



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN MEDIANTE FEA DE DAÑOS Y SOLUCIONES EN EL
TRANSPORTE DE CONCENTRADO DE HIERRO EN CAÑERÍAS DE
ACERO COMO PIPELINES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JOAQUÍN IGNACIO LENG RIQUELME

PROFESOR GUÍA:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GABRIEL ARÉVALO GONZALEZ
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: JOAQUÍN IGNACIO LENG RIQUELME
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: ÁLVARO VALENCIA M.

SIMULACIÓN MEDIANTE FEA DE DAÑOS Y SOLUCIONES EN EL TRANSPORTE DE CONCENTRADO DE HIERRO EN CAÑERÍAS DE ACERO COMO PIPELINES

La actividad minera en los últimos años ha enfrentado múltiples desafíos en el transporte de concentrado de mineral, dentro de estos desafíos se encuentran los posibles daños internos de la cañería que se puedan generar debido al desgaste de esta por erosión en sus paredes, esto asociado al material particulado contenido en la mezcla llamada concentrado de mineral; este desafío puede ir o no de la mano de un posible daño externo en la pared de la cañería debido al ambiente agresivo en el cual se ubica la cañería u otro posible fallo, ambos casos involucran una serie de fallas y/o detenciones en los procesos mineros en el transporte de ciertos fluidos.

Dentro de este contexto se encuentran los objetivos de esta investigación, los cuáles corresponden a una estimación de zonas de desgaste en un trazado de cañería que contiene 2 codos en el tramo de transporte con una cañería de acero desnudo y el diseño de una abrazadera apernada para la reparación de pipelines dañados en su exterior, que permita generar sello y estanqueidad como conjunto entre la cañería y la camisa ante fallas que atraviesen las paredes del ducto, este hermetismo debe ser generado solo por apriete mecánico y sin soldar la abrazadera a la tubería. Este mecanismo debe ser diseñado para contener la presión interna, con materiales accesibles al mercado local y que considera elementos de bajo peso.

Se presentan los antecedentes generales en el transporte de concentrado para las problemáticas planteadas, para posteriormente indicar los antecedentes que involucran los daños internos que se estimarán debido a la erosión utilizando un modelo de Finnie para una cañería que contiene dos codos en su trazado, este modelo está orientado para materiales dúctiles (como lo es el acero), junto con lo mencionado se indican los elementos contenidos en la modelación matemática y fluidodinámica utilizada en ANSYS estudiantil módulo Fluent, finalizando la recopilación de precedentes con los conceptos relacionados a los daños externos y la abrazadera mecánica a utilizar, que va de la mano con los antecedentes normativos y del método de elementos finitos en donde se ocupará el módulo estructural de ANSYS estudiantil (FEM por su sigla en inglés).

Luego de la recopilación de antecedentes junto con la presentación de los casos y geometrías a utilizar para cada problemática, se indica la metodología de trabajo para estos 2 hitos de investigación.

Finalizando este trabajo de investigación con un análisis de resultados y conclusiones según los objetivos planteados al inicio de esta investigación.

A mi abuelita Luz por todo su amor incondicional

Gracias

Agradecimientos

Agradecer a todas las personas que me acompañaron en este camino universitario, primero a mi familia por siempre estar a mi lado y ser un pilar fundamental en este proceso; a mi pequeña y que fue mi compañera durante todo tiempo Norita; a Matías y Héctor por ser un apoyo en mis años de mecánica y grandes nakamas con los que me pude encontrar.

Agradecer también a todos los amigos que generé por este período de mi vida: a mis compañeros de sección que luego serían mis grandes amigos (Nico-Pelao, Kuzco, Lucca-Pedrito y la rata Diego), gracias por acogerme y abrirme los brazos al iniciar este viaje; a los cabros de Invictus con los que tanto compartí dentro y fuera de la cancha, gracias al balón pude conocer a estas grandes personas y conseguir muchas cosas juntos, me quedo con las amistades que generé en este proceso los quiero un montón.

Mencionar también todos los compañeros que tuve en mi periplo deportivo en la Universidad: como lo fue participar en la Selección de la Universidad donde pude seguir creciendo como jugador junto con la selección de Ingeniería, además agregar a Beaucheff FC, sin el deporte como compañero quizás esta travesía no la hubiese disfrutado de la misma forma.

Por último, agradecer al departamento de ingeniería mecánica por formarme como ingeniero adquiriendo muchos conocimientos y valores que espero aprovechar en mi carrera.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	3
2. Antecedentes Generales Transporte Concentrado	4
2.1. Transporte de concentrado	4
2.2. Caracterización tuberías de conducción	5
2.3. Curvado de una tubería	6
3. Daños Internos en cañerías	8
3.1. Erosión	8
3.2. Sedimentación	9
3.2.1. Velocidad de deposición	10
3.2.2. Reología y modelamiento matemático concentrado	11
3.2.2.1. Densidad	13
3.2.2.2. Concentración del Relave C_v	13
3.2.2.3. Viscosidad Dinámica	13
3.3. Caracterización de flujo en tubería	13
3.3.1. Número de Hedstrom (He)	14
3.3.2. Velocidad de transición	15
3.4. Antecedentes Fluidodinámicos y Modelación Matemática	16
3.4.1. Fluido Dinámica Computacional (CFD)	16
3.4.2. Modelamiento concentrado general	17
3.4.3. Parámetros de interacción Fluido-Partícula	17
3.4.4. Distribución de partículas	18
3.4.5. Modelos para erosión	21
3.4.5.1. Modelo Inyección Partícula	22
3.4.5.2. Modelo de Turbulencia	23
3.4.5.3. Modelo de erosión de Finnie	24
3.5. Resumen propiedades y modelos a utilizar	26
3.5.1. Granulometría del Concentrado	26
3.5.2. Modelos ANSYS Fluent	28
3.5.3. Condiciones de Borde	29
3.6. Definición del Problema	29

3.7. Mallado o discretización del espacio a trabajar	31
4. Daños Externos de Cañería	34
4.1. Teoría de Falla, criterios para la Deformación Plástica	34
4.1.1. Esfuerzo-Deformación de un Material	35
4.1.2. Esfuerzo y deformación en Cilindros	37
4.1.3. Criterio de Falla: Von Mises	38
4.2. Antecedentes Diseño Mecánico Abrazadera	38
4.2.1. Métodos de reparación fallas externas	38
4.2.2. Mechanical Bolt on Clamps	39
4.2.3. Caso de estudio	41
4.3. Diseño Mecánico Bolt on Clamps	41
4.3.1. Diseño por requisitos de análisis	43
4.3.2. Espesor Abrazadera (S)	45
4.3.3. Carga en los pernos (T)	46
4.3.4. Espesor Flange (F)	46
4.3.5. Tolerancias de Ovalamiento	47
4.3.6. Materiales Abrazadera	48
4.3.7. Materiales Sello	49
4.4. Geometría Caso Inicial	50
4.5. Antecedentes Computacionales	52
4.5.1. Módulo Estático Estructural	52
4.5.2. Mallado y discretización del espacio a trabajar	52
4.5.3. Condiciones de Borde	56
5. Metodología	58
5.1. Recursos	60
5.1.1. Recursos no pecuniarios	60
5.1.1.1. Equipos	60
5.1.1.2. Software	60
6. Resultados	61
6.1. Erosión y Sedimentación	61
6.1.1. Líneas de flujo	61
6.1.2. Energía Cinética Turbulenta	63
6.1.3. Zonas Deposición y Sedimentación	63
6.1.4. Zona de Desgaste	64
6.2. Mechanical Bolt on Clamps	65
6.2.1. Análisis de Sensibilidad	65
6.2.2. Resultados esfuerzos y deformaciones	66
7. Análisis de Resultados	71
7.1. Daños Interiores	71
7.2. Daños exteriores	72
8. Conclusiones	74
Bibliografía	75

Anexo A. Reparaciones Permanentes	77
Anexo B. Análisis de sensibilidad - Mallado	79

Índice de Tablas

2.1.	Características principales de las cañerías a analizar.	6
2.2.	Radio mínimo de curvatura según ASME B31.4 para trasporte de relave	7
3.1.	Constantes empíricas del modelo de Erosión de Finnie para el acero al carbono [14]	25
3.2.	Valores granulometría concentrado.	27
3.3.	Esquemas numéricos y configuración.	29
3.4.	Constantes usadas en Ansys para el modelo pseudoplástico de Bingham	29
3.5.	Caso de estudio junto con sus dimensiones y propiedades de cañería.	30
3.6.	Valores de las variables necesarias para la resolución del problema.	30
3.7.	Características del mallado final.	31
3.8.	Calidad de la malla seleccionada.	33
3.9.	Valores utilizados para la sensibilidad de malla del problema.	33
4.1.	Propiedades cañería Caso de investigación.	41
4.2.	Tolerancias para el ovalamiento según API 5L [1].	47
4.3.	Sumario propiedades materiales evaluados para la abrazadera.	49
4.4.	Resultados Iniciales Espesor Abrazadera.	50
4.5.	Resultados Iniciales Torque de los pernos.	50
4.6.	Cuadro resumen de las dimensiones consideradas para cada variable.	51
4.7.	Datos para sensibilidad de malla geometría final.	54
4.8.	Principales propiedades mallado final.	55
6.1.	Resumen de resultados abrazadera mecánica.	66

Índice de Ilustraciones

2.1.	Esquema presión Interna.	5
2.2.	Representación radio de curvatura en una cañería.	7
3.1.	Mecanismo de erosión a) Materiales dúctiles b) Materiales frágiles.	9
3.2.	Sedimentación en cañerías.	9
3.3.	Gráfico velocidad de transporte versus concentración de la mezcla.	11
3.4.	Diagrama reológico fluidos de trabajo. [7].	12
3.5.	Discretización del dominio del fluido en pequeños volúmenes. [8].	17
3.6.	Regímenes de flujo en términos de velocidad versus su concentración. [7].	18
3.7.	Esquema de flujo de concentrado homogéneo. Fuente: Elaboración propia.	19
3.8.	Esquema de flujo de concentrado heterogéneo. Fuente: Elaboración propia.	19
3.9.	Esquema de flujo de concentrado con lecho móvil. Fuente: Elaboración propia.	20
3.10.	Esquema de flujo de concentrado con lecho fijo. Fuente: Elaboración propia.	20
3.11.	Descripción modelos de turbulencia en módulo Fluent [11]	23
3.12.	Gráfico de función $f(\gamma)$ con las constantes empíricas del acero al carbono.	26
3.13.	Granulometría de sólidos en concentrado.	27
3.14.	Aproximación de Rosin-Rammler para la granulometría.	28
3.15.	Geometría utilizada en el trabajo de investigación.	31
3.16.	Mallado utilizado para la simulación computacional del tramo de cañería.	32
3.17.	Calidad de la malla y sus propiedades [8].	32
3.18.	Sensibilidad de la malla en función de la velocidad de salida.	33
4.1.	Esquema mostrando un resultado típico para un ensayo uniaxial de tracción para un material dúctil.	36
4.2.	Curvas esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y frágiles.	37
4.3.	Esfuerzos presentes en un cilindro a presión.	37
4.4.	Mecanismo abrazadera apertada contra la fuga a alta presión [19].	40
4.5.	Mecanismo abrazadera apertada y sus partes en conjunto.	40
4.6.	Dimensiones a calcular de la abrazadera [20].	41
4.7.	Ejemplo abrazadera mecánica ASME PCC 2-2011.	42
4.8.	Esquema abrazadera mecánica junto con sus elementos a calcular [22].	43
4.9.	Casos de carga considerados por la ASME Sección VIII división 2.	43
4.10.	Esquema ovalamiento considerado.	47
4.11.	Principales dimensiones abrazadera diseñada.	50
4.12.	Vista superior e inferior de las dos mitades que componen la abrazadera.	51
4.13.	Vista en detalle de la abrazadera y los pernos utilizados.	51
4.14.	Espacio a discretizar de la abrazadera en mallado.	53
4.15.	Elementos posibles en el mallado de la geometría.	53
4.16.	Gráfico análisis de sensibilidad de malla.	54
4.17.	Métrica de la calidad ortogonal del mallado final.	55

4.18.	Métrica del Skewness del mallado final.	55
4.19.	Vista isométrica y vista cercana al vértice de la abrazadera del mallado final. .	56
4.20.	Condiciones de bordes impuestas en el problema, caras fijas y presión interna.	56
4.21.	Condición de borde para los pernos del problema.	57
5.1.	Flujo de trabajo dimensiones abrazadera	60
6.1.	Líneas de flujo de velocidad para un modelo no-newtoniano.	61
6.2.	Contornos de velocidad junto con sus secciones a analizar.	62
6.3.	Magnitudes y velocidades en la sección del codo para el tramo analizado. . . .	62
6.4.	Energía cinética turbulenta del tramo a analizar.	63
6.5.	Energía cinética turbulenta del codo de la geometría de trabajo.	63
6.6.	Resultados velocidad de deposición.	64
6.7.	Erosión en escala logarítmica del acero.	64
6.8.	Sensibilidad espesor de la abrazadera en función de la deformación radial. . . .	65
6.9.	Sensibilidad espesor flange en función de la deformación radial.	65
6.10.	Sensibilidad de la distancia de las perforaciones de pernos en función de la deformación radial.	66
6.11.	Resultados Deformación total abrazadera mecánica.	66
6.12.	Resultados Deformación elástica equivalente abrazadera mecánica.	67
6.13.	Resultados Esfuerzo equivalente abrazadera mecánica.	67
6.14.	Resultados Esfuerzo circunferencial abrazadera mecánica.	68
6.15.	Resultados Esfuerzo longitudinal abrazadera mecánica.	68
6.16.	Resultados Esfuerzo radial abrazadera mecánica.	69
6.17.	Resultados deformación en X.	69
6.18.	Resultados deformación en Y.	70
6.19.	Resultados deformación en Z.	70
A.1.	Reparaciones permanentes.	77
A.2.	Reparaciones permanentes.	78
B.1.	Caso de análisis S=65, F=40, ancho=35.	79
B.2.	Caso de análisis S=65, F=50, ancho=35.	79
B.3.	Caso de análisis S=65, F=60, ancho=35.	80
B.4.	S=65, F=70, ancho=35.	80
B.5.	Caso de análisis S=65, F=80, ancho=35.	80
B.6.	Caso de análisis S30, F/S=1,5, F=45, ancho=35.	81
B.7.	Caso de análisis S40, F/S=1,5, F=60, ancho=35.	81
B.8.	Caso de análisis S46, F/S=1,5, F=70, ancho=35.	81
B.9.	Caso de análisis S50, F/S=1,5, F=75, ancho=35.	82
B.10.	Caso de análisis S53, F/S=1,5, F=80, ancho=35.	82
B.11.	Caso de análisis S=65, F=60, z=13, ancho=35.	82
B.12.	Caso de análisis S=65, F=60, z=16, ancho=35.	83
B.13.	Caso análisis S=65, F=60, z=19, ancho=35.	83
B.14.	Caso de análisis S=65, F=60, z=28, ancho=35.	83
B.15.	Caso de análisis S=65, F=60, z=34, ancho=35.	84

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, el transporte de concentrados en la minería se enfrenta a múltiples desafíos entre los cuales se encuentra la prevención y reparación ante posibles daños de la cañería, tanto al interior del concentraducto como al exterior, esto debido a que la falla en pipelines de acero involucra alto riesgo en las áreas cercanas a la falla y a posibles detenciones en los proyectos involucrados, estas detenciones de los proyectos pueden llevar a una pérdida millonaria por parte de la minera o empresas involucradas, es por esto que se decide abordar los daños mencionados con soluciones factibles y sencillas.

Para el caso de los daños internos debido al transporte de material particulado (concentrado), es de vital importancia estudiar el comportamiento del material ante la erosión y sedimentación en las paredes de secciones de la cañería con ángulos agresivos o en los puntos donde se puedan generar estas posibles anomalías, para esto se revisa este posible fenómeno en un tramo de tubería que contiene dos codos con un ángulo de 60° en el pipeline que transporta concentrado de hierro y verificar si cumple con las condiciones para evitar la erosión y sedimentación en su transporte.

Los pipelines o líneas de transporte de concentrados además de tener los posibles daños internos, están sometidos a condiciones ambientales que implican en una probabilidad de daños externos como lo son las fallas longitudinales o circunferenciales en la cañería debido a corrosión o algún otro motivo, esto conlleva a una detención en el transporte del fluido debido a las altas presiones que se manejan, incluso puede verse involucrado en un accidente fatal para los operarios que trabajan en la planta.

Ante estos posibles daños externos en la cañería de acero es de interés encontrar algún método que permita una reparación temporal de la línea que no implique una detención del proyecto por un largo tiempo y que no involucre de alguna forma el proceso de soldadura ya que esto viene asociado con modificaciones en la microestructura de la cañería y si es que dentro de la tubería hay revestimiento de algún tipo a posibles daños de estos materiales.

El trabajo de investigación consiste en dos partes: la primera involucra el estudio y simulación de la erosión con la sedimentación en el transporte de concentrado de hierro en cañerías de acero desnudo, mientras que la segunda parte consiste en diseñar y simular una abrazadera de reparación mecánica llamada 'Bolt on Clamps' que pueda ser instalada en terreno, evitando la detención del flujo de trabajo por un largo período de tiempo, además de evitar

el proceso de soldadura en la instalación de esta camisa externa a la cañería, consiguiendo el sello y estanqueidad mediante el apriete de los pernos con la adaptación de una goma interna a la estructura (considerando la expansión de la cañería debido a la presión interna), esta abrazadera tiene que estar diseñada con materiales de bajo peso y disponibles en el mercado local, además de ser parametrizable para distintos diámetros del ducto, con un caso inicial de 8 NPS de diámetro de la cañería de acero.

Esta investigación se llevará a cabo mediante el modelamiento y simulación fluidodinámica por medio de CFD (Computational Fluid Dynamics) del software comercial ANSYS con su módulo FLUENT para el estudio de la erosión con la sedimentación en el transporte de concentrado, utilizando un modelo de erosión de Finnie para materiales dúctiles y el módulo FEM de Structural Mechanics de este mismo programa para el diseño de la abrazadera apernada que logre reparar daños externos a la cañería. Para ambos casos se consideran distintos diámetros de cañería, bajo las mismas condiciones de operación.

1.1. Motivación

Ver, entender y analizar los distintos problemas a los cuáles está sometida una cañería en el transporte concentrado de mineral aplicando métodos de simulaciones numéricas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar dos problemas asociados al transporte de concentrado de hierro mediante concentrado: primero el posible daño interno por erosión y sedimentación de la cañería, obteniendo posibles zonas de estos fenómenos mediante simulaciones fluidodinámicas (CFD) y segundo realizar un diseño de abrazaderas apernadas para reparación de estas cañerías de acero sometidas a fallas externas, utilizando un modelo FEM.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Simular y estudiar las zonas de desgaste por erosión de partículas en las paredes internas de un tramo de concentrado en el transporte de concentrado de hierro mediante un modelo de Bingham para fluidos no-newtonianos.
- Verificar posibles zonas de sedimentación/deposición mediante un modelo de erosión por impacto.
- Diseño y simulación mediante elementos finitos de una abrazadera mecánica, evaluando distintos materiales y la respuesta de estos diseños ante la falla mecánica.

1.3. Alcances

- Este trabajo contempla la simulación de las zonas de desgaste por erosión y sedimentación de un tramo de cañería de 12"NPS en el transporte de un concentrado de hierro mediante un análisis teórico-analítico con simulación computacional, encontrando posibles zonas de erosión y sedimentación.
- Diseño y simulación mediante elementos finitos de una abrazadera apernada que permita el sello del conjunto cañería-camisa ante una falla externa de un concentrado a alta presión, se tomará el caso inicial de un diámetro de tubería de 8"NPS que pueda ser parametrizable.

Capítulo 2

Antecedentes Generales Transporte Concentrado

Para la correcta realización de este trabajo de investigación, es importante una revisión exhaustiva de los principales conceptos, antecedentes y detalles a considerar en cada una de las fases de esta memoria; recopilación de antecedentes que se vuelve fundamental para una correcta comprensión de los problemas que se abarcan y de sus posibles soluciones.

El concepto de concentrado de mineral hace referencia al material de trabajo en la minería correspondiente a una pulpa espesa obtenida del proceso de flotación en el proceso de producción, en donde una mezcla entre el mineral extraído (para esta investigación corresponde a hierro) junto con un fluido de transporte forman un conjunto no homogéneo y dependiendo de las propiedades al momento de extraer generan variados tipos de concentrado en donde el % de mineral contenido en la mezcla va cambiando.

En resumen, un flujo de concentrado corresponde a una mezcla bifásica de partículas sólidas de mineral suspendidas en un fluido transportador como lo es el agua. Esta mezcla tiene unas diferencias notorias con respecto a un flujo líquido monofásico homogéneo, ya que estos pueden fluir o ser transportados a una variedad de regímenes de velocidades en cambio los concentrados tienen que sobrepasar ciertas velocidades debido al elevado esfuerzo de corte contenido en la mezcla, si no se alcanzan estas velocidades mínimas, las partículas del mineral de la mezcla no podrán mantener en suspensión y la tendencia será a sedimentar en las paredes inferiores de la cañería a utilizar.

2.1. Transporte de concentrado

Uno de los primeros problemas que surgen en el transporte de concentrado de mineral, es el mecanismo mediante el cual se realiza este procedimiento, esto debido a que la variedad de concentrado abre una gama variada de propiedades de estos fluidos bifásicos, entre las propiedades que tienen una notoria diferencia entre cada concentrado se encuentran: tamaño y distribución de partículas o mejor llamado granulometría, concentración de estos sólidos en el fluido de transporte, viscosidad dinámica de los fluidos entre otros.

En particular, para el transporte de relaves, concentrados o pulpas se tiene que mencionar el mecanismo mediante el cual se trasladan estas mezclas, generalmente se habla de duc-

tos revestidos (cerrados) para el correcto recorrido a largas distancias, pero existen otros mecanismos:

- Concentraductos: cañerías de acero generalmente revestidas, flujo a presión.
- Relaveductos: con superficie libre, generalmente revestidas.
- Correas transportadoras: cuando relaves filtrados no escurren gravitacionalmente.

El mecanismo de transporte del concentrado resulta una parte importante en la minería actual, debido a que la gran mayoría de compañías mineras poseen una longitud extensa entre el lugar de extracción de relave hasta el lugar donde se realiza el secado del concentrado y posterior obtención del mineral para comercialización.

2.2. Caracterización tuberías de conducción

Para la presente investigación es importante contextualizar las condiciones de diseño a las cuáles se verá sometida la cañería en el transporte de concentrado junto con las propiedades del material del concentraducto; el material del pipeline corresponde a un acero inoxidable según norma API 5L PSL2 [1], estos ductos son manufacturados sin costura y mediante soldadura.

Pese a que el objetivo principal de estas cañerías corresponde al transporte de agua, petróleo y gas a largas distancias, se ocupa como parámetro para el transporte de concentrados debido a las altas presiones bajo las cuáles se desea trabajar y que más adelante se entrará más en detalle.

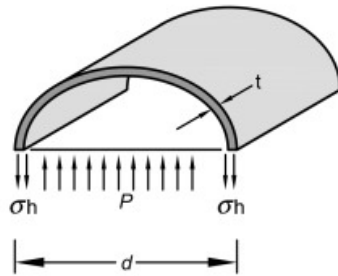


Figura 2.1: Esquema presión Interna.

Donde se establece que los espesores para tuberías de acero se calculan de la siguiente forma:

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot S} \quad (2.1)$$

$$S = f \cdot E \cdot SMYS \quad (2.2)$$

Donde:

- f : factor de diseño del acero según ASME B31.1 [2] con un valor de 0.792 para operación eventual o transientes.

- t: espesor pared de acero mínimo para soportar presión máxima de trabajo (mm).
- P: presión máxima de trabajo de la tubería (kPa).
- D: diámetro exterior de la cañería (mm).
- S: esfuerzo máximo admisible (kPa).
- E: factor de corrección por tipo de soldadura (valor 1).
- SMYS: límite de fluencia mínimo del acero a utilizar (kPa).

Las tuberías API 5L se designan por una numeración después de la norma tal como sale en la tabla 2.1 como Gr. X65, este número 65 indica la tensión mínima de fluencia del acero (SMYS) es de 65000 [psi], a modo de resumen de las características de las cañerías a trabajar se presenta la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Características principales de las cañerías a analizar.

Característica	Pipeline
Código de diseño Primario	ASME B31.4 [3]
Especificación de cañería	API 5L PSL2 [1]
Grado de la cañería	Gr. X65
Recubrimiento Interno	HDPE PE100
Clase	ASME 1500 según ASME B16.5 [4]
Fluido de trabajo	Concentrado de hierro

Para la presión máxima admisible no solo se considera el espesor de la pared de la tubería en cuestión, también importa la presión admisible de los elementos de piping en especial la presión de diseño de los flanges. La norma ASME B16.5 [4] deja establecida las presiones admisibles del grupo de materiales utilizados (en este caso corresponde al grupo 1.1) en un rango de temperatura de -29 a 38 °C (según tabla 2-1.1 "Pressure-Temperature Ratings for Group 1.1 Materials"), en donde la máxima clase a ocupar corresponde a la clase ASME 1500 con una presión máxima de 25.545 [kPa] que es el valor P de nuestra ecuación 2.1 o la presión máxima de trabajo.

2.3. Curvado de una tubería

En los trazados para líneas de transporte de pulpa hay ciertas condiciones que se buscan evitar en la definición de los pipelines, una de estas condiciones corresponde al curvado de la tubería o mejor dicho el radio de curvatura de la tubería que va directamente relacionada con las condiciones del camino por el cual se llevará a cabo el trazado de la cañería.

La norma ASME B31.4 [3] define los valores mínimos de radios para curvas realizadas en campo (sección 404.2.2), radios que dependen del diámetro de la cañería que transportará el relave y en donde la norma indica lo siguiente:

Tabla 2.2: Radio mínimo de curvatura según ASME B31.4 para transporte de relave

Diámetro Nominal Cañería (NPS)	Radio mínimo de curvatura en diámetros de cañería
12 y valores menores	18D
14	21D
16	24D
18	27D
20 y mayores	30D

Para el caso de un pipeline o trazado de tubería que posee un liner o revestimiento interno, se recomienda un radio mínimo de 50D (50 veces el diámetro de cañería externa), aunque para tramos cortos se puede utilizar una inserción de liner en curvas de 40D, pero en la presente investigación se utilizarán los valores de la tabla 2.2.

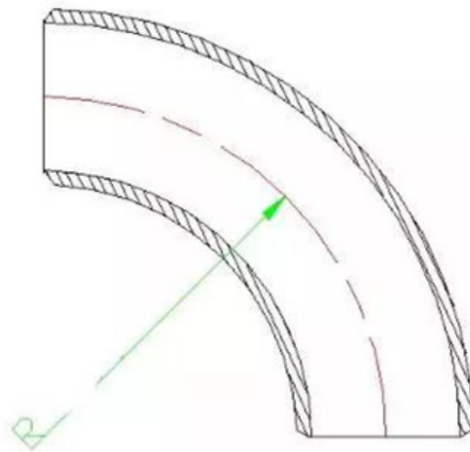


Figura 2.2: Representación radio de curvatura en una cañería.

Capítulo 3

Daños Internos en cañerías

Como se menciona al inicio de este documento uno de los desafíos más antiguos en el manejo de fluidos corrosivos a través del escurrimiento en cañerías de acero corresponde a los daños internos generados por la erosión y sedimentación del material particulado que es transportado en estas cañerías, este problema es cada vez más notorio pese a la evolución y mejoras que han tenido los materiales de los cuales están hechas las cañerías y es de vital importancia combatir estos fenómenos físico-químicos que ocurren en el interior de la tubería, a continuación se detallan los problemas a estudiar en el transporte de concentrado de hierro y las posibles soluciones que se pueden encontrar.

3.1. Erosión

La erosión en el transporte de concentrados mediante cañerías corresponde a un proceso físico en el cual las paredes o revestimientos de los ductos sufren un desgaste gradual en su superficie debido a la abrasión, generada por los constantes choques y fricciones de las partículas a alta velocidad que se acarrean por los conductos.

La erosión es un proceso complejo que depende de múltiples factores, como lo son las condiciones de operación y las propiedades del concentrado transportado, pero resulta un desafío importante a resolver debido a que afecta el sistema de producción de las industrias mineras o de procesos en general, esto debido al alto impacto que tiene este proceso físico en la vida útil de las cañerías, reduciendo este tiempo con un alto costo monetario.

Para esta investigación se trabajará el desgaste erosivo por el impacto de partículas sólidas en la superficie, estas partículas pueden ser transportadas por un medio gaseoso o líquido como es nuestro caso. En este tipo de desgaste hay múltiples fuerzas involucradas en el proceso del contacto partícula-pared, a su vez el flujo que transporta los sólidos causa arrastre, por lo tanto, las principales fuerzas involucradas en este proceso de erosión son las siguientes:

- Fuerza de contacto partícula-superficie.
- Fuerza de contacto entre partículas (choques).
- Fuerza de arrastre del flujo.

Si el material de la pared de la cañería corresponde a un material dúctil, el impacto

repetitivo de partículas de concentrado formarán 'cráteres' u orificios en la superficie y que irán aumentando su tamaño según mas partículas impacten como se ejemplifica en la figura 1-a; en cambio los materiales de composición frágil al sufrir un impacto de las partículas sufren del crecimiento de grietas laterales y radiales al ángulo de impacto, en donde se puede observar el crecimiento de pequeñas piezas que serán removidas en un futuro por posibles impactos continuos.

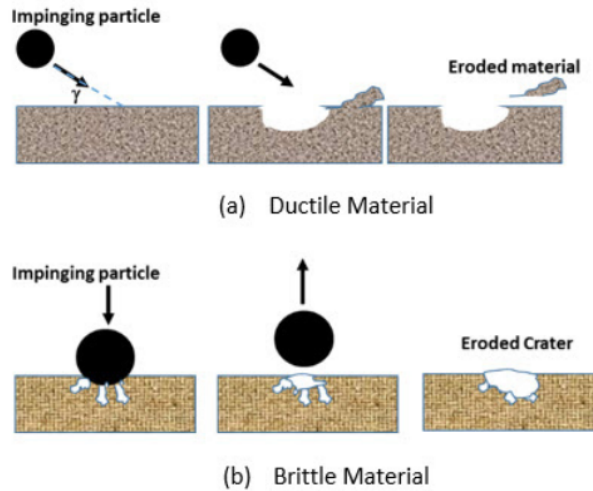


Figura 3.1: Mecanismo de erosión a) Materiales dúctiles b) Materiales frágiles.

3.2. Sedimentación

La sedimentación en cañerías corresponde al almacenamiento o deposición de partículas (con densidad mayor a la del agua que las transporta) en la superficie de las paredes de los concentraductos debido a velocidades bajas dentro de este ducto y a la misma gravedad presente, factores que no permiten la suspensión en el fluido bifásico de las partículas presentes en el concentrado.

Esta deposición de partículas en las paredes además de dañar la superficie afecta directamente las condiciones de operación en el transporte del concentrado, debido a que disminuye el diámetro interno de la cañería gracias a la capa de incrustación generada como se puede ver en la figura



Figura 3.2: Sedimentación en cañerías.

3.2.1. Velocidad de deposición

La velocidad de deposición se define como la velocidad bajo la cual las partículas más gruesas de concentrado comienzan su fase de depositación en las paredes inferiores de la cañería formando una cama de sólidos deslizante.

Comúnmente para saber si existirán zonas de deposición en tuberías horizontales se usan ajustes de la ecuación de Durand para concentrados con partículas $d_{50} < 200$ [um] [5]:

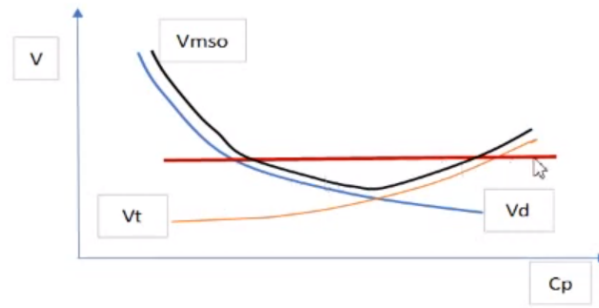
$$VL = FL \cdot \sqrt{2gD_i(S-1)} \cdot \left(\frac{d_{50}}{D_i}\right)^{1/6} \quad (3.1)$$

$$FL = 3.322 \cdot \left(\frac{C_v}{100}\right)^{0.213} \quad (3.2)$$

Donde:

- VL: velocidad límite bajo la cual hay depositación [m/s]
- FL: constante de concentración de sólidos en volumen y de D_{50} [6]
- D_i : Diámetro interno de la cañería [m].
- S: gravedad específica de los sólidos.
- C_v : concentración de sólidos en volumen (%).
- d_{50} : tamaño de abertura de la malla que permite el paso del 50% de las partículas de concentrado (m).

En el caso de las mezclas heterogéneas sedimentables (como es el caso del concentrado de hierro) el comportamiento del fluido varía para distintas concentraciones, y hay una zona o rango de velocidades a partir de las cuáles el comportamiento del escurrimiento es similar a un fluido pseudohomogéneo (y en donde los sólidos se mantienen en suspensión dentro del fluido de transporte), por debajo de esas velocidades el transporte de concentrado segrega partículas/sólidos en la superficie de la cañería y esta velocidad límite se conoce como velocidad de depósito (velocidad crítica o de sedimentación).



$$V_{mso} > \text{Max}[V_t, V_d]$$

Figura 3.3: Gráfico velocidad de transporte versus concentración de la mezcla.

Como se observa en la figura 3.14 en el enfoque reológico existen velocidades que pueden ser estimadas, la velocidad de depósito (V_d) corresponde a la línea azul y muestra la tendencia a disminuir de esta velocidad frente al aumento de la concentración; en cambio la línea naranja corresponde a la velocidad de transición (V_t) cuyo requerimiento de velocidad aumenta frente al aumento de concentraciones debido al aumento de la viscosidad (y esto implica que la velocidad de transición laminar-turbulento predomina por sobre la velocidad de depósito), por lo tanto la velocidad mínima (V_{mso}) se entiende como la mayor entre las 2 velocidades lo que nos entrega estados de trabajo factibles para evitar sedimentación.

La línea roja corresponde a pronósticos de distintos modelos y ecuaciones, se observa que es un modelo más conservador, aunque hay zonas en donde estas estimaciones no sirven debido a que se encuentran debajo de la curva de las velocidades.

La finalidad en el cálculo de la velocidad de deposición es que una vez obtenidos los resultados del modelo monofásico no-Newtoniano, analizar en qué zonas podría eventualmente haber deposición de las partículas, entonces si se observa en el campo de velocidades grandes zonas menores a deberá ponerse en duda el modelo y utilizar otro más adecuado.

3.2.2. Reología y modelamiento matemático concentrado

La reología de un concentrado permite estudiar la relación entre el esfuerzo y la deformación del fluido mientras es transportado; las propiedades que importan para el diseño de un mineroducto corresponden a la viscosidad reducida y el esfuerzo de fluencia que son reflejadas en el diagrama reológico o gráfico de esfuerzo de corte vs velocidad de deformación como se muestra a continuación:

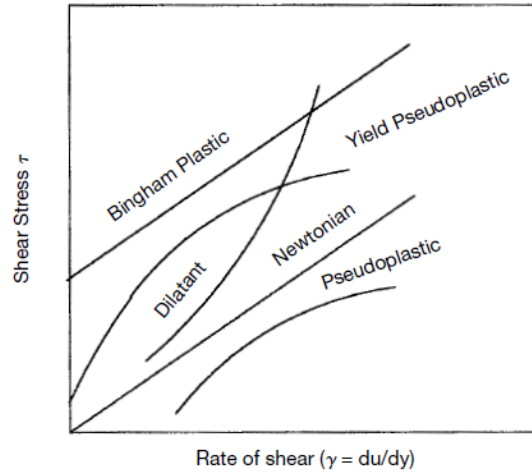


Figura 3.4: Diagrama reológico fluidos de trabajo. [7].

Y en donde la viscosidad aparente μ_a [pa s] se define como:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.3)$$

En general para el sector minero es de interés el estudio del transporte de fluidos newtonianos (líquidos puros como el agua) cuya viscosidad es constante e independiente del tiempo y los fluidos de bingham (no-newtonianos), el segundo de estos corresponde el caso a analizar dentro de los concentrados.

Los fluidos de Bingham corresponden a fluidos no newtonianos (aquellos cuya viscosidad varía con la velocidad de deformación y que son independiente del tiempo) que son similares a los fluidos newtonianos considerando altas tasas de deformación, pero que se comporta como un sólido cuando las tasas de deformación es baja lo que implica en un esfuerzo adicional para iniciar el movimiento del concentrado, y cuando ocurre este movimiento se comporta como un fluido viscoelástico cuya formulación matemática es la siguiente:

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\phi} \quad (3.4)$$

Donde:

- τ : Tensión de corte [Pa].
- τ_0 : Tensión de corte crítica (tensión de fluencia) [Pa].
- η : Viscosidad dinámica [Pa s].

En las siguientes secciones se indicarán los modelos que expresan las variables de interés del concentrado de hierro que se utilizará como fluido de trabajo.

3.2.2.1. Densidad

La densidad del concentrado relaciona la densidad del fluido de trabajo que transporta el concentrado de mineral (material particulado), la densidad de estas partículas y la concentración en % peso, las condiciones de trabajo para esta memoria considera un mínimo de 62.7 % fracción de peso para el transporte del concentrado de hierro.

$$\rho_{pu} = \frac{100}{\left(\frac{C_p}{\rho_{co}} + \frac{(100-C_p)}{\rho_l}\right)} \quad (3.5)$$

Donde:

- ρ_{pu} : densidad de la pulpa [kg/m³]
- C_p : concentración en peso del concentrado [%]
- ρ_{co} : densidad del concentrado de mineral [kg/m³]
- ρ_l : densidad del agua 1000 [kg/m³]

3.2.2.2. Concentración del Relave C_v

La concentración del relave o concentrado C_v corresponde a la concentración de partículas del mineral por volumen del sólido [7], definida cómo:

$$C_v = \frac{C_{pp}\rho_{pu}}{\rho_s} \quad (3.6)$$

Donde:

- C_{pp} : concentración de partícula por peso de sólido.
- ρ_s : densidad partícula sólida [kg/m³].

3.2.2.3. Viscosidad Dinámica

Corresponde a una de las propiedades reológicas más importantes, ya que indica la resistencia que posee el concentrado a ser transportado desde un punto a otro, siendo importante para ver el estado de flujo del concentrado dentro de la cañería a reparar a alta presión.

EL alcance de esta investigación no incluye el cálculo de esta viscosidad, debido a que se obtienen mediante los datos de temperatura y pH entregadas en el reporte de resultados de Reología suministrado por la empresa BRASS Chile y cuyo valor corresponde a $\mu=0.0054$ [Pa s].

3.3. Caracterización de flujo en tubería

El flujo que se transporta a través de una cañería tiene una clasificación dependiendo del tipo de régimen o grado de turbulencia, dependiendo de los diámetros de trabajo, velocidades

del concentrado, viscosidad dinámica y densidad, normalmente los flujos de trabajo pueden ser catalogados de la siguiente forma:

- Laminar: el flujo se realiza por capas paralelas, esto implica que todas las partículas se desplazan en la misma dirección del flujo medio.
- Zona de transición: corresponde a la fase de transición entre ambos regímenes.
- Turbulento: se presentan componentes de velocidad en todas las direcciones.

Estos regímenes dependen del Número de Reynolds [7], técnica de análisis hidráulico como análisis dimensional, en donde se establece una relación en tuberías que permite establecer los cambios de flujo en laminar, flujo de transición y turbulento.

$$Re = \frac{\rho_{pu} \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (3.7)$$

El significado de este número físico adimensional corresponde a la relación entre las fuerzas inerciales debidas al movimiento del flujo y las fuerzas disipativas viscosas o de roce que se oponen a este movimiento, por lo que en los problemas de transporte de concentrado de mineral se busca que las primeras dominen a las segundas.

Para flujo interno en cañerías el criterio para establecer el tipo de flujo bajo el cual se trabajará es el siguiente: 'Si el número de Reynolds es menor a 2300, el flujo será laminar y, si es mayor de 4000, el flujo será turbulento'.

Pero para fluidos bifásicos (concentrado de hierro) el criterio establecido por el número de Reynolds no es suficiente para establecer si un flujo bifásico está en condición laminar zona de transición o fase turbulenta, por lo que es necesario reconocer otro número adimensional.

3.3.1. Número de Hedstrom (He)

Para establecer la condición del estado del flujo existen múltiples criterios teóricos, entre los cuáles se encuentra el criterio mediante el Número de Hedstrom para fluidos no newtonianos [7] (específicamente para fluidos que siguen la ley de Bingham).

$$He = \frac{\rho \tau D^2}{\mu^2} \quad (3.8)$$

Donde:

- He: número de Hedstrom.
- D_i : diámetro interno de la cañería
- ρ : densidad de la mezcla.
- τ_0 : tensión de corte crítica [Pa].

- μ : viscosidad plástica de la concentración [Pa s]

Esta transición laminar-turbulenta se establece a través del criterio empírico de Slatter y Wasp [5], que indica que para números de Hedstrom mayores a 1.5×10^5 (en nuestro caso $He=324500 > 1.5 \times 10^5$ se utiliza el criterio de Reynolds crítico:

$$Re_c = 26 \cdot He^{1/2} \quad (3.9)$$

El valor obtenido para este Reynolds crítico es de $Re_c=46,836$ lo que corresponde a un flujo en régimen turbulento para este tipo de investigación se busca estar alejado de la fase de transición y en un estado turbulento en el escurrimiento de la mezcla, por lo tanto, se cumple esta condición.

3.3.2. Velocidad de transición

La velocidad mínima de operación segura del concentrado, corresponde a la velocidad de transición entre flujo laminar y flujo turbulento (se verá en un mayor detalle en la sección 3.5.2), en donde se utiliza la siguiente ecuación para determinar este valor de velocidad [5]:

$$V_t = \frac{Re_c \cdot \mu}{\rho_{pu} \cdot D} \quad (3.10)$$

3.4. Antecedentes Fluidodinámicos y Modelación Matemática

3.4.1. Fluido Dinámica Computacional (CFD)

El simple hecho de que exista erosión y sedimentación en el transporte de concentrado dentro de la industria eleva los costos de mantención debido a los múltiples problemas internos que se pueden generar y que pueden llegar a paralizar procesos durante un tiempo prolongado; a lo largo de los años los problemas internos mencionados fueron solucionados mediante el ensayo y error de las cañerías (métodos experimentales) junto con la experiencia con la que va asociada, pero esto implicaba fallos y riesgos para las faenas además de posibles accidentes.

Una herramienta de investigación que va ganando protagonismo en la industria es la Fluido Dinámica Computacional (CFD), esto debido al aumento en la capacidad computacional para las distintas simulaciones numéricas, esto permite reducir costos en la fabricación, construcción e instalación de cañerías, ya que es posible observar de manera previa con la simulación los elementos que pueden fallar por erosión y/o sedimentación en el transporte de concentrado.

Uno de los programas CFD existentes para trabajar es ANSYS Fluent, herramienta que permite el modelamiento numérico de distintos fenómenos en el transporte de fluidos junto con la interacción de fuerzas de un medio y su entorno. Los distintos fenómenos del flujo pueden ser representados mediante ecuaciones diferenciales parciales que son resueltas mediante ecuaciones de Navier-Stokes debido a que su solución analítica no es posible.

El método CFD tiene como base de proceso la resolución de distintas ecuaciones, pero en donde la principal corresponde a la ecuación de transporte (para cada variable de interés):

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_V \rho \phi dV + \oint_V \rho \phi V \cdot dA = \frac{\delta}{\delta t} \oint_V \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (3.11)$$

Para cada una de las ecuaciones resueltas numéricamente mediante CFD esta ecuación es aplicada cambiando la variable interés a resolver, y dependiendo de esta elección se implementa para la conservación de masa o continuidad, continuidad de momento o energía. En la ecuación 2.3 se observan 4 términos: el primero corresponde al término temporal, el segundo al término advectivo, el tercero al término difusivo y el último a la fuente de la ecuación; para cada problema varía ϕ que es la variable de interés, el coeficiente de difusión Γ y la fuente S .

La resolución de estas ecuaciones se realiza sobre volúmenes de control (o mallas) definidos previamente en el programa, que es un método de discretización del medio y en donde para esta investigación se utilizará el método de diferencias finitas llamado método de volúmenes finitos, y en el cual el dominio continuo es reemplazado por un dominio discreto del fluido de trabajo conformado por múltiples volúmenes de control que no se superponen entre si y en donde en cada uno de estos elementos las ecuaciones son resueltas, a continuación se presenta un esquema con el modelo mencionado:

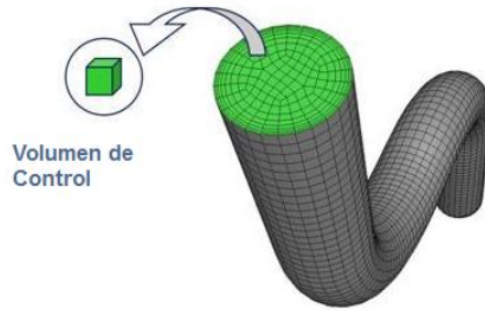


Figura 3.5: Discretización del dominio del fluido en pequeños volúmenes. [8].

Dentro de este contexto se encuentra el programa CFD de ANSYS (módulo Fluent), en donde se pueden calcular las distintas trayectorias de los sólidos de concentrado utilizando ciertos modelos adaptados en el programa.

3.4.2. Modelamiento concentrado general

Los concentrados de minería que se transportan en los concentraductos son soluciones o mezclas bifásicas de flujos de agua con partículas sólidas del material concentrado de diferente granulometría, con esta descripción se hace importante definir las distintas propiedades que tienen que ser ingresadas a los modelos de trabajo de ANSYS fluent, a continuación se presentan los elementos que permiten describir el fenómeno del transporte de concentrado dentro de una cañería bajo presión.

Un flujo de concentrado en una cañería contempla una gran diferencia con respecto al flujo de una fase, debido a que teóricamente en el flujo de una fase (y de bajas viscosidades) no requiere de altas velocidades para evitar la no suspensión de particular (y generar sedimentos en la parte inferior de la cañería); en cambio los concentrados cuya viscosidad es alta en comparación al flujo anterior requieren altas velocidades (estar en un régimen turbulento)

Existen diferentes formas de modelar estos concentrados que fluyen a través de la cañería, en donde la mezcla queda caracterizada en su totalidad con el modelo matemático definido y los siguientes parámetros: granulometría, distribución de las partículas en suspensión, concentración de la fase sólida con respecto a su propio peso, su densidad y viscosidad.

3.4.3. Parámetros de interacción Fluido-Partícula

Existen ciertos parámetros (fuerzas) que tienen una importancia en la interacción de las partículas que se transportan en el fluido de trabajo, ya que pueden afectar las propiedades o el estado en el que fluye el concentrado, por lo tanto, es importante definir cuáles serán tomadas en consideración, a continuación se listan los parámetros cuyo valor es lo suficientemente grande para ser considerado:

1. Interacción partícula-fluido:
 - Gradiente de presión estática del agua, ∇P .

- Fuerza de arrastre (drag force), causada por la diferencia de velocidades entre las dos fases $k_{sf}(v_s - v_f)$.
 - Fuerzas viscosa del agua, $\nabla \cdot \vec{\tau}_f$, $\vec{\tau}_f$ es el tensor de esfuerzos del agua.
 - Variaciones de la fuerza de arrastre debido a la turbulencia.
 - Fuerza de masa virtual, que corresponde a la fuerza que la masa de agua transporta consigo
2. Interacción partícula-partícula: gradiente de presión sólido debido a la interacción (colisiones) sólido-sólido ∇P_s y $\nabla \cdot \vec{\tau}_s$.
 3. Fuerzas de cuerpo: fuerza de gravedad, $\rho \vec{g}$.

3.4.4. Distribución de partículas

Los fluidos bifásicos que son transportados en la minería tienen una alta complejidad en su composición, por lo que resulta importante clasificar los estados o modelos bajo los cuales se tendrá que trabajar en la modelación en el transporte de estos concentrados, con esto mencionado se presentan los regímenes en el transporte de material particulado, resumidos en la figura 2.5:

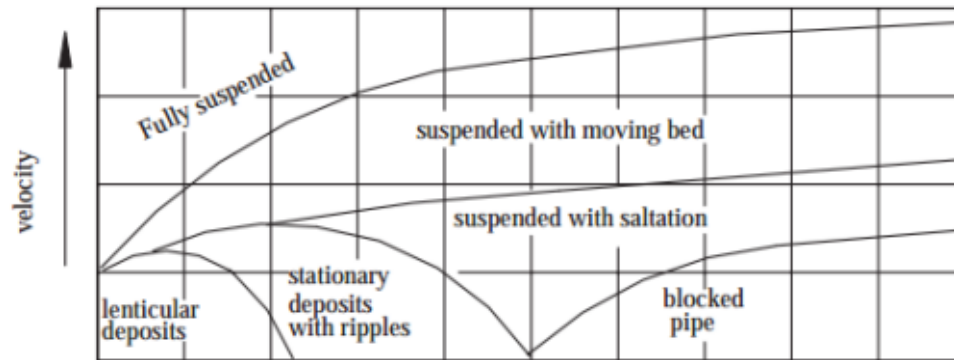


Figura 3.6: Regímenes de flujo en términos de velocidad versus su concentración. [7].

- Flujo homogéneo: en donde las partículas se encuentran en suspensión y distribuidas uniformemente en el medio líquido, generalmente este régimen se presenta en concentrados o pulpas con partículas de una granulometría pequeña o cuando el fluido bifásico se transporta a alta velocidad, a continuación se presenta el perfil de velocidad, la distribución de sólidos y el perfil de concentración en la cañería a modo de esquema.

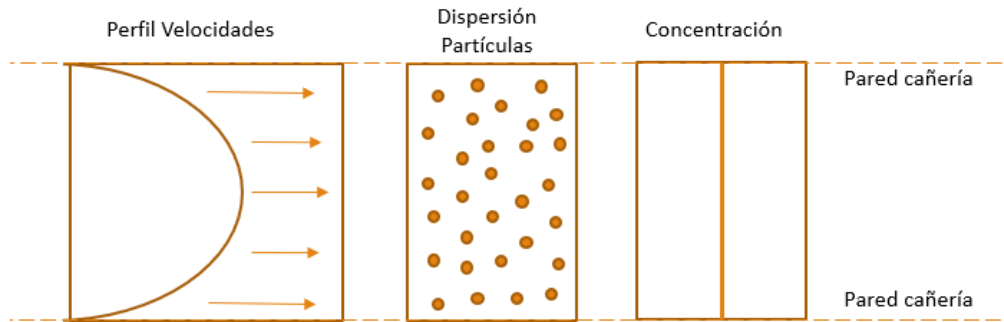


Figura 3.7: Esquema de flujo de concentrado homogéneo.
Fuente: Elaboración propia.

- Flujo Heterogéneo: los sólidos presentes en la mezcla no se encuentran distribuidos uniformemente debido a las velocidades o tamaño de partículas, generando un gradiente de concentración como se puede apreciar en la siguiente figura, en general se busca evitar este régimen imponiendo turbulencia dentro del transporte del concentrado.

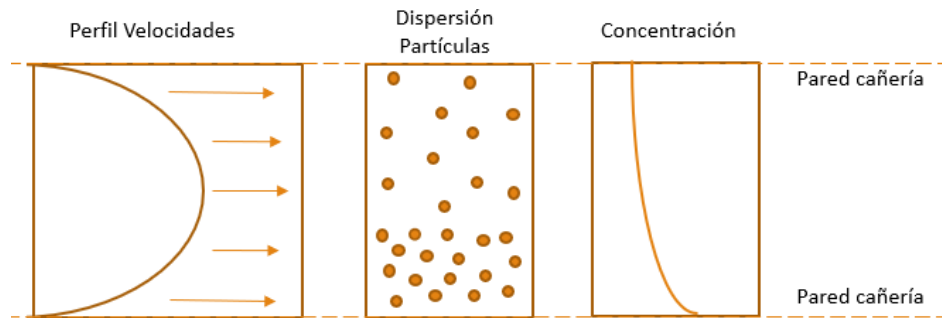


Figura 3.8: Esquema de flujo de concentrado heterogéneo.
Fuente: Elaboración propia.

- Flujo con lecho móvil: que corresponde al régimen en donde ocurren sedimentación de las partículas. Una parte de los sólidos quedan en la pared inferior de la cañería debido a la gravitación mientras que otros se mantienen en suspensión, cabe mencionar que los primeros sólidos igual son arrastrados por la corriente en la dirección de flujo, pero avanzan de manera más lenta, se puede observar en la siguiente figura que el gradiente de concentración cambia cercano al fondo donde sedimentan los sólidos.

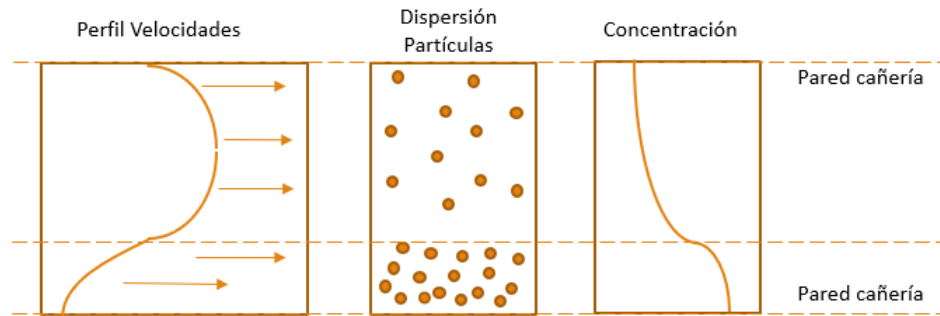


Figura 3.9: Esquema de flujo de concentrado con lecho móvil.
Fuente: Elaboración propia.

- Flujo con lecho fijo: que corresponde al peor estado en el que puede fluir el concentrado, debido a que múltiples sólidos sedimentan en la pared de cañería inferior y el escurrimiento no es libre, es importante evitar este tipo de régimen evitando bajas velocidades y grandes tamaños de partículas.

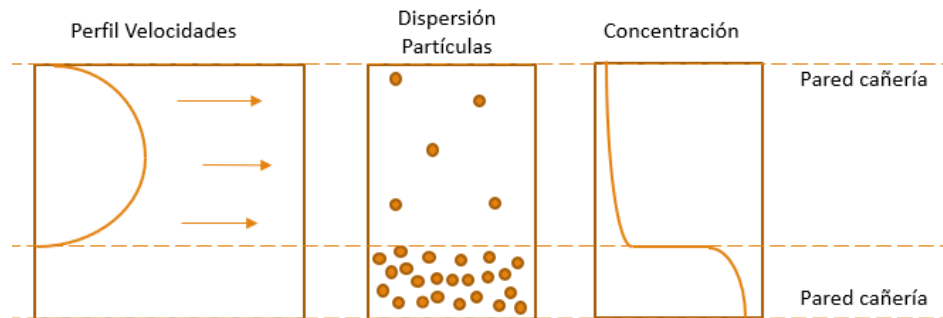


Figura 3.10: Esquema de flujo de concentrado con lecho fijo.
Fuente: Elaboración propia.

En esta investigación se busca trabajar en el primer régimen mencionado, consiguiendo velocidades ideales y turbulencias adecuadas para el correcto transporte del concentrado, es por eso que resulta importante encontrar la velocidad a la cuál sedimentan los sólidos en su escurrimiento dentro de la cañería.

Como bien se menciona, si se aumenta la velocidad en el transporte de concentrado, tenderá a aumentar el comportamiento turbulento de esta mezcla bifásicas, este comportamiento es importante debido a que la turbulencia será capaz de mantener en suspensión las partículas del mineral, por lo tanto se requieren ciertas velocidades y turbulencias para un correcto transporte pero esto no asegura un transporte simétrico en el área transversal de la cañería, esto debido a los distintos tamaños de las partículas de sólidos y debido a que el simple hecho de que cada una tiene una gravedad específica distinta, este problema se menciona en la sección 2.3.2.

3.4.5. Modelos para erosión

Como se mencionó en la sección 2.5.1 mediante la Fluido Dinámica Computacional (CFD) es posible modelar la erosión mediante el módulo Fluent de ANSYS, y en donde es posible proyectar las trayectorias de las partículas del concentrado en su transporte y así poder observar la erosión por interacción partícula-pared, esto se logra mediante distintos modelos disponibles dentro del programa y en donde para esta investigación se elige el modelo de daños por impacto (Erosion Model), el cual considera las interacciones entre partículas y los choques partícula-pared, estas son definidas mediante distintas constantes que se detallarán más adelante y que corresponden a coeficientes de restitución tanto para las direcciones tangenciales como para las normales.

El comportamiento del material frente a la erosión por el choque de partículas depende de su propiedad en contra de la deformación bajo impacto y otros factores que se mencionan en el siguiente listado:

- Velocidad de impacto de la partícula.
- Ángulo de impacto de la partícula.
- Propiedades mecánicas del material erosionado (módulo de Young, número de Poisson).
- Temperatura de la pared.
- Coeficiente de fricción partícula-pared.
- Concentración de partículas (relacionado con el número de impactos).
- Densidad de las partículas.
- Tamaño de las partículas.

A continuación se detallan los modelos disponibles en la literatura y aplicados dentro del programa para evaluar la erosión, y en donde los parámetros antes mencionados toman cierta relevancia en cada uno, todo esto correspondiente a la sección 16.10 [9]:

1. Modelo de Finnie: que es un modelo más adecuado para materiales dúctiles (acero) donde la erosión tiene un cambio significativo con la variación del ángulo de impacto y la velocidad de impacto.
2. Modelo de Oka: este esquema proporciona una correlación más realista de la erosión debido a que incluye el efecto de la dureza del material de la cañería (o de la pared).
3. Modelo de Mclaury: en particular este modelo fue desarrollado para predecir la tasa de erosión de partículas sólidas cuyo fluido de transporte es agua, se utiliza principalmente en flujos de pulpa.
4. 'Accretion'

Además de estos modelos de erosión, existen elementos en el modelamiento que es importante definir debido a la directa influencia que tienen sobre la simulación de la erosión, y en donde en cada parte se debe elegir una opción de configuración del programa:

3.4.5.1. Modelo Inyección Partícula

Para la proyección de trayectorias y zonas de impacto de las partículas sólidas que son transportadas por el agua se utiliza una aproximación lagrangeana [10], modelo que sigue los conceptos de la aproximación Euler-Lagrange y en donde el fluido es tratado como una fase continua en donde se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes mientras que la fase dispersa se resuelve mediante el 'tracking' o rastreo de un número amplio de partículas y en donde estos sólidos pueden intercambiar momentum, masa, energía con la fase fluida.

Una vez terminada la simulación de flujo continuo se procede a entregar la inyección de partículas discretas en las soluciones obtenidas, para esto se abre el setup de fluent, posteriormente se importa la última solución guardada en la solución continua.

El siguiente paso es activar el modelo de fase discreta, se tiene que desmarcar la opción Unsteady particle Tracking y luego se elige la forma de las partículas (Esféricas todas), posteriormente se selecciona la opción que permite ingresar la inyección de partículas, no olvidar que la velocidad ingresada para estas partículas tendrán un valor de 0 [m/s] debido a que tendrán la misma velocidad del flujo continuo y por último se procede a configurar los diámetros de partículas que se analizarán, serán 10 diámetros distintos obtenidos mediante la distribución de Rosin Rammler antes mencionada, eligiendo que la dirección de estos elementos sea normal a la superficie escogida (Inlet).

Antes de finalizar, se debe marcar la opción de interacción de esta fase discreta con la fase continua, lo que permitirá que en la pestaña de los modelos físicos se active la opción del modelo de erosión.

Se verifica que en las condiciones de borde, el modelo de fases discretas (DPM o Discrete Phase Model) estén indicadas las condiciones de borde con la fase discreta, para la salida de las partículas se asigna una condición de escape y para las demás una condición de 'reflect' (para observar el impacto). Con respecto a la zona del dominio en el transporte de concentrado (Zona de nombre Wall) se ingresa la función del diámetro de la partícula, la función del ángulo de impacto $f(\gamma)$ que se indican en las próximas secciones; además se considera que los coeficientes normal y tangencial de restitución de la fase discreta (que corresponde a la cantidad de momentum que es retenida por la partícula posterior al choque con la pared) se calcula de la siguiente forma:

$$e_{normal} = 0.993 - 0.0307 \cdot \theta_1 + 4.74x10^{-4}\theta_1^2 - 2.61x10^{-6} \cdot \theta_1^3 \quad (3.12)$$

$$e_{tangencial} = 0.988 - 0.029 \cdot \theta_1 + 6.43x10^{-4}\theta_1^2 - 3.56x10^{-6} \cdot \theta_1^3 \quad (3.13)$$

En donde θ_1 y θ_2 corresponden a los ángulos de entrada y salida de la partícula en su choque con la pares de la cañería, como se puede observar se utilizan polinomios para los coeficientes de restitución, y este polinomio a su vez depende del ángulo de impacto [10].

3.4.5.2. Modelo de Turbulencia

Para modelar y simular de una manera precisa el escurrimiento del fluido dentro de nuestra cañería se requiere un correcto modelo de turbulencia debido a la importancia de este concepto en múltiples sentidos, pero incluir este elemento en las simulaciones va de la mano con un aumento de los costos computacionales del problema debido a que los campos de velocidades sufren fluctuaciones considerando que hay una combinación de las magnitudes transportada por la mezcla como lo son: energía, momentum, concentración de las partículas, entre otras.

El módulo Fluent presenta múltiples modelos de turbulencia para distintas situaciones, cada uno de estos posee distintas configuraciones y requieren distintos niveles de precisión junto con el costo operacional involucrado, a continuación se presentan los modelos disponibles en el módulo Fluent de ANSYS:

ANSYS FLUENT	
RANS (Reynolds-Averaged Naviers - Stokes)	LES and DES
<i>Sparlat Allmaras</i>	<i>DDES</i>
<i>Standard K-Epsilon</i>	<i>IDDES</i>
<i>RNG K-Epsilon</i>	<i>Smagorinsky-Lilly model</i>
<i>Realizable k-Epsilon</i>	<i>Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE) model</i>
<i>Standard k-ω</i>	<i>Dynamic Smagorinsky-Lilly model</i>
<i>SST k-ω</i>	<i>Dynamic Kinetic Energy Transport model</i>
<i>4-Equation v2f *</i>	<i>Wall-Modeled LES (WMLES)</i>
<i>k-kℓ-ω Transition Model</i>	<i>SAS (Scale Adaptive Simulation SST)</i>
<i>SST Transition Model</i>	
<i>RSM (Reynolds Stress Model)</i>	
<i>Scale-Adaptive Simulation</i>	

Figura 3.11: Descripción modelos de turbulencia en módulo Fluent [11]

Como se puede observar existen 2 esquemas de trabajo para modelar la turbulencia en el escurrimiento del fluido, cada uno contiene distintos modelos y como se menciona anteriormente estos de manera particular sirven para distintas condiciones dependiendo que resultados se quiere lograr, en las listas que se observar el orden de arriba hacia abajo va en orden ascendente en costos computacionales y por lo tanto también en la precisión.

Dentro de estos esquemas se encuentra RANS [9], cuya sigla significa Reynolds Averaged Navier Stokes, que permite solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes con un promedio temporal o sea para problemas que no dependen del tiempo (estacionarios), donde se promedian en el tiempo las ecuaciones que gobiernan de manera instantánea el problema (llamadas ecuaciones exactas) y las cuales son las principales magnitudes de las ecuaciones de transporte mencionadas en la sección 2.5.1, y en donde las ecuaciones que gobiernan estos promedios se llaman 'Promedios de Reynolds':

$$u_i = \bar{u} + u'_i \quad (3.14)$$

Donde \bar{u} corresponde a la componente principal y u'_i a la componente fluctuante, esta variable u puede funcionar de manera análoga para cualquiera de las variables, sustituyendo esta expresión en la ecuación 2.3, promediando y posteriormente expresando de manera tensorial

las ecuaciones, quedan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(pv_i) = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i \rho u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_i \bar{u}_j \quad (3.16)$$

Estas ecuaciones corresponden a las ecuaciones promedio de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS), en donde las magnitudes con promedios y en donde el último término $\rho u_i \bar{u}_j$ es el término que incluye los efectos de la turbulencia (tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds).

Para este problema se decide ocupar el modelo k-epsilon realizable debido a que es el más simple de los modelos de turbulencia que permite un buen equilibrio entre el costo computacional y precisión, todo esto asociado a los componentes que se tienen para este trabajo de investigación, se diferencia del k-epsilon estándar en los siguientes puntos:

- Modelo realizable contiene una formulación alternativa a la viscosidad turbulenta.
- Nuevo término para la tasa de disipación.

3.4.5.3. Modelo de erosión de Finnie

Se utiliza la correlación de Finnie [12] para modelar el concentrado debido a que estamos trabajando con un material de la cañería que pertenece a un material dúctil, las ecuaciones y fórmulas con las que se trabajará se presentan a continuación:

$$ER = AF_s V_p^n f(\gamma) \quad (3.17)$$

o

$$ER = CV_p^2 f(\gamma) \quad (3.18)$$

Donde ER corresponde al ratio de erosión ('Erosion Ratio') expresado de manera adimensional [kg/kg], A es una constante empírica, F_s corresponde al coeficiente de forma de la partícula (1.0 para forma angular, 0.53 para una forma semi redondeada y 0.2 para una forma completamente redonda), V_p es la velocidad de impacto de la partícula y $f(\gamma)$ una función adimensional que depende del ángulo de impacto γ del sólido, por último, la constante n en metales va de un rango de 2.3 a 2.5 radianes, además la constante 'n' corresponde a un coeficiente empírico que va desde 1.73 a 2 para aceros al carbono.

Este modelo de desgaste erosivo de Finnie permite relacionar la tasa de desgaste con la tasa de energía cinética que genera el impacto de la partícula con la superficie de la cañería, la función que depende del ángulo puede tomar los siguientes valores (considerando α en

grados sexagesimales):

$$f(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{3}\cos^2\gamma & \text{para } \gamma > 18.5^\circ \\ \sin(2\gamma) - 3\sin^2(\gamma) & \text{para } \gamma \leq 18.5^\circ \end{cases} \quad (3.19)$$

Esta función no necesariamente posee las constantes de estudio para el acero; utilizando un estudio de erosión para acero para un rango de partículas de estudio de características finas (ver tamaño granulometría) la función se cambia a la siguiente estructura utilizando como base la ecuación 3.19 se obtiene:

$$f(\gamma) = \begin{cases} a\theta^2 + b\theta & \text{para } \theta \leq \varphi \\ x\cos^2\theta\sin(w\theta) + y\sin^2\theta + z & \text{para } \theta > \varphi \end{cases} \quad (3.20)$$

Donde φ , a , b , w , x , y , z son constantes empíricas que dependen del material que será erosionado, cuyos valores serán basados en una velocidad V_s en [ft/s] [13] y material acero al carbono:

Tabla 3.1: Constantes empíricas del modelo de Erosión de Finnie para el acero al carbono [14]

Constantes	Acero al Carbono
a	-0,0013
b	0,0026
w	0,055
x	2
y	-0,05
z	0,115
θ	10°
C	10 ⁻¹³

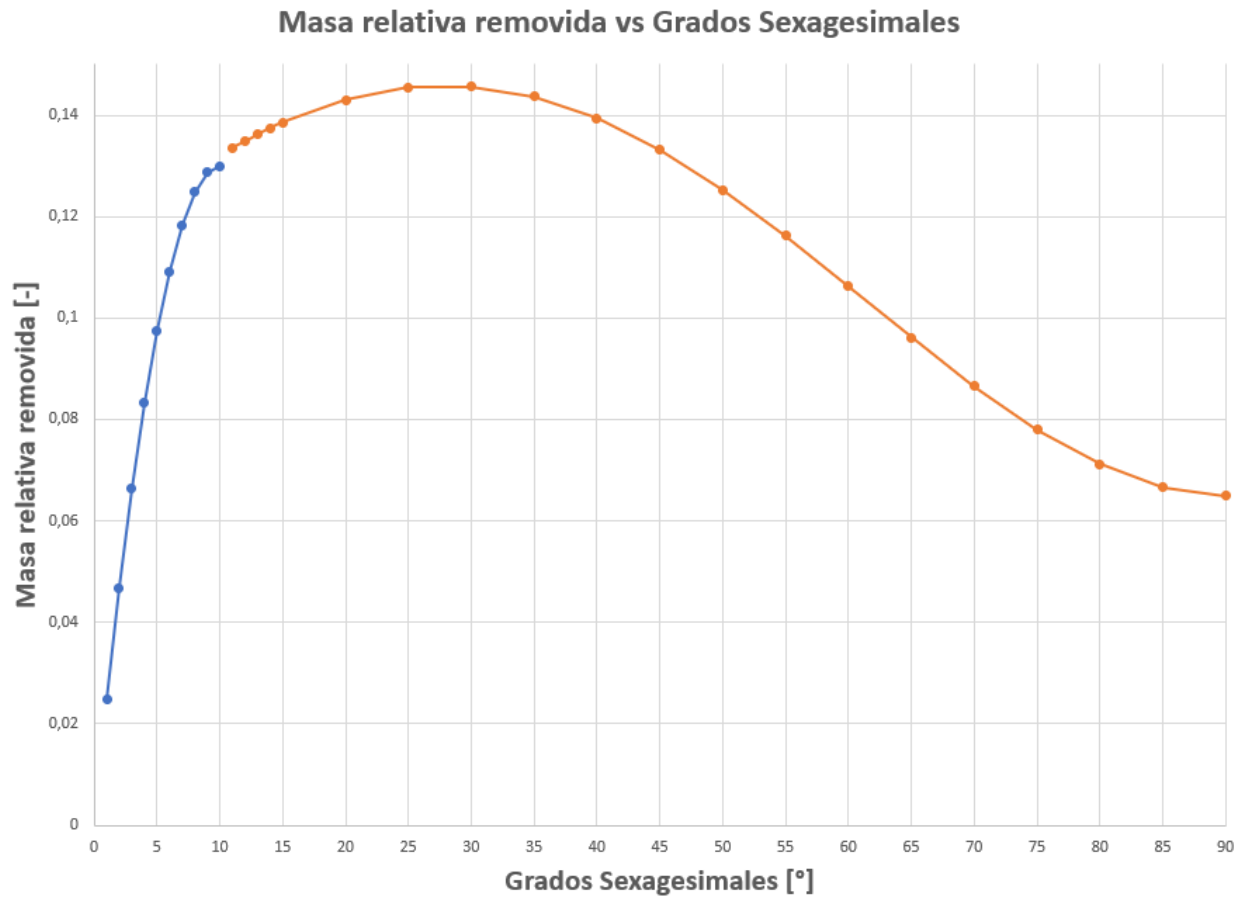


Figura 3.12: Gráfico de función $f(\gamma)$ con las constantes empíricas del acero al carbono.

3.5. Resumen propiedades y modelos a utilizar

3.5.1. Granulometría del Concentrado

Para el material concentrado que es transportado en el fluido (agua) se ocupará una gravedad específica en promedio $GES=4.73$. El porcentaje de sólidos que es transportado corresponde a un 62% de peso ($C_p=0.62$) que implica en una densidad del concentrado de $1508 [kg/m^3]$; además se indica la toma de muestras para la granulometría en la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Valores granulometría concentrado.

Malla Tyler	Tamaño malla [um]	Porcentaje pasante acumulado [%]			
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4
65	212	100	100	100	100
100	150	99,9	99,8	99,8	99,9
200	75	96	95,8	95,6	96
270	53	86,8	86,6	86,2	86,8
325	45	78,1	77,5	79,2	79,6
400	37	72,2	71,6	74	74,3

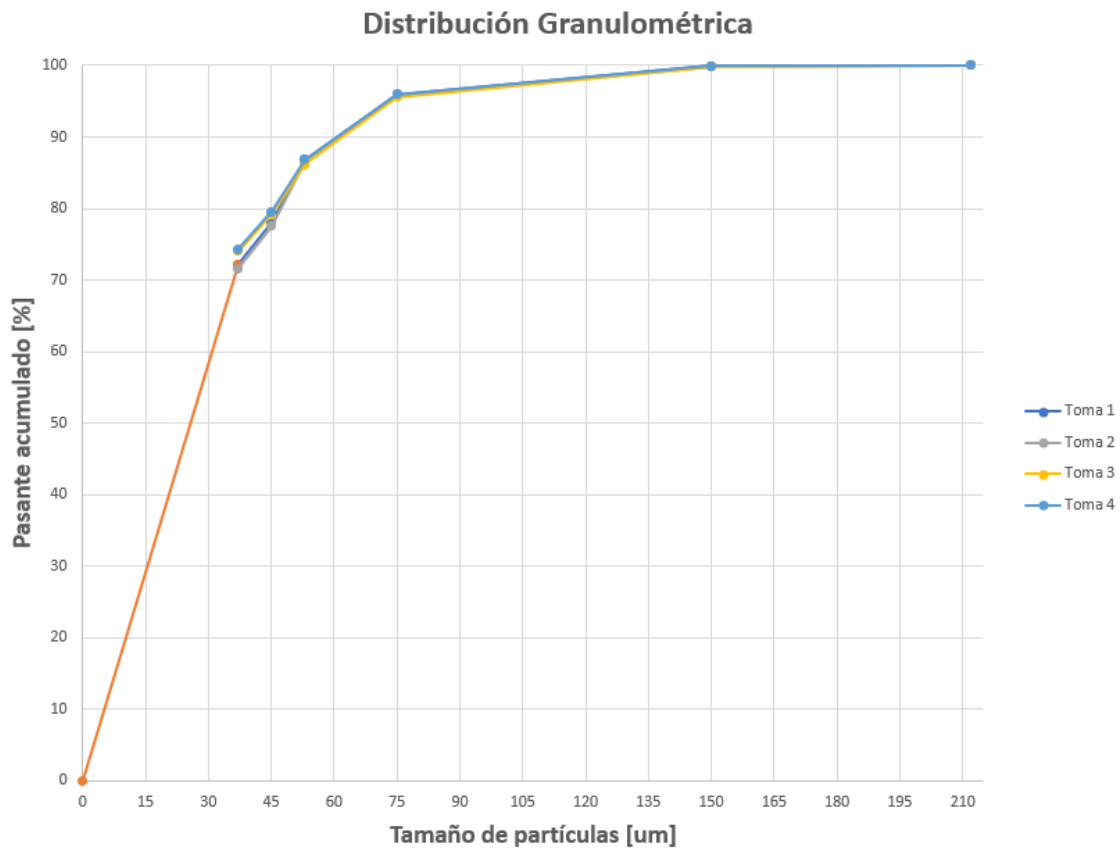


Figura 3.13: Granulometría de sólidos en concentrado.

El diámetro promedio (d_{50}) es de 28 [μm] aproximadamente, para obtener una distribución de la granulometría en todo su espectro se puede utilizar la función de Rosin-Rammler, usada en múltiples trabajos de minería para caracterizar granulometrías de sólidos que escurren en fluidos, por lo tanto se puede describir de la siguiente forma:

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (3.21)$$

Donde:

- Y_d : Fracción másica de las partículas con diámetro mayor a d .
- \bar{d} : Constante de tamaño.
- n : Parámetro de distribución de tamaño.

Los valores de los parámetros serán $\bar{d}=28$ [um] y $n=1.23$ para la granulometría del relave a trabajar, la siguiente figura muestra una aproximación de Rosin-Rammler presentada anteriormente junto con los datos de granulometrías de una muestra (específicamente la primera), se destaca el hecho que esta aproximación se utilizará en la simulación lagrangeana de partícula en el set de ANSYS módulo CFD:

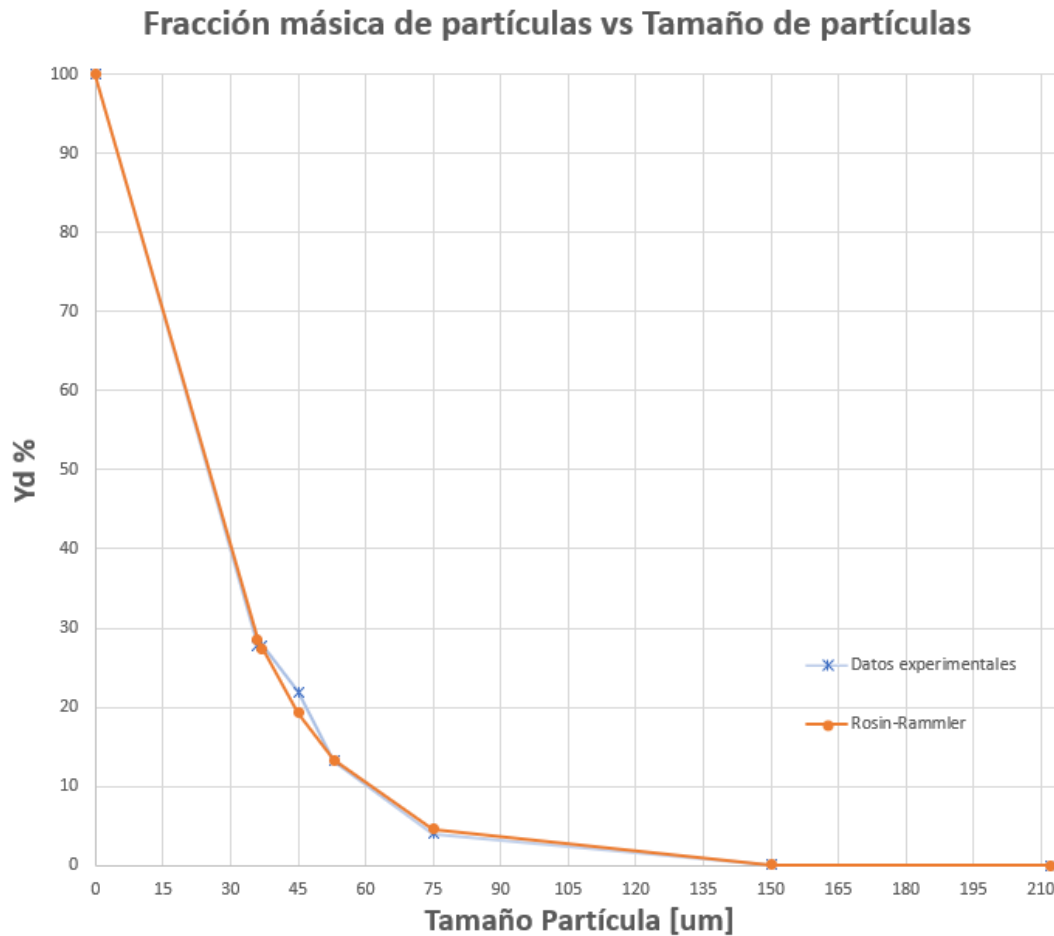


Figura 3.14: Aproximación de Rosin-Rammler para la granulometría.

3.5.2. Modelos ANSYS Fluent

A continuación se presentan los modelos utilizados junto con las variables/constantes ingresadas en el módulo de ANSYS Fluent para el problema a resolver:

Tabla 3.3: Esquemas numéricos y configuración.

Variable	Configuración
Módulo ANSYS	Fluent
Modelo	Monofásico no-Newtoniano
Tipo de Fluido	Pseudo-plástico de Bingham
Modelo de Turbulencia	k-épsilon
Aproximación velocidad primer nodo	Wall function
Modelo de Erosión por impacto	Modelo de Finnie
Modelo Partícula	Aproximación Lagrangeana
Paso de Tiempo	1.5 ms

Tabla 3.4: Constantes usadas en Ansys para el modelo pseudoplástico de Bingham

Variable	Unidad	Símbolo	Valor
Tensión de fluencia	Pa	τ_0	2.73
Viscosidad dinámica de Bingham	Pa · s	η_B	0.0054
Tasa de deformación	1/s		0.0058
Tensión de corte	Pa	τ	2.73003132

3.5.3. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde que se utilizarán para el problema son 3: Inlet (entrada a la cañería), Outlet (salida de la cañería) y Wall (la pared de la cañería). La primera corresponde a una condición de entrada de flujo del proyecto, esto corresponde a una velocidad en m/s; la segunda corresponde a una presión de salida y por último la tercera condición es una condición de borde de pared, a continuación el detalle:

- Inlet: Velocidad de entrada correspondiente a 4 [m/s].
- Outlet: este modelo resuelve la presión relativa, suponiendo que el agua se trabaja como un fluido incompresible la presión de referencia se ha tomado como la presión de salida que corresponde a $P_{outlet} = 0$ [Pa].
- Wall: se impone una velocidad igual a cero ($V=0$ [m/s]), y en donde se utiliza la aproximación de 'wall function' que entrega ANSYS como se entrega en la siguiente figura, esta aproximación permite resolver la velocidad en el primer nodo desde la pared [9].

3.6. Definición del Problema

En el presente trabajo de investigación se realiza el análisis del comportamiento de un flujo bifásico en un tramo de un concentrado cuyo diámetro es de 12" NPS que transporta concentrado de hierro a una concentración del 62%, se espera encontrar las posibles zonas de erosión y sedimentación de este transporte de pulpa para verificar si las condiciones de

operación son razonables bajo un modelo de estimación de estas zonas valido para el tipo de fluido que se desea transportar, a continuación se presenta un resumen del tramo de cañería que estará bajo análisis:

Tabla 3.5: Caso de estudio junto con sus dimensiones y propiedades de cañería.

Diámetro externo [in]	Diámetro externo [mm]	Material de la Cañería	Espesor [mm]	Diámetro Interior [mm]	Radio de curvatura [mm]
12	324	API 5L Gr. X65	14.27	295	5832

Las variables de interés del problema establecidas a lo largo de la sección y que permiten un correcto análisis fluidodinámico se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3.6: Valores de las variables necesarias para la resolución del problema.

Variable	Valor	Unidad de medida	Símbolo
Concentración de sólidos en peso	0.627	%	C_{pp}
Densidad pulpa	1980	kg/m^3	ρ_{pu}
Densidad agua	1000	kg/m^3	ρ_l
Densidad concentrado	4730	kg/m^3	ρ_{co}
Tensión de fluencia concentrado	2.73	Pa	τ_0
Tasa de corte o de deformación	0.0058	1/s	$\dot{\gamma}$
Velocidad de transición	0.5	m/s	V_t
Diámetro interno cañería	0.295	m	D_i
Curvatura codo	5.31	m	-
Gravedad específica sólidos	4.73	-	S
Tamaño de abertura malla que que deja pasar el 50 % de los sólidos	28	μm	d_{50}
Concentración de sólidos en volumen	28	%	C_v
Parámetro función del tamaño y concentración en volumen	2.53	-	FL
Velocidad límite de depositación	2.54	m/s	VL

Posterior a la definición de variables y principales propiedades del problema se procede a dibujar la geometría de trabajo que se utilizará en ANSYS mediante el módulo de SpaceClaim, correspondiente a un tramo recto con dos codos antes de finalizar con un tramo recto final, correspondiente a las dimensiones de la siguiente figura:

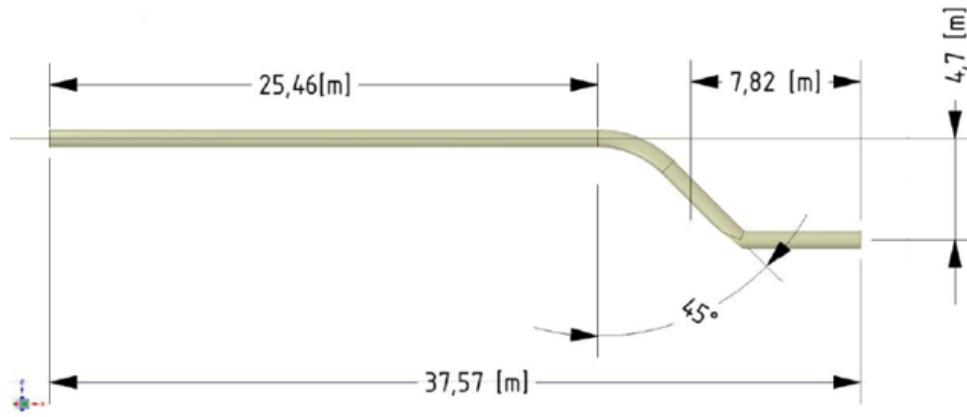


Figura 3.15: Geometría utilizada en el trabajo de investigación.

3.7. Mallado o discretización del espacio a trabajar

Las ecuaciones diferenciales que proponen los modelos a utilizar fueron resueltas mediante el método numérico de volúmenes finitos con ayuda del software ANSYS-Fluent. Básicamente el método consiste en descomponer el espacio en estudio, en este el tramo de tubería, en un set de volúmenes de control para posteriormente discretizar las ecuaciones en derivadas parciales para llegar a un sistema algebraico de ecuaciones que puede ser resuelto en una computadora como se explica en la sección 3.4.1, esto corresponde al mallado de la geometría.

El número total de elementos, número de nodos y la calidad ortogonal se detallan a continuación:

Tabla 3.7: Características del mallado final.

Propiedad	Cantidad
N° Elementos	397.053
N° Nodos	419.468

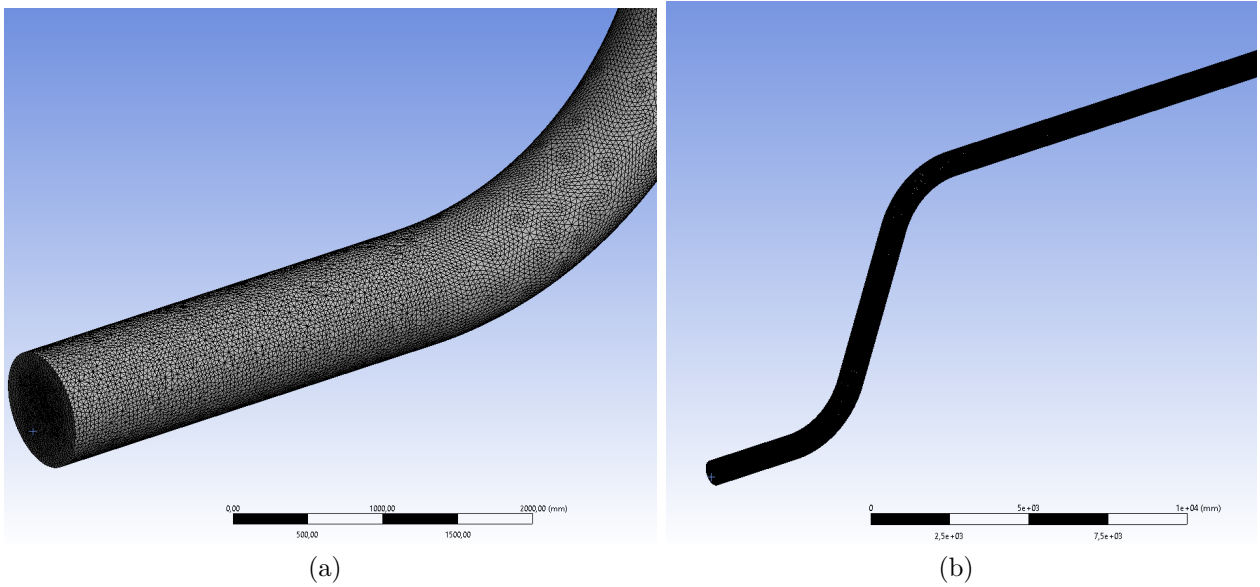


Figura 3.16: Mallado utilizado para la simulación computacional del tramo de cañería.

Las métricas de malla que asignan a cada elemento un valor cuya escala depende de la métrica de malla usada, la mayoría de las métricas miden de una u otra manera cuanto el elemento se acerca o aleja de su forma ideal, las que se utilizarán en esta investigación son las siguientes: Skewness (que tan ideal es la distancia entre lados de un elemento) y Ortogonal Quality (perpendicularidad de un elemento, en donde un valor de uno representa el elemento ideal).

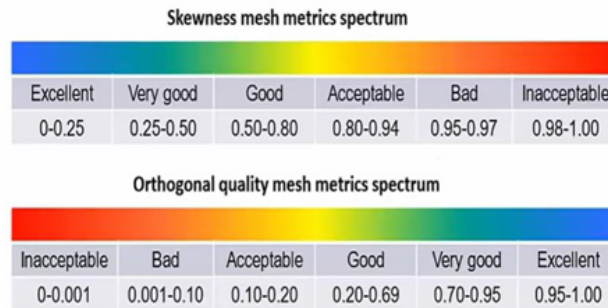


Figura 3.17: Calidad de la malla y sus propiedades [8].

Los resultados obtenidos para las métricas utilizadas se indican en la siguiente tabla, además se entregan los resultados gráficamente de esta calidad de malla:

Tabla 3.8: Calidad de la malla seleccionada.

Propiedad	Ortogonal Quality	Skewness
Valor mínimo	0.66239	0.02993
Valor promedio	0.98151	0.11881
Valor máximo	0.99953	0.49376

Como se observa en la figura 3.17 los valores de las métricas obtenidas se encuentran en estándar razonables para proceder a realizar la simulación.

El tamaño adecuado de la malla se obtiene a través de un análisis de independencia de malla con respecto a la velocidad máxima de salida en el tramo de cañería, ilustrado gráficamente en la Figura:

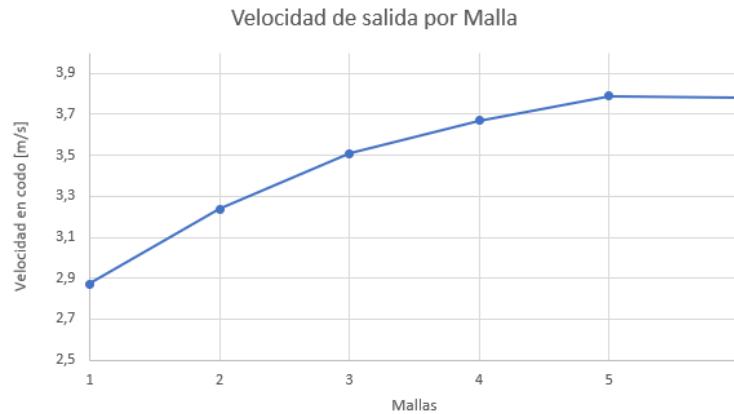


Figura 3.18: Sensibilidad de la malla en función de la velocidad de salida.

Tabla 3.9: Valores utilizados para la sensibilidad de malla del problema.

Malla	Nodos	Elementos	Velocidad [m/s]	Error %
1	21682	18688	2,87	-
2	52295	49140	3,236	12,75
3	147499	136770	3,51	8,47
4	357008	348964	3,67	4,56
5	419468	397053	3,79	3,27
6	516670	503370	3,783	0,18

Gracias a este análisis de sensibilidad se observa que el error presentado entre las mallas 4 y 5 además de la 5 y 6 presentan valores menores a un 5% que son datos aceptables para este análisis, finalmente por temas de memoria y evitar tener alta cantidad de nodos nos decantamos por el mallado 4 cuyas propiedades ya fueron presentadas.

Capítulo 4

Daños Externos de Cañería

Los componentes o piezas asociados al transporte de concentrado en minería están sujetos a múltiples fenómenos en los que los distintos materiales pueden sufrir acciones que sean consideradas como causal de falla, en la sección anterior (Daños internos de cañerías) se abordan las fallas que pueden ocurrir por posibles cambios en las propiedades del material, particularmente los fenómenos conocidos como: erosión, sedimentación. Estos no consideran las fallas ante fuerzas externas o las condiciones ambientales bajo las cuales está sometida la cañería o pipeline de la línea de transporte de concentrado, en particular en esta investigación se aborda un problema muy común que corresponde a una falla superficial de las paredes de la cañería que pueden generar una fuga del fluido a transportar, provocando accidentes fatales o detenciones de plantas, para eliminar estos problemas de manera temporal se propone diseñar una abrazadera apernadas mecánicamente bajo el concepto de 'Mechanical Bolt on Clamps' para la reparación de pipelines en terreno, evitando detenciones prolongadas de la planta y entregando sello y hermetismo ante la falla ocasionada.

Este mecanismo de reparación tiene que responder a la presión de trabajo que se indicará, entregando una respuesta tal que no se rompa o sobrepase una deformación en específico.

4.1. Teoría de Falla, criterios para la Deformación Plástica

Para diseñar el mecanismo de respuesta ante una falla externa que dañe la superficie de la cañería, es necesario conocer cuáles son los principales factores de diseño de este componente, acá es donde entra la teoría de falla [15], bajo criterios de deformación plástica, ya que el componente tiene que tener una respuesta de no falla bajo ciertos criterios ante una presión interna (fuerza externa) bajo la cual estará sometida la tubería en el transporte de concentrado, es por eso que es importante mencionar los principales conceptos de esta teoría, explicando los fenómenos que pueden ocurrir al momentos de instalar el mecanismo de reparación de la línea como son los siguientes:

- Formación de una deformación plástica: cuando un cuerpo se deforma plásticamente su forma sólida cambia de manera permanente, este cambio permanente implica en que el mecanismo no funcionará de la misma forma variando la respuesta ante el problema presentado.

- Exceso deformación elástica: cuando el cuerpo de trabajo se ve sometido a grandes esfuerzos por cargas externas en su superficie, esta puede sufrir grandes desplazamientos elásticos, esto no necesariamente va de la mano con deformaciones plásticas como se menciona en el punto anterior, pero este exceso de deformación elástica en algunas ocasiones puede provocar problemas en el funcionamiento del mecanismo.
- Rotura del mecanismo: es el caso más conocido dentro de la teoría de falla, esta rotura de alguna pieza o componente está directamente ligada al comportamiento de las grietas que se puedan tener, estas grietas poseen dos fases según la teoría: fase estable, en donde la grieta puede crecer con una velocidad baja y la fase inestable en donde la grieta supera un cierto tamaño y esta empieza a crecer de manera acelerada, ocurriendo una falla catastrófica.

Las posibles causas de estos fenómenos de falla mencionados en parte pueden ser los siguientes:

- Cargas (fuerzas externas) altas: en este caso la presión en el interior de la cañería que tiene que soportar el mecanismo.
- Cargas cíclicas: cargas cuyas magnitudes y signo pueden cambiar a lo largo del tiempo, ocasionando fallas en formato de grietas o roturas.
- Cargas que se mantienen por un tiempo prolongando: aplicación de fuerzas externas por un período largo de tiempo puede generar el fenómeno llamado 'creep' en donde se aprecia un lento 'fluir' del sólido (deformación inelástica), en esas escalas el sólido se comporta como un fluido.
- Cambio brusco por temperatura: se generan altos esfuerzos térmicos, lo que puede provocar roturas o agrietamiento del elemento, incluso generando cambios en la microestructura del material.

Existe una gran variedad de tipos de falla distintos a la rotura, en esta investigación se abordará principalmente en la falla por deformación plástica causada por cargas altas como lo es la presión de trabajo a la que estará sometida la cañería en el transporte de concentrado, este tipo de falla también va relacionada al material de trabajo como se explicará más adelante.

4.1.1. Esfuerzo-Deformación de un Material

Para distinguir si el componente de trabajo va a fallar o no frente la presión interna es necesario explicar cómo se relacionan los esfuerzos bajo los cuáles estará sometido el mecanismo frente a las deformaciones que estos ocasionan, todo cuerpo al estar sometido a una fuerza tratará de deformarse en el sentido de aplicación de esta fuerza, para medir que tanto se deforma un cuerpo frente a esfuerzos existen múltiples métodos de obtener las propiedades que relacionan estos dos conceptos, uno de los principales es el ensayo de tracción, que permite entregar la curva esfuerzo-deformación junto con los datos de resistencia y ductilidad del material de interés, para esta investigación se procede a analizar materiales dúctiles y frágiles, a continuación se presenta la curva de esfuerzo-deformación que nos permite definir las variables de interés del problema:

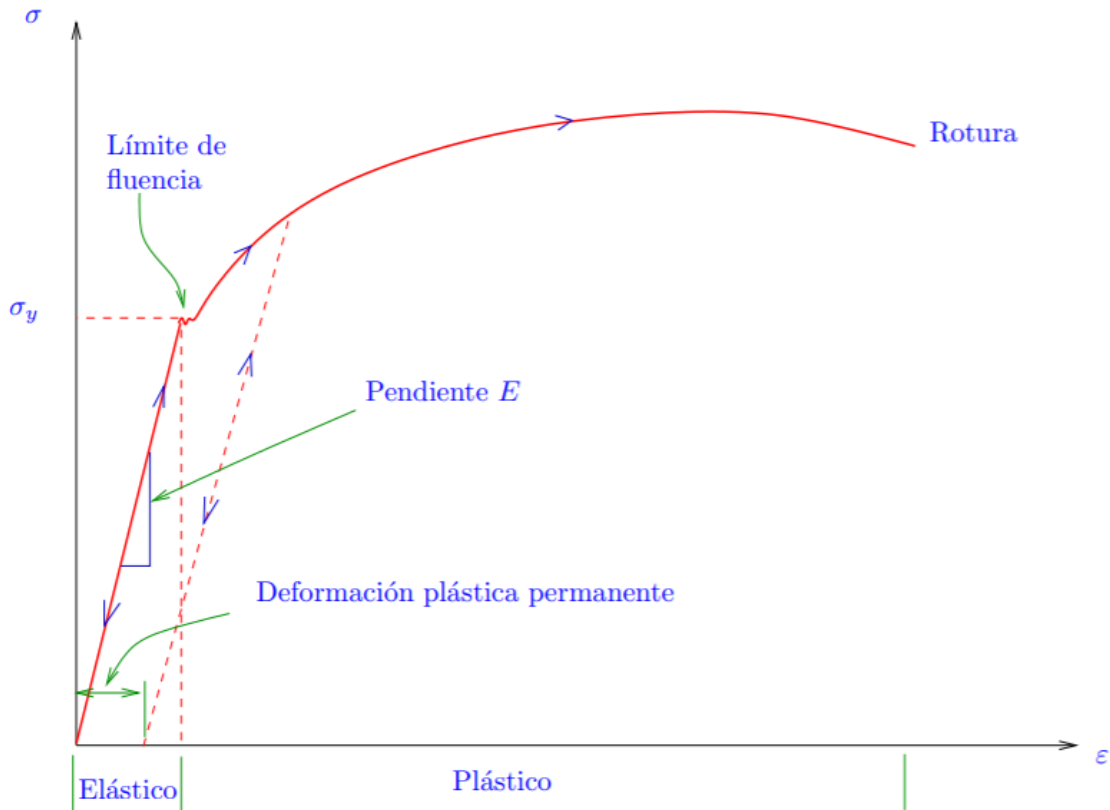


Figura 4.1: Esquema mostrando un resultado típico para un ensayo uniaxial de tracción para un material dúctil.

- En general para materiales dúctiles se distinguen dos zonas de comportamiento, el elástico y plástico. En la zona de comportamiento elástico cualquier deformación ‘no es permanente’ en el sentido de que, si se retiran las fuerzas externas, el cuerpo recobra su forma inicial.
- En la zona de comportamiento elástico la relación entre el esfuerzo y la deformación es aproximadamente lineal para muchos materiales. La pendiente de la recta en esta zona se llama ‘módulo de elasticidad’ y se denota como E . En esta zona tenemos la ley de Hooke y en donde la pendiente dependerá del tipo de material a trabajar del componente a evaluar.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (4.1)$$

- El límite entre la zona de comportamiento elástico y la zona de comportamiento plástico ocurre a un nivel específico de esfuerzo llamado esfuerzos de fluencia (yielding), que es distinto para cada material.
- En la parte más alta de la curva se presenta el punto de ‘Ultimate Strength’ o llamado de otra forma como resistencia a la tracción, que corresponde al máximo valor de un esfuerzo en donde el material sufre estrechamiento de su área transversal formando una especie de ‘cuello’, lo que induce posterior a una falla mecánica.
- Otra de las propiedades de interés que es necesario para un correcto análisis de esfuerzo-deformación es el ratio o relación de Poisson’s, que ejemplifica la reducción del área

transversal de un sólido sometido a una carga externa, esta relación solo aplica dentro de la región elástica de la curva esfuerzo-deformación.

La diferencia de los materiales dúctiles a los materiales frágiles radica en el tipo de curva que se forma en el gráfico de esfuerzo deformación, además de las distintas áreas que se forma bajo la curva, a continuación se ejemplifica lo señalado [16]:

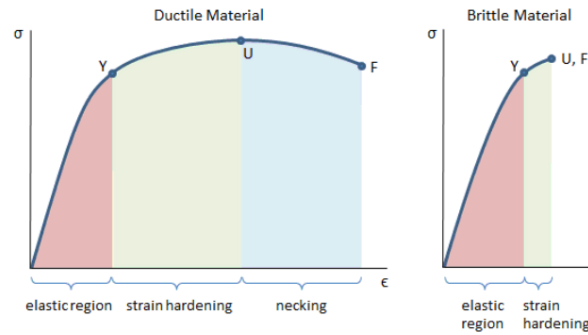


Figura 4.2: Curvas esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y frágiles.

Acá podemos observar que la zona por endurecimiento por deformación desde el punto de fluencia hasta el punto de máxima resistencia a la tracción (U) es pequeño, y es probable que estos materiales pueden fallar en la sección elástica.

En breves palabras, para los materiales que serán evaluados para la abrazadera, las propiedades que nos importan: Módulo de Young (E), relación de Poisson's, Esfuerzo de fluencia y el punto de máxima resistencia a la tracción para el caso de materiales compuestos.

4.1.2. Esfuerzo y deformación en Cilindros

En recipiente cilíndricos presurizados a altas presiones se desarrollan esfuerzos radiales, tangenciales y longitudinales con valores que dependen del radio de trabajo junto con las fuerzas ejercidas en las paredes del recipiente [17], esto se puede ejemplificar con la siguiente figura:

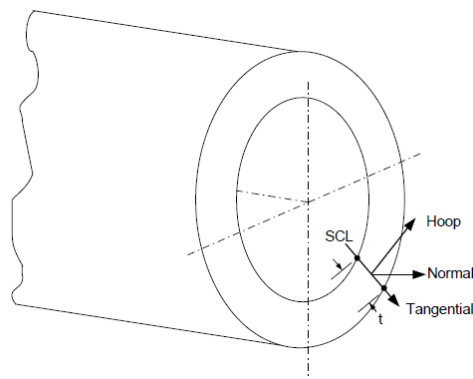


Figura 4.3: Esfuerzos presentes en un cilindro a presión.

Donde:

- Esfuerzo normal: esfuerzo que ocurre de manera longitudinal en el cilindro de trabajo, la elongación producida por este esfuerzo en este tipo de problemas se asume constante alrededor de la circunferencia del cilindro, aunque muchas veces debe considerarse que existen esfuerzos longitudinales cuando el propio recipiente a presión toma las reacciones en los extremos del cilindro debidos a la presión interna.
- Esfuerzo circunferencial o Hoop: que es la tensión que se opone directamente a la presión ejercida internamente.
- Esfuerzo radial: para un cilindro de paredes gruesas como será nuestro caso este esfuerzo, este variable es igual y opuesta a la presión manométrica en la superficie interior y cero en la superficie exterior, esta tensión es mucho menor que las otras dos.

4.1.3. Criterio de Falla: Von Mises

La pregunta que puede surgir conociendo el concepto de ensayo uniaxial es el de cómo se traspasa esta información de un ensayo en 2 dimensiones a un problema en 3 dimensiones, para resolver este problema se decide usar la teoría de Von Mises:

'El material fallará en 2D o 3D si su energía de distorsión por unidad de volumen en el instante de falla es igual a la energía en ese instante en un ensayo uniaxial usando una probeta del mismo material' y en donde se define el esfuerzo de Von Mises como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3} \quad (4.2)$$

Siendo σ_{VM} el esfuerzo de Von Mises y $\sigma_{i=1,2,3}$ los esfuerzos principales del problema, de esta ecuación se puede obtener el criterio para el límite de la falla como el siguiente:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3 = \sigma_0^2 \quad (4.3)$$

Siendo σ_0 el esfuerzo de fluencia, por lo que la ecuación nos indica que el material falla si $\sigma_{VM}^2 = \sigma_0^2$, que es el caso límite y el que se quiere evitar.

4.2. Antecedentes Diseño Mecánico Abrazadera

4.2.1. Métodos de reparación fallas externas

Los defectos o fallas que se encuentran en la superficie de la cañería pueden ser removidos o reparados mediante distintos métodos sujetos a la limitancia que entrega cada falla debido a cómo afecta la estructura del material, que se puede observar en las tablas 451.6.2.9-1 'Acceptable Pipeline Repair Methods (Nonintended, Nonwrinkled, and Nonbuckled Pipe)' para las fallas sin fugas y 451.6.2.9-2 'Acceptable Pipeline Repair Methods for Dents, Buckles, Ripples, Wrinkles, Leaking Couplings, and Defective Prior Repairs' de la norma [3] para las fallas que involucren fugas, se consideran los siguientes defectos a reparar por los métodos:

- Corrosión externa (mayores y menores al 80 % del espesor de la cañería)
- Corrosión y daños superficiales debido al procedimiento de manufactura previo.
- Daños debido a la presión de otro metal.
- Defectos volumétricos (poros) debido a soldaduras previas.
- Rotura o apertura longitudinal de la cañería.

Entre los métodos más efectivos ante cada una de las limitaciones de las fallas mencionadas se encuentran 3 tipos de reparación:

1. Remover y reemplazar la falla: como se menciona, la falla es identificada, se selecciona un cilindro de la cañería que contenga el daño y se remueve para posteriormente instalar flanges y reemplazar por un nuevo cilindro al anterior.
2. Manga o envoltura de acero soldada al sector dañado, donde parte de la cañería dañada es envuelta por una estructura de acero para contener la presión interna, esta estructura se instala como caparazón alrededor de la falla y se suelda por los extremos [18].
3. Mechanical Bolt on clamps, abrazaderas aplicadas mecánicamente (apernada) que generan sello y estanqueidad mediante una estructura que envuelve la cañería y está apretada mecánicamente con pernos, este diseño hace juego con la goma interna la abrazadera para evitar las fugas por presión interna, este tipo de reparaciones no se utiliza para reparar daños circunferenciales a menos que se diseñe para soportar cargas axiales, se detalla en la siguiente sección.

El hecho de trabajar bajo el concepto de la estructura de abrazaderas apernadas nos permite evitar soldar sobre la cañería evitando el daño del revestimiento interno de HDPE como se menciona en la anterior sección, además estas abrazaderas pueden ser reutilizadas dependiendo de los diámetros de trabajo requeridos; es importante destacar el hecho de que el procedimiento para instalar este caparazón apernado es totalmente en terreno y evita el flujo de la línea de trabajo.

Las abrazaderas apernadas deberán seguir una serie de normas establecidas previamente a este trabajo por organismos internacionales, esto debido a los estándares para materiales y condiciones ya definidas, en el caso de las reparaciones permanente para tramos de aceros revestidos internamente se utiliza la norma ASME B31.4 [3] (requerimientos de abrazaderas para reparación) debido al tipo de fluido de trabajo que se transportará (concentrados de hierro).

4.2.2. Mechanical Bolt on Clamps

En esta investigación se decide verificar la efectividad de las abrazaderas apernadas 'Mechanical Bolt on Clamps' para entregar sello y estanqueidad ante fallas longitudinales de una cañería (se evalúa para distintos diámetros), se elige este mecanismo debido a que no requiere soldadura a la estructura externa de la cañería y esto implica no dañar el revestimiento interno del ducto, importante debido a la alta corrosión y abrasión generado por el transporte

del concentrado de hierro; además otra ventaja que entrega es que no requiere de la detención del servicio de la planta.

Este método es ampliamente utilizado en la industria debido a su utilidad para reparar fallas de alta a baja presión, las abrazaderas (se habla en plural porque es un conjunto por mitades) están conectadas mediante pernos para formar un conjunto o recipiente para alta presión alrededor de la zona dañada, la composición del mecanismo se explica a continuación:

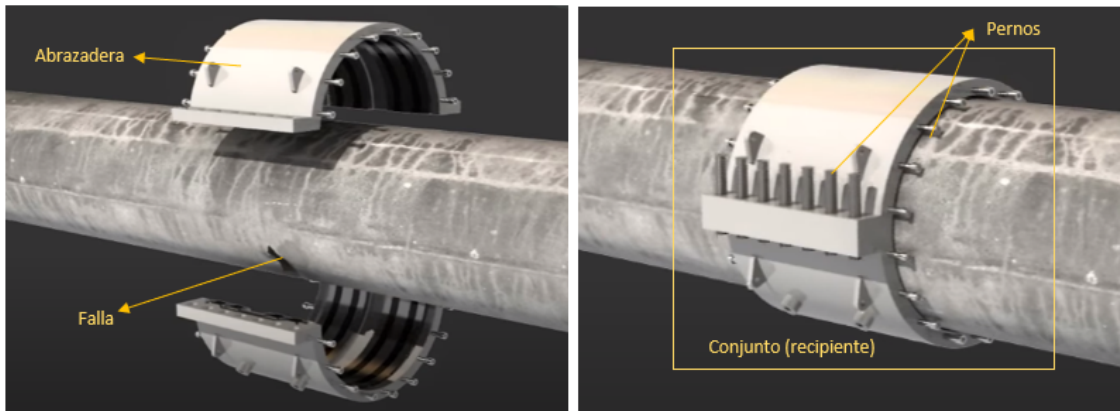


Figura 4.4: Mecanismo abrazadera apernada contra la fuga a alta presión [19].

Las partes y compuestos que están considerados en esta estructura se detalla en la siguiente figura, esto permite ver en corte el apriete que generan los pernos y el detalle interior del conjunto:

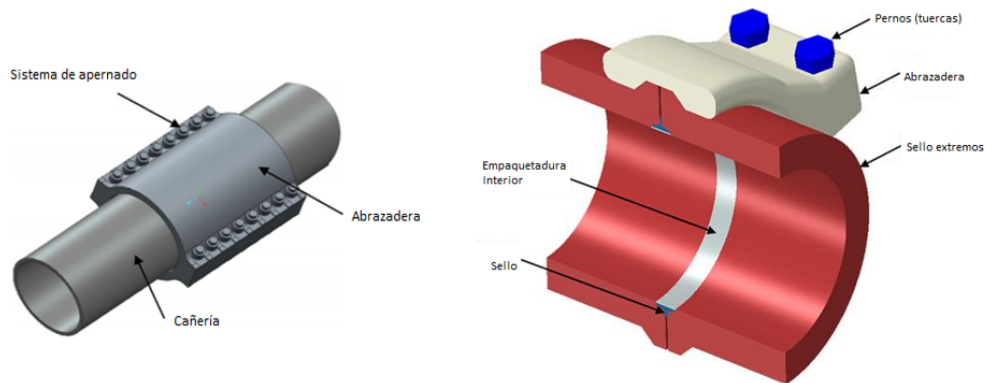


Figura 4.5: Mecanismo abrazadera apernada y sus partes en conjunto.

En la figura 4.5 se destacan los siguientes elementos de la abrazadera: los pernos, que permiten el apriete mecánico con la abrazadera entre las dos camisas que envuelven la cañería, la abrazadera que es el conjunto que reúne todos los elementos y consigue el hermetismo ante la falla, sellos extremos de la abrazadera, empaquetadura interior para no dañar la estructura y faltaría agregar la goma interna que permite la estanqueidad.

Esta goma permite que el fluido presurizado no fugue, ya que se genera una cápsula entre la goma y la abrazadera.

Este trabajo de investigación no abarca el proceso de fabricación de la abrazadera ni las técnicas utilizadas en su manufactura.

4.2.3. Caso de estudio

Para la presente investigación, se decide analizar el caso de una abrazadera que permita reparar un daño estructural externo de la tubería de diámetro 8"NPS de acero sin revestimiento externo, considerando que esta cañería estará sujeta bajo las tolerancias de fabricación indicadas en el código API 5L, indicadas en la sección 4.1.5; esta abrazadera debe ser diseñada para una presión de diseño o MAWP (maximum allowable operating pressure) de clase 1500 según la norma ASME B16.5 para el grupo de materiales 1.1, que corresponde a una presión de 25.545 kPa, se utilizará un factor de seguridad de 1.5 con esta presión de diseño (P_i), a continuación se presenta una tabla resumen con los datos iniciales del caso base de esta abrazadera:

Tabla 4.1: Propiedades cañería Caso de investigación.

Diámetro Nominal NPS (in)	MAWP (MPa)	P_i (MPa)	D_i (mm)	Material Cañería (-)
8	25.545	38.3175	219	ASTM A53 Gr. B

4.3. Diseño Mecánico Bolt on Clamps

El diseño mecánico de las abrazaderas es la parte importante de esta investigación debido a que el sello y estanqueidad se tiene que lograr en parte con un ajuste entre los componentes de esta misma (abrazadera) y el apriete que genera el apernar los componentes que la constituyen; esto implica el no soldar a la cañería, por lo mismo las dimensiones normalizadas se tiene que cumplir a cabalidad, en la siguiente figura se presentan las dimensiones principales a analizar y que se requieren según normativa:

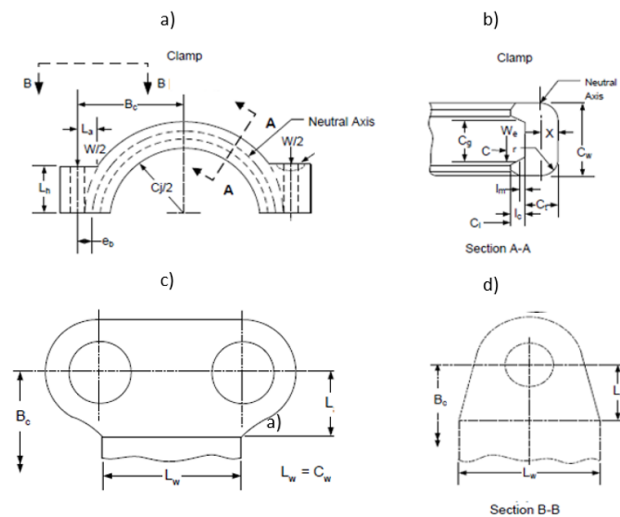


Figura 4.6: Dimensiones a calcular de la abrazadera [20].

Como bien se menciona al inicio de estos antecedentes la abrazadera está compuesta de 2 partes cilíndricas tipo carcasa como se observa en la figura 4.5 y que están unidos mediante pernos, que implica que la unión es mediante un apriete mecánico y no soldadura.

Para este diseño de abrazadera no se considera en los distintos modelos la adición de puertos de presión o mecanismos que permitan medir la fuga de la abrazadera.

El diseño y análisis de esta abrazadera permite verificar la resistencia y confiabilidad de esta ante la presión de diseño bajo la cual estará sometida en la reparación de la línea de acero de 8 NPS de diámetro, permitiendo parametrizar esta estructura para diámetros con valores entre el caso inicial (8NPS) hasta cañerías de 24 NPS, considerando que la tubería puede estar bajo las tolerancias de fabricación indicadas en el código API 5L.

Esta verificación de la resistencia bajo las condiciones indicadas se hará mediante una serie de cálculos bajo normativa de la ASME VIII división 2, sección de reparaciones permanentes parte 4 (diseño por reglas) y la parte 5 diseño por análisis ante el colapso plástico (sección 5.2), verificando los valores y adaptándolos según los resultados entregados mediante el modelo de elementos finitos.

La metodología utilizada en esta investigación permite establecer un desarrollo similar para diámetros de cañería distintos al caso que se analiza, permitiendo resultados robustos para el diseño de estas abrazaderas.

Para esto se va a considerar un esquema sencillo de la abrazadera en base a las figuras 4.7 y 4.8 junto con el esquema de la ASME PCC-2-2011 Repair of Pressure Equipment and Piping"[21], que se muestran a continuación:

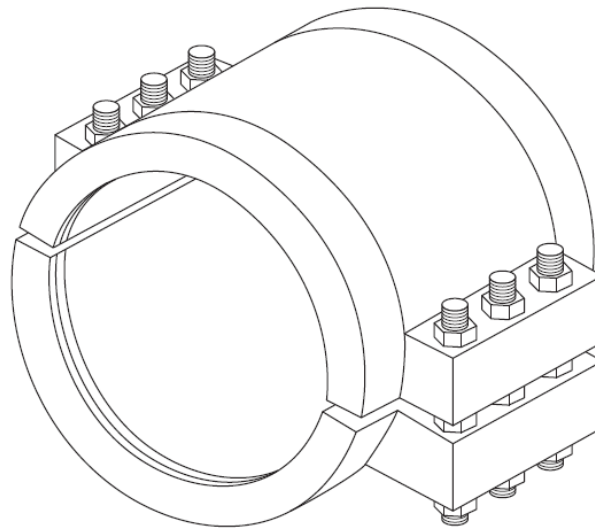


Figura 4.7: Ejemplo abrazadera mecánica ASME PCC 2-2011.

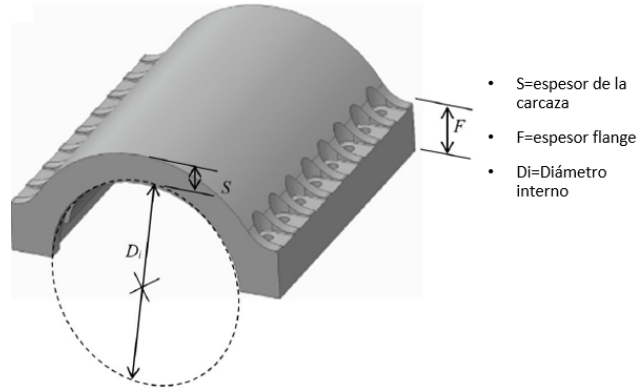


Figura 4.8: Esquema abrazadera mecánica junto con sus elementos a calcular [22].

4.3.1. Diseño por requisitos de análisis

Como se menciona en la sección anterior, los requerimientos del diseño de la abrazadera para su aplicación se detallan en la sección 5.1 de la ASME Sección VIII división 2 [20], que proporciona detalladamente los elementos a considerar en el análisis para falla plástica bajo el cual se trabaja en este trabajo, y en donde se indican las combinaciones de carga posibles para el caso:

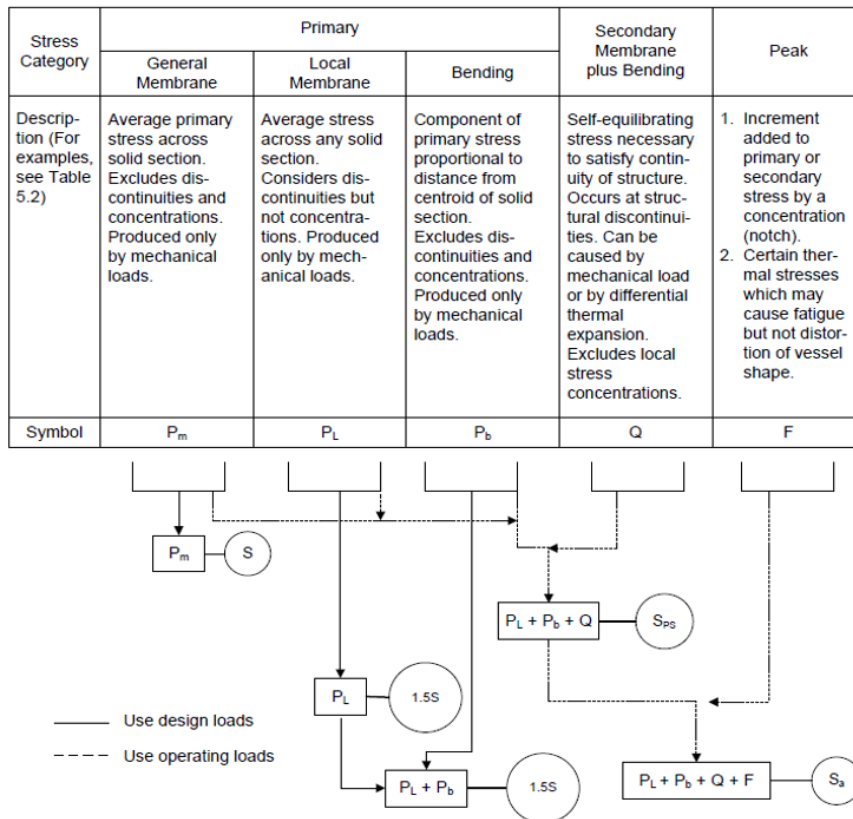


Figura 4.9: Casos de carga considerados por la ASME Sección VIII división 2.

Para el caso de la protección en contra del colapso plástico, se abarcan 3 métodos de análisis:

- Método de análisis de Deformaciones elásticas, en donde los esfuerzos son analizados de manera elástica y catalogados de manera de indicar cuáles permiten que el colapso plástico no ocurra.
- Método de carga límite: donde se calcula la carga límite (máxima) bajo la cual no ocurre el colapso plástico.
- Método de análisis elástico-plástico: una carga de colapso se deriva de un análisis elástico-plástico considerando tanto la carga aplicada como las características de deformación del componente. La carga permisible en el componente se establece aplicando factores de diseño a la carga de colapso plástico.

El primer método es el elegido para la protección ante el colapso plástico en donde se compara el esfuerzo equivalente obtenido de la ecuación 4.1 con el límite del material antes de la falla, para entender de manera completa el uso de esta ecuación es necesario explicar las categorías de esfuerzos entregados en la figura 4.9:

- Esfuerzo equivalente primario de membrana (P_m)
- Esfuerzo equivalente primario local de membrana (P_l)
- Esfuerzo equivalente primario de pandeo (P_b)
- Esfuerzo equivalente secundario (Q)
- Esfuerzo equivalente adicional debido a altas concentraciones de esfuerzos o cargas térmicas por sobre el valor nominal (F)

Debido a que trabajaremos en el método de evaluar el diseño en función de la protección en contra del colapso plástico, los esfuerzos Q y F no necesitan ser determinados, el procedimiento estándar para el cálculo de los esfuerzos y verificar si el diseño es aceptable para el criterio es el siguiente:

1. Determinar las condiciones de borde y cargas que actúan por encima del componente diseñado, en este caso solo será considerada la presión de diseño junto con la pre-tensión de los pernos involucrados.
2. Desarrollar el modelo de elementos finitos, debido a la simetría de la geometría y de las cargas se decide utilizar un modelo axisimétrico sólido para el desarrollo del problema, posteriormente se realiza el mallado del problema con los elementos que correspondan, finalmente aplicar las propiedades de material para cada elemento que componen el diseño de la carcasa.
3. El programa debe entregar las cargas, deformaciones y reacciones obtenidas a lo largo del modelo.
4. Calcular el tensor de esfuerzos para cada tipo de carga, luego asignar este tensor de esfuerzos a una de las categorías mencionadas anteriormente, para este caso corresponde solo al esfuerzo equivalente primario de membrana (P_m).

5. Sumar los tensores de esfuerzos de cada categoría utilizada, el resultado final corresponde a los efectos causados por las cargas en el diseño, debido a que nuestro problema solo involucra cargas controladas como lo son la presión interna ejercidas a las predes junto con la pre-tensión de los pernos, se utiliza el esquema de la figura 4.9 para el primer caso, para la suma final de los tensores utilizar la ecuación 4.1.
6. Para verificar que el diseño cumple la protección en contra del colapso plástico verificar:

$$P_m \leq S_y \quad (4.4)$$

$$P_l \leq 1.5S_y \quad (4.5)$$

$$(P_l + P_b) \leq 1.5S_y \quad (4.6)$$

Por lo tanto, para evaluar si la abrazadera diseñada responde bien a la presión interna bajo la cual estará sometida se establece el criterio de que las deformaciones formadas debido a los esfuerzos equivalentes primarios de membrana (P_m) deben ser menor o igual al estrés permisible (S_y) del material de trabajo a cierta temperatura de diseño.

Teniendo en cuenta los criterios para evaluar el diseño de la abrazadera, a continuación se mencionan las principales variables a calcular en la geometría de las carcasas, estos valores serán evaluados en la simulación numérica que se hará del diseño final.

4.3.2. Espesor Abrazadera (S)

Para el cálculo de esta variable el único valor que se asume es el del esfuerzo circunferencial permitido ϵ (hoop strain) del componente, el espesor de la carcasa S permite un esfuerzo ϵ que debe estar por debajo del esfuerzo límite a la ruptura, la fórmula utilizada para este parámetro es la siguiente en concordancia con las normas mencionadas:

$$S = P_i \cdot \frac{D_i}{2 \cdot E \cdot \epsilon} \quad (4.7)$$

Donde:

- D_i : es el diámetro interno de la abrazadera o diámetro externo de la cañería con un GAP.
- P_i : presión máxima de trabajo junto con el factor de seguridad indicada en la sección 4.1.3.
- E: módulo circunferencial de la elasticidad del material de la abrazadera, que corresponde a 17 GPa.
- ϵ : deformación máxima circunferencial del material, en este caso será de 0.5 %

4.3.3. Carga en los pernos (T)

El torque estimado en cada perno de la abrazadera se calcula asumiendo que el mecanismo de reparación es un cilindro continuo:

$$T = F \cdot K \cdot D_{pernos} \cdot FS \quad (4.8)$$

Donde:

- k: factor de corrección 0.177 asumiendo pernos nuevos.
- D_{pernos} : diámetro nominal de los pernos.
- FS: factor de seguridad
- F_{PC} : es la pre-carga requerida en los pernos:

$$F_{PC} = P \cdot p \cdot R \quad (4.9)$$

- P: presión interna del fluido.
- R: radio de la mitad de la abrazadera.
- p: distancia entre los pernos.

4.3.4. Espesor Flange (F)

Para definir el espesor del flange (F) es necesario involucrar otras variables debido al alto impacto que puedan tener estas en el diseño de la abrazadera en su altura, debido a que este valor F debe considerar la posible expansión bajo presión que pueda ocasionar que el apriete junto con el sello fuguen, lo que sería un fenómeno catastrófico para este método de reparación, por esto se decide abrir rangos para evaluar el comportamiento del espesor de flange variando los valores de los elementos geométricos de la abrazadera como lo son: el mismo espesor del flange (F), espesor de la abrazadera (S) y la ubicación de las perforaciones para los pernos.

Se busca un balance entre estas variables evitando el fallo mecánico y una expansión no deseada porque sobrepasa en su número un valor más allá de lo establecido, para esto es importante definir los límites para la expansión de la abrazadera y flange:

- Expansión carcasa/abrazadera en X: deformación de la abrazadera en todo su conjunto en la dirección X.
- Expansión carcasa/abrazadera en Y: deformación de la abrazadera en todo su conjunto en la dirección Y.
- Espaciado del flange en Y: se observa la separación que se puede llegar a tener entre las dos mitades de la abrazadera.

Para las dos primeras variables es aceptable tener una deformación menor a 0.7 [mm], para el caso de la separación de la abrazadera se considera un límite de 0.3 [mm] en su separación, estos valores son seleccionados para asegurarnos que al menos el 50 % de la compresión del sello diseñada se mantiene y no haya una fuga [22].

4.3.5. Tolerancias de Ovalamiento

El diseño de las abrazaderas considera el ovalamiento obtenido en la cañería ante distintos motivos, no superando el 5 % del diámetro original, a continuación se presentan las tolerancias para el caso base de 8"NPS, valores extraídos de la norma API 5L:

Tabla 4.2: Tolerancias para el ovalamiento según API 5L [1].

Diámetro exterior específico mm (in.)	Tolerancias de Ovalación	
	Cañería excepto su fin	mm Cañería y su fin a ambos extremos
>168.3 (6.625) a 610 (24)	0.020D	0.015D

Se puede observar que en la anterior tabla se indica que la tolerancia del diseño de la abrazadera debe considerar una expansión máxima de la cañería de 8"NPS de 0.020 veces su diámetro, si se hace este simple cálculo se obtiene un margen de ovalamiento de 4.38 [mm] lo que nos entrega un diámetro interior de la abrazadera $D_i=224$ [mm].

Es importante recalcar que este espacio considerado debido al ovalamiento de la cañería se soluciona con la alta presión ejercida desde el interior de la tubería hacia la abrazadera y el juego que se genera con el sello interno de ésta, ya que esta capa de sello es la que estará en contacto directo con la cañería y no la abrazadera como se observa en la figura. donde están los primeros puntos de contacto del mecanismo (figura 4.10 a) y como es considerado el ovalamiento de la cañería ante la presión interna ejercida (figura 4.10 b).

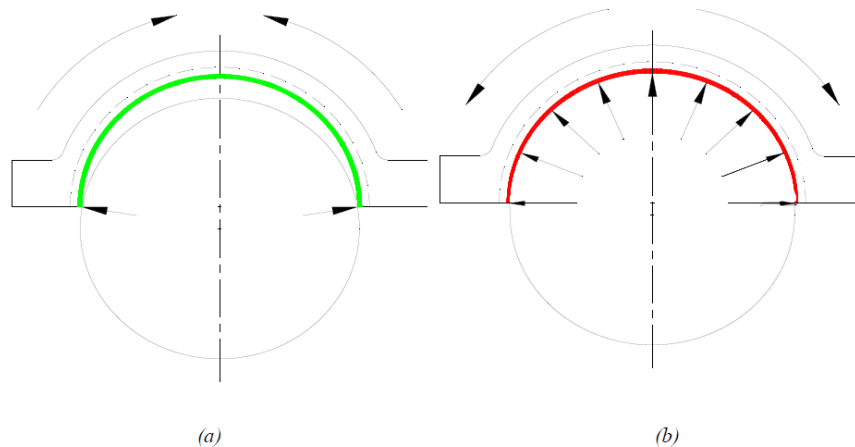


Figura 4.10: Esquema ovalamiento considerado.

Todo esto se basa en la capacidad del empernado en cambiar la redondez del tubo, pero en cañerías o tubos que contengan paredes de un valor elevado de grosor quizás no sea posible modificar la ovalidad de la tubería; tampoco dentro de este análisis se consideran cañerías aplanadas o abolladas.

4.3.6. Materiales Abrazadera

El uso de materiales compuestos en vez de metales en el diseño de abrazaderas mecánicas ante posibles fallas en cañerías tienen ciertas ventajas en la industria minera, como lo son: reducir el peso del mecanismo de reparación y por lo tanto facilitar su instalación y transporte, una mayor resistencia ante la corrosión del ambiente externo donde esté la cañería; es por esto que para este trabajo de investigación se decide utilizar un compuesto polimérico (matriz epóxica) reforzada con fibras de vidrio, esto debido a que la adición de estas fibras de E-glass (clase más común dentro de las fibras de vidrio, se usa debido a sus buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, además de su bajo costo de mercado) mejora propiedades mecánicas a una densidad no tan elevada.

Como breve explicación, podemos indicar que la matriz compuesta polimérica hecha de resina epóxica entrega estabilidad a altas temperaturas además de buena resistencia a los agentes químicos, a esta fase primaria se le agregan una fibra de refuerzo (E-glass) para complementar y elevar sus propiedades mecánicas debido a la distribución equitativa de la carga aplicada sobre el componente, a esta fase se le llama fase secundaria y se va agregando en forma de capas y dependiendo de su dirección puede modificar sus propiedades, para este caso se decide usar laminas biaxiales de fibras de vidrio con orientaciones de $0/90^\circ$ de tal manera que la fracción volumétrica de la matriz epóxica sea de un 50% y la fracción volumétrica del refuerzo de vidrio sea de 50% [23].

Junto con este compuesto polimérico reforzado mencionado, se analizan otros materiales para el diseño de la abrazadera como lo son la fibra de carbono, concreto y acero estructural que son los más comunes usados en el mercado, a continuación se presentan las principales propiedades de cada material:

Tabla 4.3: Sumario propiedades materiales evaluados para la abrazadera.

Propiedad	Fibra Biaxial Epóxica/fibra de vidrio	Fibra de Carbono	Acero Estructural	Concreto
Densidad (kg/m ³)	1857	1800	7860	2392
Relación de Poisson's	0.1543	0.2	0.3	0.1414
Módulo de Young [GPa]	26.4	395	200	19.36
Resistencia a la tracción [MPa]	440	3500	250	2-5

Una abrazadera hecha con fibra de carbono es la que entrega los mejores resultados tanto en peso, volumen, y rendimiento mecánico, el problema de este material es el precio de mercado ya que es más elevado que los otros materiales que se presentan, además puede presentar galvanizado al estar en contacto con el acero directamente, por esto se decide descartar esta opción; el concreto es un material con una baja relación e Poisson's y baja resistencia a la tracción, pertenece al grupo de los elementos frágiles por lo que una fractura a altas presiones es probable a menos que una abrazadera robusta sea diseñada.

Por último, el acero es descartado por lo mencionado en los antecedentes: se busca reemplazar esta opción debido a los posibles daños que puede entregar al apretar este componente a la cañería, todo esto considerando que no se va a soldar esta abrazadera mecánica.

4.3.7. Materiales Sello

El espacio anular entre la abrazadera mecánica y la cañería a reparar se puede dejar vacío o lleno, mediante un revestido con epoxi, algún sellador, fibra, materiales refractarios, u otros compuestos.

Para el material que permita obtener el sello y estanqueidad de la estructura con el espacio anular se recomienda utilizar Goma de Nitrilo Butadieno o de sus siglas en inglés NBR (Nitrile-Butadiene-Rubber) que es un copolímero de goma sintética cuyas propiedades físicas y químicas permiten que sea resistente a distintos compuestos químicos, este material es altamente utilizado en la industria minera, junto con las del transporte de gas y petróleo.

En este trabajo de investigación se considera que el sello y estanqueidad se logra de manera teórica según lo indicado en [22] gracias a la adición de la goma NBR y respetando las dimensiones acordadas en la expansión de la abrazadera.

4.4. Geometría Caso Inicial

Para el diseño final de la abrazadera propuesta en el caso del diámetro 8"NPS de la cañería se utilizan las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5 que nos entregan el caso base de análisis de esfuerzos y deformaciones; caso base que posteriormente es modificado para analizar mediante una sensibilidad de valores el valor ideal de las dimensiones de la abrazadera según lo indicado en la sección 4.3.4:

Tabla 4.4: Resultados Iniciales Espesor Abrazadera.

Diámetro Cañería [pulgadas]	MAWP [MPa]	Presión Interna [MPa]	Diámetro Interno Abrazadera [mm]	Epsilon [%]	Espesor Abrazadera S [mm]
8	25.545	38.3175	224	0.25	65

Tabla 4.5: Resultados Iniciales Torque de los pernos.

Diám. Cañería [pulgadas]	Presión Interna [MPa]	Paso Pernos [mm]	Radio [mm]	k [%]	Diámetro Perno [mm]	Torque Perno [Nm]	Fuerza Perno [kN]
8	38.3175	17	141	0.177	12.7	207	92

En las siguientes figuras se ejemplifica las dimensiones más importantes en el diseño de la abrazadera, con respecto a los valores finales utilizados serán indicados en la sección de resultados del presente informe:

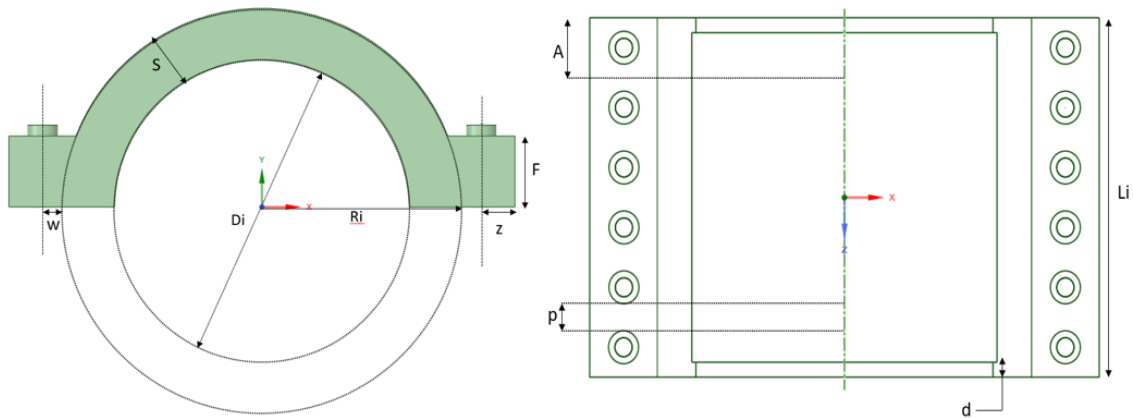


Figura 4.11: Principales dimensiones abrazadera diseñada.

Las dimensiones iniciales de la abrazadera será la base para analizar como varían los resultados en función de la modificación de cada elemento de la abrazadera, se procederá a hacer un análisis de sensibilidad con las variables más importantes, con respecto al largo de la abrazadera L_i esta depende del tamaño del daño en la cañería, considerando lo anterior se establecen los rangos para los valores trabajados:

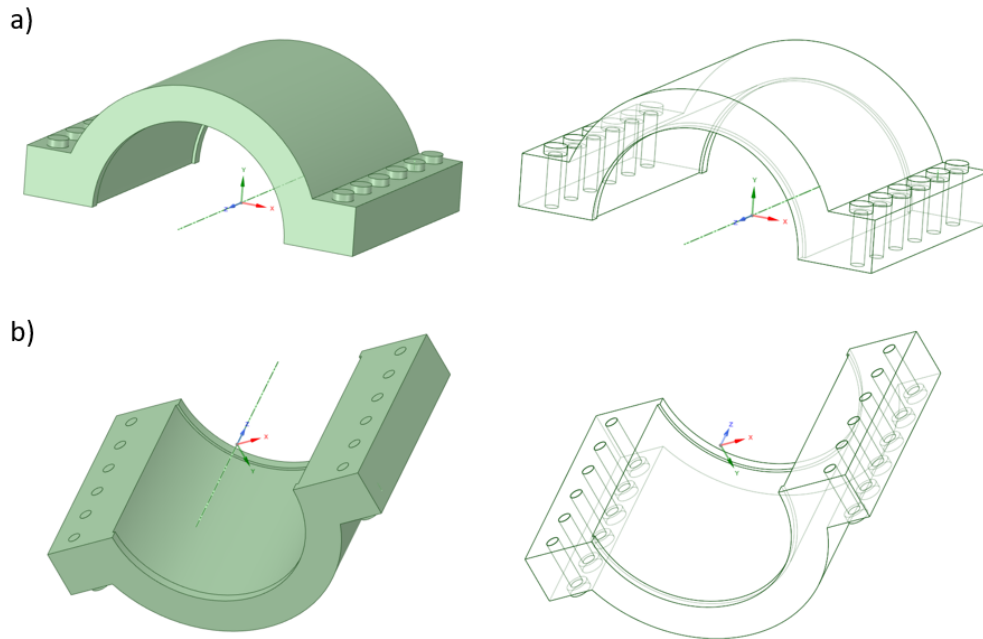


Figura 4.12: Vista superior e inferior de las dos mitades que componen la abrazadera.

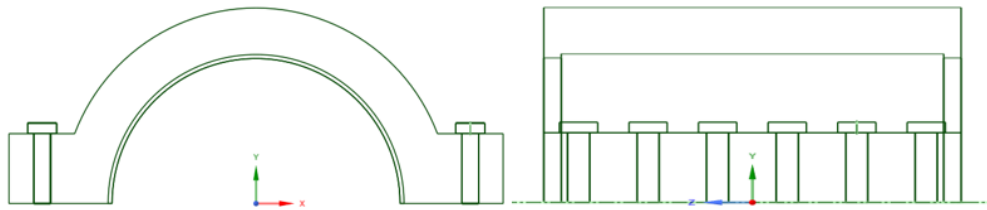


Figura 4.13: Vista en detalle de la abrazadera y los pernos utilizados.

Tabla 4.6: Cuadro resumen de las dimensiones consideradas para cada variable.

Variable	Símbolo	Dimensión considerada	
		Mínimo (mm)	Máximo (mm)
Espesor Flange	F	40	80
Espesor Abrazadera	S	30	65
Ubicación Pernos	z	13	34

4.5. Antecedentes Computacionales

Así como en los problemas en el transporte de concentrado al interior de las cañerías se utiliza el módulo Fluent de ANSYS, para el problema específico de la abrazadera mecánica apornada se utilizará uno de los tantos módulos que presenta ANSYS Mechanical, como lo es el módulo de Estática Estructural que permite estudiar el comportamiento de elementos de geometría compleja mediante la discretización de cada una de las partes del mecanismo de reparación y tener una idea del comportamiento que este elemento tendrá en las condiciones indicadas.

Esta herramienta de Ansys permite resolver situaciones muy particulares en diseño mecánico como elementos estructurales lineares, no lineares y análisis dinámico. Con este módulo estático puedes evaluar el comportamiento, asignar materiales y resolver ecuaciones del problema asignado.

4.5.1. Módulo Estático Estructural

Como estamos presente en un problema en el cuál la carga se mantiene constante, se utiliza un análisis de carga estática que entrega el Módulo Structural Static de ANSYS, en donde se ignoran los efectos de inercia o amortiguación que pueda tener el problema a investigar, y en donde el vector desplazamiento global X es resuelto en la siguiente matriz de la ecuación:

$$[K] \cdot (X) = (F) \quad (4.10)$$

Donde:

- $[K]$: Es la matriz de rigidez global constante del material, que considera el comportamiento lineal del material elástico a trabajar.
- (F) : corresponde al vector global de las cargas aplicadas en el elemento, de manera estática y en donde no hay fuerzas que varíen en función del tiempo (no existen cargas cíclicas) como tampoco existen cargas asociadas a amortiguamientos.

Para resolver esta ecuación es necesario entregarle al programa ciertas propiedades del material como lo son el módulo de Young (E) y el Poisson's Ratio, todo esto debido a que estamos trabajando un análisis estático estructural; junto con estas propiedades muchas veces la densidad o el esfuerzo límite se solicita debido a que pueden existir cargas inerciales o análisis de estrés en el problema.

4.5.2. Mallado y discretización del espacio a trabajar

Para llevar a cabo el mallado de la abrazadera mecánica diseñada, en ANSYS existe una variada gama de elementos para discretizar el espacio seleccionado, cada uno de estos elementos posee características que permite diferenciarlos del resto en cuánto a su geometría, nodos, grados de libertad entre otras, en este caso de un mallado 3D los tipos de elementos finitos que se pueden formar son más complejos que los formados en un elemento 2D, la gran

duda que se genera en esta parte es si se debe utilizar elementos tipo tetraédricos, hexaédricos, piramidales o prismáticos.

Primero es importante definir qué espacio será discretizado con el mallado, para esto se decide simplificar el modelo de la abrazadera a una geometría que contenga la mitad de cada carcasa junto con el perno que las une para observar el comportamiento del flange:

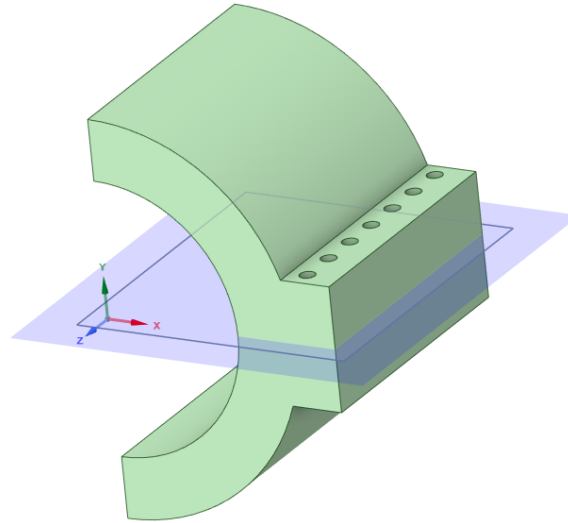


Figura 4.14: Espacio a discretizar de la abrazadera en mallado.

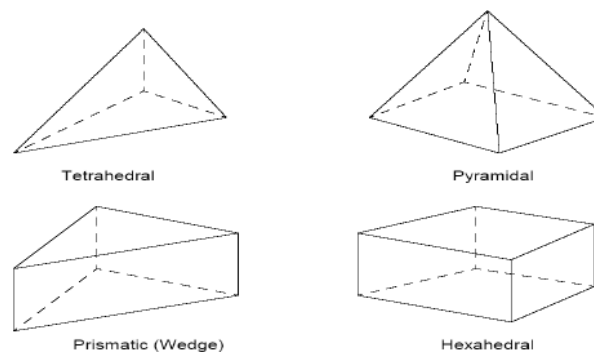


Figura 4.15: Elementos posibles en el mallado de la geometría.

Posteriormente se decide el tipo de elemento de mallado, el presente trabajo utiliza elementos TET10 que consta de elementos tetraédricos con 10 nodos, se elige este debido a la limitancia que posee la licencia estudiantil del módulo estructural, a continuación se presentan un análisis de sensibilidad que permite observar el mallado ideal viendo la calidad de esta malla en función de los elementos/nodos contra dos métricas consideradas (métricas ya utilizadas en la sección anterior: Skewness y Orthogonal Quality):

Tabla 4.7: Datos para sensibilidad de malla geometría final.

Caso	Estrés equivalente máximo [MPa]	Número Elementos	Skewness promedio	Calidad Ortogonal promedio	Error %
Mallado 1	197.00	197	0.54	0.46	-
Mallado 2	344.67	28408	0.68	0.32	74.96
Mallado 3	302.27	34974	0.68	0.31	12.30
Mallado 4	322.78	55785	0.71	0.29	6.79
Mallado Final	332.27	62118	0.72	0.28	2.94

Como se observa de la tabla 4.7 la variable de interés es el estrés equivalente promedio, debido a que este permite ver a grandes rasgos que tan factible es el modelo, será aceptable un mallado de manera que tenga un error menor a un 5% que corresponden al último tipo de mallado, que además corresponde a la máxima cantidad de elementos y nodos disponibles para esta licencia:

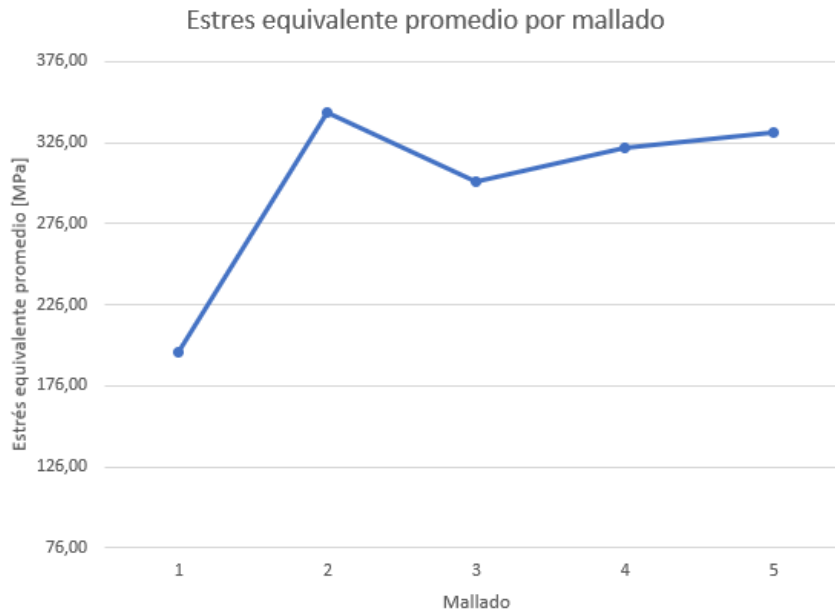


Figura 4.16: Gráfico análisis de sensibilidad de malla.

Para un mayor detalle visual de los mallados utilizados para el análisis de sensibilidad se dejan en el Anexo los resultados obtenidos, a continuación se presenta el mallado final utilizado para la obtención de resultados junto con sus principales propiedades:

Tabla 4.8: Principales propiedades mallado final.

Número de nodos	125.572
Número de elementos	62.118
Promedio calidad Skewness	0.7198
Promedio calidad Ortogonal	0.2790

Obteniendo de manera gráfica los siguientes valores para las métricas indicadas:

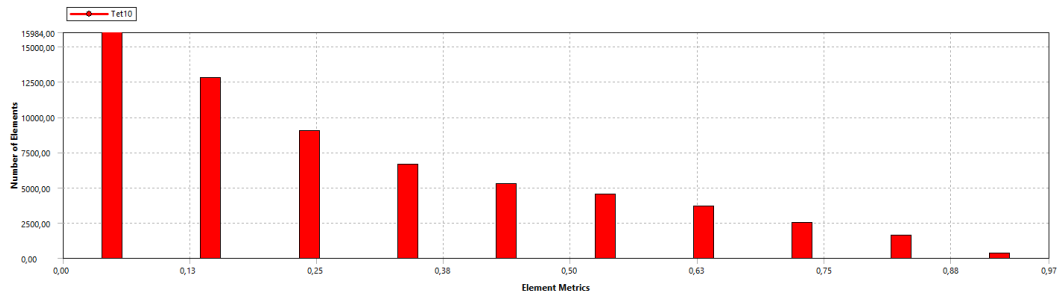


Figura 4.17: Métrica de la calidad ortogonal del mallado final.

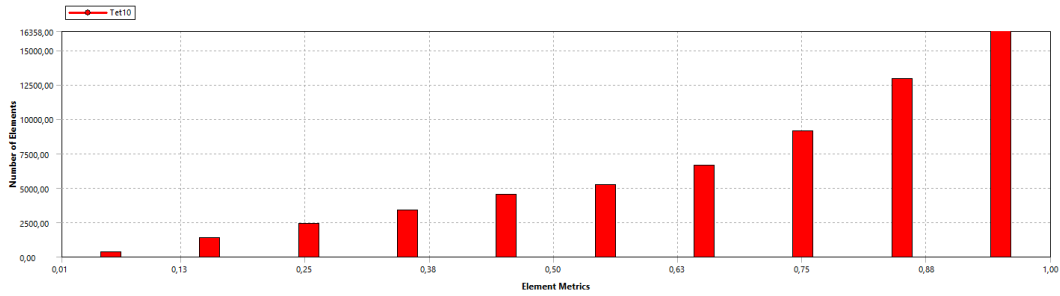


Figura 4.18: Métrica del Skewness del mallado final.

Como se observa en la figura 3.17 el promedio de los elementos en el mallado, en el caso de la métrica de la calidad ortogonal y skewness ambos se encuentran en un rango aceptable.

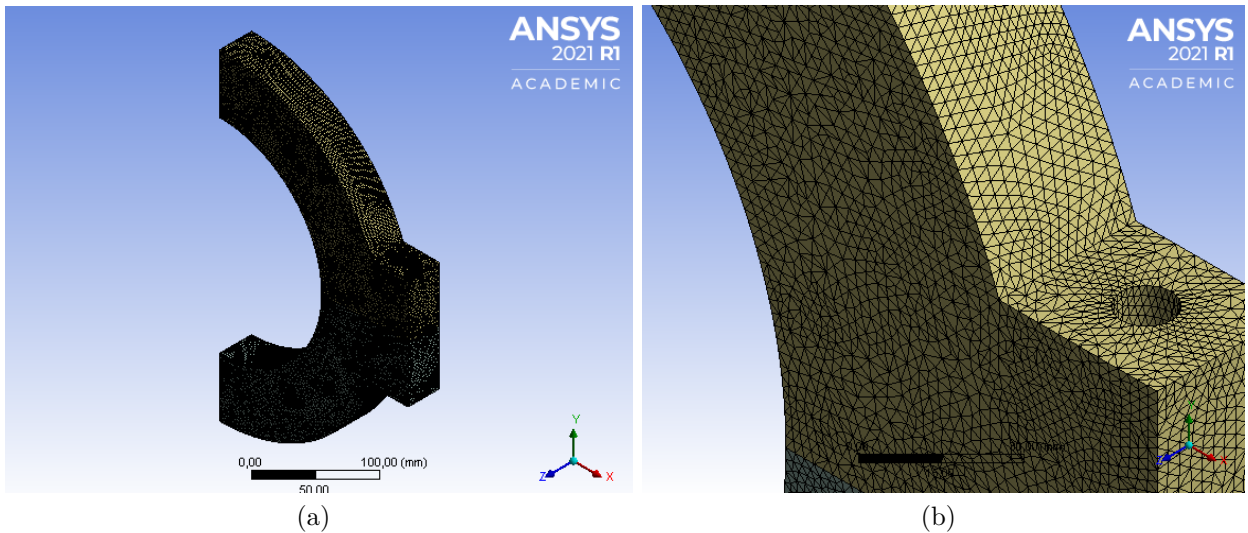


Figura 4.19: Vista isométrica y vista cercana al vértice de la abrazadera del mallado final.

4.5.3. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde ingresadas como parámetros iniciales del problema corresponden a valores importantes dentro del problema, a continuación se mencionan las principales condiciones y se presentan las figuras que permiten ejemplificar lo mencionado:

- Punto fijo: corresponde a la sección en donde se realiza el corte de las dos carcasas que componen la abrazadera.
- Presión interna: la presión a la que estará sometida la abrazadera, que corresponde a 38.3175 [MPa].
- Pre-tensión del perno: corresponde a la fuerza que estará aplicado en los pernos que unen las dos mitades de la carcasa, que corresponde a un valor máximo de 91 [kN].

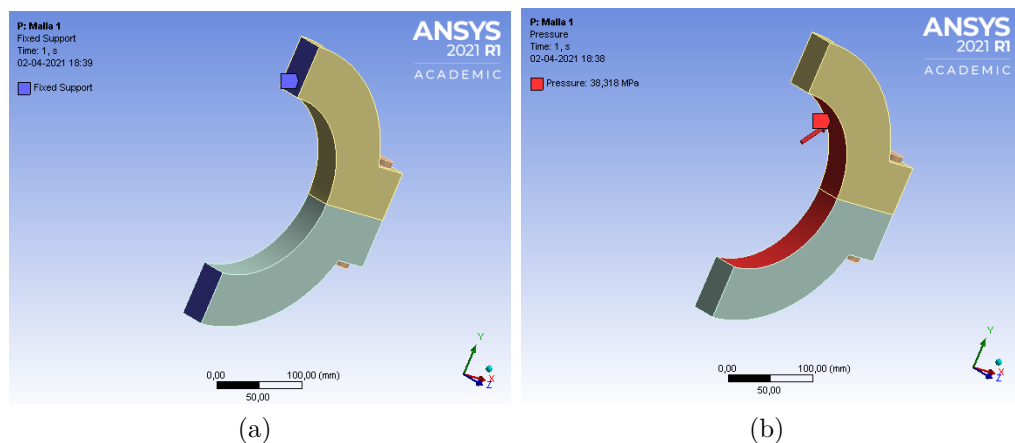


Figura 4.20: Condiciones de bordes impuestas en el problema, caras fijas y presión interna.

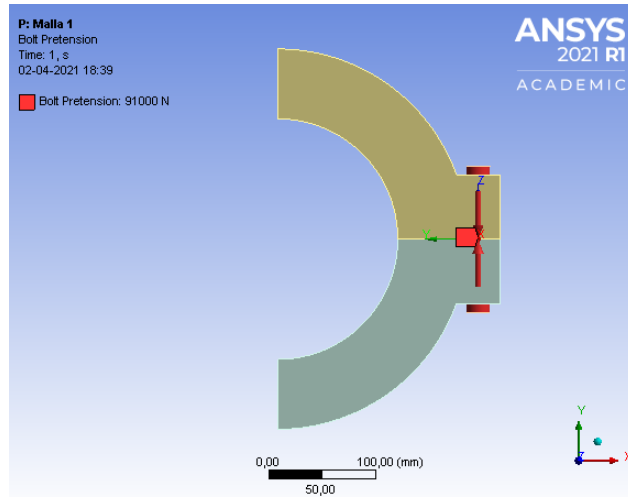


Figura 4.21: Condición de borde para los pernos del problema.

Capítulo 5

Metodología

Parte 1

- Se definen las dimensiones del tramo de cañería junto con su geometría a simular (diámetro interno y la extensión de este ducto), además de las propiedades del material, junto con esto se presentan las propiedades reológicas del concentrado y de su fluido de transporte, cada uno de estos elementos responden a las secciones mencionadas en los antecedentes.
- Mediante el módulo SpaceClaim dentro de ANSYS workbench se crea la geometría del problema para el caso a simular, esta geometría corresponde al volumen en donde se analizará el comportamiento del fluido a transportar.
- Posteriormente se crea el mallado, de esta manera se discretiza el volumen diseñado en la geometría, estas pequeñas celdas corresponden a los elementos en donde el programa realizará la resolución de las ecuaciones de Navier-stokes como se menciona en la sección 3.4.1.
- Luego de la etapa anterior se procede a ingresar las condiciones de borde del problema, en donde se especifican los valores para la entrada y salida de la geometría a analizar, junto con la definición del tipo de fluido a transportar.
- Se realiza la simulación en ANSYS módulo Fluent. La simulación será multifásica, el concentrado presenta turbulencias en su transporte y movimiento particulado, se incluye un modelo de erosión por partículas estudiado en ANSYS.
- Los modelos de erosión por impacto descritos necesitan como dato de entrada la velocidad de la partícula antes de impactar, es por esto que se utilizaron simulaciones CFD para obtener los campos de velocidades, posteriormente se realiza el tracking de partículas, mediante este apartado se obtienen las zonas de potenciales puntos de deposición de partículas en el interior del piping de estudio.
- Se generan las imágenes con los valores obtenidos en la simulación para poder analizar los resultados.
- Se analizan los resultados obtenidos, de ser necesario se modifica el mallado para obtener una correcta simulación y posterior análisis, se realizan los gráficos indicados a los objetivos, posteriormente se concluye.

Parte 2

- Se indican las condiciones de diseño del problema: presión interna de trabajo, factor de seguridad considerado para evaluar la abrazadera, temperatura ambiente del problema.
- Se define el material a utilizar en la abrazadera, además de establecer las principales dimensiones del problema como lo son: diámetro interior de la cañería, espesor, tolerancia de ovalamiento según diámetro y diámetro interior de la abrazadera.
- Mediante las ecuaciones presentadas en los antecedentes se establecen las medidas iniciales de la abrazadera: espesor Flange (F), espesor abrazadera (S), carga en los pernos y diámetro de estos.
- Se establece un cuadro de trabajo con rangos para cada uno de los parámetros, para observar la sensibilidad del componente en función de cada uno de los valores.
- Se procede a diseñar la abrazadera mecánica para cada uno de los casos considerados, el modelo se dibuja mediante SpaceClaim de Workbench.
- Se importa al módulo Static Structural, donde se indican el material del cual estará compuesto cada parte de la abrazadera.
- Luego de establecer los materiales de trabajo se procede a realizar el mallado de la geometría, el siguiente paso es establecer las condiciones de borde del problema indicadas en la sección 4.5.3.
- Se indica al programa que variable de interés se busca, en este caso buscamos las deformaciones obtenidas en cada dirección junto con los esfuerzos, para así mediante la ecuación de Von Mises establecer el esfuerzo equivalente que será comparado con el esfuerzo máximo permisible del material.
- Se generan las imágenes con los valores obtenidos en la simulación para poder analizar los resultados.
- Se analizan los resultados obtenidos, de ser necesario se modifica el mallado para obtener una correcta simulación y posterior análisis, se realizan los gráficos indicados a los objetivos, posteriormente se concluye.

A continuación se presenta un breve esquema del procedimiento utilizado como flujo de trabajo para determinar el diseño final de la abrazadera.

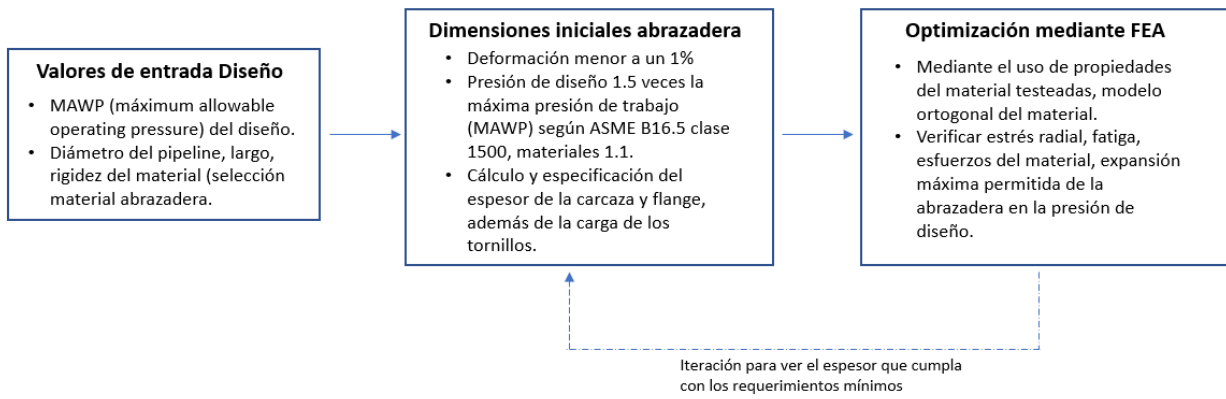


Figura 5.1: Flujo de trabajo dimensiones abrazadera

5.1. Recursos

En esta sección se presentan los recursos requeridos para poder realizar la investigación en su totalidad.

5.1.1. Recursos no pecuniarios

5.1.1.1. Equipos

Se requiere un computador que permita utilizar el programa ANSYS módulo CFD (computational fluid dynamics), con la suficiente memoria para al menos 512.000 elementos (licencia para estudiantes).

5.1.1.2. Software

Programa ANSYS módulo CFD (computational fluid dynamics) y statical structure con al menos licencia Estudiantil.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Erosión y Sedimentación

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la simulación del modelo No-newtoniano mediante las simulaciones indicadas:

6.1.1. Líneas de flujo

Líneas de flujo obtenidas con las condiciones de borde aplicadas al concentrado de mineral en trabajo:

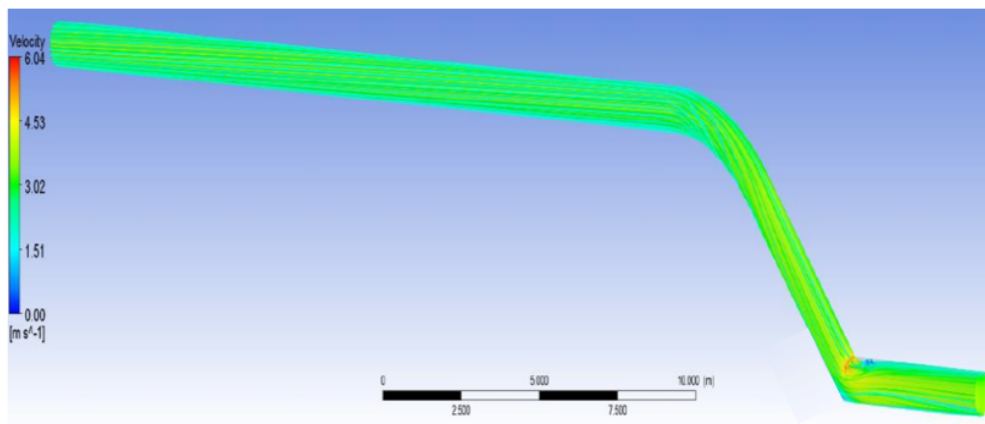
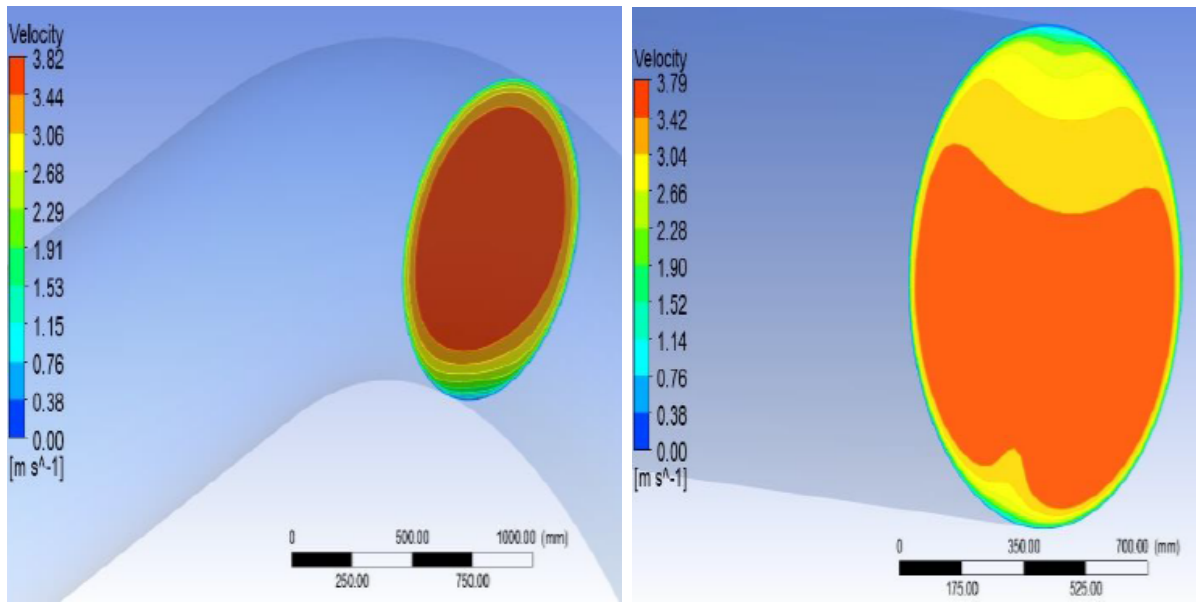


Figura 6.1: Líneas de flujo de velocidad para un modelo no-newtoniano.

Junto con estas líneas de velocidad se obtienen los contornos de los valores promedios, además de sus magnitudes vectoriales:



(a)

(b)

Figura 6.2: Contornos de velocidad junto con sus secciones a analizar.

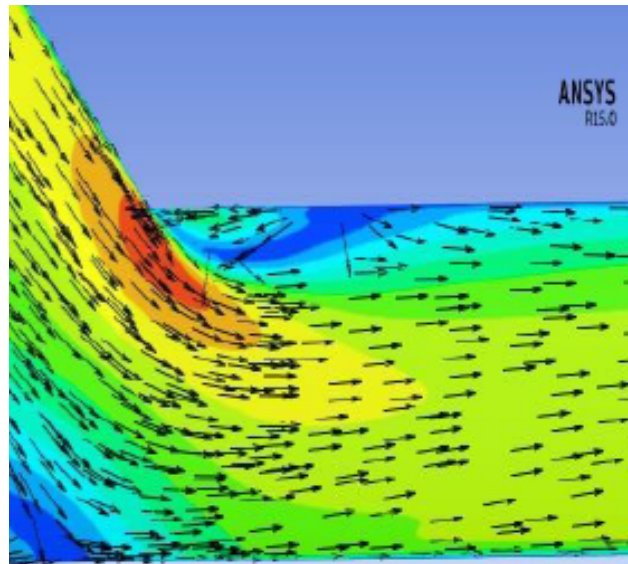


Figura 6.3: Magnitudes y velocidades en la sección del codo para el tramo analizado.

6.1.2. Energía Cinética Turbulenta

La simulación nos permite obtener la energía cinética en el transporte del concentrado:

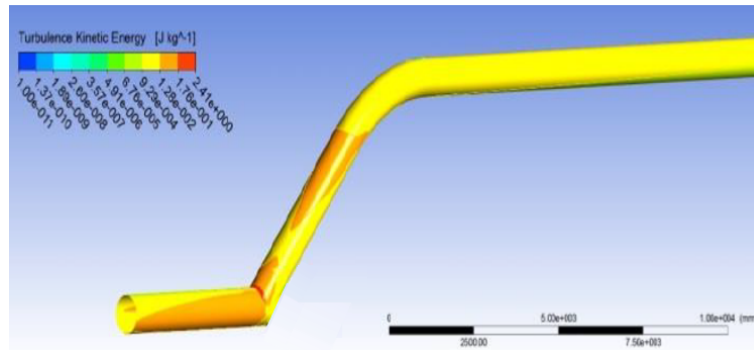


Figura 6.4: Energía cinética turbulenta del tramo a analizar.

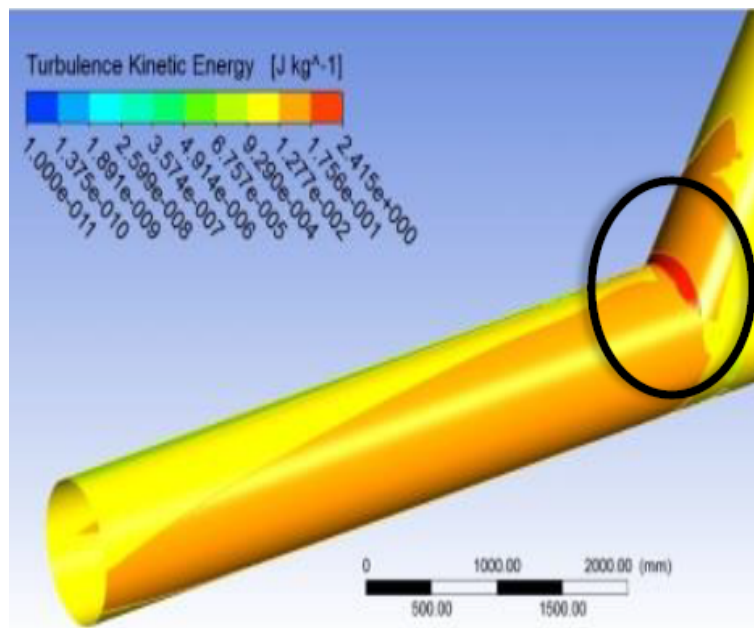


Figura 6.5: Energía cinética turbulenta del codo de la geometría de trabajo.

6.1.3. Zonas Deposición y Sedimentación

A continuación se presentan los resultados que permiten observar las zonas de deposición y sedimentación:

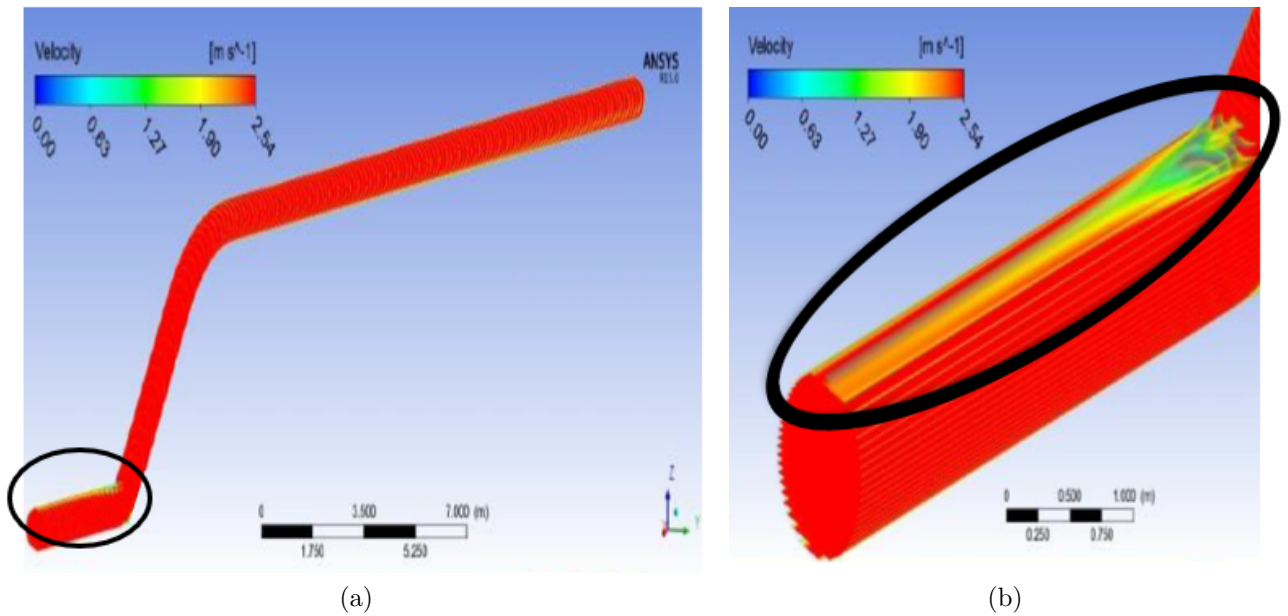


Figura 6.6: Resultados velocidad de deposición.

6.1.4. Zona de Desgaste

Con la tasa de erosión definida para el acero se obtienen las áreas para este fenómeno:

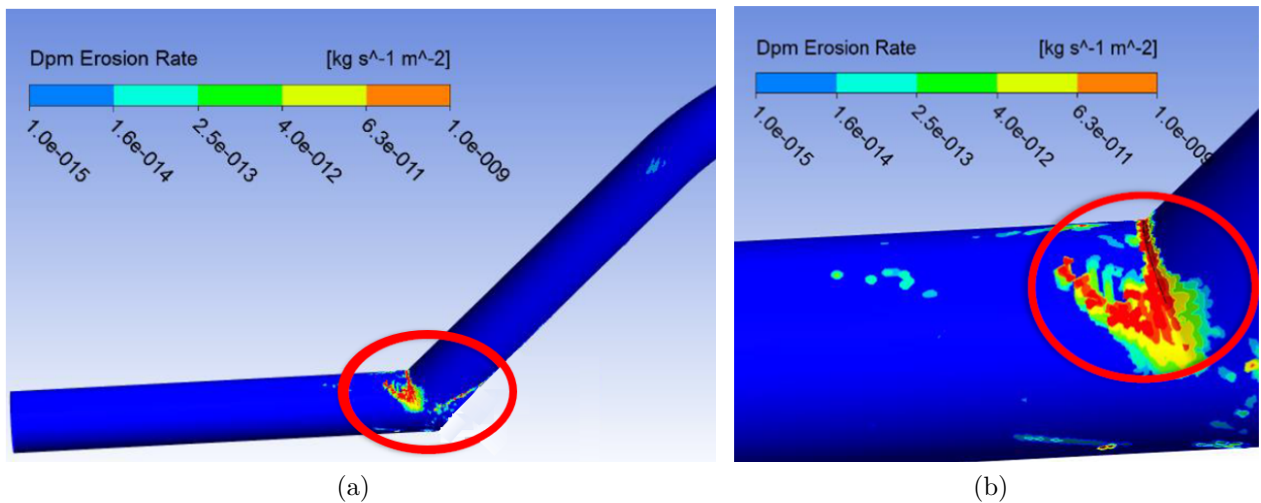


Figura 6.7: Erosión en escala logarítmica del acero.

Los resultados con respecto a las tasas de erosión entregados poseen unidades $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ por lo que para obtener una tasa de erosión en $[\text{mm}/\text{año}]$ se debe dividir los valores obtenidos por la densidad del material de la cañería (en este caso acero que posee un valor cercano a los $8000 [\text{kg}/\text{m}^3]$ y este valor multiplicarlo por la cantidad de segundos en el año ($31.536.00 [\text{s}]$), suponiendo un año no bisiesto; se obtienen valores menores a $0.1 [\text{mm}/\text{año}]$.

6.2. Mechanical Bolt on Clamps

6.2.1. Análisis de Sensibilidad

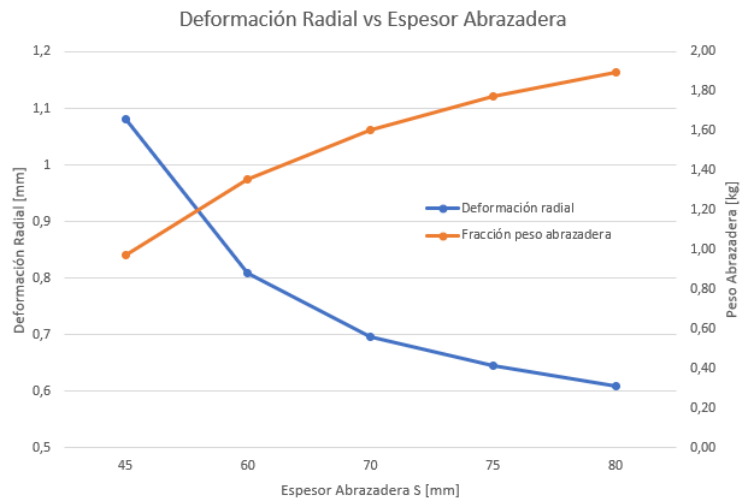


Figura 6.8: Sensibilidad espesor de la abrazadera en función de la deformación radial.

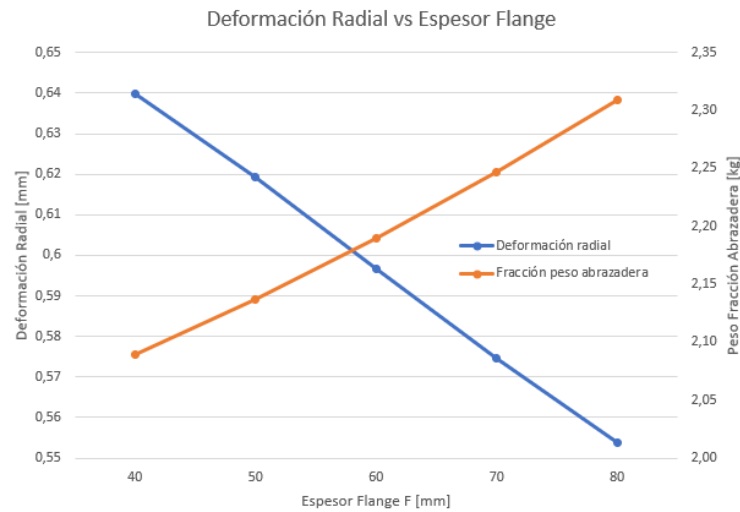


Figura 6.9: Sensibilidad espesor flange en función de la deformación radial.

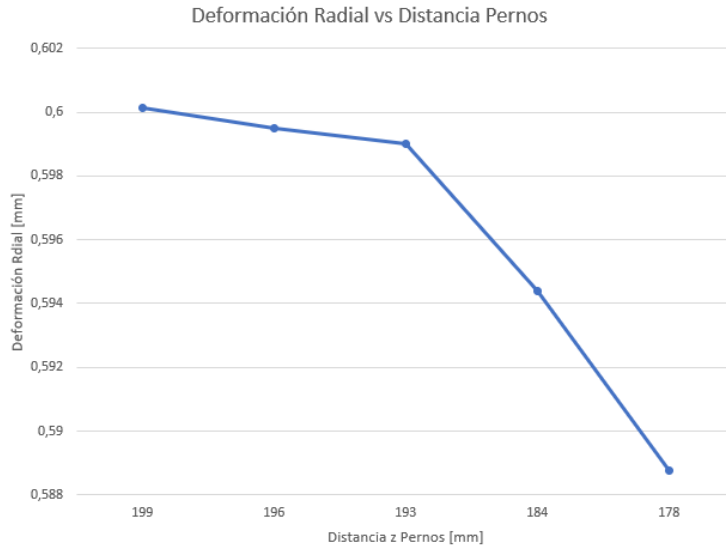


Figura 6.10: Sensibilidad de la distancia de las perforaciones de pernos en función de la deformación radial.

6.2.2. Resultados esfuerzos y deformaciones

Tabla 6.1: Resumen de resultados abrazadera mecánica.

Elemento	Expansión abrazadera (mm)		Esfuerzo máximos (MPa)			
	Deformación en X	Deformación en Y	Hoop	Longi.	Radial	P_m
Valor	0.59572	0.19757	342.51	307.5	60.69	332.27
Comparativa	<0.7	<0.3	<440	<440	<440	<440
¿Falla?	No	No	No	No	No	No

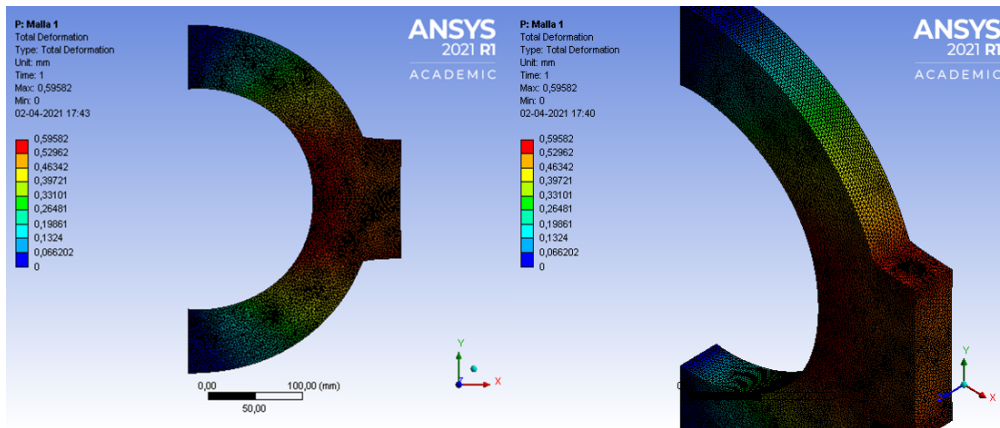


Figura 6.11: Resultados Deformación total abrazadera mecánica.

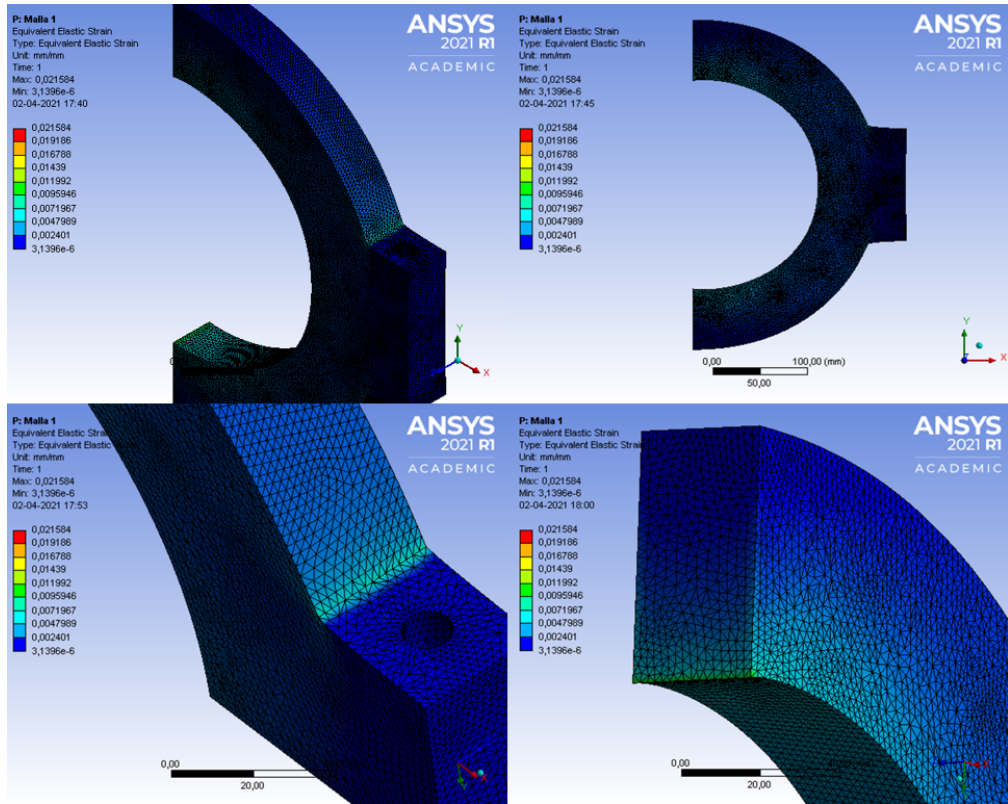


Figura 6.12: Resultados Deformación elástica equivalente abrazadera mecánica.

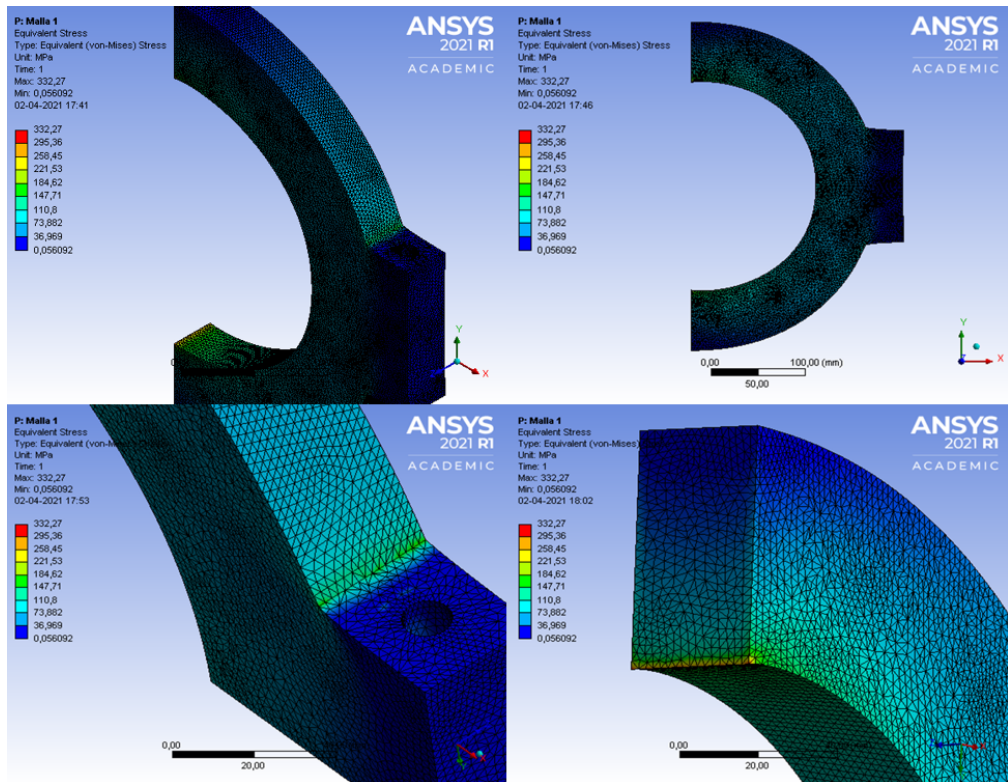


Figura 6.13: Resultados Esfuerzo equivalente abrazadera mecánica.

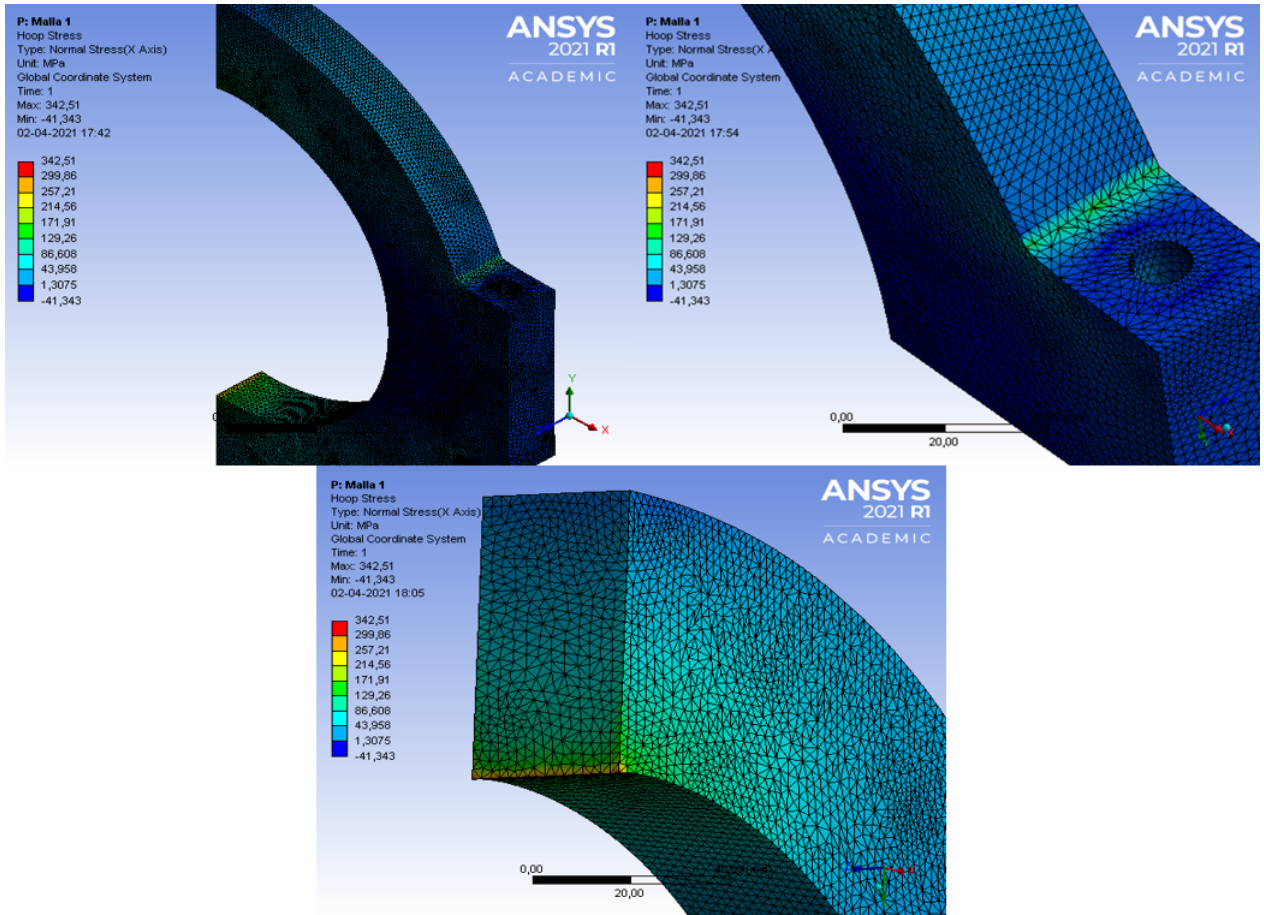


Figura 6.14: Resultados Esfuerzo circunferencial abrazadera mecánica.

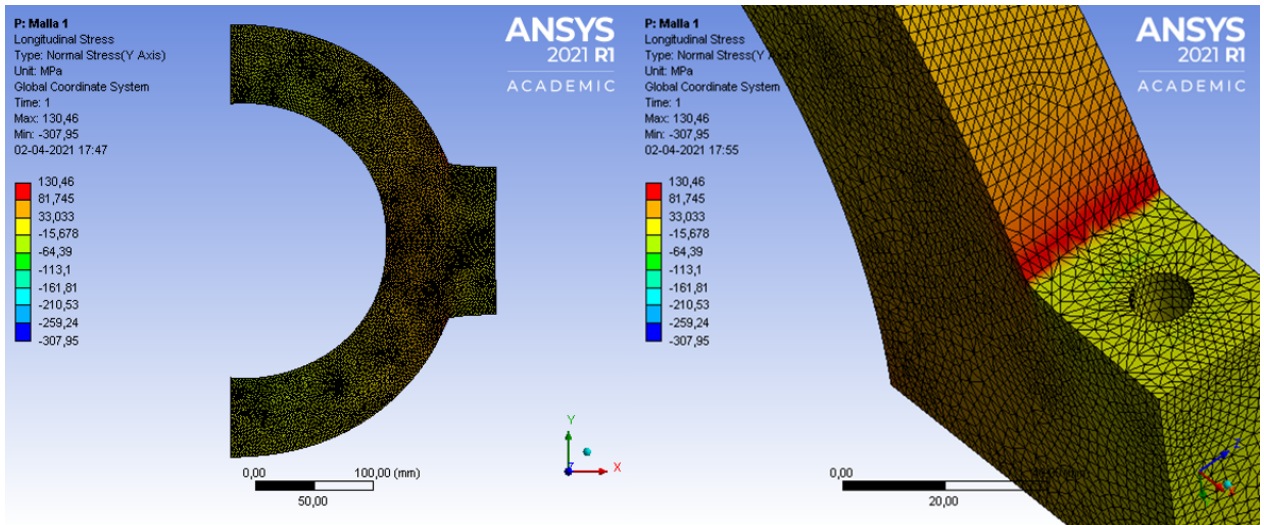


Figura 6.15: Resultados Esfuerzo longitudinal abrazadera mecánica.

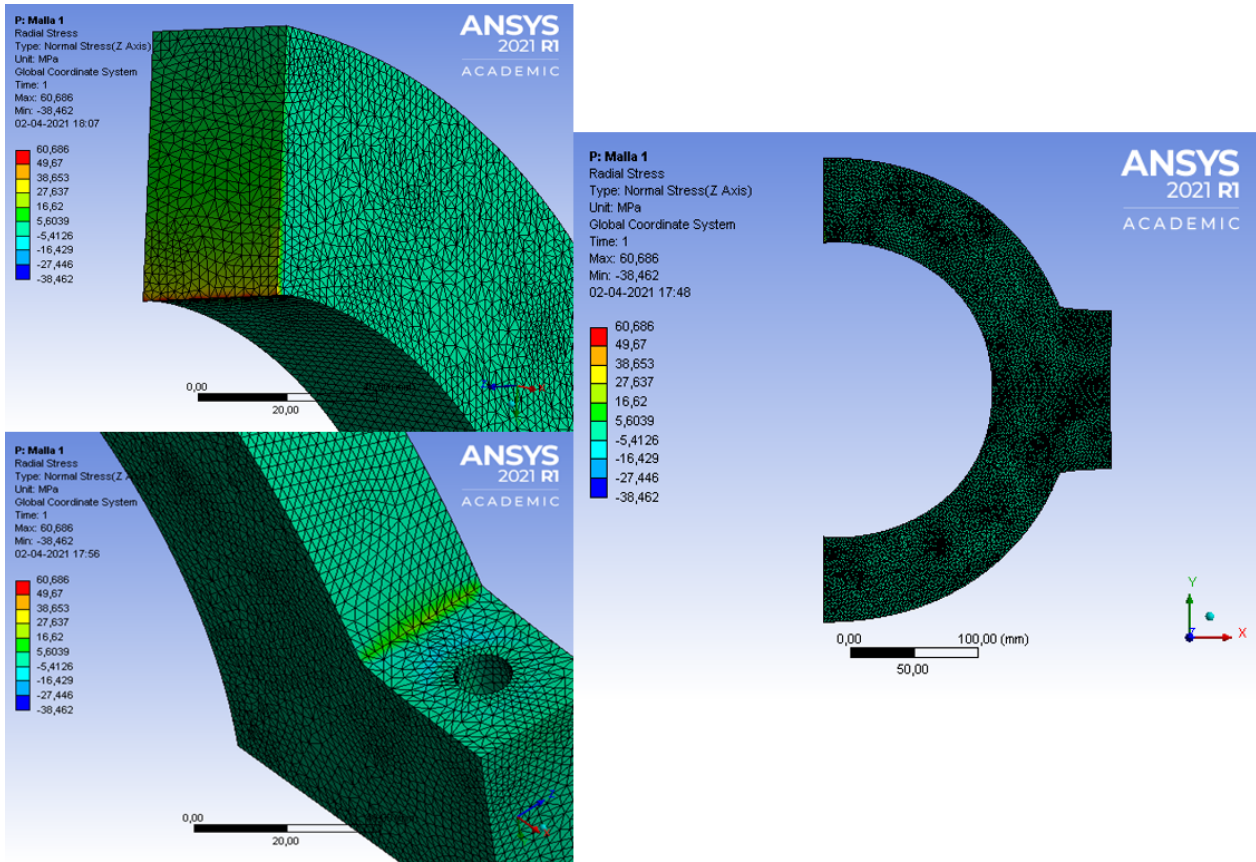


Figura 6.16: Resultados Esfuerzo radial abrazadera mecánica.

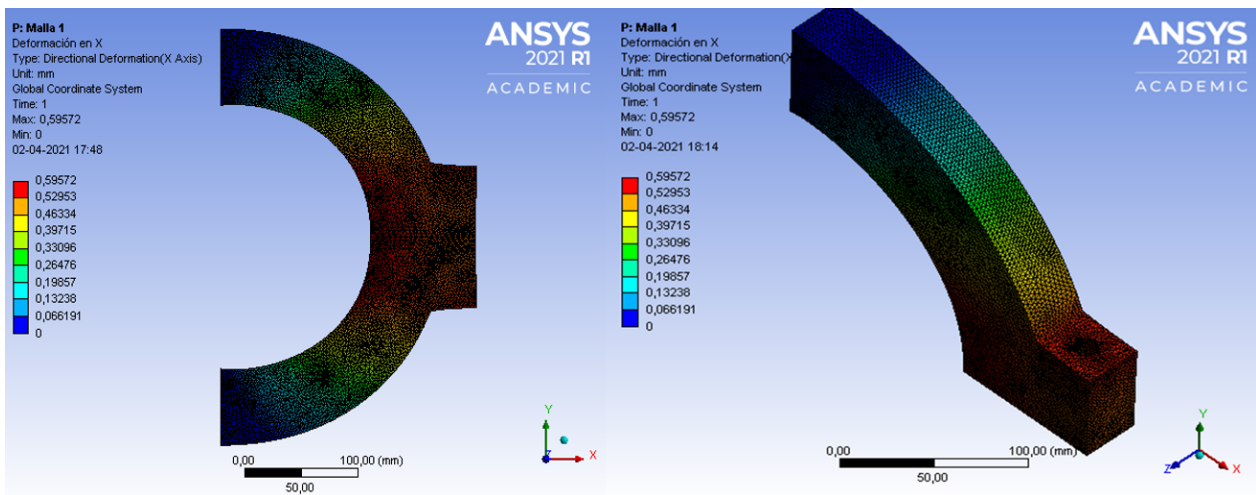


Figura 6.17: Resultados deformación en X.

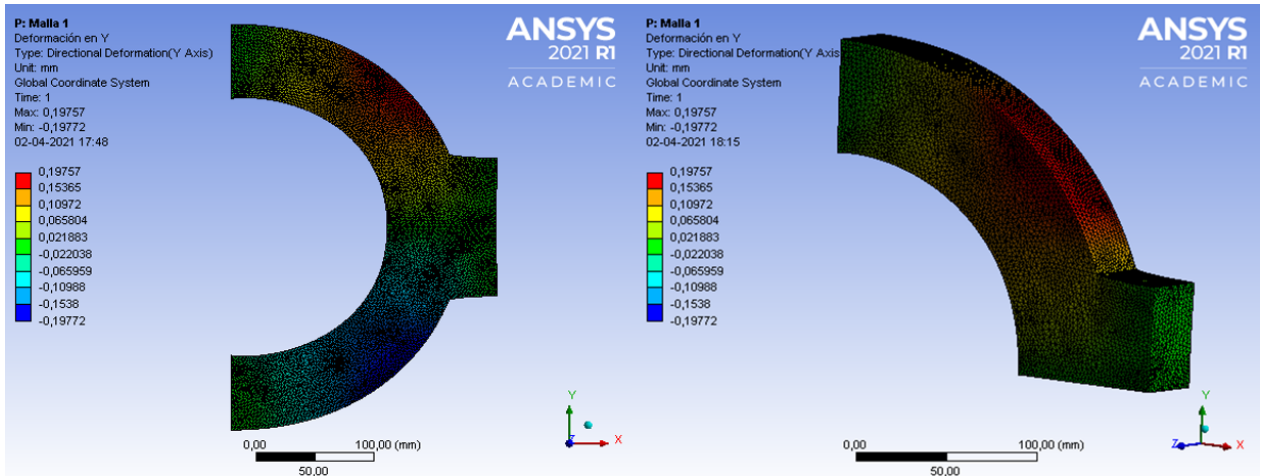


Figura 6.18: Resultados deformación en Y.

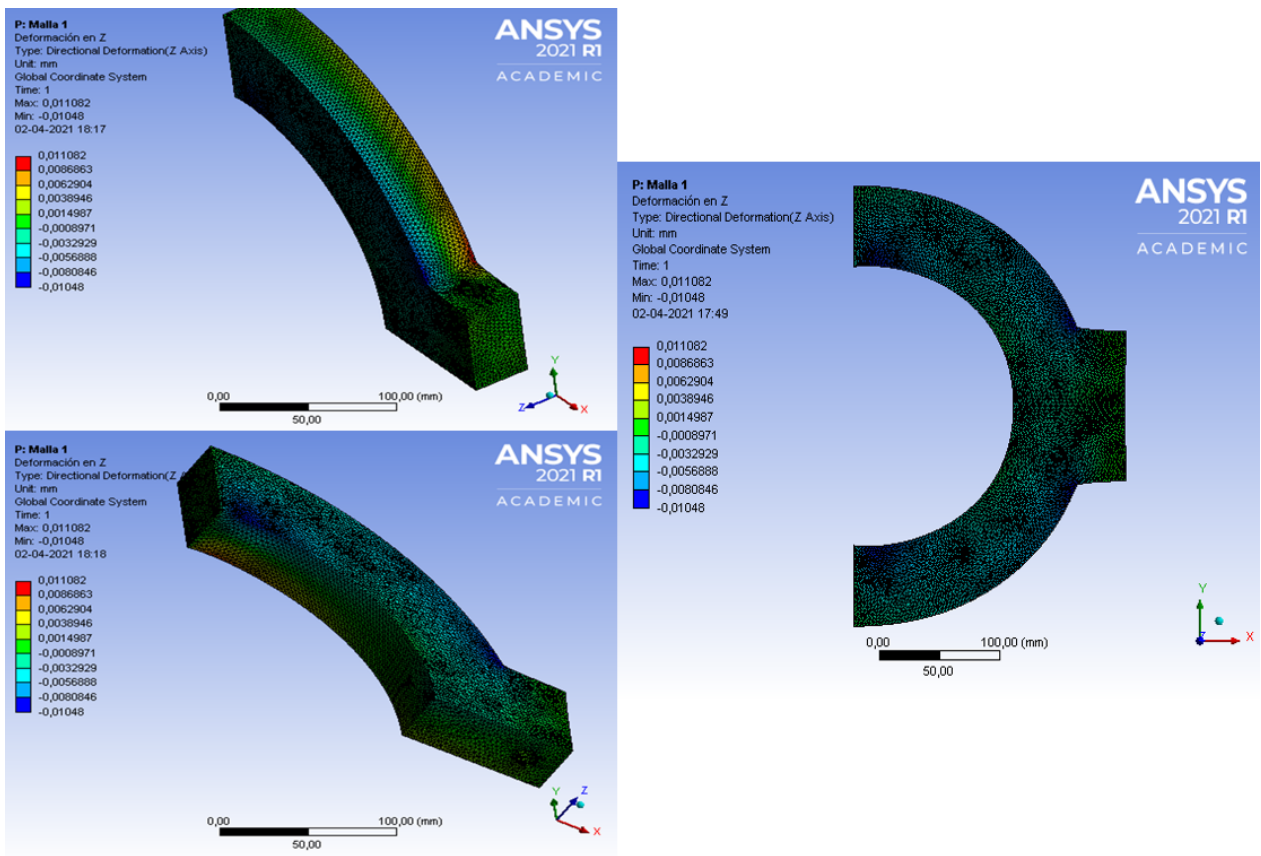


Figura 6.19: Resultados deformación en Z.

Capítulo 7

Análisis de Resultados

7.1. Daños Interiores

Las simulaciones realizadas mediante el programa ANSYS con su módulo fluent permiten obtener los campos de velocidad en el desplazamiento del fluido, todo esto mediante el seguimiento o tracking de las partículas de concentrado simuladas, con este seguimiento es posible observar el comportamiento de las velocidades de las partículas permitiendo visualizar si es que hay posibles puntos de deposición y sedimentación del tramo de cañería analizado, dentro de los principales resultados se puede analizar que:

- En la figura 6.1 se observan las líneas de flujo en donde el valor promedio de la velocidad es cercano a 3.32 [m/s] y una velocidad máxima cercana a los 6 [m/s] en la zona del codo inferior del tramo de cañería, para un mayor detalle de las velocidades alcanzadas por tramo se tienen la figura 6.2 que contiene el detalle de la velocidad del primer codo en donde la máxima velocidad corresponde a 3.82 [m/s] junto con la velocidad de salida del tramo de tubería analizado, donde la velocidad máxima alcanzada se encuentra al centro de esta cañería y es de un valor cercano a 3.79 [m/s].
- Como detallamos en el punto anterior, la sección donde se alcanza la mayor velocidad en su magnitud en el transporte de concentrado corresponde al codo inferior de la geometría, en la figura 6.3 se puede ver el contorno de velocidad en este punto y en donde se puede visualizar en la parte de color rojo una velocidad de un valor de 5.15 [m/s], este valor nos puede indicar una posible zona de mayor erosión del tramo a trabajar en el problema.
- Esta posible zona de mayor erosión en el tramo de cañería simulado puede ser detallado mediante un análisis de la energía cinética turbulenta debido a que donde haya mayor velocidad, mayor es la energía cinética turbulenta, este valor se tomará como el gran indicio de las zonas de posible erosión de material.
- Con respecto a los criterios para establecer posibles zonas de deposición y sedimentación, las referencias y valores utilizados se encuentran en los antecedentes; tomando el peor caso posible de los tamaños de partícula como lo es el sólido de diámetro de 212 [μm] cuya velocidad de sedimentación corregida es de 0.0036 [m/s] se puede verificar que no existen posibles zonas de decantación notorias en el tramo de cañería debido a que son valores despreciables de áreas con respecto al volumen del codo, en el caso de la velocidad de deposición que corresponde a un valor de 2.54 [m/s] según la ecuación 3.1 se observa que en la figura 6.6 las velocidades alcanzadas al interior del tubo indican posibles zonas

de deposición en las secciones posteriores al primer y segundo codo, con velocidades menores al valor límite. Estas zonas indicadas con color verde-amarillo-naranja indican donde las partículas pueden llegar a decantar con cierta tolerancia a que niveles inferiores de líneas de flujo las arrastren debido a su velocidad.

- Con respecto a las zonas de desgaste por erosión mencionadas en el segundo punto de esta sección, estas partes en donde la concentración de sólidos ocasiona zonas de alto impacto debido a cambios bruscos de velocidad (zonas de una mayor turbulencia) tanto en su magnitud como en su dirección, todo esto debido a que los sólidos no continúan con la inercia de la fase continua (del fluido) y colisionan con las paredes de la tubería, por esto se hace necesario observar la energía cinética turbulenta obtenida mediante la simulación, tomando mayor atención en las secciones donde hay cambios bruscos de geometría como lo son los codos presentes en el tramo.
- En la figura 6.7 se observan las tasas de erosiones para toda la geometría analizada y como se menciona en el punto anterior se verifica que los puntos en donde hay cambios bruscos de geometría junto con secciones que contengan harta energía cinética turbulenta son las zonas donde hay una mayor tasa de erosión, acá se observa localmente, todo esto gracias a los valores tomados para el modelo de erosión de Finnie para el acero de trabajo presentado en la sección 3.4.5.3.

7.2. Daños exteriores

Con respecto al segundo tema abarcado en este trabajo de memoria, las simulaciones obtenidas mediante el módulo Static Structural de ANSYS se pueden obtener las deformaciones asociadas a la aplicación de la presión interna en las paredes de la abrazadera y la carga presente en los pernos de la abrazadera, junto con estas deformaciones podemos ver los esfuerzos radiales, circunferenciales y longitudinales para verificar si la abrazadera no fallará plásticamente en su aplicación, todas estas variables serán comparadas con valores establecidos en los antecedentes:

- Los materiales considerados para el diseño de la abrazadera apernada son los siguiente: concreto, acero, fibra de carbono y material compuesto, donde podemos indicar que el primer material es descartado por su baja resistencia a la tracción y los altos valores de su peso y volumen en el diseño ideal de la abrazadera, el segundo se descarta por el hecho de los posibles daños que puede generar en el apriete a la cañería, además de contener una alta densidad que puede afectar en la movilidad de la abrazadera; la fibra de carbono se descarta por su alto precio de mercado.
- El material final elegido consiste un material compuesto por una matriz epóxica reforzada con fibras de vidrio o E-glass con las fibras en orientaciones 0/90°, material que permite obtener buenas propiedades mecánicas y alta resistencia a fenómenos químicos como son la corrosión y erosión; este material es utilizado en abrazaderas mecánicas de alta presión bajo agua.
- En la figura 6.8 se observa que al variar el espesor de la abrazadera (S) en los rangos establecidos en la tabla 4.6 las expansiones o deformaciones de las carcazas se ven impactadas de manera importante en su valor, verificando que: un espesor alto en S implica

una reducción en los valores de las deformaciones en todo sentido, pero al disminuir este espesor las deformaciones se hacen notorias, para este análisis se dejaron fijas las otras variables como lo son el espesor de flange (F) y ubicación de los pernos (z).

- En la figura 6.9 se observa que al variar el espesor del flange (F) o sea modificando el ratio flange/espesor carcaza en los rangos establecidos en la tabla 4.6 las expansiones o deformaciones de las carcazas se ven impactadas en su valor (en menor medida al espesor de la abrazadera), verificando que: un espesor alto en F implica una reducción en los valores de las deformaciones en todo sentido, pero al disminuir este espesor las deformaciones se hacen notorias, para este análisis se dejaron fijas las otras variables como lo son el espesor de la abrazadera (S) y ubicación de los pernos (z), este análisis de sensibilidad permite observar que el aumento de este valor impacta fuertemente en el peso y volumen de la abrazadera.
- Para esta misma variable F, es posible verificar que el cálculo realizado mediante la ecuación 4.7 se aproxima al valor ideal mínimo para que la abrazadera no sufra una deformación mayor a lo establecido, debido a que los valores alcanzados al disminuir el valor del espesor de la abrazadera nos entregan resultados ejemplificados en las figuras B.6, B.7, B.8.
- En la figura 6.10 se observa que al variar la distancia en donde se ubican los pernos (z) en los rangos establecidos en la tabla 4.6 las expansiones o deformaciones de las carcazas no se ven impactadas de una manera elevada en su valor, verificando que: mientras más cerca se encuentra el perno menor será la deformación radial, además el efecto del espesor del flange será menor que si el perno estuviese más alejado, sería ideal tener los pernos lo más cerca posible, pero llega un punto en que la cercanía a la línea exterior de la abrazadera va asociado con un sacado del componente. lo que debilita la estructura.
- Los principales valores obtenidos en las simulación están resumidos en la tabla 6.1, en donde además se pueden establecer los criterios que permiten identificar el correcto desempeño de la abrazadera bajo las condiciones de diseño del problema, además se puede verificar que: para las deformaciones de la abrazadera bajo la presión interna y la carga de los pernos, la deformación equivalente da un total de 0.59, esta componente sufre en gran medida el aporte del valor de la deformación en X, que al tener un menor valor al establecido como límite (0.7 [mm]) nos indica que el diseño de la abrazadera responde bien en esta medida, con respecto a la deformación en Y, podemos observar de la tabla que el valor máxima para este parámetro corresponde 0.3 [mm], esto debido a que en esta dirección se encuentra el plano de unión de las carcazas de la abrazadera que permiten el sello, por lo que podemos concluir que el diseño de la abrazadera cumple con ambos casos.
- El esfuerzo equivalente calculado mediante Von Mises, gracias a los esfuerzos obtenidos por la simulación, figura 6.13 poseen un menor valor al esfuerzo máxima de tracción que presenta el material epóxico/E-glass biaxial, cuyo valor es de 440 [MPa], esto nos indica que la abrazadera diseñada no fallará de manera plástica ante las condiciones establecidas.
- Las ecuaciones y rangos establecidos en este diseño son parametrizables para diámetros mayores, pero se debe establecer una presión de diseño máxima correspondiente a la clase 1500 de la ASME B16.5 para los materiales 1.1.

Capítulo 8

Conclusiones

Con respecto a los resultados obtenidos en la primera parte de esta investigación, sobre las posibles zonas y daños generados internamente por erosión o sedimentación en el transporte de concentrado de hierro en un tramo de cañería de acero desnudo con un diámetro nominal de 12"NPS se puede concluir que: las simulaciones desarrolladas en el presente trabajo mediante ANSYS módulo CFD, utilizando un modelo de Finnie para la erosión del acero (permitiendo ver la tasa de este fenómeno) permite describir el campo de velocidades en el transporte de concentrado que nos entregan pequeñas zonas de sedimentación (casi imperceptibles) por lo que no es necesario cambiar la geometría u estructura del tramo de cañería analizado por lo que este fenómeno es probable que no ocurra si se mantienen las condiciones mencionadas en el problema.

La energía cinética turbulenta obtenida (k) en la paredes del trazado obtienen puntos máximos en sus valores en zonas cercanas a los codos, esto asociado a los cambios repentinos en la geometría que implica cambios bruscos en las direcciones de las velocidades, estas zonas coinciden con aquellas en donde la tasa de erosión de material es más alta de lo normal, este modelo nos entrega las zonas aproximadas en donde ocurrirá el fenómeno de erosión del material de trabajo y en las que posiblemente haya que tener un mayor cuidado en temas de mantención a futuro.

La simulación obtenida del diseño final de la abrazadera apernada mecánicamente mediante el módulo de Static Structural de ANSYS nos entregan resultados satisfactorios, debido a que las deformaciones en X e Y son menores a los valores establecidos como el límite de esta variable, además el esfuerzo equivalente calculado mediante Von Mises nos indica que la abrazadera no sufrirá una falla plástica por lo que se puede establecer que: las ecuaciones y rangos utilizados puede servir para ser parametrizable esta abrazadera para otros diámetros de cañería (hasta 24"NPS), habría que verificar los pesos y volúmenes obtenidos con este diseño de abrazadera además de establecer como límite una presión de diseño según la clase ASME B16.5 1500 para el grupo de materiales 1.1.

La estanqueidad formada entre la cañería-sello y abrazadera se considera de manera teórica en este trabajo de investigación.

Bibliografía

- [1] American Petroleum Institute. *API 5L-Specification for line Pipe*. 2015.
- [2] The American Society of Mechanical Engineers. *ASME B31.11-Slurry Transportation Piping Systems*. Two Park Avenue, New York, NY 10016-5990, 2002.
- [3] The American Society of Mechanical Engineers. *ASME B31.4-Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*. Two Park Avenue, New York, NY 10016-5990, 2007.
- [4] The American Society of Mechanical Engineers. *ASME B16.5- Pipe Flanges and Flanged Fittings*. Two Park Avenue, New York, NY 10016-5990, 2013.
- [5] Kenny J.P. Ghandi R.L.: Wasp, E. J. Solid – liquid flow slurry pipeline transportation. *Trans Tech Publications*,, 1979.
- [6] FRANCISCA DANIELA PINET CABEZÓN. Simulación fluidodinámica computacional para la determinación de la variación de energía en tramos rectos de tuberías de transporte de flujos bifásicos, 2012. URL [UniversidaddeChile](#).
- [7] Baha Abulnaga. *Slurry systems handbook*. *McGraw-Hill*.
- [8] ESSS. Dinámica de fluidos computacional: ¿qué es? URL [ess.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/](#).
- [9] ANSYS-Fluent. Theory guide 16.10 wall erosion ansys help 19.1, 2018.
- [10] ANSYS-Fluent. Theory guide 16.1 discrete phase ansys help 19.1, 2018.
- [11] CFD Perú. Modelos de turbulencia, openfoam vs ansys cfx vs ansys fluent, 2019. URL <https://cfdperu.com/modelos-de-turbulencia-openfoam-vs-ansys-cfx-vs-ansys-fluent/>.
- [12] Shivam Mishra Anurag, Nitish Kumar. Slurry erosion: An overview. *ScienceDirect*, 2019. doi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319329323>.
- [13] S.A Shirazi X. Chen, B.S Mclaury. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (cfd)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees. *ScienceDirect*, 2004. doi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004579300400043X>.
- [14] A. Zamberi M. Jadid Z. Johar Ch. B. Solnordal, Ch. Y. Wong. Determination of erosion rate characteristic for particles with size distributions in the low stokes number range. *International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, 2013.
- [15] Roger A Bustamante Plaza. Apunte mecánica de sólidos. *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*.
- [16] MechaniCalc. Mechanical properties of materials. URL <https://mechanicalc.com/>

[reference/mechanical-properties-of-materials](#).

- [17] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. *McGrawHill*, 8va edición.
- [18] Ibrahim A. Alnaser. Comparison of the crack-growth rates for full-encirclement and patch composite repairs. *Sciende Direct*, 2019. doi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319302016>.
- [19] Stats Group. Pipeline isolation, hot tapping linestop plugging. URL <https://www.statsgroup.com/>.
- [20] The American Society of Mechanical Engineers. *ASME VIII division 2-Rules for Construction of Pressure Vessels*. Three Park Avenue, New York, NY 10016-5990, 2010.
- [21] The American Society of Mechanical Engineers. *Repair of Pressure Equipment and Piping*. Three Park Avenue, New York, NY 10016-5990, 2011.
- [22] L. P. Djukic T. K. T. Nguyen A. Y. L. Leong P. J. Falzon W. S. Sum, K. H. Leong. Design, testing and field deployment of a composite clamp for pipeline repairs. *Plastics, Rubber and Composites.*, 2016. doi: 10.1080/14658011.2016.1143082.
- [23] T. Rangaswamy K. Devendra. Strength characterization of e-glass fiber reinforced epoxy composites with filler materials, 2013. URL <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=40059>.

Anexo A

Reparaciones Permanentes

**Table 451.6.2.9-1 Acceptable Pipeline Repair Methods
(Nonindented, Nonwrinkled, and Nonbuckled Pipe)**

Type of Defect	Repair Methods								
	1 Replace as Cylinder	2 Removal by Grinding	3 Deposition of Weld Metal	4a Reinforcing Full Encirclement Sleeve (Type A)	4b Pressure- Containing Full Encirclement Sleeve (Type B)	5 Composite Sleeve	6 Mechanical Bolt-On Clamps	7 Hot Tap	8 Fittings
External corrosion $\leq 80\% t$ (excluding grooving, selective, or preferential corrosion of ERW, EFW seams)	Yes [Note (1)]	No	Limited [Note (2)]	Limited [Note (3)]	Yes	Yes [Note (3)]	Yes	Limited [Note (4)]	Limited [Note (5)]
External corrosion $> 80\% t$	Yes [Note (1)]	No	No	No	Yes	No	Yes	Limited [Note (4)]	Limited [Note (5)]
Internal corrosion $\leq 80\% t$	Yes [Note (1)]	No	No	Limited [Note (6)]	Yes	Limited [Note (6)]	Yes	Limited [Note (4)]	No
Internal corrosion $> 80\% t$	Yes [Note (1)]	No	No	No	Yes	No	Yes	Limited [Note (4)]	No
Grooving, selective or preferential corrosion of ERW, EFW seam	Yes [Note (1)]	No	No	No	Yes	No	Yes	Limited [Note (4)]	No
Gouge, groove, or arc burn	Yes [Note (1)]	Limited [Note (7)]	No	Limited [Notes (3), (8)]	Yes	Limited [Notes (3), (8)]	Yes	Limited [Note (4)]	Limited [Notes (5), (8)]
Crack	Yes [Note (1)]	Limited [Note (7)]	No	Limited [Note (7)]	Yes	Limited [Note (7)]	Yes	Limited [Note (4)]	No
Hard spot	Yes [Note (1)]	No	No	Limited [Note (3)]	Yes	No	Yes	Limited [Note (4)]	No
Blisters	Yes [Note (1)]	No	No	No	Yes	No	Yes	Limited [Note (4)]	No
Defective girth weld	Yes [Note (1)]	No	Limited [Note (2)]	No	Yes	No	Yes	No	No
Lamination	Yes [Note (1)]	No	No	No	Yes	No	Yes	No	No

ASME B31.4-2016

Figura A.1: Reparaciones permanentes.

(16) **Table 451.6.2.9-2 Acceptable Pipeline Repair Methods for Dents, Buckles, Ripples, Wrinkles, Leaking Couplings, and Defective Prior Repairs**

Type of Defect	Repair Methods					
	1	2	4a	4b	5	6
	Replace as Cylinder	Removal by Grinding	Reinforcing-Type Full Encirclement Sleeve (Type A)	Pressure- Containing Full Encirclement Sleeve (Type B)	Composite Sleeve	Mechanical Bolt-On Clamps
Dents ≤ 6% of the diameter of the pipe containing seam or girth weld	Yes [Note (1)]	No	Limited [Note (2)]	Yes	Limited [Note (2)]	Yes
Dents ≤ 6% of the diameter of the pipe containing gouge, groove, or crack	Yes [Note (1)]	Limited [Note (4)]	Limited [Notes (2), (3)]	Yes	Limited [Notes (2), (3)]	Yes
Dents ≤ 6% of the diameter of the pipe containing external corrosion with depth exceeding 1 2 ¹ / ₂ % of wall thickness	Yes [Note (1)]	No	Limited [Note (2)]	Yes	Limited [Note (2)]	Yes
Dent exceeding 6% of the diameter of pipe	Yes [Note (1)]	No	Limited [Note (2)]	Yes	Limited [Notes (2), (3)]	Yes
Buckles, ripples, or wrinkles	Yes [Note (1)]	No	Limited [Note (2)]	Yes	No	Yes
Leaking coupling	Yes [Note (1)]	No	No	Yes	No	Yes
Defective sleeve from prior repair	Yes [Note (1)]	No	No	Yes	No	Yes

Figura A.2: Reparaciones permanentes.

Anexo B

Análisis de sensibilidad - Mallado

Sensibilidad Flange (f)

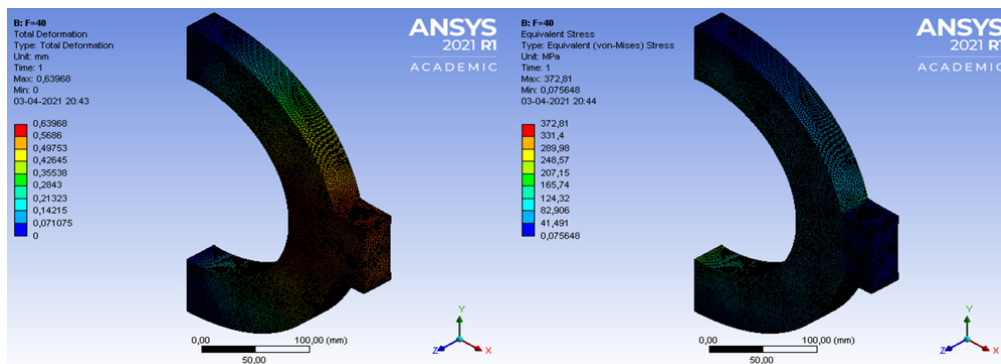


Figura B.1: Caso de análisis S=65, F=40, ancho=35.

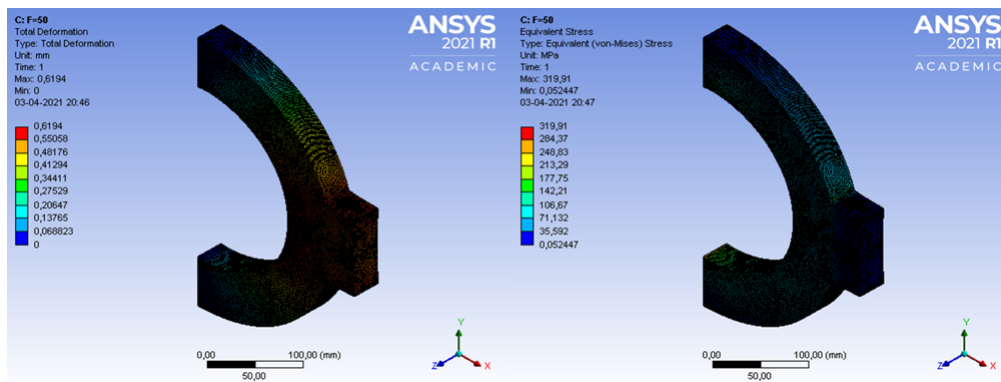


Figura B.2: Caso de análisis S=65, F=50, ancho=35.

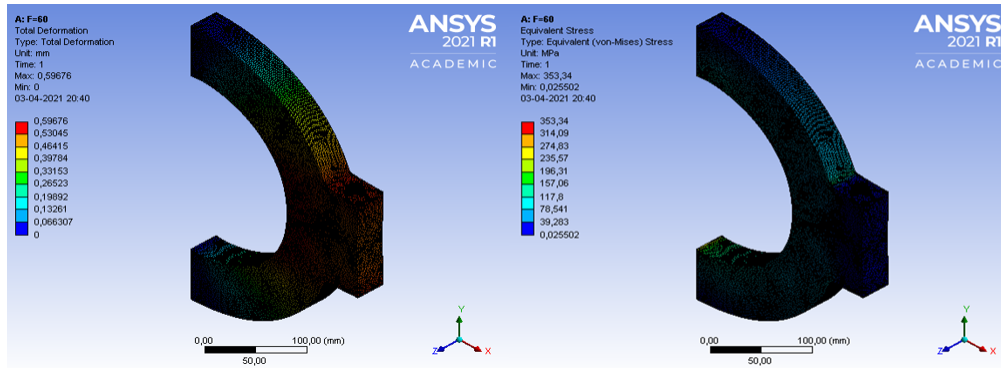


Figura B.3: Caso de análisis S=65, F=60, ancho=35.

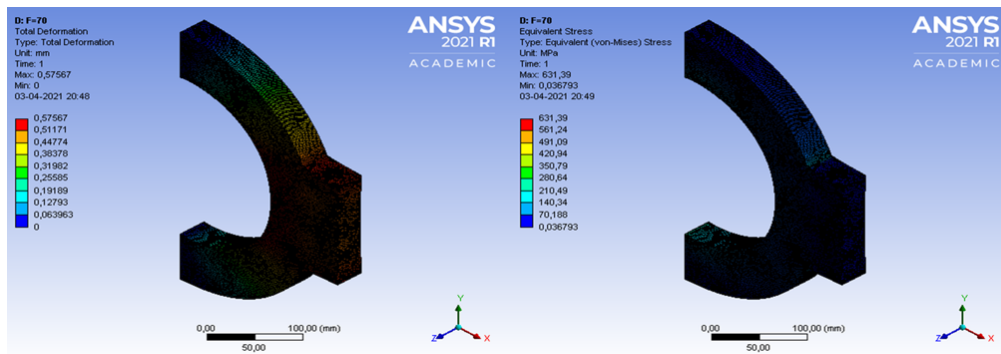


Figura B.4: S=65, F=70, ancho=35.

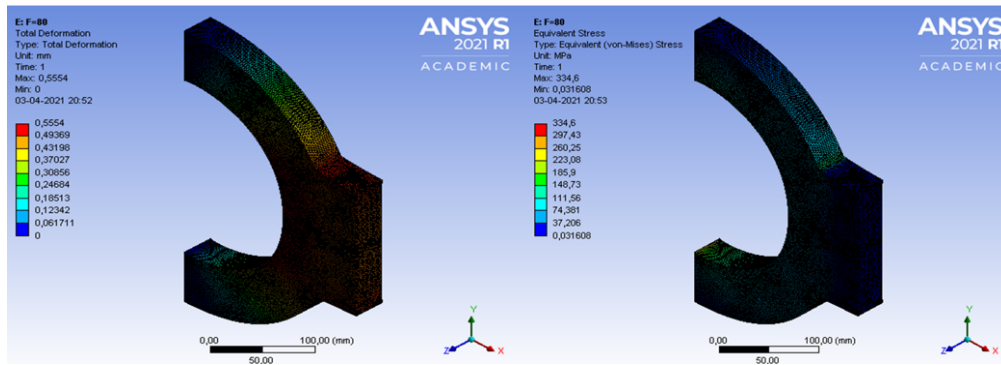


Figura B.5: Caso de análisis S=65, F=80, ancho=35.

Sensibilidad Espesor abrazadera (S)

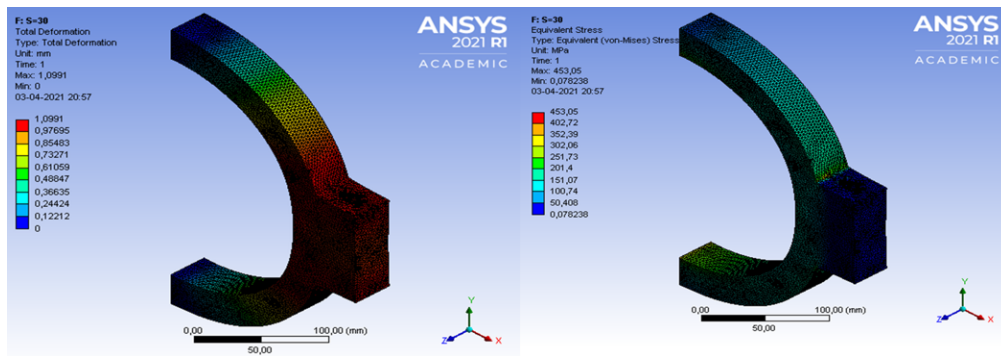


Figura B.6: Caso de análisis S30, $F/S=1,5$, $F=45$, ancho=35.

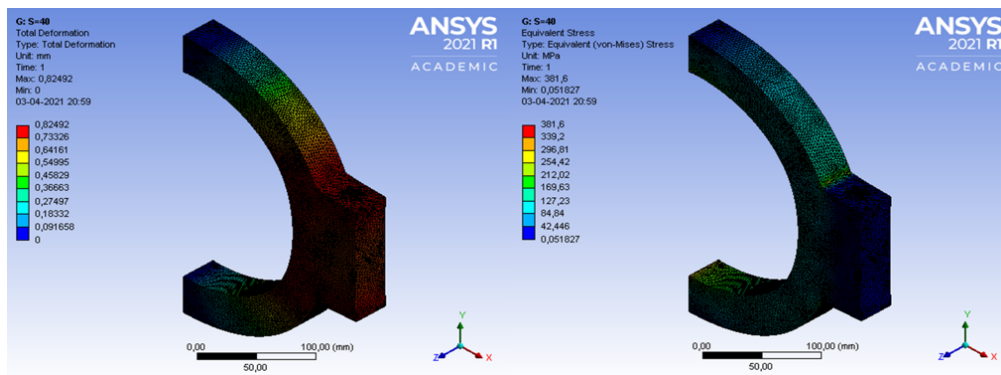


Figura B.7: Caso de análisis S40, $F/S=1,5$, $F=60$, ancho=35.

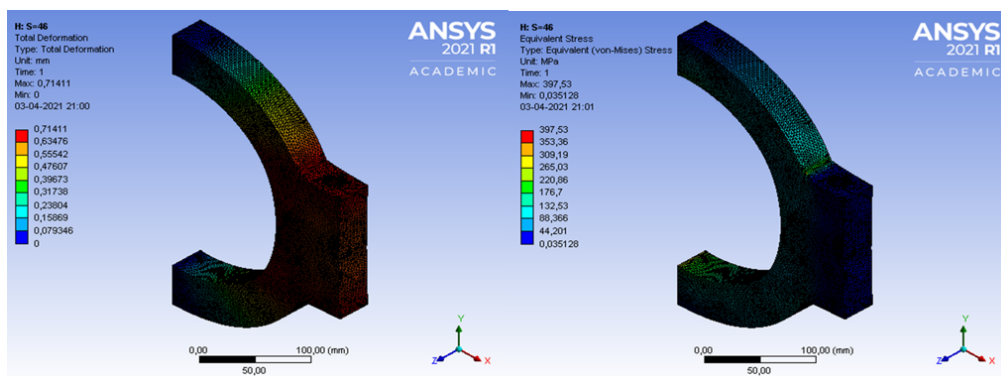


Figura B.8: Caso de análisis S46, $F/S=1,5$, $F=70$, ancho=35.

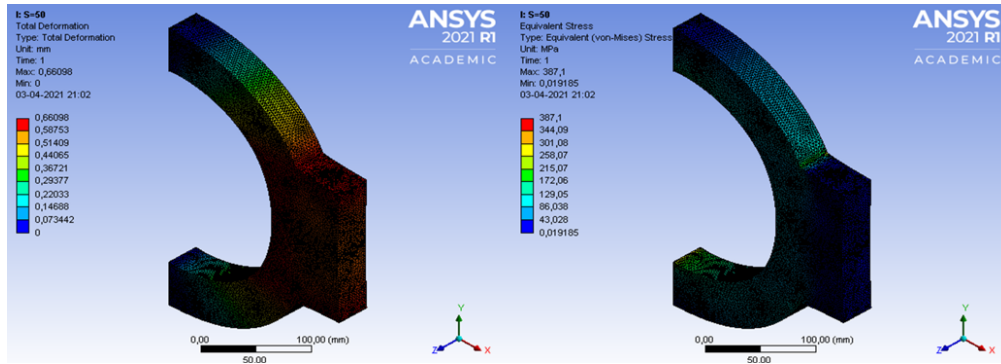


Figura B.9: Caso de análisis S50, $F/S=1,5$, $F=75$, ancho=35.

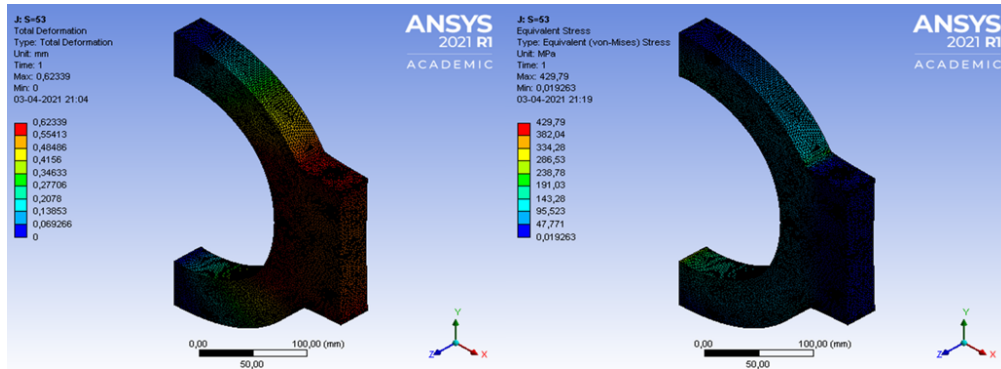


Figura B.10: Caso de análisis S53, $F/S=1,5$, $F=80$, ancho=35.

Sensibilidad distancia Pernos (z)

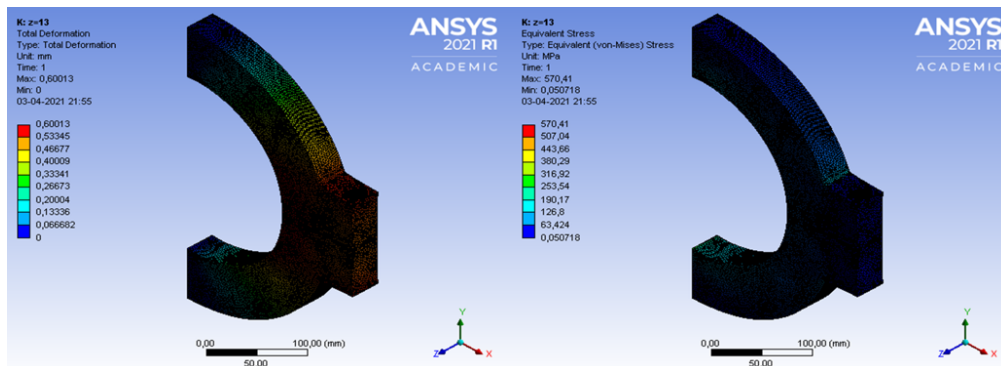


Figura B.11: Caso de análisis $S=65$, $F=60$, $z=13$, ancho=35.

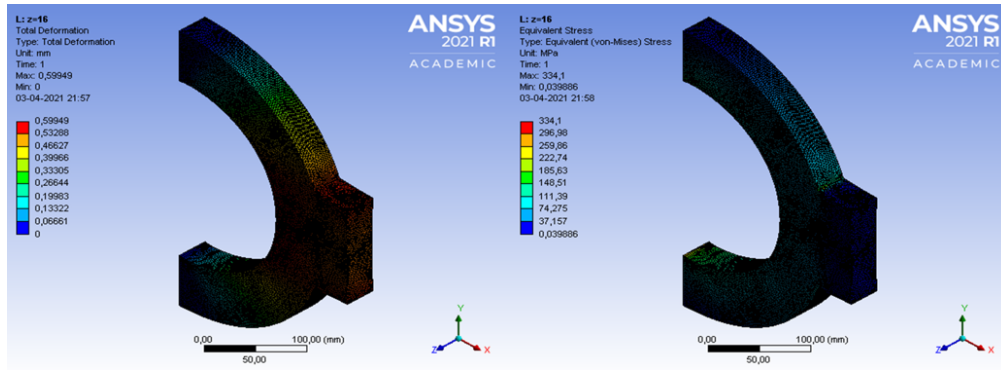


Figura B.12: Caso de análisis S=65, F=60, z=16, ancho=35.

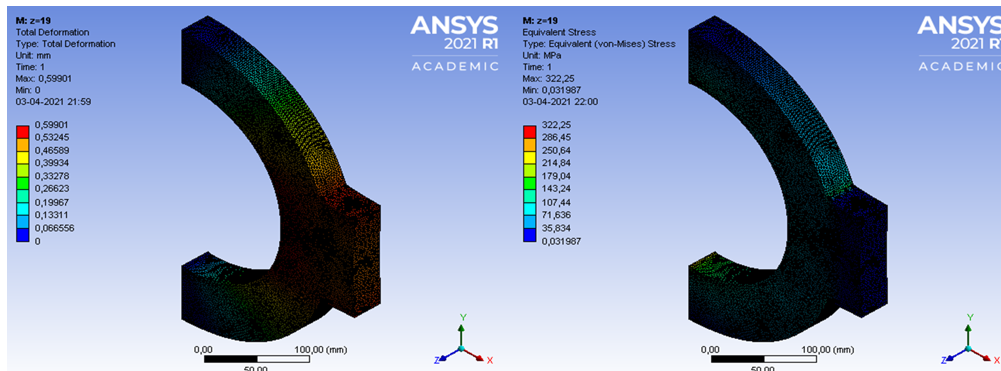


Figura B.13: Caso análisis S=65, F=60, z=19, ancho=35.

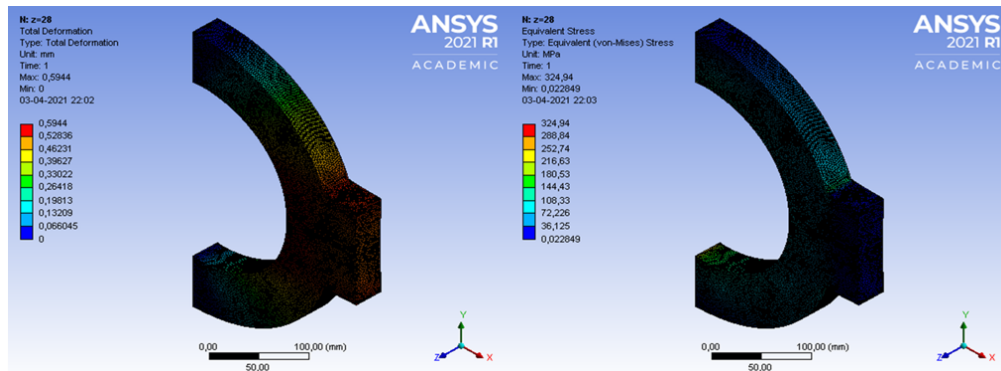


Figura B.14: Caso de análisis S=65, F=60, z=28, ancho=35.

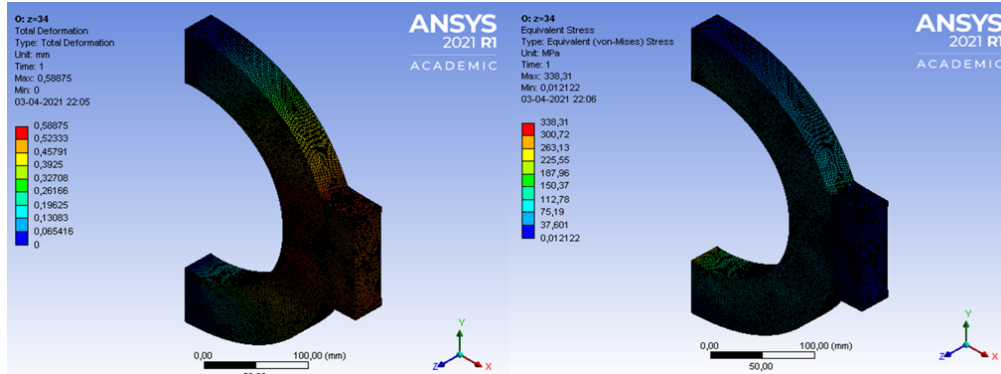


Figura B.15: Caso de análisis S=65, F=60, z=34, ancho=35.