrilátero.



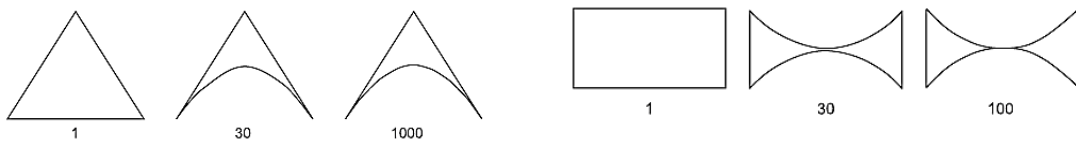
Nota: (ANSYS, 2015, pág. 30).

c) Relación Jacobiana (Jacobian Ratio)

La relación jacobiana se calcula y prueba para todos los elementos excepto los triángulos y tetraedros que son lineales (no tienen nodos en el medio) o (b) tienen nodos en el medio perfectamente centrados. Es una relación que indica el desnivel del punto medio de un lado de un elemento como muestra en la Figura 20. Una relación vuelve el modelo poco confiable. (ANSYS, 2015, págs. 31-32).

Figura 20

Relación Jacobiana



a) Relación de Jacobiana de un triángulo

b) Relación de Jacobiana de un cuadrilátero

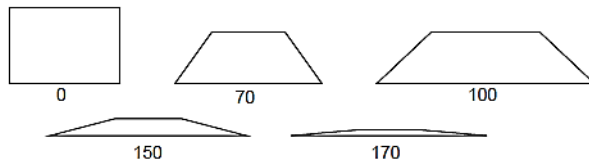
Nota. (ANSYS, 2015, págs. 31-32).

d) Desviación Paralela (Parallel Deviation)

El ángulo formado por las aristas opuestas de un cuadrilátero indica la desviación paralela como muestra en la Figura 21.

Figura 21

Desviación paralela.



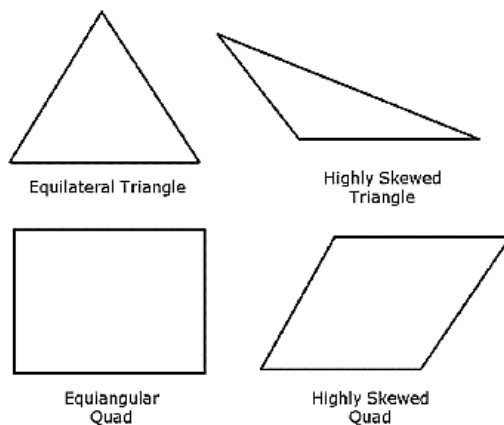
Nota: Mientras mayor el ángulo formado mayor será este parámetro. (ANSYS, 2015, pág. 35).

e) Asimetría (Skewness.)

La asimetría es una de las principales medidas de calidad de una malla. La asimetría determina qué tan cerca del ideal (es decir, equilátero o equiángulo) está una cara o celda

Figura 22

Asimetría u oblicuidad.



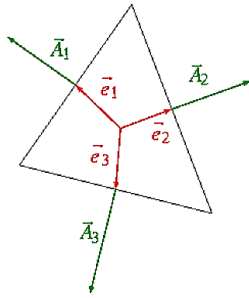
Nota: Los parámetros de asimetría van de 0 donde es un cuadrado o triángulo equilátero hasta 1 donde la figura se encuentra degenerada completamente. (ANSYS, 2015, pág. 32).

f) Calidad ortogonal (Orthogonal quality)

Es el producto escalar entre dos vectores, vector perpendicular a la arista del elemento y un vector desde el centroide de la cara al centroide de la arista. Este producto permite determinar en coseno del ángulo entre ellos, siendo este el parámetro de calidad ortogonal.

Figura 23

Calidad ortogonal.



Nota: La calidad ortogonal está determinada por el coseno del ángulo que forman entonces los parámetros van de 1 lo ideal a 0 lo peor. (ANSYS, 2015, págs. 39-40).

Para una mayor lectura de sobre la calidad de malla y los parámetros que conlleva, revisar la ANSYS Meshing User's Guide del 2015.

d) Paso 3: Solución

Las ecuaciones de FEA se resuelven en este paso; esto introduce un error de solución, también llamado error numérico o error de redondeo. (Kurowski, 2017)

- **Ecuaciones de elementos finitos**

Del número infinito de conjuntos de desplazamientos nodales que permiten las restricciones, solo un conjunto de desplazamientos nodales minimiza la energía potencial total del modelo. Este estado de energía potencial total mínima corresponde al estado de equilibrio. Por lo tanto, al encontrar el conjunto de desplazamientos nodales que minimiza la energía potencial total del modelo, podemos encontrar un estado de equilibrio del modelo bajo las cargas y restricciones aplicadas. La aplicación del principio de la energía potencial total mínima conduce a la formulación de las ecuaciones fundamentales FEA:

Las ecuaciones de elementos finitos se escriben en forma matricial como.

$$[K] * [d] = [F] \quad (20)$$

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez conocida, $[F]$ es el vector conocido de cargas nodales y $[d]$ es el vector desconocido de desplazamientos nodales.

La matriz de rigidez $[K]$ es una función de la geometría del modelo, las propiedades del material y las condiciones de contorno de desplazamiento, comúnmente llamadas restricciones. (Kurowski, 2017, pág. 13)

e) Paso 4: Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos en el paso 3 ahora se utilizan para tomar una decisión de diseño. Si los resultados se malinterpretan, entonces se introduce el error de interpretación de los resultados. Los errores de modelado, los errores de discretización y los errores de solución son inevitables; el error de interpretación de los resultados es, por supuesto, totalmente prevenible. (Kurowski, 2017)

- **Análisis de singularidades**

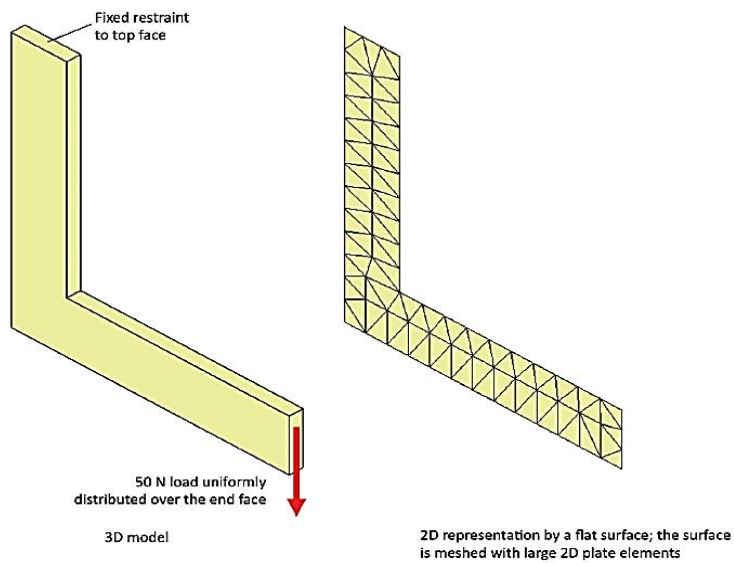
Para evaluar las singularidades se tomará como referencia, el análisis de no convergencia del libro "Finite Element análisis for desingn Engineers" de Paul M. kurowski en las páginas 51-54. donde:

Se modela un soporte, como un problema de esfuerzo en un plano 2D y se genera la malla con un tamaño de elementos h , el material es aluminio 1060 con límite de fluencia de 27.6MPa. Se restringe los movimientos en la parte superior del soporte L y se aplica una carga de 50N en borde inferior como se observa en la Figura 24.

Para el análisis de malla se redujo el tamaño de elemento (h) por refinamiento de malla global comenzando con un tamaño de elemento 8mm, el cual se dividirá por la mitad hasta llegar a los 0.25mm en la última interacción.

Figura 24

Discretización de un soporte L con elementos 2D.

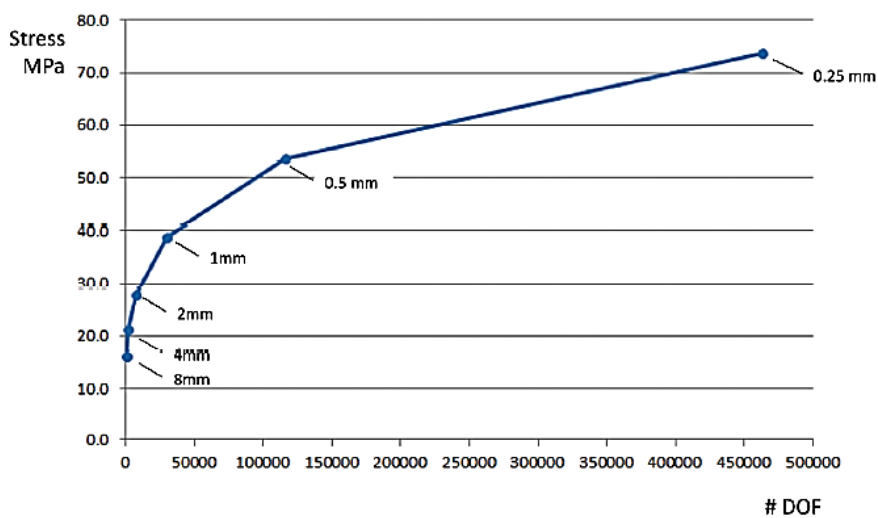


Nota. Soporte en L delgado, puede representarse mediante una superficie plana y mallarse con elementos de placa 2D. La malla que se muestra tiene un tamaño de 8mm. (Kurowski, 2017)

Los resultados del análisis indican que el modelo analizado no presenta convergencia en el esfuerzo máximo Como se muestra en la Figura 23, donde se fue reduciendo el tamaño del elemento de manera global para desarrollar el análisis de convergencia. La razón es que el modelo matemático no ofrece una solución para la tensión máxima. La esquina presenta una singularidad donde la tensión es infinita.

Figura 25

Divergencia del Esfuerzo Máximo.



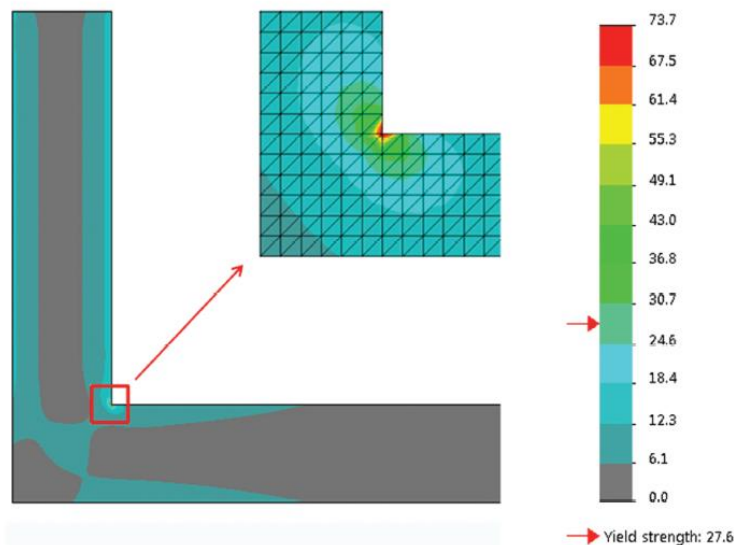
Nota. La tensión máxima de von mises (ubicada en el borde agudo de reentrada) en función del tamaño de elementos 8,4,2,1, 0.5, 0.25mm. (Kurowski, 2017)

La singularidad de la tensión en el modelo es causada por una esquina afilada en 90°, pero cualquier esquina reentrante en un modelo 2D o 3D produce singularidad de tensión. Para notar estas singularidades se requiere un refinamiento de malla más agresivo. (Kurowski, 2017)

Al mostrar la divergencia de los datos de interés (aquí el estrés máximo de von Mises), el proceso de convergencia reveló el error de modelado. Podemos remediar esta situación usando un modelo matemático diferente, uno que no tenga una singularidad de estrés. La forma más obvia es modelar un filete, que siempre está presente en una parte real incluso si el borde es muy afilado. El resultado puede mostrar un estrés muy alto, pero ese resultado será acotado; convergerá a un valor finito.

Figura 26

Tensión máxima del Soporte L



Nota. Tensión máxima 73.7Mpa de von mises con tamaño de elemento 0.25mm

Otra forma de eliminar la singularidad de la tensión es utilizar un modelo capaz de modelar la plasticidad. Lo implicaría materiales no lineales.

Para mayor información sobre singularidades continuar con las lecturas del libro “Finite Element análisis for desingn Engineers” de Paul M. kurowski en las páginas 55-60.

2.2.4 Criterios de diseño.

La norma brasileña NBR-8883 establece tres casos de carga para el diseño de compuertas. Según la frecuencia de ocurrencia, la naturaleza de las cargas y la probabilidad que suceda.

a) Caso de carga normal

Considera los valores y combinaciones más desfavorables de las cargas hidrostáticas a niveles normales de agua (incluida la influencia de olas), efectos hidrodinámicos, fuerzas de fricción, peso muerto, flotabilidad, cargas de tránsito y fuerzas motrices.

b) Caso de carga ocasional

Se consideran las cargas que ocurren con menor frecuencia, tales como:

- ✓ Fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas en niveles de agua inusuales.
- ✓ Cargas de viento
- ✓ Efectos de temperatura
- ✓ Fricción de los barcos
- ✓ Presión e impactos del hielo

c) Caso de carga excepcional

Se considera casos de cargas excepcionales las cargas que se producen durante el transporte, montaje, servicios de mantenimiento u otros casos excepcionales como los siguientes:

- ✓ Efectos hidrodinámicos y sobrecargas debidas a las fuerzas motrices en caso de rotura del revestimiento o de la compuerta
- ✓ Cargas asimétricas y sobrecargas debidas a las fuerzas motrices provocadas por el atascamiento de cuerpos extraños o daños en los cojinetes, rodillos o bisagras.
- ✓ Impactos de barcos

- ✓ Efectos sísmicos
- ✓ Cambio en las condiciones de soporte.

La ocurrencia simultanea de estas cargas y niveles de agua, así como las combinaciones solo debe considerarse cuando sea posible y probable.

En las puertas de cierre por gravedad, se deberá probar la preponderancia de las fuerzas de cierre con un margen de 20%, para el caso de carga normal, y del 15% para el excepcional. (Erbisti, Design of Hydraulic Gates, 2014)

a) Consideraciones de las cargas en las compuertas

La consideración de cargas, como las direcciones del viento, efectos térmicos, cargas debido a las olas y otras ya mencionadas, dependen de la naturaleza de la compuerta, esto implica condiciones ambientales y operacionales.

La dirección del viento se debe suponer que actúa horizontalmente. La superficie expuesta al viento debe ser la resultante de una proyección paralela sobre un plano vertical a la dirección del viento. La presión del viento siempre que se prescriban condiciones más desfavorables, se considera como:

- ✓ Para compuertas en movimientos, igual a 500N/mm^2
- ✓ Para compuertas en reposo, igual a 1000N/mm^2

Los efectos térmicos. Si no se prescriben condiciones más desfavorables, se deben considerar las siguientes fluctuaciones de temperatura.

- ✓ Para compuertas levantadas fuera del agua temporalmente en su totalidad o durante mayor parte del tiempo $\pm 30^\circ\text{C}$
- ✓ Para compuertas sumergidas la mayor parte del tiempo o levantadas fuera del agua en un ambiente protegido de grandes variaciones de temperatura se considera $\pm 20^\circ\text{C}$.
- ✓ Para compuertas sumergidas completamente se considera $\pm 10^\circ\text{C}$.

Las cargas debido a las olas se consideran de acuerdo a las condiciones locales.

Las cargas resultantes debido a lo asentamiento diferenciales de la cimentación y desplazamiento de la estructura del hormigón deben ser consideradas para el diseño de la compuerta.

La influencia sísmica se tiene en cuenta en el diseño con su efecto simulando como una fuerza horizontal de magnitud igual a la masa de la compuerta multiplicada por la aceleración sísmica horizontal en la región. Se debe investigar la posible ocurrencia de los fenómenos de resonancia y sus efectos.

La influencia de la presión y el impacto del hielo se considera de acuerdo con las condiciones locales. (Erbisti, Design of Hydraulic Gates, 2014, págs. 117-119)

b) Tensiones admisibles

Los esfuerzos permisibles se determinan de acuerdo con el límite elástico del material (Limite de fluencia) y las condiciones de carga.

Para los elementos estructurales, los esfuerzos admisibles corresponden al límite de fluencia multiplicado por los coeficientes de la tabla 4

Tabla 4

Coefficientes para Esfuerzos admisibles. Elementos Estructurales.

TIPO DE ESTRÉS	CASO DE CARGA		
	Normal	Ocasional	Excepcional
Esfuerzo Tensión y Flexión	0.68	0.76	0.89
Esfuerzo de flexión si se requiere una prueba de estabilidad	0.59	0.68	0.79
Esfuerzo de Corte	0.39	0.44	0.51
Esfuerzo Combinado	0.76	0.82	0.92
Esfuerzo Combinados en la Placa de la superficie	0.87	0.87	0.97

Nota. Se evaluará los factores de seguridad con los datos de la tabla. (Erbisti, Design of Hydraulic Gates, 2014, pág. 119)

En febrero de 1996 fue revisada y actualizada la norma brasileña NBR-8883 Cálculo de Compuertas Hidráulicas. La modificación más importante ocurrió con las tensiones permitidas para los elementos estructurales. En su versión original de 1985 se

establecían límites para las tensiones resultantes en el eje principal, paralelamente a una comprobación de las tensiones combinadas. Sin embargo, según la teoría de Hencky-von Mises, en un estado de tensiones múltiples es suficiente comprobar las tensiones combinadas en el punto, incluso en el caso en que las tensiones resultantes en cada eje principal alcancen valores elevados. Basado en este concepto, se han eliminado los límites para la tensión axial resultante. (Erbisti, Design of Hydraulic Gates, 2014).

Para un mayor detalle sobre el diseño de compuertas se recomienda revisar el libro “Design of Hydraulic Gates” de Paolo C:F Erbisti.

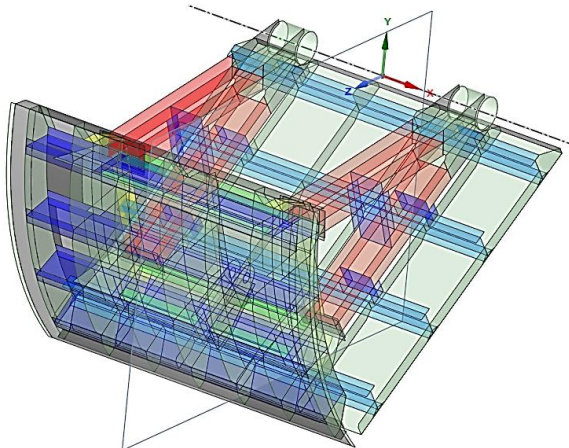
En el desarrollo de la tesis se usará el concepto de tensión equivalente con el criterio de Von Mises. El análisis general de la estructura se realizará utilizando el método por elementos finitos, por lo que es necesario determinar los esfuerzos permisibles máximos. Los resultados de esfuerzos mostrados son el **Esfuerzo Equivalente por Von Mises** donde resuelven los **esfuerzos normales y cortantes (Tracción, Flexión, Torsión y Corte)** para cualquier punto del dominio.

c) Modelo analítico de una compuerta radial

El refuerzo de la placa de revestimiento se realiza con la ayuda de vigas y rigidizadores horizontales y verticales como se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Compuerta Radial.



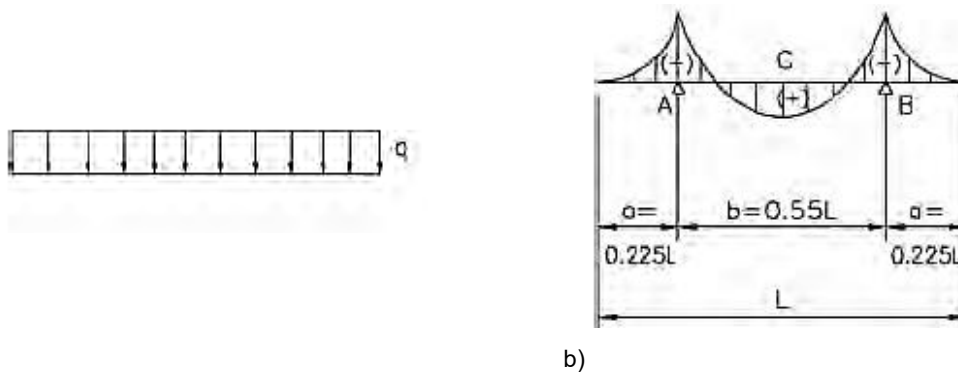
Nota. Compuerta radial constituida por vigas, láminas de diferentes espesores y rigidizares.

Las vigas horizontales esta distribuidos con espaciamento variable en toda la placa de revestimiento, para que todas estén sometidas a la misma parte del empuje del agua, lo que facilita mucho su dimensionamiento y fabricación.

Las vigas horizontales pueden modelarse como viga en flexión, con dos puntos rígidos A y B como se muestra en la Figura 28-a). Donde esta sometidos a una presión constante.

Figura 28

Comportamiento de una viga horizontal en una compuerta radial.

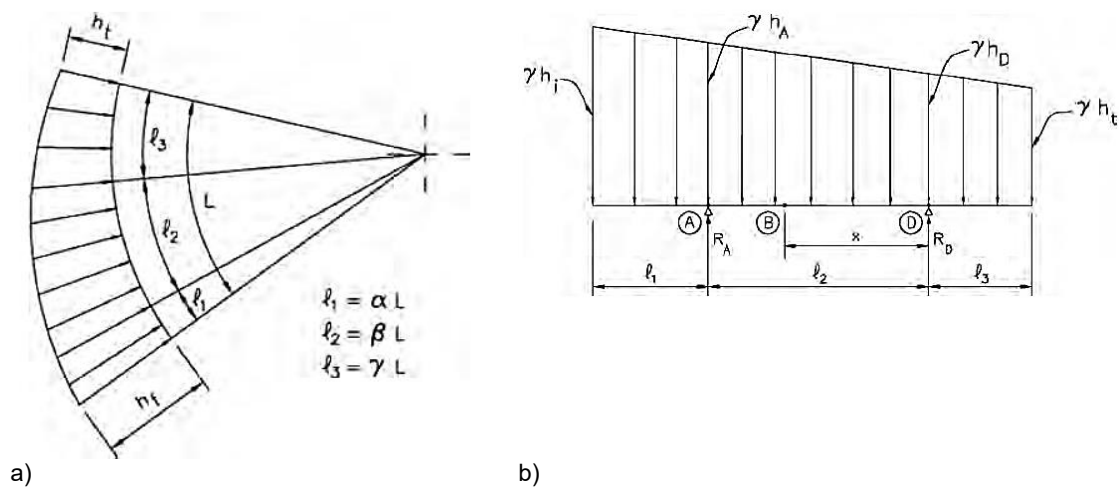


Nota: Modelo analítico de una viga horizontal en una compuerta radial. (Erbisti, Design of Hydraulic Gates, 2014, pág. 141).

Las vigas verticales pueden modelarse con la presión variable según la altura y con dos puntos rígidos A y D como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Comportamiento de una viga vertical en una compuerta radial.



Nota: Modelo analítico de una viga vertical en una compuerta radial (Erbisti, Design of Hydraulic Gates, 2014, págs. 143-145).

Para calculo y diseño analítico de una compuerta segmento puede evaluar el libro “Desing of Hydraulic Gates de Paulo Erbisti del año 2004” entre las páginas 133 hasta 148. Para el desarrollo de esta tesis solo necesitamos saber cómo se comportarán estas estructuras, puesto que se usarán estos principios para el análisis por elementos finitos. Si bien el modelo analítico presentado por el autor de este libro reduce a modelos no complejos con dos puntos rígidos tanto en las vigas horizontales como verticales, es importante destacar que un modelo conjunto no se comporta de tal manera.

d) Norma técnica E.030 Diseño Sismorresistente

Esta norma establece las condiciones mínimas para que las edificaciones deseadas tengas un comportamiento sísmico con el fin de evitar pérdidas de vidas humanas, aseguramiento de la continuidad de los servicios básicos y minimizar los daños a la propiedad. (Ministerio de Vivienda, Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente, 2014)

En la figura 30. Se muestra el mapa sísmico del Perú. A cada zona se le asigna un factor Z según en la Tabla 5. Este factor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. El factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad. (Ministerio de Vivienda, Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente, 2014, pág. 21)

Para el desarrollo de la tesis, necesitamos identificar la zona sísmica. La presa está ubicada en el departamento de Huancavelica, departamento de Tayacaja y distrito de Colcabamba. Correspondiente a la zona sísmica 2. Y se considera el valor máximo indicados en la Tabla 5.

Tabla 5
Factores de Zona “Z”

ZONA	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Nota. El valor de Z se expresa como fracción de la aceleración de la gravedad. (Ministerio de Vivienda, Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente, 2014, pág. 5)

Figura 30
Zonas Sísmicas



Nota: Zonas del Perú con su factor Z (Ministerio de Vivienda, Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente, 2014, pág. 5)

e) Norma E.020 - Cargas

Las edificaciones y todas sus partes deberán ser capaces de resistir las cargas que se les imponga como consecuencia de su uso previsto. Estas actuarán en las combinaciones prescritas y no deben causar esfuerzos ni deformaciones que excedan los señalados para cada material estructural en su norma de diseño específica.

Carga: Fuerza u otras acciones que resulten del peso de los materiales de construcción, ocupantes y sus pertenencias, efectos del medio ambiente, movimientos diferenciales y cambios dimensionales restringidos.

Carga Muerta. - Es el peso de los materiales, dispositivos de servicio, equipos, tabiques y otros elementos soportados por la edificación, incluyendo su peso propio, que se propone sean permanentes o con una variación en su magnitud, pequeña en el tiempo.

Carga Viva. - Es el peso de todos los ocupantes, materiales, equipos, muebles y otros elementos movibles soportados por la edificación. (Ministerio de Vivienda, Norma Técnica E.020, 2006, pág. 1)

Combinación de cargas del método ASD (Método por esfuerzos permisibles).

- (1) D
- (2) D + L
- (3) D + (W o 0,70 E)
- (4) D + T
- (5) α [D + L + (W o 0,70 E)]
- (6) α [D + L + T]
- (7) α [D + (W o 0,70 E) + T]
- (8) α [D + L + (W o 0,70 E) + T]

Donde:

D = Carga muerta, según Capítulo 2.

L = Carga viva, Capítulo 3.

W = Carga de viento, según Artículo 12.

E = Carga de sismo, según NTE E.030 Diseño de Sismorresistente.

T = Acciones por cambios de temperatura, contracciones y/o deformaciones diferidas en los materiales componentes, asentamientos de apoyos o combinaciones de todos ellos.

α = Factor que tendrá un valor mínimo de 0.75 para las combinaciones (5), (6) y (7); y de 0.67 para la combinación (8). En estos casos no se permitirá un aumento de los esfuerzos admisibles. (Ministerio de Vivienda, Norma Técnica E.020, 2006, págs. 14-15)

Capítulo III. Desarrollo de la Tesis

3.1 Compuerta Radial.

La compuerta radial es de tipo segmentó sumergida, diseñada para soportar carga hidráulica constante, fabricada en el año 1969 y posiblemente diseñada ese mismo año.

Tabla 6

Compuerta Radial

Fabricante	Riva Calzoni
Tipo	Compuerta Radial
Año de Fabricación	1969
Ancho [m]	4
Alto [m]	2.5
Radio [m]	4
Espesor Nominal del Tablero [mm]	20
Equipo de maniobra	1 cilindro hidráulico
Tiempo de abertura total	4
Tiempo de cierre total	3 a 5

Nota: Se detalla las características principales de la compuerta radial.

3.2 Material de la compuerta radial

La estructura fue construida en el año 1969, los aceros que se usaron en su fabricación fueron denominados por la norma UNI italiana de aquellos años; si bien la norma italiana ha modifica las denominaciones del acero conforme el paso del tiempo. Para la determinación de las propiedades mecánicas de los aceros que constituyen la compuerta, se realizó una investigación sobre los aceros usados entre los años 1960-1970 en Italia, baja la norma UNI.

Para el desarrollo de la tesis es necesario conocer el material y sus propiedades mecánicas. Para lo cual se evaluó el plano de ingeniería denominado "78665-Primera

Etapa-Compuerta de Sector dimensiones 4x250 para desagüe del alivio cuatro” otorgado por Electroperú S.A.C ubicada en el ANEXO B y ANEXO C.

Según los planos, la estructura está constituida por los siguientes aceros:

Tabla 7

Materiales de Fabricación de la Compuerta

Aceros	Estructura
Aq 42 UNI 815	Láminas de la compuerta
A37 UNI 743	Refuerzos internos (Platinas de refuerzo, cartelas). Perfiles IPE 330 Perfiles IPE 400
Fe 52 D UNI 5335	Estructura de refuerzo de Brazo.
Fe 42 C	Perfiles IHEB 400 Perfiles IPE 400

Nota. Resumen de materiales en la estructura de la compuerta radial.

3.2.1 Aceros usados en la fabricación de la compuerta.

De los aceros originales se buscó sus propiedades mecánicas principales, como el límite de fluencia, resistencia a la tracción y alargamiento. Las cuáles serán cargadas al Ansys y asignados según corresponda.

- **Acero Fe42C**

Limite elástico: 225MPa
Resistencia a la tracción: 412-490Mpa
Alargamiento: 22-23%

Referencia: UNI 5334: 1964 / Aceros para uso general en productos laminados en caliente - Secciones, barras y laminas. Espesores de 16 a 40mm. Para una temperatura 0-30°C

- **Acero Aq42**

Limite elástico: 235 MPa
Resistencia a la tracción: 412-490Mpa
Alargamiento: 21-27%

Referencia: UN 3965: 1957 / Acero en productos laminados en caliente - Placas con espesor $\geq 4,76$ mm para uso en calderas de vapor y en recipientes a presión. Para una temperatura 0-30°C

- **Acero Fe52D**

Limite elástico:	333-353 MPa
Resistencia a la tracción:	510-608 MPa
Alargamiento:	21-22%

Referencia: UNI 5334: 1964 / Aceros para uso general en productos laminados en caliente - Secciones, barras y laminas. Espesores de 16 a 40mm. Para una temperatura 0-30°C

- **Acero A37 UNI 743**

Para este acero no se encontró información de las propiedades mecánicas.

Para el análisis se consideró con las mismas características del acero Aq42.

Limite elástico:	235 MPa
Resistencia a la tracción:	412-490MPa
Alargamiento:	21-27%

Las propiedades mecánicas fueron sacadas del portal web <https://portal.totalmateria.com>, que presenta un base de datos extensa en propiedades del metal, polímeros, cerámicos y materiales compuestos.

3.3 Dominio.

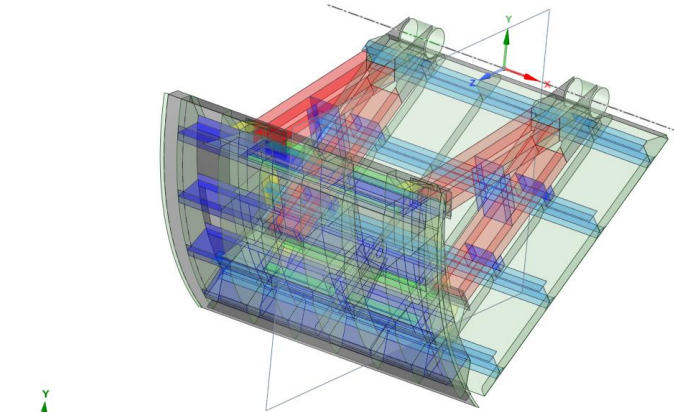
Se diseña un modelo CAD en 3D acorde a los detalles del plano de ingeniería (ANEXO 1), desarrollado en el software **Autodesk Inventor 2021**. Este modelo CAD fue exportado a SpaceClaim (Herramienta del Ansys) donde la geometría será preparada para su análisis y su correspondiente discretización.

La compuerta radial se considerará simétrica respecto al plano YZ con el objetivo de reducir el número de elementos y nodos, posteriormente se aplicará una condición de

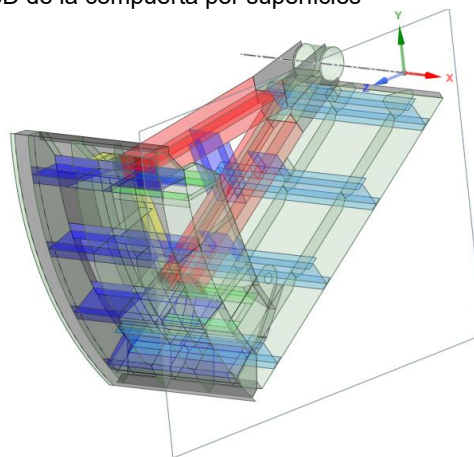
simetría en el modelo de análisis respecto al plano YZ. El dominio de la compuerta radial será la mitad, dividida por el plano YZ como se muestra en la Figura 31-b.

Figura 31

Dominio de la compuerta Radial.



a) Modelo 3D de la compuerta por superficies



b) Compuerta dividida por el plano YZ

Nota: a) La compuerta modelada en SpaceClaim por superficies medias para la generación del dominio. b) La compuerta se considera simétrica. El dominio será la mitad, estando dividida por el plano YZ.

3.3.1 Preparación de la geometría

La compuerta radial está constituida por planchas de diferentes espesores y vigas de diferentes secciones. Para la generación del dominio se tomó en cuenta el gasto computacional (Cantidad de nodos y cantidad de elementos), las conexiones (La representación de diferentes tipos de uniones soldadas y empernadas entre planchas y vigas) y las Inconsistencias presentadas en la solución.

Para el modelo de la compuerta radial se evaluó tres maneras de discretizar.

a) Primero: Estructura 3D- Solido.

Este primero método no se tomó en cuenta debido a que superaría fácilmente el número de nodos y/o elementos permitidos por Ansys Student, puesto que es una estructura compleja de grandes dimensiones, estos detalles pueden ser revisados en el ANEXO 1.

El número nodos y/o elementos permitidos por Ansys Student.

- Análisis Estructural: 128k nodos / elementos.
- Análisis de fluidos :512k nodos / elementos

b) Segundo: Metodología de superficies.

Esta metodología se adapta más a la estructura puesto que en su mayoría está construido por láminas de diferentes espesores que van desde los 6 mm hasta los 80mm. Las vigas de refuerzo interno y de los brazos también se puede representar con láminas con sus respectivos espesores del Alma y Patín.

El gasto computacional se reduce, puesto que se trabajará con superficies medias en la mayoría de láminas de la compuerta y las conexiones entre ella serán un segmento de línea. En esta metodología el espesor es una propiedad intrínseca de la superficie.

c) Tercero: Metodología por Segmentos y Superficies

El análisis 1D por segmentos de línea generalmente se usa solo para estructuras metálicas conformadas únicamente por perfiles de diferentes secciones. Puesto que son líneas que convergen entre ellas o se hace que convergen entre ellas para poder modelar. SpaceClaim presenta una herramienta que permite extraer las secciones de las vigas y representarlos por un segmento de línea conservando sus propiedades geométricas como longitud, sección, momentos de Inercia de cada una de estas. Si bien para cálculos de estructuras metálicas no se modelan las uniones, para el análisis por elementos finitos; ya

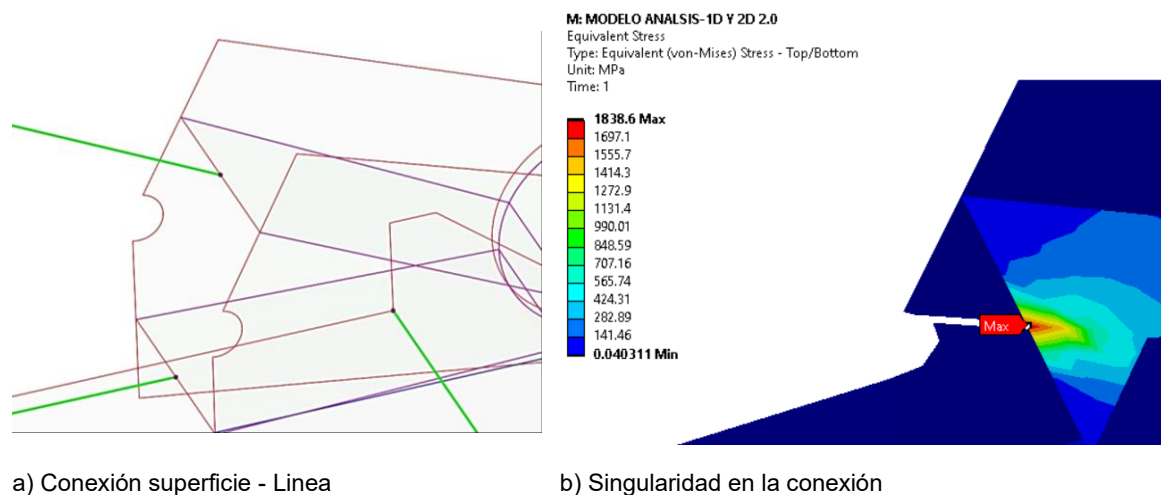
sean estas soldadas, empernadas y con cartelas de refuerzo; simplemente se representan por segmentos de línea y segmentos curvos teniendo como unión un punto.

La Figura 32-a) muestra la unión de la viga HEB 400 del brazo representada por un segmento de color verde conectada al punto medio de la superficie de refuerzo del origen. Este tipo de uniones genera singularidades puesto que concentran esfuerzos en un punto, como se muestra en la Figura 32-b) y además no representan la distribución de esfuerzos entre la unión de la geometría de origen y el perfil HEB 400

Con este modelo Superficie-líneas la Carga computacional es inferior a la metodología de superficies puesto que se discretizan líneas y no superficies, si bien tiene beneficios al momento de analizar perfiles (vigas y columnas), el cual permite obtener diagramas de momento flector (bendig momento) y diagramas de fuerza.

El análisis de la compuerta se realizó por el segundo método (superficies) y por el tercer método (superficies y segmentos). Descartando este último por las singularidades que se presentaba en los nodos de conexión entre superficie y línea.

Figura 32
Singularidad en la unión Línea de viga y Superficie



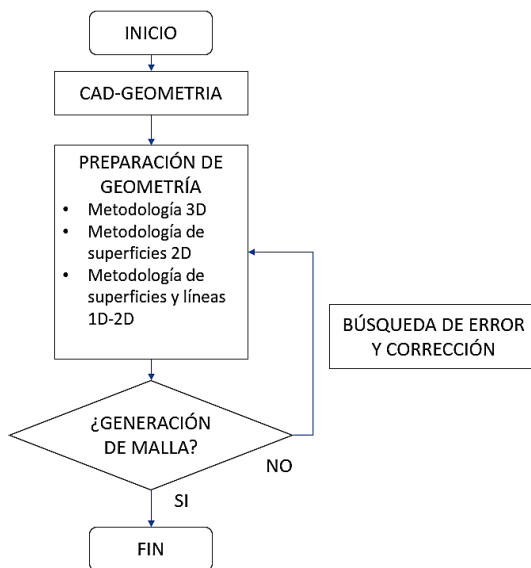
Nota: En la figura a). La viga HEB 400 representada por el segmento de color verde unida a una superficie. En la Figura b) se muestra la singularidad producida por este tipo de uniones. Tamaño de elementos global de 40mm (Nodos: 25216, Elementos:24543).

3.3.2 Análisis de la geometría para el mallado.

En la Figura 33 presenta un esquema donde está el procedimiento de mallado que siguió, inicia con la geometría CAD y posterior la preparación de ella para generar el dominio a discretizar. Donde influye los tipos de elementos que se usaran para la generación del dominio.

Figura 33

Procedimiento de mallado para la compuerta.



Nota. Análisis cíclico de procedimiento de mallado del dominio. Se evalúa si la malla generada representa al modelo que analizamos.

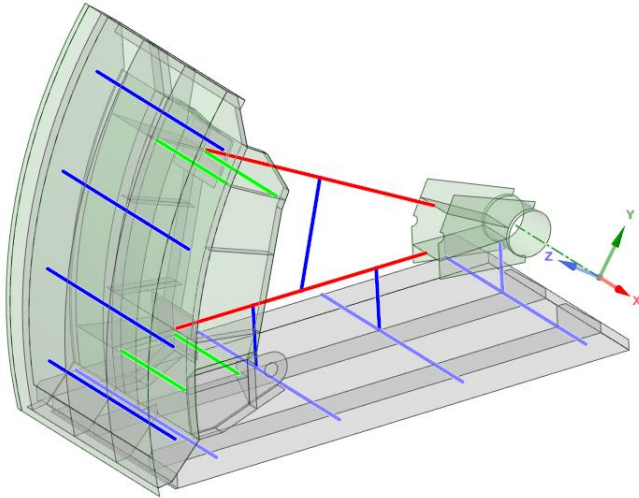
a) Dominio por segmentos y superficies.

SpaceClaim permite convertir las vigas en segmento almacenado sus características geométricas como el área de la sección (A_o), momentos de inercia (I_{xx}) y longitud. (L). En las láminas permite extraer las superficies medias, exteriores e interiores, almacenado su espesor como una característica intrínseca.

En la Figura 34 se muestra el dominio de la compuerta radial modelada con segmentos y superficies, cada color indica una viga diferente conectada a una superficie.

Figura 34

Estructura constituida por Segmentos y Superficies.



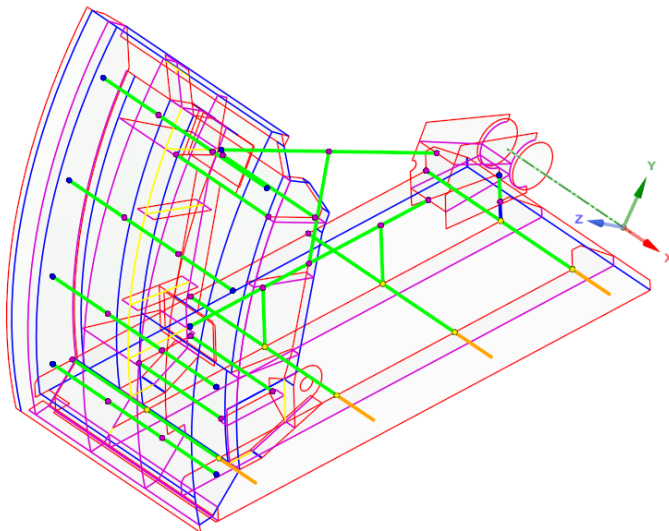
Nota. Preparación del dominio para el mallado, superficies con sus respectivos espesores y vigas con sus características geometrías correspondientes.

Rojo: HEB 400 Azul: IPE 400 Celeste: IPE 330 Verde: ½ IPE 300

Se continúa vinculando las superficies y segmentos. Esto permite la continuidad de esfuerzos y deformaciones en toda la estructura, en la figura 35 se muestra este proceso.

Figura 35

Vinculación del dominio.



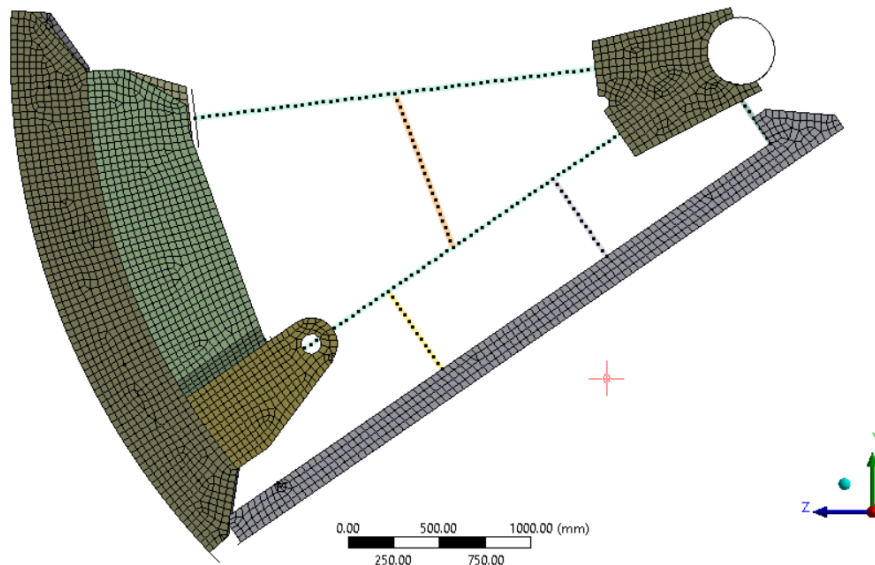
Nota Los segmentos de las uniones entre superficies son representados por diferentes colores según el número de superficies que converjan a un segmento

Solo: Rojo Doble: Azul Triple: Morado Múltiple: Amarillo

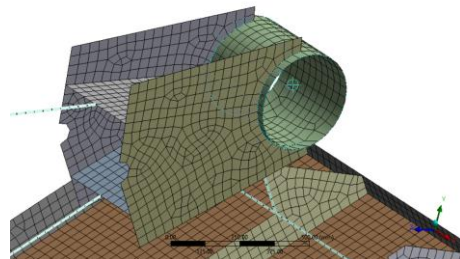
Finalmente se genera la malla como se muestra en la Figura 36, los elementos son de tipo rectangular en todas las superficies. Este tipo de elementos representa mejor las superficies al discretizar.

Figura 36

Malla en el dominio de superficies y segmentos



a) Discretización de la geometría.



b) Conexión entre la viga HEB400 y la superficie

Nota. Malla generada con un tamaño de elemento global de 40mm (Nodos 25216, Elementos: 24543).

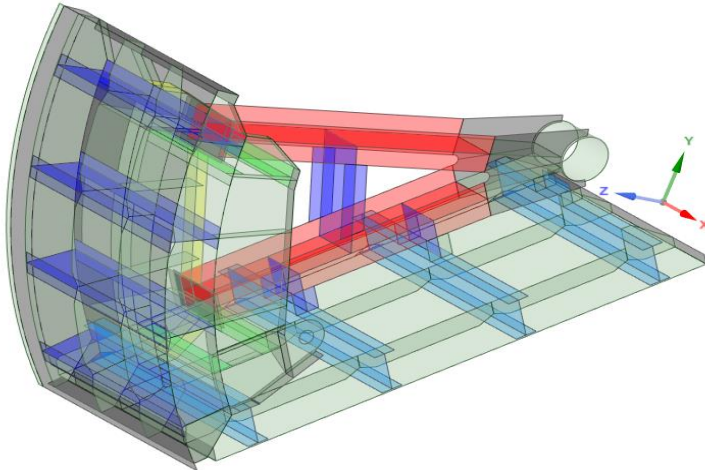
b) Geometría preparada Superficies -2D

Las vigas se representarán por superficies medias, este proceso incrementa el número de elementos. En la figura 36 se muestra la conexión del perfil HEB 400 con el origen de la compuerta; los patines y el alma de la compuerta conectan con las superficies de origen, permitiendo una continuidad en los esfuerzos y deformaciones evitando de esta manera la generación de singularidades en las conexiones. Este tipo de uniones se realizó en toda la estructura de la compuerta.

En la Figura 37 se muestra el dominio de la compuerta radial modelada solo con superficies, cada color de superficie indica una viga diferente.

Figura 37

Estructura Constituida por Superficies.



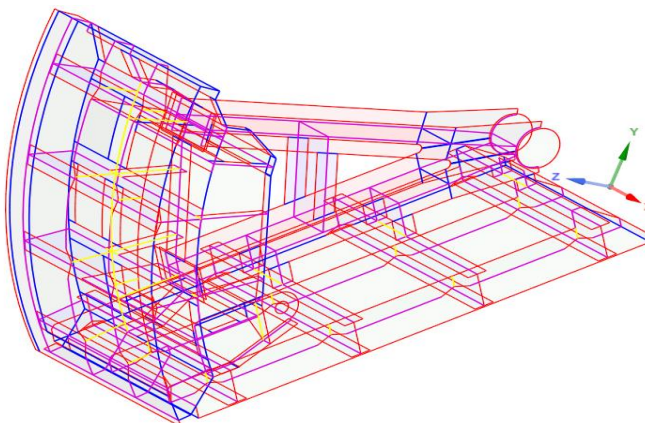
Nota. Preparación del dominio para el mallado, superficies con sus respectivos espesores.

Rojo: HEB 400 Azul: IPE 400 Celeste: IPE 330 Verde: ½ IPE 300

Las superficies que representan las vigas fueron representadas con los mismos patrones de colores. Se continúa vinculando las superficies. Permitirá la continuidad de esfuerzos y deformaciones en toda la estructura, en la figura 38 se muestra este proceso.

Figura 38

Vinculación del Dominio



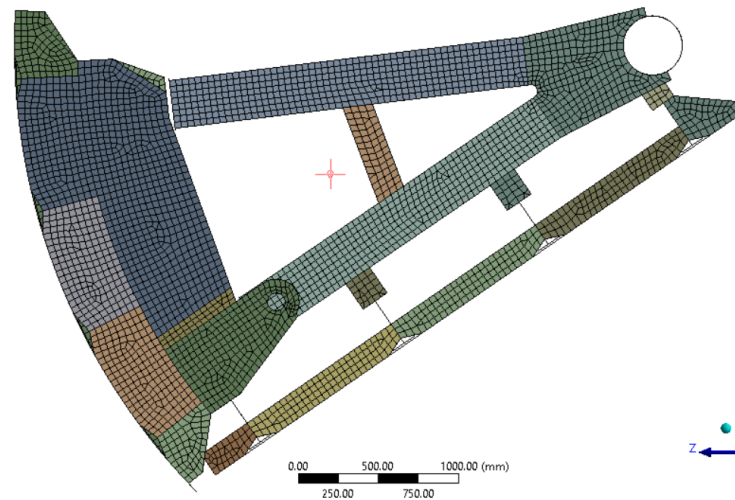
Nota Los segmentos de las uniones entre superficies son representados por diferentes colores según el número de superficies que converjan a un segmento

Solo: Rojo Doble: Azul Triple: Morado Múltiple: Amarillo

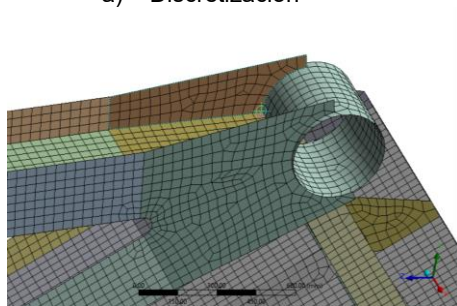
Finalmente, se genera malla como se muestra en la Figura 39.

Figura 39

Malla en el Dominio de superficies.



a) Discretización



b) Conexión entre la viga HEB 400 y la superficie

Nota. Malla generada con un tamaño de elemento global de 40mm (Nodos 30860, Elementos: 30370), a) vista lateral de la compuerta.

Al comparar el número de nodos y elementos generados al crear la malla con un tamaño de elemento de 40mm para ambos modelos; para el modelo de Superficies y líneas se generaron 25216 Nodos y 24543 elementos, para el modelo de superficies se generó 30860 nodos y 30370 elementos. Representa un incremento de 22.38% en nodos y 23.74% en elemento.

3.4 Análisis de las condiciones de contorno

El análisis de la compuerta se ejecutará en dos estados estáticos:

- **Estado 1: Condición de Operación**

La primera, es la condición de operación de la compuerta radial, soporta caras aguas arriba una carga hidráulica en toda su superficie, además consta de sellos laterales

e inferiores que permiten la hermeticidad de esta y un contacto entre la base del alivio y dicha compuerta.

Toda esta carga es transmitida mediante los brazos de la compuerta a los cojinetes.

- **Estado 2: Condición de apertura.**

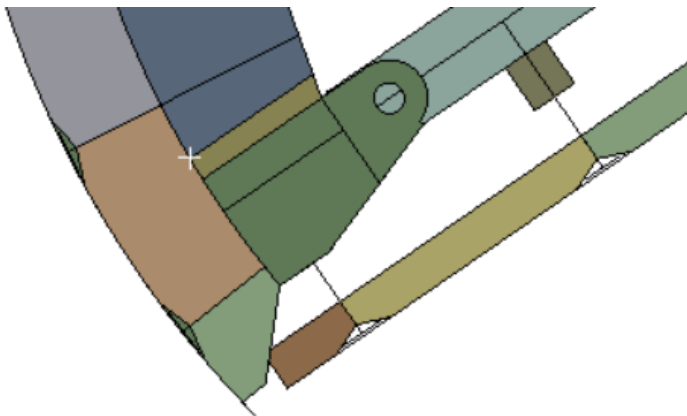
En el segundo estado, se evalúa la condición inicial de accionamiento, el cual permitirá ver el estado tensional y de rigidez en la estructura de accionamiento. Para modelar este estado es necesario considerar lo siguiente:

- ✓ La conexión entre el sistema de accionamiento y la compuerta radial se considera que no presentara desplazamiento. (Figura 40)
- ✓ No hay contacto entre el piso del alivio y compuerta,
- ✓ Las otras condiciones de operación se mantendrán.

Con las restricciones concentramos la carga en la estructura de accionamiento y los cojinetes.

Figura 40

Conexión entre el sistema de accionamiento y la compuerta



Nota. Para evaluar la estructura de accionamiento se considera el instante donde la toda la carga está distribuida en eje principal y eje de accionamiento.

Para la generación de modelo es necesario ingresar ciertos parámetros como:

3.4.1 Peso de la compuerta

Para la asignación del peso de las láminas y los perfiles de la compuerta radial es necesario considerar la aceleración de la gravedad estándar, El software determina el peso según las propiedades mecánicas y geométricas.

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

g: Gravedad

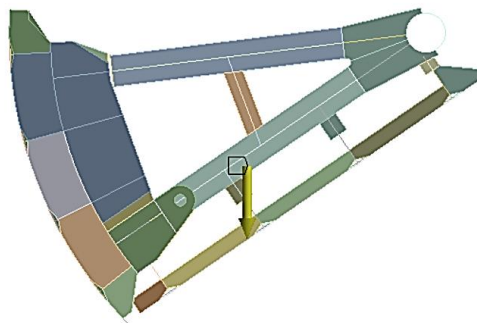
Peso del dominio de la compuerta: 5579.3 kg.

Figura 41

Asignación de Peso.

F: ANÁLISIS DE MALLA- LÍNEA BASE
Standard Earth Gravity
Time: 1. s

Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s²
Components: 0,-9806.6,0. mm/s²



Nota. Para la asignación del peso solo es necesario ingresar la gravedad en Ansys previamente habiendo ingresado las propiedades mecánicas y geométricas.

3.4.2 Carga hidráulica

Para la determinar la presión en las caras aguas arriba de la compuerta radial debemos conocer la densidad de fluido (ρ), la gravedad (g) y la altura de la carga hidráulica (h).

$$P = P_o + \rho gh \quad (21)$$

La densidad del fluido (ρ) se considerará la del agua, si bien la densidad es variable en función de la altura por lo sedimentos presentes, para este análisis la densidad se considerará uniforme.

$$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

La aceleración de la gravedad (g) se considera.

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

Para la carga hidráulica es necesario determinar la altura (h) de operación.

El nivel más bajo de la compuerta radial está ubicado en la cota 2652.9 msnm, la altura máxima de operación en la represa es 2695 msnm. La coronación de la presa está en a la cota 2697 msnm. Para Mayor detalle revisar el ANEXO 2 que es plano 311-Primera Etapa -Obra de represamiento -Desagüe del alivio 4-Formas y detalles -Secciones A-A, E-E.

$$h = 42.1m$$

$$H = 2695 - 2652.9$$

$$H = 42.1m$$

En la Figura 42 se muestra la asignación de la carga hidráulica en la cara aguas arriba de la compuerta. La superficie media presenta dos caras las cuales están definidas como “bot” y “top”. Se escoge la cara que presenta contacto con la carga hidráulica como se muestra en la Figura 42-b

$$\Delta p = \rho * g * h = 1000 * 9.81 * 42.1m = 0.413001MPa$$

Se calculo la carga hidráulica máxima, en el punto más bajo de la compuerta radial, para verificar si la carga hidráulica asignada es correcta.

Figura 42

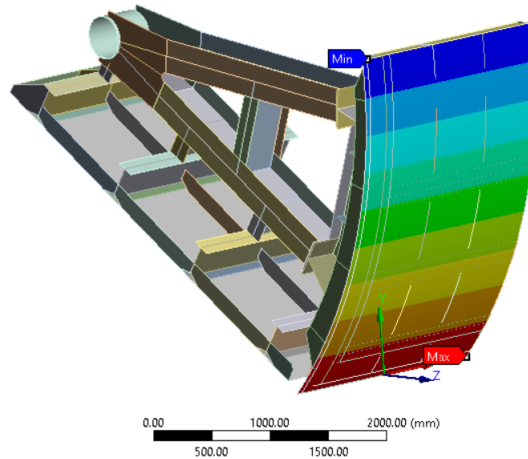
Asignación de Carga Hidráulica

ID (Beta)	406
Type	Hydrostatic Pressure
Applied By	Surface Effect
Coordinate System	Contacto compuerta-Alivio N4
<input type="checkbox"/> Fluid Density	1000. kg/m ³
Suppressed	No
Hydrostatic Acceleration	
Define By	Components
<input type="checkbox"/> X Component	0. m/s ² (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	9.81 m/s ² (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0. m/s ² (ramped)
Free Surface Location	
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0. m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	42.1 m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0. m
Location	Click to Change

a) Altura de operación máxima.

G: ANALISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA
Hydrostatic Pressure
Time: 1. s
Unit: MPa

0.413001 Max
0.409727
0.406452
0.403178
0.399904
0.39663
0.393355
0.390081
0.386807
0.383532 Min



b). Carga hidráulica

Nota.a) Los parámetros a ingresar como la densidad y altura de carga hidráulica. Es importante referenciar un sistema de coordenadas en el punto más bajo de lámina de contacto como se muestra en la Figura b) esto permitirá una asignación correcta de la carga hidráulica.

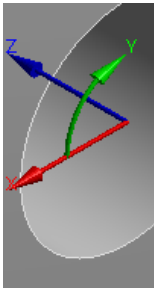
3.4.3 Modelado de cojinete.

El cojinete de la compuerta radial no desplazarse en el eje axial (eje X), no puede desplazarse de manera radial, pero si puede desplazarse de manera tangencial. Para poder modelar de manera correcta se decidió aplicar una condición de soporte cilíndrico (Cylindrical Support), La figura 43 se detalla los grados de libertad que se pueden restringir.

En .la Figura 43 se muestra la asignación de estas condiciones. Se selecciona la superficie que modela al cojinete para restringir los grados de libertad, en la Figura 44 b) se muestra esta condición resaltada con un color azul.

Figura 43

Grados de libertad de Cylindrical Support



Nota. Z es axial, Y es tangencial y X es la dirección radial.

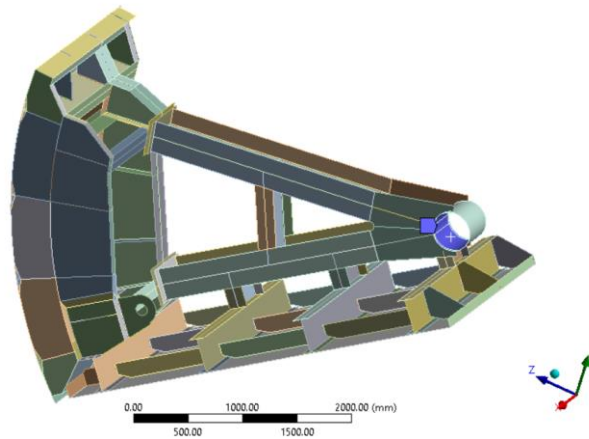
Figura 44

Asignación de Soporte en el Origen

Details of "Cylindrical Support"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
Definition	
ID (Beta)	1110
Type	Cylindrical Support
Radial	Fixed
Axial	Fixed
Tangential	Free
Suppressed	No

a) Grados de libertad.

F: ANALISIS DE MALLA- LINEA BASE
Cylindrical Support
Time: 1. s
■ Cylindrical Support: 0. mm



b) Superficies asignadas

Nota. El soporte de tipo Cylindrical Support presenta 3 grados de libertad las cuales se configuran como se muestra en la Figura 44-a). Donde se restringe los desplazamientos radiales y axiales, pero se deja libre el movimiento tangencial.

3.4.4 Definición de contactos

Se define los contactos en el software. Las uniones por soldaduras y empennadas tiene que ser modeladas puesto que estas uniones restringen los grados de libertad del modelo, en la Figura 45 se define un contacto que representa la unión empennada entre el brazo y el refuerzo de la compuerta, Para el modelo estas superficies comparten los mismos grados de libertad.

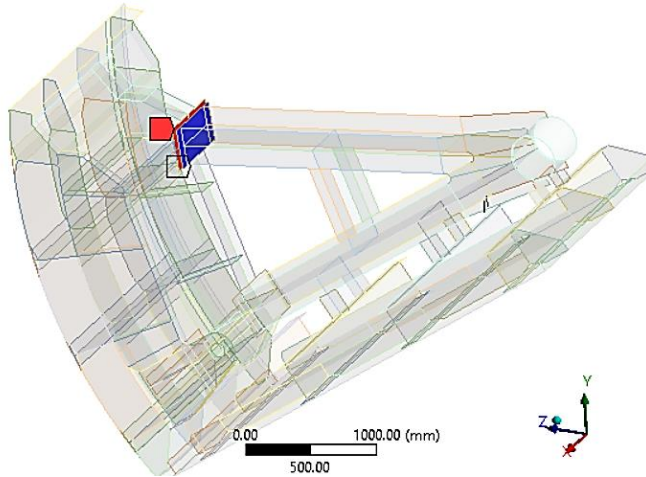
Figura 45

Definición de contactos.

Bonded - Brazo-Superior-30mm-Aq 42-3 To Brazo-contacto-30mm-Aq42-1

■ Bonded - Brazo-Superior-30mm-Aq 42-3 To Brazo-contacto-30mm-Aq42-1 (Contact Bodies)

■ Bonded - Brazo-Superior-30mm-Aq 42-3 To Brazo-contacto-30mm-Aq42-1 (Target Bodies)



Nota. Para mayor detalle de los contactos revisar el archivo “Análisis de convergencia de malla” con Ansys.

Las uniones por soldadura, son representadas por segmentos de línea, que restringen los grados de libertad entre una superficie soldadas de otra. Se aprecia en Figura 38 donde se realiza la vinculación entre superficies.

3.4.5 Contacto inferior.

El contacto entre los puntos más bajos de la compuerta radial con la estructura del alivio N°4 restringe el desplazamiento de los puntos más bajos de la lámina de contacto de la compuerta radial. El conducto del alivio N°4 presenta una inclinación de 12.4° (ANEXO 2). Estos puntos no pueden desplazarse de manera perpendicular a la superficie inclinada.

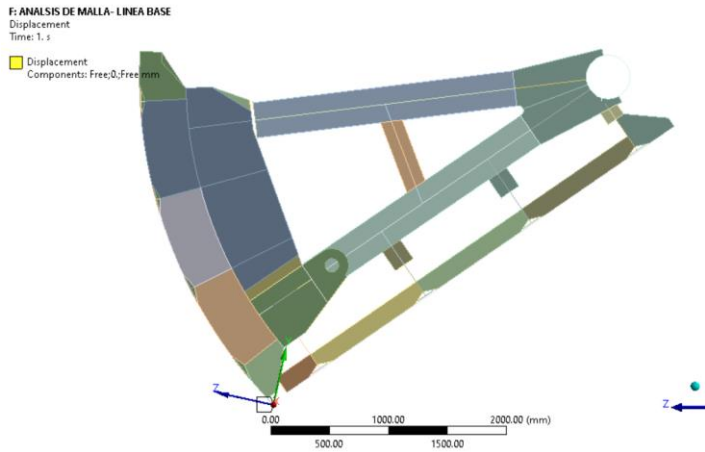
Con esta premisa se trasladó un sistema de coordenadas al segmentó de contacto, se roto los 12.4° . y se restringió el movimiento en eje Y como se muestra en la figura 46 b) el cual es perpendicular a la base del alivio N°4.

Figura 46

Restricción de Contacto con la Base del Alivio.

Details of "Displacement"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
Definition	
ID (Beta)	1114
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Coordenadas-Angulo de inclinacion de superficie de contacto
X Component	Free
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm (ramped)
Z Component	Free
Suppressed	No

a) Contacto con la base



b) Sistema de coordenadas con 12°.4

Nota. En la Figura 46-a) los grados de libertad en el nuevo sistema de coordenadas en la cual se pone un desplazamiento de 0 mm en el eje Y. La Figura 46-b) se muestra las configuraciones realizadas.

3.4.6 Contactos laterales

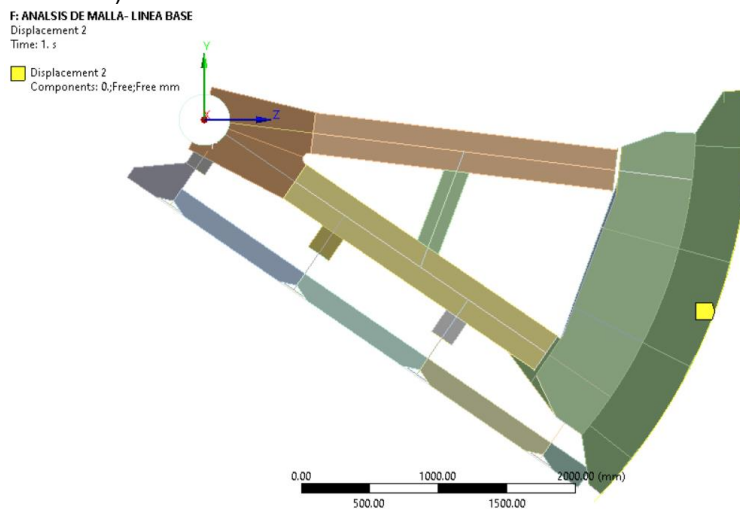
Los puntos del contacto lateral tienen la capacidad de desplazarse en una guía radial. Estos puntos no pueden desplazarse perpendicularmente, por lo que el desplazamiento en X será 0mm como se muestra en la Figura 47.

Figura 47

Restricción de los Contactos Laterales

Details of "Displacement 2"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
Definition	
ID (Beta)	1128
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. mm (ramped)
Y Component	Free
Z Component	Free
Suppressed	No

a) Restricción de contacto



b) Asignación se superficie.

Nota En la figura 47-b se muestra el segmento de color amarillo al cual se le aplica la restricción de desplazamiento de 0mm en eje x siendo.

3.4.7 Condición de simetría.

Con objetivo de reducir la carga computacional se aplica una condición de borde de simetría, puesto que a la compuerta se le considera que está constituida por dos mitades iguales respecto al plano YZ. Por lo que se procedió a dividir el dominio a la mitad y en la configuración del modelo se asignó la condición de simetría.


Para aplicar esta metodología de análisis por elementos finitos es necesario que se cumpla tres condiciones:

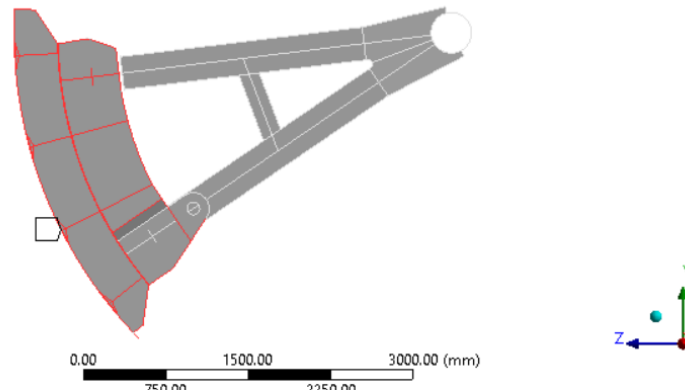
1. La geometría es simétrica respecto a un plano o varios planos.
2. Las cargas aplicadas son simétricas a un plano o varios planos.
3. Las condiciones de contorno son simétricas a un plano o varios planos.

El modelo analizado cumple con las tres condiciones en el plano YZ; siendo posible aplicar esta metodología.

Figura 48

Condición de borde de simetría

Symmetry Region
 Symmetry Region



Nota. Se aplica la condición de borde de simetría en el plano YZ resaltado por color un color rojo.

3.4.8 Carga sísmica.

La presa está ubicada en el departamento de Huancavelica, departamento de Tayacaja y distrito de Colcabamba. Correspondiente a la zona sísmica 2. Y se considera el valor máximo indicados en la Tabla 4.

$$Z = 0.25$$

Este factor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido. El factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad. (Ministerio de Vivienda, Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente, 2014, pág. 21)

Para el desarrollo de la tesis de asumirá los valores máximos.

$$S_z = 0.25 * g$$

$$S_x = 0.25 * g$$

Considerando la gravedad:

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

Las aceleraciones máximas en las direcciones Z y X.

$$S_z = 2.4525 \quad (21)$$

$$S_x = 2.4525 \quad (21)$$

Las cargas de viento no son consideradas puesto que la estructura está completamente sumergida.

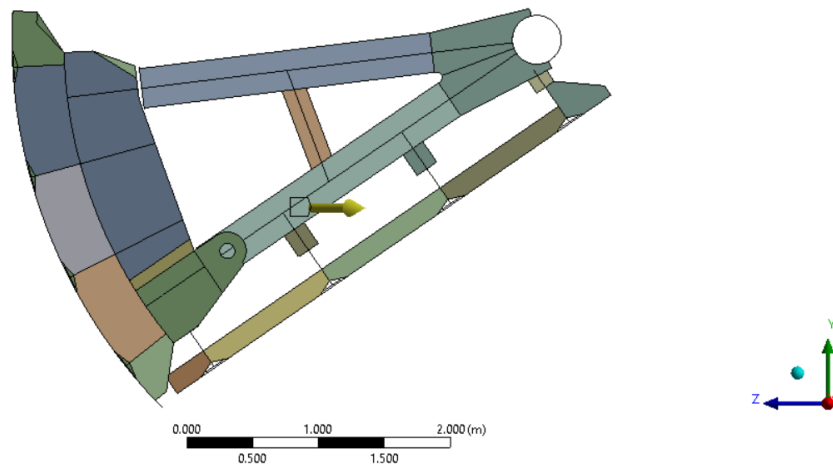
Las cargas producto de los cambios de temperatura no son considerados en el modelo.

Figura 49

Carga sísmica

D: ANALISIS 1
Carga Sísmica
Time: 1. s
11/11/2023 14:21

■ Carga Sísmica: 3.4295 m/s²
Components: 2.425;0;-2.425 m/s²



Nota. Se considera una aceleración máxima paralela a la carga hidráulica y la otra transversal.

3.5 Mallado del dominio

Para encontrar el tamaño de elemento correcto es necesario variar este, hasta encontrar una convergencia en los resultados, por lo que para este análisis se reduce el tamaño de elemento de manera global como se muestra en la Tabla 7, Esto permitirá evaluar si el mallado del dominio tiene buena calidad y representa el modelo geométrico de manera correcta.

La restricción es el número de nodos y elementos establecidos por ANSYS student

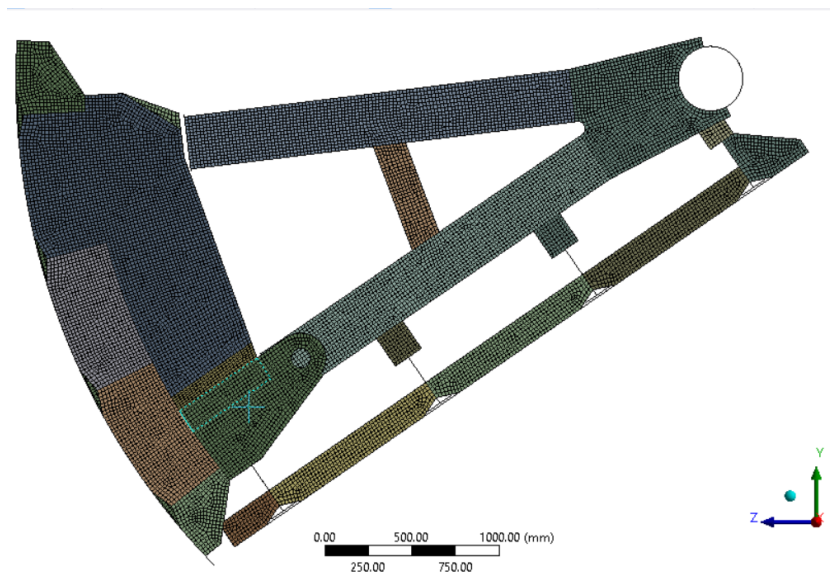
- Análisis Estructural: 128k nodos / elementos.
- Análisis de fluidos :512k nodos / elementos.

Este análisis, permite obtener una solución más precisa con una malla que es lo suficientemente densa, para que no demande un alto gasto computacional o recursos de procesamiento. Para el análisis; la reducción del tamaño de elemento será homogénea en toda la estructura como se muestra en la Figura 50. Este análisis también permitirá determinar si existen singularidades en el modelo y no confundirlos con concentradores de esfuerzos. Es muy típico encontrar singularidad en modelos con superficies y volúmenes.

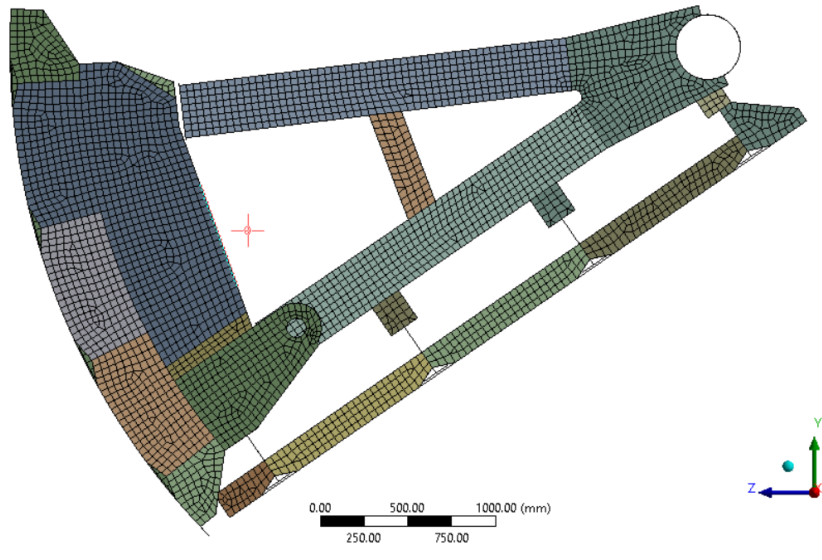
Para el análisis se usará elementos de tipo rectangular y cuadrado en su mayoría, puesto que esto se adapta mejor a elementos de tipo superficie; pudiendo crear algunas singularidades en uniones a 90 grados entre superficies.

Figura 50

Mallado Según Tamaño de Elemento.



a) Malla de 20mm



b) Malla de 40mm

Nota. a) Malla de la compuerta con 20mm de tamaño de elemento, b) Malla de la compuerta con 40mm de tamaño de elemento

Se parametrizo los resultados en función del tamaño de elemento y se evalúan la calidad de malla con los siguientes parámetros: Calidad de elemento (Element quality); Relación de Aspecto (Aspect Ratio.), asimetría, desviación, calidad ortogonal.

Una vez establecido el modelo, ya definido el material de la compuerta, el dominio, condiciones de contorno y la malla se procede a realizar la simulación correspondiente. Los resultados para el análisis son deformaciones, esfuerzos máximos y factores de seguridad.

3.6 Análisis del modelo.

Se realizarán dos análisis estáticos con dos condiciones distintas, en las cuales se busca evaluar la condición estándar de operación y la condición de accionamiento de la compuerta radial.

Se realizará la combinación de cargas por el método de esfuerzos permisibles (ASD)

- (1) D
- (2) D + L
- (3) D + (W o 0,70 E)
- (4) D + T
- (5) α [D + L + (W o 0,70 E)]
- (6) α [D + L + T]

- (7) $\alpha [D + (W \text{ o } 0,70 E) + T]$
- (8) $\alpha [D + L + (W \text{ o } 0,70 E) + T]$

No aplica las cargas de viento, No aplica acciones por cambios de temperatura y no se considera cargas vivas. Evaluando las combinaciones de carga las que los que arrojan mayores esfuerzos y deformaciones son:

- (1) D
- (2) D
- (3) D + 0,70 E
- (4) D
- (5) 0.75 [D + 0,70 E]
- (6) 0.75 [D]
- (7) 0,75 [D + 0,70 E]
- (8) 0.67 [D + 0,70 E]

Las combinaciones de carga que se realizaran son:

- (1) D
- (3) D + 0,70 E

El factor 0.7 de la carga sísmica se procede a cambiarlo 1. Este cambio es realizado por la norma brasileña NBR-8883, donde sugiere considerar la carga sísmica pero no detalla un factor, por un tema de seguridad se considera la carga sísmica máxima.

- (1) D
- (2) D + E

3.6.1 Condición de operación (D).

La compuerta se encuentra soportando toda la carga hidráulica y esta es transmitida directamente a los brazos(cojinetes) en condición estática; es su estado natural de funcionamiento.

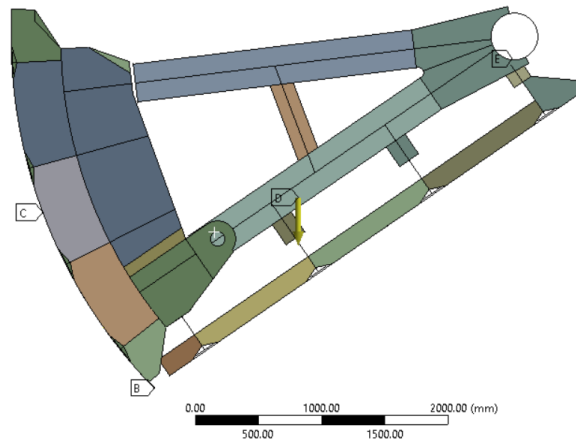
En este primer análisis no se considera la carga sísmica.

Figura 51

Primera Condiciones de Análisis de la Compuerta Radial - 1.

D: ANALISIS 1 [D]
Static Structural
Time: 1, s
12/11/2023 14:00

- A Variable Load: Presión Hidrostática
- B Contacto Inferior
- C Contacto Lateral
- D Gravedad: 9806.6 mm/s²
- E Soporte Cilindrico: 0. mm



Nota. [A], Presión hidrostática [B], Contacto Inferior [C], Contacto lateral, [D] Gravedad, [E] Soporte Cilíndrico.

3.6.2 Condición de operación y carga sísmica (D+E).

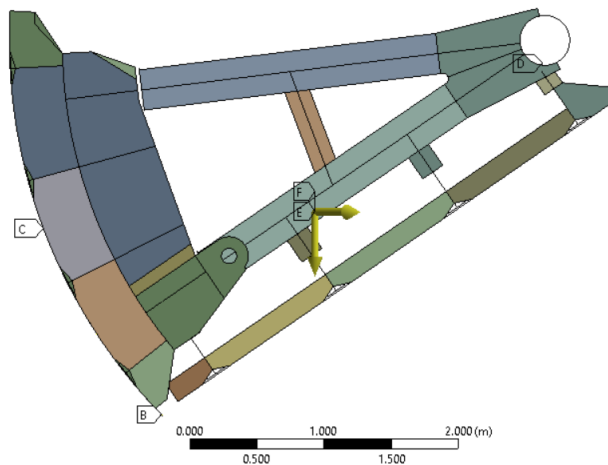
En este análisis se considera la carga sísmica.

Figura 52

Primera Condiciones de Análisis de la Compuerta Radial - 2.

D: ANALISIS 1-CARGA SISMICA
Static Structural
Time: 1, s
11/11/2023 19:59

- A Variable Load: Presión hidrostática
- B Contacto Inferior
- C Contacto Lateral
- D Soporte Cilindrico : 0. m
- E Gravedad: 9.8066 m/s²
- F Carga Sísmica : 3.4295 m/s²



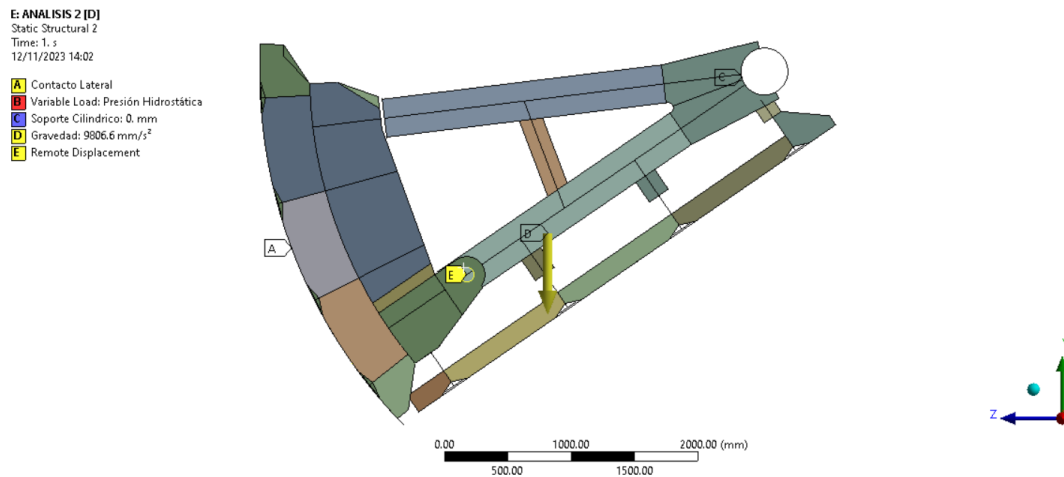
Nota. [A], Presión hidrostática [B], Contacto Inferior [C], Contacto lateral, [D] Soporte Cilíndrico, [E] Gravedad, [F] Carga Sísmica.

3.6.3 Condición de apertura (D)

La carga será soportada por la estructura de accionamiento y los brazos de la compuerta radial (cojinetes) en condición estática. Lo que se busca en este modelo es simular los esfuerzos en la estructura de accionamiento, se toma un diferencial de tiempo donde no hay contacto entre la base del alivio N°4 y la lámina de la cara de contacto, pero si existe una restricción de desplazamiento en la oreja de accionamiento. La restricción en la oreja se consideró desplazamiento cero, definido como soporte [F] en la Figura 45.

Figura 53

Segunda Condiciones de Análisis de la Compuerta Radial.



Nota. [A] Contacto Lateral, [B], Presión Hidrostática [C], Soporte cilíndrico, [D] Gravedad, [E] Restricción de soporte.

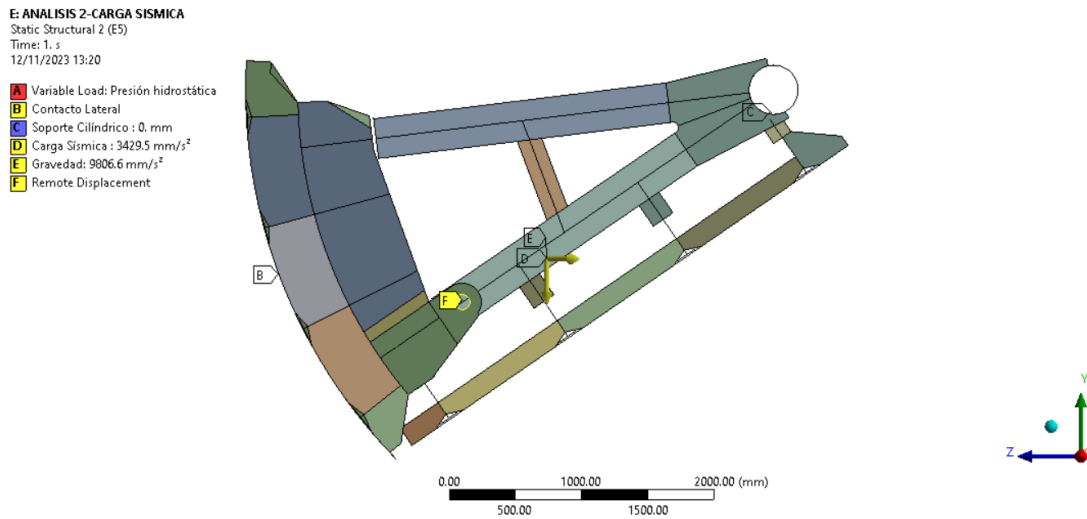
Para el segundo análisis se elimina la condición de contacto entre el alivio N°4 y los puntos más bajos de la compuerta radial. Adicionalmente se restringe el desplazamiento en las orejas de accionamiento. Esta condición permite evaluar la estructura de accionamiento y el comportamiento ideal inicial de la compuerta al abrirse.

3.6.4 Condición de apertura y carga sísmica (D+E).

En este análisis se considera la carga sísmica.

Figura 54

Primera Condiciones de Análisis de la Compuerta Radial - 3



Nota. [A], Presión hidrostática [B], Contacto lateral, [C] Soporte Cilíndrico, [D] Carga Sísmica, [E] Gravedad, [F] Restricción de carga.

Capítulo IV Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis de malla

Los resultados del análisis de malla, tienen como parámetro de ingreso el tamaño de elemento y como salida el número de nodos, esfuerzos y deformaciones. Como se muestra en la Tabla 8, se redujo el tamaño de elemento hasta llegar al número máximo permitido por el Ansys student. (128k nodos). La reducción del tamaño de malla es global partiendo del 100 mm de tamaño de elemento, llegando hasta los 20 mm dando un total de 121k elementos, estando muy próximo al máximo.

Tabla 8

Datos del Análisis de Convergencia de Malla.

	Tamaño de Elemento	1/h	Número de elementos	Esfuerzos máximos (Von-Mises)	Esfuerzo Promedio en zona Crítica	Deformaciones Máximas
	[mm]	[1/mm]		[MPa]	[MPa]	[mm]
DP 1	100	0.01	5897	253.400	67.583	3.2297
DP 2	75	0.0133	9055	281.692	67.713	3.3123
DP 3	60	0.0166	14119	291.648	66.018	3.3220
DP 4	55	0.01818	17144	293.438	65.648	3.3278
DP 5	50	0.02	20328	331.566	62.169	3.3447
DP 6	45	0.02222	24316	339.725	62.291	3.3543
DP 7	40	0.025	30370	339.957	62.114	3.3640
DP 8	35	0.02857	39364	375.617	60.829	3.3681
DP 9	30	0.03333	54198	382.923	60.488	3.3763
DP 10	25	0.04	77326	415.812	59.624	3.3809
DP 11	20	0.05	121462	445.217	59.082	3.3853

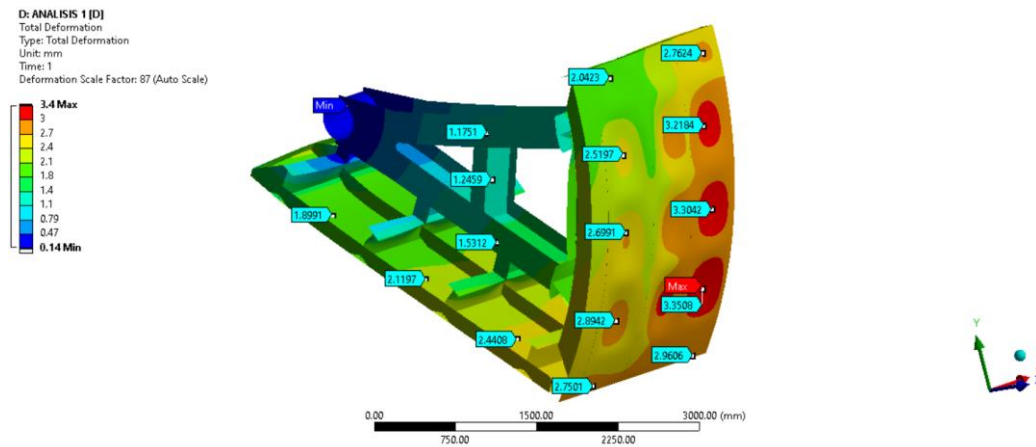
Nota Datos obtenidos en el análisis de convergencia de malla. Para mayor información y detalle de cada simulación. Archivo de Convergencia de Malla.

Si bien el objetivo del análisis de convergencia de malla es reducir el error en los resultados de las deformaciones máximas y esfuerzos máximos, también permite evaluar si se presentan singularidades. Para el análisis de malla se toma los resultados obtenidos en la condición de operación (D) donde no se considera la carga sísmica. La carga sísmica incluirá en los análisis posteriores. Tener en cuenta que este modelo solo es para analizar la malla, donde determinaremos un tamaño de elementos para los posteriores análisis.

4.1.1 Análisis de Deformaciones.

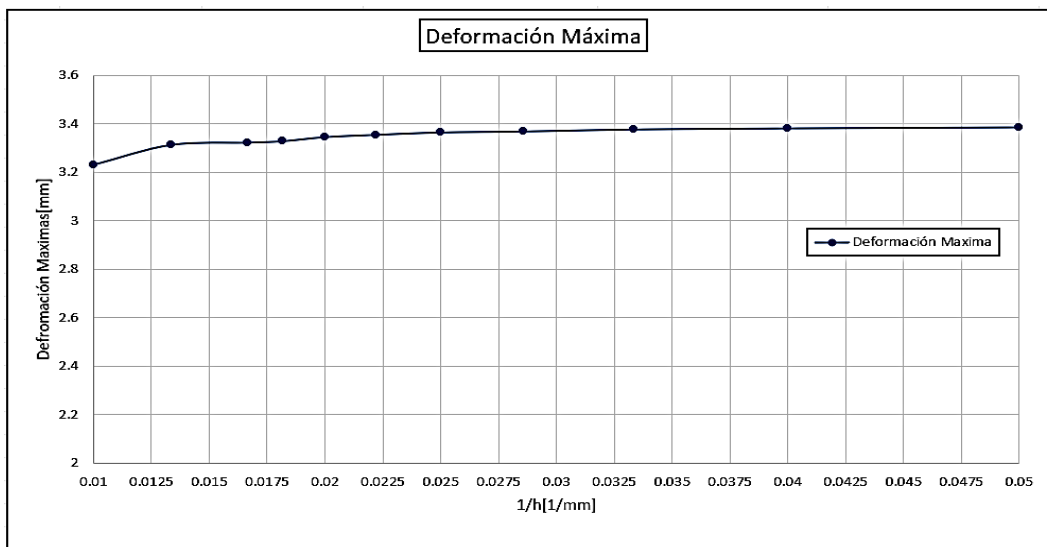
Al realizar la evaluación de la deformación máxima versus la inversa del tamaño de elemento ($1/h$) se obtiene la Figura 56 donde nos muestran un gráfico de la tendencia de las deformaciones máximas. La tendencia es a converger. No presenta singularidad en las deformaciones. La Figura 55 muestra el estado de deformaciones (rigidez). La deformación máxima está focalizada en la cara de contacto zona inferior.

Figura 55
Deformaciones Máximas



Nota. Tamaño de elemento 40mm.

Figura 56
Deformaciones Máximas vs La Inversa del tamaño de elemento.



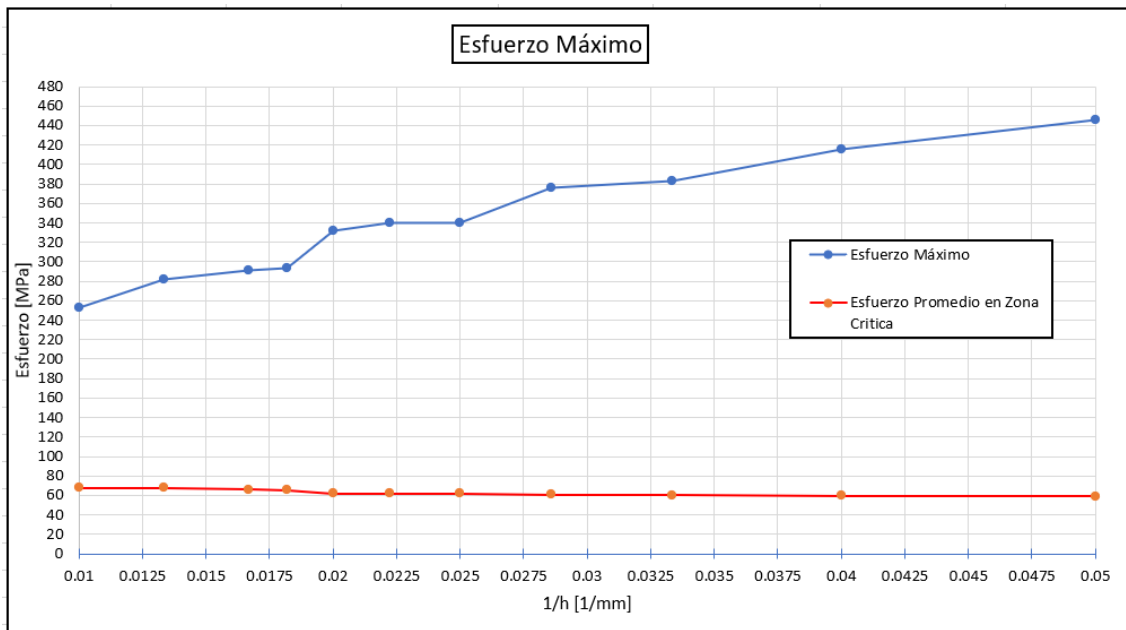
Nota. Deformación máxima[mm] en la compuerta radial vs la inversa del tamaño de elemento de malla. [1/mm]

4.1.2 Análisis de Esfuerzos

Cuando analizamos los esfuerzos máximos versus la inversa del tamaño de elemento ($1/h$). Los resultados demuestran, que los esfuerzos máximos divergen, además de superar fácilmente el límite de fluencia y de rotura del material. La Figura 57 donde se analiza los resultados en tensiones máximas, nos muestran un gráfico de la tendencia de las tensiones máximas. Si se sigue reduciendo el tamaño de elemento por debajo de los 20mm los esfuerzos se seguirán incrementando. Esto es un indicador que el modelo presenta singularidades; puesto que el análisis es lineal y no debería superara el límite de fluencia del acero asignando

Figura 57

Esfuerzo máximo vs la inversa del tamaño de elemento



Nota. Se incluye el esfuerzo promedio en la superficie de la Figura 58, superficie donde se presenta la singularidad.

4.1.3 Análisis de singularidad.

Esta singularidad, se presente en la región de refuerzo de brazo de la compuerta radial como muestra en la Figura 58-a) y de forma focalizada en la Figura 58- b), Si analizamos las otras regiones del refuerzo de brazo se puede notar esfuerzos inferiores al límite de fluencia (235Mpa) y solamente tiene la tendencia a incrementarse en este punto.

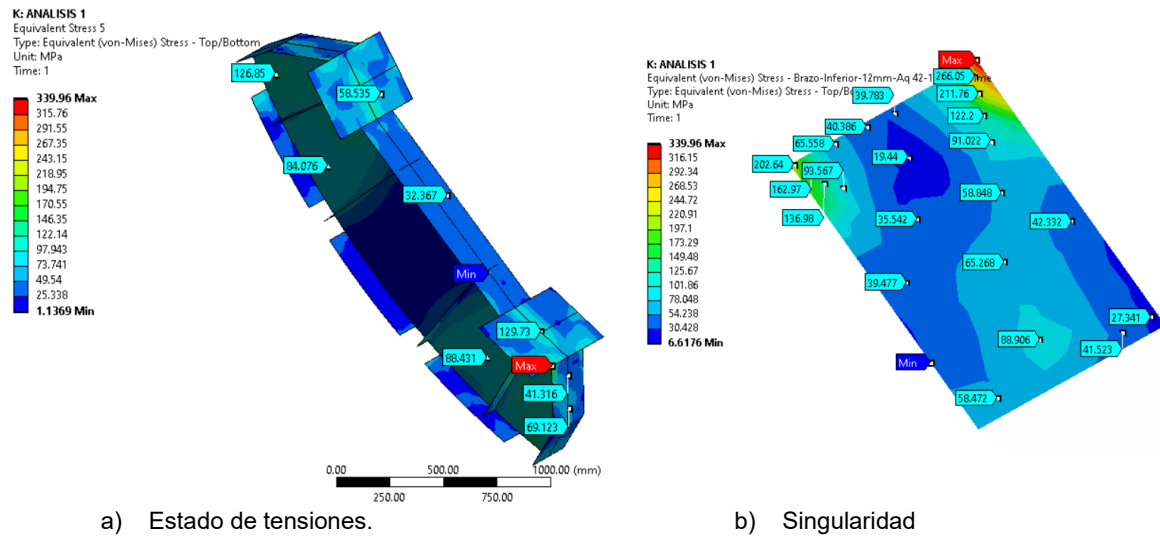
Se analiza la superficie donde se produce la concentración de esfuerzos; focalizada en la parte superior derecha de la Figura 58-b; con el objetivo de evaluar cómo afecta esta singularidad a toda la superficie. Para esto se graficó el esfuerzo promedio en función de la inversa del tamaño de elemento como se muestra en la Figura 57. Los resultados indican que el esfuerzo promedio en esta región tiende a converger. De los resultados mostrados en la Figura 58; Omitiendo la zona de singularidad, los esfuerzos están por debajo del límite de fluencia, la estructura principal tiene un esfuerzo máximo de 169MPa, esto se evaluará más adelante.

El análisis de convergencia de malla permitirá determinar el tamaño de malla adecuado para los posteriores análisis computacionales. De la Figura 57. El rango donde presenta un menor incremento de Esfuerzos es de 0.02-0.025 [1/mm], para los posteriores análisis se tomará un tamaño de elemento de 40mm. Si bien se podría tomar elementos de 35mm o 30mm, esto implicaría un mayor gasto computacional obteniendo prácticamente los mismos resultados, en la tesis el dominio será evaluado en dos condiciones como se explicó en páginas anteriores, es necesario definir un tamaño de elemento para los posteriores análisis.

De la Figuras 57; para un tamaño de elemento de 40mm (0.025 [1/mm]) una deformación de 3.36817mm y para un elemento de 20mm una deformación 3.38530mm, implica un incremento de 0.508% en el resultado de deformaciones.

Figura 58

Singularidad de la compuerta.



Nota. a) Esfuerzos por Von-Mises en el refuerzo de brazo con una malla de 40mm. Esfuerzo máximo de 339.96 MPa. b) Región donde se genera la Singularidad.

De estas evaluaciones se procederá a trabajar con un tamaño de elemento de 40mm (0.025 [1/mm]). Si bien, el modelo de superficies se adapta de manera correcta a toda la estructura, pero la complejidad de la geometría al generar un dominio por superficies no permite representar las uniones soldaduras (uniones cóncavas o convexas) que eliminarían fácilmente estas singularidades. Además de presentar superficies perpendiculares que generar singularidades.

4.2 Resultados y análisis de la compuerta radial.

En este análisis la estructura presenta esfuerzos que superan fácilmente el límite de fluencia según se reduce el tamaño de elemento. Este hecho genera cierta incertidumbre en la veracidad en los resultados obtenidos. Por eso siempre es necesario hacer un análisis de convergencia de malla. Como el ejemplo del soporte en L visto en el fundamento teórico, donde básicamente cuando se hace un análisis de elementos finitos usando superficies hay una tendencia a generar inconsistencias cuando la curvatura presenta un ángulo de 90° la cual quedó demostrada en el análisis del primer modelo en la zona de el refuerzo de brazo como se muestra en la Figura 58.

Si bien el modelo no representaría la geometría real al 100%, las regiones de donde se presenta la singularidad hay pequeñas curvaturas que liberarían este tipo de tensiones, también podría darse el caso que los esfuerzos en la estructura superado el límite de fluencia del acero y este trabajando en la zona plástica u otra, pero este análisis no se presentará en la tesis. El análisis de la tesis es estático, donde las deformaciones son pequeñas y lineales.

Para evaluar cómo influye esta singularidad en toda la superficie donde se produce, es necesario evaluar la tendencia de la curva del esfuerzo promedio en la zona crítica de la Figura 57, donde hay una tendencia a reducir el esfuerzo promedio en la zona, al reducir el tamaño de elemento. Con estos datos podríamos omitir los esfuerzos por Von-Mises en esta zona.

4.2.1 Resultados: Condiciones de operación (D)

El primer análisis de la compuerta radial se ejecuta con las condiciones de contorno de la Figura 51, con un tamaño de elemento 40mm. Se evalúa las estructuras principales de la compuerta como la lámina de contacto, refuerzo de contacto, refuerzo de brazo, brazo y refuerzo de accionamiento. Las deformación y esfuerzos máximos serán evaluados en las estructuras ya mencionadas.

Los resultados obtenidos son la resistencia (estado de tensiones) y la rigidez (estado de deformaciones). También se obtendrá factores de seguridad en toda la estructura respecto al límite de fluencia del material de cada estructura.

Se evalúa la reacción del momento en el cojinete con el fin de determinar si la compuerta tendría cierre por su propio peso.

Tabla 9

Reacciones en el cojinete en la condición de operación (D).

	Condición de operación –[D]	Condición de apertura –[D]
Reacción de momento eje X	-344.72 N·m	-38.662 N·m
Reacción de momento eje Y	-10320 N·m	-9788.1 N·m
Reacción de momento eje Z	-3292.4 N·m	-2383.7 N·m
TOTAL	10838 N·m	10074 N·m

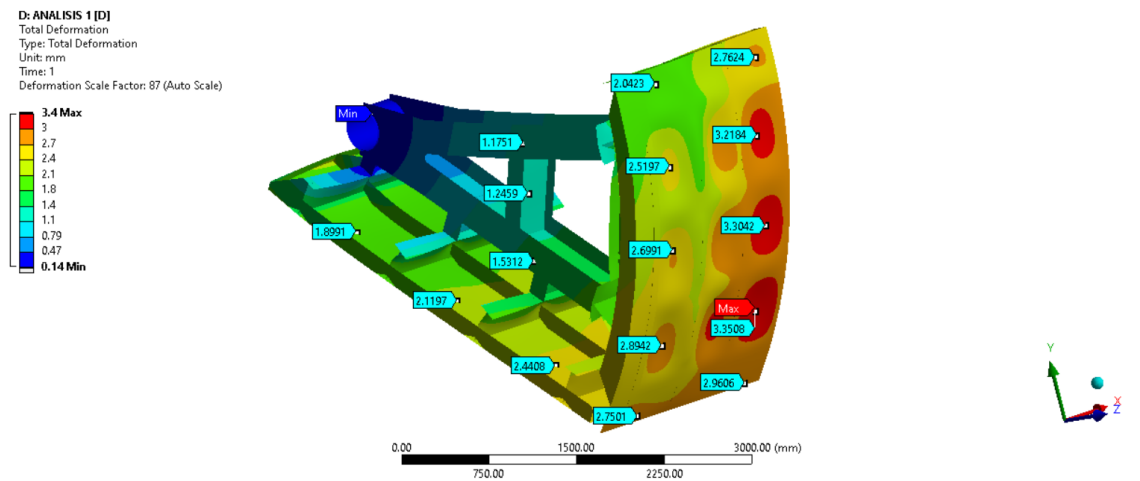
Nota: Se detalla la reacción de los momentos en el cojinete.

En ambos casos la compuerta tendría cierre por producto por su propio peso. Teniendo un momento positivo respecto al eje X. La compuerta fue diseñada para un cierre por gravedad.

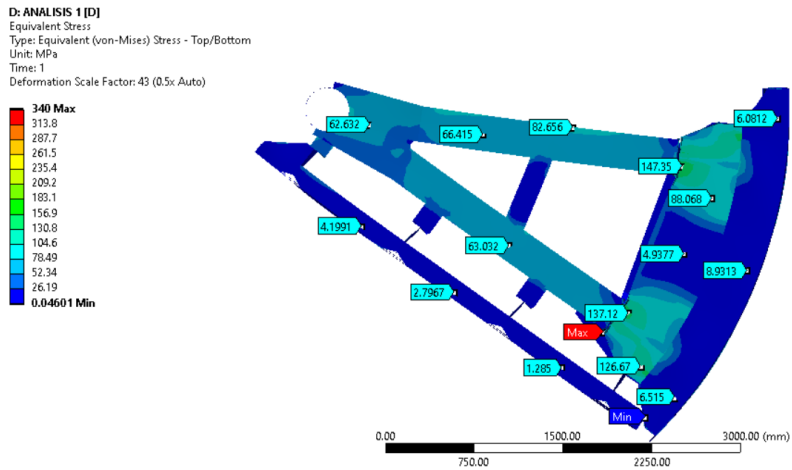
Tener en cuenta que al generar un modelo se redujo el peso de toda la estructura. Se retiraron la pernería, cordones de soldadura, equipos de maniobras y estructuras por facilidad de modelo. Dando así un dominio de media compuerta con 5579.3 kg.

Figura 59

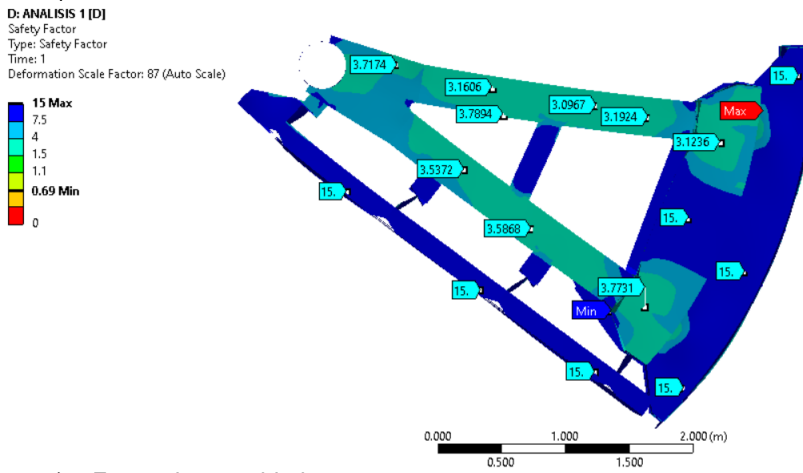
Resultados en la Compuerta Radial.



a) Estado de deformaciones



b) Estados de tensiones-Lateral derecho.

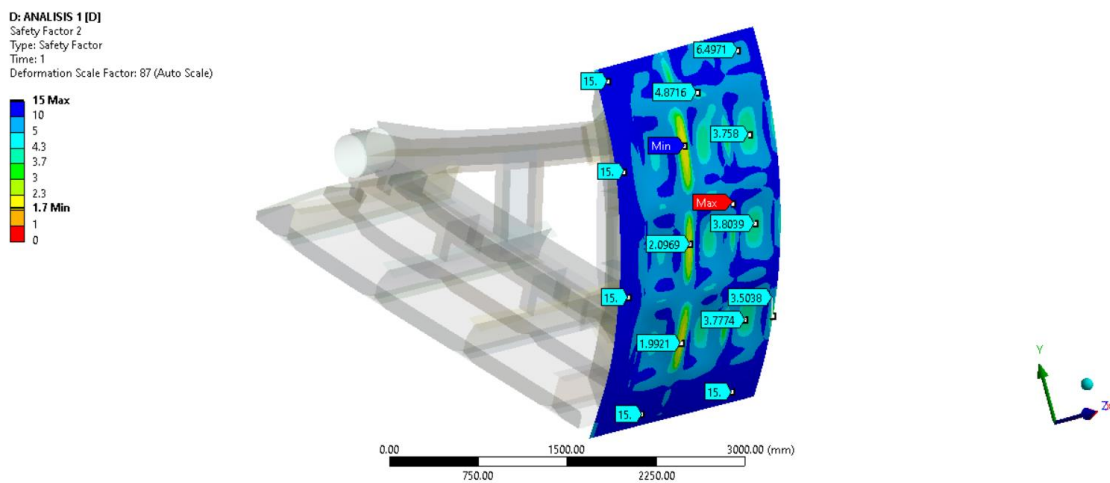


c) Factor de seguridad.

Nota. El factor de seguridad de 0.69, es producto de una singularidad.

Figura 60

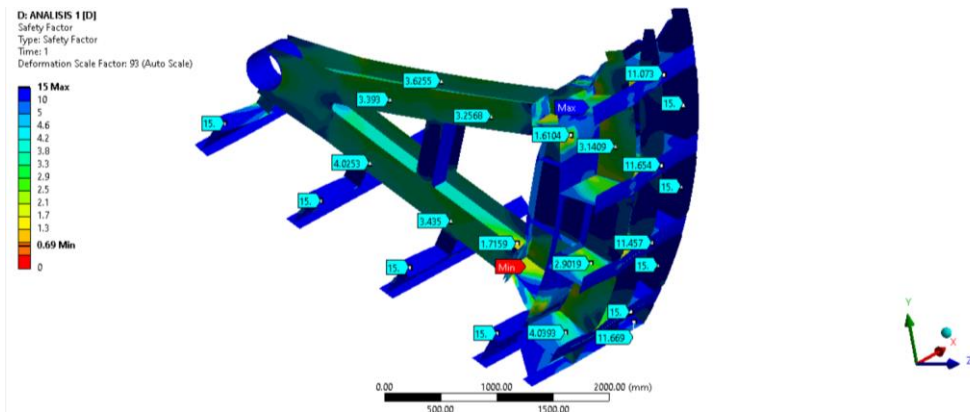
Resultados en la Lámina de contacto- Factor de seguridad.



Nota. Factor de seguridad superior a los 1.7

Figura 61

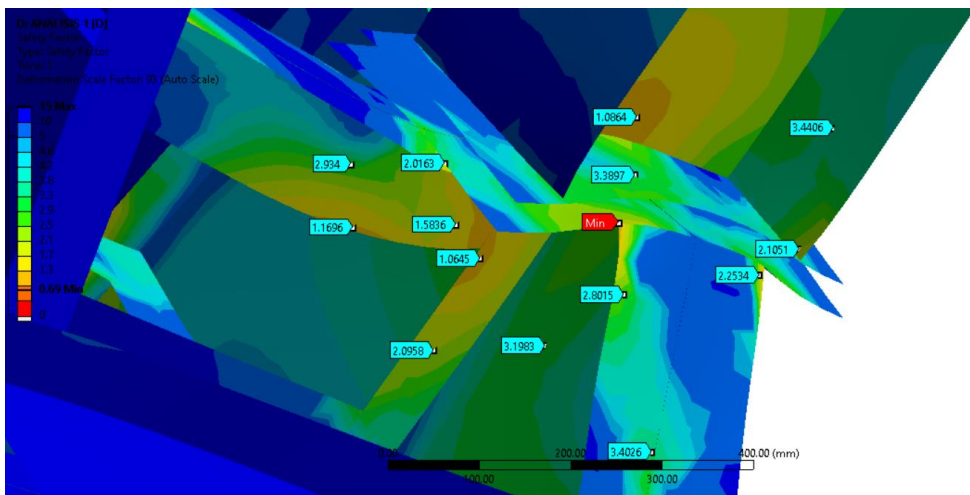
Estructura principal



Nota. No se encuentra factores de seguridad críticos en las estructuras principales.

Figura 62

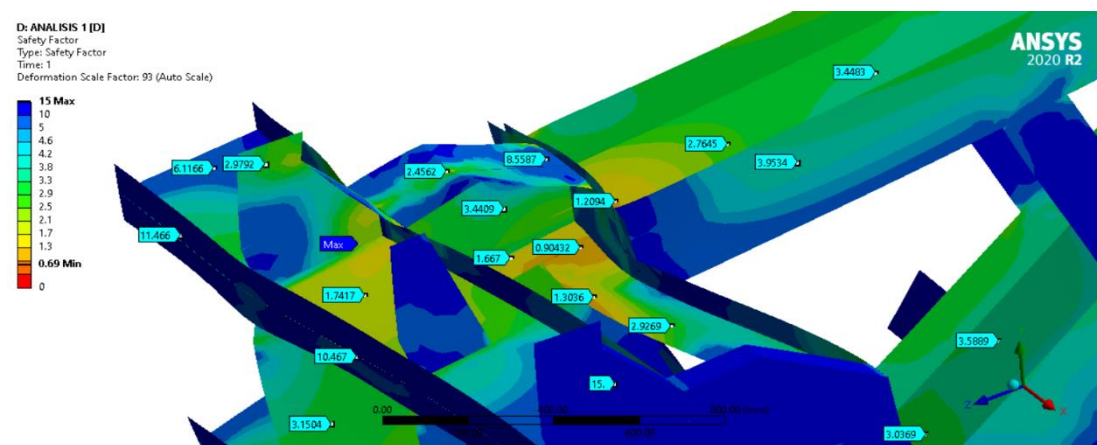
Contacto Inferior



Nota. Punto de singularidad con menor factor de seguridad.

Figura 63

Contacto Superior.

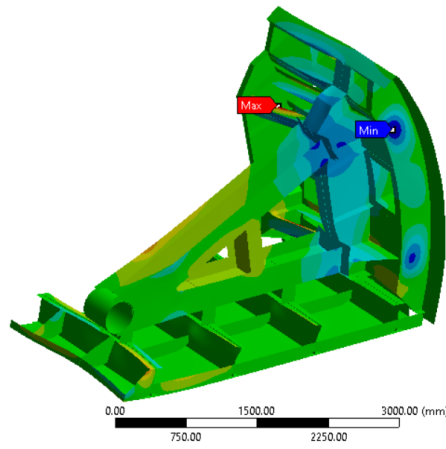
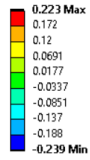


Nota. Factores de seguridad menores a 1.

Figura 64

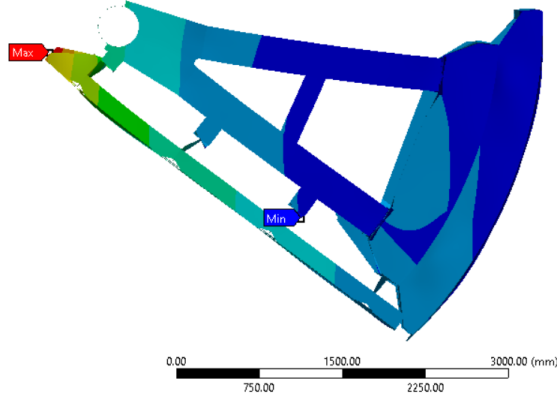
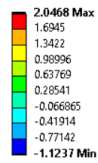
Deformación Direccionales

D: ANALISIS 1 [D]
X Axis - Directional Deformation - 1. s 2
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



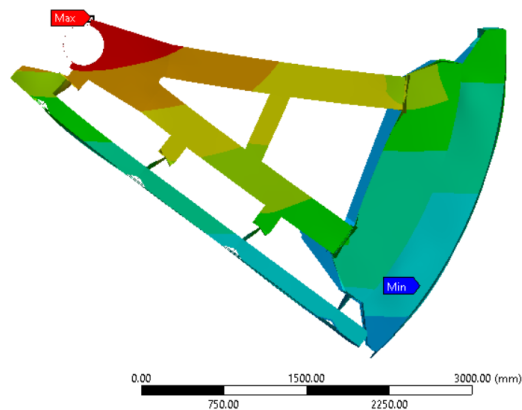
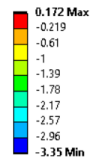
a) Deformación eje X

D: ANALISIS 1 [D]
Y Axis - Directional Deformation - End Time
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



b) Deformación eje Y

D: ANALISIS 1 [D]
Z Axis - Directional Deformation - End Time
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



c) Deformación eje z

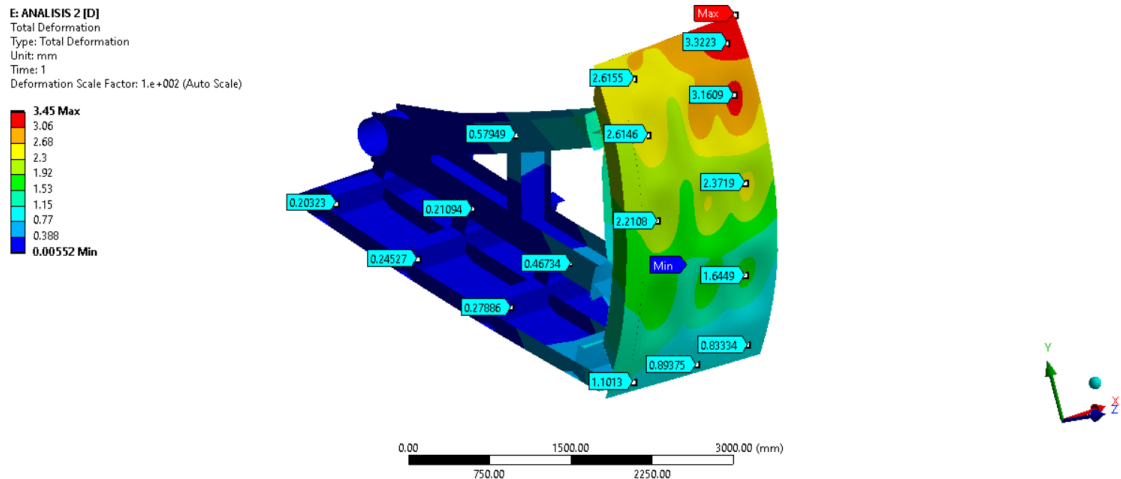
Nota. Deformaciones en los ejes principales.

4.2.2 Resultados: Condición de apertura (D).

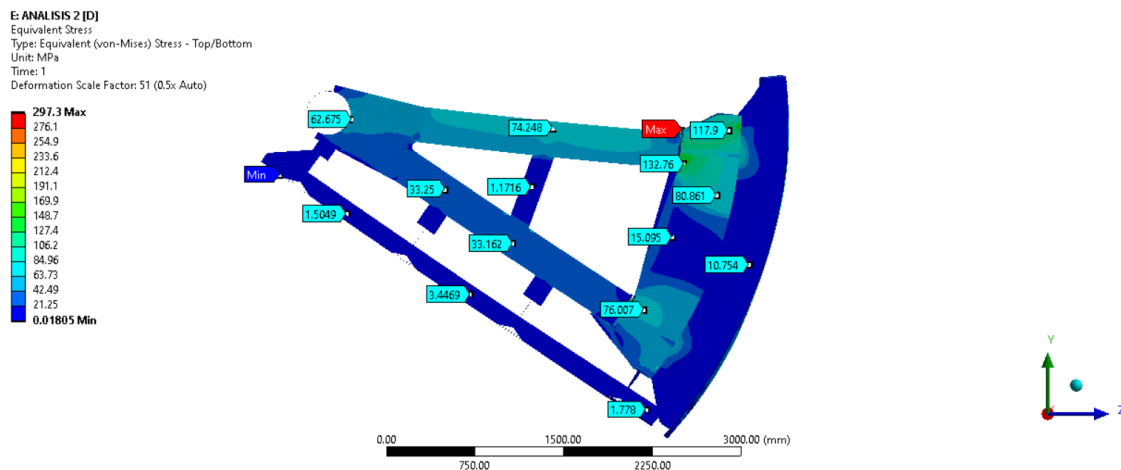
En el segundo análisis se obtiene el comportamiento de la compuerta cuando se inicia la apertura, con las condiciones de contorno ya indicadas en la Figura 50.

Figura 65

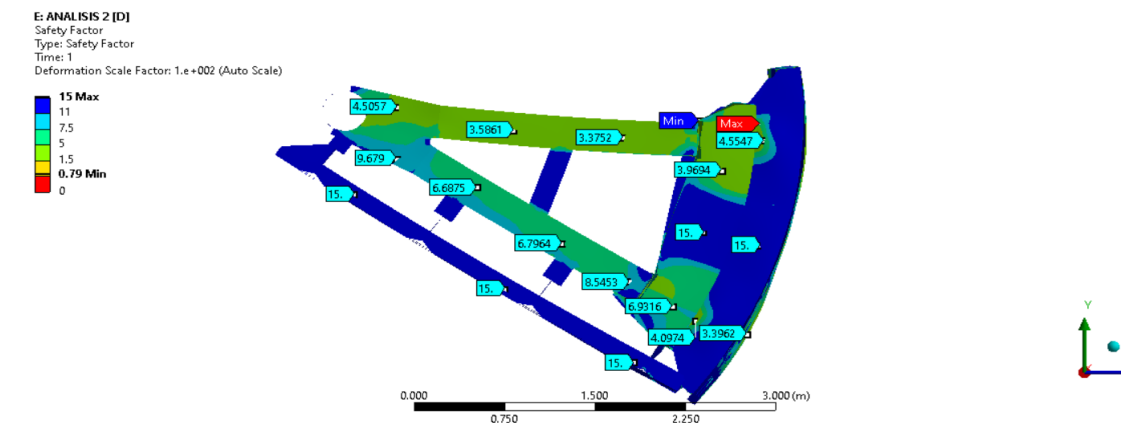
Resultados en la Compuerta Radial.



a) Estado de deformaciones



b) Estados de tensiones-Lateral derecho.

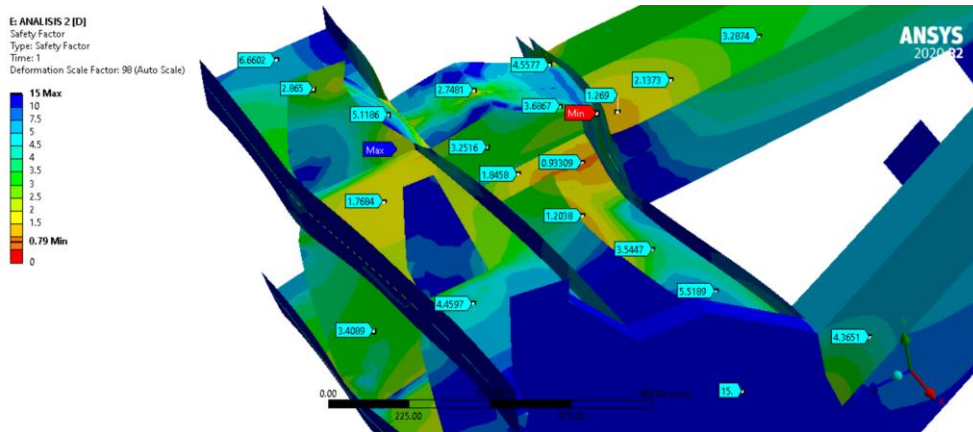


c) Factor de seguridad.

Nota. Se encuentra factores de seguridad con 0.79 en uniones de 90°.

Figura 68

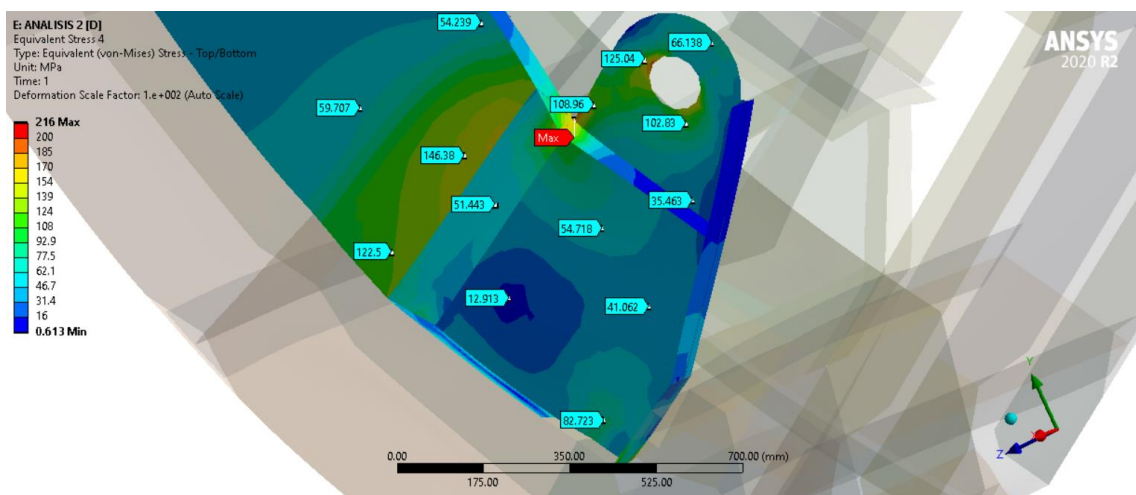
Contacto Superior- Factor de seguridad.



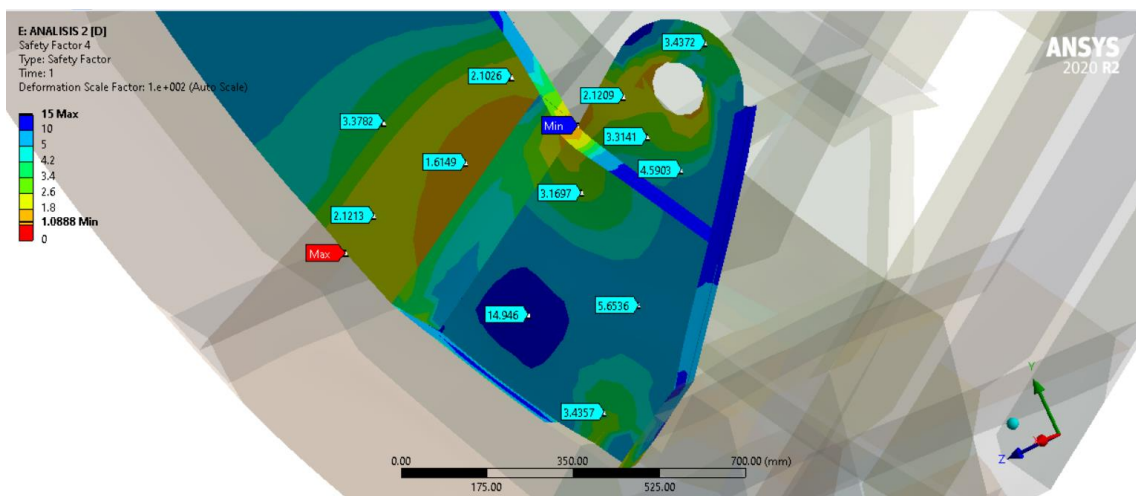
Nota. Se puede ver puntos con factores de seguridad por debajo de 1.

Figura 69

Resultados en la Estructura de accionamiento.



a) Estado de Tensiones



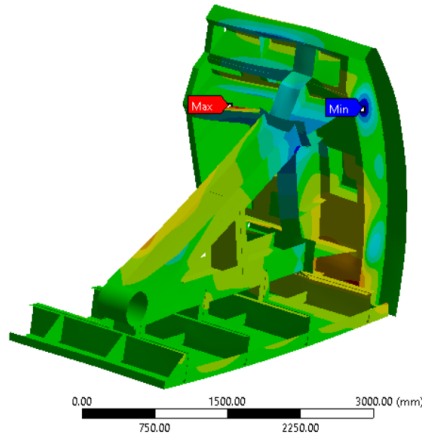
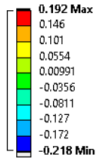
b) Factor de seguridad.

Nota. Presenta puntos muy próximos al límite de fluencia, por tanto, factores de seguridad muy próximos a 1.

Figura 70

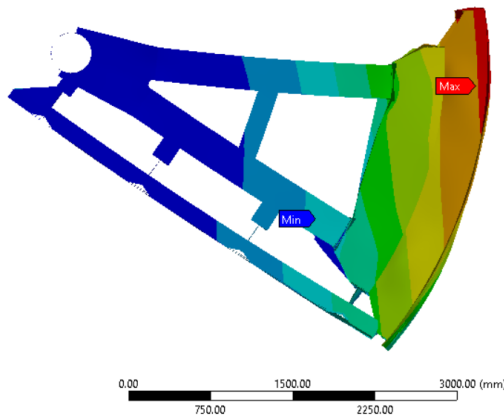
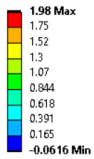
Deformación Direccional

E: ANALISIS 2 [D]
 X Axis - Directional Deformation - 1. s
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



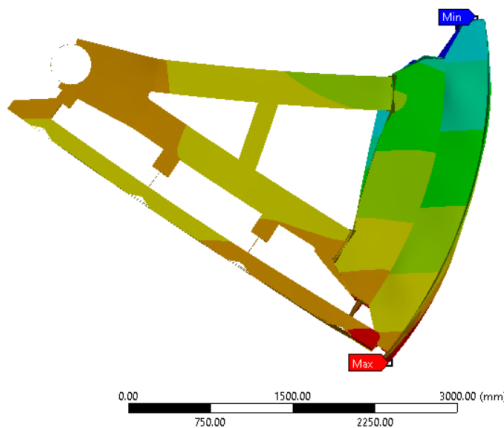
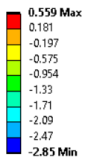
a) Deformación eje X

E: ANALISIS 2 [D]
 Y Axis - Directional Deformation - End Time
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



b) Deformación eje Y

E: ANALISIS 2 [D]
 Z Axis - Directional Deformation - End Time
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



c) Deformación eje z

Nota. Deformaciones en los ejes principales.

4.2.3 Resultados: Condiciones de operación (D+E)

Se evalúa la reacción del momento en el cojinete con el fin de determinar si la compuerta tendría cierre por su propio peso. En este modelo se considera la carga sísmica.

Tabla 10

Reacciones en el cojinete en la Condición de operación (D+E).

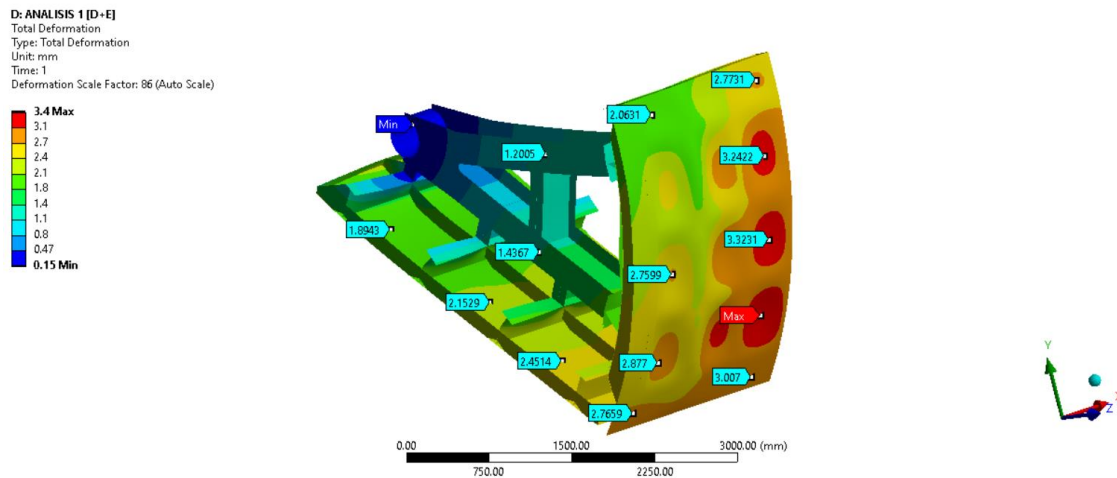
	Condición de operación –[D+E]	Condición de apertura –[D+E]
Reacción de momento eje X	-353.19 N·m	-33.712 N·m
Reacción de momento eje Y	-11189 N·m	-8933. N·m
Reacción de momento eje Z	-3583.2 N·m	-2112.1 N·m
TOTAL	11755 N·m	9179.4 N·m

Nota: Se detalla la reacción de los momentos en el cojinete.

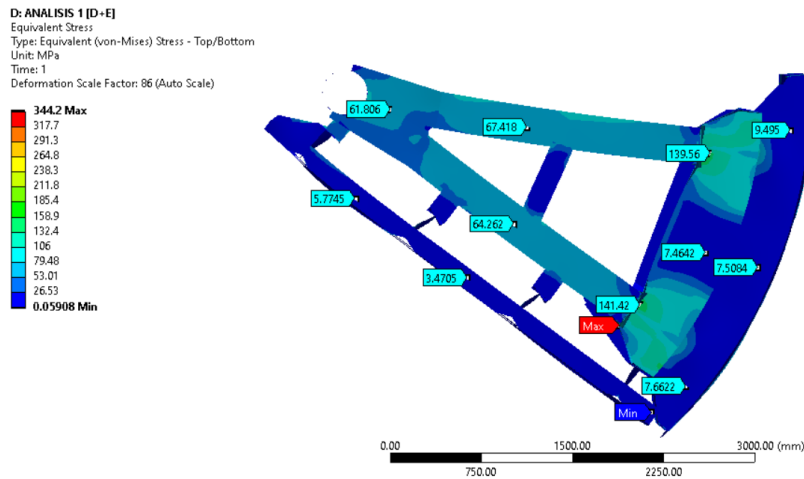
En ambos casos la compuerta tendría cierre por producto por su propio peso. Teniendo un momento positivo respecto al eje X.

Figura 71

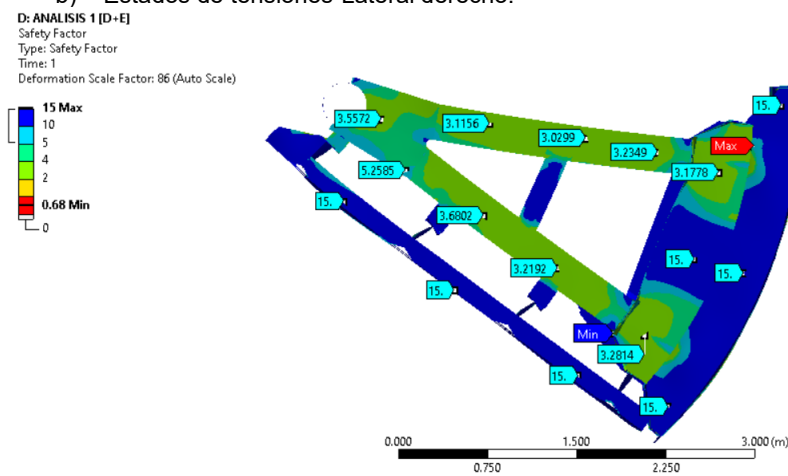
Resultados en la Compuerta Radial.



a) Estado de deformaciones



b) Estados de tensiones-Lateral derecho.

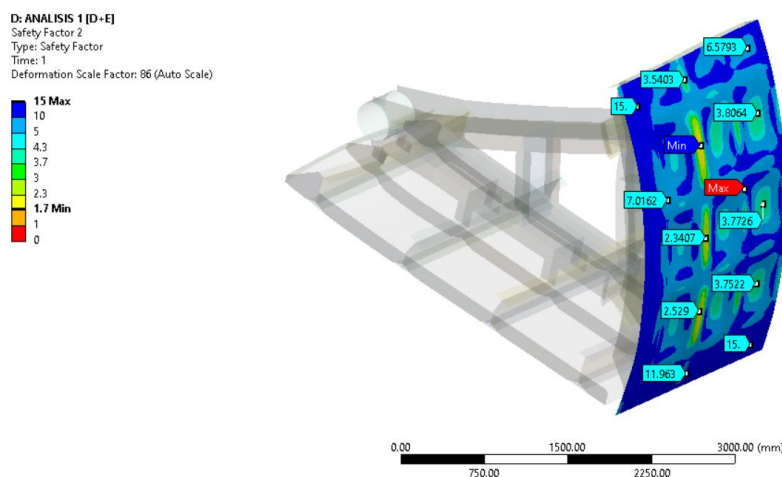


c) Factor de seguridad.

Nota. Factores de seguridad menores a 1.

Figura 72

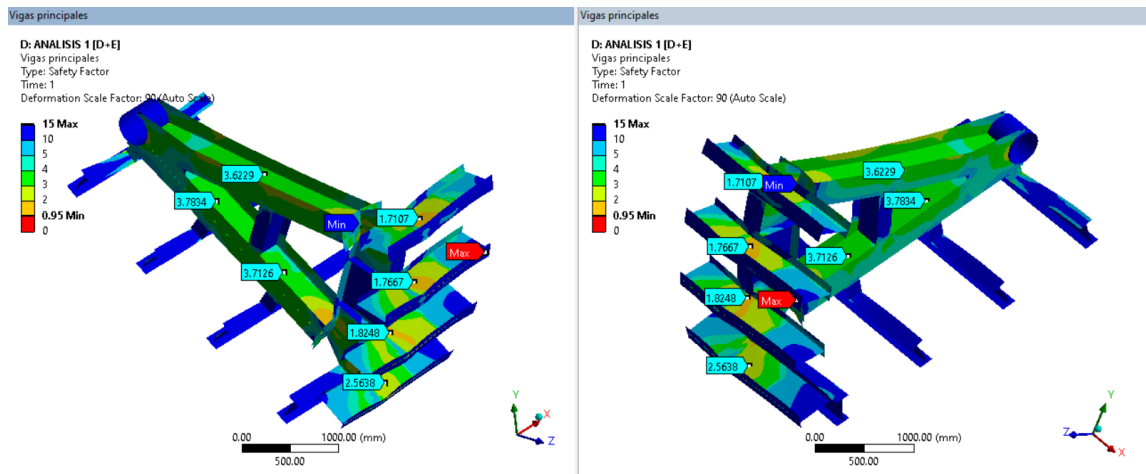
Resultados en la Lámina de contacto. - Factor de seguridad.



Nota. Factores de seguridad superiores a 1.7

Figura 73

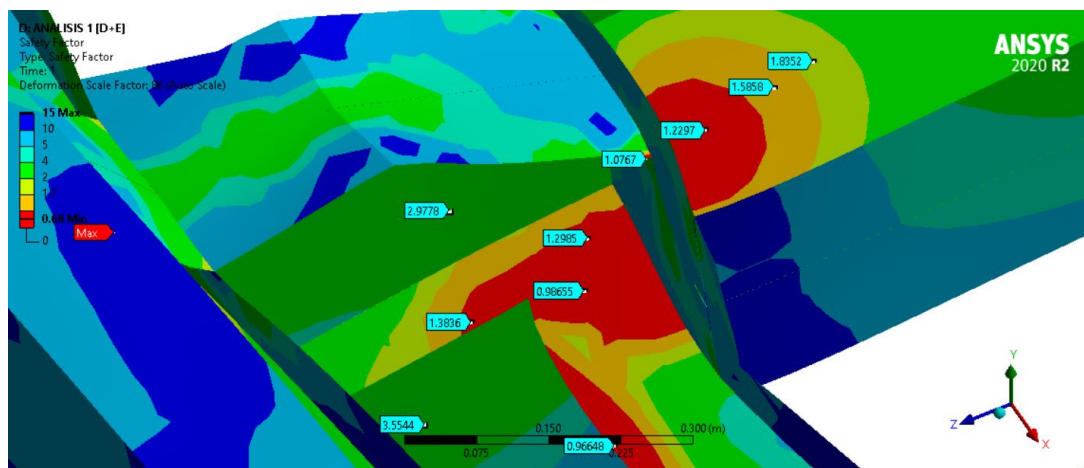
Estructura principal



Nota. El factor de seguridad mínimo está ubicado en el brazo de compuerta.

Figura 74

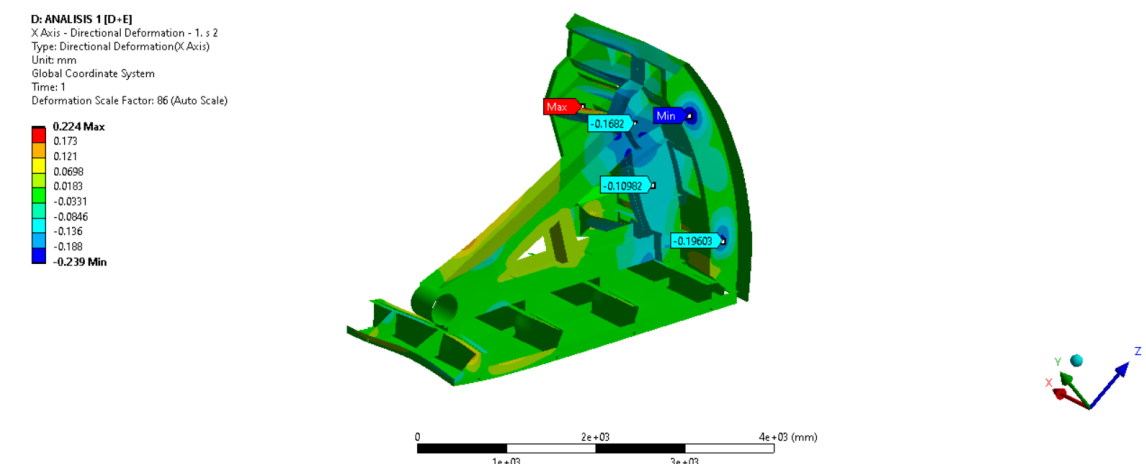
Contacto Superior- Factor de seguridad.



Nota. Se puede ver puntos con factores de seguridad por debajo de 1.

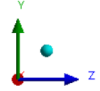
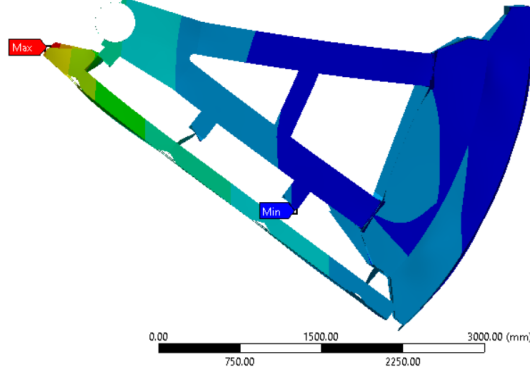
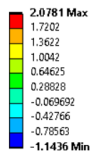
Figura 75

Deformación Direccionales



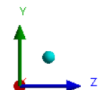
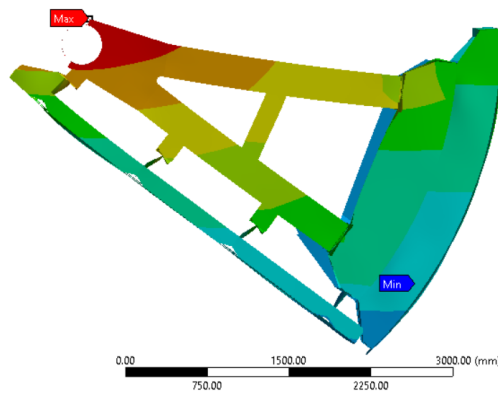
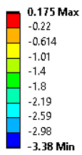
a) Deformación eje X

D: ANALISIS 1 [D+E]
 Y Axis - Directional Deformation - End Time
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 86 (Auto Scale)



b) Deformación eje Y

D: ANALISIS 1 [D+E]
 Z Axis - Directional Deformation - End Time
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 86 (Auto Scale)



c) Deformación eje z

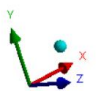
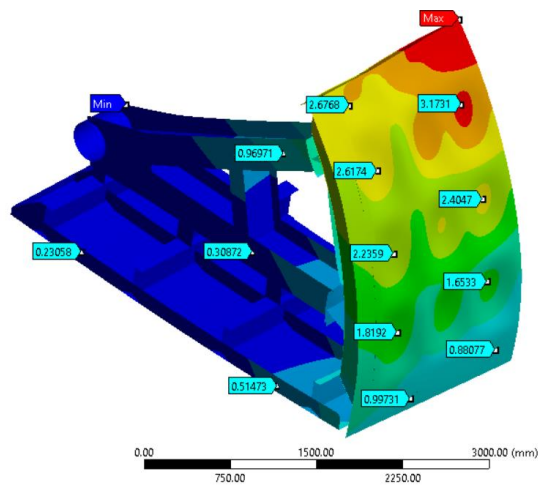
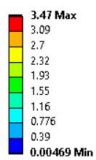
Nota. Deformaciones en los ejes principales.

4.2.4 Resultados: Condición de apertura (D+E).

Figura 76

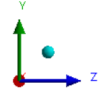
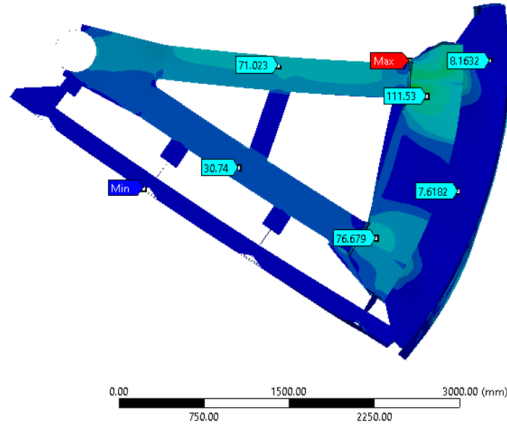
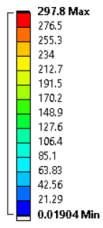
Resultados en la Compuerta Radial.

E: ANALISIS 2 [D+E]
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



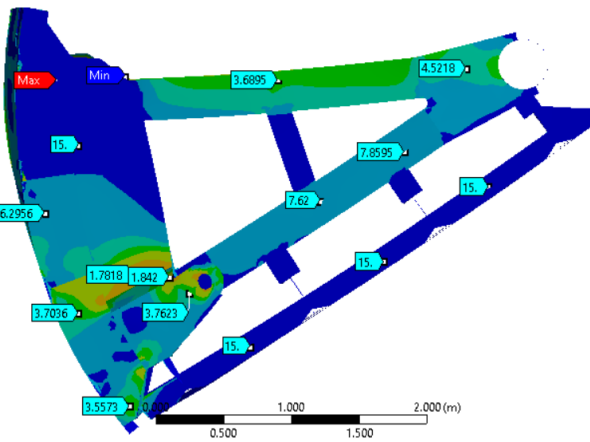
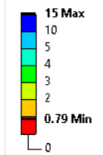
a) Estado de deformaciones

E: ANALISIS 2 [D+E]
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



b) Estados de tensiones-Lateral derecho.

E: ANALISIS 2 [D+E]
 Safety Factor
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



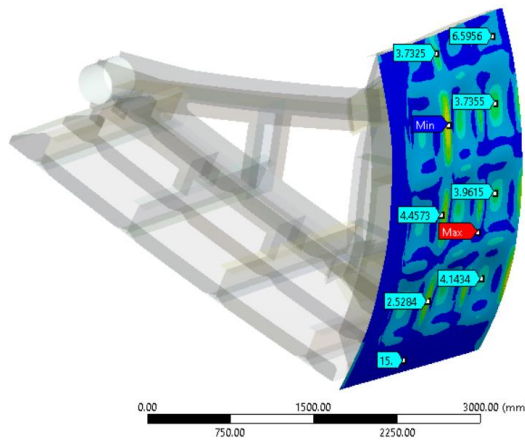
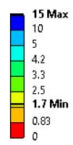
c) Factor de seguridad

Nota. Factores de seguridad menores a 1.

Figura 77

Resultados en la Lámina de contacto. - Factor de seguridad.

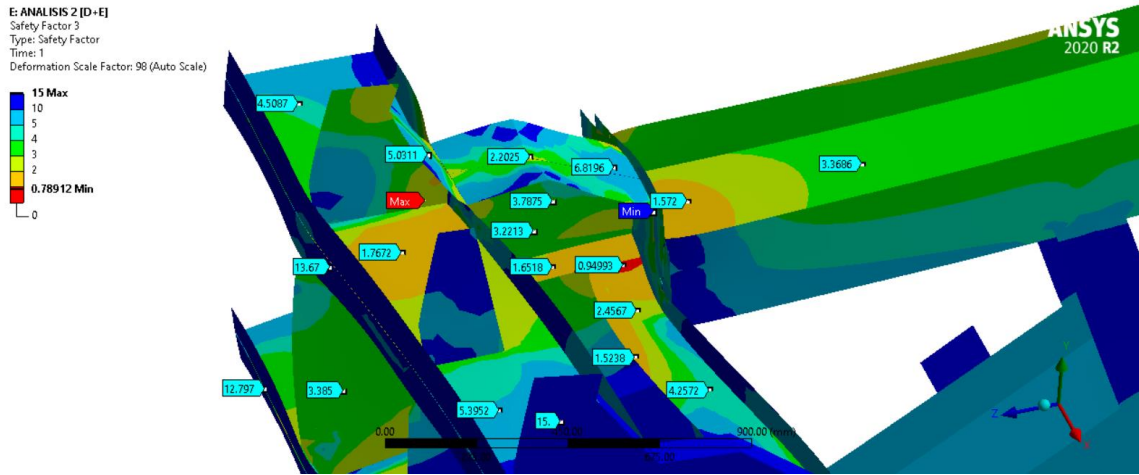
E: ANALISIS 2 [D+E]
 Safety Factor 2
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



Nota. Factores de seguridad superiores a 1.7

Figura 78

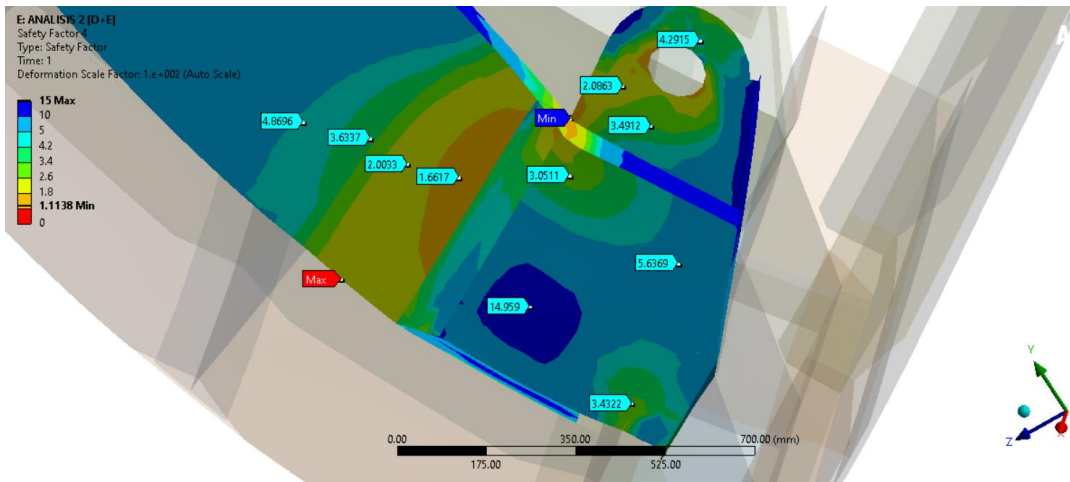
Contacto Superior.



Nota. Presenta zonas con factores de seguridad menores a 1.

Figura 79

Estructura de accionamiento.

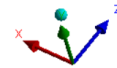
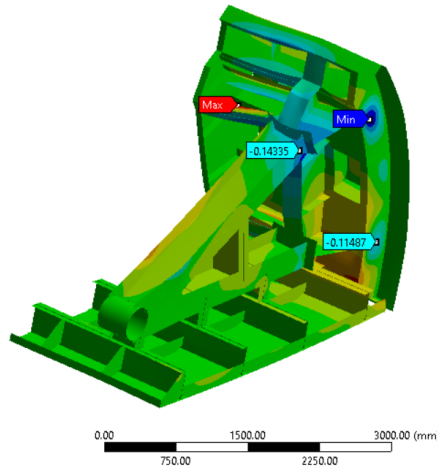
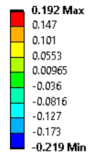


Nota. Factores de seguridad superior a 1.

Figura 80

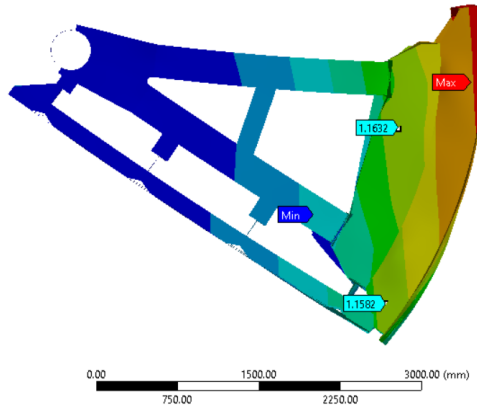
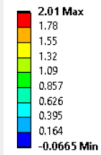
Deformación Direccionales

E: ANALISIS 2 [D+E]
 X Axis - Directional Deformation - 1. s
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



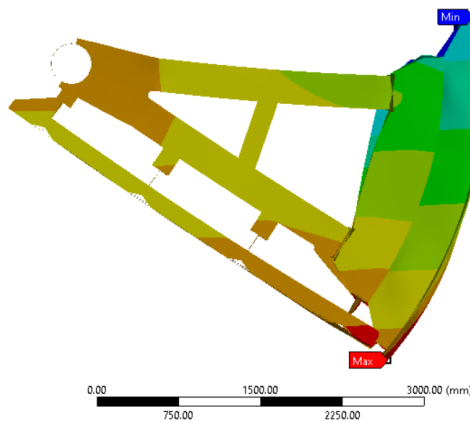
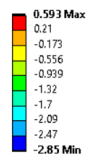
d) Deformación eje X

E: ANALISIS 2 [D+E]
 Y Axis - Directional Deformation - End Time
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



e) Deformación eje Y

E: ANALISIS 2 [D+E]
 Z Axis - Directional Deformation - End Time
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.e+002 (Auto Scale)



f) Deformación eje z

Nota. Deformaciones en los ejes principales.

4.2.5 Análisis de resultados

De los resultados obtenidos en las dos condiciones de operación del diseño original. Al evaluar los esfuerzos admisibles en los elementos estructuras bajo la normativa NBR-8883, podemos determinar los factores de seguridad mínimos.

De la **tabla 4**, de los coeficientes de esfuerzos admisibles para los diferentes elementos estructurales.

Esfuerzos combinados en la placa de la superficie.

Esfuerzos combinados = 0.87 (Esfuerzo admisible).

El factor de seguridad mínimo con carga normal es de **1.149** y con carga excepcional es **1.086**.

Los esfuerzos combinados, para la estructura se considera:

Esfuerzos combinados = 0.76 (Esfuerzo admisible).

El factor de seguridad mínimo con carga normal es de **1.315** y con carga excepcional es **1.086**

En adelante se evaluará la compuerta con estos criterios de diseño. El análisis del dominio original nos permitirá establecer una línea base, para el proceso de optimización, por ello la importancia de realizar la combinación de cargas.

Por eso la importancia de la evaluación de la reacción en los cojinetes y las deformaciones direccionales producto de la carga sísmica. Nos permitirá evaluar si la compuerta tiene cierre producto de su propio peso el cual es un requerimiento de diseño para este tipo de compuertas.

a) Lámina de contacto

En las Condición de operación (D), condición de apertura (D), condición de operación con carga sísmica (D+E) y la condición de apertura con carga sísmica (D+E). Presenta un factor de seguridad 1.7, el cual superior a los 1.149 mínimos.

b) Estructuras.

En general la estructura presenta factores de seguridad superiores a los 1.315. En la figura 74, condición de operación con carga sísmica (D+E), presenta regiones con factores de seguridad menores a 1, es una región que necesitamos optimizar, mejorar la transmisión de esfuerzo. Si bien hay superficies que tienen perpendicularidad que inducen a generar singularidades. Por la complejidad de la geometría y el análisis presenta singularidad en el vértice, pero también presenta concentradores de esfuerzos muy próximos a las zonas. Esto sucede en todas las combinaciones de cargas.

En la figura 69 Condición de apertura (D), y Figura 79 Condición de apertura con carga sísmica (D+E), podemos encontrar factores de seguridad de 1.088 y 1.1138 respectivamente, justamente en el vértice, estando por debajo de 1.315. Es necesario optimizar la zona para evaluar la singularidad. La mayoría de las regiones superan el factor de seguridad de 1.315

Tras evaluar el cierre de la compuerta por gravedad, en la condición de operación se tiene momentos que mantendrían la compuerta cerrada, pero no podríamos determinar si cumple con el 20% de margen adicional. Recordemos que el dominio representa a la estructura, pero al general se omiten estructuras, pernerías, soldadura, etc. lo que afectaría el peso de la compuerta.

Las deformaciones direccionales nos permiten evaluar el efecto de la carga sísmica, pero al comparar la condición de Operación [D] y [D+E], se nota la poca influencia de esta en todo el sistema. Lo mismo sucede en la condición de apertura en las dos condiciones, como se indica en la tabla 10.

Tabla 11*Deformaciones direccionales máximas y mínimas*

Deformación direccional	Operación[D]		Apertura [D]		Operación [D+E]		Apertura [D+E]	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
x	0.223	-0.239	0.192	-0.218	0.224	-0.239	0.192	-0.219
y	2.046	-1.1237	1.98	-0.0616	2.078	-1.14	2.01	-0.066
z	0.172	-3.35	0.559	-2.85	0.175	-3.38	0.593	-2.85

Nota. Se evalúa las deformaciones para evaluar la influencia de la carga sísmica en todo el dominio.

4.3 Optimización.

Para el proceso de optimización es necesario mantener parámetros que definen su funcionamiento, por los cuales se tomarán las siguientes restricciones.

- Los puntos de accionamiento de la compuerta se mantendrán, puesto que se mantiene un sistema hidráulico de accionamiento.
- Las dimensiones principales no podrán ser modificadas, como la posición del origen y el radio de curvatura.
- Para el proceso de optimización se usará las condiciones de contorno de operación (D), se trabajará con una malla de 40mm.

4.3.1 Modificaciones en la geometría.

Tras el análisis de la estructura en las dos condiciones de operación, se procedió a realizar las modificaciones en la estructura. El modelo original presenta singularidades; se busca en el nuevo modelo eliminarlas mediante variaciones en la geometría; afinando la malla no se consiguieron eliminarlas.

La primera modificación es el retiro de la base inferior de refuerzo de la compuerta. En los resultados de los análisis de la primera y segunda condición se comprobó que no tiene un funcionamiento estructural. Se define que la nueva compuerta radial no llevara refuerzo inferior.

a) Evaluación de la geometría sin refuerzo interior.

Para este proceso se inició evaluando la estructura sin el refuerzo interior, manteniendo las propiedades mecánicas, tamaño de elemento, condiciones de contorno, y las cargas aplicadas de la condición de operación (D).

La evaluación de la estructura muestra, un comportamiento similar; las deformaciones máximas tienden a incrementarse de 3.58mm a 3.83mm, lo que representa un incremento del 6.9%. Las tensiones máximas en las zonas críticas se reducen de 339.96MPa a 331.42MPa, lo que representa un 2.51% en la reducción de esfuerzos.

Se evalúa la reacción del momento en el cojinete con el fin de determinar si la compuerta tendría cierre por su propio peso.

Tabla 12

Reacciones en el cojinete.

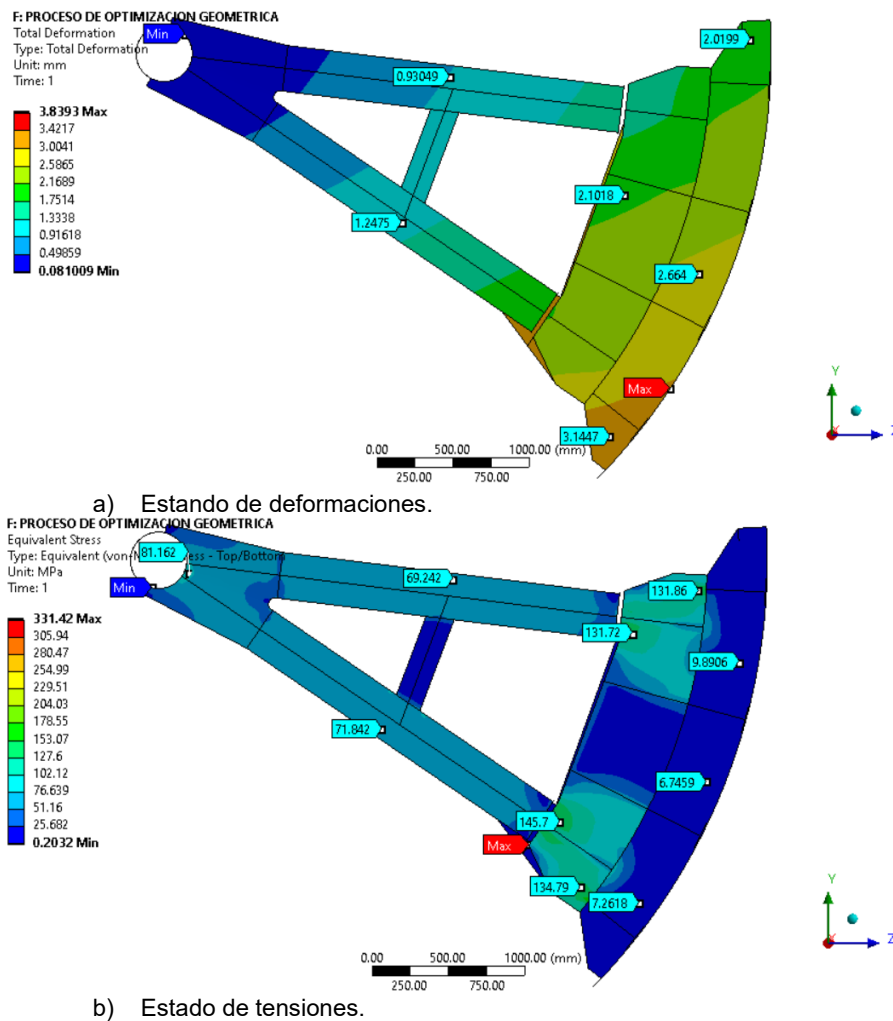
	Condición de operación –[D]
Reacción de momento eje X	-200.29 N·m
Reacción de momento eje Y	-11041 N·m
Reacción de momento eje Z	-48480 N·m
TOTAL	12057 N·m

Nota: Solo se analizada en la condición de operación.

Tras la modificación la compuerta tendría todavía el cierre por gravedad. El nuevo modelo tendría un peso de 4244.5 kg, el primer modelo tenía un peso de 5579.3 kg. Al retirar la base inferior se redujo el peso del dominio en 1334.8 kg.

Figura 81

Deformación y Estado de Tensiones en el Refuerzo Inferior.



Nota. Tamaño de elemento de 40mm; Deformación máxima en 3.8mm y esfuerzo máximo 331.42Mpa

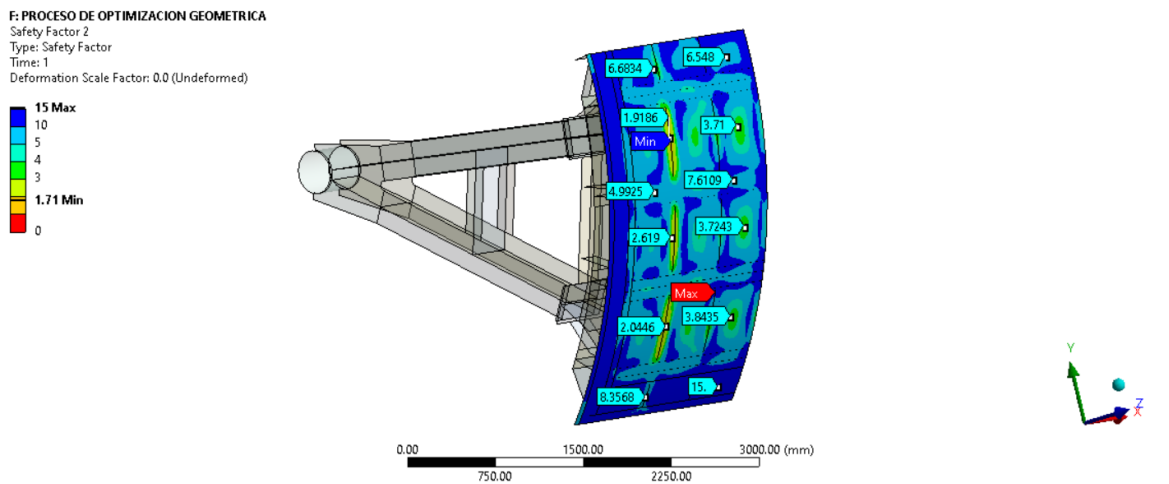
Se procedió a evaluar los elementos estructurales principales.

a) Resultados en la En la lámina de contacto:

Las deformaciones máximas se incrementaron en 3.3641mm a 3.8393mm. Los esfuerzos máximos se redujeron de 139.18MPa a 137.48Mpa. Como se indica en la Figura 71.

Figura 82

Factor de seguridad en la Cara de Contacto.



Nota. Factores de seguridad superiores a 1.7

b) Estructura principal del Refuerzo de brazo.

Se evalúa los esfuerzos en la estructura principal de refuerzo de brazo, los esfuerzos máximos disminuyen de 169.13Mpa a 168.11Mpa como se indica en la Figura 72.

Para mayor detalle, revisar los archivos de optimización, donde se puede visualizar los resultados del estado de deformaciones y tensiones en toda en la estructura.

Los resultados demuestran que si retiramos el refuerzo inferior no hay mayor variación en el comportamiento estructural. El peso del dominio sin modificación es de 5579.3kg. El nuevo dominio pesa 4244.5kg.

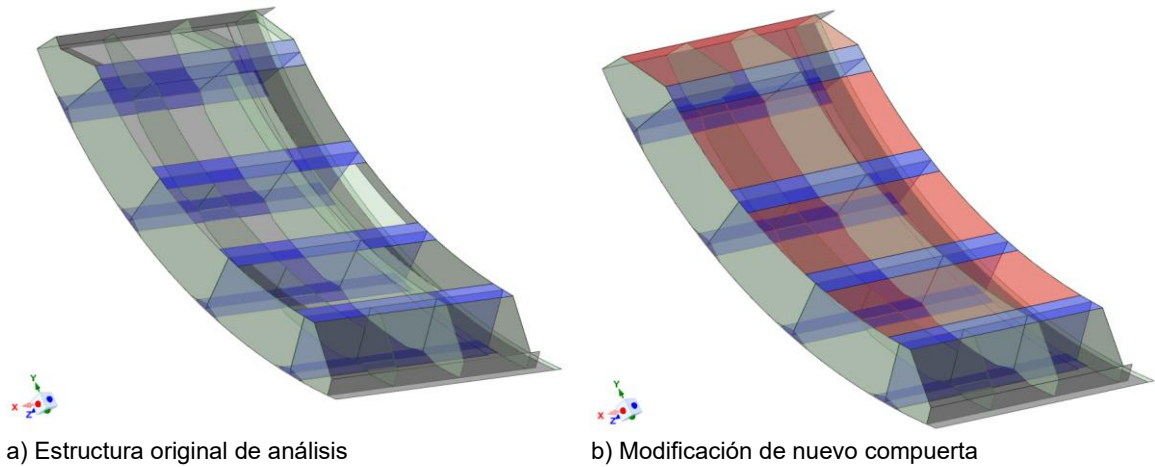
b) Optimización de Geometría.

• Estructura de contacto.

El nuevo diseño está constituido por laminas curvas las cuales conectan entre perfiles entre los perfile IPE 400 como se muestra en la Figura 83-b; esto permitirá aumentara la rigidez de la estructura. Se busca una estructura cerrada que permita una continuidad en la distribución de esfuerzos y deformaciones. Con este modelo se busca recuperar la rigidez que se presentó al retirar el refuerzo inferior. Se mantiene los perfiles IPE 400 y los radios de curvatura originales.

Figura 83

Optimización de la Estructura de Contacto



Nota. Superficie de color rojo agregada a la estructura a la cual se le asignará un espesor y material para un posterior análisis.

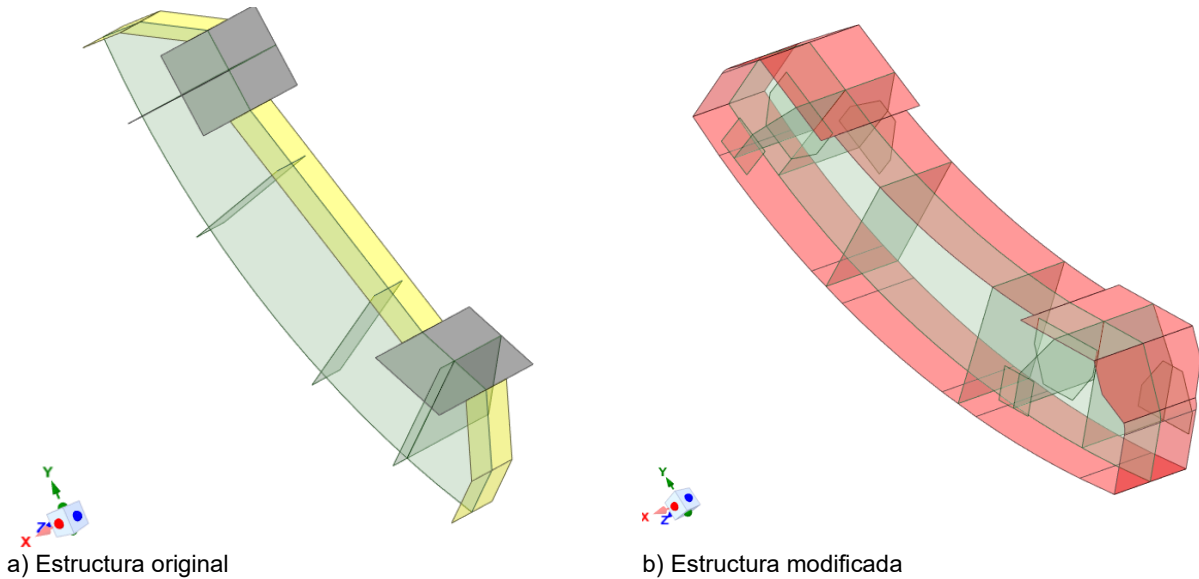
Los espesores de las caras de contacto se mantuvieron, pero como se buscaba una estructura más rígida, se procedió a incrementar algunos espesores como se muestra en la Figura 86, Así también permitió incrementar el peso la estructura, con el fin de tener un cierre por propio peso.

- **Refuerzo de Brazo.**

Se incrementa la rigidez, dándole continuidad a todo el contorno e incrementando los espesores (color rojo, Figura 84). Se varia la geometría de la estructura principal de tal manera que permita una mejor continuidad de esfuerzos y deformaciones. Se mantiene las posiciones originales de empernado del refuerzo de brazo con el brazo de la compuerta.

Figura 84

Optimización de la Estructura de Refuerzo de Brazo.



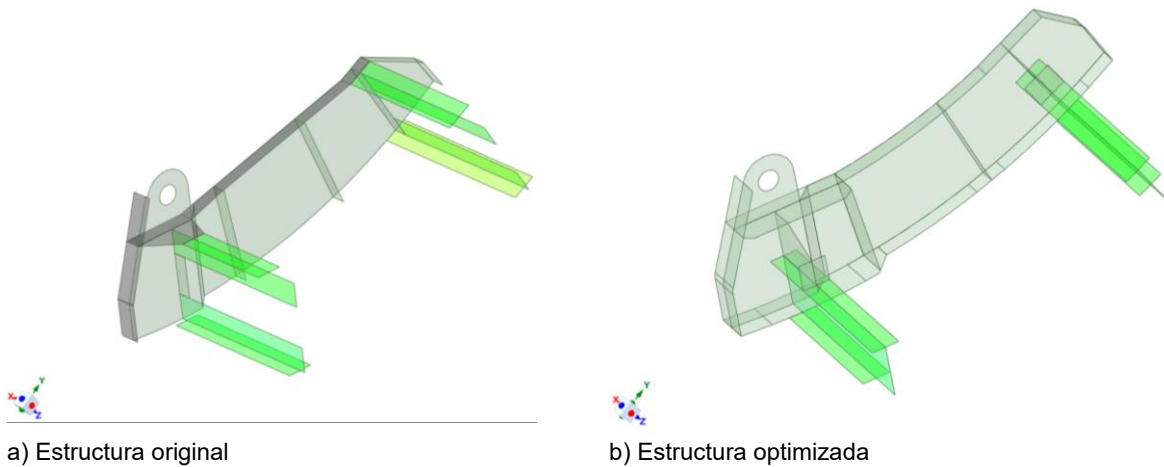
Nota. La nueva estructura optimizada, superficie de color rojo agregada a la estructura a la cual se le asignará un espesor y material para un posterior análisis.

- **Refuerzo de accionamiento.**

La estructura original presentaba perfiles IPE 330 partidos a la mitad, estos conectan el refuerzo de accionamiento y refuerzo de brazo como se muestra en la Figura 75 a). En el Análisis se encontró zonas puntuales donde los esfuerzos superan al límite de fluencia del acero. Por eso se tomó la decisión de mantener los perfiles IPE 330 completo y conectarlas como se muestra en la Figura 75 b), pero al cual se le agrego superficies complementarias que permiten una mejor transmisión de esfuerzos. Se mantuvo el perfil L y se agregó curvaturas.

Figura 85

Optimización de la Estructura de Refuerzo de Accionamiento.



a) Estructura original

b) Estructura optimizada

Nota. optimizada los perfiles IPE 330 no divididos a la mitad, se agregan estructuras complementarias.

- **Brazo**

Los perfiles HEB 400 del brazo no se modificaron. Las otras superficies se mantienen, pero se evaluará los espesores de las laminas complementarias y la asignación material de la estructura.

4.3.2 Generación del modelo

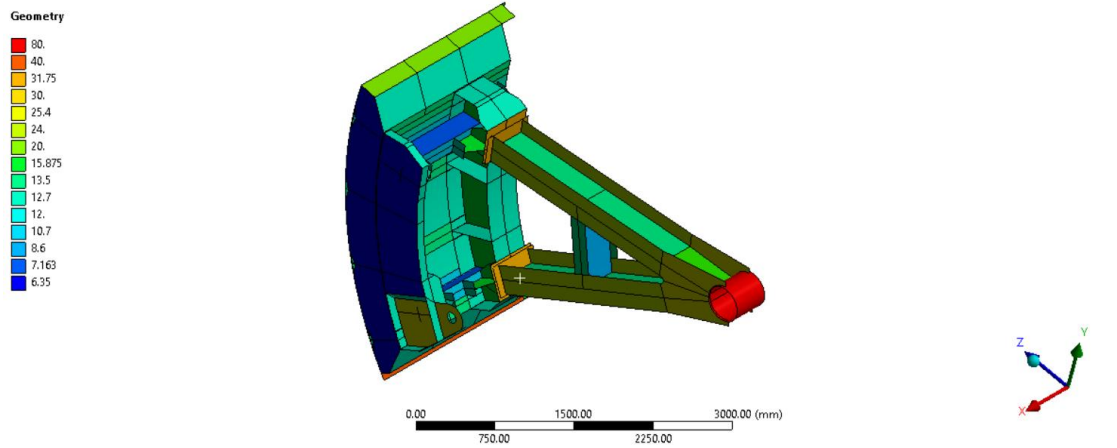
El análisis de la estructura fue realizado en las dos condiciones estáticas ya mencionadas en los capítulos anteriores. También se evalúa la carga sísmica.

a) Dominio de la nueva compuerta radial

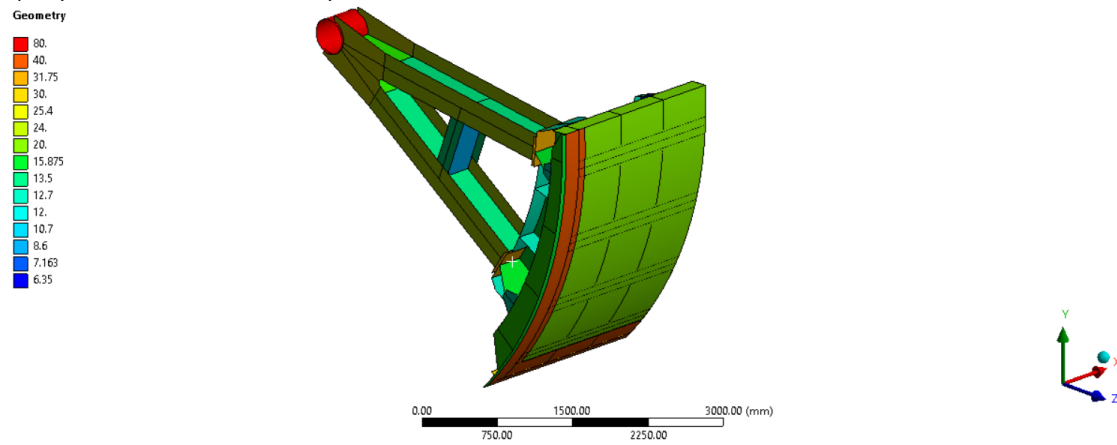
Con las modificaciones geométricas en la estructura, en el proceso de optimización en el cual se busca obtener una mayor rigidez en toda la estructura, se procedió también a incrementar algunos espesores como se indica en la Figura 86.

Figura 86

Dominio de nueva compuerta optimizada.



a) Espesores de la nueva compuerta – Isométrico 1



b) Espesores de la nueva compuerta – Isométrico 2

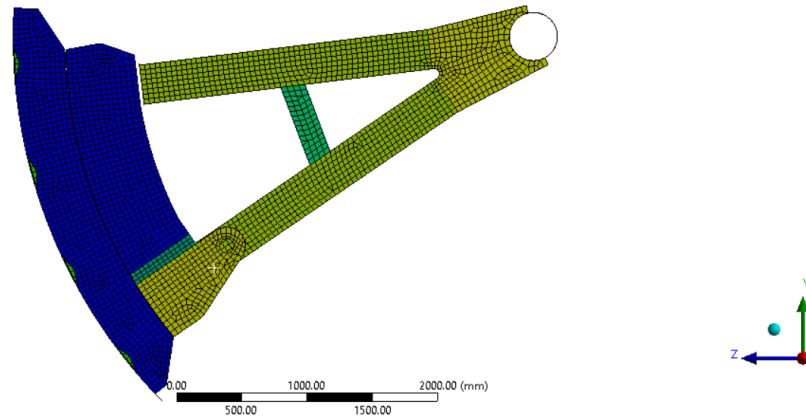
Nota. Se procedió a incrementar espesores en algunas zonas. En las figuras se muestra los nuevos espesores en milímetros.

b) Malla de la nueva compuerta radial.

El nuevo dominio se trabaja con el mismo tamaño de elemento, 40 mm en una malla global.

Figura 87

Discretización del dominio.



Nota. Tamaño global de elemento de 40mm.

4.3.3 Evaluación de materiales

El acero estructural que se busca, es un acero de alta resistencia, como los aceros A572, A618, A913 y A992. Y para las estructuras complementarias se usará un acero de bajo carbono como los aceros A36, A53, A500, A501 y A529.

- El acero ASTM 36, con un límite de fluencia de 250Mpa será usado para las partes no estructurales.
- El acero A572 grado 50, será usado para parte estructural cuyo límite de fluencia es 350Mpa.

4.3.4 Resultados: Condición de operación (D)

Se evalúa la reacción del momento en el cojinete con el fin de determinar si la compuerta tendría cierre por su propio peso.

Tabla 13

Reacciones en el cojinete en la condición de operación (D)

	Condición de operación –[D]	Condición de apertura –[D]
Reacción de momento eje X	-165.22 N·m	-44.047 N·m
Reacción de momento eje Y	37046 N·m	2713.2 N·m
Reacción de momento eje Z	14074 N·m	-8582.3 N·m
TOTAL	39629 N·m	9001.1 N·m

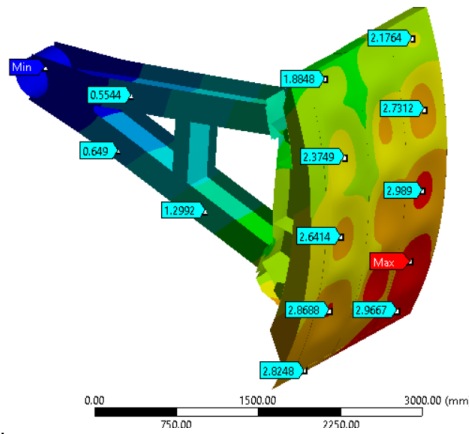
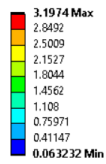
Nota: Se detalla la reacción de los momentos en el cojinete.

En ambos casos la compuerta tendría cierre por su propio peso. Teniendo un momento positivo respecto al eje X. La compuerta fue diseñada para un cierre por gravedad. El dominio de la nueva compuerta presenta un peso de 4885.6 kg.

Figura 88

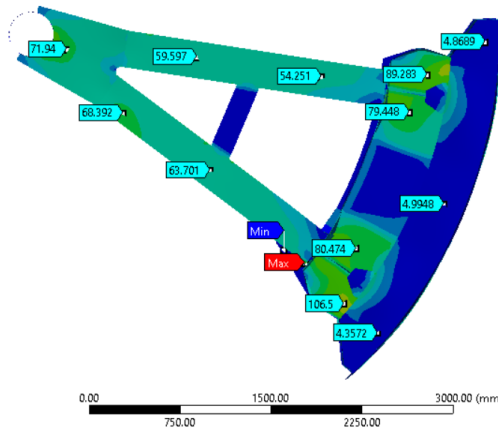
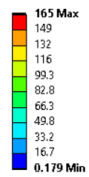
Resultados en la Compuerta Radial.

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D)
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



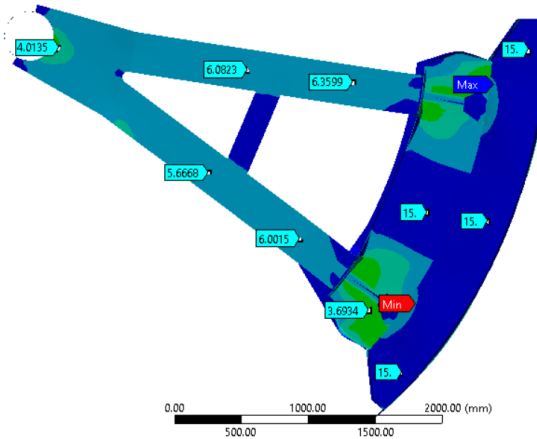
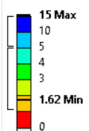
a) Estado de deformaciones

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D)
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



b) Estados de tensiones-Lateral derecho.

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D)
 Safety Factor
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



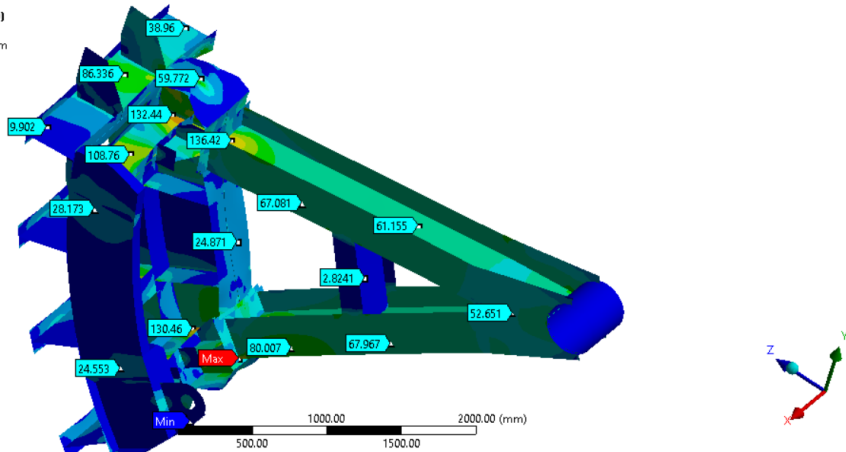
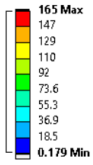
c) Factor de seguridad.

Nota. Factores de seguridad superiores a 1.62.

Figura 89

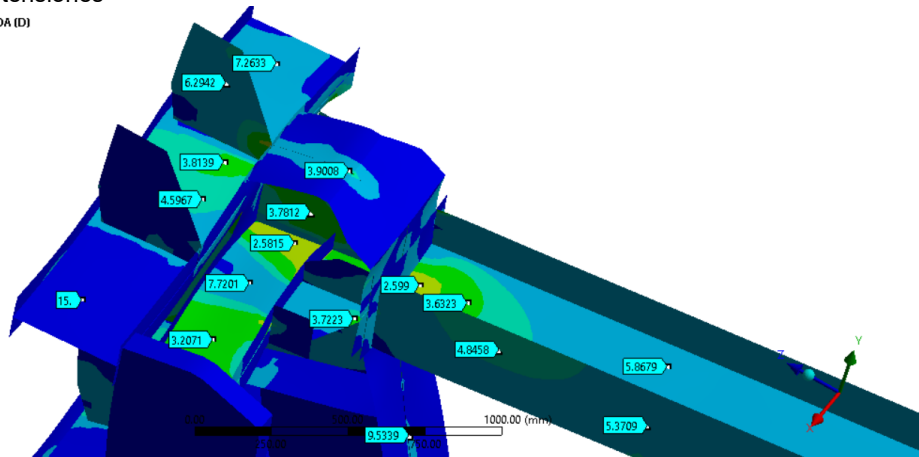
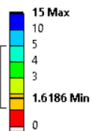
Estructura principal.

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D)
 Equivalent Stress 8
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 94 (Auto Scale)



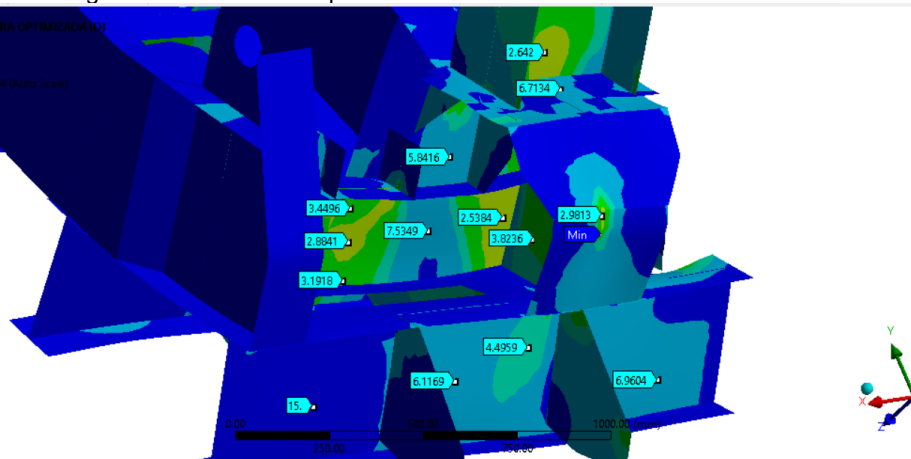
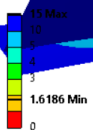
a) Estados de tensiones

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D)
 Safety Factor 2
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 94 (Auto Scale)



b) Factor de seguridad. -Estructura superior

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D)
 Safety Factor 2
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 94 (Auto Scale)

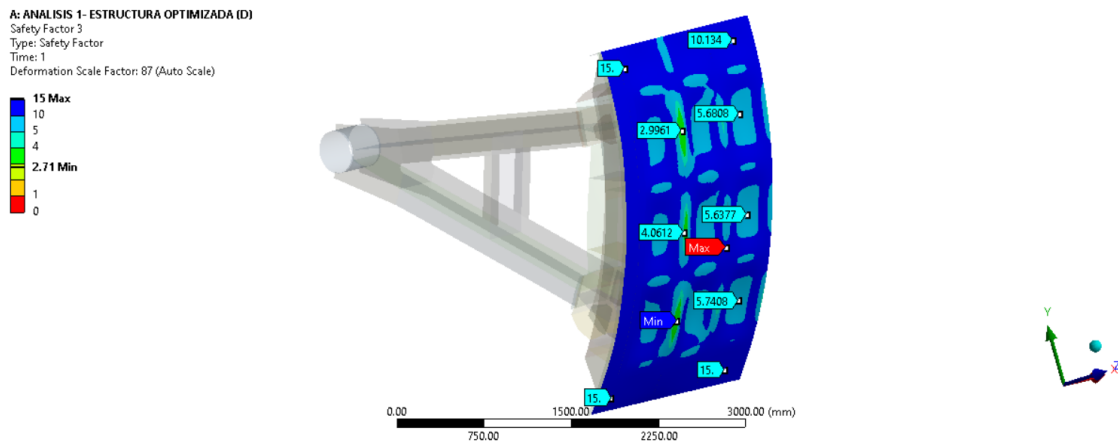


c) Factor de seguridad. -Estructura Inferior.

Nota. Factores de seguridad superiores a 1.62.

Figura 90

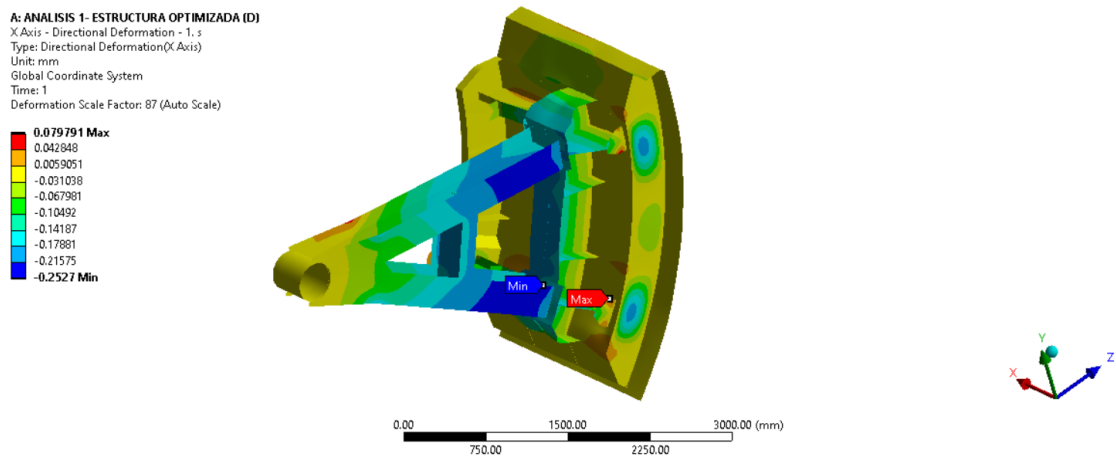
Resultados en la Compuerta Radial.



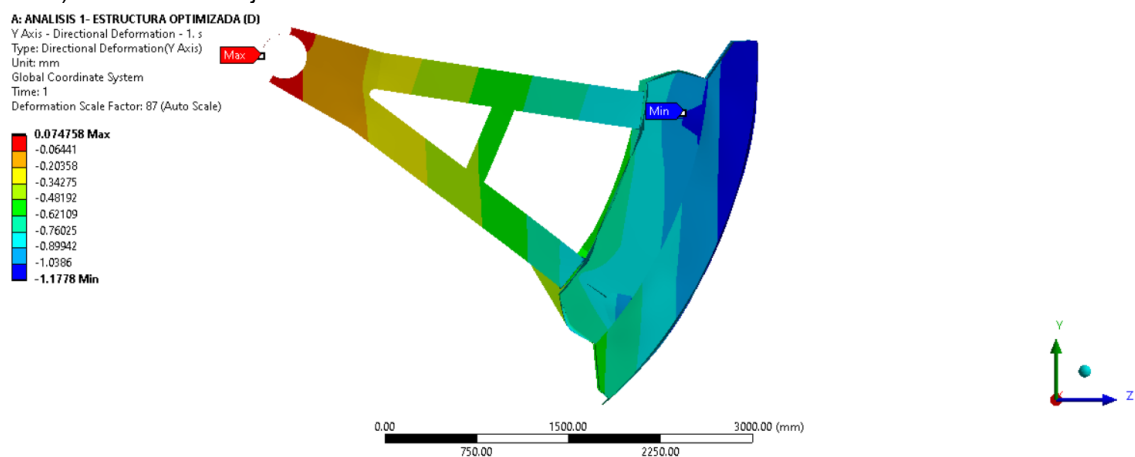
Nota. Factores de seguridad superiores a 2.71

Figura 91

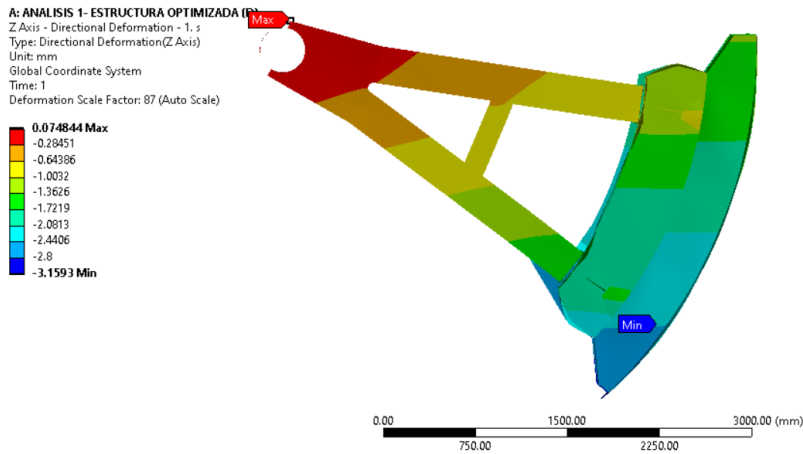
Deformación Direccionales



a) Deformación eje X



b) Deformación eje Y



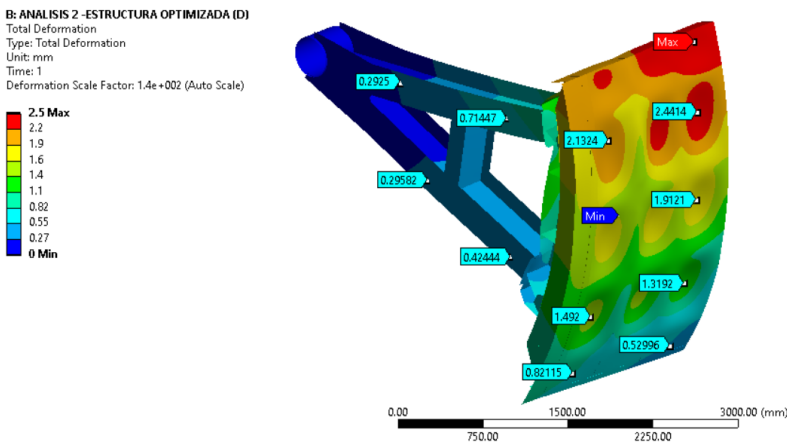
c) Deformación eje z

Nota. Deformaciones en los ejes principales.

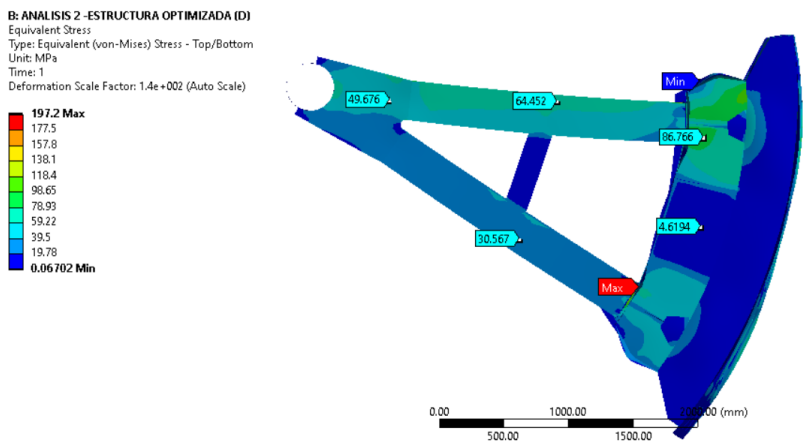
4.3.5 Resultados: Condición de apertura (D)

Figura 92

Resultados en la Compuerta Radial.

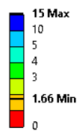


d) Estado de deformaciones



e) Estados de tensiones-Lateral derecho.

B: ANALISIS 2 - ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D)
 Safety Factor
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)

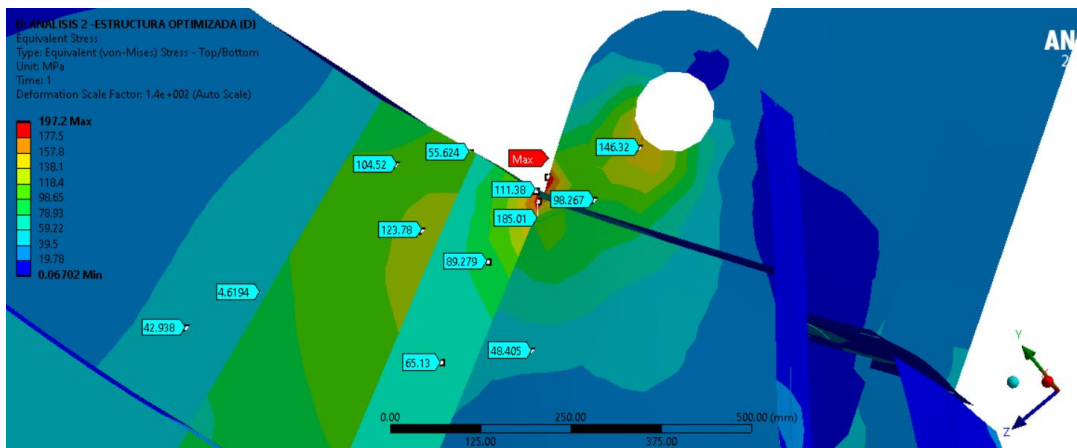


f) Factor de seguridad.

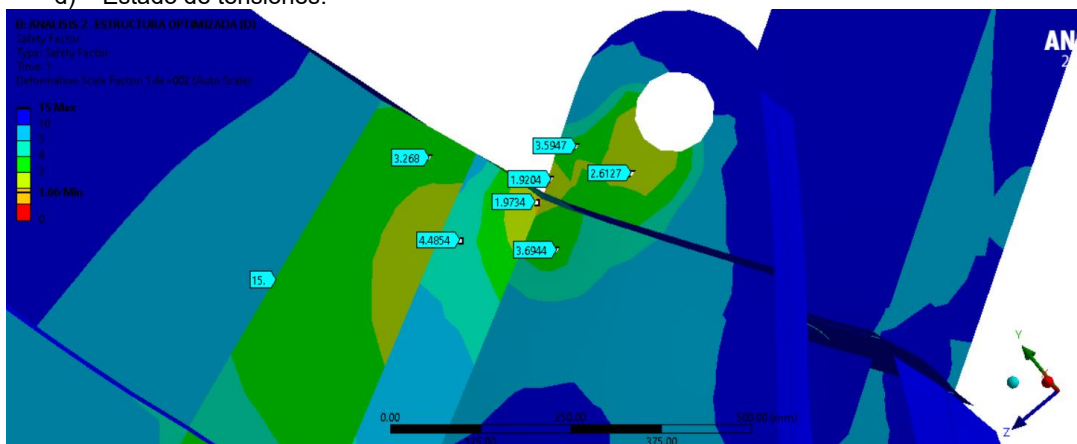
Nota. Factores de seguridad superiores a 1.66.

Figura 93

Estructura principal.



d) Estado de tensiones.



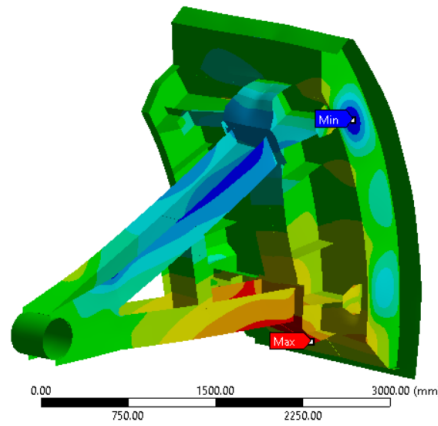
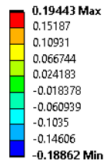
e) Factor de seguridad.

Nota. Factores de seguridad superiores a 1.66. Punto de singularidad en la unión

Figura 94

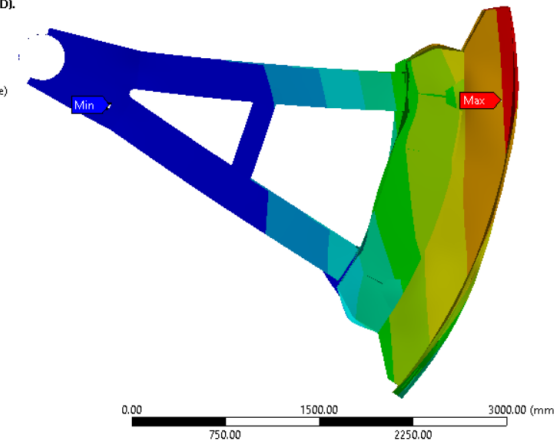
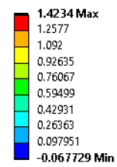
Deformación Direccionales

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D).
X Axis - Directional Deformation - 1. s
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



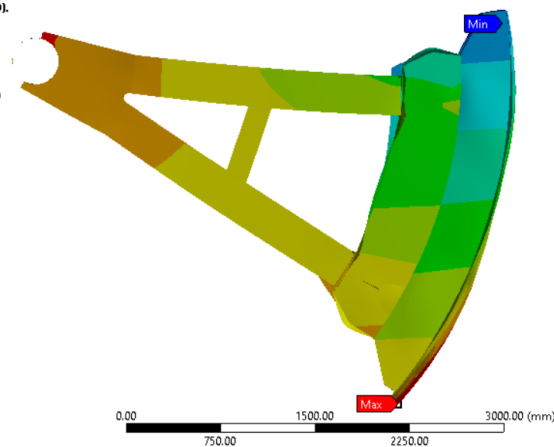
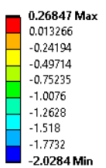
a) Deformación eje X

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D).
Y Axis - Directional Deformation - 1. s
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



b) Deformación eje Y

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D).
Z Axis - Directional Deformation - 1. s
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



c) Deformación eje z

Nota. Deformaciones en los ejes principales.

4.3.6 Resultados: Condición de operación (D+E)

Se evalúa la reacción del momento en el cojinete con el fin de determinar si la compuerta tendría cierre por su propio peso. Se incluye la carga sísmica para los dos análisis.

Tabla 14

Reacciones en el cojinete en la Condición de operación (D+E)

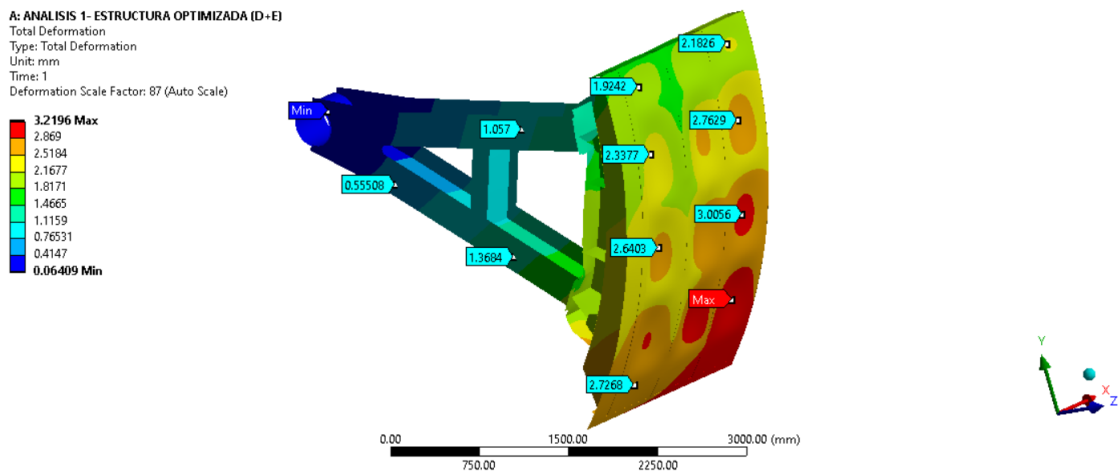
	Condición de operación –[D+E]	Condición de apertura –[D+E]
Reacción de momento eje X	-167.94 N·m	-42.186 N·m
Reacción de momento eje Y	36159 N·m	3827. N·m
Reacción de momento eje Z	13769 N·m	-8158.1 N·m
TOTAL	38693 N·m	9011.3 N·m

Nota: Se detalla la reacción de los momentos en el cojinete.

En ambos casos la compuerta tendría cierre por su propio peso. Teniendo un momento positivo respecto al eje X. La compuerta fue diseñada para un cierre por gravedad. El dominio de la nueva compuerta presenta un peso de 4885.6 kg.

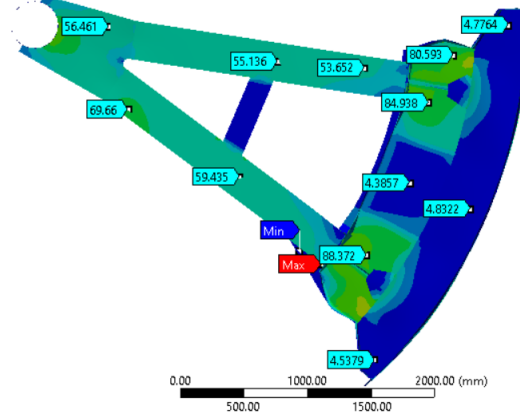
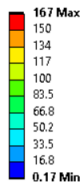
Figura 95

Resultados en la Compuerta Radial.



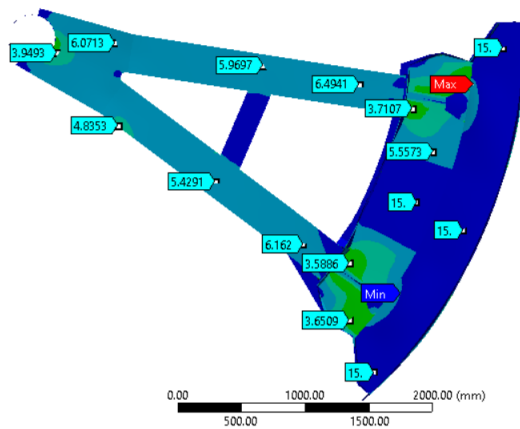
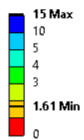
g) Estado de deformaciones

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D-E)
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Times: 1
 Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



h) Estados de tensiones-Lateral derecho.

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D-E)
 Safety Factor
 Type: Safety Factor
 Unit: -
 Times: 1
 Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



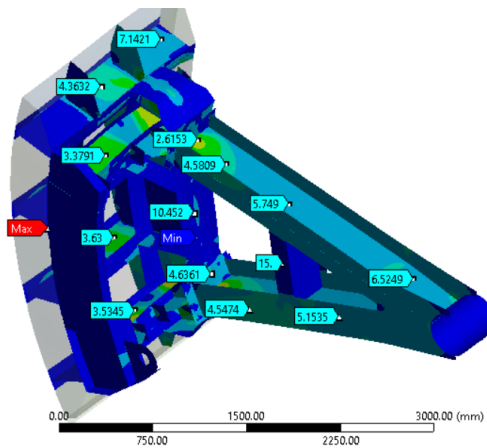
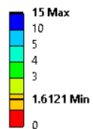
i) Factor de seguridad.

Nota. Factores de seguridad superiores a 1.61

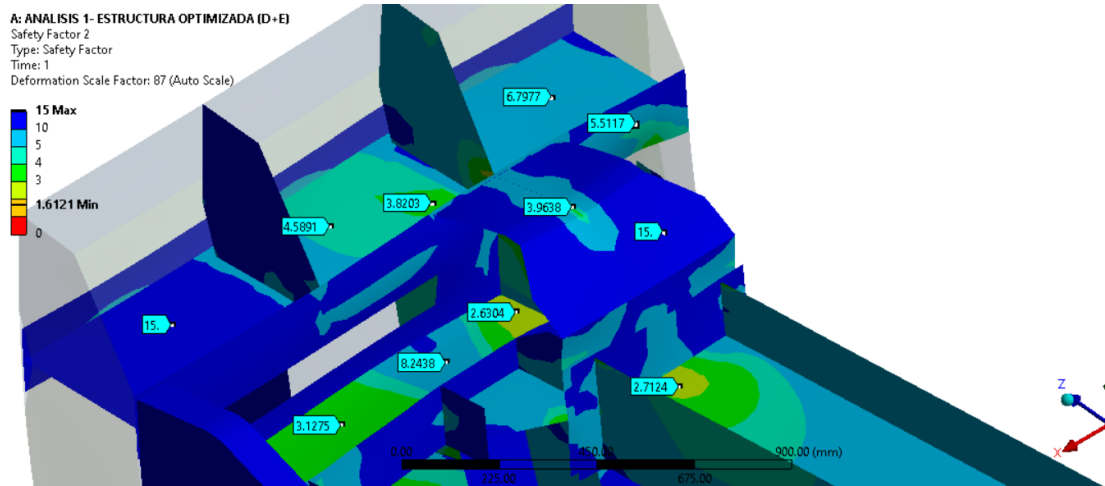
Figura 96

Estructura principal.

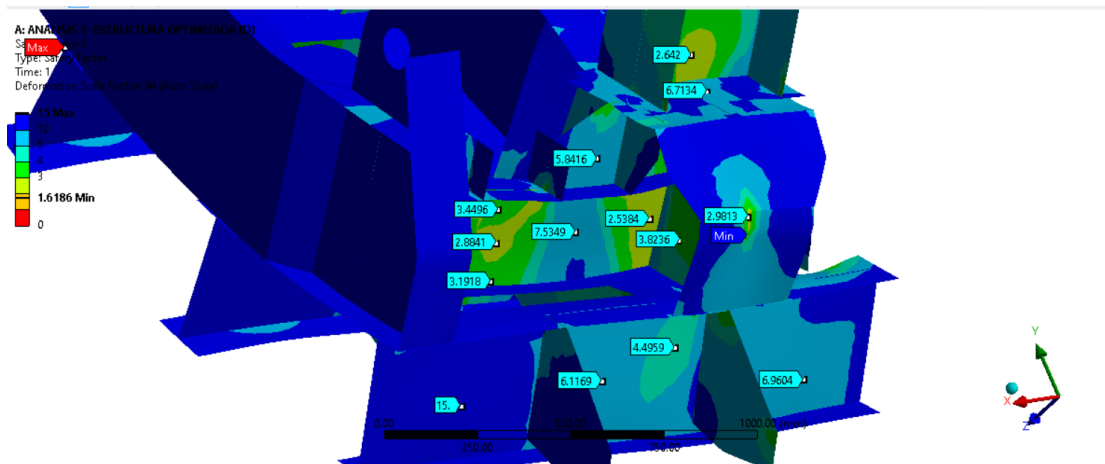
A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D-E)
 Safety Factor 2
 Type: Safety Factor
 Unit: -
 Times: 1
 Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



a) Estados de tensiones



b) Factor de seguridad. -Estructura superior

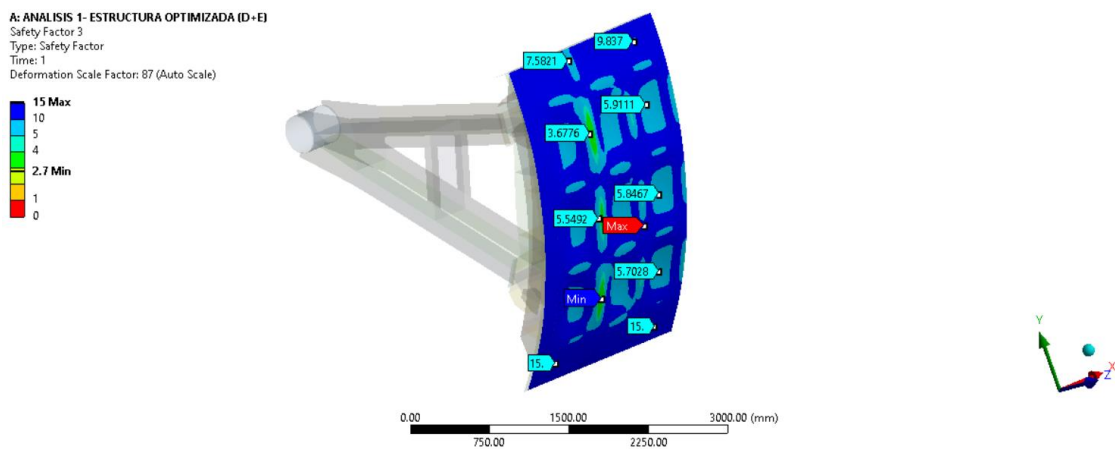


c) Factor de seguridad. -Estructura Inferior.

Nota. Factores de seguridad superiores a 1.61

Figura 97

Resultados en la Compuerta Radial.

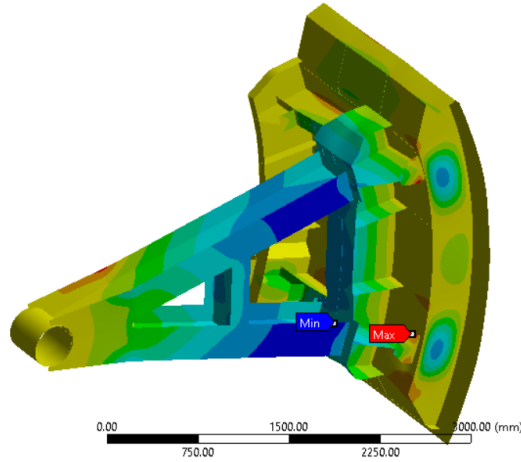
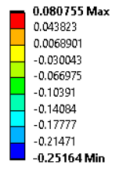


Nota. Factores de seguridad superiores a 2.71

Figura 98

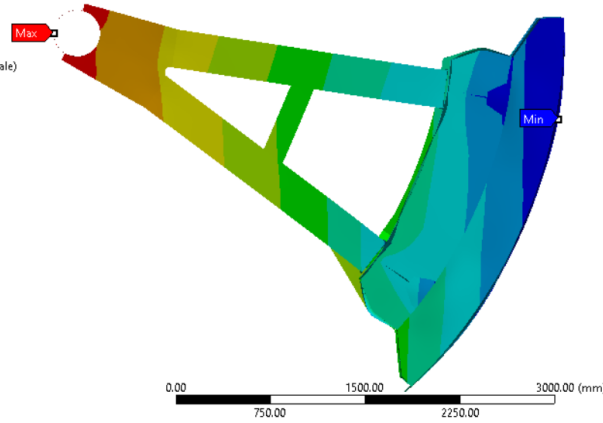
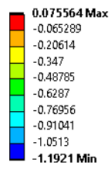
Deformación Direccional

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+E)
X Axis - Directional Deformation - 1. s
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



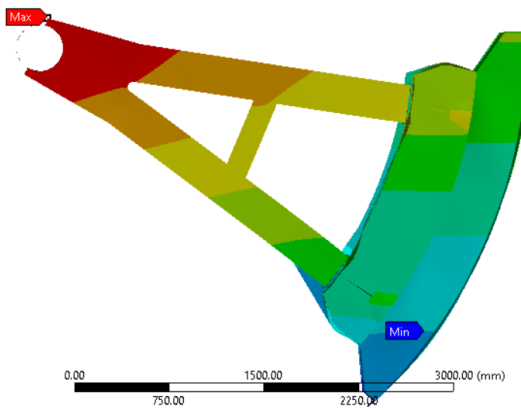
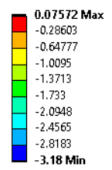
a) Deformación eje X

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+E)
Y Axis - Directional Deformation - 1. s
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



b) Deformación eje Y

A: ANALISIS 1- ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+E)
Z Axis - Directional Deformation - 1. s
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 87 (Auto Scale)



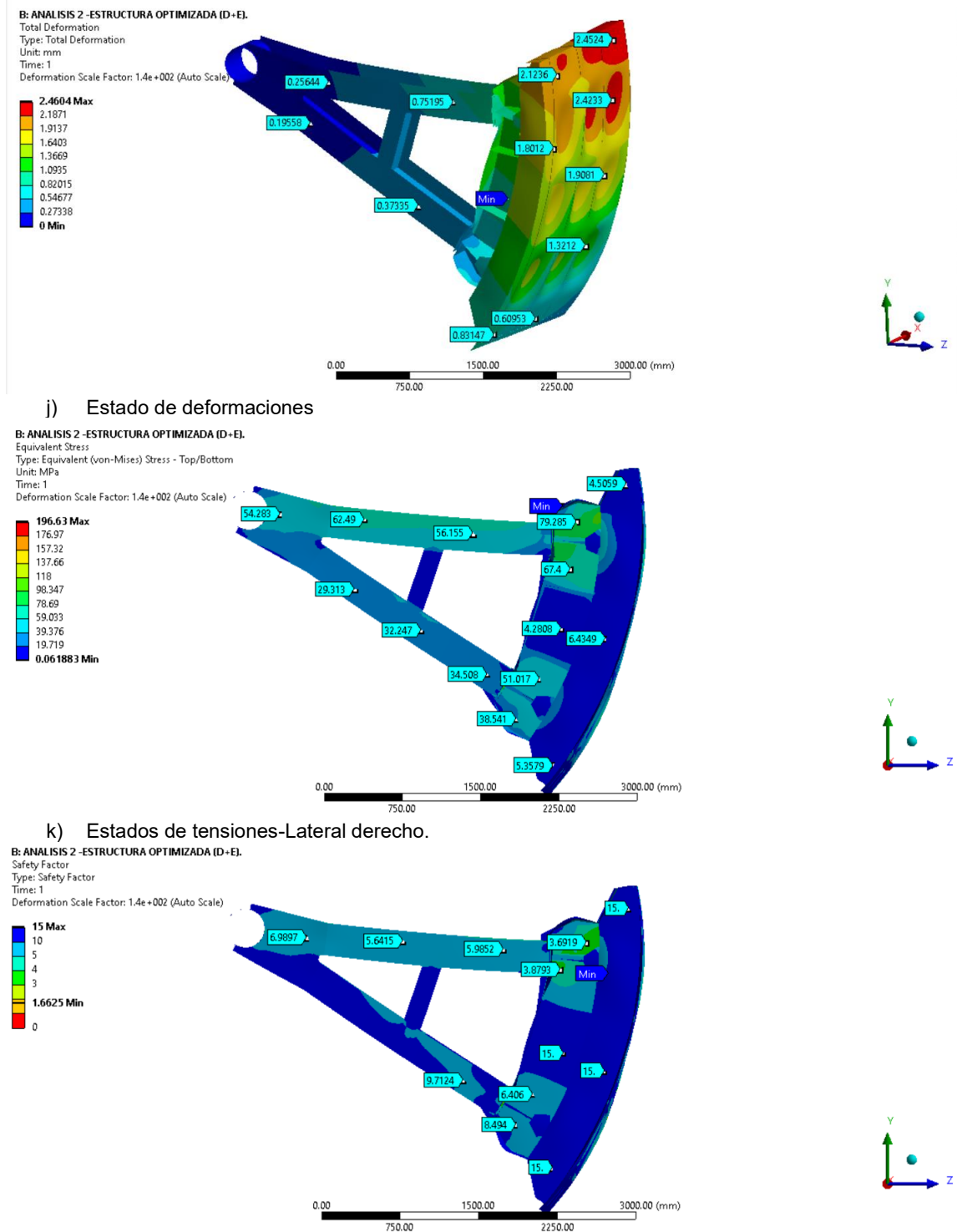
c) Deformación eje z

Nota. Deformaciones en los ejes principales.

4.3.7 Resultados: Condición de apertura (D+E)

Figura 99

Resultados en la Compuerta Radial.



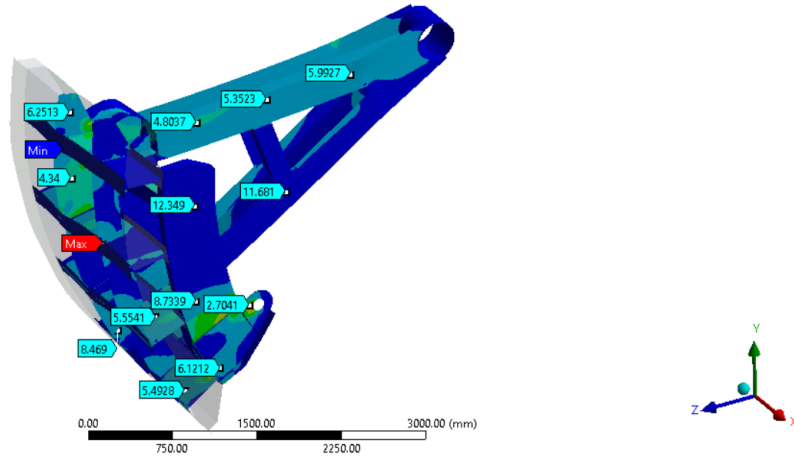
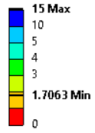
l) Factor de seguridad.

Nota. Factores de seguridad superiores a 1.66

Figura 100

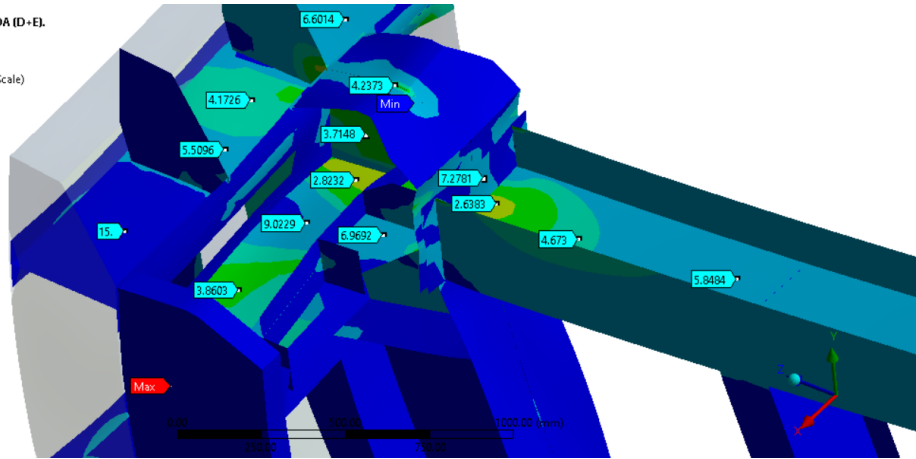
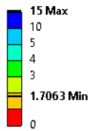
Estructura principal.

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+EI)
Safety Factor 2
Type: Safety Factor
Time: 1
Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



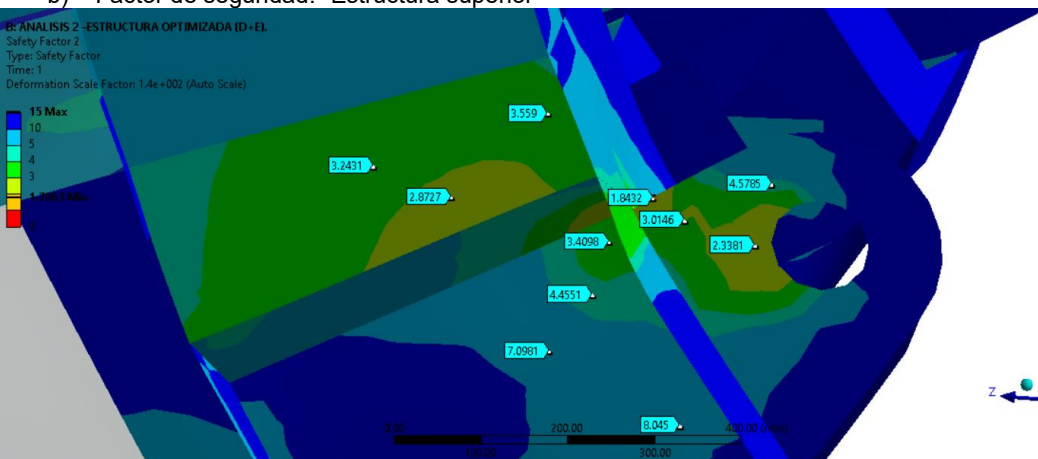
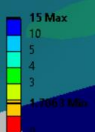
a) Estados de tensiones

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+EI)
Safety Factor 2
Type: Safety Factor
Time: 1
Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



b) Factor de seguridad. -Estructura superior

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+EI)
Safety Factor 2
Type: Safety Factor
Time: 1
Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



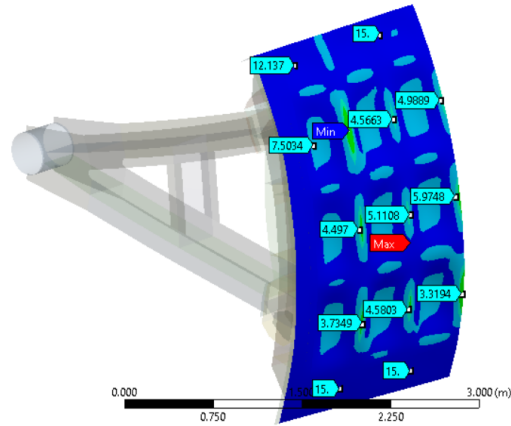
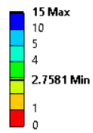
c) Factor de seguridad. -Estructura Inferior.

Nota. Factores de seguridad superiores a 1.70

Figura 101

Resultados en la Compuerta Radial.

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+EI).
 Safety Factor 3
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)

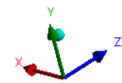
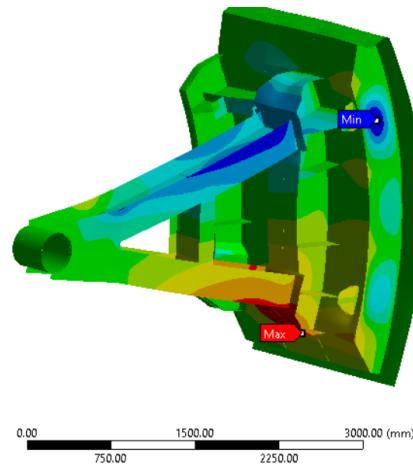
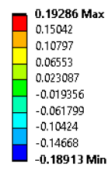


Nota. Factores de seguridad superiores a 2.75

Figura 102

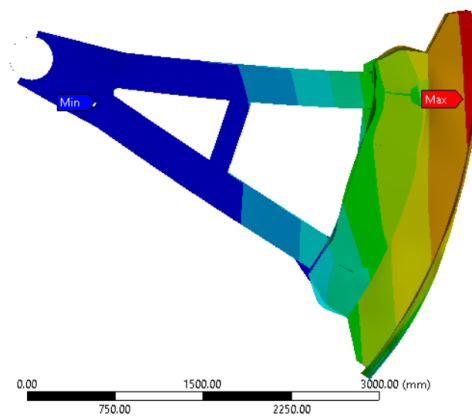
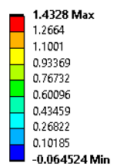
Deformación Direccional

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+EI).
 X Axis - Directional Deformation - 1. s
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



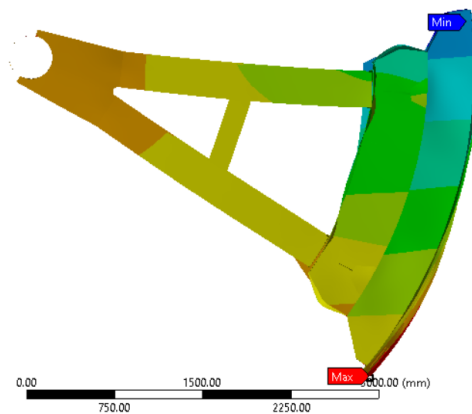
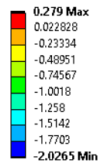
d) Deformación eje X

B: ANALISIS 2 -ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+EI).
 Y Axis - Directional Deformation - End Time
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



e) Deformación eje Y

B: ANALISIS 2-ESTRUCTURA OPTIMIZADA (D+E).
Z Axis - Directional Deformation - 1.5
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Deformation Scale Factor: 1.4e+002 (Auto Scale)



f) Deformación eje z

Nota. Deformaciones en los ejes principales.

4.3.8 Análisis de resultados

a) Lámina de contacto

En las Condición de operación (D), condición de apertura (D), condición de operación con carga sísmica (D+E) y la condición de apertura con carga sísmica (D+E). Presenta un factor de seguridad superior a los 2.7, el cual superior a los 1.149 mínimos.

b) Estructuras.

En general la estructura presenta factores de seguridad superiores a los 1.315. Tras el proceso de optimización se obtuvieron factores de seguridad superiores a los 1.6 en la condición de operación [D] y la condición de operación más carga sísmica [D+E], si bien se encuentran vértices con singularidades mas no son concentradores de esfuerzos.

Las deformaciones direccionales nos permiten evaluar el efecto de la carga sísmica, pero al comparar la condición de Operación [D] y [D+E], se nota la poca influencia de esta en todo el sistema. Lo mismo sucede en la condición de apertura en las dos condiciones, como se indica en la tabla 10.

Tabla 15*Deformaciones direccionales máximas y mínimas*

Deformación direccional	Operación[D]		Apertura [D]		Operación [D+E]		Apertura [D+E]	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
x	0.079	-0.252	0.194	-0.188	0.08	-0.251	0.192	-0.189
y	0.0747	-1.177	1.4234	-0.067	0.075	-1.192	1.438	-0.064
z	0.074	-3.159	0.268	-2.028	0.075	-3.18	0.279	-2.026

Nota. Se evalúa las deformaciones para evaluar la influencia de la carga sísmica en todo el dominio.

Si comparamos la deformación máxima actual (3.19mm), con la deformación máxima de la línea base(3.4mm) en la condición de operación [D]; se tiene una menor deformación, dándonos así una estructura más rígida.

Al evaluar los momentos en la condición de operación [D], resulta que la compuerta optimizada presenta un 50% del momento de la línea base. Si bien con esto podría tener un cierre producto de la gravedad, pero se tiene incertidumbre puesto que se redujo el momento.

En el proceso de optimización se logró reducir el peso del dominio de 5579.3kg a 4885.6kg, la nueva compuerta tiene factores de seguridad superiores a la línea base, mayor rigidez; evaluadas con el mismo tamaño de elemento, se cambió los materiales de fabricación y se modificaron geometría.

CONCLUSIONES

El método de elementos nos permitió optimizar la compuerta de manera efectiva, pero fue necesario definir un dominio, ejecutar un análisis de malla donde los esfuerzos superaban el límite de fluencia del acero asignado en zonas puntuales en los primeros análisis (Condición de operación y condición inicial de accionamiento). En el análisis del proceso de optimización se encontró singularidades, pero estas no superaban el límite de fluencia y eran secciones muy pequeñas por no decir puntuales en ciertos vértices de las superficies.

- a) El procedimiento de análisis y optimización seguido es de los elementos finitos junto a la La norma brasileña NBR-8883 para el diseño de compuertas. Para la carga sísmica se usó la norma técnica peruana E.030 diseño sismorresistente. La combinación de cargas se realizó por el método de esfuerzos permisibles (ASD).
- b) La identificación de las propiedades mecánicas los aceros (Aq 42 UNI 815, A37 UNI 743, Fe 52 D UNI, Fe 42 C) según el plano de ingeniera de la compuerta radial (ANEXO 1) es un parámetro indispensable para la ejecución de la simulación. En consecuencia, se tuvo que asumir las propiedades mecánicas del acero A37 UNI 743, puesto que no encontró en una base de datos confiable las propiedades mecánicas.
- c) Para el desarrollo del análisis es necesario definir un dominio que represente de manera adecuada la compuerta radial, por ende, se evaluó dominios tentativos en función de la carga computacional, singularidades, rigidez y estado tensional. Se concluye que el dominio que representa mejor la estructura estudiada es el de superficies medias.
- d) Se desarrolla dos análisis en dos estados diferentes, con un mismo dominio. Se concluye que las condiciones insertadas al modelo representan de manera efectiva las condiciones de operación y de accionamiento de la compuerta puesto que en el

proceso de optimización también se insertó las mismas condiciones y se obtuvieron resultados confiables.

- e) El análisis de malla demostró que el modelo simulado presenta singularidades en el campo de las tensiones, en las deformaciones tiene la tendencia a converger. Al analizar las zonas donde está presente las singularidades se concluye que estas zonas pueden ser omitidas en el análisis y posiblemente el modelo lineal no represente de manera idónea el comportamiento de esta compuerta, puesto que hay zonas que trabajen en la región plástica del material.
- f) En el análisis de la condición de operación y de accionamiento se encontraron singularidades en el cual los esfuerzos tienden a incrementarse conforme se reduce el tamaño de elemento. Teniendo factores de seguridad menores a 1. También se encontró zonas concentradoras de esfuerzos las cuales estaban por debajo de 1. La normativa brasileña NBR-8883 establece como factor de seguridad mínimo para láminas de contacto 1.149, el cual se cumple sin ninguna observación. Las estructuras principales deben ser superiores 1.315. Se concluye que hay zonas que trabajan con esfuerzos que superan al límite de fluencia o están muy próximas.
- g) Se concluye que el proceso de optimización fue efectivo, puesto que el diseño final de la nueva compuerta presenta un 13% menos en peso. Tiene una mayor rigidez y presenta factores de seguridad que superan fácilmente los 1.6.

RECOMENDACIONES

- a) Se recomienda hacer un análisis de malla, con el objetivo de reducir el gasto computacional, encontrar singularidades. En la tesis se desarrolló un análisis con tamaño de elemento global, pero también podría ejecutarse con un análisis de malla focalizado. En caso de ser global como es en la tesis, es recomendable definir un tamaño de elemento para ejecutar los análisis.
- b) Para definir un dominio es recomendable realizar una evaluación de la estructura. Sobre todo, en los tipos de elementos presentes (Vigas, planchas, etc.) en esta. Si presenta mecanismos o sistema de accionamiento evaluar cómo afectaría este a la simulación.
- c) La tesis se planteó con un análisis línea estático, las singularices presentes pueden eliminarse al cambiar a un modelo no lineal que presenta mejor las deformaciones y esfuerzos. Es recomendable el uso de modelos no lineal pero la complejidad de los dominios dificulta el modelo.
- d) Para los procesos de optimización es necesario definir que partes de la estructura tienen un comportamiento estructural, en la tesis el refuerzo inferior no tenía un comportamiento estructural, básicamente por esta razón se procedió a retirarla.
- e) Es recomendable realizar la combinación de cargar ya sea por el método ASD u otro. Y evaluar las deformaciones direccionales producto de ellas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS, I. (2015). *ANSYS Meshing User's Guide* .
- C. McCORMAC, J., & F. CSERNAK, S. (2013). *Diseño de Estructuras de Acero*. Mexico: Alfaomega.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2018). *Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A de CV.
- Cervera Ruiz, M., & Blanco Díaz, E. (2001). *Mecánica de estructuras Libro 1 Resistencia de Materiales*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- Chen, X., & Yijun , L. (2015). *Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench*. CRC Press.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas. (s.f.). *GUIA TECNICA DE SEGURIDAD DE PRESAS- GUIA N° ALIVIADEROS Y DESAGUES*. Madrid: Comité Nacional Español de Grandes Presas. Obtenido de www.spancold.org
- Córdova Carmen, J. (2015). *Diseño de embalse teniendo en cosideración los impactos ambientales*. Piura-Peru.
- Dechaumphai, P., & Sucharitpwatskul, S. (2018). *Finite Element Analysis whith ANSYS Workbench*. Oxford, UK: Alpha Science International Ltd.
- Electroperu. (s.f.). <http://www.electroperu.com.pe>. Obtenido de <http://www.electroperu.com.pe>.
- Encalada, M. (2018). *“Metodología de cálculo de un sistema de compuerta de obras hidráulicas de captación”*.
- Erbisti, P. C. (2004). *Desing of Hydraulic Gates*.

- Kurowski, P. M. (2017). *Finite Element Analysis for Design Engineers*. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE INTERNATIONAL.
- Lavayen, D. (2014). "Análisis de los componentes estructurales de un aerogenerador de 3 kW mediante simulación numérica".
- Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS - Second Edition*. Tucson, Arizona: Springer.
- Mera, D. (2015). "Análisis, Simulación y Evaluación de los Esfuerzos y Deformaciones, entre el Método Analítico y el Método de Elementos Finitos, de una Compuerta Tipo Vagón para Desagüe de Fondo.
- Ministerio de Vivienda, C. y. (2006). *Norma Técnica E.020*. Lima, Perú.
- Ministerio de Vivienda, C. y. (2014). *Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente*. Lima, Perú.
- Novak, P., Moffat, A., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras Hidráulicas*. Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, U.K.,
- Rojas, J. (2017). "Diseño y cálculo de una compuerta tipo segmento radial para el control de represamiento de agua en el sistema de irrigación Yocara San Román Juliaca".
- Vladimir, E. (2006). "Diseño de una compuerta Hidráulica Tipo Segmente para un Nivel máximo de aguas arriba de 2m y un nivel máximo de aguas debajo de 2,3m".

ANEXOS

ANEXO A	Matriz de consistencia	1
ANEXO B	78665 - Primera Etapa - Compuerta de Sector Dimensiones 4x250 para Desagüe Alivio 4.....	3
ANEXO C	1-311 - Primera Etapa - Obra de represamiento - Desague de alivio A4 - Formas y Detalles - Secciones A-A E-E	4

ANEXO A: Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	V. Independientes
Electroperu S.A, está desarrollando el mantenimiento integral del alivio 04, uno de los puntos destacados en el cambio de la compuerta radial, para la cual se requiere un nuevo diseño.	Analizar y optimizar la compuerta radial mediante un análisis estático lineal por elementos finitos.	El análisis por elementos finitos de la compuerta radial existente, permite desarrollar optimizaciones para el diseño de una nueva compuerta radial manteniendo las condiciones de operación y accionamiento.	Condiciones de operación y accionamiento. Los planos de ingeniería de la compuerta. El método de elementos Finitos
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Especificas	V. Dependiente
a) Para el diseño por elementos finitos existe una serie de pasos, pero para realizar la optimización de la compuerta radial es necesario definir un procedimiento.	Definir un procedimiento para analizar y optimizar el diseño por elementos finitos de la compuerta radial	¿Es posible realizar un procedimiento para el análisis por elementos finitos de modelo en específico?	Planos de ingeniería de la compuerta
b) Los materiales de fabricación de la compuerta están basados en la norma UNI-Italia de los 1960	Analizar los materiales de fabricación de la compuerta radial de acuerdo a los planos.	Se conocen todas las propiedades mecánicas de los aceros de la norma UNI.	Planos de ingeniería de la compuerta
c) Es necesario definir una geometría que represente a la compuerta para la simulación.	Definir un dominio de análisis que represente de manera efectiva a la compuerta.	El dominio será por elementos de tipo superficie 2D.	Calidad de mallado Tipo de elementos Numero de nodos.

d) Para la realizar el análisis por elementos finitos es necesario conocer las condiciones de operación y accionamiento de la compuerta.	Definir las condiciones de contorno para las condicione de operación y accionamiento de la compuerta.	En la condición de operación se espera obtener mayor resistencia	Carga hidráulica Restricciones de los grados de libertad de la estructura.
e) Es necesario determinar el tamaño de elemento correcto en el mallado del dominio para ejecutar el análisis.	Ejecutar un análisis de malla del dominio definido, en el estado de operación de la compuerta.	Al ejecutar el análisis de malla no se encontrarán singularidades.	Tamaño de elemento. Tipo de elemento. Condiciones de contorno del estado de operación. Numero de nodos y Elementos.
f) Para ver el estado tensorial y de deformación de la compuerta radial es necesario definir el tipo de análisis que se ejecutara.	Ejecutar el análisis por elementos finitos en las condiciones de operación y accionamiento.	Se espera obtener factores de seguridad superiores a los 1.5 respecto al límite de fluencia en las estructuras principales.	Esfuerzos Deformaciones. Factores de seguridad
g) Mejorar el diseño	Optimizar la compuerta acorde a los resultados obtenidos	La nueva compuerta radial tendrá una mayor rigidez y mayor resistencia mecánica.	Esfuerzos Deformaciones Factores de Seguridad

ANEXO C -1-311 - Primera Etapa - Obra de represamiento - Desague de alivio A4 - Formas y Detalles - Secciones A-A E-E

