



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Modelación y análisis FEM de la unión soldada entre la sección 1 y sección 2 de un descortezador de madera

POR

Pablo Andrés Inostroza Jarpa

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánica

Profesores Guía:
Emilio Dufeu Delarze
Cristian Canales Cárdenas

Diciembre 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Pablo Andrés Inostroza Jarpa

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Esta memoria de título va dedicada a toda la gente que me apoyó durante todos los años de la carrera, en especial a mi familia, quienes siempre me motivaron para seguir adelante y lograr todas mis metas.

A mi mamá por estar conmigo en los momentos difíciles, demostrarme que nada es tan terrible y que todas las cosas tienen una solución, además de ser un ejemplo de superación. A mi hermana que espero esto le sirva como motivación durante la enseñanza media para que estudie lo que más le guste.

Agradecer al equipo de Andritz quienes me dieron la oportunidad de realizar este proyecto con ellos y tener la mejor disposición ante mis dudas.

También una dedicatoria especial a Macarena que durante este camino fue un pilar súper importante gracias a su motivación y apoyo cuando más lo necesitaba.

Finalmente, pero no menos importante, quiero dedicarme esto a mi como mérito al esfuerzo y a las ganas que siempre tuve al momento de estudiar esta carrera.

Resumen

El presente proyecto analiza mediante el método de elementos finitos (FEM), la resistencia de una unión soldada entre las secciones 1 y 2 que conforman la virola de un descortezador de tambor utilizado en la industria celulosa. Este equipo es el fundamental en el proceso de preparación de la madera para obtener pulpa celulosa. Debido al principio de funcionamiento del equipo, las paredes de la virola están sometidas a los impactos de los troncos, provocando una carga sobre las paredes de estas al momento del impacto.

La metodología incluyó la creación de un modelo 3D del tambor descortezador utilizando el software Autodesk Inventor. Posteriormente se definieron las condiciones de borde del sistema para ser incorporadas a la simulación mediante elementos finitos en el software ANSYS. Las condiciones de borde aplicadas corresponden a la presión ejercida por los troncos en distintas condiciones de operación y además, el torque generado por el sistema motriz, con el objetivo de determinar los esfuerzos en el cordón de soldadura. Además, se evaluó la vida a la fatiga, considerando la presencia de una ranura que simula una pequeña fisura en el cordón interior de la unión soldada.

Para la evaluación de los resultados de la simulación estática estructural, se utilizó el criterio de falla de Von Mises. En ambas simulaciones, el esfuerzo máximo se presentó en el cordón interior de la unión soldada. En la simulación con un 75% de carga el esfuerzo máximo obtenido fue 21,19 [Mpa], mientras que en la simulación con un 50% de carga se alcanzó un esfuerzo máximo de 19,8[Mpa]. Ambos valores se encuentran por debajo del límite elástico del material de la soldadura AWS A5.20 E71T-1, por lo cual, en base a los resultados obtenidos, se descarta una posible falla bajo este criterio.

El análisis de fatiga permitió evaluar la influencia de la ranura en el cordón de soldadura. Los resultados de la simulación entregaron que, para el caso de la vida útil del material, este podría soportar una cantidad infinita de ciclos de carga, con un factor de seguridad a la fatiga de 8,97. En base a los resultados, se puede descartar que el cordón falle por fatiga bajo las condiciones de cargas utilizadas en las simulaciones.

Se analizó la deformación equivalente de la virola, donde se identificaron deformaciones máximas de $7,88 \cdot 10^{-5}$ [mm/mm] considerándose bastante pequeñas para la dimensión de esta, por lo cual se descarta que la deformación de la virola tenga una influencia directa sobre la unión soldada.

Dentro de los resultados obtenidos en la simulación de la unión soldada, se obtuvo información valiosa de la concentración de esfuerzos sobre las paredes del descortezador, donde se identificaron esfuerzos de 43 [Mpa] en las ranuras por donde la corteza salen del equipo, considerando que el límite elástico del material de la virola es menor que el de la unión soldada, podrían fallar primero la ranuras que el cordón, por lo cual, sería de gran importancia realizar un análisis enfocado en las paredes de la virola, considerando la carga de los troncos como fuerzas de impacto en vez de una presión distribuida.

Palabras clave: Descortezador de tambor, Unión soldada, Elementos finitos (FEM), Esfuerzos, Fatiga, Deformación

Abstract

This project analyzes by means of the finite element method (FEM), the strength of a welded joint between sections 1 and 2 that make up the ferrule of a drum debarker used in the cellulose industry. This equipment is fundamental in the process of wood preparation to obtain cellulose pulp. Due to the principle of operation of the equipment, the walls of the shell are subjected to the impacts of the logs, causing a load on the walls of these at the time of impact.

The methodology included the creation of a 3D model of the drum debarking using Autodesk Inventor software. Subsequently, the boundary conditions of the system were defined to be incorporated into the simulation using finite elements in ANSYS software. The boundary conditions applied correspond to the pressure exerted by the logs under different operating conditions and in addition, the torque generated by the drive system, in order to determine the stresses in the weld seam. In addition, the fatigue life was evaluated, considering the presence of a groove that simulates a small crack in the inner seam of the welded joint.

For the evaluation of the static structural simulation results, the Von Mises failure criterion was used. In the simulation with 75% load the maximum stress obtained was 21.19 [Mpa], while in the simulation with 50% load a maximum stress of 19.8 [Mpa] was reached. Both values are below the elastic limit of the AWS A5.20 E71T-1 weld material, so, based on the results obtained, a possible failure under this criterion is ruled out.

The fatigue analysis allowed to evaluate the influence of the groove in the weld bead. The results of the simulation showed that, for the case of material life, the material could withstand an infinite number of load cycles, with a fatigue safety factor of 8.97. Based on the results, fatigue failure of the bead under the loading conditions used in the simulations can be ruled out.

The equivalent deformation of the ferrule was analyzed, where maximum deformations of $7,88 \cdot 10^{-5}$ [mm/mm] were identified, being considered quite small for the dimension of the ferrule, so it is ruled out that the deformation of the ferrule has a direct influence on the welded joint. On the other hand, from the simulation of the welded joint, valuable information was obtained on the stress concentration on the debarker walls, where stresses of 43 [Mpa] were identified in the grooves where the bark exits the equipment, considering that the elastic limit of the ferrule material is lower than that of the welded joint, it would be of great importance to perform an analysis focused on the walls of the ferrule, considering the load of the logs as impact forces instead of a distributed pressure.

Glosario

AWS	: American Welding Society
FCAW	: Fluxed Cored Arc Welding Metal Arc Welding
SMAW	: Shielded Metal Arc Welding
GMAW	: Gas Metal Arc Welding
ASTM	: American Society for Testing and Materials

Nomenclatura

D_e	: Diámetro externo virola
D_i	: Diámetro interno virola
A_f	: Área sección virola
ρ_{pinus}	: Densidad pinus radiata
W	: Carga distribuida
P	: Presión
T	: Momento torsor
M	: Momento flector
G	: Módulo de elasticidad
J	: Momento polar de inercia
σ	: Esfuerzo
σ_{eq}	: Esfuerzo equivalente de Von Mises
σ_Y	: Esfuerzo de fluencia
S_{rup}	: Esfuerzo de ruptura
F_c	: Factor de compactación de troncos
S'_e	: Límite de resistencia a la fatiga
K_a	: Factor de corrección superficial
K_b	: Factor de corrección tamaño
K_c	: Factor de corrección carga
K_d	: Factor de corrección temperatura
K_e	: Factor de corrección confiabilidad
S_e	: Límite de resistencia a la fatiga modificado

Tabla de Contenidos

Agradecimientos.....	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Tabla de Contenidos.....	v
Lista de figuras	vii
Lista de tablas.....	3
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	4
1.1 Contexto.....	4
1.2 Descripción del problema.....	5
1.3 Objetivo general	5
1.4 Objetivos específicos.....	5
1.5 Consideraciones de diseño o hipótesis	5
1.6 Metodología.....	5
2 Capítulo 2: Marco teórico	7
2.1 Celulosa	7
2.2 Proceso Kraft	7
2.3 Descortezador de tambor	8
2.3.1 Descripción y funcionamiento del equipo	9
2.3.2 Especificaciones técnicas del equipo.....	10
2.4 Soldadura	10
2.4.1 Definición de soldadura.....	10
2.4.2 Tipo de unión soldada.....	10
2.4.3 Proceso de soldadura	11
2.4.4 Análisis de esfuerzos en soldadura a tope	12
2.4.5 Criterios de falla	14
2.5 Fatiga	14
2.6 Factores de corrección del límite de resistencia a la fatiga	15
3 Capítulo 3: Desarrollo de la metodología	17
3.1 Estimación de la carga generada por los troncos.....	17
3.2 Cálculo de presión ejercida por los troncos sobre cara interior del tambor descortezador	19

3.3 Estimación del momento aplicado a la estructura por el sistema corona-piñón.....	20
3.4 Determinación de curva S-N del material de aporte AWS A5.20 E71T-1.....	21
3.5 Cálculo de factores de corrección del límite de fatiga del material de soldadura	22
3.6 Antecedentes del problema.....	23
3.7 Geometría del sistema	23
3.8 Geometría de la soldadura	25
3.9 Geometría de la ranura para análisis de fatiga.....	26
3.10 Materiales	27
3.10.1 Propiedades físicas y mecánicas del acero S235JR.....	27
3.10.2 Propiedades del cordón de soldadura AWS A5.20 E71T-1	27
3.11 Condiciones de borde	28
3.11.1 Condiciones de borde para simulación a un 50% de carga	28
3.11.2 Condiciones de borde para simulación a un 75% de carga	29
3.11.3 Condiciones de borde para simulación de vida a la fatiga de la soldadura	30
3.12 Discretización de la geometría	31
3.9.1 Especificaciones del mallado.....	31
4 Capítulo 4: Resultados	35
4.1 Deformación de la virola del descortezador	35
4.2 Análisis de esfuerzos en cordones de soldadura en condiciones de carga al 50%	35
4.3 Análisis de esfuerzos en condiciones de carga al 75%	37
4.4 Convergencia de resultados	38
4.5 Esfuerzos equivalentes de Von Mises en virola del descortezador	40
4.5 Análisis de fatiga en cordón de soldadura con ranura	41
4.4.1 Análisis de vida y daño.....	42
4.4.2 Factor de seguridad.....	42
5 Capítulo 5: Conclusiones	44
6 Bibliografía.....	46

Lista de figuras

Figura 1: Diagrama del proceso Kraft.....	8
Figura 2: Descortezador de tambor	9
Figura 3: Ubicación de lifters al interior del descortezador	9
Figura 4: Tipos de uniones soldadas	10
Figura 5: Unión a tope en secciones del descortezador	11
Figura 6: Proceso físico en la soldadura FCAW	11
Figura 7: Soldadura a tope sometida a una carga axial	12
Figura 8: Barra sometida a torsión pura	13
Figura 9: Curva S-N acero UNS G41300 [10]	15
Figura 10: Porcentaje de llenado del tambor descortezador	17
Figura 11: Representación de factor de compactación entre los troncos	18
Figura 12: Plano de plancha sección 1 descortezador [Andritz]	19
Figura 13: Curva S-N acero ASTM E572 Grado 50	22
Figura 14: Plancha metálica media sección [Elaboración propia]	24
Figura 15: Sección 1 descortezador [Elaboración propia]	24
Figura 16: Ensamble descortezador de madera [Elaboración propia]	25
Figura 17: Plano de soldadura [Andritz]	25
Figura 18: Modelo 3D de soldadura a tope [Elaboración propia]	26
Figura 19: Dimensiones de la ranura: a) profundidad y b) ancho	26
Figura 20: Condiciones de borde de simulación 50% de carga	28
Figura 21: Condiciones de borde de simulación 75% de carga	29
Figura 22: Condiciones de borde para simulación de fatiga	30
Figura 23: Parámetros utilizados para análisis de fatiga	30
Figura 24: Parámetros globales de mallado	31
Figura 25: Mallado general de secciones	32
Figura 26: Mallado local de cordón de soldadura	32
Figura 27: Mallado local en ranura	33
Figura 28: Calidad de los elementos de mallado	33
Figura 29: Verificación de calidad del mallado en cordón de soldadura	34
Figura 30: Parámetro de calidad de mallado aspect ratio	34
Figura 31: Deformación equivalente de la virola del descortezador	35
Figura 32: Esfuerzo equivalente de Von Mises cordón exterior	36
Figura 33: Esfuerzo equivalente de Von Mises cordón interior	36
Figura 34: Esfuerzo equivalente de Von Mises cordón exterior	37
Figura 35: Esfuerzo equivalente de Von Mises cordón interior	38
Figura 36: Convergencia de resultados simulación al 50% de carga	39
Figura 37: Convergencia de resultados simulación al 75% de carga	39
Figura 38: Esfuerzos equivalentes: a) virola del descortezador b) ranuras de la virola	41
Figura 39: Esfuerzos en la ranura: a) Von Mises b) Alternantes máximos	41
Figura 40: Resultado de vida a la fatiga	42

Figura 41: Resultado daño por fatiga 42

Figura 42: Factor de seguridad a la fatiga 43

Lista de tablas

Tabla 1: Especificaciones técnicas	10
Tabla 2: Presiones obtenidas según el nivel de llenado de troncos.....	20
Tabla 3: Comparación propiedades mecánicas entre AWS A5.20 E71T-1 y ASTM A572 Gr 50....	21
Tabla 4: Factores de corrección del límite de fatiga	22
Tabla 5: Composición química del acero	27
Tabla 6: Propiedades físicas y mecánicas del acero S235JR	27
Tabla 7: Composición química E71T-1	27
Tabla 8: Propiedades mecánicas E71T-1	28
Tabla 9: Esfuerzos obtenidos según el tamaño de malla para condición de llenado del 50%	38
Tabla 10: Esfuerzos obtenidos según el tamaño de malla para condición de llenado del 75%	38
Tabla 11: Error relativo de los resultados según el tamaño del mallado.....	40

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

Para el proceso de elaboración de pulpa celulosa, todo inicia con el descortezado y triturado de la madera. Los sistemas y estrategias de descortezado se utilizan para aumentar el valor de la biomasa leñosa separando la madera y la corteza en dos flujos de valor añadido. Se han utilizado varios métodos de descortezado para eliminar la corteza de la madera. La selección de un método de descortezado suele basarse en el tipo de madera y su uso final. [1]

Debido a la gran cantidad de materia prima que demanda una planta celulosa, el proceso de descortezado de troncos debe ser lo más eficiente posible, por lo cual, este proceso se realiza mediante tambores rotatorios, cilindros dentro de los cuales los troncos se golpean contra las paredes o contra otros troncos, y como consecuencia del impacto se desprende la corteza. [2]

El descortezador de tambor o *drum debarker* es un equipo perteneciente al sector de madera dentro de la industria celulosa y se encarga de separar la corteza del tronco, en este caso del pino. El equipo se compone por un tambor de 35 metros de longitud y 5.585 metros de diámetro. Este cuenta con ranuras a lo largo de toda su extensión que permiten la expulsión de la corteza fuera de este y, además, en las caras interiores cuenta con prismas en dirección axial que sirven para levantar y descortezar mejor los troncos durante la rotación. [3]. El tambor esta soportado por dos estaciones compuestas por dos polines y un anillo fijo al manto que permite que este rote debido al accionamiento de un sistema motriz.

Debido al funcionamiento del equipo, considerando que los troncos impactan continuamente sobre las paredes internas del tambor, y sumado a posibles piedras que ingresan en conjunto con los troncos, las superficies se van desgastando con el tiempo, por lo cual, es necesario el reemplazo de la sección desgastada por una nueva. La instalación de esta sección perteneciente a la entrada del descortezador involucra uniones mediante soldadura entre la nueva sección y la siguiente del equipo.

Debido a lo anterior, el proyecto contempla realizar un estudio de la soldadura entre las secciones 1 y 2 del descortezador mediante el método de elementos finitos con la ayuda del software ANSYS. Debido a que, la simulación mediante el método de elementos finitos del estado tensional de las uniones soldadas sometidas a cargas externas contempla todos los elementos presentes en las mismas, como excentricidad de la carga, distribución no uniforme de las deformaciones a lo largo de la unión y concentración de tensiones en el cordón, por lo que constituye una valiosa herramienta para validar las expresiones de cálculo [4].

1.2 Descripción del problema

Debido al cambio de la sección 1 del descortezador de pino de la planta Arauco Nueva Aldea, se necesita hacer un análisis de la soldadura entre la unión de la nueva sección del descortezador y la conexión con la sección antigua, con el fin de poder determinar, como se ve influenciada la soldadura por el proceso de descortezado y, además, producto de la propia estructura del descortezador. De esta forma poder descartar una posible falla del equipo debido al cambio de la sección.

1.3 Objetivo general

Determinar mediante un análisis de elementos finitos (FEM) del equipo, como se ve afectada la soldadura entre la nueva sección instalada y la sección antigua del equipo.

1.4 Objetivos específicos

- Realizar diseño 3D del equipo con ayuda de software de modelación.
- Definir detalladamente las condiciones de borde del Sistema
- Analizar mediante elementos finitos la unión soldada de la sección 1 del descortezador
- Analizar la deformación del descortezador y como está afecta sobre soldadura
- Determinar la resistencia a la fatiga de la soldadura

1.5 Consideraciones de diseño o hipótesis

Condición de diseño 1: Se considerará para el análisis FEM que el espesor de la sección 1 será el mismo que el espesor de la sección antigua a la cual estará soldado.

Condición de diseño 2: La fuerza de impacto que generan los troncos sobre la superficie del tambor será considerada como una fuerza equivalente que se ejerce sobre una sección del tambor.

Condición de diseño 3: El momento torsor que es aplicado sobre la estructura, se considerara como el máximo que puede generar el motor eléctrico del sistema motriz.

1.6 Metodología

Para abordar todos los objetivos del proyecto, se tiene la siguiente metodología de trabajo.

En un principio, se recopilará toda la información referente al descortezador de madera, como lo son planos de diseño del equipo, planos de instalación y datos operacionales. Se realizará un modelo 3D en software Autodesk INVENTOR y la asignación del material a cada una de las piezas del equipo, para el modelo se considerarán los componentes involucrados en el proceso de descortezado.

Previo al análisis FEM de la sección del descortezador, se determinarán las condiciones de borde del sistema considerando las propiedades del material de la soldadura, las restricciones, condiciones de cargas y condiciones de contorno. El modelo se importará al software ANSYS donde se realizará un análisis FEM enfocado en el cordón de soldadura perteneciente a la unión entre la sección 1 y sección 2 del descortezador.

Con la pieza importada en el software primero se realizará un análisis estático estructural del equipo para determinar la deformación longitudinal del descortezador y analizar cómo se ve afectada la unión soldada producto de la flexión y torsión del tambor descortezador.

Para la simulación del impacto de los troncos, se realizará una suposición para aproximar los troncos como una masa equivalente y se calculará como una fuerza equivalente que es ejercida sobre la superficie del tambor.

Para el estudio de la vida a la fatiga de la soldadura, se realizará una modificación en la geometría de uno de los cordones de soldadura, con el fin de simular una posible fisura o pérdida de material, provocando una zona de concentración de esfuerzo, para definir los parámetros de la simulación de fatiga, será necesario determinar la curva S-N del material de la soldadura, buscando un acero equivalente con propiedades similares al material de la soldadura.

Finalmente se analizarán los resultados obtenidos de la simulación y en base a lo obtenido, se propondrán mejoras o alternativas para la unión soldada.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Celulosa

La celulosa o fibra es el elemento constitutivo de la madera. Desde el punto de vista químico, la celulosa es un polímero natural por unidades de glucosa. Las fibras se encuentran en la madera unidas entre sí por un compuesto químico complejo llamado lignina [5]. Este compuesto proporciona la rigidez estructural y actúa como unión entre las fibras de la madera, por lo cual, el proceso de obtención de celulosa consiste en separar la lignina de las fibras, esto se logra mediante procesos químicos o mecánicos.

Como se mencionó anteriormente, existen 2 procesos para la obtención de la pulpa celulosa, en el pulpaje mecánico se utiliza la fuerza mecánica para separar las fibras de la celulosa obteniéndose un producto final que posee un alto nivel de lignina y una baja resistencia del papel. El propósito del pulpaje químico es utilizar químicos y calor para remover la lignina que une las fibras para que las astillas se desfibren fácilmente.

Dentro del pulpaje químico, el proceso Kraft es el procedimiento más utilizado ya que permite obtener una pulpa de alta resistencia y permite utilizar cualquier tipo de madera como materia prima.

2.2 Proceso Kraft

El proceso Kraft consta de 6 etapas para la producción de pulpa celulosa.

Preparación de la madera: Es la primera etapa del proceso, aquí se selecciona la materia prima, la cual se encuentra almacenada en el patio de madera. Los troncos son lavados previamente al proceso de descortezado y posteriormente son triturados buscando obtener astillas lo más homogéneas posibles.

Cocción: En esta parte del proceso, las astillas ingresan al digestor donde se utilizan químicos y calor para separar la lignina de las fibras de la madera. El proceso utiliza una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S), la función del hidróxido de sodio es degradar la lignina y el sulfuro de sodio se encarga de acelerar las reacciones de cocción y, además, se comporta como un agente que contribuye a disminuir la degradación de la celulosa a causa del hidróxido de sodio. La temperatura de proceso se encuentra entre los 150 y 170°C.

Lavado: En esta etapa las sustancias disueltas son separadas de la pulpa, este proceso se realiza posterior a la cocción y previo a la deslignificación con oxígeno, el objetivo de esta etapa del proceso es limpiar la pulpa y recuperar el licor residual del proceso de cocción. Mientras más limpia se encuentre la pulpa, menor son los recursos utilizados en los siguientes procesos.

Deslignificación con oxígeno: Es el proceso en el cual se remueve parte de la lignina residual utilizando oxígeno y álcali, esta etapa es crucial tanto por razones económicas como ambientales.

En esta etapa el oxígeno reacciona con la lignina y con los carbohidratos. El oxígeno es reducido a agua al reaccionar con los componentes orgánicos y estos son oxidados. A pesar de que el oxígeno es un oxidante débil, su poder de oxidación se puede aumentar incrementando la temperatura y creando un ambiente alcalino.

Blanqueo: Esta etapa continua con la deslignificación de la pulpa, mediante químicos de blanqueo. A pesar de que anteriormente la pulpa pasa por procesos de deslignificación, sigue quedando lignina residual del proceso de cocción. Aquí se utilizan químicos más selectivos que en los procesos anteriores, con el fin de afectar lo mínimo posible el rendimiento o propiedades de la pulpa. Estos químicos rompen la lignina residual en pequeñas partes solubles en agua o álcali.

Secado: Esta etapa finaliza el proceso, aquí la pulpa es secada y preparada para su uso en la fabricación del papel u otros productos de celulosa. Es importante que el secado sea controlado ya que este debilita las propiedades de resistencia de la pulpa, mientras más alta sea la temperatura de secado, mayor es la pérdida de la resistencia de rotura por tensión, por lo cual, para el secado de la pulpa se utilizan las temperaturas más bajas posibles.

A continuación, en la figura 1 se muestra un diagrama del proceso Kraft.

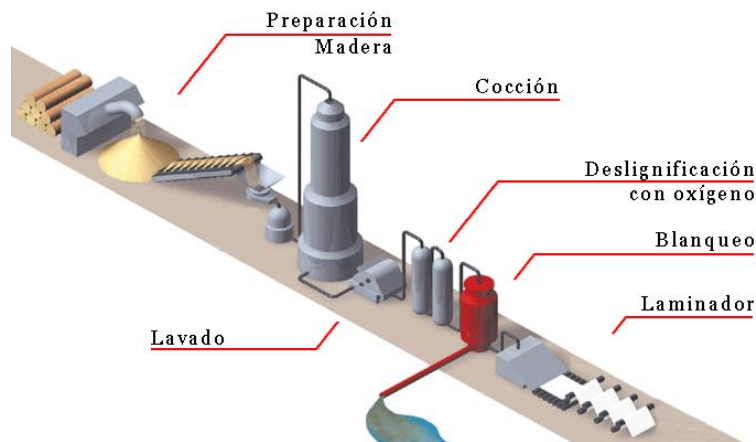


Figura 1: Diagrama del proceso Kraft

2.3 Descortezador de tambor

Se encuentra en la primera etapa de la producción de celulosa, en el área de la preparación de la madera. Su función es descortezar los troncos de *pinus radiata* los cuales posteriormente serán chipiados para servir de materia prima de la celulosa.

Del proceso de descortezado, se obtienen dos productos, uno para la línea central de producción de pulpa celulosa, que es el tronco sin corteza y otro que se obtiene como residuo del descortezado que sería la corteza, la cual es preparada y utilizada en la caldera de poder como combustible. A continuación, en la figura 2 se muestra un descortezador de madera de tambor.

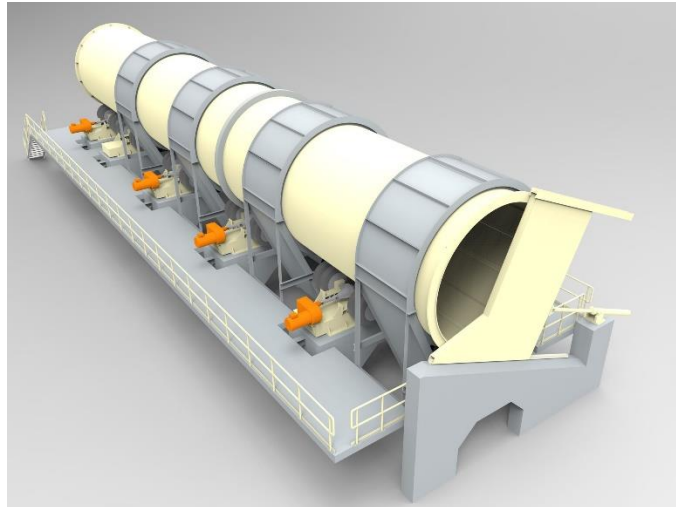


Figura 2: Descortezador de tambor

2.3.1 Descripción y funcionamiento del equipo

El descortezador consiste en un tambor horizontal, donde se introducen los troncos, a todo lo largo de su interior, cuenta con lifters los cuales tienen la función de levantar los troncos favoreciendo la fricción entre ellos. Producto de la rotación del tambor y adicionado al impacto con los lifters, se desprende la corteza del tronco. En la figura 3 se observan los lifters al interior del tambor descortezador.

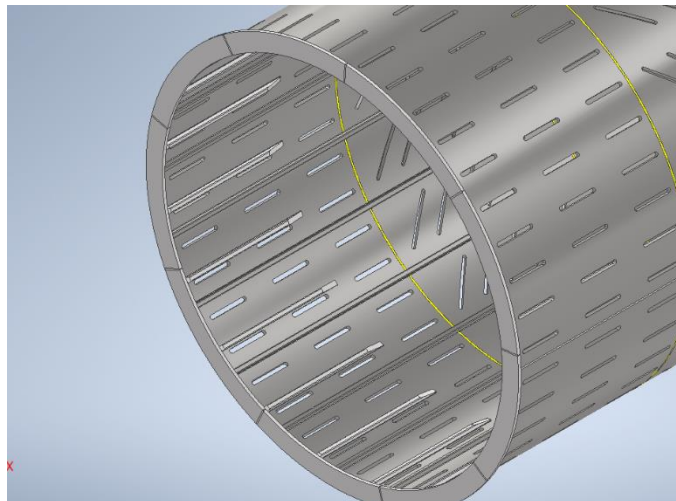


Figura 3: Ubicación de lifters al interior del descortezador

El tambor tiene un movimiento de rotación de 3 a 7 rpm, este cuenta con una inclinación de 1/100 permitiendo el avance de los troncos al interior del tambor en dirección hacia la salida. La eficiencia del descortezado depende del tiempo de residencia de los troncos al interior del tambor es controlado mediante una compuerta ubicada en la salida de este.

2.3.2 Especificaciones técnicas del equipo

A continuación, en la tabla 1, se presentan las especificaciones técnicas del equipo, las cuales serán utilizadas para la construcción del modelo 3D para el estudio.

Tabla 1: Especificaciones técnicas

Longitud del tambor	35 m
Espesor del tambor*	50-45 mm
Diámetro exterior	5585 mm
Ranuras para evacuación de corteza	55 x 650 mm
Lifters interiores	0.06 x 0.06 x 35 m

*El espesor del tambor va disminuyendo desde la sección ubicada en la entrada hacia la salida, en el caso de este estudio, el espesor de la nueva sección es de 50 mm.

2.4 Soldadura

2.4.1 Definición de soldadura

La soldadura constituye una unión fija entre dos o más piezas metálicas, por lo general de igual material, las cuales, por medio de calor entregado a las mismas, y casi siempre a un material adicional de aporte, se funden y se combinan resultando una unión por cohesión en las denominadas soldaduras fuertes y por adhesión en las denominadas soldaduras blandas [6].

2.4.2 Tipo de unión soldada

Estas pueden variar según el diseño de la estructura, agrupándose en cinco tipos de uniones diferentes, las cuales se muestran en la figura 4.

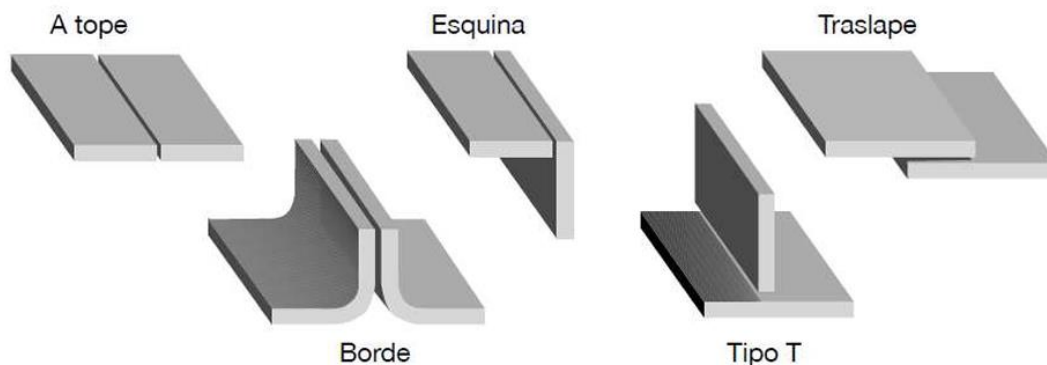


Figura 4: Tipos de uniones soldadas

Unión a tope: Es la unión entre dos piezas en sus extremos que se encuentran alineados aproximadamente en el mismo plano.

Unión en esquina: Es la unión entre dos piezas que forman un ángulo recto entre ambas.

Unión de traslape: Es la unión entre dos piezas, donde una se encuentra superpuesta sobre la otra.

Unión de borde: Junta entre dos bordes de dos o más piezas paralelas.

Unión tipo T: Es la unión entre dos piezas, una de estas se encuentra posicionada transversalmente sobre la otra, formando una T.

Para el caso de este estudio, se tiene una unión a tope entre la sección 1 y la sección 2, tal como se puede observar en la figura 5.

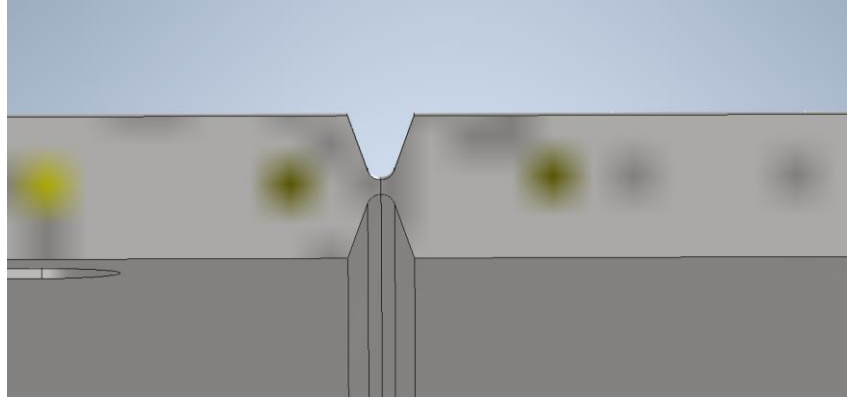


Figura 5: Unión a tope en secciones del descortezador

2.4.3 Proceso de soldadura

El proceso utilizado para la unión de las secciones es la soldadura por alambre con núcleo fundente o alambre tubular, o sus siglas en inglés Flux Core Arc Welding (FCAW).

El proceso FCAW combina la versatilidad del proceso SMAW con la característica de la alimentación continua y de manera semiautomática del alambre solidado de la GMAW. Es un proceso económico y de fácil aplicación, utilizado para soldar una gran diversidad de tipos de juntas, sobre todo de aceros, inoxidable y aleaciones a base níquel [7].

Según lo indicado por Andritz, la sección fue soldada con la variante del proceso FCAW-G que incluye una mezcla de protección gaseosa 80% argón y 20% CO_2 con el fin de proteger el metal fundido del contacto con nitrógeno u oxígeno. En la figura 6, se muestra un esquema del proceso físico en la soldadura en la soldadura FCAW.

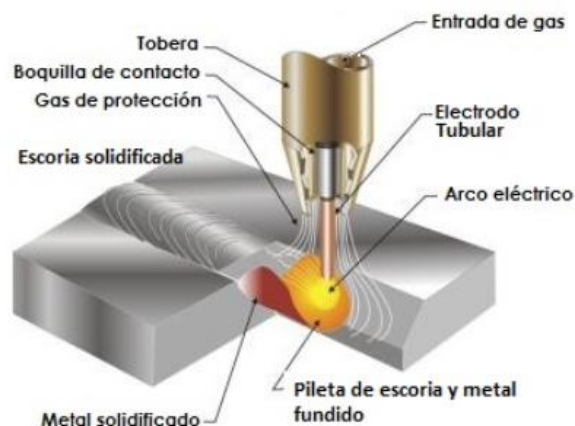


Figura 6: Proceso físico en la soldadura FCAW

2.4.4 Análisis de esfuerzos en soldadura a tope

Los esfuerzos en la soldadura se generan debido a las cargas externas aplicadas a la unión. Estas cargas pueden ser de distintos tipos: tracción, compresión, flexión o cortante. Las cargas son sometidas a la estructura del descortezador, pero estas se transmiten igualmente hacia la soldadura debido a que estas transfieren las fuerzas entre las secciones.

Dependiendo de la carga transmitida sobre la unión soldada, se pueden encontrar esfuerzos de tipo axiales, cortantes y de flexión.

Esfuerzo axial (tracción-compresión)

Si existe una carga axial, como se muestra en la figura 7, el esfuerzo axial se puede calcular como se muestra en la ecuación 1.

$$\sigma_{axial} = \frac{P}{A} = \frac{P}{h \cdot l} \quad (1)$$

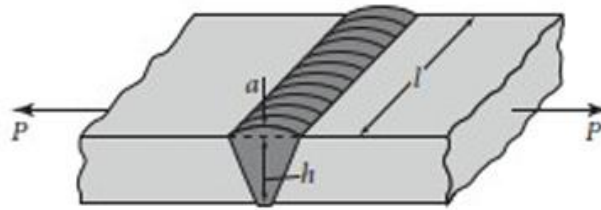


Figura 7: Soldadura a tope sometida a una carga axial

Esfuerzo cortante

Si existe una fuerza de torsión que se aplique sobre el cordón de soldadura, se generan esfuerzos cortantes en este, generando una tendencia a deslizar de las capas unidas por la soldadura, si se fija un extremo de la sección y en el otro extremo se aplica el par torsor, el extremo libre girara un ángulo θ con respecto al extremo fijo, se conoce como ángulo de torsión. Además, una línea longitudinal en la superficie de la barra, tal como la línea nn , girara un pequeño ángulo a la posición nn' , como se muestra en la figura 8.

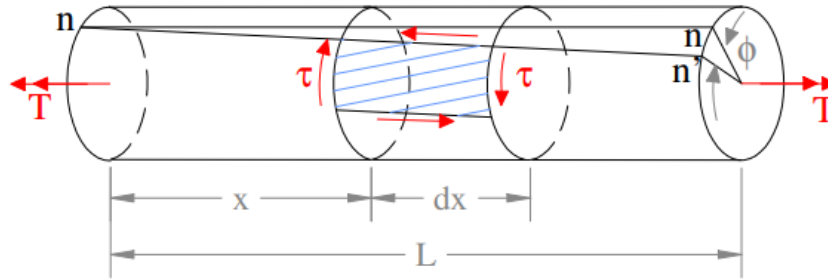


Figura 8: Barra sometida a torsión pura

El ángulo de torsión por unidad de longitud es directamente proporcional al momento torsionante T e inversamente proporcional al producto entre GJ , conocido como la rigidez torsional total, tal como se muestra en la ecuación 2.

$$\theta = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} \quad (2)$$

Donde el ángulo de torsión θ se mide en radianes. Utilizando las unidades del sistema internacional, el momento torsionante T se debe expresar en Newton metros (Nm), la longitud L en metros (m), el módulo de elasticidad G en pascales (Pa) y el momento polar de inercia J en metros a la cuarta potencia (m^4)

El esfuerzo cortante máximo para una sección tubular hueca se puede obtener con la ecuación 3.

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot r}{J} \quad (3)$$

Donde el momento polar de inercia J esta dado por la ecuación 4.

$$J = \frac{\pi}{32} (d_e^4 - d_i^4) \quad (4)$$

Donde d_e corresponde al diámetro exterior de la sección tubular hueca y d_i al diámetro interior de la sección tubular hueca.

Esfuerzos de flexión

Cuando la unión soldada se encuentra sometida a una fuerza perpendicular a esta, se produce un momento flector, este tiende a generar esfuerzos que provocan una deformación del cordón de soldadura. El esfuerzo producido por flexión se puede calcular según se muestra en la ecuación 5.

$$\sigma_f = \frac{M \cdot c}{I} \quad (5)$$

Donde, M corresponde al momento flector, c corresponde a la distancia del cordón de soldadura hasta el centroide y I corresponde al momento de inercia de la sección tubular.

2.4.5 Criterios de falla

Los criterios de falla son utilizados para verificar la seguridad de la soldadura, usualmente se utiliza el criterio de Von Mises o el criterio de Tresca, en este caso como la unión soldada se encuentran presente esfuerzos combinados, el criterio más adecuado para la verificación de los resultados sería el criterio de Von Mises.

Teoría de la energía de distorsión máxima (Von mises)

El fallo ocurre cuando la energía de distorsión total de un volumen unitario es mayor que el valor de energía de distorsión correspondiente a la resistencia a la fluencia del mismo volumen [8], se tiene una expresión general para el esfuerzo equivalente de Von Mises a partir de los tres esfuerzos principales, dado por la ecuación 6.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (6)$$

La condición de falla se da cuando se cumple lo expresado en la ecuación 7.

$$\sigma_{eq} \geq \sigma_y \quad (7)$$

Donde σ_y es el límite elástico o resistencia a la fluencia del material. Por lo tanto, si σ_{eq} es mayor o igual al límite elástico, la soldadura podría fallar por deformación plástica.

2.5 Fatiga

La fatiga es un fenómeno que provoca la degradación de un material debido a cargas cíclicas o cargas alternadas, incluso cuando estas se encuentran considerablemente por debajo de la tensión de rotura o límite elástico del material. Este fenómeno es crítico en componentes que se encuentran sometidos a cargas fluctuantes, como las uniones soldadas, debido a que tienden a presentar concentraciones de esfuerzos por la geometría y la heterogeneidad del material de aporte con el material base.

El análisis de fatiga permite predecir la vida útil de una estructura o en este caso de la soldadura bajo condiciones de carga cíclica, cada ciclo fluctuante va deteriorando la soldadura hasta un punto donde se alcanza un número de ciclos terminado y un esfuerzo alternante que supere el límite de fatiga produciendo el fallo por fatiga.

Según M. Naranjo [9], la vida a la fatiga se puede definir como “el fallo debido a cargas repetitivas que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura”, por lo cual, el análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga conocidas.

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas de fatiga, las muestras se someten a fuerzas repetidas o variables de magnitudes especificadas, mientras se cuentan los ciclos o inversiones del esfuerzo hasta su destrucción [10]. Para esto, se realiza una gran cantidad de ensayos donde al comienzo los esfuerzos a los que se somete la pieza ensayada son cercanos al límite de ruptura del material, registrándose el número de ciclos de carga que soporta la pieza hasta la falla,

luego estos esfuerzos van disminuyendo y, por consiguiente, al disminuir los esfuerzos, el número de ciclos de resistencia aumenta.

La relación de esfuerzo y numero de ciclos son graficados en un diagrama S-N o diagrama de Wohler, donde se representan los parámetros en forma bi-logarítmica, se observa que para aceros la resistencia a la fatiga disminuye a medida que aumenta el número de ciclos, tal como se muestra en la figura 9.

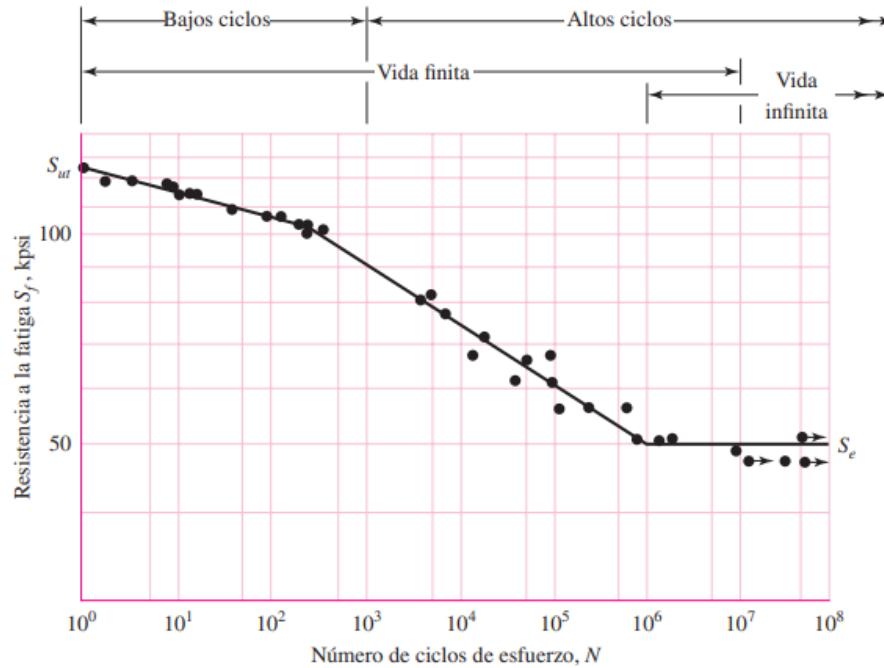


Figura 9: Curva S-N acero UNS G41300 [10]

De la figura anterior, desde 1 a 1000 ciclos, por lo general se clasifica como fatiga de bajos ciclos. En consecuencia, la fatiga de altos ciclos se relaciona con la falla correspondiente a ciclos de esfuerzos mayores que 10^3 , también se hace una distinción entre la región de vida finita y la región de vida infinita, se considera vida infinita del material desde los 10^6 ciclos.

2.6 Factores de corrección del límite de resistencia a la fatiga

Debido a que los valores que se obtienen en los ensayos en laboratorio para determinar los límites de resistencia a la fatiga se encuentran en condiciones muy controladas, los factores de corrección son multiplicadores que se aplican al límite de resistencia a la fatiga, con el fin de reflejar las influencias de factores como la geometría, el tipo de carga, el tratamiento superficial entre otros. La multiplicación de todos estos factores de corrección por el límite de fatiga del material, la ecuación 8 se denomina la ecuación de Marin, mostrada a continuación.

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot S'_e \quad (8)$$

Donde, K_a corresponde al factor de corrección de la condición superficial, K_b al factor del tamaño, K_c al factor de carga, K_d al factor de temperatura y K_e al factor de confiabilidad.

Los factores de corrección obtenidos serán añadidos en el apartado de configuración de fatiga en el software ANSYS.

Capítulo 3: Desarrollo de la metodología

3.1 Estimación de la carga generada por los troncos

Para poder determinar las cargas producidas por los troncos, es necesario realizar una estimación de esta carga durante la operación del equipo. Según los datos operacionales proporcionados por Andritz, los troncos ingresan al descortezador con un largo aproximado entre 2,5-6 metros y un diámetro entre 30-50 cm.

Según las especificaciones técnicas del equipo, el nivel de carga ideal para un descortezador de tambor es de $\frac{3}{4}$ de llenado en la sección de entrada, el cual ira estrechándose de manera natural hasta la compuerta de descarga, para este estudio, se considerará que el nivel de llenado se mantendrá constante a lo largo de toda la extensión del equipo.

La condición de llenado se basa en no permitir que los troncos caigan de un extremo a otro de manera descontrolada, debido a que afectaría en la eficiencia del descortezado, mientras mayor es el porcentaje de llenado, mayor será la presión y fricción entre los troncos, por lo tanto, mayor será la eficiencia del descortezado.

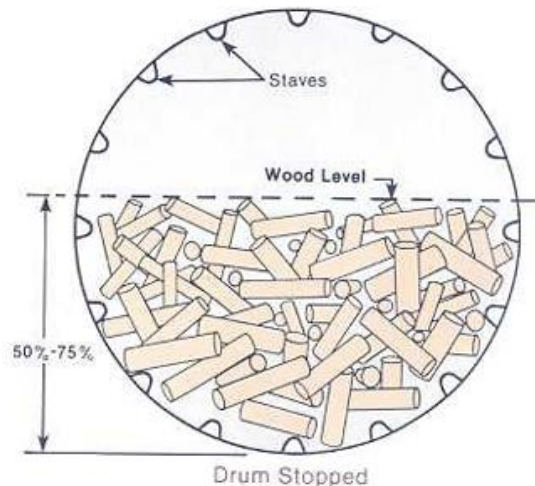


Figura 10: Porcentaje de llenado del tambor descortezador

La figura 10, muestra el nivel de llenado del descortezador, se observa que lo recomendado es entre un 50% a un 75% de llenado, para este estudio se consideraran ambos porcentajes, de esta forma analizar como varían los resultados para un mínimo y máximo de llenado.

Para poder determinar la carga producida por los troncos, considerando que solo ingresan *pinus radiata* al descortezado y, además, que estos no se encuentran perfectamente ordenados al interior del descortezador, es necesario utilizar un factor de compactación el cual indica que tan juntos se encuentran los troncos al interior del tambor, de esta forma se puede obtener el volumen total que está siendo realmente utilizada por los troncos. En la figura 11, se muestra una representación de los troncos apilados al interior del tambor, donde el factor de compactación corresponde al espacio que existe entre estos en una vista radial.

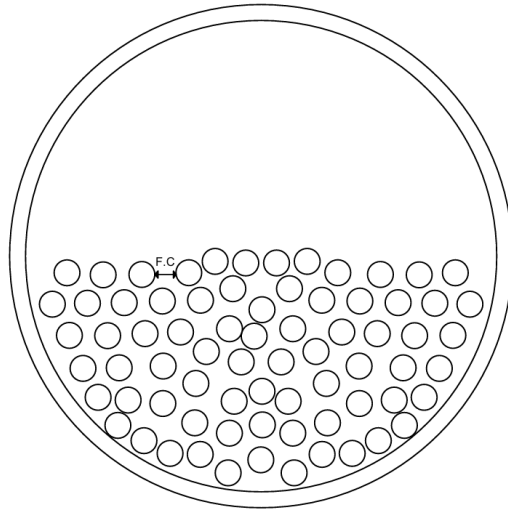


Figura 11: Representación de factor de compactación entre los troncos

Para determinar la carga distribuida al interior del tambor descortezador, es necesario determinar el área de la sección de entrada del descortezador. Para esto se tiene la siguiente ecuación 9.

$$A_f = \pi \cdot r^2 \quad (9)$$

Donde, A_f es el área del descortezador y r corresponde al radio de la sección, donde $r = 2,7425$ m, por lo tanto, se tiene que.

$$A_f = 23,63 \text{ m}^2$$

Como se mencionó anteriormente, la carga será determinada para 2 casos distintos, para el caso 1 cuando el porcentaje de llenado es de 50% y para el caso 2 cuando el porcentaje de llenado es de un 75%. Ambos casos siguen el mismo procedimiento mostrado a continuación.

Caso 1. Porcentaje de llenado de 50%

Considerando un factor de compactación de los troncos ($F_c = 0,55$) y la densidad de los troncos de *pinus radiata* de $\rho_{pinus} = 448 \text{ kg/m}^3$, el área del descortezador abarcada por los troncos se obtiene mediante la ecuación 10.

$$A_{50} = A_f \cdot F_c \cdot \%llenado \quad (10)$$

$$A_{50} = 6,5 \text{ m}^2$$

Finalmente, multiplicando el área obtenida para un llenado del 50% del tambor por la densidad de los troncos, se obtiene la distribución de cargas generada por los troncos en el interior del descortezador, tal como se muestra en la ecuación 11.

$$W_{t50} = A_{50} \cdot \rho_{pinus} \quad (11)$$

$$W_{t50} = 2911,2 \text{ kg/m}$$

Caso 1. Porcentaje de llenado de 75%

Para este caso, se considera el mismo factor de compactación anterior y la densidad del pinus radita

$$A_{75} = A_f \cdot F_c \cdot \%_{\text{llenado}}$$

$$A_{75} = 9,75 \text{ m}^2$$

Finalmente, multiplicando el área obtenida para un llenado del 50% del tambor por la densidad de los troncos, se obtiene la distribución de cargas generada por los troncos en el interior del descortezador.

$$W_{t75} = A_{75} \cdot \rho_{\text{pinus}}$$

$$W_{t75} = 4366,8 \text{ kg/m}$$

3.2 Cálculo de presión ejercida por los troncos sobre cara interior del tambor descortezador

Las cargas distribuidas obtenidas en el punto 3.1, para los casos de llenado de 50% y 75% son aplicadas sobre la estructura como presión ejercida sobre las caras inferiores de la sección 1 y sección 2, para poder obtener la presión generada por cada uno de los casos de llenado, se considera el área de la plancha metálica que conforma el semi círculo de cada sección.

A continuación, en la figura 12, se muestra el plano correspondiente a la plancha de la sección 1, estas dimensiones son las mismas para la sección 2.

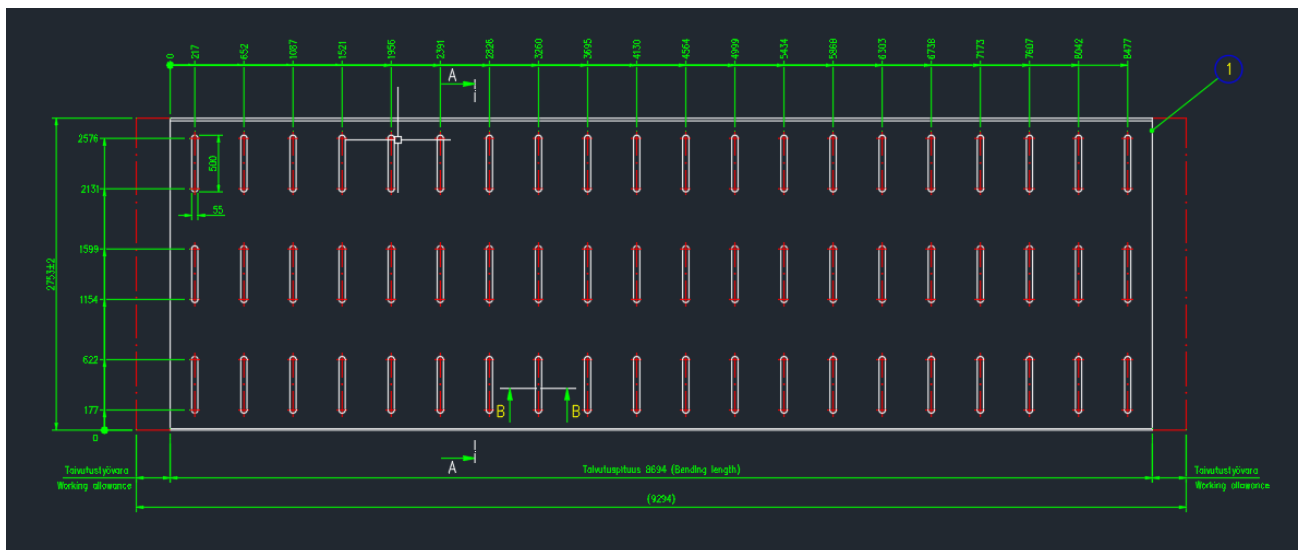


Figura 12: Plano de plancha sección 1 descortezador [Andritz]

De acuerdo con la figura anterior, la plancha tiene una dimensiones de 2,750x8,694 m por lo cual se tiene un área de 23,83 m².

La presión sobre la cara está dada por la ecuación 12.

$$P = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (12)$$

Donde F corresponde a la fuerza ejercida sobre la superficie y A corresponde al área efectiva donde se aplica la presión.

Por lo cual considerando la distribución de cargas obtenidas para cada nivel de llenado y el largo donde se aplican estas cargas, se tiene los resultados mostrados en la tabla 2.

Tabla 2: Presiones obtenidas según el nivel de llenado de troncos

Nivel de llenado (%)	Distribución de cargas (N/m)	L=5.5 metros (N)	Presión ($\frac{N}{m^2}$)
50	28558,2	157073	6974
75	42838,3	235610	9852

3.3 Estimación del momento aplicado a la estructura por el sistema corona-piñón

El principio operacional del descortezador es su rotación, lo anterior sumado al impacto entre los troncos y lifters al interior del tambor, generan el descortezado de los troncos.

Para que toda la estructura rote, es necesario un sistema motriz que transfiera un torque o momento hacia la estructura produciendo su rotación. Este torque se asume que es transferido uniformemente sobre toda la estructura debido a que no existen grandes cambios en la sección transversal del tambor, solo existe en cambio de espesor de 5 mm desde la sección 4 hasta las sección 13, por lo cual, considerando que el diámetro del tambor es de 5,585 m, el cambio de espesor es despreciable.

Para producir el par de torsión para que la estructura rote, se tiene un motor eléctrico con una potencia nominal de 450 [kW] a 1500 rpm, por lo cual según la ecuación 13, se determina el torque transmitido.

$$T_{motor} = \frac{9550 \cdot 450}{1500} = 2865 Nm \quad (13)$$

El motor se encuentra conectado a un reductor de velocidad, el cual se encarga de reducir la velocidad y aumentar el torque, considerando que el reductor reduce la velocidad de giro de 1500 rpm a 7 rpm, se tiene la siguiente relación. Tal como se muestra en la ecuación 14.

$$T_{reductor} = T_{motor} \cdot \frac{1500}{7} = 613928 Nm \quad (14)$$

Se asume que el torque en la salida del reductor es transmitido en un 100% al piñón, por lo cual, el torque que produce la corona y es transmitido a la estructura, está dado por la relación de dientes entre la corona y el piñón. Considerando 240 dientes que posee la corona y 21 dientes que posee el piñón, se tiene la siguiente relación mostrada en la ecuación 15.

$$T_{corona} = T_{reductor} \cdot \frac{240}{21} = 7003452 Nm \quad (15)$$

Cabe mencionar que el torque obtenido al utilizar la potencia nominal del motor corresponde al máximo que puede ser transferido a la estructura.

3.4 Determinación de curva S-N del material de aporte AWS A5.20 E71T-1

Debido a la complejidad de encontrar algún ensayo de fatiga realizado a la soldadura y la obtención experimental de la curva S-N del material de aporte no se encuentra dentro de los alcances del proyecto, por lo cual, se seleccionó un acero equivalente que tenga propiedades mecánicas similares a la soldadura.

Se selecciono el acero ASTM A572 Grado 50 como acero equivalente al material de la soldadura, tomando en cuenta su resistencia a la tracción, ductilidad y comportamiento frente a la fatiga. En la tabla 3, se muestra una comparación entre las propiedades mecánicas de la soldadura y el acero equivalente

Tabla 3: Comparación propiedades mecánicas entre AWS A5.20 E71T-1 y ASTM A572 Gr 50

Propiedades mecánicas	AWS A5.20 E71T-1	ASTM A572 Gr 50
Limite elástico (Mpa)	390	345
Resistencia a la tracción (Mpa)	490	450
Ductilidad (%)	22	21

De la tabla anterior, se observa que tanto el límite elástico como la resistencia a la tracción del ASTM A572 Gr 50 se encuentran levemente por debajo de las propiedades del material de la soldadura, lo cual será tomado en cuenta al momento de analizar los resultados obtenidos, es decir, podría existir un porcentaje de error si el material llegara a fallar por fatiga. A su vez, si los resultados indican que el material posee vida infinita, es decir, resiste sobre 10^6 ciclos de carga, este resultado se puede extrapolar y ser considerado valido como vida a la fatiga de la soldadura, ya que, se entiende que, si acero equivalente que tiene propiedades inferiores al material de soldadura, posee vida infinita, la soldadura también la tendrá.

Como se muestra en la figura 13, la curva S-N del acero ASTM E572 Grado 50 se obtuvo desde el software GRANTA Edupack, donde se extrajeron los datos para el caso más desfavorable.

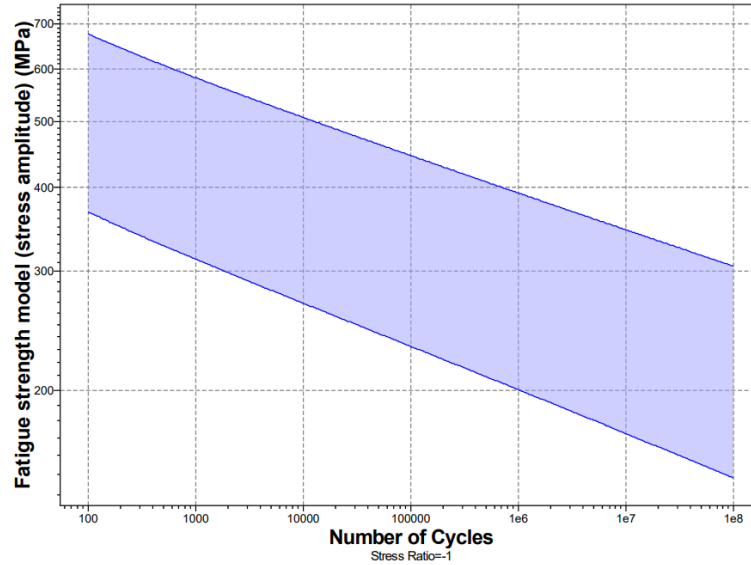


Figura 13: Curva S-N acero ASTM E572 Grado 50

3.5 Cálculo de factores de corrección del límite de fatiga del material de soldadura

Según lo escrito en el marco teórico, se determinaron los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga del cordón, con el fin de utilizar este valor en la sección de configuración de fatiga en ANSYS. y a la vez, poder obtener un resultado teórico el cual será comparado posteriormente con el resultado obtenido en la simulación.

Por lo tanto, según la ecuación de Marin se tiene:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e$$

Considerando $S'_e = 0,5 \cdot S_{rup}$, con un esfuerzo de ruptura del material de 450 Mpa, se tiene que $S'_e = 225$ Mpa. Para los factores de corrección, los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Factores de corrección del límite de fatiga

Factores de corrección	Valores
K_a	0,83
K_b	0,85
K_c	1
K_d	1
K_e	0,897
K_f	1

En base a los factores de corrección definidos en la tabla 3, en la configuración de fatiga de ANSYS se utilizará 0,6328 como el factor de corrección del límite de fatiga.

Al existir una muesca o ranura en el cordón de soldadura, el límite de resistencia a la fatiga disminuirá en comparación a una geometría sin la ranura, para este caso, ANSYS interpreta el cambio de sección

en la geometría del cordón, lo por lo cual no es necesario determinar el factor de concentración de esfuerzos.

3.6 Antecedentes del problema

Durante el proceso de descortezado, los troncos impactan entre sí y contra las paredes del tambor. Aunque los troncos son más blandos que el acero, con el tiempo causan desgaste en la superficie. Además, la presencia de piedras dentro del descortezador acelera este proceso, contribuyendo a un mayor desgaste de las paredes.

Debido a lo anterior, cuando el espesor de las paredes disminuye al menos un 50% su espesor inicial, estas son reemplazadas, con el fin de evitar posibles fisuras de la carcasa. Se tiene planeado realizar el cambio de la sección 1 del descortezador, correspondiente a la sección de entrada de los troncos, por lo cual es necesario unir esta sección nueva al resto del tambor, las cuales debido al desgaste poseen un espesor distinto que la nueva sección.

Para unir la nueva sección se tiene considerado utilizar una soldadura AWS A5.20 E71T-1 debido a sus elevadas propiedades mecánicas y resistencia a los impactos, factor determinante debido a las condiciones de operación del equipo.

Este estudio busca determinar la resistencia de la soldadura comparando los resultados obtenidos al simular las condiciones de operación del equipo con los límites propios del material, para esto, se realizarán dos análisis. El primero será un análisis estático del sistema, donde se considerarán las fuerzas transmitidas por el sistema motriz y los troncos como carga distribuida sobre las secciones 1 y 2, con el fin de obtener los esfuerzos que se generen en el cordón de soldadura.

El segundo corresponde a un análisis de fatiga de la soldadura, donde se agregará una ranura al cordón interior, igualmente se aplicará una carga estática con el objetivo de determinar la vida de la soldadura bajo cargas cíclicas.

3.7 Geometría del sistema

Para la geometría, se utilizó el software Autodesk INVENTOR para la creación de las secciones del descortezador, cada sección fue creada siguiendo los planos proporcionados por Andritz considerando las siguientes dimensiones.

El descortezador está conformado por 13 secciones unidas radialmente para formar la estructura cilíndrica, para la creación del manto, la sección 1 se conforma por 2 planchas soldadas a lo ancho, donde para cada una se tiene una chapa metálica de acero 8694 mm x 2750 mm x 50 mm.

Cada plancha posee 60 ranuras horizontales de dimensiones 500 mm x 55 mm, por las cuales la corteza sale del tambor, tal como se puede observar en la figura 14.

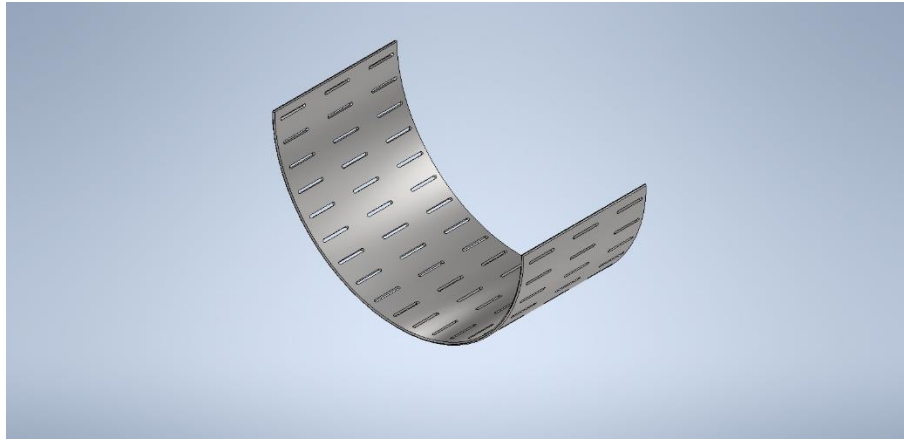


Figura 14: Plancha metálica media sección [Elaboración propia]

Luego, en la herramienta de ensamblaje que proporciona INVENTOR, las planchas son unidas en sus extremos y se genera la sección cilíndrica, como se muestra en la figura 15.

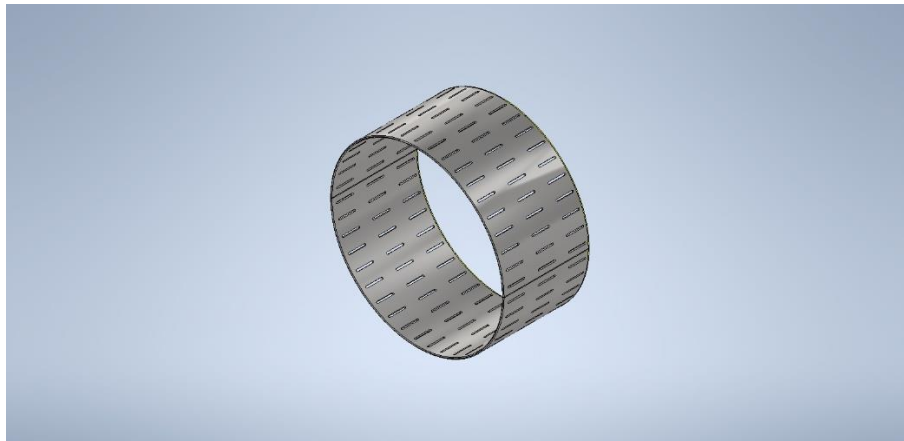


Figura 15: Sección 1 descortezador [Elaboración propia]

Por último, se crean el resto de las secciones faltantes y además se incluyen los anillos de soporte de la estructura que permiten la rotación del equipo, finalmente se ensamblan todas las secciones considerando un desfase de 18° entre cada sección, dando la forma final a la estructura, como se puede observar en la figura 16.

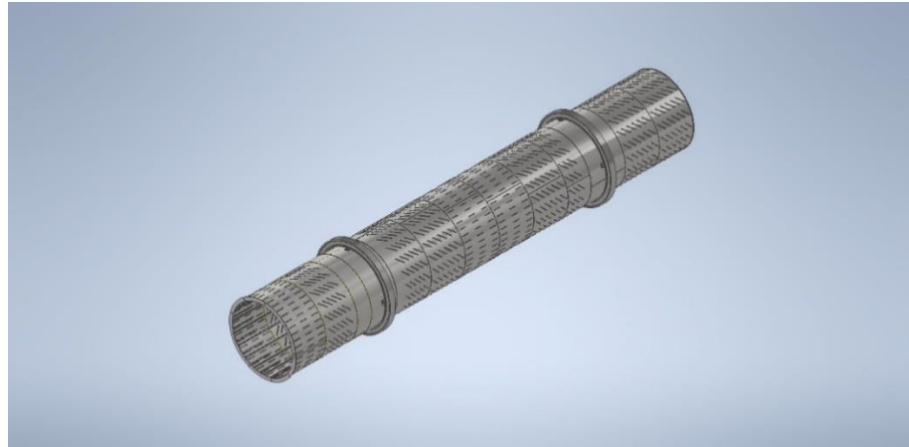


Figura 16: *Ensamble descortezador de madera [Elaboración propia]*

Cabe mencionar, que para este estudio se considerara la sección 1 y sección 2 del descortezador debido a la gran demanda de recursos que significaría realizar el análisis FEM considerando toda la estructura.

3.8 Geometría de la soldadura

Debido a que el análisis por elementos finitos está enfocado en determinar las deformaciones y esfuerzos que se producen en el cordón de soldadura, es necesario la modelación del cordón de manera independiente de las planchas, permitiendo utilizar elementos solidos en la simulación y asignar el material del electrodo, de esta forma se puede aumentar la exactitud de los resultados.

Otra consideración que se tuvo para modelar la soldadura fue crear su geometría siguiendo las especificaciones de los planos proporcionados por Andritz, de esta forma se espera que los resultados de la simulación sean lo más cercano a la realidad.

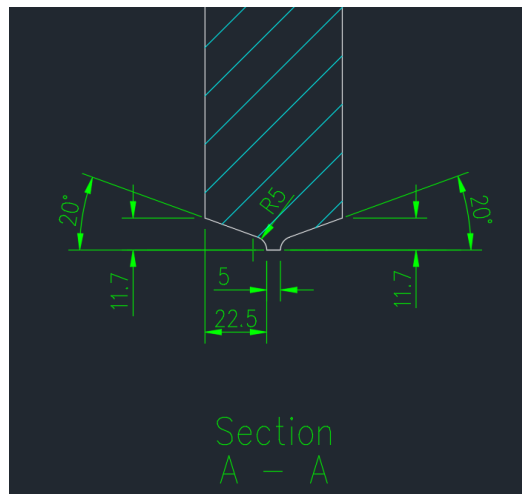


Figura 17: *Plano de soldadura [Andritz]*

De la figura 17, se observa que la unión soldada es de tipo doble U, con una dimensión de 22,5 mm, conformando un ángulo de 60° al unirse con la otra placa.

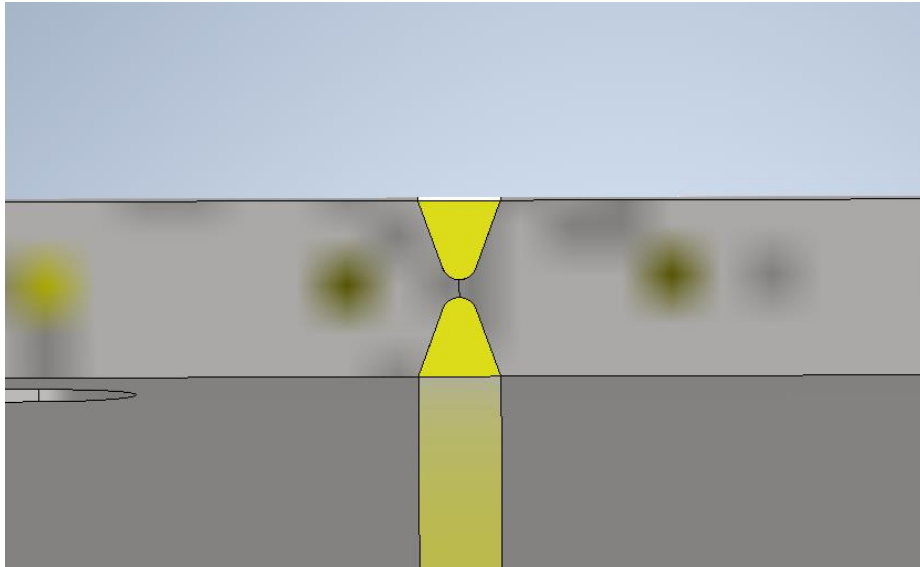


Figura 18: Modelo 3D de soldadura a tope [Elaboración propia]

Para modelar el cordón de soldadura, se consideró que este es continuo a lo largo de todo el perímetro del tambor. En la figura 18, se muestra una vista en corte donde se observan los cordones de soldadura ensamblados a la estructura.

3.9 Geometría de la ranura para análisis de fatiga

Para el análisis de fatiga que se realizara al cordón de soldadura, se agregó una ranura con el fin de predecir la vida del componente a la fatiga en un caso hipotético en presencia de un concentrador de esfuerzos.

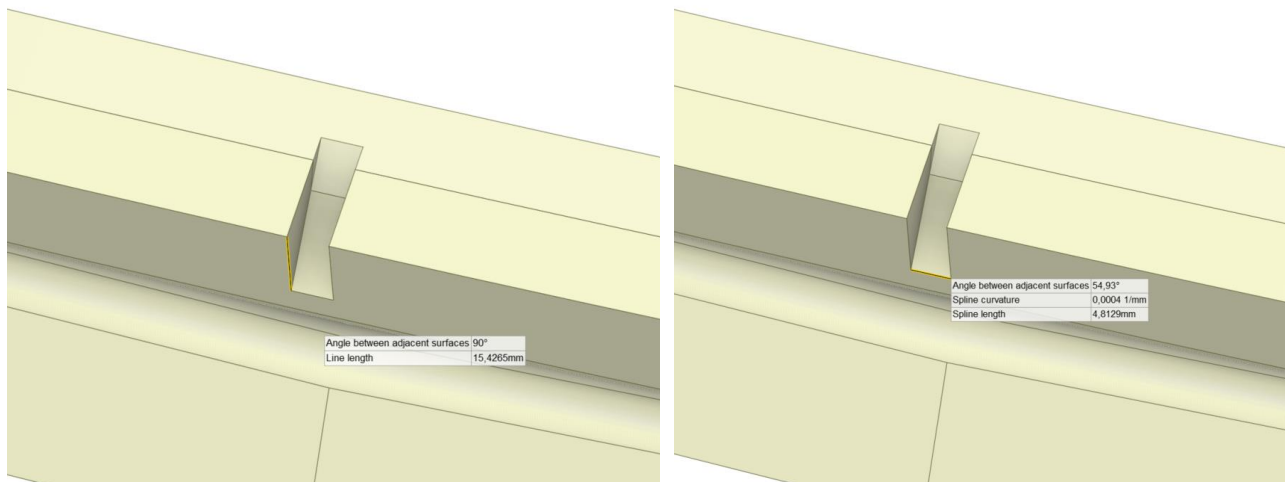


Figura 19: Dimensiones de la ranura: a) profundidad y b) ancho.

Como se puede observar en la figura 19, las dimensiones de la ranura son 15,426 mm de profundidad y 4,813 mm ancho.

3.10 Materiales

3.10.1 Propiedades físicas y mecánicas del acero S235JR

Las secciones del descortezador están conformadas por planchas de acero EN 10025 acero S235JR el cual es un acero estructural no aleado laminado en caliente norma europea. Se destaca por tener una buena plasticidad, tenacidad y soldabilidad.

En las tablas 5 y 6, se muestra la composición química y las propiedades físicas y mecánicas del acero S235JR correspondientemente.

Tabla 5: Composición química del acero

Norma	Grado de acero	C	Si	Mn	P	S	N	Cu
EN 10025-2:2004	S235JR	0,20	-	1,4	0,035	0,035	0,0012	0,55

Tabla 6: Propiedades físicas y mecánicas del acero S235JR

Propiedades mecánicas	S235JR
Densidad del material	7,85 g/cm ³
Punto de fusión	1420-1460°C
Dureza Brinell	120 HBW
Limite elástico	235 Mpa
Módulo de elasticidad	210 Gpa
Resistencia a la tracción	360-510 Mpa
Módulo de Poisson	0,3
% de alargamiento	25

3.10.2 Propiedades del cordón de soldadura AWS A5.20 E71T-1

Para soldar la sección 1 con la sección 2 del descortezador, se utilizó una soldadura AWS A5.20 E71T-1 mediante el método FCAW. El alambre tubular E71T-1 está desarrollado especialmente para soldar aceros al carbono, consiguiendo uniones soldadas de elevadas propiedades mecánicas y alta calidad radiográfica. En las tablas 7 y 8, se muestra la composición química y las propiedades mecánicas del material de aporte.

Tabla 7: Composición química E71T-1

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	V
0,12	1,75	0,9	0,012	0,01	0,35	0,5	0,08

Tabla 8: Propiedades mecánicas AWS 5.20 E71T-1

Propiedades mecánicas	ASME/ AWS A5.20
Resistencia a la tracción	490 Mpa
Limite elástico	390 Mpa
% de alargamiento	22

3.11 Condiciones de borde

Para obtener resultados lo más representativos posible, es necesario definir las restricciones y condiciones de carga que son aplicadas al modelo, de esta forma la simulación se acerca lo más posible al comportamiento físico que experimenta el equipo en operación.

Para este estudio, se tiene tres simulaciones cada una asociadas a condiciones de borde distintas por lo cual estas serán definidas a continuación.

3.11.1 Condiciones de borde para simulación a un 50% de carga

Para esta simulación, donde el tambor descortezador está cargado en un 50% de su capacidad con troncos, se tienen las siguientes condiciones de borde que se muestran en la figura 20.

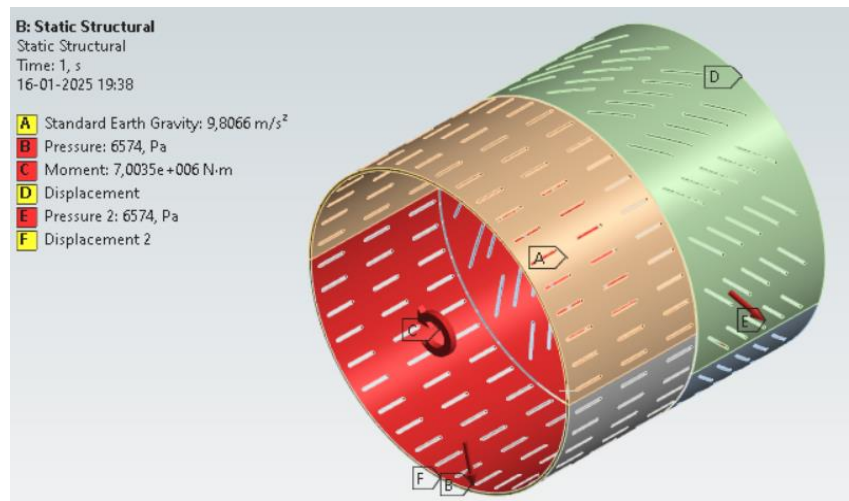


Figura 20: Condiciones de borde de simulación 50% de carga

De acuerdo con la figura anterior, se tienen restricciones de desplazamiento y condiciones de carga aplicadas en las caras interiores del tambor.

Restricción de desplazamiento [D]: Debido a que se están utilizando dos secciones del tambor, se fija el desplazamiento en los 3 ejes coordenados la cara generada por el espesor de la sección 2. En la práctica esta sección se encuentra unida a la sección contigua.

Restricción de desplazamiento [F]: El extremo libre de la sección 1 que no se encuentra soldada es restringido su desplazamiento en el eje Z de esta forma se permite que la estructura solo se deforme en x, y.

Condiciones de carga [B] [E]: Esta condición corresponde a la presión generada por los troncos sobre las caras interiores del tambor, estas fueron calculadas en el punto 3.2, aplicándose una presión de 6574 Pa sobre las caras seleccionadas.

Condición de carga [C]: Corresponde al torque o momento que ejerce el sistema motriz sobre la estructura, se asume que la magnitud se mantiene constante a lo largo de toda la estructura debido a que no hay cambios de espesores, se aplica un momento en la cara libre de la sección 1 con una magnitud de 7.003.453 Nm

Condición de carga [A]: Se aplica la fuerza de gravedad a toda la estructura, de esta forma se considera el peso de las secciones para los resultados de la simulación.

3.11.2 Condiciones de borde para simulación a un 75% de carga

Para esta simulación, donde el tambor descortezador está cargado en un 75% de su capacidad con troncos, se tienen las siguientes condiciones de borde que se muestran en la figura 21.

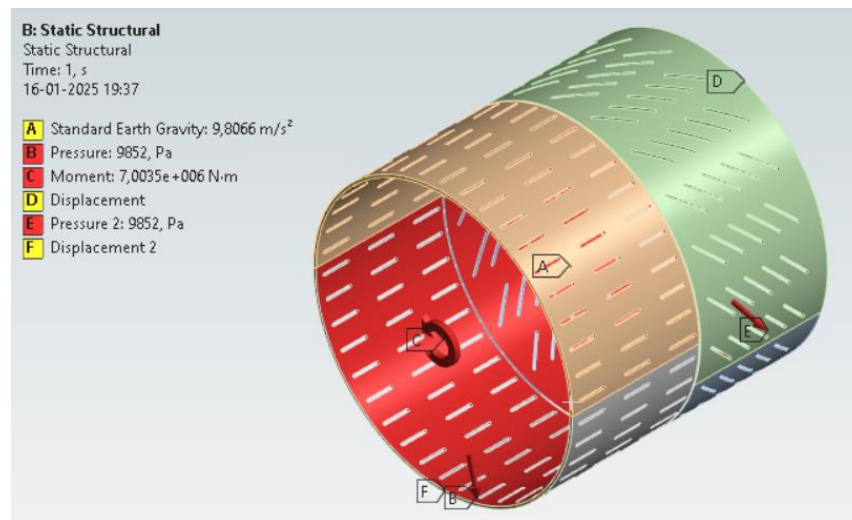


Figura 21: Condiciones de borde de simulación 75% de carga

De acuerdo con la figura anterior, se tienen restricciones de desplazamiento y condiciones de carga aplicadas en las caras interiores del tambor.

Restricción de desplazamiento [D]: Debido a que se están utilizando dos secciones del tambor, se fija el desplazamiento en los 3 ejes coordenados la cara generada por el espesor de la sección 2. En la práctica esta sección se encuentra unida a la sección contigua.

Restricción de desplazamiento [F]: El extremo libre de la sección 1 que no se encuentra soldada es restringido su desplazamiento en el eje Z de esta forma se permite que la estructura solo se deforme en x, y.

Condiciones de carga [B] [E]: Esta condición corresponde a la presión generada por los troncos sobre las caras interiores del tambor, estas fueron calculadas en el punto 3.2, aplicándose una presión de 9862 Pa sobre las caras seleccionadas.

Condición de carga [C]: Corresponde al torque o momento que ejerce el sistema motriz sobre la estructura, se asume que la magnitud se mantiene constante a lo largo de toda la estructura debido a

que no hay cambios de espesores, se aplica un momento en la cara libre de la sección 1 con una magnitud de 7.003.453 Nm

Condición de carga [A]: Se aplica la fuerza de gravedad a toda la estructura, de esta forma se considera el peso de las secciones para los resultados de la simulación.

3.11.3 Condiciones de borde para simulación de vida a la fatiga de la soldadura

Las condiciones de borde utilizadas para la simulación de la vida a la fatiga son las mismas utilizadas en las otras 2 simulaciones anteriores, por lo tanto, las restricciones de desplazamientos y condiciones de carga no varían. En la figura 22, se muestran las condiciones de borde aplicadas al sistema.

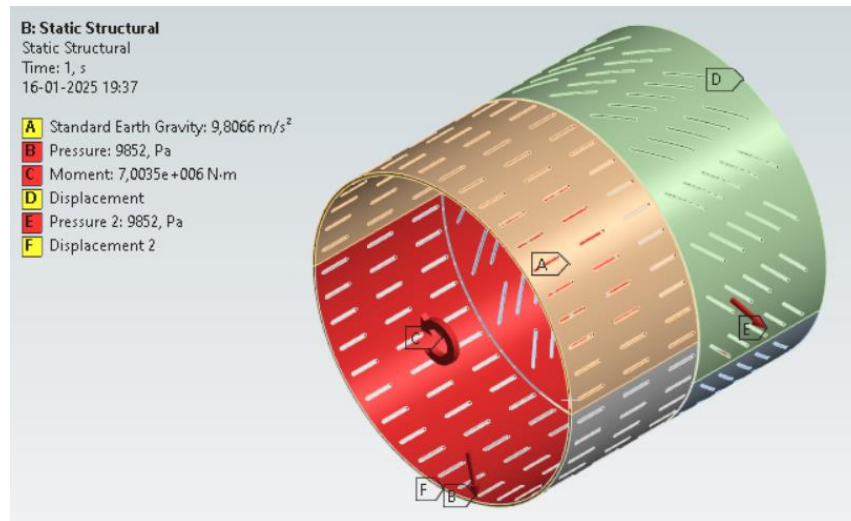


Figura 22: Condiciones de borde para simulación de fatiga

Además, se definen la configuración de fatiga en el apartado de *fatigue Tool* donde se consideran los valores que se muestran en la figura 23.

Details of "Fatigue Tool"	
Domain	
Domain Type	Time
Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	0,63
Loading	
Type	Zero-Based
<input type="checkbox"/> Scale Factor	1,
Definition	
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
Options	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	Goodman
Stress Component	Equivalent (von-Mises)
Life Units	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1, cycles

Figura 23: Parámetros utilizados para análisis de fatiga

Como se observa en la figura 23, se agrega el factor de corrección estimado anteriormente y se considera que las cargas no son completamente reversibles, se define el tipo de carga como *Zero-Based*

considerando que los esfuerzos medios no son nulos, por lo cual se interpreta que las cargas son aplicadas en una sola dirección durante cada ciclo de carga.

3.12 Discretización de la geometría

El mallado de la geometría es la representación discretizada del modelo de estudio. Está conformada por un conjunto de nodos y aristas que unidos forman una superficie, las cuales se van colocando sobre nuestro modelo hasta abarcarlo por completo. La unión de todas estas superficies se denomina malla de superficie [11], estas pueden ser de tipo triangulares, tetraédricas o hexaédricas.

Las fuerzas o desplazamientos aplicados a nuestra geometría serán calculadas en cada nodo de la malla, por lo tanto, mientras más se reduce el tamaño de los elementos, debido al mayor número de nodos, más preciso tienden a ser los resultados. No obstante, llega un punto donde reducir los elementos no mejora la precisión de los resultados, generándose un sobre mallado de la pieza y provocando una mayor demanda computacional.

Otro problema que se presenta si el mallado de la geometría no está bien definido son los problemas de convergencia de los resultados, producidos principalmente por elementos distorsionados o desigualdades de tamaños entre los elementos de una región.

Existen dos tipos de mallas, una estructurada y otra no estructurada. La de tipo estructurada es una ideal para geometrías sencillas y la no estructurada, se utiliza principalmente para geometrías complejas donde el programa automáticamente ajusta la malla utilizando distintos tipos de elementos.

3.9.1 Especificaciones del mallado

Para este análisis se utilizó una malla tetraédrica debido a la capacidad que tienen estos elementos para ajustarse mejor a las zonas curva y complejas, que presenta tanto el cordón y la sección del tambor.

Para las tres simulaciones que se realizarán se utilizarán las mismas condiciones de mallado global y local, como el análisis está enfocado en el cordón de soldadura, primero se realizó un mallado global con tamaño de malla de 120 mm y con la función *adaptive Sizing* desactivada debido a que la malla tendía a refinarse en las ranuras de la virola siendo lugares de no interés para la simulación. En las figuras 24 y 25, se muestran los parámetros utilizados en el programa y el resultado final del mallado de la estructura general.

Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	120, mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,85)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (240, mm)

Figura 24: Parámetros globales de mallado

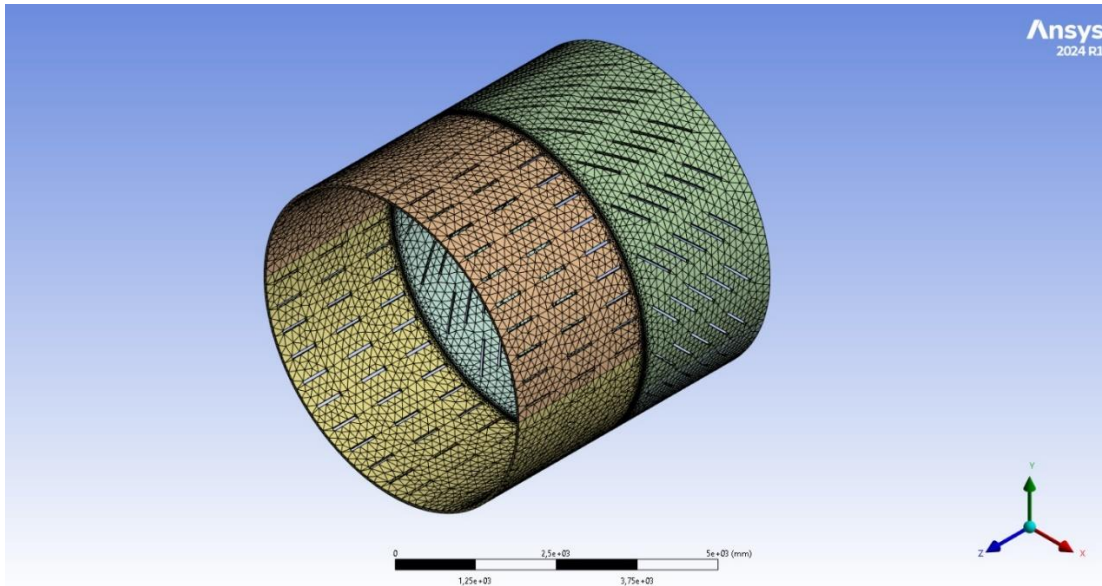


Figura 25: Mallado general de secciones

En el cordón de soldadura es donde se espera obtener una alta concentración de esfuerzos y deformaciones, por lo tanto, es necesario refinar localmente el mallado tanto para el cordón como en la vecindad correspondiente a la sección, esto con el fin de evitar problemas de convergencia de los resultados.

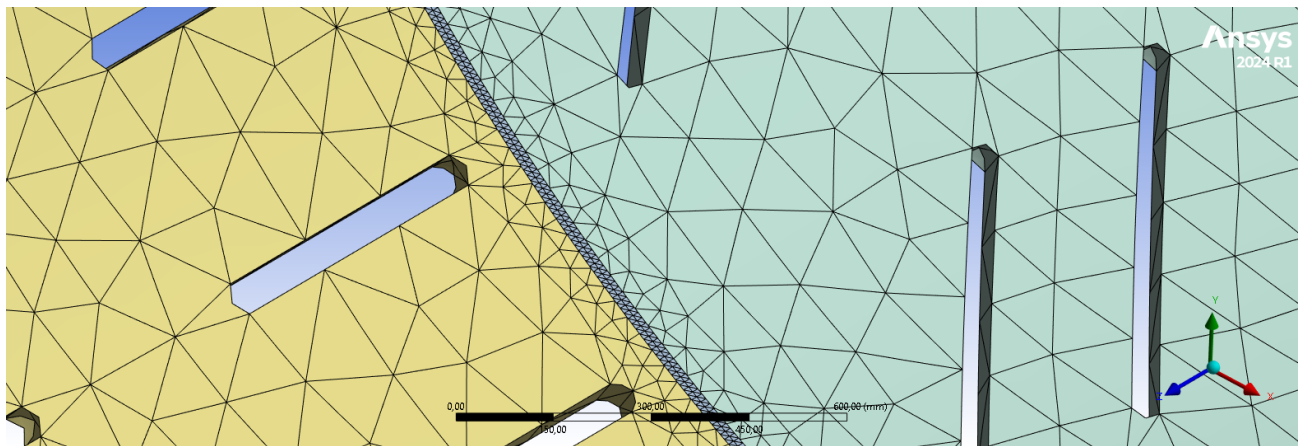


Figura 26: Mallado local de cordón de soldadura

Como se puede observar en la figura 26, el tamaño de la malla en el cordón es considerablemente más pequeño que la utilizada en las secciones, para lograr lo anterior, fue necesario realizar un *Sizing* con tamaño de elemento de 10 mm y un *face meshing* a las caras del cordón de soldadura, con el fin de mejorar la calidad del mallado. Además, se realizó un *Sizing* en el vértice de la sección de 15 mm para disminuir problemas de convergencia de resultados por desigualdad de tamaños de los elementos.

Para el análisis de fatiga, se consideraron los mismos parámetros del mallado general y local para toda la estructura, para el caso de la ranura, con el fin de encontrar resultados más precisos, se refino aún más esa sección mediante un *face sizing* de 0,8 mm a las 3 caras que componen la ranura, tal como se puede observar en la figura 27.

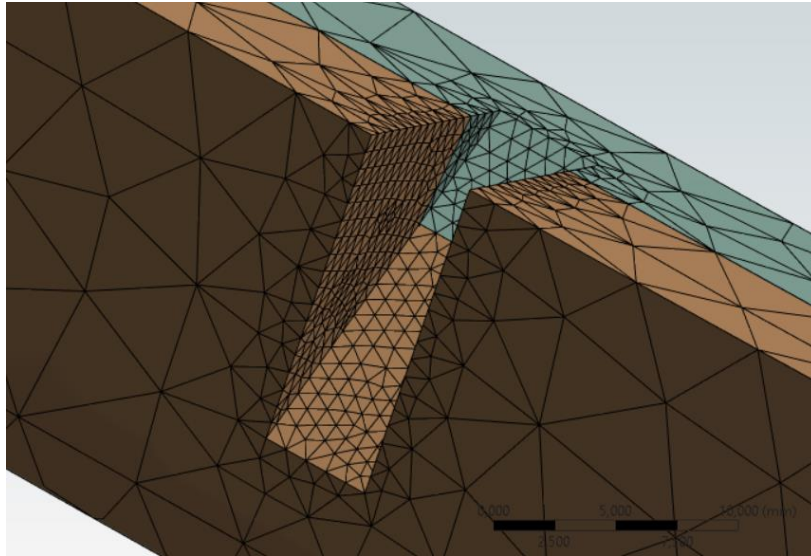


Figura 27: Mallado local en ranura

Para verificar la calidad del mallado ANSYS proporciona diversos parámetros para la verificación de esta, siendo fundamental para este estudio verificar la calidad mediante el parámetro *element quality* y *aspect ratio*, debido a que estos nos entregan una mayor información que pudiera afectar los resultados.

Según lo indicado por el parámetro *element quality*, el mallado general de la pieza tiene una calidad promedio de un 70%, siendo bastante buena. En la figura 28 se muestra un gráfico donde se indica detalladamente la cantidad de elementos con su calidad asociada.

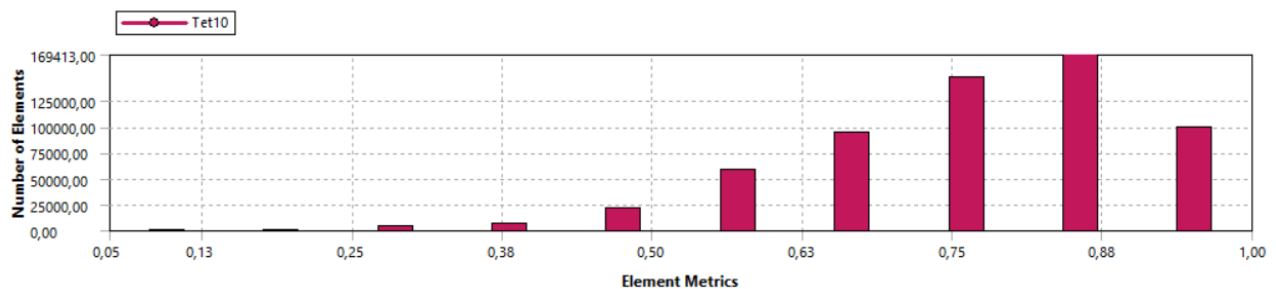


Figura 28: Calidad de los elementos de mallado

Como para este estudio lo importante es que la calidad del mallado del cordón de soldadura sea lo mejor posible, también se verifico localmente la calidad como se puede observar en la figura 29, obteniendo resultados entre el 68% y 99% de calidad para el cordón.

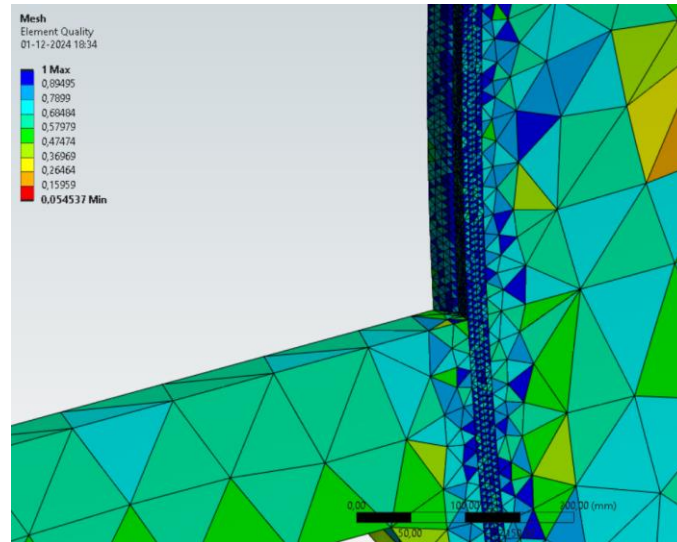


Figura 29: Verificación de calidad del mallado en cordón de soldadura

El parámetro aspect ratio nos indica la distorsión de los elementos, mientras mayor es la distorsión peor será la precisión de los resultados, por lo tanto, lo recomendable es estar en un rango de 1 a 5, como se puede observar en la figura 30, el promedio que se obtuvo fue de 2,62 estando dentro del rango aceptable.

Mesh Metric	Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1,1895
<input type="checkbox"/> Max	38,353
<input type="checkbox"/> Average	2,6224
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	1,6646

Figura 30: Parámetro de calidad de mallado aspect ratio

Capítulo 4: Resultados

4.1 Deformación de la virola del descortezador

Se determinó la deformación equivalente de Von Mises de la virola con el fin de cuantificar la deformación de la estructura bajo las condiciones de cargas combinadas, como se puede observar en la figura 31, la máxima deformación que sufre la estructura es de $7,99 \cdot 10^{-5}$ mm/mm, considerando las dimensiones de ambas secciones analizadas con un diámetro de 5585 mm y 5500 mm de largo, la deformación que se obtiene es bastante pequeña, lo cual indica que la estructura se encuentra dentro del rango elástico.

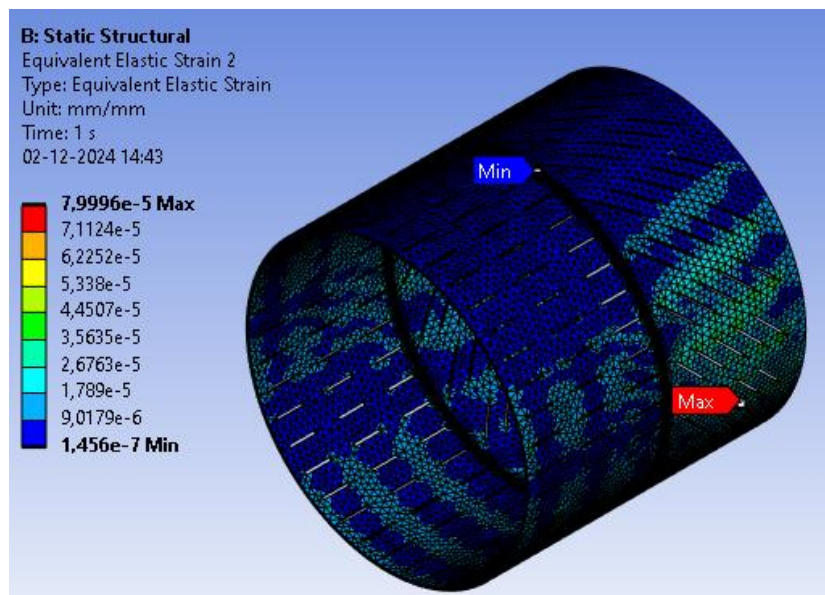


Figura 31: Deformación equivalente de la virola del descortezador

Debido a que la estructura presenta deformaciones significativamente bajas, se descarta una influencia sobre los cordones de soldadura producto de la deformación de la virola.

4.2 Análisis de esfuerzos en cordones de soldadura en condiciones de carga al 50%

En condiciones cuando el descortezador se encuentra operando con una carga al 50% del llenado del tambor, se obtienen los siguientes esfuerzos en los cordones de soldadura que unen la sección 1 con la sección 2. Como se puede observar en la figura 32, la zona marcada con el color rojo corresponde al esfuerzo máximo que se obtuvo mediante la teoría de falla de Von Mises, obteniéndose un resultado de 18,412 [Mpa]. Considerando que el límite elástico del material de aporte E71T-1 es de 390 [Mpa], se obtiene un factor de seguridad de 21, por lo tanto, considerando este análisis se descartaría la falla del cordón exterior bajo condiciones de operación con un 50% de carga.

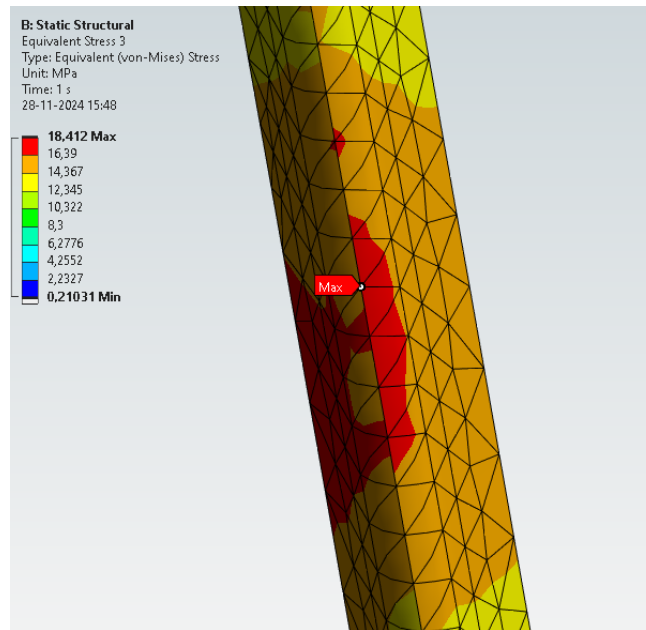


Figura 32: Esfuerzo equivalente de Von Mises cordón exterior

Para el cordón interior, del análisis de esfuerzos mostrado en la figura 33, se observa que el máximo esfuerzo que se obtiene es de 19,8 [Mpa], considerando que el material de la soldadura es el mismo que para la soldadura exterior, con el límite elástico de 390 [Mpa], se descartaría una posible falla en el cordón interior bajo estas condiciones de operación.

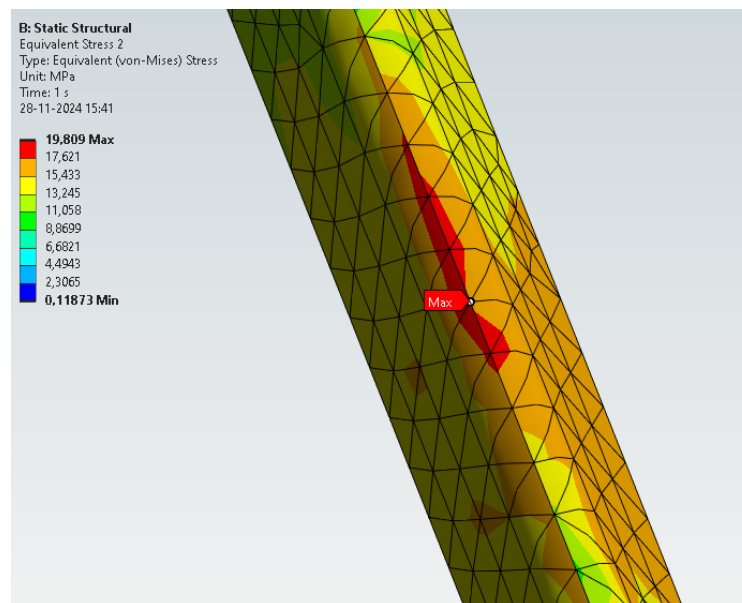


Figura 33: Esfuerzo equivalente de Von Mises cordón interior

4.3 Análisis de esfuerzos en condiciones de carga al 75%

Al igual que en el punto 4.2, se obtienen los esfuerzos en el cordón de soldadura cuando el equipo está operando en su capacidad máxima con un 75% de llenado. Como se puede observar en la figura 34, la zona marcada con el color rojo corresponde al esfuerzo máximo que se obtuvo mediante la teoría de falla de Von Mises, obteniéndose un resultado de 19,17 [Mpa] en el cordón exterior, para el cual su límite elástico es de 390 [Mpa], por lo cual, al igual que para la condición de carga al 50% se descartaría una falla bajo esta condición de operación.

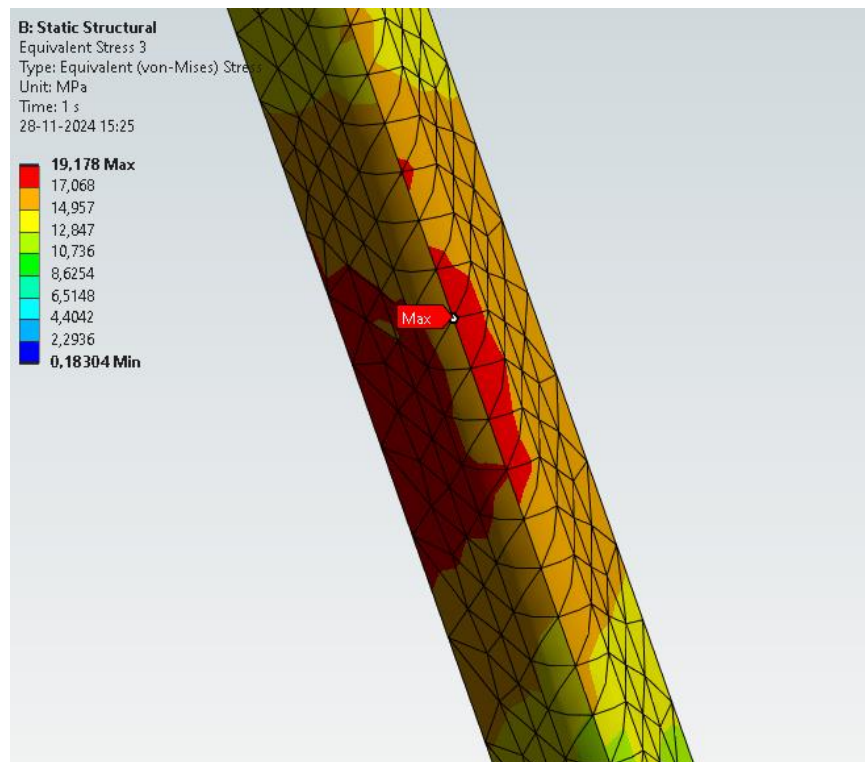


Figura 34: Esfuerzo equivalente de Von Mises cordón exterior

Para el cordón interior, del análisis de esfuerzos mostrado en la figura 35, se observa que el máximo esfuerzo que se obtiene es de 21,19 [Mpa], considerando el límite elástico de 390 [Mpa], se descartaría una posible falla en el cordón interior bajo estas condiciones de operación.

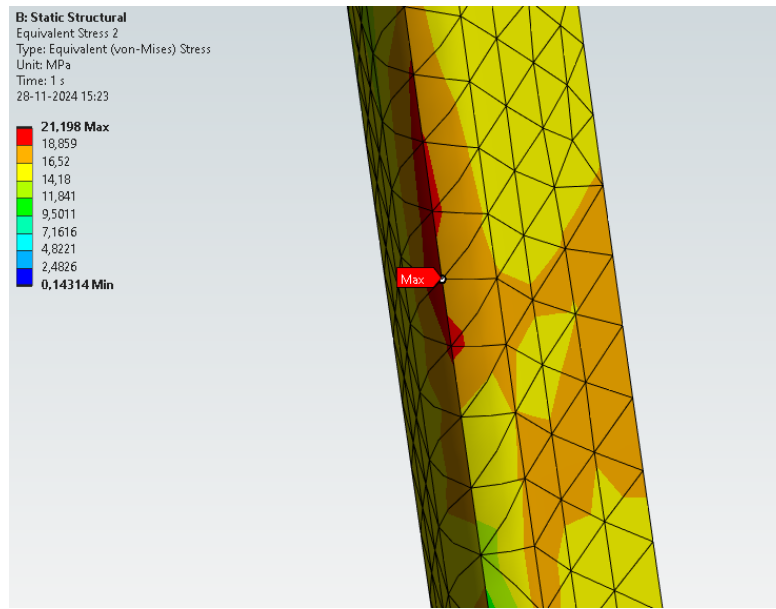


Figura 35: Esfuerzo equivalente de Von Mises cordón interior

4.4 Convergencia de resultados

Para verificar que los resultados obtenidos en ambos cordones de soldadura no sufren alteraciones según la calidad del mallado de la geometría, se realizó un estudio de la convergencia de estos verificándose los resultados obtenidos para un mallado del cordón de 12 mm, 10 mm, 8 mm y 5 mm, obteniéndose los resultados mostrados en las tablas 9 y 10.

Tabla 9: Esfuerzos obtenidos según el tamaño de malla para condición de llenado del 50%

Tamaño malla [mm]	N° elementos cordón interior	N° elementos cordón exterior	Esfuerzos de Von Mises interior [Mpa]	Esfuerzos de Von Mises exterior [Mpa]
12	33355	33082	23,02	21,3
10	50934	52476	21,19	19,17
8	116912	116345	21,56	19,68
5	216590	220450	21,94	19,84

Tabla 10: Esfuerzos obtenidos según el tamaño de malla para condición de llenado del 75%

Tamaño malla [mm]	N° elementos cordón interior	N° elementos cordón exterior	Esfuerzos de Von Mises interior [Mpa]	Esfuerzos de Von Mises exterior [Mpa]
12	33355	33082	21,23	20,52
10	50934	52476	18,82	18,2
8	116912	116345	19,8	18,41
5	216590	220450	19,92	18,72

Con los resultados obtenidos para cada tamaño del mallado y la cantidad de elementos para cada cordón, estos valores se graficaron para ver la tendencia de los resultados y poder determinar el error relativo entre cada uno de ellos.

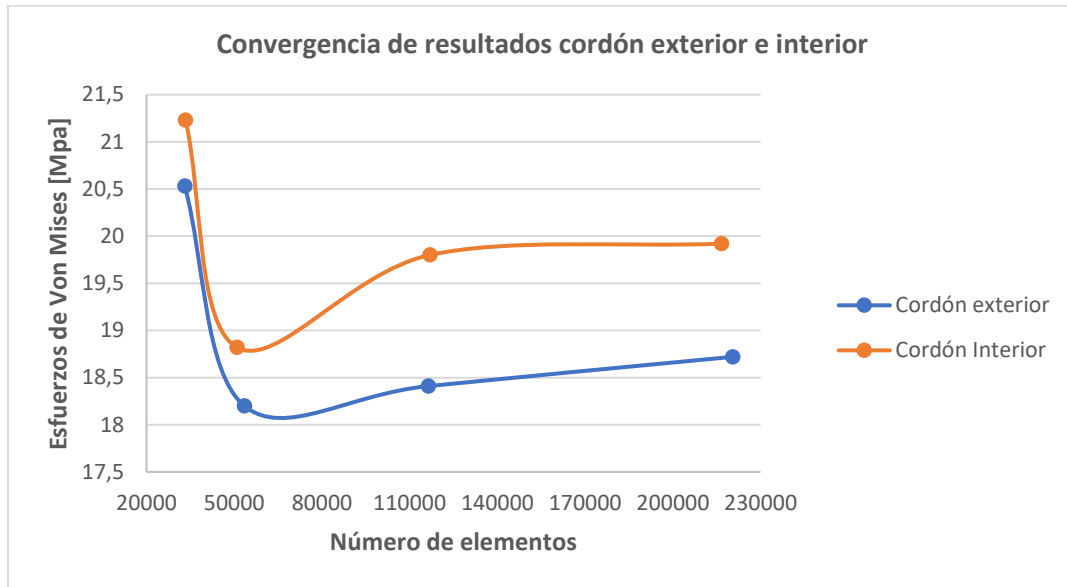


Figura 36: Convergencia de resultados simulación al 50% de carga

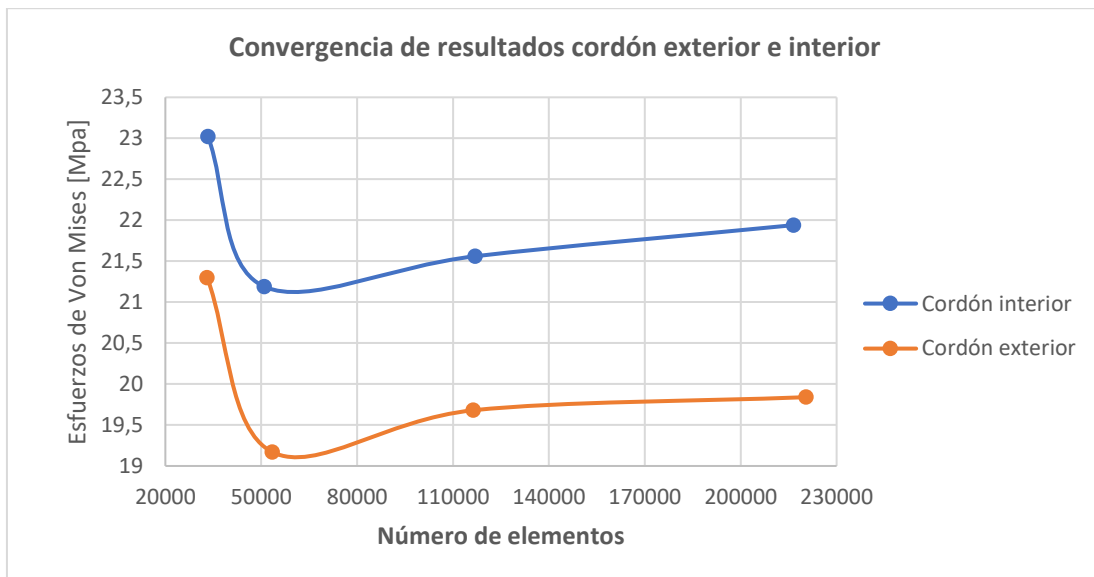


Figura 37: Convergencia de resultados simulación al 75% de carga

Como se puede observar en las figuras 36 y 37, cuando menor es la cantidad de elementos, es decir cuando el tamaño de la malla es de 12 mm, los esfuerzos tienden a ser más grandes que los con una tamaño de malla menor, esto se debe principalmente a la distorsión de los elementos en el cordón, dado que, por el tamaño de la geometría del cordón, los elementos se distorsionan, por lo tanto, estos valores al corresponder a singularidades no son considerados representativos. Por otro lado, se observa que mientras mayor es el refinamiento del mallado, los resultados tienden a converger hacia un valor.

Cuando se evalúa la convergencia de la malla, se considera un error relativo máximo el cual puede existir entre los resultados obtenidos para cada simulación. Para este análisis se considerará aceptable el error de los resultados si se encuentran dentro del rango de 2-5% o inferior. El error relativo se determina según la ecuación 16.

$$E = \frac{(\sigma_i - \sigma_{i-1})}{\sigma_i} \cdot 100 \quad (16)$$

Donde σ_i corresponde al esfuerzo obtenido con la malla más refinada y σ_{i-1} corresponde al esfuerzo obtenido con la malla anterior. De acuerdo con lo anterior, se obtienen los siguientes resultados mostrados en la tabla 11.

Tabla 11: Error relativo de los resultados según el tamaño del mallado

Tamaño del mallado	Error relativo (%) en condición de carga a 50%		Error relativo (%) condición de carga a 75%	
	Cordón interior	Cordón exterior	Cordón interior	Cordón exterior
12	8,3	11	12,8	11,3
10	1,71	2,59	4,94	1,14
8	1,73	0,81	0,6	1,65

Por lo tanto, según el rango aceptable de error que se propuso anteriormente, con una malla de 10 mm y 8 mm, ya se ha alcanzado la precisión suficiente y no sería necesario mallar aún más los cordones de soldadura, ya que, los resultados no presentarían una gran variación.

4.5 Esfuerzos equivalentes de Von Mises en virola del descortezador

Dentro de los resultados entregados en la simulación, para condiciones de carga del 75%, ya que, al ser el máximo de carga a la cual podría trabajar el equipo, no es necesario realizar este cálculo para el caso de operación normal del equipo a 50% de carga. Como se puede observar en la figura 38 (b), la mayor concentración de esfuerzos se da en el borde de las ranuras que dan salida a la corteza desde el equipo, obteniéndose un esfuerzo máximo de 43 [Mpa].

No obstante, para el material por el cual están conformadas las secciones de la virola del descortezador, el acero S235JR con un límite elástico de 235 [Mpa], se obtiene un factor de seguridad de 5,77. Por lo cual, bajo este análisis queda descartada una falla de la virola bajo estas cargas.

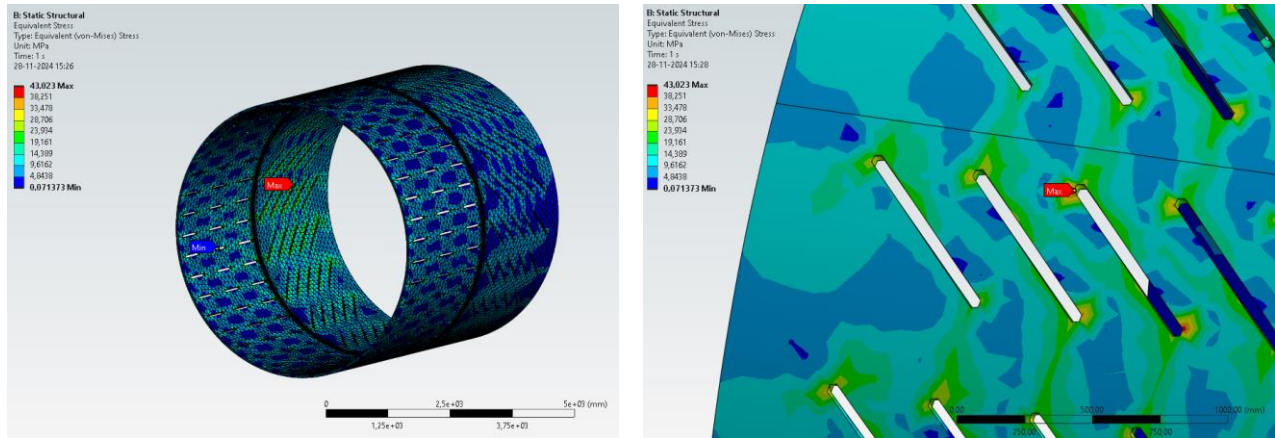


Figura 38: Esfuerzos equivalentes: a) virola del descortezador b) ranuras de la virola

4.5 Análisis de fatiga en cordón de soldadura con ranura

Cuando se realiza un análisis de la fatiga de un material, se estima que los resultados son aproximaciones de cómo puede comportarse un material bajo cargas cíclicas, por lo cual los resultados pueden ser interpretados como una referencia para proponer posibles causas de falla bajo las condiciones simuladas por el software.

En la figura 39, se puede observar el refinamiento del mallado que se realizó en la zona de la ranura con el fin de poder obtener un resultado lo más preciso posible. En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos para los esfuerzos equivalentes de von mises y esfuerzos alternantes en la ranura.

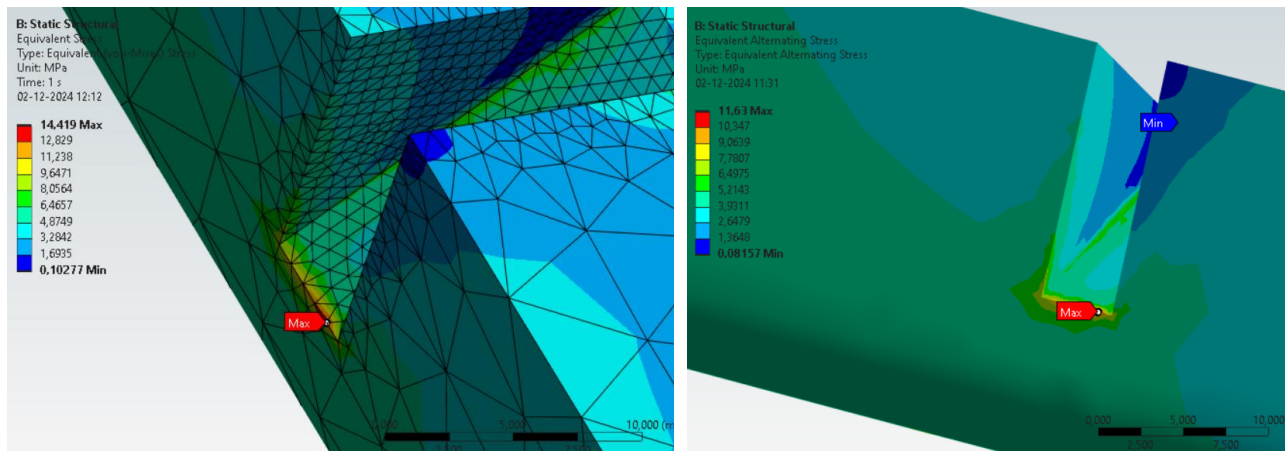


Figura 39: Esfuerzos en la ranura: a) Von Mises b) Alternantes máximos

Según la figura 39 (a), el esfuerzo máximo que se ha encontrado en la sección de la ranura fue de 14,63 [Mpa], aumentando aproximadamente 2,9 veces los esfuerzos que se obtuvieron en las zonas alejadas a la ranura. A su vez, como se puede observar en la figura 39 (b), el máximo esfuerzo alternante que se obtuvo fue de 11,63 [Mpa], cabe mencionar, que ANSYS amplifica este esfuerzo en base al factor de corrección utilizado.

4.4.1 Análisis de vida y daño

Como se puede observar en la siguiente figura 40, a pesar de contar con la ranura, el cordón posee vida infinita para los esfuerzos a los cuales está sometido, superando el límite de vida infinita propuesto de 10^6 ciclos.

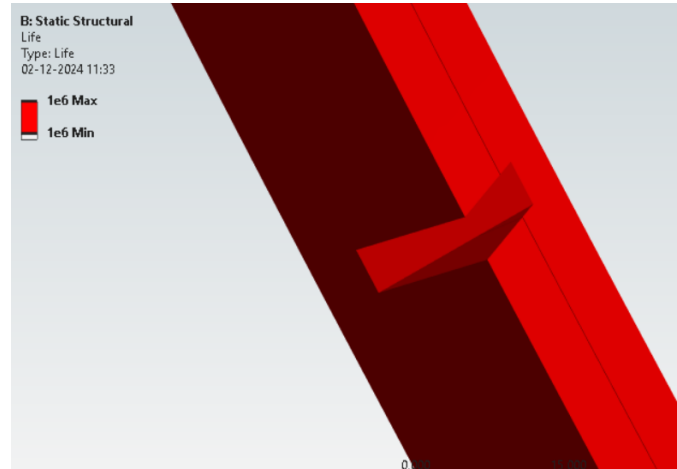


Figura 40: Resultado de vida a la fatiga

El siguiente análisis corresponde a un plano de contornos que representa el daño por fatiga, los valores superiores a 1 indican falla antes que se alcance la vida de diseño.

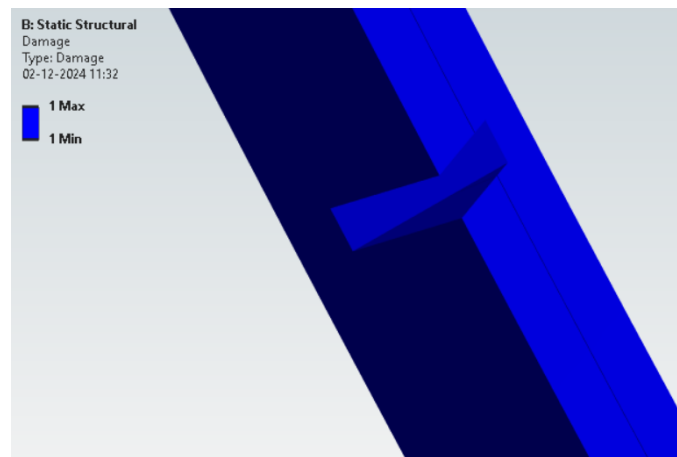


Figura 41: Resultado daño por fatiga

Como se puede observar en la figura 41 y en concordancia con el resultado anterior, el daño que se obtiene en esta sección del cordón no supera el valor 1, por lo cual, no existe un daño por el fenómeno de fatiga en el cordón.

4.4.2 Factor de seguridad

El factor de seguridad muestra un plano de contornos con respecto a la falla por fatiga definido para 10^6 . Para entender la escala de los resultados obtenidos, el máximo valor de seguridad es 15, y el

mínimo es 1, es decir si se encuentran valores inferiores a 1, existiría falla previo a lo estimado por diseño.

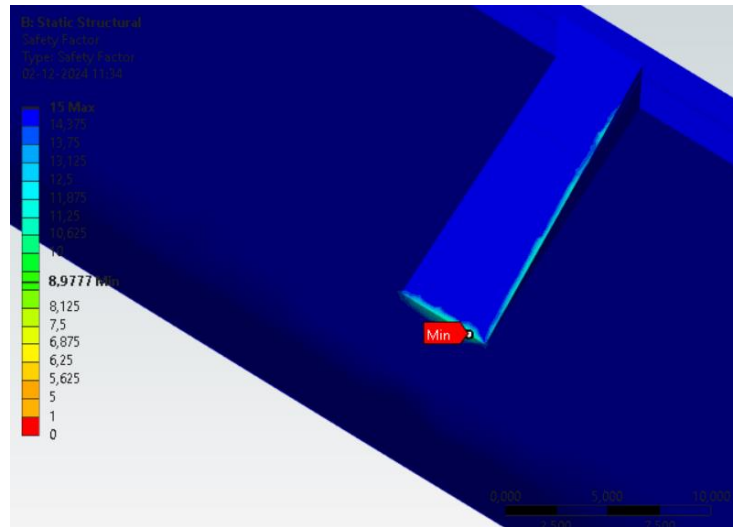


Figura 42: Factor de seguridad a la fatiga

Como se puede observar en la figura 42, el mínimo se encuentra en la zona donde los esfuerzos dentro de la ranura son máximos, obteniéndose un factor de seguridad de 8,97 en la zona afectada.

Capítulo 5: Conclusiones

Basándose en los objetivos específicos de la investigación, la simulación se enfocó en dos secciones de la virola del descortezador con la finalidad de poder ahorrar recursos computacionales. A pesar de esta simplificación en el modelo, el objetivo principal fue obtener los esfuerzos sobre las uniones soldadas a tope de la sección 1 con la sección 2. Para ello, se definieron las condiciones de borde que permitieran aproximar los resultados de manera fiel a los obtenidos al trabajar con toda la estructura.

Se llevaron a cabo dos simulaciones por separado bajo distintas condiciones de cargas, una simulación considerando el 50% de carga del descortezador, correspondiente al porcentaje de llenado en el que opera habitualmente el equipo, y otra a un 75% de carga, el cual representa el límite máximo operativo según ficha técnica. Adicional a las cargas por los troncos, ambas simulaciones cuentan con un momento torsor que se transfiere a la estructura, correspondiente al generado por el sistema motriz.

En el análisis de 50% de carga, los esfuerzos que se obtuvieron tanto para el cordón interior de 19,8 [Mpa] y para el cordón exterior de 18,412 [Mpa]. En el segundo caso, para la condición de 75% de carga, los esfuerzos que se obtuvieron tanto para el cordón interior de 21,19 [Mpa] y para el cordón exterior de 19,17 [Mpa]

En ambos casos, los esfuerzos se encuentran por debajo de los 390 [Mpa] de límite elástico que posee el material de la soldadura E71T-1. Por lo cual, bajo esta condición de carga ambos esfuerzos se encuentran dentro del límite elástico, descartando una falla bajo este criterio.

Respecto a los resultados obtenidos en ambas simulaciones, contemplando que el momento torsor aplicado a la estructura se mantuvo constante en ambas simulaciones, se observó que, aunque el porcentaje de llenado aumente, la presión que ejercen los troncos sobre las caras internas de la virola no son lo suficientemente altos para producir una gran variación de los esfuerzos en el cordón de soldadura bajo este tipo de análisis estático.

Debido a que el equipo se encuentra sometido a ciclos de carga repetitivos, se realizó una simulación de vida a la fatiga incorporando una ranura en el cordón interior, con el fin de poder analizar la cantidad de ciclos que podría resistir el cordón bajo cargas cíclicas. Para este análisis se consideró la presión sobre las caras de la virola a un 75% de llenado, significando el caso más crítico al cual podría operar el equipo.

Los resultados obtenidos en la simulación de vida a la fatiga indican que, a pesar de la presencia de la ranura, se obtuvo un esfuerzo de 14,4 [Mpa], concentrándose en la sección de la ranura donde se esperaba que los esfuerzos aumentaran, es decir, en dirección donde se une el cordón de soldadura con la sección.

Según los resultados obtenidos, el cordón de soldadura posee vida infinita, superando los 10^6 ciclos de vida y el valor asociados al daño por fatiga fue 1, es decir, no existe un daño por el fenómeno de fatiga en el cordón. También se determinó el factor de seguridad asociado al cálculo de fatiga, para el cual ANSYS define un rango de [1-15], relacionando la resistencia máxima a la fatiga del material y la tensión alternante máxima en la zona analizada, obteniéndose un factor de seguridad de 8,97 por lo cual, a pesar de la ranura, se descarta el fallo del cordón por el fenómeno de fatiga.

Dentro de los resultados de la investigación, se obtuvieron los esfuerzos en la virola donde se identificó un máximo de 43 [Mpa], específicamente en la zona de las ranuras por donde la corteza es expulsada del equipo, por lo cual, considerando que el límite elástico del acero S235JR es inferior al del material de la soldadura, la virola fallaría antes bajo estas condiciones de carga, además, se obtuvo que la deformación máxima equivalente de la virola fue de $7,99 \cdot 10^{-5}$ mm/mm, considerando las dimensiones del descortezador, esta deformación es bastante pequeña y se descartaría una posible influencia de esta sobre el cordón de soldadura.

En base a los resultados obtenidos de las simulaciones, se descartaría la falla de la soldadura bajo el criterio de falla de von mises y por fatiga en presencia de una ranura, por lo cual, el cambio de las secciones del descortezador no serían por una posible falla de la soldadura que une estas secciones.

Como se pudo observar en los resultados de la virola, las ranuras por donde sale la corteza están sometidas a mayores concentraciones de esfuerzos, pero aun así se encuentran dentro del límite elástico, es importante recordar que las simulaciones solo contemplan una presión uniforme sobre la virola, según el principio operacional del equipo, al ser un equipo rotatorio, los troncos impactan contra las paredes del descortezador, por lo cual, la fuerza que se aplica no es constante en el tiempo.

Para investigaciones futuras sería relevante considerar el impacto de los troncos contra las paredes de la virola en el tiempo, lo que podría generar mayores concentraciones de esfuerzo en ciertas áreas, particularmente en las ranuras.

Bibliografía

- [1] A. Chahal y D. Ciolkosz, «A REVIEW OF WOOD-BARK ADHESION: METHODS AND MECHANICS OF DEBARKING FOR WOODY BIOMASS,» 2019.
- [2] A. S. Tejedor, «Escuela de Ingenierías Industriales,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>.
- [3] P. Trebuña, F. Trebuña y F. Simcak, «Analysis of possible causes of cracks initiation on barking drum,» 2014.
- [4] J. A. P. Morejón y R. Goytisol Espinosa, «Solución de problemas de soldadura de componentes mediante la modelación por elementos finitos,» 2014.
- [5] L. L. Molina, «Estudio tecnico y economico para mejorar la confiabilidad del transportador auxiliar de cal, horno de cal Linea 2. Celulosa Arauco,» 2018.
- [6] P. Ringegni, Cálculo de uniones soldadas, 2013.
- [7] J. L. C. Romero, «Implementación del proceso de soldadura FCAW en la fabricación de estructuras metálicas de techos para mejorar la productividad en la empresa Grupo SEFEME SAC,» Lima, 2021.
- [8] M. Abasolo, J. Corral y E. Iriondo, Diseño de maquinas, 2017.
- [9] M. Naranjo, «Estudio a fatiga de un cuadro de bicicleta mediante el método de elementos finitos,» 2015.
- [10] R. G. Budynas y J. Keith Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Mc Graw Hill, Octava edición.
- [11] J. M. d. Vehi, «Mallado de geometrías complejas mediante CFD,» Barcelona, 2016.
- [12] D. I. S. Cepillo, «Diseño óptimo de laminados en materiales compuestos. Aplicación del MEF y el método de las superficies de respuesta.,» 2011.
- [13] E. F. Valero, «Aportaciones al estudio de las maquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos,» 2004.
- [14] O. P. L.L, Aprendiendo sobre el Método de los elementos finitos, 2006.
- [15] J. T. C. Lizarza, Método de los Elementos finitos para Análisis Estructural, Navarra: UNICOPIA C.B, 2011.

- [16] A. Molina, M. R. Piña-Monarez y J. Barraza, «Weibull S-N Fatigue Strength Curve Analysis for A572 Gr. 50 Steel, Based on the True Stress- True Strain Approach,» Applied Sciences, 2020.