

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



“ESTUDIO DE FALLA Y REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE
UN TROMMEL PARA UN MOLINO SAG”

Memoria para optar al Título de:
INGENIERO MECÁNICO

ALUMNO : MARIO RIVAS PUENTES
PROFESOR GUÍA : ERNESTO URBINA VERDUGO

2017

AGRADECIMIENTOS.

Quiero dedicar este trabajo a mi amada familia, que me dieron el soporte y las fuerzas para poder sobreponerme a todas las dificultades que nos vimos enfrentados, justamente en el periodo donde debía cumplir con la entrega de este trabajo.

Dar las gracias especiales a mi esposa, por darme su incondicional apoyo y amor, sacrificando parte de nuestra vida familiar, para poder obtener un nuevo logro profesional.

A mis hijos, ya que ellos me motivan a demostrarles que, para una persona que se propone algo, nada es imposible.

A mi madre y mi padre, que siempre me impulsaron a entregar lo mejor de mi persona y a siempre superarme.

A mi suegra, por ayudarme con el cuidado de mi hijo pequeño, ya que sin su ayuda, no habría podido terminar este trabajo.

A don Ricardo Almarza Castro, bibliotecario en escuela de mecánica, por facilitarme un espacio y ayuda, para poder desarrollar durante dos meses mi tesis en la escuela de mecánica.

RESUMEN.

El siguiente trabajo de memoria de título se basa en un estudio de falla catastrófico de un Trommel, realizado por Metso Chile S.P.A. a solicitud de la empresa SOUTHERN COPPER CORPORATION, quienes son dueños del equipo que se encontraba instalado en la mina y concentradora llamada Toquepala. Esta mina a tajo abierto, está ubicada en el sur del Perú, a 30 kilómetros de Cuajone y 870 kilómetros de Lima.

El estudio presente tiene como fin, determinar la causa de la falla catastrófica de la estructura del Trommel, desde el punto de vista del diseño, para así poder rediseñar y entregar un diseño que esté dentro de los márgenes de seguridad para funcionar a vida infinita de fatiga.

El estudio se compone de 6 partes fundamentales, donde se presentarán los siguientes puntos

- Objetivos del estudio
- Antecedentes generales de la empresa
- Antecedentes generales del equipo y descripción de la falla
- Criterios de diseño de Trommel del manual de la empresa
- Revisión del diseño del Trommel que fallo, en base al manual.
- Rediseño del Trommel, en base al manual y criterios de la empresa
- Conclusión de estudio.

Cabe destacar que gracias al estudio realizado en Chile y verificado en Estados Unidos, se constató que en Chile, se dispone de las capacidades para realizar ingeniería, utilizando herramientas de vanguardia de clase mundial, comenzándose a realizar verificaciones en la filial de la compañía ubicada en Con-Con.

INDICE.

| | |
|---|--------|
| 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS..... | - 1 - |
| 1.1 Introducción..... | - 2 - |
| 1.2 Objetivos del estudio..... | - 3 - |
| 1.2.1 Objetivos generales..... | - 3 - |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | - 3 - |
| 2. ANTECEDENTES GENERALES DE METSO..... | - 4 - |
| 2.1 Historia..... | - 5 - |
| 2.2 Antecedentes generales de la empresa..... | - 5 - |
| 2.2.1 Metso a nivel global..... | - 5 - |
| 2.2.2 Metso Chile S.p.A..... | - 6 - |
| 2.3 Antecedentes operacionales de la empresa..... | - 6 - |
| 3. ANTECEDENTES GENERALES DEL EQUIPO A ESTUDIAR Y DESCRIPCION DEL PROBLEMA..... | - 10 - |
| 3.1 Ubicación en el proceso y desempeño..... | - 11 - |
| 3.2 Funcionamiento..... | - 12 - |
| 3.3 Descripción de la falla..... | - 14 - |
| 4. CRITERIOS DE DISEÑO DE TROMMEL DEL MANUAL METSO..... | - 17 - |
| 4.1 Prologo..... | - 18 - |
| 4.2 Perfiles y configuración de la estructura de acero..... | - 18 - |
| 4.2.1 Dimensiones y perfiles..... | - 20 - |
| 4.2.2 Materiales de perfiles..... | - 22 - |
| 4.2.3 Patrón diagonal de la estructura..... | - 23 - |
| 4.2.4 Localización de los anillos intermedios..... | - 24 - |

| | | |
|-------|--|--------|
| 4.3 | Soldadura..... | - 25 - |
| 4.3.1 | Electrodos..... | - 25 - |
| 4.3.2 | Recomendaciones especiales para perfiles de fijación de paneles SMT Skega..... | - 27 - |
| 4.4 | Inspecciones a realizar..... | - 28 - |
| 4.5 | Análisis de elementos finitos..... | - 29 - |
| 4.5.1 | Introducción..... | - 29 - |
| 4.5.2 | Modelo creado..... | - 29 - |
| 4.5.3 | Casos de carga..... | - 31 - |
| 4.5.4 | Condiciones de borde..... | - 34 - |
| 4.5.5 | Rango de esfuerzo admisible..... | - 35 - |
| 4.5.6 | Uniones sometidas a una serie de esfuerzos..... | - 36 - |
| 4.5.7 | Ejemplo de cálculo para molinos SAG..... | - 38 - |
| 5. | REVISION DEL TROMMEL CON FALLA CATASTROFICA DE ACUERDO A LOS CRITERIOS DE MANUAL METSO..... | - 39 - |
| 5.1 | Especificaciones de fabricación..... | - 40 - |
| 5.2 | Estudio de elementos finitos..... | - 42 - |
| 5.2.1 | Modelación..... | - 42 - |
| 5.2.2 | Propiedades de los materiales..... | - 43 - |
| 5.2.3 | Discretización..... | - 45 - |
| 5.2.4 | Condiciones de borde..... | - 47 - |
| 5.2.5 | Casos de carga..... | - 49 - |
| 5.2.6 | Resultados..... | - 52 - |
| 5.3 | Conclusiones preliminares de la revisión..... | - 60 - |
| 6. | REDISEÑO DE TROMMEL..... | - 61 - |

| | | |
|-------|--|--------|
| 6.1 | Estudio de elementos finitos, nueva configuración..... | - 62 - |
| 6.1.1 | Modelación. | - 62 - |
| 6.1.2 | Discretización. | - 62 - |
| 6.1.3 | Condiciones de borde. | - 64 - |
| 6.1.4 | Casos de carga. | - 64 - |
| 6.1.5 | Resultados. | - 65 - |
| 6.2 | Especificaciones y plano final. | - 71 - |
| 7. | CONCLUSIONES. | - 72 - |
| 8. | BIBLIOGRAFIA. | - 74 - |
| 8.1 | Bibliografía. | - 75 - |
| 8.2 | Nomenclatura..... | - 76 - |
| 9. | ANEXOS. | - 79 - |
| 9.1 | Anexo 1: Tabla de comparación de propiedades de perfiles de Europa, América y Australia..... | - 80 - |
| 9.2 | Anexo 2: Tabla de comparación de propiedades de perfiles de Europa, América y Australia..... | - 81 - |
| 9.3 | Anexo 3: Propiedades de acero ASTM A-36..... | - 82 - |
| 9.4 | Anexo 4: Propiedades de acero ASTM A-500 GR. B. | - 83 - |
| 9.5 | Anexo 5: Norma ISO 2768 de tolerancias dimensionales de piezas mecanizadas. | - 84 - |
| 9.6 | Anexo 6: Norma ISO 13920 clase A, tolerancia para piezas soldadas. | - 86 - |
| 9.7 | Anexo 7: Temperatura interpasada según norma AWS D1.1. | - 88 - |
| 9.8 | Anexo 8: Electrodo recomendados según norma AWS D1.1..... | - 89 - |
| 9.9 | Anexo 9: Condiciones de borde del rediseño del Trommel..... | - 90 - |
| 9.9.1 | Fijaciones de perno..... | - 90 - |
| 9.9.2 | Condición de apoyo..... | - 90 - |

| | |
|---|--------|
| 9.9.3 Aceleración de gravedad..... | - 91 - |
| 9.9.4 Peso del Ball Catcher. | - 91 - |
| 9.10 Anexo 10: Casos de carga del rediseño del Trommel..... | - 92 - |
| 9.10.1 Caso 1: Carga de operación normal. | - 92 - |
| 9.10.2 Caso 2: Carga accidental..... | - 92 - |

INDICE DE FIGURAS.

| | |
|--|--------|
| Figura N° 1: Productos fabricados en planta Con-Con..... | - 8 - |
| Figura N° 2: Diagrama de flujo planta concentradora..... | - 11 - |
| Figura N° 3: Tapa de descarga de molino SAG con Trommel y los elementos protectores.- | 12 - |
| Figura N° 4: Movimiento de carga típica dentro del cilindro del molino SAG..... | - 13 - |
| Figura N° 5: Simulación del movimiento del material a través de la tapa de descarga y a través de Trommel..... | - 13 - |
| Figura N° 6: Esquema de funcionamiento de Trommel..... | - 14 - |
| Figura N° 7: Fotos de falla de Trommel..... | - 15 - |
| Figura N° 8: Plano con identificación de la falla y modelo 3D recibidos de Metso Perú.... | - 16 - |
| Figura N° 9: Descripción perfiles utilizados en estructuras de Trommel..... | - 19 - |
| Figura N° 10: Patrón diagonal Par (izquierda), Patrón diagonal impar (central) y designación de sección (derecha)..... | - 23 - |
| Figura N° 11: La distancia del último anillo y del patrón de las diagonales,..... | - 24 - |
| Figura N° 12: Tolerancia de posición de perfiles..... | - 27 - |
| Figura N° 13: Detalle zonas de uniones, que no deben ser soldadas..... | - 28 - |
| Figura N° 14: Elementos utilizados en el análisis..... | - 30 - |
| Figura N° 15: Modelo EF de combinación de elementos vigas con elementos cascara..... | - 30 - |
| Figura N° 16: Carga de gravedad y carga aplicada al modelo EF..... | - 31 - |
| Figura N° 17: Caso de carga para Trommels de molino SAG..... | - 32 - |
| Figura N° 18: Máxima altura de cama para diferentes diámetros de Trommels..... | - 32 - |
| Figura N° 19: Fuerza de la carga utilizada en análisis EF de carga de molinos SAG..... | - 33 - |
| Figura N° 20: Las vigas longitudinales son fijas en la brida de entrada..... | - 35 - |

| | |
|--|--------|
| Figura N° 21: Estándar básico de la curva $Sr - N$ de la soldadura de categoría F2, con un factor de probabilidad nominal del 97,7%..... | - 35 - |
| Figura N° 22: Gráfico de comportamiento de análisis (izquierda), diagrama tensión v/s deformación unitaria. | - 42 - |
| Figura N° 23: Modelo CAD 3D Trommel..... | - 43 - |
| Figura N° 24: Materiales aplicados al modelo de elementos finitos. | - 44 - |
| Figura N° 25: Pesos considerados en modelo de elementos finitos..... | - 44 - |
| Figura N° 26: Discretización del modelo 3D del Trommel. | - 45 - |
| Figura N° 27: Rango de calidad para los elementos generados. | - 46 - |
| Figura N° 28: Espesores asignados al modelo de elementos finitos..... | - 46 - |
| Figura N° 29: Fijaciones de Perno. | - 47 - |
| Figura N° 30: Condición de apoyo en el modelo de elementos finitos. | - 47 - |
| Figura N° 31: Aceleración de gravedad..... | - 48 - |
| Figura N° 32: Peso del Ball Catcher, considerado como una masa concentrada..... | - 48 - |
| Figura N° 33: Altura de cama para calcular la carga. | - 49 - |
| Figura N° 34: Estimación de la carga de operación del Trommel. | - 50 - |
| Figura N° 35: Carga repartida en los perfiles para caso de carga normal de operación..... | - 51 - |
| Figura N° 36: Carga repartida en los perfiles para caso de carga accidental. | - 52 - |
| Figura N° 37: Caso 1: Desplazamiento vertical. | - 53 - |
| Figura N° 38: Caso 1: Esfuerzo equivalente de von-Mises..... | - 53 - |
| Figura N° 39: Caso 1: Estado de esfuerzo en zonas críticas. | - 54 - |
| Figura N° 40: Caso 1: Esfuerzo máximo principal. | - 54 - |
| Figura N° 41: Caso 1: Esfuerzo mínimo principal..... | - 55 - |
| Figura N° 42: Caso 2: Desplazamiento vertical. | - 56 - |
| Figura N° 43: Caso 2: Esfuerzo equivalente de von-Mises..... | - 56 - |

| | |
|--|--------|
| Figura N° 44: Caso 2: Estado de esfuerzo en zonas críticas. | - 57 - |
| Figura N° 45: Caso 2: Esfuerzo máximo principal. | - 57 - |
| Figura N° 46: Caso 2: Esfuerzo mínimo principal. | - 58 - |
| Figura N° 47: Rediseño del modelo CAD 3D Trommel. | - 62 - |
| Figura N° 48: Discretización del modelo 3D del Trommel. | - 63 - |
| Figura N° 49: Rango de calidad para los elementos generados. | - 63 - |
| Figura N° 50: Espesores asignados al modelo de elementos finitos. | - 64 - |
| Figura N° 51: Caso 1: Desplazamiento vertical. | - 65 - |
| Figura N° 52: Caso 1: Esfuerzo equivalente de von-Mises. | - 65 - |
| Figura N° 53: Caso 1: Estado de esfuerzo en zonas críticas. | - 66 - |
| Figura N° 54: Caso 1: Esfuerzo máximo principal. | - 66 - |
| Figura N° 55: Caso 1: Esfuerzo mínimo principal. | - 67 - |
| Figura N° 56: Caso 2: Desplazamiento vertical. | - 68 - |
| Figura N° 57: Caso 2: Esfuerzo equivalente de von-Mises. | - 68 - |
| Figura N° 58: Caso 2: Estado de esfuerzo en zonas críticas. | - 69 - |
| Figura N° 59: Caso 2: Esfuerzo máximo principal. | - 69 - |
| Figura N° 60: Caso 2: Esfuerzo mínimo principal. | - 70 - |
| Figura N° 61: Plano de fabricación de Trommel rediseñado. | - 71 - |

INDICE DE TABLAS.

| | |
|--|--------|
| Tabla N° 1: Productos de planta Con-Con. | - 7 - |
| Tabla N° 2: Gama estándar de Estructuras de Trommels..... | - 18 - |
| Tabla N° 3: Tabla de diseño para dimensionamiento de perfiles de..... | - 20 - |
| Tabla N° 4: Tabla comparativa de perfiles..... | - 21 - |
| Tabla N° 5: Tabla comparativa de perfiles..... | - 22 - |
| Tabla N° 6: Propiedades mecánicas y químicas de aceros utilizados en la fabricación de Trommels..... | - 23 - |
| Tabla N° 7: Características principales electrodo E-6010..... | - 26 - |
| Tabla N° 8: Características principales electrodo E-7018..... | - 27 - |
| Tabla N° 9: Comparativo de perfiles en cuanto a sus dimensiones. | - 40 - |
| Tabla N° 10: Comparativo de perfiles, momento de inercia y peso | - 41 - |
| Tabla N° 11. Materiales utilizados en el modelo de elementos finitos..... | - 43 - |
| Tabla N° 12: Tabla de resumen de resultados..... | - 58 - |
| Tabla N° 13: Tabla de resumen de resultados..... | - 70 - |

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS.

1.1 Introducción.

En la industria contemporánea existen elementos o equipos los cuales funcionan bajo principios mecánicos, fisicoquímicos u otros conocidos y que sin embargo se hace difícil de analizar bajo condiciones reales de operación, especialmente cuando se trata de repetir condiciones similares que existían y que pudieron haber influido en el inicio y propagación de una falla. En particular los equipos están sometidos a variadas condiciones simultáneas como lo son: fuerzas cíclicas, presión, temperatura, tamaño, geometría y características del material.

En la mina a tajo abierto llamada Toquepala, perteneciente a la empresa Souther Copper Corporation, se presentó una falla catastrófica en la estructura de un Trommel diseñado por Metso Perú e instalado a la salida del molino SAG, modelo Fuller de diámetro 21 [pies] por un largo de 33,5 [pies]. Al ocurrir esta falla, Souther Copper Corporation solicitó a la empresa proveedora del equipo, reponer un equipo nuevo, por lo cual la fábrica de Metso Perú, al estar a cargo del Gerente de la planta de Chile y al no tener personal calificado para realizar el estudio, derivó este requerimiento al departamento de Ingeniería de fábrica de Metso Chile. Siendo necesario estudiar y traducir el “manual de diseño de Cribas Rotatorias de Metso” o bien llamado “Engineering Manual Modular Mill Trommels”, para poder llegar a una conclusión de la falla del Trommel.

De acuerdo a las recomendaciones del manual, es fundamental para realizar el estudio y obtener un alto grado de confiabilidad en los resultados, el apoyo de software de ingeniería para ayudar en la resolución, ya que en la solución de este problema se hace demasiado complejo resolverlo por los métodos analíticos convencionales, debido a la complejidad de la geometría del Trommel, utilizándose el método de los elementos finitos, para obtener los esfuerzos principales a los cuales está sometida la estructura, para luego posteriormente, ingresar estos resultados dentro de la ecuación de daños de Miner, obteniéndose los resultados finales, de vida esperada para este equipo.

1.2 Objetivos del estudio.

1.2.1 Objetivos generales.

Determinar la causa de falla catastrófica del Trommel, mediante el manual de diseño Metso y mediante Análisis de Elementos finitos.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Revisión del procedimiento de diseño mediante manual Metso de diseño de Trommels.
- Determinación de esfuerzos máximos en la zona afectada, mediante software de elementos finitos.
- Entregar un diseño que funcione a vida infinita sometido a fatiga.
- Recomendaciones de fabricación, de acuerdo a manual Metso.

2. ANTECEDENTES GENERALES DE METSO.

2.1 Historia.

Metso fue creado mediante la fusión de Valmet y Rauma en el año 1999. En ese momento, Valmet suministraba máquinas de papel y cartón, mientras que las operaciones de Rauma estaban enfocadas en tecnología de fibra, la trituración de roca y el flujo de las soluciones de control. La fusión, creó un proveedor de equipos que reunió a la industria de procesos globales. Poco después de la unión, Metso Corporation comenzó a desarrollar sus servicios para la minería, a través de la adquisición de Svedala Industri AB. Siguiendo una estrategia de adquisición activa y crecimiento orgánico, en poco tiempo, la empresa se convirtió en uno de los principales proveedores del mundo de la industria de procesos.

El año 2013, marcó un punto de inflexión en la historia de Metso, ya que se decidió separar la compañía en dos empresas públicas independientes: Metso Corporation y Valmet Corporation. Valmet Corporation continuó su trayectoria al servicio de las industrias que utilizan materias primas de base biológica.

Metso, en tanto, centró su desarrollo en soluciones y servicios inteligentes para la minería, la construcción; y el petróleo y gas. Además, continuó proporcionando soluciones de automatización de procesos, control de flujo, y servicios para las plantas de celulosa, papel y generación de energía, y otras industrias. Dichas operaciones son aquellas que realiza hasta ahora.

2.2 Antecedentes generales de la empresa.

2.2.1 Metso a nivel global.

Metso es una empresa industrial líder a nivel mundial que atiende a las industrias de minería, agregados, reciclaje, petróleo, gas, pulpa, papel y procesos. Ayudan a sus clientes a mejorar su eficiencia operativa, reducir riesgos e incrementar la rentabilidad utilizando su experiencia única, personal experimentado y soluciones innovadoras.

Los productos comercializados abarcan desde equipos y sistemas de procesamiento de minerales y agregados, hasta válvulas y controles industriales. Posee una red global de más de 80 centros de servicio y cerca de 6.000 profesionales de servicios.

Metso cotiza en el NASDAQ OMX Helsinki, Finlandia, y tuvo ventas netas de alrededor de 2.600 millones de euros en 2016. Metso emplea a más de 11.000 personas en más de 50 países.

2.2.2 Metso Chile S.p.A.

En Chile esta compañía se hace presente en diferentes ciudades como: Antofagasta, Concón y Santiago, en esta última es donde se encuentra la casa matriz de Metso Chile S.p.A.

Actualmente Metso Minerales Chile cuenta con 514 empleados distribuidos a lo largo de todo el país, con más de 125 personas dedicadas exclusivamente al área de servicios y con 25 ingenieros certificados por fábricas.

Las instalaciones ubicadas en Concón - V región de Chile, las más grandes instalaciones de esta compañía en Chile, se remontan al año 1970 en donde fue fundada la fábrica en Concón cuyo dueño era la empresa Skega de nacionalidad sueca. Tras varios años esta empresa se fusionó con Svedala que en los años noventa pasó a formar parte de lo que se conoce hoy como Metso Chile S.p.A.

2.3 Antecedentes operacionales de la empresa.

Metso Minerals es un proveedor global de soluciones, equipos y servicios para el procesamiento de rocas y minerales. Sus principales productos por línea de producción son:

- **Trituración y Cribado (“Crushing & Screening”)**
 - ✓ Trituradoras
 - ✓ Cribas
 - ✓ Alimentadores
 - ✓ Cintas Transportadoras
 - ✓ Equipos Móviles
- **Procesamiento de Minerales**
 - ✓ Molinos
 - ✓ Equipos de Separación
 - ✓ Bombas
 - ✓ Procesamiento por Pirolisis
 - ✓ Manejo de Materiales a Granel

- **Protección contra el desgaste y Sistemas transportadores**
 - ✓ Revestimientos para Molinos
 - ✓ Material de Cribado
 - ✓ Protección contra el desgaste
 - ✓ Cintas Transportadoras/accesorios
 - ✓ Protección contra el Polvo
 - ✓ Manguera para lodos
- **Servicios**
 - ✓ Piezas de desgaste y Repuestos
 - ✓ Mantenimiento Preventivo
 - ✓ Mantenimiento y Reparación
 - ✓ Contratos de Mantenimiento Total

Este trabajo está focalizado en la línea de protección contra el desgaste. Especialmente se trabajó con todo tipo de productos relacionados con revestimientos de goma y polimet (goma y metal) para molinos de minería. En Chile son fabricados por la planta ubicada en Concón - V región Chile.

Los productos de protección y desgaste que se fabrican actualmente por la empresa en base a molde por compresión, se muestran en la Tabla N° 1.

| PRODUCTOS DE GOMA | PRODUCTOS DE GOMA CON INSERTOS METALICOS |
|-------------------|--|
| Anillos | Lifter Polymet |
| Corazas | Corazas de Cilindro Polymet |
| Lifter | Corazas de Tapas Polymet |
| Barras | Barras Polymet |
| Lainas | |
| Mallas | |
| Parrillas | |
| Planchas PML | |
| Tapa de Registro | |
| Nervios | |
| | PRODUCTOS ESTRUCTURALES REVESTIDOS EN GOMA |
| | Descargador interior de Tapas |
| | Descargador exterior de Tapas |
| | Cribas rotatorias (Trommel) |

Tabla N° 1: Productos de planta Con-Con.

(Fuente: Elaboración propia.)

Estos productos cumplen un rol importante dentro de los molinos, equipos utilizados para moler la roca en una faena minera, ya que son los que protegen el casco del molino contra los impactos de la roca. Todos estos productos se ubican al interior del molino, por ello a modo de ejemplo, se muestra en la Figura N° 1 un diagrama en donde se observa la posición de estas piezas dentro del molino.

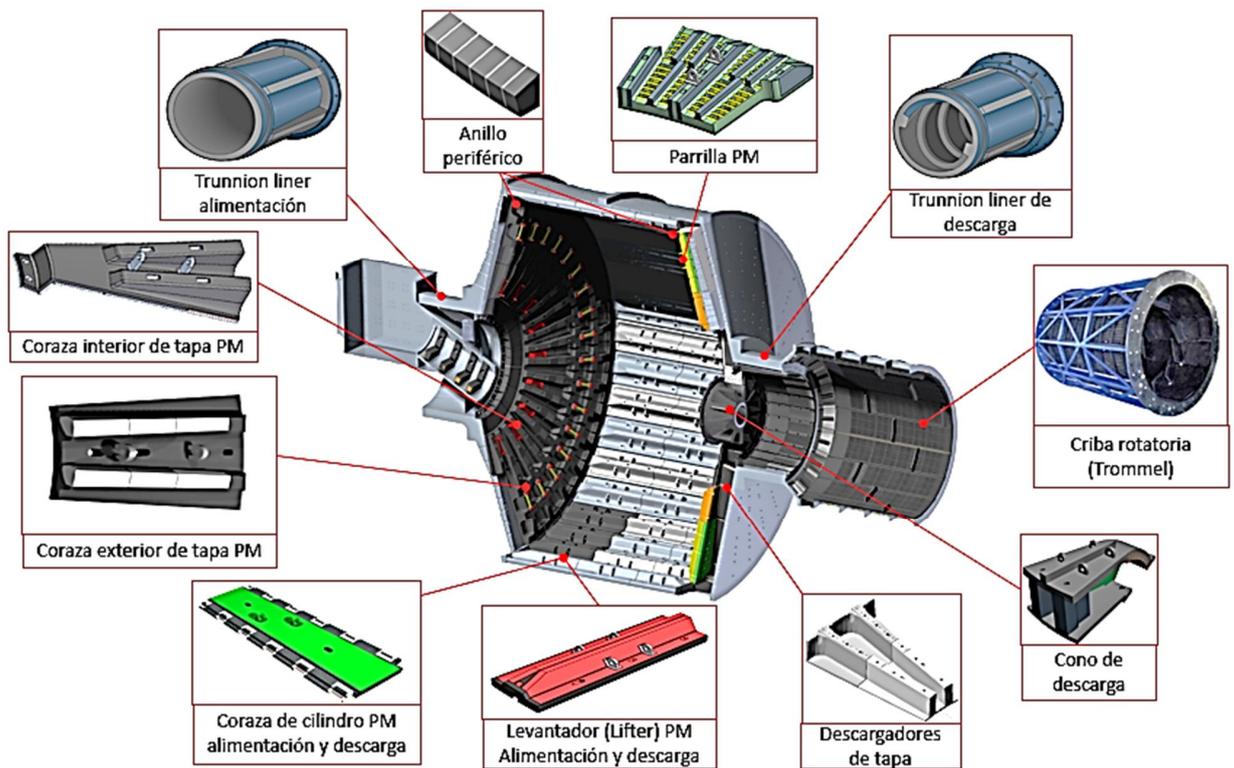


Figura N° 1: Productos fabricados en planta Con-Con.

(Fuente: Elaboración propia.)

El sistema de producción del área de fábrica es principalmente a pedido. Metso Chile S.p.A. posee a lo largo de Chile diferentes faenas mineras a su cargo. La relación que posee Metso con estas empresas mineras es integral, o sea ellos se encargan del completo funcionamiento y mantención de los equipos, que en algunos casos son también fabricados por Metso. Por ello es que a medida que se necesitan los repuestos en la faena minera, también se genera la orden de trabajo, eso sí, consideran un tiempo prudente para no caer en problemas de falta de tiempo o trabajos urgentes.

El tipo de sistema “a solicitud del cliente” se debe a que como existen una gran variedad de molinos en la industria minera los productos difieren en su tipo de geometría, esto involucra fabricar diferentes moldes para un tipo específico de pieza. Por ello es que el sistema de producción se define como “a solicitud del cliente”.

El área prensa trabaja a 3 turnos en faena continua. Los trabajadores se separan en grupos de trabajo (turnos), los cuales están formados por 5 trabajadores el cual queda a cargo de un jefe de turno. Los trabajadores que forman parte de estos equipos de trabajo se reparten el trabajo entre la laminadora, extrusora y las prensas.

Durante los turnos de día existe un supervisor de producción el cual está a cargo de toda la operación de la fábrica. Para acceder a este cargo es necesario tener más de 15 años de experiencia. Él tiene a cargo a todos los jefes de área y a todos los trabajadores.

**3. ANTECEDENTES GENERALES DEL EQUIPO A ESTUDIAR Y DESCRIPCION
DEL PROBLEMA.**

3.1 Ubicación en el proceso y desempeño.

En el proceso de recuperación de los minerales, después de obtenidos de una mina a tajo abierto o subterránea, se envían a una planta concentradora (Figura N° 2) que tiene como finalidad, el procesamiento de la roca en varias etapas hasta obtener el concentrado del metal mediante la conminución, que consiste en pasar durante varias etapas la roca del mineral hasta obtener el tamaño deseado, el cual seguirá al siguiente proceso.

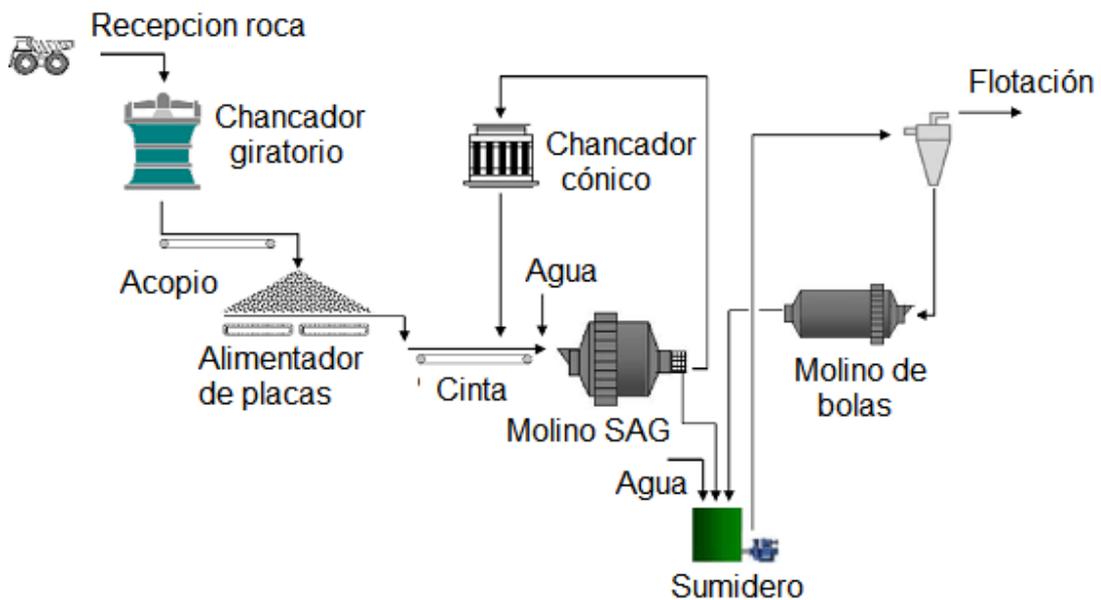


Figura N° 2: Diagrama de flujo planta concentradora.

(Fuente: Presentación Metso molinos rotatorios.)

En la conminución se distinguen dos procesos, el chancado y la molienda. La máquina a estudiar, se encuentra en el proceso de molienda, a la salida del molino SAG, existiendo la posibilidad de encontrar también los “Trommels” o también llamados “Cribas rotatorias” en otros circuitos, a la salida del molinos de bolas. A continuación se muestra una imagen referencial en la Figura N° 3, de un ejemplo de Trommel, adosado a la tapa de descarga del molino SAG, describiéndose los elementos protectores utilizados en un Trommel.

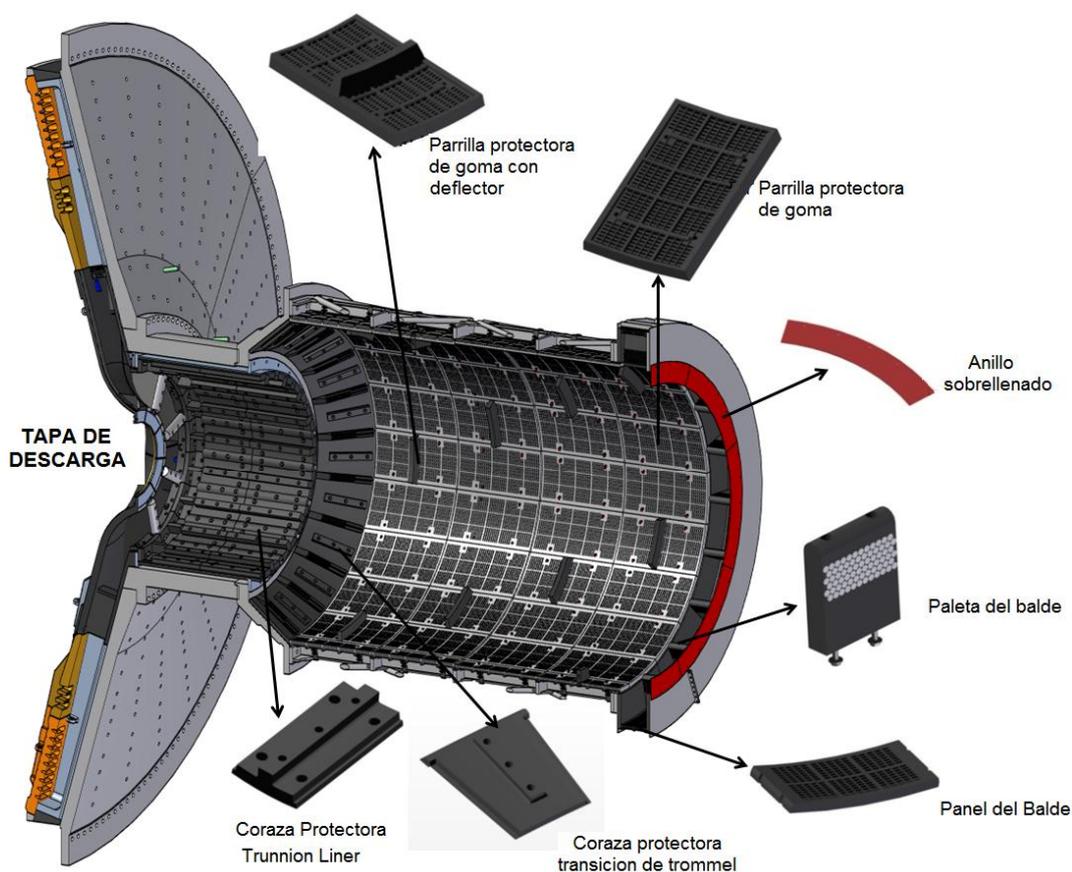


Figura N° 3: Tapa de descarga de molino SAG con Trommel y los elementos protectores.

(Fuente: Presentación Soluciones Ludowici.)

Un Trommel (originario del término alemán para tambor, Trommel) desempeña un trabajo de retención de las bolas, especialmente de aquellas que por el trabajo han sufrido un desgaste excesivo, con la finalidad de que no entren a las bombas.

3.2 Funcionamiento.

La roca molida, proveniente del chancado, ingresa al molino SAG junto con agua y bolas de acero, la cual es levantada por los perfiles, llamados levantadores o lifters, que pertenecen al revestimiento del molino y son elevadas hasta cierta altura formando una cascada, de donde caen golpeándose entre ellos y contra los revestimientos, sucesivamente, produciéndose una serie de golpes y fricciones, moliendo el mineral (Figura N° 4).

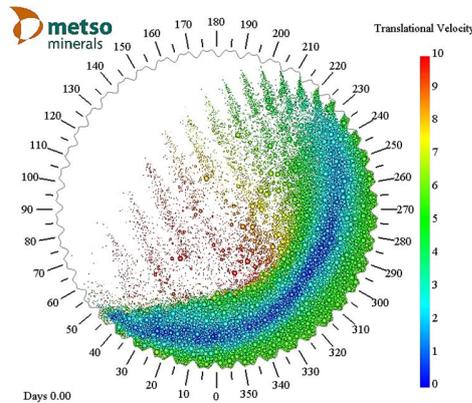


Figura N° 4: Movimiento de carga típica dentro del cilindro del molino SAG.

(Fuente: Informe Metso, resultado molinos SAG.)

Una vez disminuido su tamaño, pasara a través de las parrillas presentes en la tapa de descarga (Imagen izquierda Figura N° 5), cayendo el material más fino, a través de las parrillas protectoras del Trommel (Imagen derecha Figura N° 5).

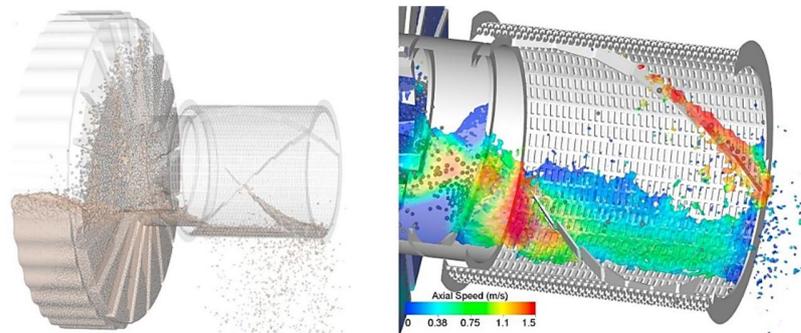


Figura N° 5: Simulación del movimiento del material a través de la tapa de descarga y a través de Trommel.

(Fuente: Presentación Metso molinos rotatorios.)

El material de sobretamaño (rocas de mineral y bolas de acero) que seguirá avanzado por el Trommel y que no pueda ser liberado a través de la parrilla, llegará hasta el final impulsado por una helicoide deflectora, hasta caer en el interior de la rueda de capachos y será enviado al contenedor fijo, donde una inyección de agua presurizada, la enviará por un cono, también fijo, ubicado en el centro del Trommel, reingresando a reproceso hasta disminuir su tamaño.

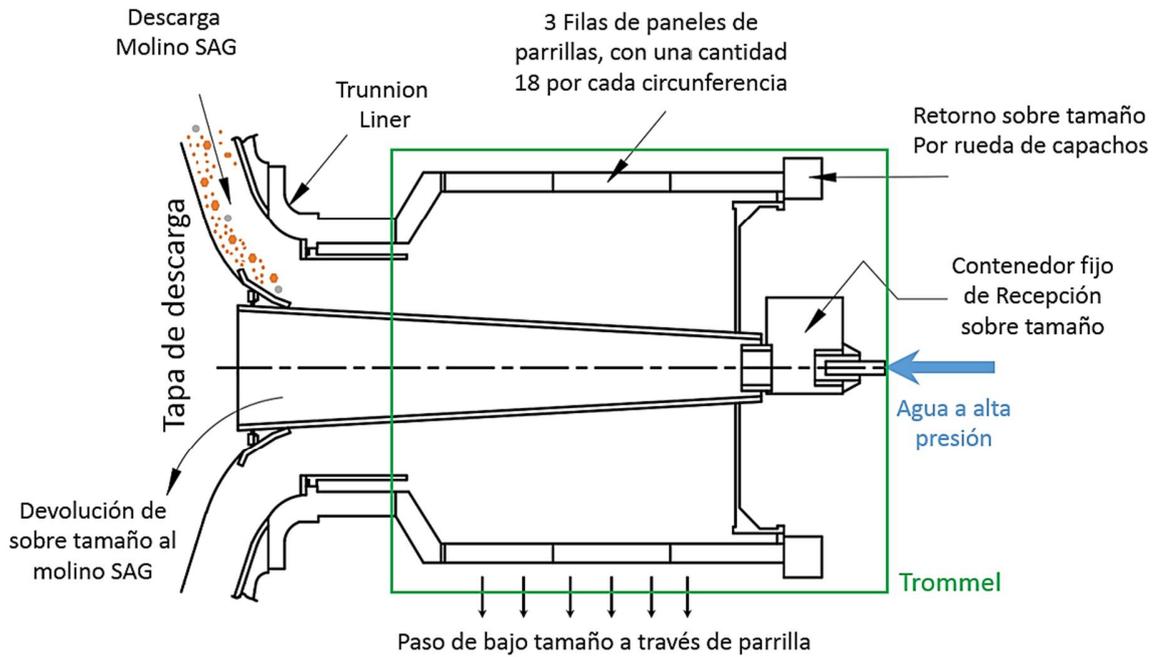


Figura N° 6: Esquema de funcionamiento de Trommel.

(Fuente: Discharge Screens-Trommel vs. Vibrating Tony Moon, RTZ.)

En la Figura N° 6, se puede observar el esquema en la vista en corte de; la tapa de descarga, Trunnion Liner de descarga y Trommel, del proceso explicado en el párrafo anteriormente descrito.

Cabe destacar que los diseños pueden cambiar, de acuerdo a la configuración diseñada por la empresa a cargo de la ingeniería del proceso.

3.3 Descripción de la falla.

A pedido de Metso Perú, se encomendó a Metso Chile, el trabajo de realizar una verificación estructural del Trommel de un molino, modelo Fuller de dimensiones; diámetro de 21 [pies] equivalentes a 6,4 [m] y de largo de 33,5 [pies], equivalentes a 10,21 [m].

A continuación en la Figura N° 7, se muestra la evidencia fotográfica de la falla ocurrida, la cual fue recibida a partir de un informe preparado por el Ingeniero supervisor en terreno, perteneciente al área de Mill Lining Perú.



Figura N° 7: Fotos de falla de Trommel.

(Fuente: Presentación de inspección realizada por Metso Perú.)

Como comentario dentro del informe se indica que personal a cargo del equipo perteneciente a la mina Toquepala, da testimonio de que el equipo falló en operación, solicitando un estudio de elementos finitos.

Para el análisis se deberá trabajar en base a:

- Reporte de inspección fotográfico recibido.
- Correo recibido en el cual se indica que funcionó durante aproximadamente 8 meses presentándose una falla catastrófica.
- La densidad aparente del material descargado por el Trommel (pulpa) es de 1,6 [ton/m³], el giro del Trommel es de 9 [RPM], además de planos y modelos 3D recibidos.

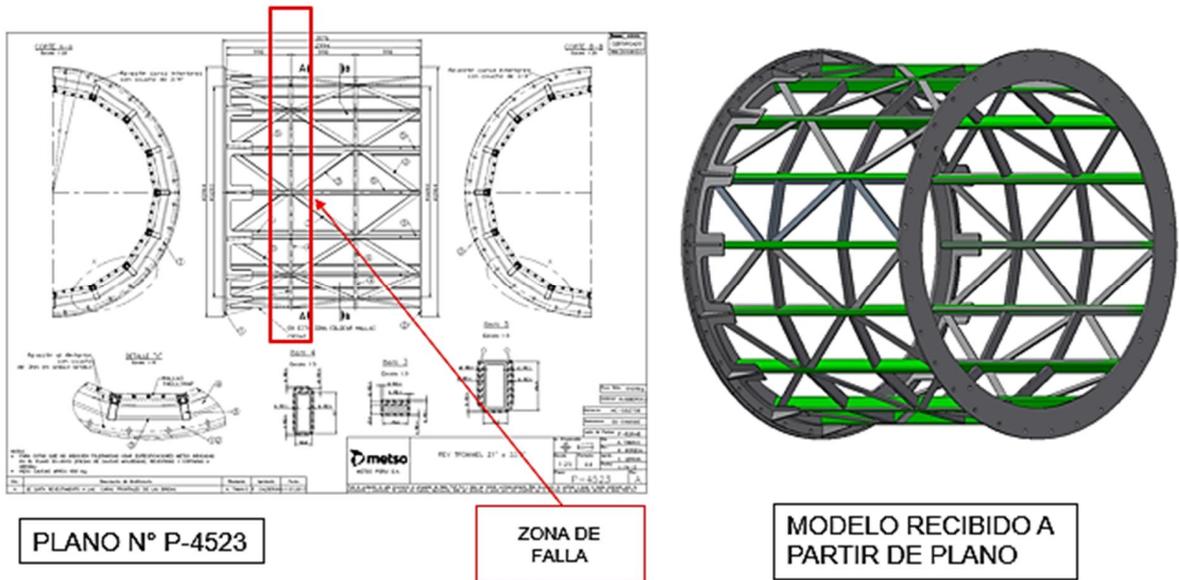


Figura N° 8: Plano con identificación de la falla y modelo 3D recibidos de Metso Perú.

Fuente: (Información recibida de Ingeniería de Metso Perú.)

En la Figura N° 8, se muestra el plano y el modelo 3D recibido, donde a través de las fotos mostradas anteriormente en la Figura N° 7, se pudo deducir e identificar claramente la zona de la falla, que es en el primer anillo ubicado de izquierda a derecha, específicamente en la intersección de perfiles. Se debe mencionar que además, esta estructura se encuentra revestida completamente en caucho, exceptuando las zonas delanteras y traseras de acople, hacia el molino y hacia el anillo retenedor.

4. CRITERIOS DE DISEÑO DE TROMMEL DEL MANUAL METSO.

4.1 Prologo.

El manual fue creado en un proyecto de normalización entre los centros de desarrollo de Svedala Grinding de Suecia y York PA de los Estados Unidos, para determinar los tipos de molinos y paneles de parrillas de Trommel que estaban y siguen fabricándose, por las plantas de Metso Minerals en el mundo, de manera de tener un estándar común de producción.

En este documento se indican instrucciones de fabricación que garantizarán que la calidad de las estructuras de Trommel suministradas por cualquiera de las unidades de fabricación de Metso Minerals, serán adecuadas y uniformes. Además se establecen pautas para condiciones de carga de diseño de Trommel, para ser calculadas por Análisis de Elementos Finitos.

Cabe destacar que el enfoque de los criterios nombrados y descritos en este informe, solamente están enfocados a la estructura del Trommel que ya está diseñada, sin considerar el análisis de los accesorios del Trommel, como serían los; paneles de parrilla, paneles de balde, parrillas con deflectores y demás accesorios mostrados en la Figura N° 3 del capítulo 3, sección 3.1.

4.2 Perfiles y configuración de la estructura de acero.

Para el diseño y dimensionado de la estructura, existen dimensiones estándar definidas de acuerdo a los productos que van puestos en los Trommels. A continuación se muestra en la Tabla N° 2, la gama de dimensiones disponibles para los productos, que comienzan de diámetros internos de 1500 [mm].

Relacion de aspecto: $1 \leq (L / D) \leq 1.5$

| Numero de secciones | Diametro [mm] | | | Largo de Trommel [mm], excluyendo la brida y los espacios entre paneles (Para incluir las bridas, agregar de 50 - 75 [mm]) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|----------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | Interno | externo* | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | |
| | | pesada | suave | 1525 | 1830 | 2135 | 2440 | 2745 | 3050 | 3355 | 3660 | 3965 | 4270 | 4575 | 4880 | 5185 | 5490 | 5795 | 6100 | 6405 | |
| 8 | 1473 | 2107 | 2047 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 1676 | 2307 | 2247 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 1877 | 2505 | 2445 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 2077 | 2703 | 2643 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 2277 | 2900 | 2840 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 2475 | 3095 | 3035 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 2673 | 3330 | 3290 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 2870 | 3544 | 3524 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 3067 | 3718 | 3678 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 3263 | 3932 | 3932 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 3459 | 4125 | 4105 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 3656 | 4319 | 4299 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 3851 | 4511 | 4491 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Numero de anillos intermedios | | | | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | | | |

* Diametro externo estimado dependiendo de los casos de carga.

- Diseñado usando FEA
- El diseño requiere investigacion adicional y FEA
- No recomendado
- Evitar en lo posible.

Tabla N° 2: Gama estándar de Estructuras de Trommels.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Los Trommels estándar, están diseñados sin ningún aditamento especial, como los tubos de retorno con chorro de agua. En caso de necesitarse estos aditamentos, deben ser discutidos y previamente validados con cálculos por elementos finitos.

Los campos de aplicación de los Trommels son en: molinos AG/SAG, considerados como condición pesada y molinos de Bolas, considerados como condiciones suaves, respectivamente.

Para este caso en particular, se utiliza la condición de carga pesada, por ser un molino SAG.

De acuerdo a la Figura N° 9, se muestra la configuración típica de la estructura, que está compuesta por:

1. Vigas longitudinales.
2. Perfil de fijación de los paneles SMT.
3. Vigas Intermedias.
4. Brida interna.
5. Brida externa.
6. Diagonales
7. Placas de conexión de diagonales.

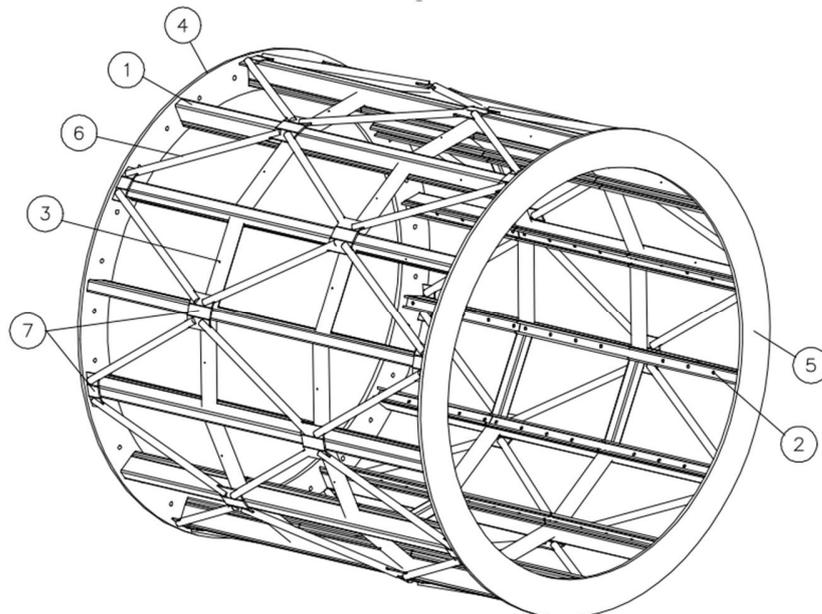


Figura N° 9: Descripción perfiles utilizados en estructuras de Trommel.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

La estructura de acero es diseñada para soportar fatiga de acuerdo a la norma Británica de soldadura BS-7608 con elementos finitos, la cual será abordada en el capítulo 4, sección 4.5, de más adelante.

4.2.1 Dimensiones y perfiles.

Para el diseño de un Trommel, se debe usar el software configurador de Trommel modular de Metso, disponible en Estados Unidos.

Como se conoce el tamaño del Trommel requerido, se deberá hacer uso de la Tabla N° 3 de diseño como herramienta para seleccionar la configuración de la estructura correcta como; tubos, diagonales y bridas, siendo solamente utilizable y válida esta tabla de diseño para Trommels con relación de aspecto (L / D) de 1 a 1,5, es decir las áreas verdes pertenecientes a la Tabla N° 2: Gama estándar de Estructuras de Trommels. (mostrado en el capítulo 4, sección 4.2, de la página - 18 -). Los diseños fuera de este rango, requieren investigación adicional, la cual será discutida en conjunto con las áreas de Mill Lining Systems o Mineral Processing Grinding.

| Number of sections | Longitudinal beam [mm] | Intermediate beam [mm] | Diagonal diameter [mm] | Flange thickness inner/outer [mm] |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 8 | VKR 120x80x6.3 | VKR 80x80x6.3 | 38 | 35/15 |
| 9 | VKR 120x80x6.3 | VKR 80x80x6.3 | 50 | 35/15 |
| 10 | VKR 120x80x6.3 | VKR 80x80x6.3 | 50 | 35/15 |
| 11 | VKR 120x80x6.3 | VKR 80x80x6.3 | 50 | 35/15 |
| 12 | VKR 120x80x6.3 | VKR 80x80x6.3 | 50 | 35/15 |
| 13 | VKR 120x80x6.3 | VKR 80x80x6.3 | 50 | 35/15 |
| 14 | VKR 140x80x6.3 | VKR 100x50x6.3 | 50 | 50/25 |
| 15 | VKR 150x100x10 | VKR 120x80x6.3 | 50 | 50/25 |
| 16 | VKR 140x80x6.3 | VKR 100x50x6.3 | 50 | 50/25 |
| 17 | VKR 150x100x10 | VKR 120x80x6.3 | 60 | 50/25 |
| 18 | VKR 150x100x10 | VKR 120x80x6.3 | 60 | 50/25 |
| 19 | VKR 150x100x10 | VKR 120x80x6.3 | 60 | 50/25 |
| 20 | VKR 150x100x10 | VKR 120x80x6.3 | 60 | 50/25 |

Tabla N° 3: Tabla de diseño para dimensionamiento de perfiles de Trommels para molinos SAG (Carga pesada).

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Esta tabla de perfiles está diseñada y seleccionada en base al estándar Europeo. Vale la pena informar que adjunto en el Anexo 9, sección 9.1 a este documento, se encuentran las equivalencias de perfiles y en el Anexo 9, sección 9.2, la resistencia del material de acuerdo a las diferentes normas de fabricación utilizadas en Europa, América y Australia. En caso de no encontrar ninguna equivalencia, como alternativa se podrán fabricar los perfiles ya sea doblados o soldados, pero deberán ser inspeccionados al 100% con partículas magnéticas y/o tintas penetrantes, para asegurar su resistencia estructural.

A continuación se muestra un ejemplo de sensibilidad obtenido en forma práctica, medido directamente en la estructura de un Trommel instalado en un molino SAG de diámetro 36 [pies] y de largo 19 [pies] perteneciente a una planta de Suecia, para mostrar que el parámetro del momento de inercia de la diagonal, es mucho más sensible que el momento de inercia de la viga longitudinal.

Ejemplo:

1. Cambiando de VKR 140 x 80 x 6.3 a 5[pulg.] x 3[pulg.] x 0.31 [pulg.] (127 [mm] x 76 [mm] x 7.87 [mm]) en un Trommel de 14 secciones.

| Perfil | descripción | Viga longitudinal |
|--|---|---|
| Perfil tipo 1 VKR 140[mm]x80[mm]x6.3[mm] | Forma Perfil |  |
| | Momento de Inercia $\times 10^4 [mm^4]$ | $I_x = 646 \quad I_y = 265$ |
| | Peso por unidad de largo [kg/m] | 20,2 |
| Perfil tipo 2 5 [in]x3[in]x0,31[in] | Forma Perfil |  |
| | Momento de Inercia $\times 10^4 [mm^4]$ | $I_x = 549 \quad I_y = 243$ |
| | Peso por unidad de largo [kg/m] | 22,1 |

Tabla N° 4: Tabla comparativa de perfiles.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Resultados respecto al perfil Tipo 1, de la Tabla N° 4.

$$I_x : -15\% r, \quad I_y : -8\%, \quad \text{peso: } +9\% \implies \text{Variación de Esfuerzo Medido: } +1\%$$

2. Cambiando el diámetro de la diagonal de 50[mm], a 48.7 [mm].

| Perfil | descripción | Viga longitudinal |
|---|---|---|
| Perfil tipo 1 $\varnothing 50[mm]$ | Forma Perfil |  |
| | Momento de Inercia $\times 10^4 [mm^4]$ | $I_x = I_y = 30,68$ |
| | Peso por unidad de largo $[kg/m]$ | 15,4 |
| Perfil tipo 2 $\varnothing 48,7 [mm]$ | Forma Perfil |  |
| | Momento de Inercia $\times 10^4 [mm^4]$ | $I_x = I_y = 27,61$ |
| | Peso por unidad de largo $[kg/m]$ | 14,6 |

Tabla N° 5: Tabla comparativa de perfiles.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Resultados respecto al perfil Tipo 1, de la Tabla N° 5.

I_x : -10%, peso: -5% \implies **Variación de Esfuerzo Medido: +3% a +4%**

Resultados:

La estructura del Trommel es mucho más sensitiva (desde el punto de vista de la variación del esfuerzo) para una disminución del momento de inercia de la diagonal, que para la disminución del momento de inercia de la viga longitudinal.

4.2.2 Materiales de perfiles.

Para el diseño del Trommel, principalmente se utilizarán dos materiales, los cuales son:

- **ASTM A-500** : Especificación estándar publicada por la ASTM para tuberías estructurales soldadas de acero al carbono y perfiles conformados en frío sin soldadura de formas redondas, cuadradas y rectangulares. Normalmente se especifica en Estados Unidos para secciones estructurales huecas. Otra norma relacionada es la *ASTM A-501*, que es la versión conformada en caliente del *ASTM A-500*.

- **ASTM A-36** : Es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y otros. También comúnmente atornillado y remachado en las aplicaciones estructurales: edificios, puentes, torres, etc. Se produce en una amplia variedad de formas, incluyen; planchas, perfiles estructurales, tubos, láminas.

En la Tabla N° 6 se presentan los valores típicos de propiedades mecánicas y químicas de los materiales descritos anteriormente.

| Material | Resistencia [MPa] | | Composición Química [%] | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------|---------------------------|-----------|-----------|------|------|
| | Fluencia | Ultima | C | Si | Mn | P | S |
| <i>ASTM A-500 grado B</i> | 317 | 400 | 0,26 | | | 0,04 | 0,05 |
| <i>ASTM A-36</i> | 250 | 400 | 0,26 | 0,15-0,40 | 0,85-1,35 | 0,04 | 0,05 |

Tabla N° 6: Propiedades mecánicas y químicas de aceros utilizados en la fabricación de Trommels.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

4.2.3 Patrón diagonal de la estructura.

Si el número de secciones del Trommel es par, entonces el patrón diagonal de la estructura se denominará “Par” y para un número impar de secciones, se denominará “Impar”, tal como se muestra en la Figura N° 10.

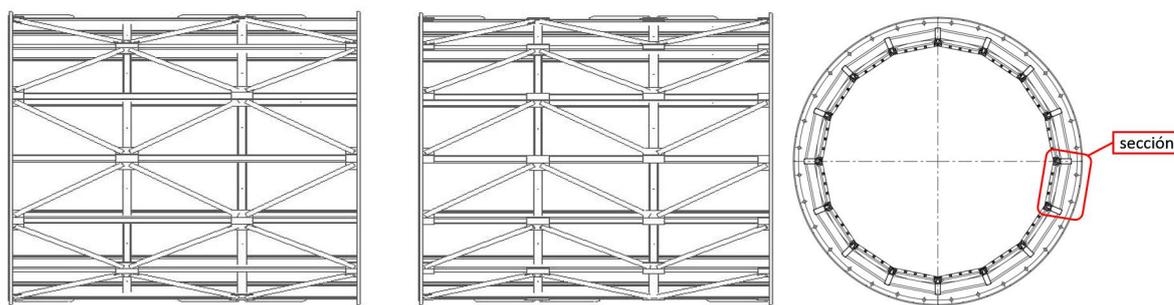


Figura N° 10: Patrón diagonal Par (izquierda), Patrón diagonal impar (central) y designación de sección (derecha).

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Un patrón diagonal par es mejor del punto de vista estructural, porque todas las vigas trabajan como una armadura que reparte equitativamente las cargas.

4.2.4 Localización de los anillos intermedios.

Los anillos intermedios, se colocarán en la unión entre los paneles modulares (SMT) Skega para minimizar la exposición al desgaste. La distancia nominal entre los 3 anillos, será igual a la suma del largo de 3 paneles de 305[mm], equivalentes a un largo total de 915[mm]. La distancia entre el último anillo y la brida exterior será de 2 a 4 paneles, dependiendo del largo del Trommel, de acuerdo a lo mostrado en la Figura N° 11.

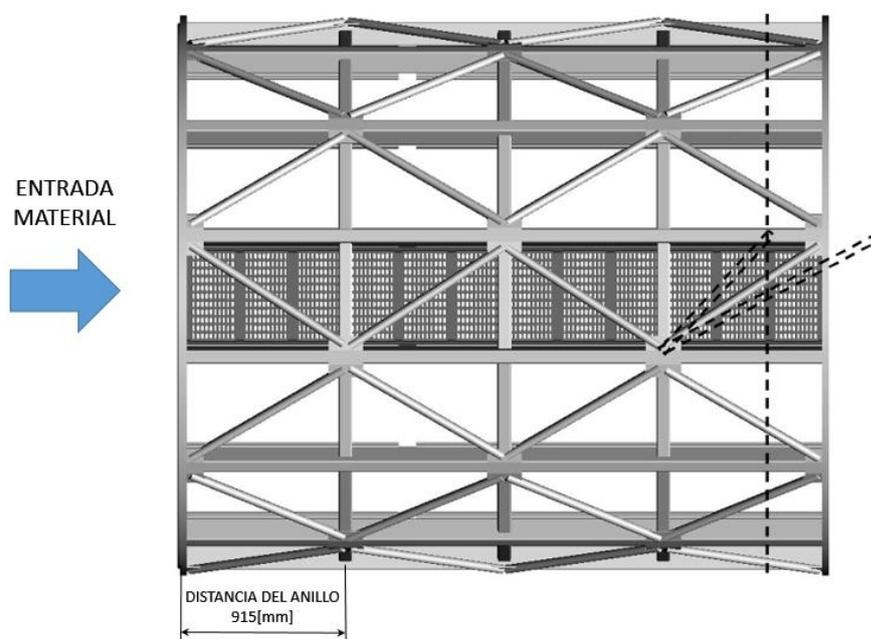


Figura N° 11: La distancia del último anillo y del patrón de las diagonales, depende del largo del Trommel.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Esto es porque se desea mantener la distancia constante al principio del Trommel, para aumentar la resistencia estructural, manteniendo el ángulo diagonal fijo. Un ángulo y una distancia constantes, darán una longitud igual en diagonales (en la mayoría), que es lo que se busca para poder intercambiar las piezas de revestimiento que protegerán la estructura, frente al desgaste.

4.3 Soldadura.

Todas las soldaduras que se deban realizar en la estructura, deberán realizarse de acuerdo a la norma de soldadura estructural AWS D1.1 versión más actualizada, específicamente al capítulo donde se hable de “soldadura de estructuras tubulares”, poniéndose especial énfasis en el precalentamiento solicitado por la norma mencionada. Se adjunta en el capítulo 9, sección 9.7, anexo 7, la tabla de mínimo precalentamiento y la temperatura de interpasada, perteneciente a la norma AWS D1.1/D1.1M-2015.

Los soportes soldados serán usados para realizar la conexión entre la brida y las vigas longitudinales, facilitando la obtención de soldaduras con penetración completa. Además no será necesario un alivio de tensiones post-soldadura.

4.3.1 Electrodo.

Para el ensamblado de la estructura, se utilizará el proceso de soldadura por arco, utilizando la técnica de soldadura por arco con electrodo revestido o también llamado SMAW en inglés. Para el ensamblado se considerará la utilización de electrodos de clasificación AWS de tipo E-6010 para la raíz y E-7018 de recubrimiento. A continuación, se muestra una breve descripción y sus propiedades típicas.

Electrodo E-6010: Electrodo con polvo de hierro en el revestimiento, que permite una velocidad de depósito mayor y una aplicación más fácil, junto con propiedades mecánicas sobresalientes. La estabilidad del arco y el escudo protector que da el revestimiento ayudan a dirigir el depósito reduciendo la tendencia a socavar. Está diseñado según los últimos adelantos técnicos para lograr óptimos resultados prácticos. Este electrodo tiene campo de aplicación muy amplio, en especial cuando es necesario soldar en toda posición. Entre sus típicas aplicaciones se encuentran; estanques, estructuras, tuberías de presión, cañerías, barcos, planchas corrientes y galvanizadas. En la Tabla N° 7 se muestran propiedades mecánicas, químicas y otras.

| Composición química (típica del metal depositado): | | | | |
|---|-------------|----------------|------------------------|------------------------|
| C 0,11%; Mn 0,55%; Si 0,24%; P 0,014%; S 0,008% | | | | |
| Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04): | | | | |
| Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte | | Requerimientos | Energía Absorbida Ch-v | Requerimientos |
| Resistencia a la tracción : 500 MPa | | 430 MPa | 38J a -30°C | 27J a -30°C |
| Límite de fluencia : 414 MPa | | 330 MPa | | |
| Alargamiento en 50 mm : 26% | | 22% | | |
| Amperajes recomendados: | | | | |
| Diámetro mm | Longitud mm | Amperaje | | Electrodos x kg aprox. |
| | | mín. | máx. | |
| 2,4 | 300 | 60 | 90 | 75 |
| 3,2 | 350 | 80 | 110 | 35 |
| 4,0 | 350 | 110 | 160 | 24 |
| 4,8 | 350 | 150 | 200 | 17 |

Tabla N° 7: Características principales electrodo E-6010.

Fuente: (Manual de sistemas y materiales de soldadura Indura.)

Electrodo E-7018: Electrodo de bajo contenido de hidrogeno. Se caracteriza por depósitos de calidad radiográfica, arco fácil de establecer, excelentes características operativas, fácil desprendimiento de escoria y excelente presentación, especialmente recomendado para trabajos donde se requiere una alta calidad radiográfica. Entre sus aplicaciones típicas se encuentran; construcción, reparación de buques, plataformas petroleras, cañerías, etc. En la Tabla N° 8 se muestran propiedades mecánicas, químicas y otras.

| Composición química (típica) del metal depositado: | | | | |
|--|---------------------------|------------------------|----------------|------------------------|
| C 0,09%; Mn 1,05%; Si 0,55%; P 0,020%; S 0,015% | | | | |
| Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04): | | | | |
| Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte | Requerimientos | Energía Absorbida Ch-v | Requerimientos | |
| Resistencia a la tracción : 572 MPa Límite de fluencia : 475 MPa Alargamiento en 50 mm : 31% | 490 MPa 400 MPa 22% | 135J a -30°C | 27J a -30°C | |
| Amperajes recomendados: | | | | |
| Diámetro mm | Longitud mm | Amperaje | | Electrodos x kg aprox. |
| | | mín. | máx. | |
| 2,4 | 300 | 60 | 110 | 52 |
| 3,2 | 350 | 100 | 160 | 26 |
| 4,0 | 350 | 130 | 210 | 19 |
| 4,8 | 350 | 190 | 280 | 14 |

Tabla N° 8: Características principales electrodo E-7018.

Fuente: (Manual de sistemas y materiales de soldadura Indura.)

4.3.2 Recomendaciones especiales para perfiles de fijación de paneles SMT Skega.

Los perfiles de fijación de paneles SMT Skega son muy importantes, ya que sobre estos se instalarán las parrillas, por lo tanto se debe asegurar mantener una distancia lo más constante posible y es debido a esto que, los perfiles serán los **últimos elementos que serán soldados** a la estructura. En la Figura N° 12, se muestra la tolerancia de posición necesaria para estos perfiles.

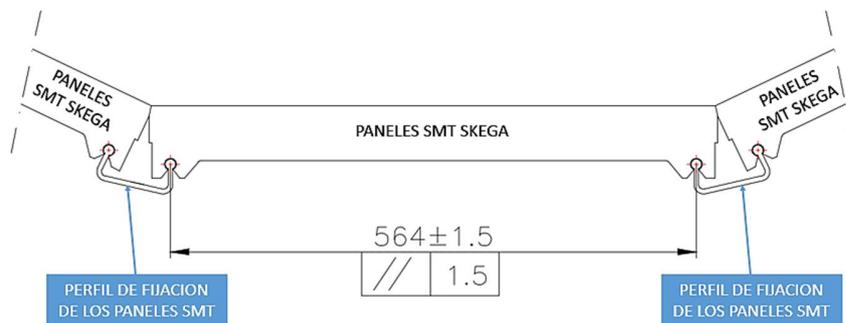


Figura N° 12: Tolerancia de posición de perfiles.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Este perfil que es especialmente fabricado, será soldado a las vigas longitudinales mediante el tipo de soldadura de tapón.

En las últimas fabricaciones que se han realizado, se han encontrado hallazgos de iniciaciones de grietas, exactamente en las zonas de intersecciones de vigas longitudinales y transversales, por lo tanto es de vital importancia que, en la zona de intersección y en las cercanías, **no se aplique la soldadura de tapón**. A continuación en la Figura N° 13, se muestra el detalle de la zona.

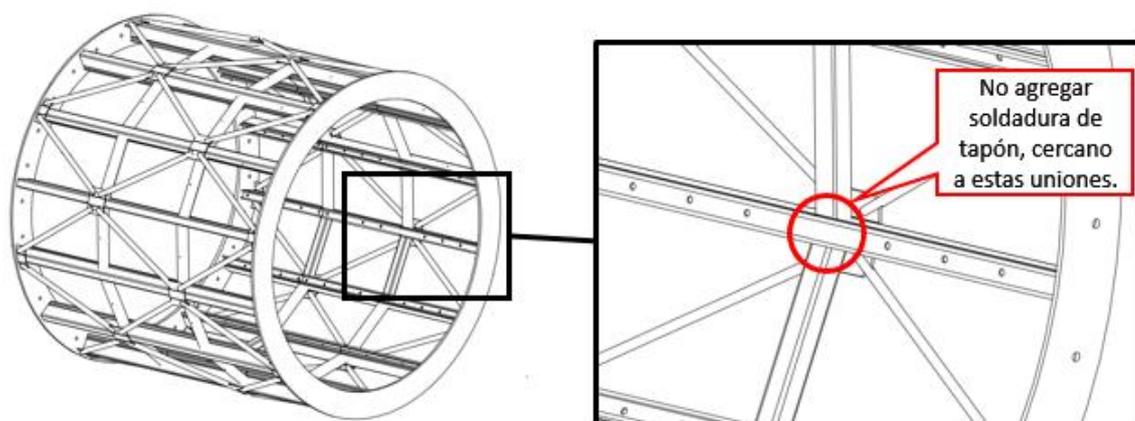


Figura N° 13: Detalle zonas de uniones, que no deben ser soldadas.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

4.4 Inspecciones a realizar.

Para asegurar que la ingeniería desarrollada para la estructura cumpla tanto dimensionalmente como estructuralmente, se deberán agregar al plano de fabricación de la estructura del Trommel, las siguientes indicaciones:

- Para las cotas sin ninguna especificación de tolerancia, se utilizará en piezas o zonas mecanizadas la norma *ISO 2768-1 clase media* y la norma *ISO 13920 clase A*, para piezas o zonas soldadas.
- Verificar que las zonas mecanizadas sean protegidas de la corrosión y los golpes.
- Las soldaduras aplicadas, deberán ser inspeccionadas visualmente, de acuerdo a la sección de “Estructuras tubulares soldadas” de la norma *AWS D1.1*. versión vigente.

4.5 Análisis de elementos finitos.

4.5.1 Introducción.

Las estructuras son expuestas a cargas cíclicas y por lo tanto la fatiga es el principal problema para la estructura de acero del Trommel, siempre que la protección contra el desgaste esté intacta.

El análisis de elementos finitos (FEA en inglés) será utilizado para calcular los esfuerzos principales, en las regiones soldadas de interés. Los Trommels dentro de la gama estándar, son analizados utilizando elementos finitos. Las tareas claves para conducir este estudio, son:

- Ensamblar el modelo de elementos finitos (FE-models) para el Trommel en la gama de Trommels modulares para molinos.
- Extraer el resultado del esfuerzo máximo y mínimo principal en las regiones de interés (en esencia los más altos esfuerzos calculados) y por lo tanto los rangos de tensión alterna máxima en cada región, producto del funcionamiento del Trommel.
- Comparar los resultados con el código británico de soldadura BS-7608, categoría de soldadura F2.
- Aplicar la carga accidental en condición de operación (+50%) y extraer los máximos rangos de esfuerzos alternantes. Determinar cuán a menudo las condiciones accidentales pueden ocurrir sin causar problemas de fatiga.

4.5.2 Modelo creado.

Para la discretización del modelo, existen variados tipos de elementos que sirven para formar la malla. Para el caso de este análisis, se considerará la utilización de elementos viga y elementos placa, mostrados en la Figura N° 14.

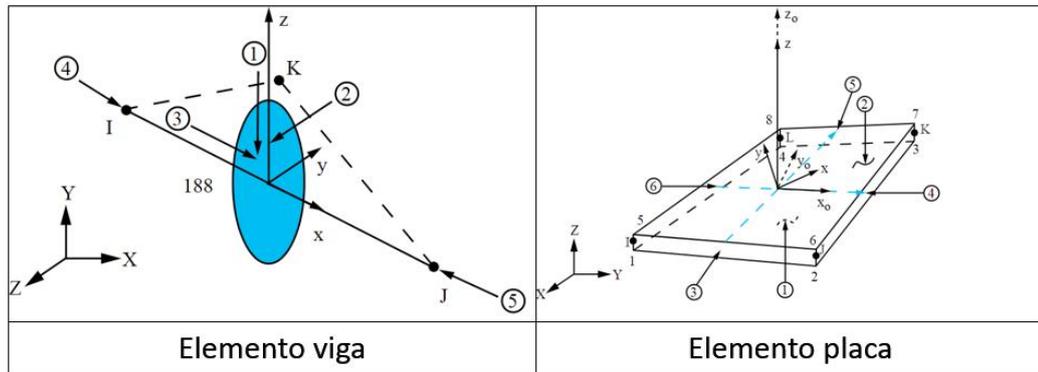


Figura N° 14: Elementos utilizados en el análisis.

Fuente: (Manual Ansys Workbench V17.)

El elemento viga 3D es basado en la teoría de vigas de Timoshenko, es geoméricamente una línea con dos nodos y cuenta con 6 grados de libertad para cada nodo. El elemento placa 3D es basado en la teoría de Mindlin-Reissner, siendo un elemento con 4 nodos y cuenta con 6 grados de libertad para cada nodo. La explicación del uso de estos tipos de elementos, es lograr disminuir los tiempos de cálculo, especialmente en modelos complejos.

La malla empleada para el modelo E.F, es una combinación de elementos viga con elementos placa de p-elementos (Figura N° 15). El modelo también podría ser completamente resuelto con elementos placa, para verificar la validez de la combinación de elementos.

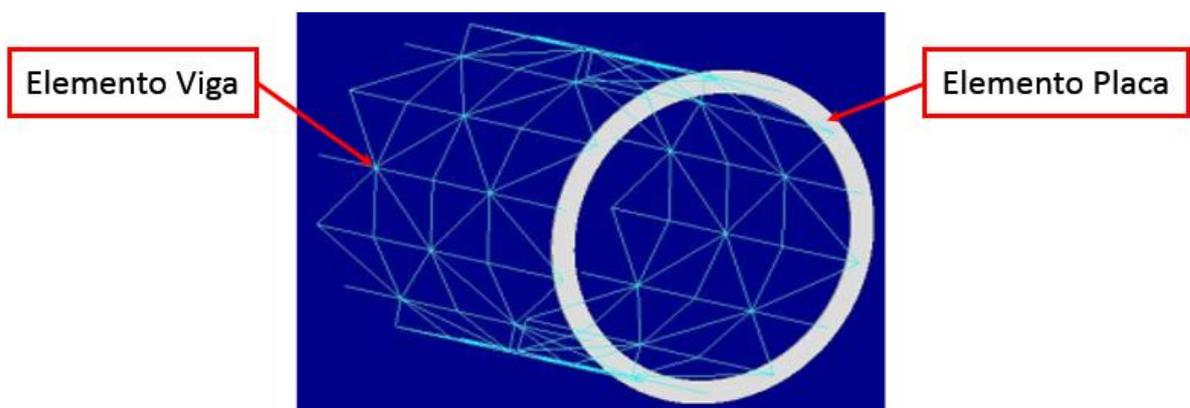


Figura N° 15: Modelo EF de combinación de elementos vigas con elementos cascara.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Los paneles de parrilla, los espirales y el revestimiento protector no son modelados, pero el peso es agregado, incrementando la densidad del acero estructural, para agregar el peso extra de estos componentes.

4.5.3 Casos de carga.

El valor de la carga de gravedad que actúa en el modelo es de $9.81 [m/s^2]$, denotada como G en la Figura N° 16. Los Trommels modulares de molinos, son analizados usando el caso de carga para:

- Carga normal de operación para Trommel de molinos SAG (carga pesada)
- Caso de carga accidental.

A continuación se muestra la carga aplicada a las vigas longitudinales, en la Figura N° 16.

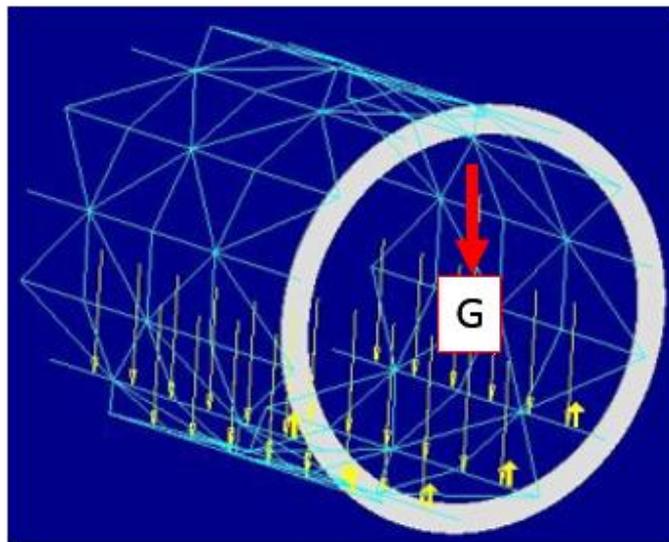


Figura N° 16: Carga de gravedad y carga aplicada al modelo EF.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

4.5.3.1 Carga de Trommels de molinos SAG.

Las aberturas de las parrillas de molinos, son considerablemente más grandes que las aberturas de las parrillas de Trommel, debido a las grandes dimensiones. Por lo tanto se espera que una cantidad considerable de material de sobretamaño pase a través del Trommel del molino SAG, tal como se muestra en la Figura N° 17.

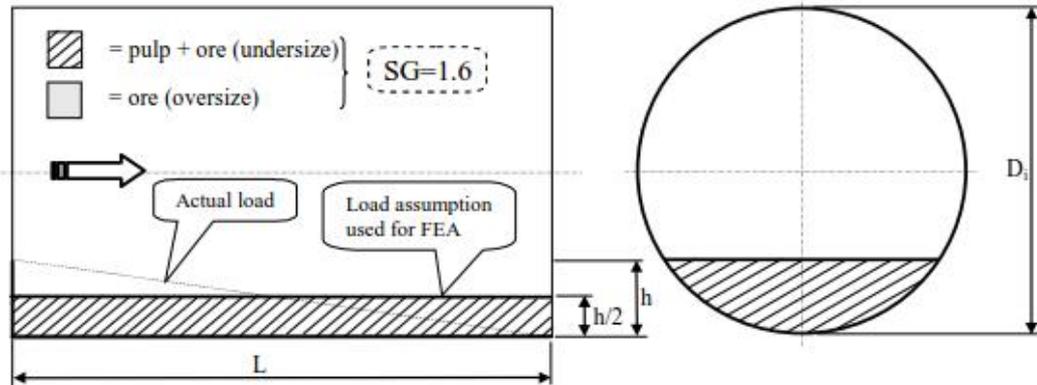


Figura N° 17: Caso de carga para Trommels de molino SAG.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Tenga en cuenta que el análisis EF se realiza suponiendo que la carga tiene una profundidad uniforme ($h/2$) para toda la longitud. Esta suposición hace que el rango de tensión varíe en un 2%, dependiendo del tamaño del Trommel.

La altura máxima de la cama de material (h) es utilizada para calcular el volumen de la carga, ver Figura N° 18.

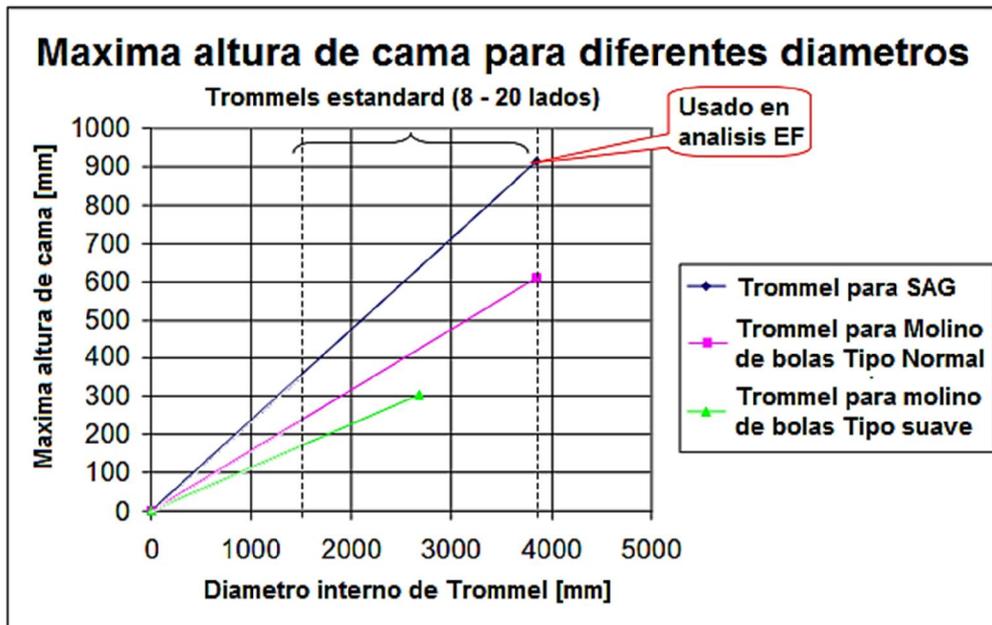


Figura N° 18: Máxima altura de cama para diferentes diámetros de Trommels.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

Utilizando la altura de la cama y el diámetro del Trommel, se puede calcular el volumen de la carga. La fuerza que produce la carga, se calcula utilizando una pulpa de densidad $1,6 \text{ [ton/m}^3\text{]}$ para aplicaciones de molinos SAG (carga pesada). Para Molinos de bolas de carga tipo normal y de carga tipo suave, se utilizará una densidad de pulpa de $1,7 \text{ [ton/m}^3\text{]}$, debido a la baja altura de la cama del material.

La carga se calcula utilizando un peso específico de pulpa de $1,6 \text{ [ton/m}^3\text{]}$ que se considera aceptable para los minerales con una densidad sólida de hasta $4 \text{ [ton/m}^3\text{]}$. Para densidades sobre $4 \text{ [ton/m}^3\text{]}$ de minerales, deberá ser discutido en conjunto con las áreas de Mill Lining Systems o Mineral Processing Grinding.

Observación:

Un cambio en la densidad del sólido de $2,7$ a $4,0 \text{ [ton/m}^3\text{]}$ al 60% de sólidos, da como resultado un cambio de la gravedad específica de la pulpa de $1,6$ a $1,8$, que es solamente un 12% de incremento en la fuerza ejercida por el material. Considerando que el esfuerzo causado por la fuerza de la carga está entre 15% y 40% (15% para un Trommel de 8 secciones y 40% para un Trommel de 20 secciones) del rango total de esfuerzo para la estructura. Por lo tanto, el aumento de 12% en la densidad de la pulpa, equivale a un rango de 2% a 5% de aumento en el esfuerzo, que se considera aceptable para la hipótesis del caso de carga conservador.

La Figura N° 19 se basa en el supuesto de que $L = 1,5 \times D$

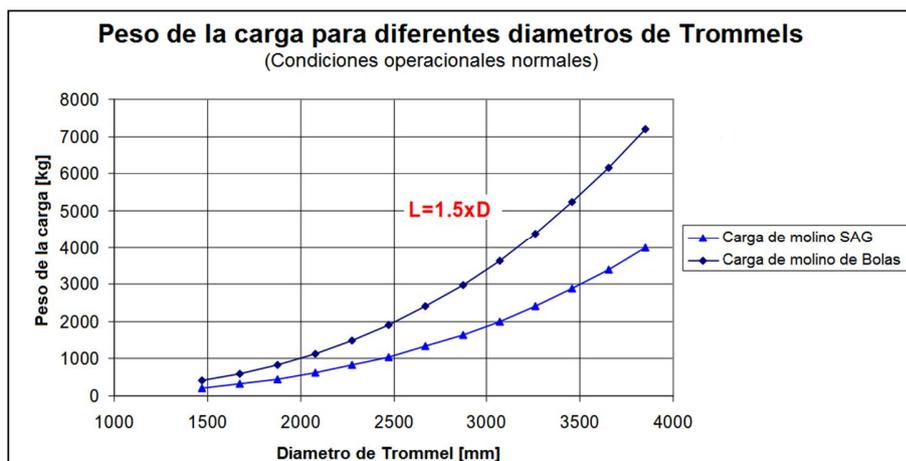


Figura N° 19: Fuerza de la carga utilizada en análisis EF de carga de molinos SAG.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

4.5.3.2 Caso de carga accidental.

Para condiciones de cargas accidentales, la condición de carga normal se incrementará aumentando la densidad de 50% (una sobrecarga típica debida a la rotura de parrillas). La condición accidental se utiliza para estimar la frecuencia con la que esta condición, puede ocurrir sin reducir la vida útil de la estructura de acero.

Suposición: El caso de carga por accidente se basa en la causa más común y probable de una condición de sobrecarga de la parrilla. La falla se produce dos veces al año como máximo (6 meses de vida útil de las parrillas) y la condición de sobrecarga será rectificada en un máximo de 12 horas, es decir la condición accidental podrá ocurrir 24 horas al año.

Se aplica la carga para condiciones accidentales (+50%) y se extrae el máximo y mínimo esfuerzo principal de las regiones de interés (es decir los más altos) y con eso, se tendrá el máximo esfuerzo alternante. Luego se calcula la vida útil estimada usando la suma acumulada de daños de Miner.

4.5.4 Condiciones de borde.

Dado que la estructura del Trommel tiene zonas que restringen su movimiento, es necesario definir condiciones de soporte que simulen este efecto y generen una condición de equilibrio (fuerzas y momentos de reacción) que impidan algún movimiento no deseado.

En simulación los soportes tienen distintas formulaciones, las cuales definen las restricciones que poseen los componentes presentes.

La brida interna no es modelada y las vigas se asumen fijas en la entrada, ver Figura N° 20.

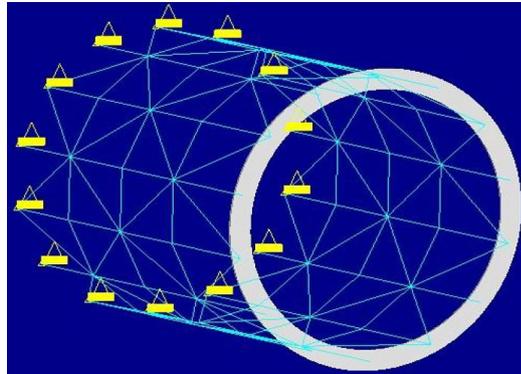


Figura N° 20: Las vigas longitudinales son fijas en la brida de entrada.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

4.5.5 Rango de esfuerzo admisible.

Para obtener el nivel de esfuerzo admisible, se utilizó la norma británica “Código de prácticas para el diseño sometido a fatiga y la evaluación de estructuras de acero”, *BS-7608:1993*. La categoría de la soldadura de unión es F2 y el rango de esfuerzo admisible, para esta categoría es de 35 [MPa], acorde a la tabla 14 de la página 34. Basado en el valor medio, menos el doble de la desviación estándar, se obtiene un factor de probabilidad nominal del 97,7%. Para esta categoría de soldadura, se construyó una curva $S_r - N$ característica a partir de variados ensayos prácticos la cual se llamó “estándar básico de diseño de la curva $S_r - N$ ”, grafico mostrado en la Figura N° 21.

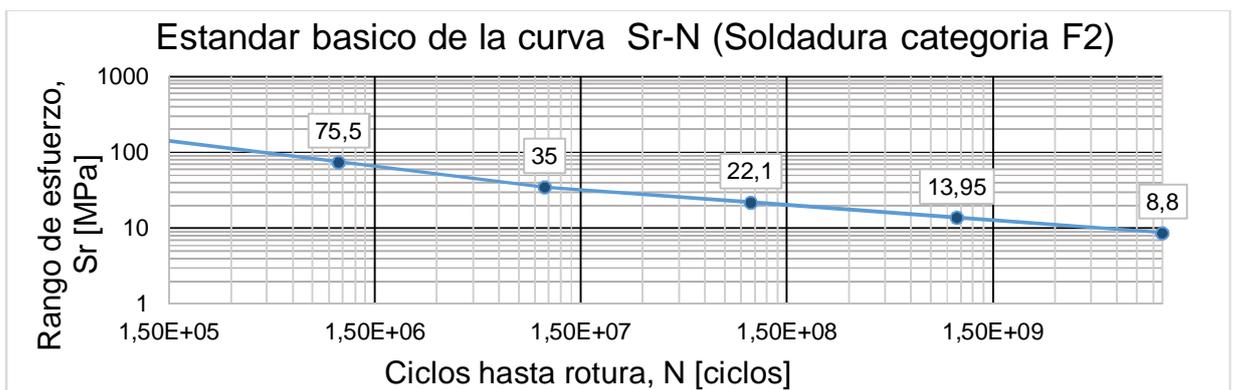


Figura N° 21: Estándar básico de la curva $S_r - N$ de la soldadura de categoría F2, con un factor de probabilidad nominal del 97,7%.

Fuente: (Metso Engineering Manual Modular Mill Trommel.)

S_0 : Es la amplitud constante del rango inicial de esfuerzos no propagables en $N = 10^7$ ciclos, para la soldadura clase F2.

$$S_0 = 35[MPa]$$

De acuerdo a la norma BS-7608:1993, la curva F2 es expresada en términos de \log_{10} siendo:

$$\log_{10}(N) = 12,09 - 0,2279 \cdot d - 3 \cdot \log_{10}(S_r) \quad \text{Ecuación A.1}$$

o

$$S_r(N) = \left(\frac{430.724.920.982}{N} \right)^{1/3} \quad \text{Ecuación A.2}$$

Donde d es el número de desviaciones estándar por debajo de la media, para la ecuación A.1.

En el gráfico de la Figura N° 21 se muestra que, para la curva S_r - N para soldadura de categoría F2, tiene un cambio de pendiente inversa de m a $(m + 2)$ en $N = 10^7$.

4.5.6 Uniones sometidas a una serie de esfuerzos.

El siguiente texto y ecuación, ha sido tomado de la norma británica “Código de prácticas para el diseño sometido a fatiga y la evaluación de estructuras de acero” BS-7608, párrafo 4.7.1 pagina 36:

“Para una unión sometida a un numero de repeticiones “ n_i ” de cada uno de varios rangos de esfuerzo “ S_{ri} “, debe determinarse el valor de “ n_i ” correspondiente a cada “ S_{ri} “. El número de ciclos de falla “ N_i ” en cada rango de esfuerzo, “ S_{ri} “, debe determinarse a partir de la curva básica $S - N$, modificada según sea necesario de acuerdo con 4.3, para la clase de unión correspondiente a la probabilidad de falla seleccionada.”

La suma acumulativa de daños de Miner, debe cumplir lo siguiente:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad \text{Ecuación A.3}$$

- Condiciones normales de operación:
 - $S_{r,normal}$ determinado del análisis EF
 - N_{normal} Calculado usando la ecuación A.2, con la pendiente inversa $(m + 2)$
 - n_{normal} Calculado usando la ecuación A.3
- Condiciones accidentales de operación ($L/3$ del largo del Trommel, desprotegido):
 - $S_{r,accidental}$ determinado del análisis EF
 - $N_{accidental}$ Calculado usando la ecuación A.2
 - $n_{accidental}$ Calculado usando la suposición: “El caso de carga accidental puede ocurrir 5 horas/mes durante la vida de diseño estimada”

“Si todos los valores de S_{r_i} son menores que S_0 el fenómeno de fatiga, no es necesario que se considerado. Sin embargo, si cualquier valor de S_{r_i} supera S_0 , todos los rangos de esfuerzo, incluyendo aquellos por debajo de S_0 , deberán ser incluidos en la suma.”, párrafo 4.7.1 de la página 36 de la norma BS-7608.

Utilizando la técnica mencionada anteriormente y una vida esperada de fatiga de 10 años (aproximadamente 50×10^6 ciclos a 10 RPM) el esfuerzo de diseño debería ser de 25,4 [MPa], si el rango de esfuerzo accidental es superior a 35 [MPa] (soldadura de clase F2). Este enfoque es conservador considerando todas los Trommels instalados y diseñados con este esfuerzo admisible de 35 [MPa].

Los Trommels en este manual son diseñados utilizando la misma aproximación que el Trommel de Batu Hijau. El cálculo es basado en una curva de fatiga que es horizontal por encima de los 107 [ciclos], es decir que el número de ciclos de vida infinita se toma con 107 [ciclos]. Para los Trommels con valores de esfuerzo de sobrecarga superiores a los límites de fatiga permitidos a largo plazo (S_0), se debe obtener un nuevo límite admisible de fatiga a largo plazo (utilizando la suma de Miner) teniendo en cuenta el daño por fatiga causado por la sobrecarga a corto plazo. Con una vida a fatiga de 10 años, la condición accidental puede ocurrir por 240 horas (10 [años] x 24 [horas/año]), el cual es igual a:

- Trommels de molinos SAG: $14,4 \times 10^3$ [ciclos/día] (10 RPM)

4.5.7 Ejemplo de cálculo para molinos SAG.

Carga normal

Rango de esfuerzo: $S_{r,normal} = 35[MPa]$

Tiempo $n_{normal} = 1 \times 10^7[ciclos]$

operacional:

(Obtenido al ingresar a la curva $S - N$ con los 35[MPa] , para soldadura clase F2)

Carga accidental

Rango de esfuerzo: $S_{r,accidental} = 1,5 \times 35$
 $= 52,5[MPa]$

$$n_{accidental} = 10 \frac{ciclos}{min} * 60 \frac{min}{h} * 24 \frac{h}{año} * 10 años = 1,44 \times 10^5 [ciclos]$$

Tiempo $n_{accidental} = 1,44 \times 10^5 [ciclos]$

operacional:

Ciclos de falla: $N_{accidental} = 2,977 \times 10^6 [ciclos]$

(Obtenido al ingresar a la curva $S - N$ con los 52,5[MPa], para soldadura clase F2)

Suma de Miner

$$\frac{1 \times 10^7}{N_{normal}} + \frac{1,44 \times 10^5}{2,977 \times 10^6} \leq 1$$

$$\Rightarrow N_{normal} = 10,508 \times 10^6 [ciclos] (\text{Usando la pendiente } m) \Rightarrow S_o = 34,5 [MPa]$$

**5. REVISION DEL TROMMEL CON FALLA CATASTROFICA DE ACUERDO A
LOS CRITERIOS DE MANUAL METSO.**

5.1 Especificaciones de fabricación.

Las especificaciones de fabricación, se encuentran explícitamente dentro del plano desarrollado para la fabricación de la estructura. El plano utilizado para la fabricación, fue desarrollado en conjunto entre la maestranza y la oficina de ingeniería de Metso Perú.

Si bien es un plano de ensamblaje, no se muestra dentro de este, la norma de soldadura que deberá ser utilizada, para asegurar un estándar mínimo de calidad en la fabricación, lo que si se encuentra es la simbología de paralelismo, concentricidad, perpendicularidad y acabado superficial para las zonas que deberán acoplar con otra pieza en forma armoniosa. También se encuentra, una tabla de tolerancias admisibles en la fabricación, de acuerdo a la norma *DIN 7168* la cual especifica rangos de desviaciones admisibles de acuerdo a las dimensiones inspeccionadas.

Para la configuración de la estructura se utilizaron dimensiones de acuerdo a la disponibilidad de perfiles en el mercado metalmecánico del Perú, estando las dimensiones fuera de lo especificado por el manual de diseño de Trommel de Metso, utilizándose en algunos casos, perfiles diferentes, en la Tabla N° 9 se muestra la comparación a lo recomendado por el manual.

| | Numero de secciones | Viga longitudinal [mm] | Viga intermedia [mm] | Dimensión diagonal [mm] | Espesor Brida interior/exterior [mm] |
|------------|---------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Plano Perú | 16 | 152,4 x 76,2 x 9,5 | 127 x 50,8 x 6,35 | 76,2 x 25,4 | 56/26 |
| Manual | 16 | 140 x 80 x 6,3 | 100 x 50 x 6,3 | Ø 50 | 50/25 |

Tabla N° 9: Comparativo de perfiles en cuanto a sus dimensiones.

(Fuente: Elaboración propia.)

A continuación se mostrará en la comparación de las propiedades de los perfiles, ya sea en cuanto a su momento de inercia y al peso por longitud para poder saber la variación en cuanto a porcentaje, respecto a los que recomienda el manual. Una vez sean obtenidos los resultados del análisis de elementos finitos, se podrá concluir respecto a estos resultados obtenidos.

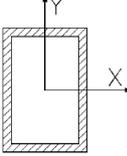
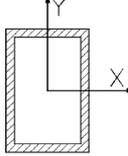
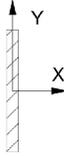
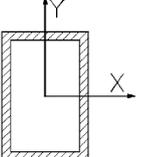
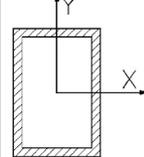
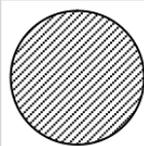
| Fuente información | descripción | Viga longitudinal | Viga intermedia | Dimensión diagonal |
|--------------------|---|--|---|--|
| Plano Perú | Forma Perfil |  |  |  |
| | Designación | 6[in]x3[in]x3/8[in] | 5[in]x2[in]x1/4[in] | 3[in]x1[in] |
| | Momento de Inercia x 10 ⁴ [mm ⁴] | $I_x = 989$ $I_y = 323$ | $I_x = 352$ $I_y = 80$ | $I_x = 93$ $I_y = 10$ |
| | Peso por unidad de largo [kg/m] | 29,52 | 15,654 | 15,192 |
| Manual | Forma Perfil |  |  |  |
| | Designación | VKR 140x80x6.3 | VKR 100x50x6.3 | Ø50 |
| | Momento de Inercia x 10 ⁴ [mm ⁴] | $I_x = 646$ $I_y = 265$ | $I_x = 197$ $I_y = 63$ | $I_x = I_y = 30,68$ |
| | Peso por unidad de largo [kg/m] | 18,2 | 14,3 | 15,4 |

Tabla N° 10: Comparativo de perfiles, momento de inercia y peso

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Tabla N° 10, se muestran las siguientes diferencias en porcentaje:

- Al realizar el cambio del VKR 140 x 80 x 6.3 a 6 [pulg] x 3 [pulg] x 0.375[pulg] (152,4 x 76 x 9,5[mm]) en un Trommel de 16 secciones.
 I_x : +53%, I_y : +21%, *peso*: +62%
- Cambiando de VKR 100 x 50 x 6.3 a 5 [pulg] x 2 [pulg] x 0.25 [pulg] (127 x 50,8 x 6,3 [mm]) en un.
 I_x : + 78%, I_y : +27%, *peso*: +9,5%
- Cambiando el diámetro de la diagonal de Ø50 [mm], (76,2 x 25,4 [mm]).
 I_x : +303%, I_y : -67%, *peso*: -1,3%

5.2 Estudio de elementos finitos.

5.2.1 Modelación.

La estructura se simuló mediante un modelo cuasi-estático de elementos finitos, con un comportamiento elástico-lineal, debido a:

- Los materiales utilizados cumplen con la Ley de Hooke, esto es, la tensión es directamente proporcional a la deformación unitaria.
- Los desplazamientos inducidos son lo suficientemente pequeños como para ignorar el cambio en la rigidez causado por la carga.
- Las condiciones de contorno no varían durante la aplicación de las cargas. Las cargas son constantes en cuanto a magnitud, dirección y distribución (ver Figura N° 22). Además estas no cambian mientras se deforma el modelo.

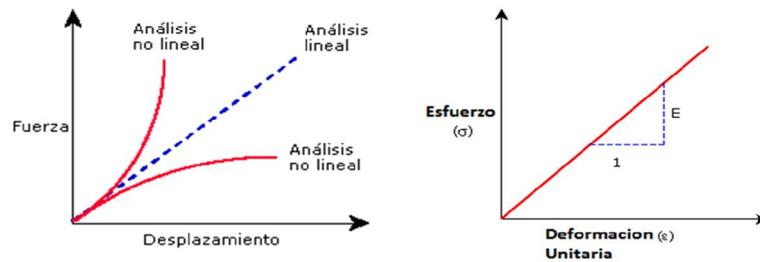


Figura N° 22: Gráfico de comportamiento de análisis (izquierda), diagrama tensión v/s deformación unitaria.

(Fuente: Ayuda SolidWorks.)

El modelo de elementos finitos fue construido en Spaceclaim y calculado en Ansys workbench V17.2. En la Figura N° 23 se muestra el modelo CAD 3D confeccionado por el departamento de Ingeniería de Metso Perú en el software Autodesk Inventor.

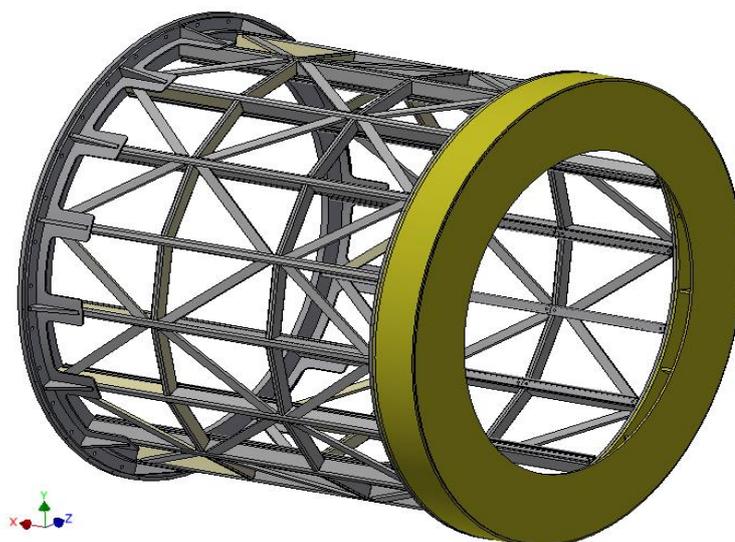


Figura N° 23: Modelo CAD 3D Trommel.

(Fuente: Elaboración propia.)

A partir de la geometría recibida, se deberá construir un modelo de elementos finitos del tipo placa 3D y solamente se considera la estructura, lo mostrado de color amarillo, llamado “Ball catcher” se considerará en el modelo como una masa concentrada, por no tener ningún efecto más allá del aporte en cuanto peso en el sector más alejado de la zona apernada al molino.

5.2.2 Propiedades de los materiales.

Las propiedades de los materiales asignados a las partes del modelo y que fueron utilizados para el análisis se muestran en la Tabla N° 11.

| | Material | E [MPa] | ν [-] | ρ [t/m ³] | Límite de fluencia [MPa] | Esfuerzo Ultimo [MPa] |
|-----------------------------|--------------------|---------|-----------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Vigas Longitudinales | ASTM A500 Gr.B (*) | 205710 | 0,28 | 7,8 | 290 | 400 |
| Vigas intermedias | ASTM A500 Gr.B (*) | 205710 | 0,28 | 7,8 | 290 | 400 |
| Brida Interna | ASTM A-36 (*) | 200000 | 0,26 | 7,8 | 250 | 400 |
| Brida Externa | ASTM A-36 (*) | 200000 | 0,26 | 7,8 | 250 | 400 |
| Diagonales | ASTM A-36 (*) | 200000 | 0,26 | 7,8 | 250 | 400 |

(*) ASM Metals Reference Book, Third edition, Michael Baucchio, Ed. ASM International, Materials Park, OH, 1993.

Tabla N° 11. Materiales utilizados en el modelo de elementos finitos.

(Fuente: MatWeb.)

La aplicación de las propiedades al modelo se muestra en la Figura N° 24.

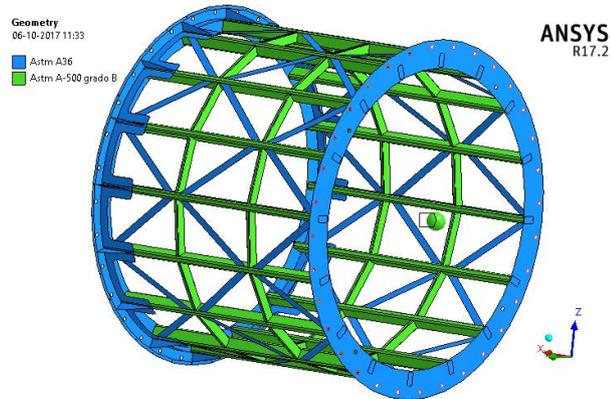


Figura N° 24: Materiales aplicados al modelo de elementos finitos.

(Fuente: Elaboración propia.)

Para considerar los pesos reales, se aplicó un factor de corrección en las densidades del modelo que incluirá el peso de; revestimiento de caucho, perfiles de anclaje de mallas, mallas, peso propio de la estructura y un 10% extra del peso de la estructura, que representará la soldadura. En la Figura N° 25 se muestra la comparación entre los pesos reales involucrados en la estructura, versus los pesos adecuados por el factor en el modelo de elementos finitos.

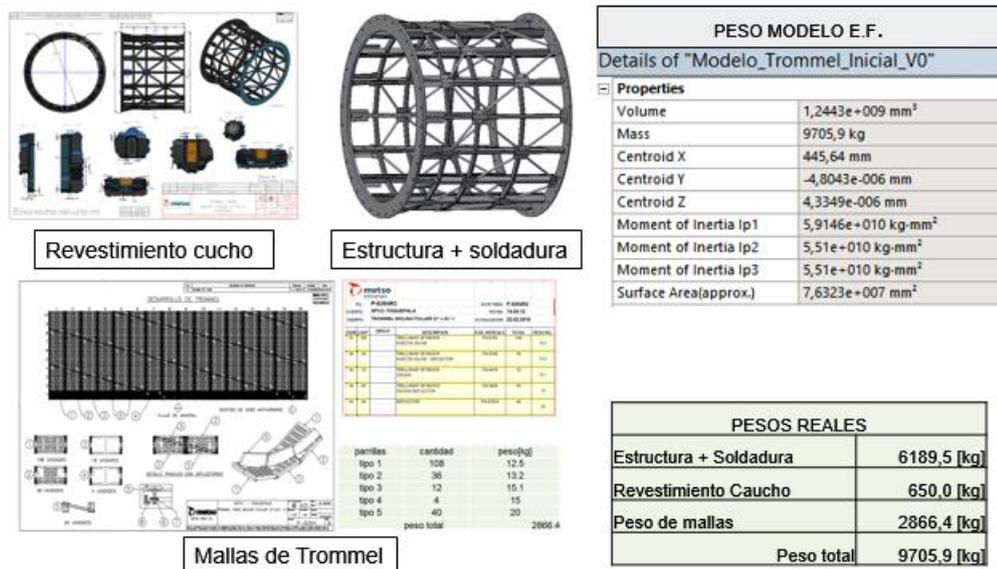


Figura N° 25: Pesos considerados en modelo de elementos finitos.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.3 Discretización.

Basado en la geometría descrita en el capítulo 5.2.1 de esta tesis, se procedió a realizar una discretización del modelo de elementos finitos. Para los anillos y estructura en general, se decidió utilizar debido al alto grado de precisión y al menor requerimiento computacional, un modelo del tipo placa 3D con elementos cuadrangulares y triangulares de primer orden combinados (Figura N° 26).

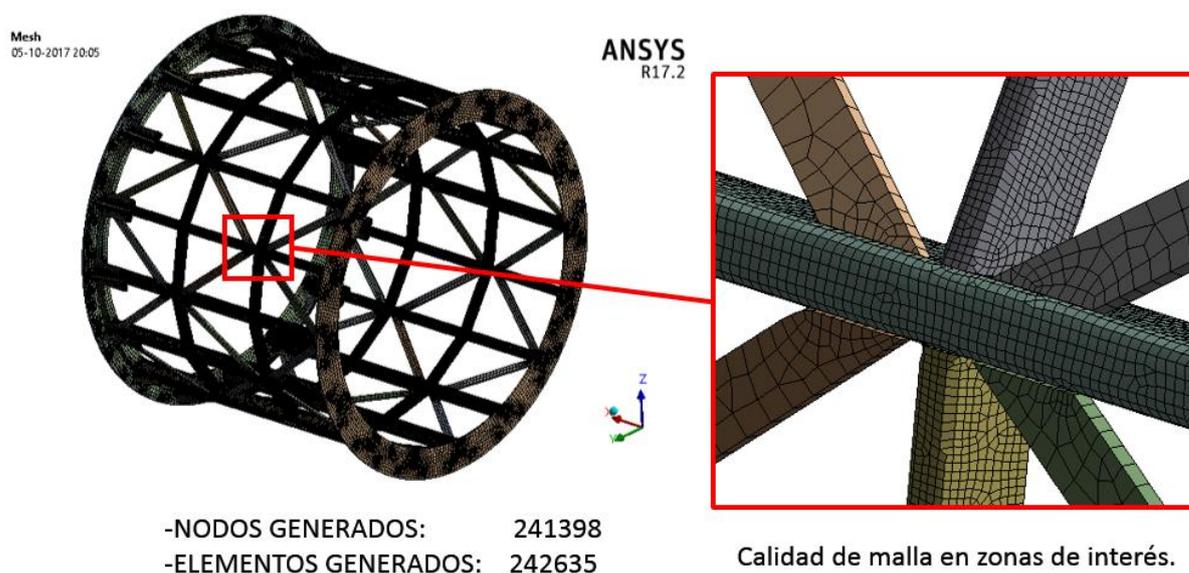


Figura N° 26: Discretización del modelo 3D del Trommel.

(Fuente: Elaboración propia.)

De los elementos generados para la malla, el de mayor dimensión tiene 50 [mm] y el de menor 10[mm], el rango promedio de la calidad de la malla tiene 0,83, siendo una calidad aceptable mayor a 0,5 de acuerdo al manual del software Ansys. En la Figura N° 27 se muestra el rango de calidad para los elementos generados, mostrándose también la cantidad de elementos triangulares como los cuadrangulares de primer orden.

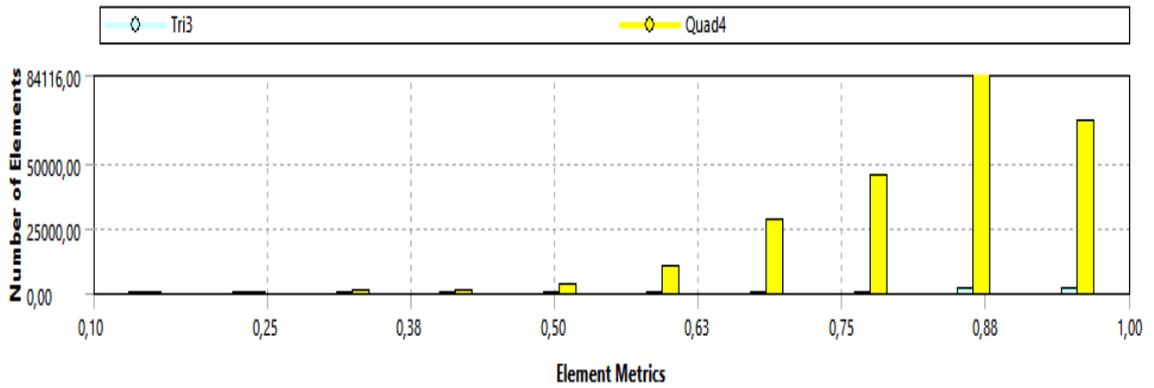


Figura N° 27: Rango de calidad para los elementos generados.

(Fuente: Elaboración propia.)

Al utilizar un modelo de placa 3D, se deben asignar espesores a cada parte del Trommel, en la Figura N° 28 se muestran los espesores asignados al modelo de elementos finitos.

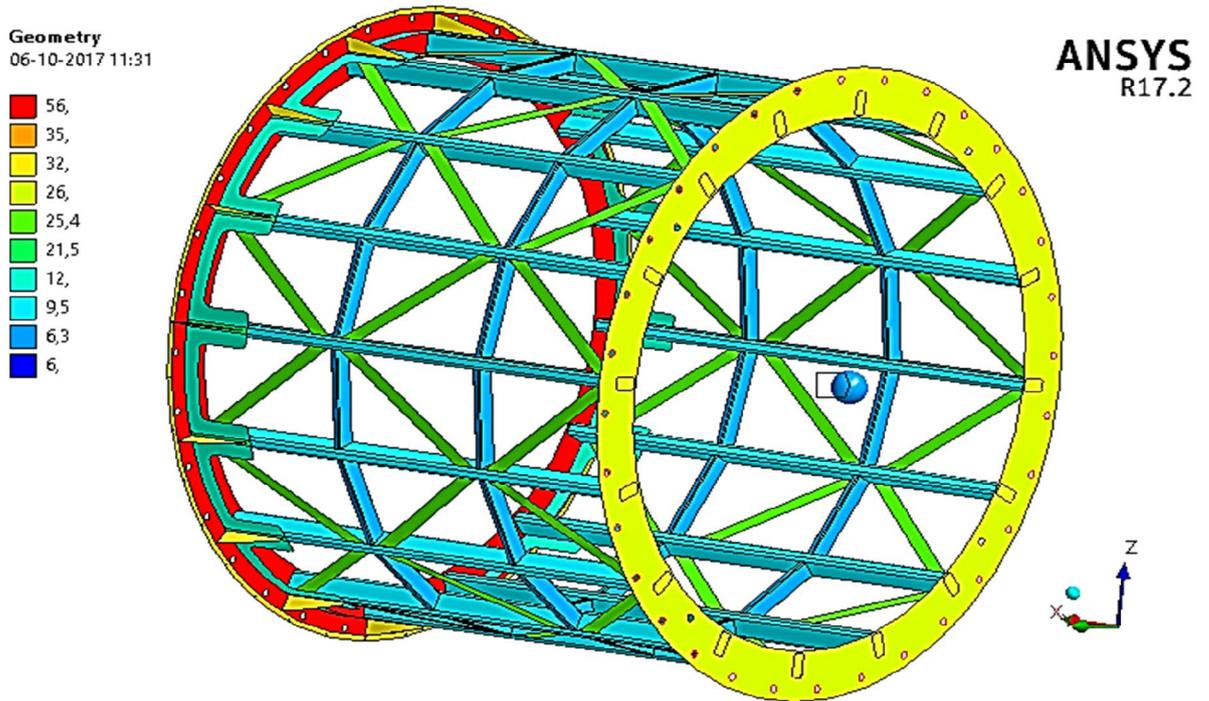


Figura N° 28: Espesores asignados al modelo de elementos finitos.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.4 Condiciones de borde.

5.2.4.1 Fijaciones de perno.

Las fijaciones de pernos para unir al molino SAG, fueron simuladas con condiciones de fijación en todas sus direcciones y traslaciones, aplicadas a la perforación, ver Figura N° 29.

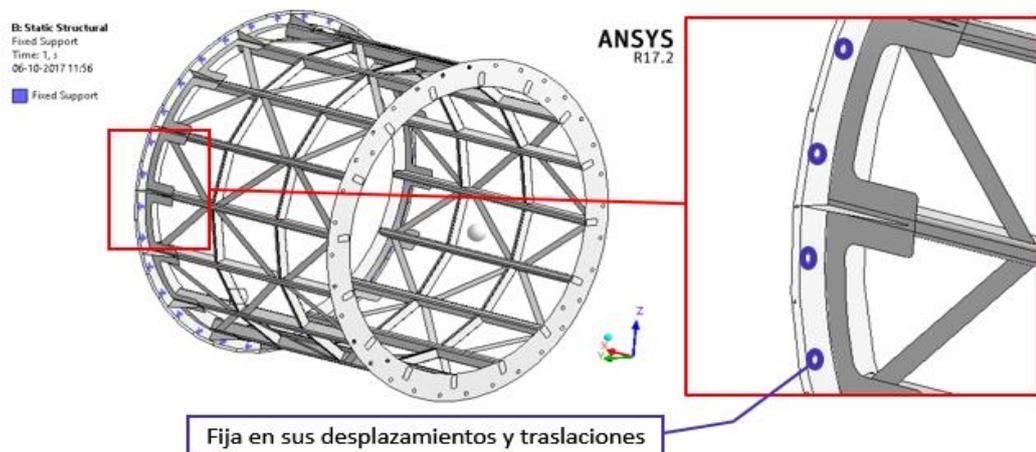


Figura N° 29: Fijaciones de Perno.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.4.2 Condición de apoyo.

Se considera la mitad de la superficie del anillo de fijación al molino SAG, como apoyado sin fricción, para tener una condición más desfavorable a la real, mostrado en la Figura N° 30.

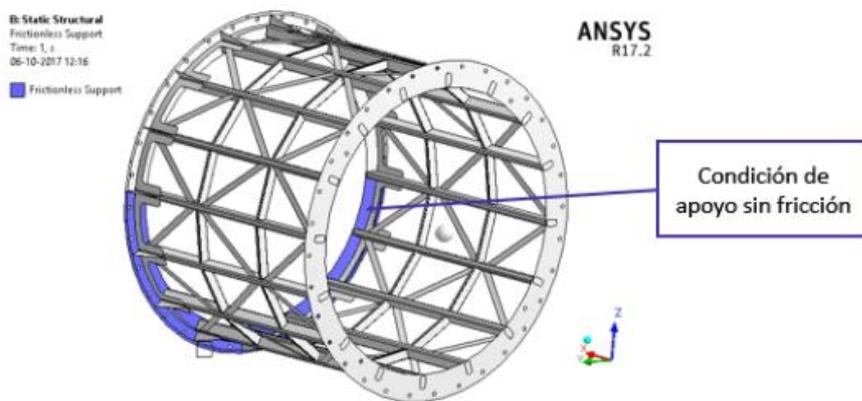


Figura N° 30: Condición de apoyo en el modelo de elementos finitos.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.4.3 Aceleración de gravedad.

Para considerar el peso propio de la estructura en la modelación, se aplicó la aceleración de gravedad de $9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ en la dirección vertical del eje Z, mostrado en la Figura N° 31.

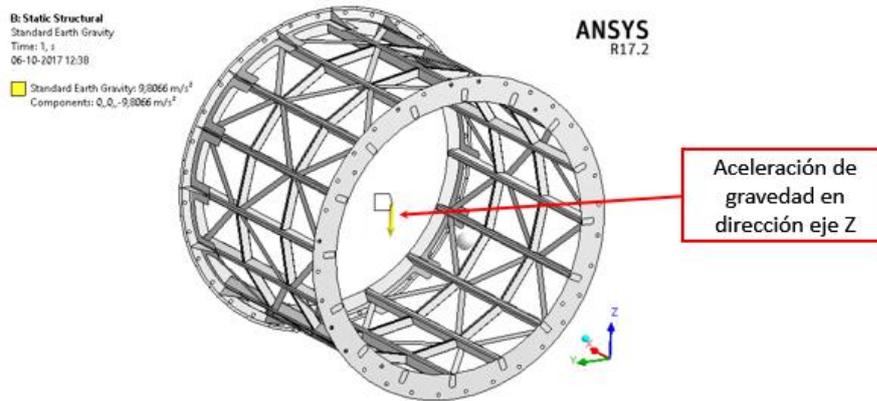


Figura N° 31: Aceleración de gravedad.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.4.4 Peso del Ball Catcher.

Para ambos casos se agregará además como una masa concentrada, el peso del “Ball Catcher”, el cual se unirá a las perforaciones del anillo de salida mediante elementos de cuerpos rígidos, tal como se muestra en la Figura N° 32.

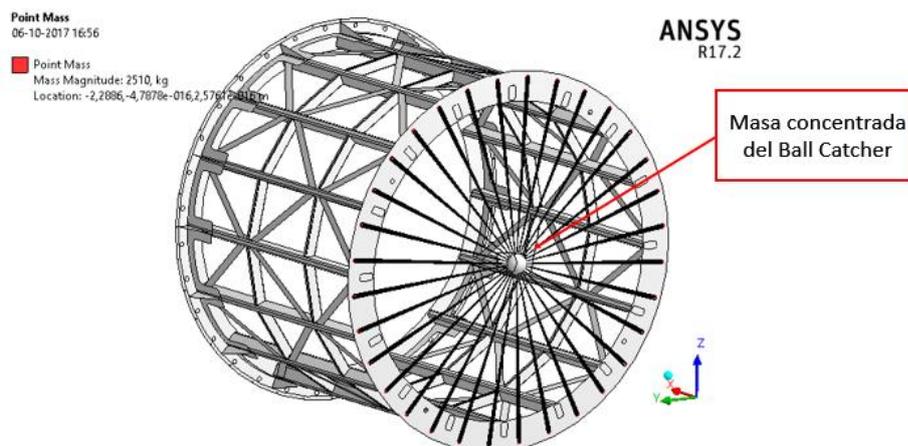


Figura N° 32: Peso del Ball Catcher, considerado como una masa concentrada.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.5 Casos de carga.

De acuerdo al manual, se realizaron dos casos de carga, para evaluar la estructura y de los cuales, se obtendrán los máximos valores en puntos críticos observados, para los resultados de los esfuerzos máximo principal y mínimo principal.

5.2.5.1 Caso 1: Carga de operación normal.

Para el cálculo de la carga de operación, se debe utilizar el gráfico mostrado en la Figura N° 18 del capítulo 4, sección 4.5.3.1, sacando la máxima altura de la carga de acuerdo al diámetro del Trommel. En la Figura N° 33 se muestra el valor obtenido.

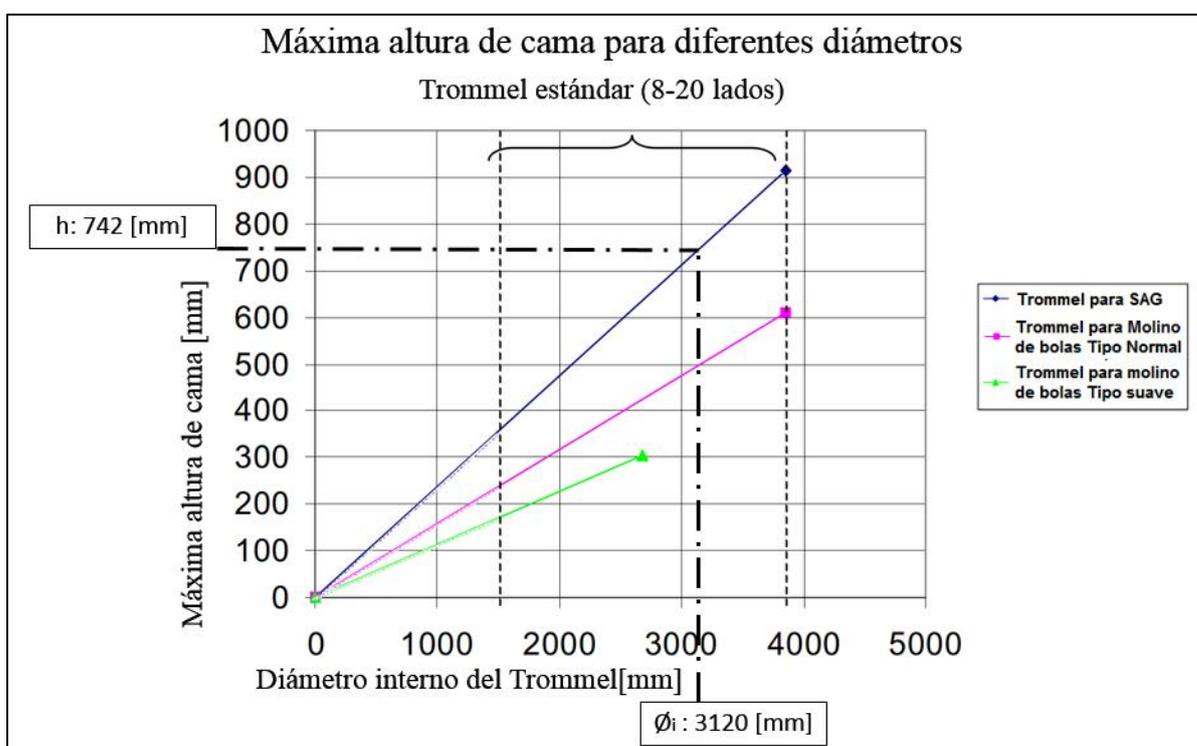


Figura N° 33: Altura de cama para calcular la carga.

(Fuente: Elaboración propia.)

Luego de haber sido obtenida la altura de la cama, se ingresó en el modelo CAD (Figura N° 34) y de acuerdo a lo recomendado por el manual, se calculó la carga a la que está sometida el Trommel.

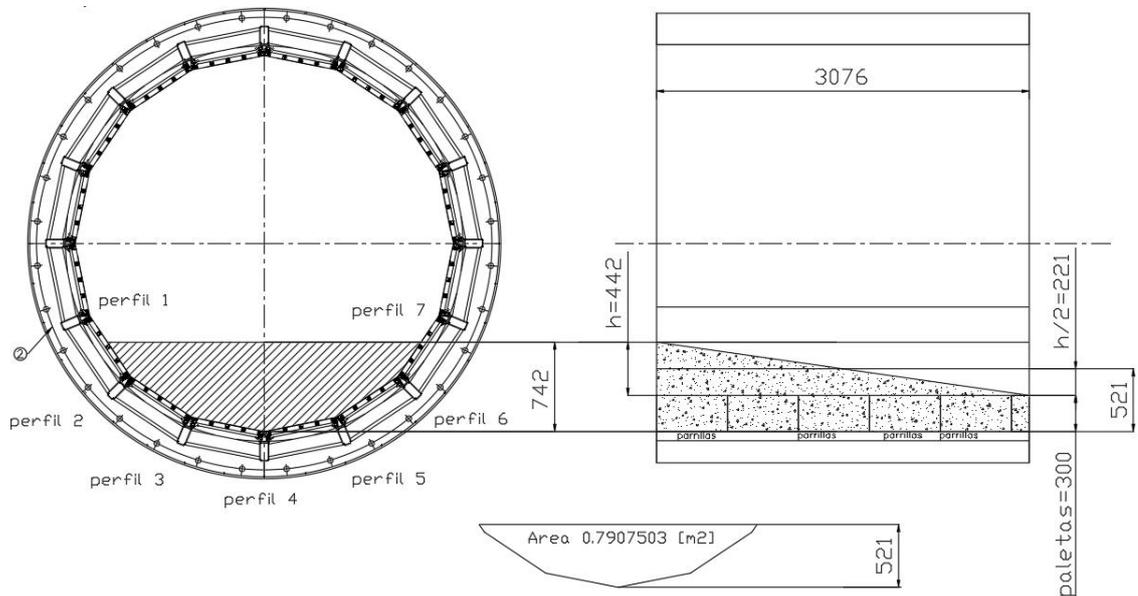


Figura N° 34: Estimación de la carga de operación del Trommel.

(Fuente: Elaboración propia.)

Al haber sido obtenida el área, se deberá multiplicar por la densidad aparente de la pulpa y el largo del Trommel, obteniendo así la carga total estimada de operación normal, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$W_{estimada} = A \times L \times \rho_{aparente}$$

Donde:

$W_{estimada}$: Carga estimada dentro del Trommel [kg]

A : Área proyectada en el modelo CAD en [m²]

L : Largo del Trommel [mm]

$\rho_{aparente}$: Densidad aparente de la pulpa [ton/m³]

Luego se tiene:

$$W_{estimada} = 0,7908 [m^2] \times 3076[mm] \times 1,6 [ton/m^3]$$

$$W_{estimada} = 3892 [kg] \approx 38180,5[N]$$

En la Figura N° 35 se muestra la carga de operación normal aplicada a los perfiles que sostienen las parrillas y que están en contacto con el material.

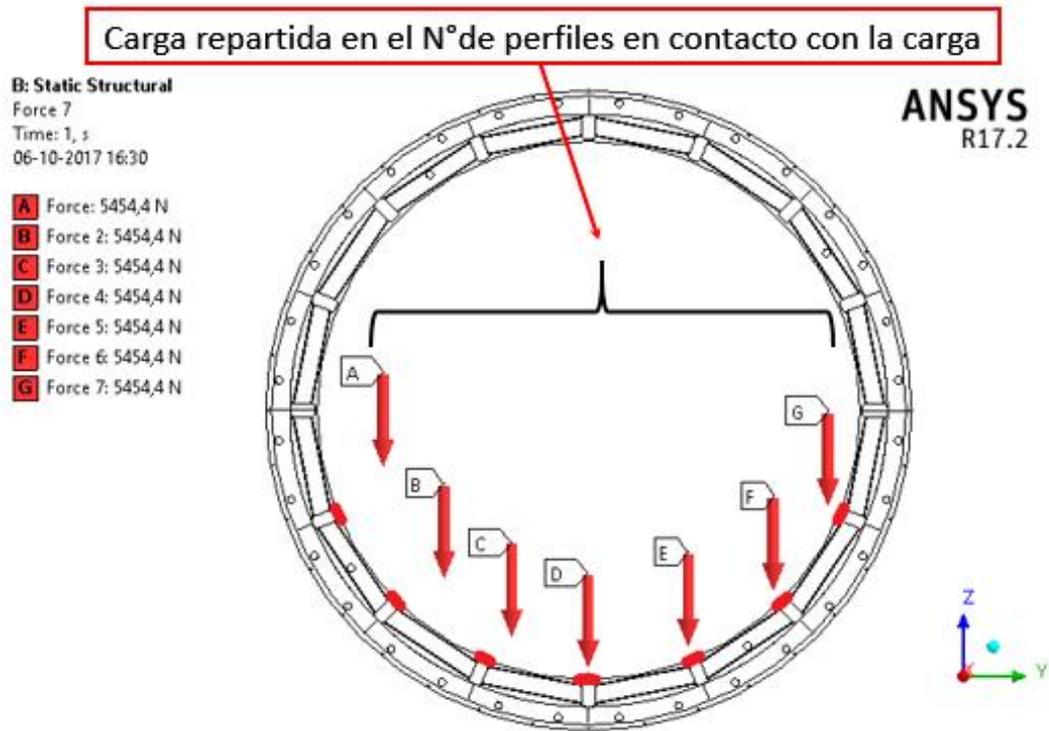


Figura N° 35: Carga repartida en los perfiles para caso de carga normal de operación.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.5.2 Caso 2: Carga accidental.

Para el caso de carga accidental, se consideró un aumento en la densidad aparente de la pulpa en un 50%, por lo tanto la fórmula para el cálculo de la carga ahora queda así:

$$W_{estimada} = A \times L \times (\rho_{aparente} \times 1,5)$$

Donde luego se tendrá el siguiente resultado:

$$W_{estimada} = 0,7908 [m^2] \times 3076 [mm] \times (1,6 [ton/m^3] \times 1,5)$$

$$W_{estimada} = 5830 [kg] \approx 52270,8 [N]$$

En la Figura N° 36 se muestra la carga de operación accidental aplicada a los perfiles que sostienen las parrillas y que están en contacto con el material.

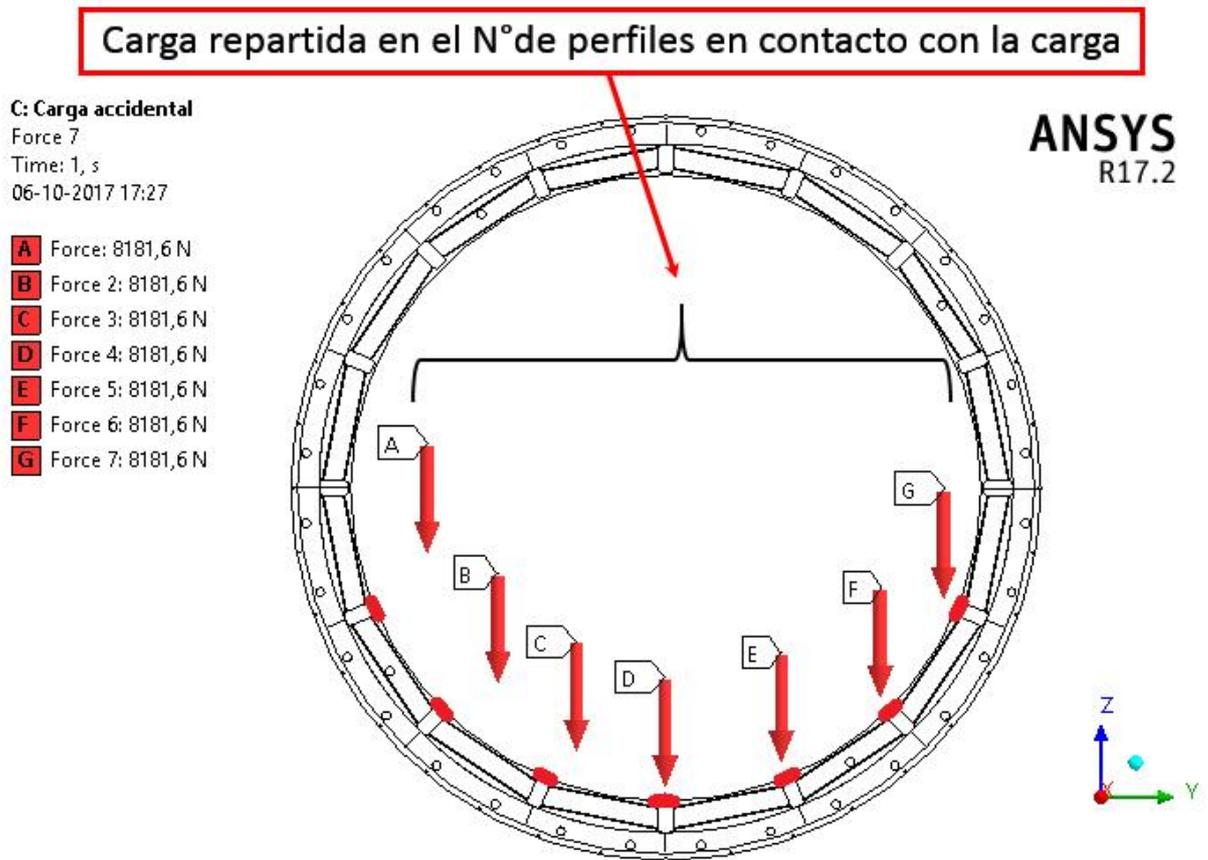


Figura N° 36: Carga repartida en los perfiles para caso de carga accidental.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.6 Resultados.

Los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos aplicado a la estructura del Trommel, se presentan a continuación.

5.2.6.1 Resultado caso 1: Carga de operación normal.

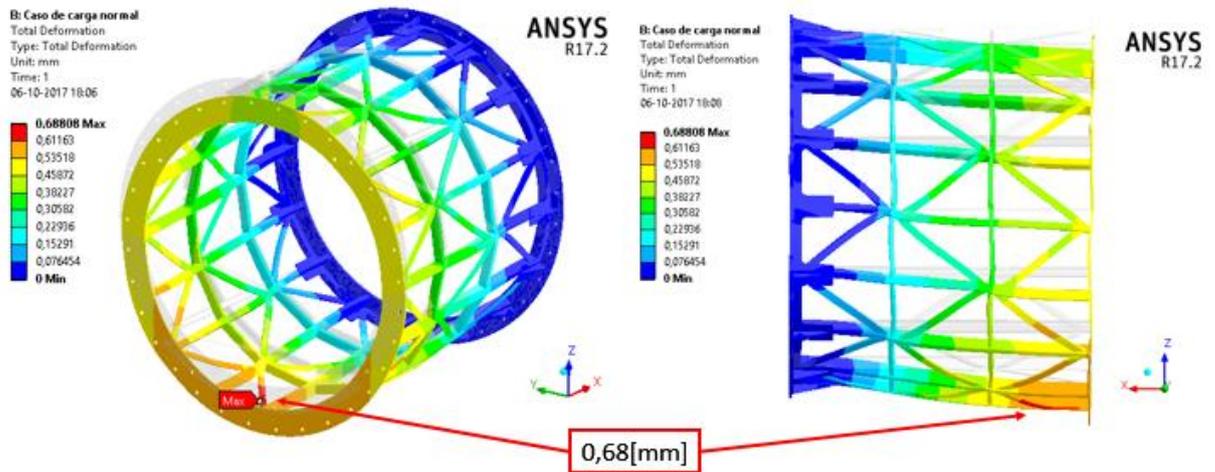


Figura N° 37: Caso 1: Desplazamiento vertical.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 37, se pueden observar los desplazamientos verticales para el caso 1, ubicado en la zona inferior del Trommel, específicamente en la diagonal donde producto de la carga aplicada se alcanzó un desplazamiento máximo de 0,68[mm]. Cabe destacar que la deformación esta aumentada a 150X para poder ser visualizada.

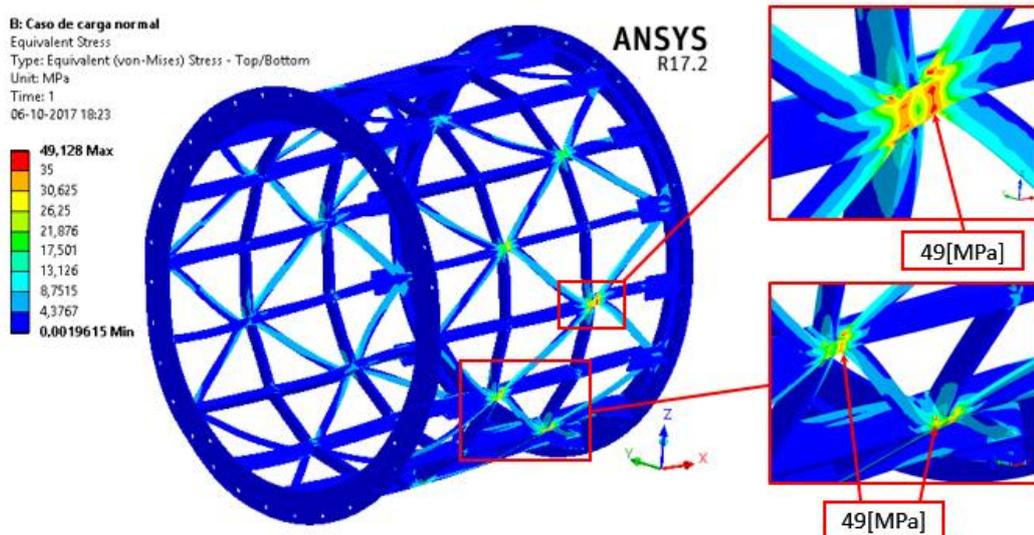


Figura N° 38: Caso 1: Esfuerzo equivalente de von-Mises.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 38 se muestra el esfuerzo de von-Mises obtenido para el caso 1, donde el máximo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de los perfiles longitudinales con los transversales y las diagonales, llegando su valor máximo a 49[MPa].

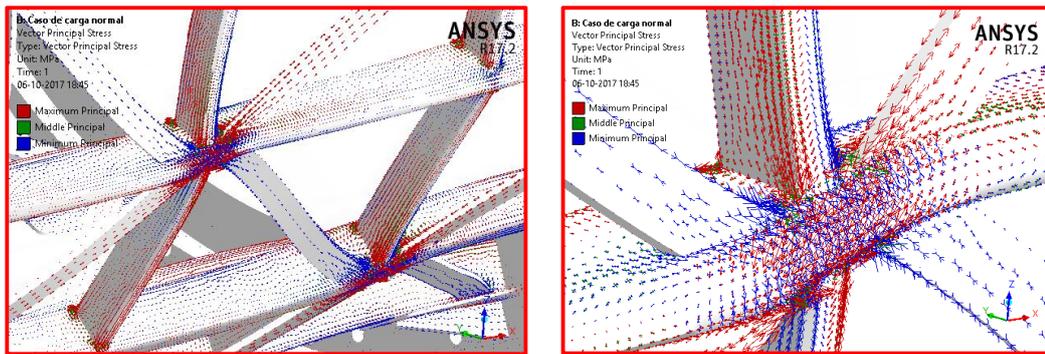


Figura N° 39: Caso 1: Estado de esfuerzo en zonas críticas.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 39 se muestran los estados de esfuerzos a los cuales están sometidas estas intersecciones, diferenciándose los altos de los bajos por la intensidad de las flechas. La combinación de estados tractivos (rojo) y compresivos (azul), se muestra que es mayor para el cuerpo de las diagonales y los perfiles.

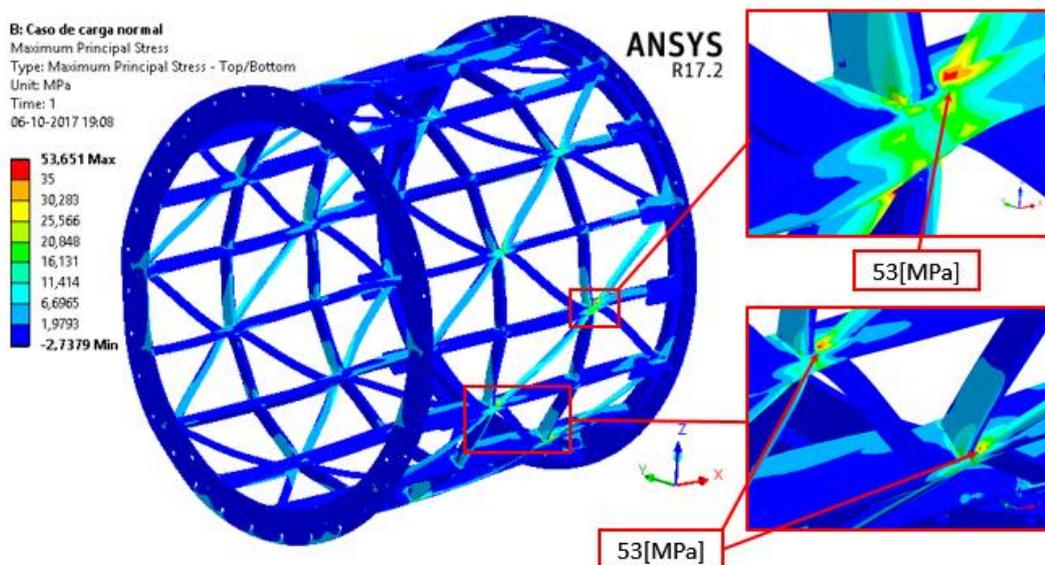


Figura N° 40: Caso 1: Esfuerzo máximo principal.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 40 se muestra el esfuerzo máximo principal obtenido para el caso 1, donde el máximo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de los perfiles longitudinales con los transversales, específicamente en la base de las diagonales, llegando su valor máximo a 53[MPa].

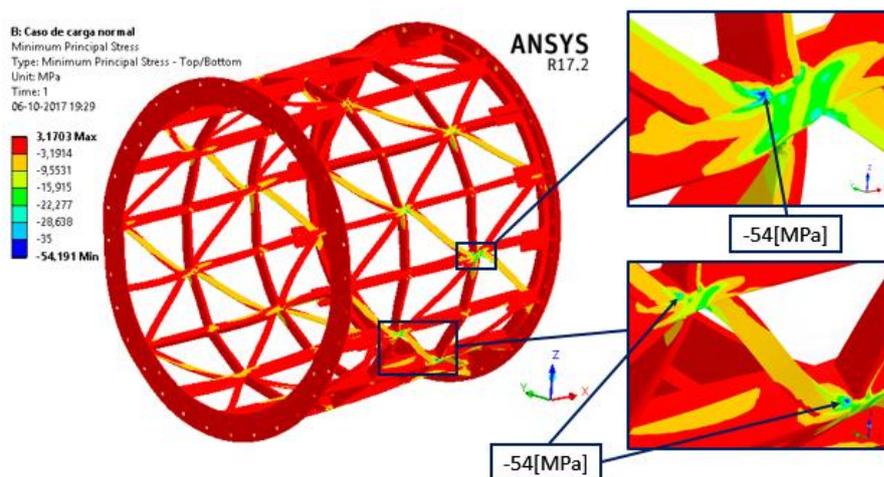


Figura N° 41: Caso 1: Esfuerzo mínimo principal.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 41 se muestra el esfuerzo mínimo principal obtenido para el caso 1, donde el mínimo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de los perfiles longitudinales con los transversales, específicamente en la base de las diagonales, llegando su valor máximo calculado a -54[MPa]. Al analizar el resultado, la zona crítica se obtiene en la diagonal del otro lado, lo que indica que al funcionar en ciclos rotativos, este lado estará en el ciclo inverso, sometido a tracción.

5.2.6.2 Resultado caso 2: Carga accidental.

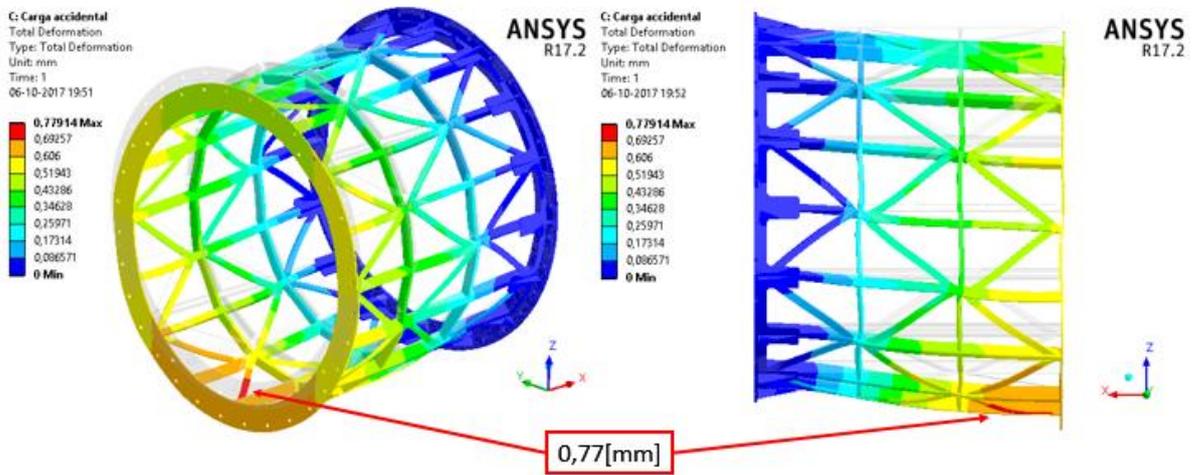


Figura N° 42: Caso 2: Desplazamiento vertical.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 42, se pueden observar los desplazamientos verticales para el caso 2, ubicado en la zona inferior del Trommel, específicamente en la diagonal donde producto de la carga aplicada, se alcanzó un desplazamiento máximo de 0,77[mm]. Cabe destacar que la deformación esta aumentada a 150X para poder ser visualizada.

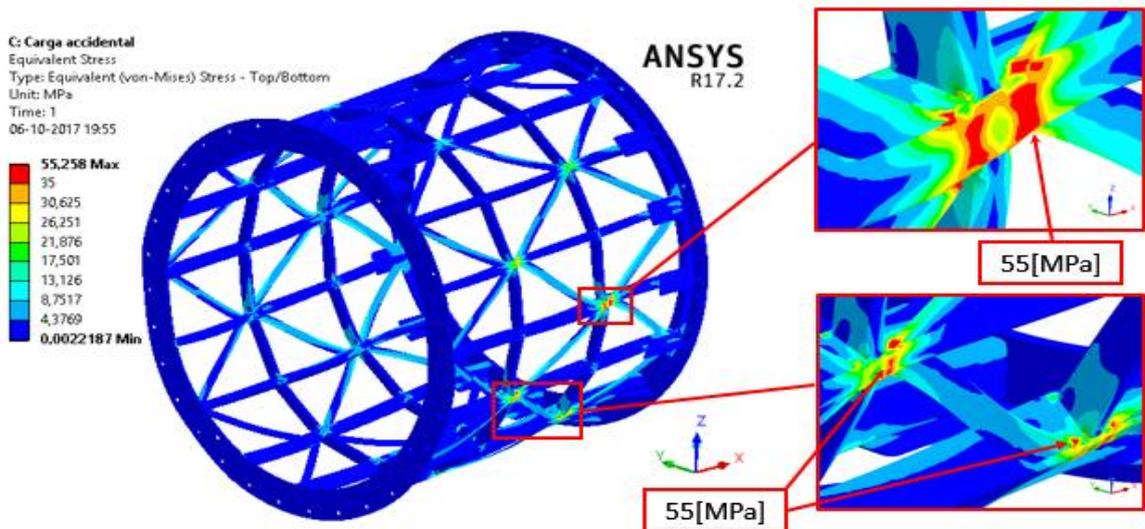


Figura N° 43: Caso 2: Esfuerzo equivalente de von-Mises.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 43 se muestra el esfuerzo de von-Mises obtenido para el caso 2, donde el máximo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de los perfiles longitudinales con los transversales y las diagonales, llegando su valor máximo a 55[MPa].

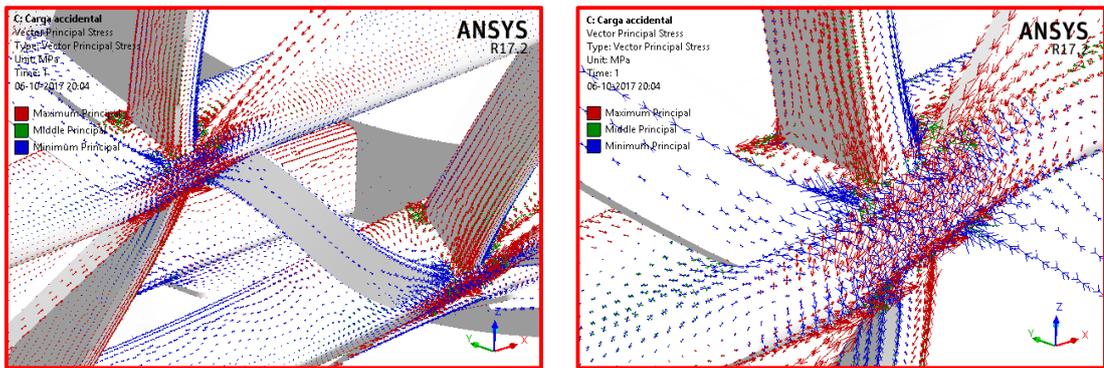


Figura N° 44: Caso 2: Estado de esfuerzo en zonas críticas.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 44 se muestran los estados de esfuerzos a los cuales están sometidas estas intersecciones, diferenciándose los mayores de los menores resultados, por la intensidad de las flechas. Además se muestra, la combinación de estados tractivos (color rojo) y compresivos (color azul).

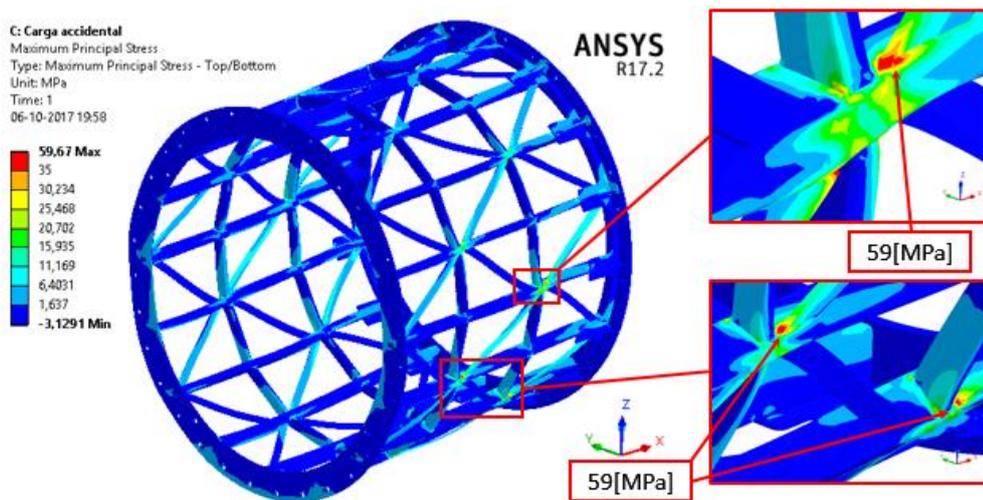


Figura N° 45: Caso 2: Esfuerzo máximo principal.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 45 se muestra el esfuerzo máximo principal obtenido para el caso 2, donde el máximo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de los perfiles longitudinales con los transversales, específicamente en la base de las diagonales, llegando su valor máximo a 59[MPa].

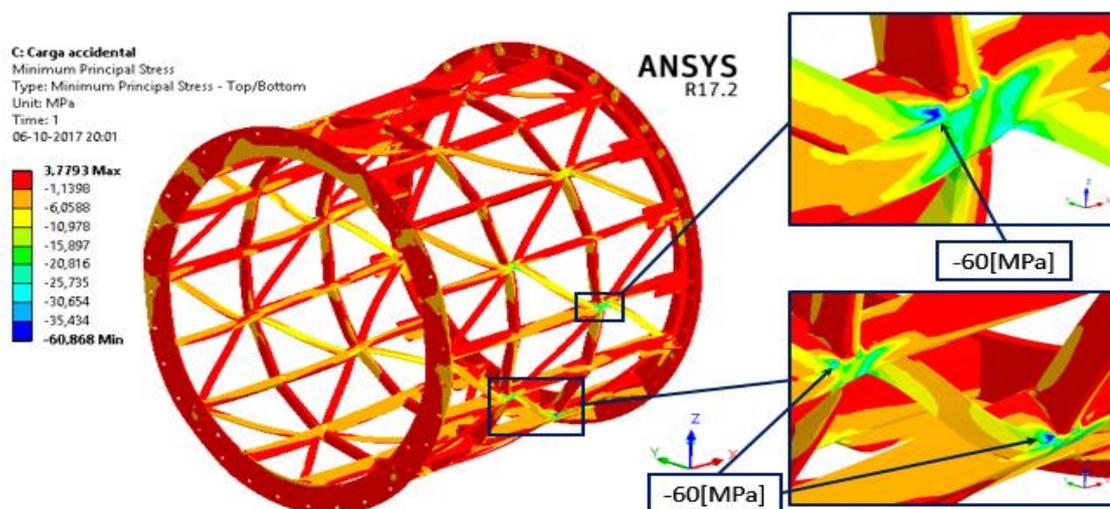


Figura N° 46: Caso 2: Esfuerzo mínimo principal.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 46 se muestra el esfuerzo mínimo principal obtenido para el caso 2, donde el mínimo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de los perfiles longitudinales con los transversales, específicamente en la base de las diagonales, llegando el valor máximo obtenido a -60[MPa]. Al analizar el resultado, la zona crítica se obtiene en la diagonal del otro lado, lo que indica que al funcionar en ciclos rotativos, este lado estará en el ciclo inverso, sometido a tracción.

A continuación se muestra la Tabla N° 12, que contiene el resumen de resultados.

| caso de carga | Resumen de Resultados | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|------------------------|
| | desplazamiento [mm] | von-Mises [MPa] | Máximo Principal [MPa] | Mínimo principal [MPa] |
| Caso 1: Carga normal | 0,68 | 49 | 53 | -54 |
| Caso 2: Carga accidental | 0,77 | 55 | 59 | -60 |

Tabla N° 12: Tabla de resumen de resultados.

(Fuente: Elaboración propia.)

5.2.6.3 Cálculo de ciclos de vida del Trommel.

De acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente,

Carga normal

$$\text{Rango de esfuerzo: } S_{r,normal} = 54[\text{MPa}]$$

$$\text{Tiempo operacional: } n_{normal} = 2,96 \times 10^6[\text{ciclos}]$$

(Obtenido al ingresar a la curva $S - N$ con los 54[MPa] , para soldadura clase F2)

Carga accidental

$$\text{Rango de esfuerzo: } S_{r,accidental} = 60 [\text{MPa}]$$

$$n_{accidental} = 9 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}} * 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{año}} * 10 \text{ años} = 1,296 \times 10^5[\text{ciclos}]$$

$$\text{Tiempo operacional: } n_{accidental} = 1,296 \times 10^5[\text{ciclos}]$$

$$\text{Ciclos de falla: } N_{accidental} = 1,96 \times 10^6[\text{ciclos}]$$

(Obtenido al ingresar a la curva $S - N$ con los 60[MPa] , para soldadura clase F2)

Suma de Miner

$$\frac{2,96 \times 10^6}{N_{normal}} + \frac{1,296 \times 10^5}{1,96 \times 10^6} \leq 1$$

$$\Rightarrow N_{normal} = 2,88 \times 10^6[\text{ciclos}](\text{Usando la pendiente } m) \Rightarrow S_o = 53[\text{MPa}]$$

5.3 Conclusiones preliminares de la revisión.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Dentro del plano de fabricación, no fueron agregadas las dimensiones de filetes, procesos de precalentamiento de material requerido por el acero ASTM A-500 Gr.B, ni normas asociadas a la soldadura, requerimientos de inspecciones etc. dejándolo a juicio del fabricante.
- A pesar de que a simple vista los perfiles utilizados poseen mejores propiedades mecánicas, estos aumentan el peso de la estructura, produciendo sobre esfuerzos en esta. Respecto al análisis comparativo de los momentos de inercia, un elemento clave como lo es la diagonal posee un menor momento de inercia.
- Al configurar las diagonales unidas a los puntos de intersección de los perfiles, sin agregar una placa, como lo que recomienda el manual de diseño Metso, se observa un claro punto de concentración de estados de esfuerzos sometidos a compresión y tracción a la vez.
- Al obtener del cálculo de elementos finitos, los rangos de esfuerzos producidos en la estructura, fueron ingresados en la ecuación de Miner, indicando que la vida de las uniones soldadas será de $2,88 \times 10^6$ [ciclos], que corresponden a 7 meses y 12 días, que es concluyente con la falla, ya que la estructura colapso a los 8 meses aproximadamente.

Bajo todas las conclusiones obtenidas del análisis, se realizará un rediseño, utilizando todas las recomendaciones dadas por el manual de Metso, para el diseño de Trommels.

6. REDISEÑO DE TROMMEL.

6.1 Estudio de elementos finitos, nueva configuración.

Para asegurar un diseño que cumpla bajo las condiciones operacionales a las que son sometidos los Trommel, se utilizarán los estándares definidos por Metso para realizar el rediseño, sometiéndolo a las mismas condiciones operacionales anteriormente descritas.

6.1.1 Modelación.

El nuevo modelo de elementos finitos así como el inicial, también fue construido en SpaceClaim y calculado en Ansys workbench V17.2. En la Figura N° 47 se muestra el modelo CAD 3D rediseñado y recibido del departamento de Ingeniería de Metso Perú en el software Autodesk Inventor.

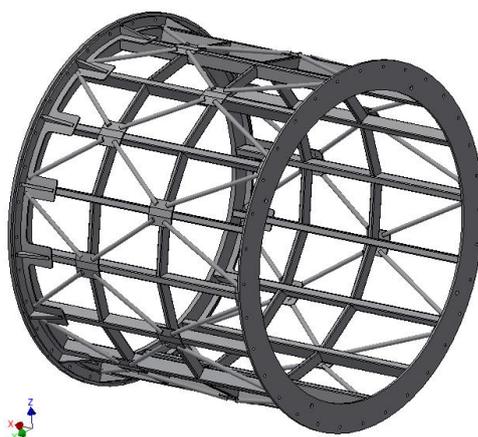


Figura N° 47: Rediseño del modelo CAD 3D Trommel.

(Fuente: Elaboración propia.)

A partir de esta nueva geometría (Figura N° 47), se construyó un modelo de elementos finitos del tipo placa 3D para los perfiles y anillos, en combinación con vigas para las barras circulares transversales. Los efectos producidos por los otros componentes mencionados anteriormente (Ball catcher, parrillas deflectores, etc.), serán considerados de la misma forma que el modelo inicial.

6.1.2 Discretización.

Para el modelo del rediseño del Trommel, mostrado anteriormente, se realizó una discretización del modelo de elementos finitos. Para los anillos y estructura en general, se decidió utilizar

debido al alto grado de precisión y al menor requerimiento computacional, un modelo del tipo placa 3D, con elementos cuadrangulares y triangulares de primer orden combinados, tal como se muestra en Figura N° 48.

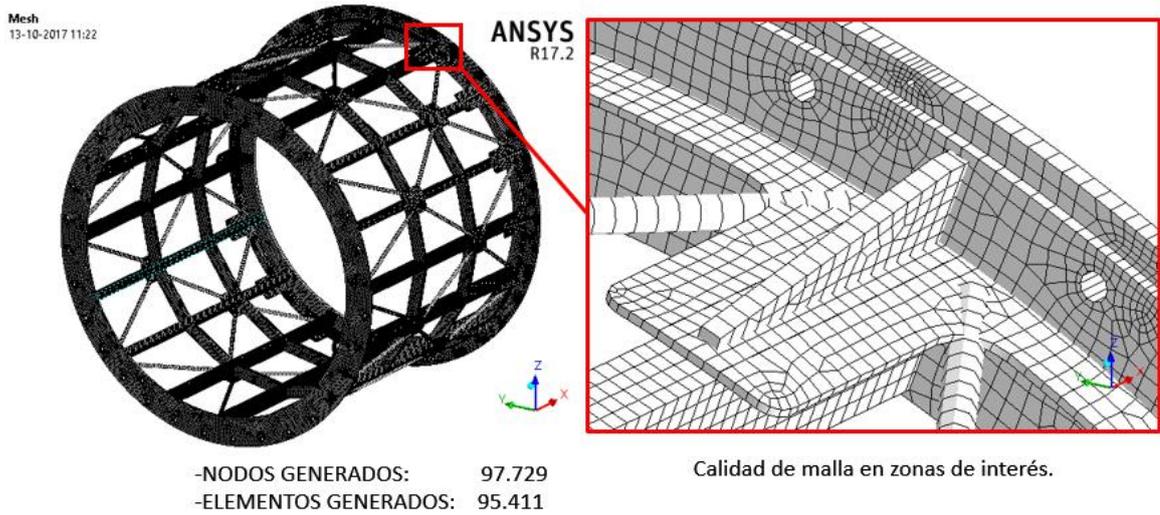


Figura N° 48: Discretización del modelo 3D del Trommel.

(Fuente: Elaboración propia.)

De los elementos generados para la malla, el de mayor dimensión tiene 30 [mm] y el de menor 6[mm], el rango promedio de la calidad de la malla tiene 0,93, siendo una calidad aceptable mayor a 0,5 de acuerdo al manual del software Ansys. En la Figura N° 49 se muestra el rango de calidad para los elementos generados, mostrándose también la cantidad de elementos triangulares como los cuadrangulares de primer orden.

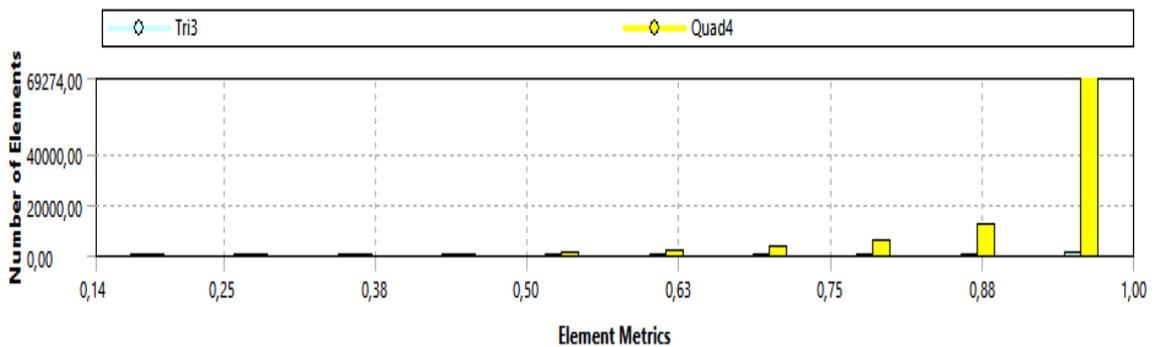


Figura N° 49: Rango de calidad para los elementos generados.

(Fuente: Elaboración propia.)

Al utilizar un modelo de placa 3D, se deben asignar espesores a cada parte del Trommel, en la Figura N° 50 se muestran los espesores asignados al modelo de elementos finitos.

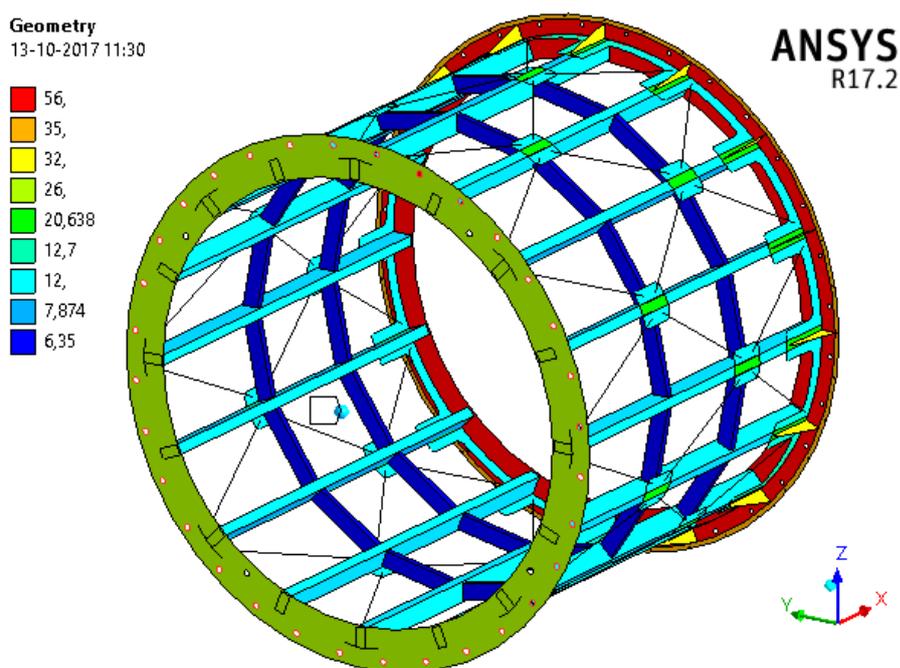


Figura N° 50: Espesores asignados al modelo de elementos finitos.

(Fuente: Elaboración propia.)

6.1.3 Condiciones de borde.

Para este modelo de elementos finitos, se consideraron las mismas condiciones de borde utilizadas en el capítulo 5, sección 5.2.4. Para mayor información, ver en capítulo 9, sección 9.9 anexo 9, a este documento.

6.1.4 Casos de carga.

Para este modelo de elementos finitos, se consideraron las mismas condiciones de carga utilizadas en el capítulo 5, sección 5.2.5. Para mayor información, ver en capítulo 9, sección 9.10 anexo 10, a este documento.

6.1.5 Resultados.

Los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos aplicado al rediseño de la estructura del Trommel, se presentan a continuación.

6.1.5.1 Resultado caso 1: Carga de operación normal.

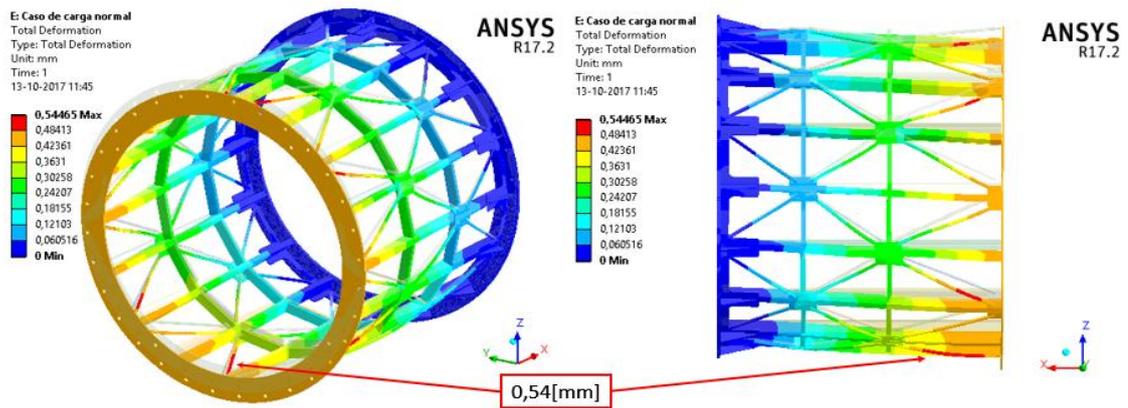


Figura N° 51: Caso 1: Desplazamiento vertical.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 51, se muestra el desplazamiento vertical para el rediseño del Trommel caso 1, ubicado en la zona inferior del Trommel, específicamente en la diagonal donde producto de la carga aplicada se alcanzó un desplazamiento máximo de 0,54 [mm]. Cabe destacar que la deformación esta aumentada a 150X para poder ser visualizada.

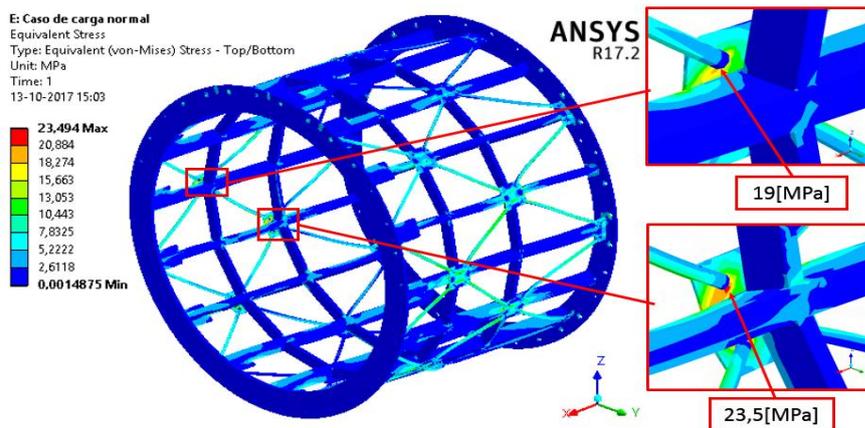


Figura N° 52: Caso 1: Esfuerzo equivalente de von-Mises.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 52 se muestra el esfuerzo de von-Mises obtenido para el rediseño del Trommel caso 1, donde el máximo esfuerzo se localiza en las zonas de las placas de unión a las diagonales, llegando su valor máximo a 23,5[MPa].

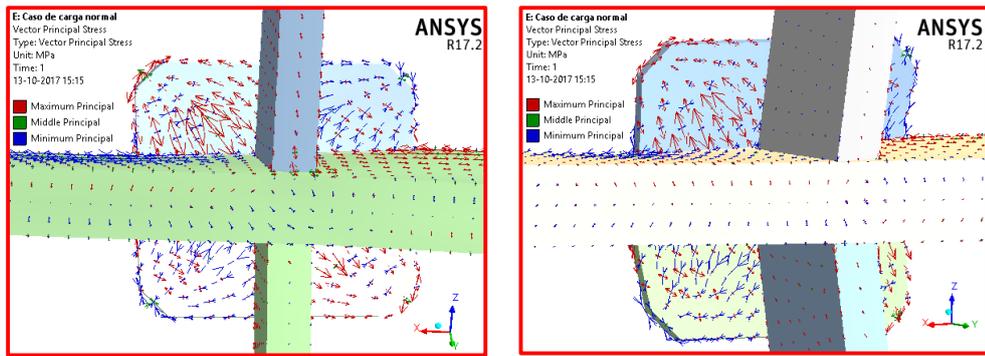


Figura N° 53: Caso 1: Estado de esfuerzo en zonas críticas.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 53 se muestran los estados de esfuerzos a los cuales están sometidas estas intersecciones, diferenciándose los menores de los mayores, por la intensidad de las flechas. Además se muestra la combinación de estados tractivos (rojo) y compresivos (azul), bajando considerablemente para las intersecciones de los perfiles, respecto al diseño inicial.

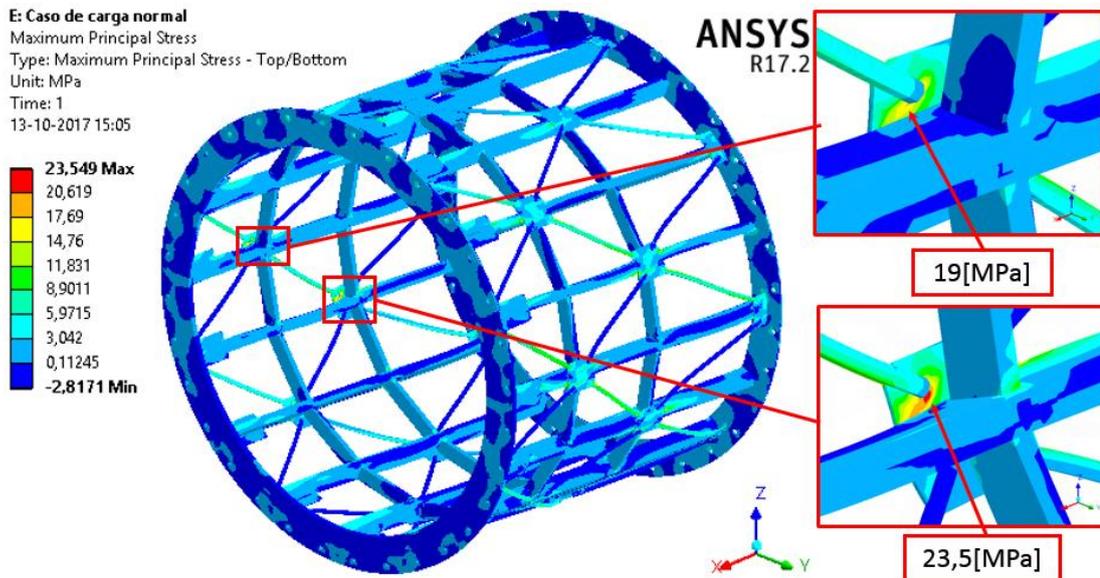


Figura N° 54: Caso 1: Esfuerzo máximo principal.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 54 se muestra el esfuerzo máximo principal obtenido para el rediseño del Trommel caso 1, donde el máximo esfuerzo se localiza en las zonas de la placa de unión con las diagonales, específicamente en la placa de unión, llegando su valor máximo a 23,5[MPa].

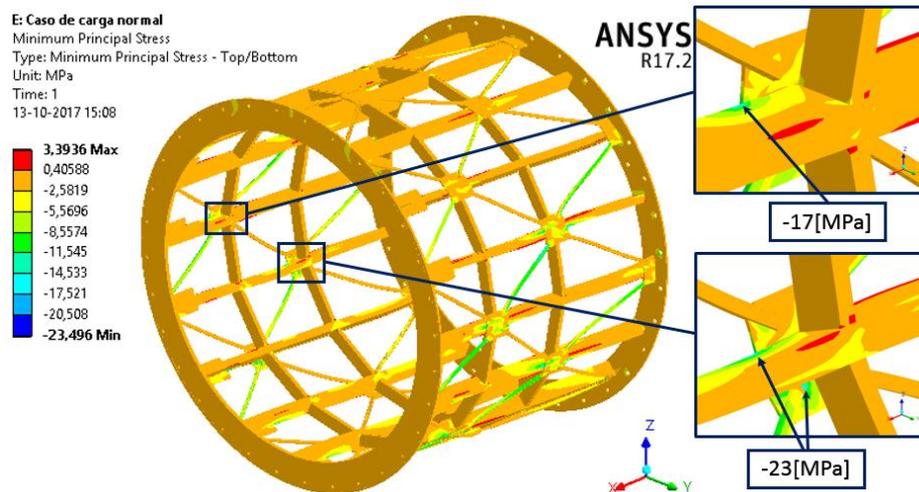


Figura N° 55: Caso 1: Esfuerzo mínimo principal.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 55 se muestra el esfuerzo mínimo principal obtenido para el rediseño del Trommel caso 1, donde el mínimo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de las placas con las diagonales y las placas con perfiles longitudinales, llegando su valor máximo calculado a -23[MPa]. Al analizar el resultado, la zona crítica se obtiene en la unión de la placa con la diagonal del otro lado, lo que indica que al funcionar en ciclos rotativos, este lado estará en el ciclo inverso, sometido a tracción.

6.1.5.2 Resultado caso 2: Carga accidental.

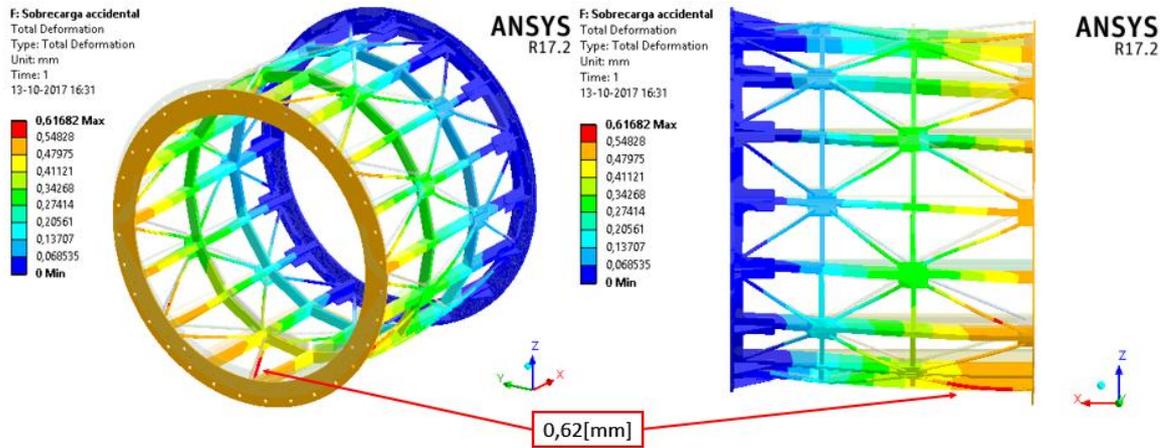


Figura N° 56: Caso 2: Desplazamiento vertical.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 56, se presentan los desplazamientos verticales para el rediseño del Trommel caso 2, ubicado en la zona inferior del Trommel, donde se alcanzó un desplazamiento máximo de 0,62[mm]. Cabe destacar que la deformación esta aumentada a 150X para poder ser visualizada.

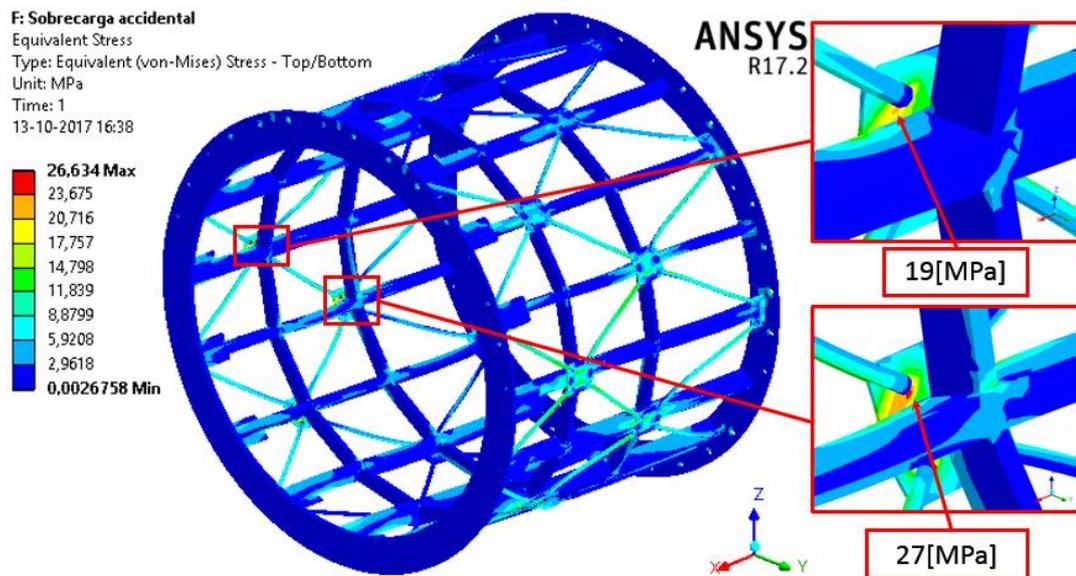


Figura N° 57: Caso 2: Esfuerzo equivalente de von-Mises.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 57 se muestra el esfuerzo de von-Mises obtenido para el rediseño del Trommel caso 2, donde el máximo esfuerzo se localiza en las zonas de la placa de unión con las diagonales, llegando su valor máximo a 27[MPa].

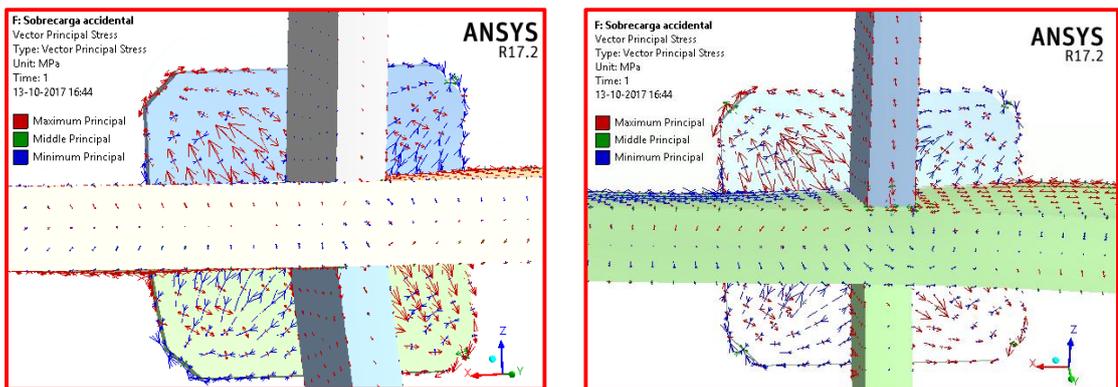


Figura N° 58: Caso 2: Estado de esfuerzo en zonas críticas.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 58 se muestran los estados de esfuerzos para el rediseño del Trommel caso 2, a los cuales están sometidas estas intersecciones, diferenciándose los menores de los mayores, por la intensidad de las flechas. Además se muestra la combinación de estados tractivos, de color rojo y compresivo de color azul.

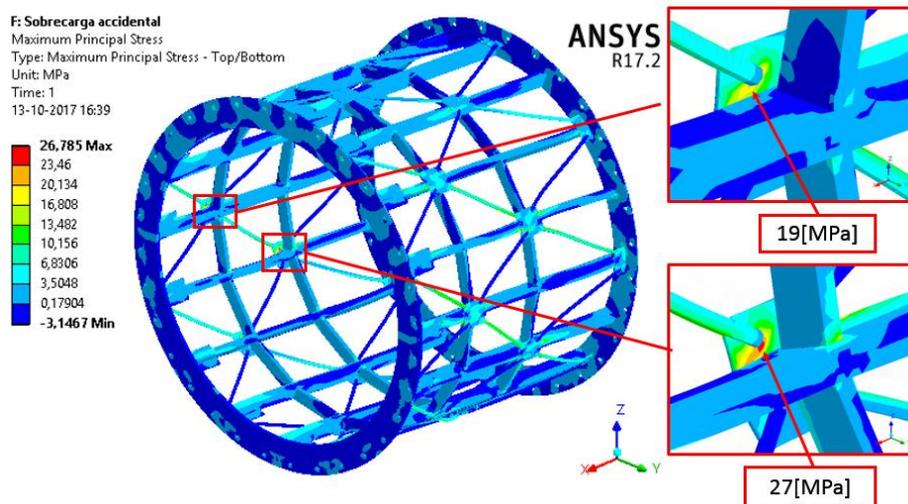


Figura N° 59: Caso 2: Esfuerzo máximo principal.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 59 se muestra el esfuerzo máximo principal obtenido para el caso 2, donde el máximo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de los perfiles longitudinales con los transversales, específicamente en la base de las diagonales, llegando su valor máximo a 27[MPa].

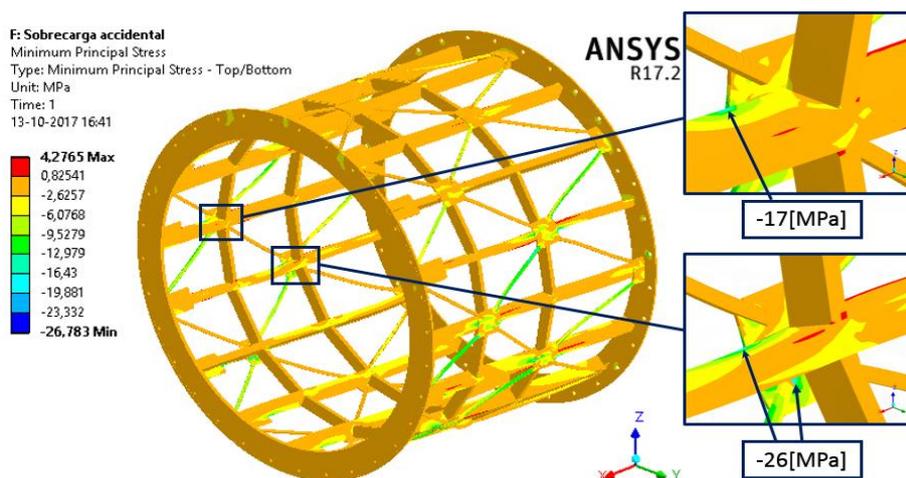


Figura N° 60: Caso 2: Esfuerzo mínimo principal.

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura N° 60 se muestra el esfuerzo mínimo principal obtenido para el caso 2, donde el mínimo esfuerzo se localiza en las zonas de intersecciones de las placas con las diagonales y las placas con perfiles longitudinales, llegando el valor máximo obtenido a -26[MPa]. Al analizar el resultado, la zona crítica se obtiene en la diagonal del otro lado, lo que nos indica que al funcionar en ciclos rotativos, este lado estará en el ciclo inverso, sometido a tracción.

A continuación se presentará una tabla de resumen de resultados.

| caso de carga | Resumen de Resultados | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| | desplazamiento [mm] | von-Mises [MPa] | Máximo Principal [MPa] | Mínimo principal [MPa] | Esfuerzo admisible alterno [MPa] |
| Caso 1: Carga normal | 0,54 | 23,5 | 23,5 | -23,5 | 25,4 |
| Caso 2: Carga accidental | 0,62 | 27 | 27 | -26 | 35 |

Tabla N° 13: Tabla de resumen de resultados.

(Fuente: Elaboración propia.)

Al presentarse valores de esfuerzos alternantes inferiores al admisible, no se hace necesario estimar la vida mediante la ecuación de Miner ya que, funcionará a vida infinita de acuerdo a la norma británica “Código de prácticas para el diseño sometido a fatiga y la evaluación de estructuras de acero”, *BS-7608:1993*.

6.2 Especificaciones y plano final.

A continuación se presentará el plano diseñado por el departamento de Ingeniería de fábrica de Metso Perú (Figura N° 61), de acuerdo al modelo calculado y mostrado anteriormente.

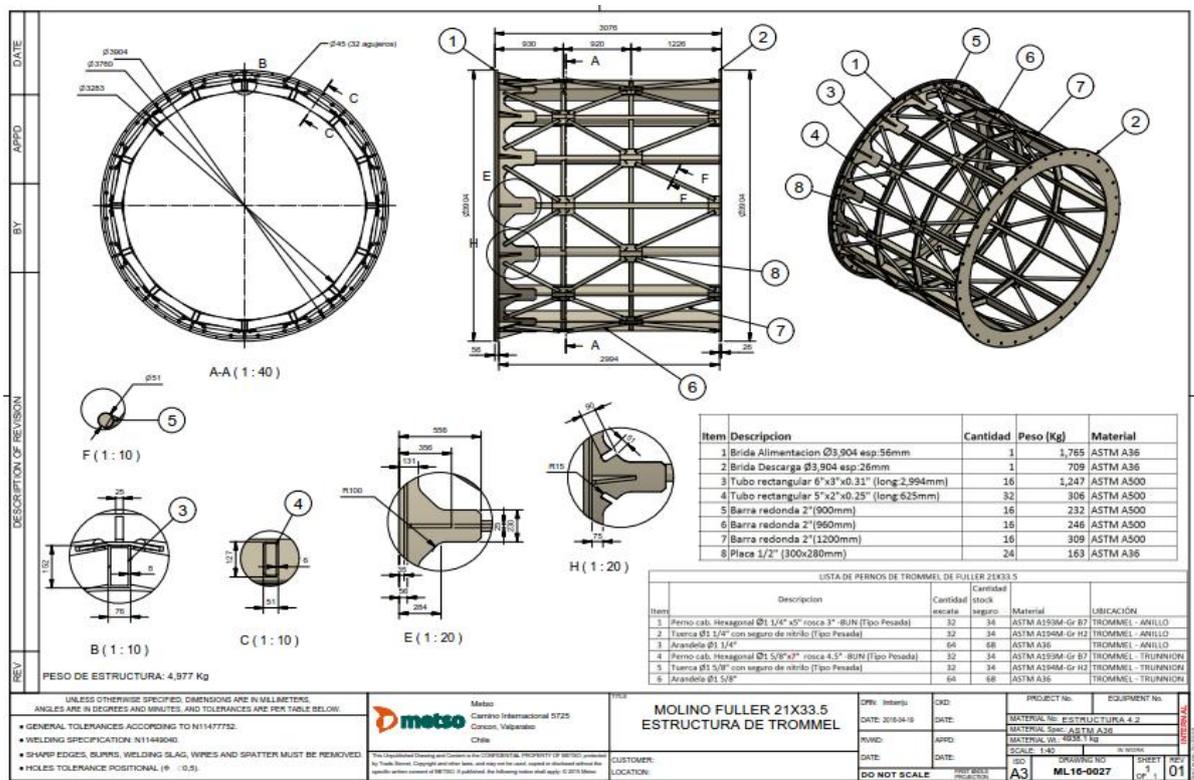


Figura N° 61: Plano de fabricación de Trommel rediseñado.

Fuente: (Información recibida de Ingeniería de Metso Perú.)

Las especificaciones ingresadas al plano y ubicadas en el sector inferior-izquierdo, fueron:

- Tolerancias generales acorde a *N11477752*.
- Especificación de soldadura *N11449040*.
- Se deben sacar los bordes afilados, las rebabas, la escoria de soldadura y salpicaduras
- Para las perforaciones, la tolerancia dimensional debe ser 0,5 [mm].

7. CONCLUSIONES.

Del estudio realizado, las conclusiones son:

- La falla se presentó en la intersección de los perfiles, específicamente en el primer anillo del Trommel a la salida del SAG, tal como se muestra en la Figura N° 8 del capítulo 3, sección 3.3.
- Se identificaron deficiencias en la fabricación de la estructura del Trommel, faltando especificaciones respecto a la soldadura del material de los perfiles, los cuales deben ser sometidos a procesos de precalentamiento debido al material de estos.
- Aunque se llegue a utilizar perfiles con mejores propiedades mecánicas, si la configuración estructural es deficiente, los problemas se presentarán inevitablemente.
- Con el estudio de elementos finitos se identificaron deficiencias en el diseño de la estructura, ya que se generaron intersecciones de perfiles, que terminaron concentrando los estados esfuerzos en estos puntos.
- Las concentraciones de esfuerzo observadas en el diseño inicial de la estructura del Trommel, fueron aliviadas gracias a las placas de unión de las diagonales, transformándose en un punto clave para el diseño estructural del Trommel.
- Con la suma acumulativa de daños de Miner, se calculó la vida estimada a la cual funcionó el Trommel, arrojando el resultado en 7 meses y 12 días aproximados, estando muy cercana al tiempo que funcionó realmente el Trommel con la falla catastrófica, siendo de 8 meses aproximados.
- Con el rediseño, que tomó en cuenta todas las recomendaciones entregadas por el manual de diseño de Trommel, se resolvió la falla.
- El manual de diseño de Trommel, entrega una confiabilidad y precisión en cuanto a la fabricación de estas estructuras, asegurando una vida mínima de 2 años, pudiendo llegar más allá de este tiempo.

8. BIBLIOGRAFIA.

8.1 Bibliografía.

- Metso Minerals; 2004. Conocimientos básicos en el procesamiento de minerales. Edición 1, 2004-05
- L. Furtenbach, D. Johansson; 2012. Engineering Manual Modular Mill Trommels Metso.V5 Svedala Grinding, York PA USA.
- M.D. Sinnott, P.W. Cleary, R.D. Morrison; 2017. Combined DEM and SPH Simulation of Overflow Ball Mill Discharge and Trommel Flow. Elsevier. Pag.106.
- Yi-Shun Chen, Shu-San Hsiau, Hsuan-Yi Lee, Yau-Pin Chyou, Chia-Jen Hsu; 2010. Size Separation of Particulates in a Trommel Screen System. Elsevier.
- Tony Moon, RTZ; 2000. Sag Mill Discharge Screens-Trommels vs. Vibrating.
- Indura S.A. Industria y Comercio; Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura. Pag.34-43
- American National Standards Institute; AWS D1.1/D1.1M:2015. Structural Welding Code Steel, 23rd Edition. Part E-Fabrication pag.269-270– Part F-Inspection pag.270-271.
- Astm International; 2013. Technical Datasheet Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes A500/A500M.
- Astm International; 2003. Technical Datasheet Standard Specification for Carbon Structural Steel A36/A 36M.
- Technical Datasheet of Astm A36 Steel Plate, for Finite Element. (Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6&ckck=1>. Consultado el: 05 de octubre del 2017).
- Technical Datasheet of Astm A500 Steel grade B, round structural tubing, for Finite Element. (Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=f95dd344761d40b48d19bc009c936b27>. Consultado el: 05 de octubre del 2017).

8.2 Nomenclatura.

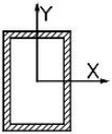
- 150X : Factor de amplificación, 150 veces.
- \emptyset : Diámetro.
- ρ : Densidad.
- ν : Coeficiente de Poisson.
- AG : Tipo de molino Autógeno.
- ASTM : American Society for Testing Materials.
- AWS : American Welding Society.
- Ball Catcher : Caja que atrapa bolas de molinos, a la salida del Trommel.
- BS : British Standard.
- Ciclos : Serie de cargas o fuerzas que suceden en el mismo orden hasta llegar a un punto, donde vuelven a repetirse en el mismo orden.
- $^{\circ}\text{C}$: Temperatura grados Celsius.
- DIN : Acrónimo de Deutches Institut für Normung.
- E : Módulo de Young.
- EF : Elementos Finitos.
- Elemento : Ítem de una malla, que puede tener forma triangular o cuadrangular entre otros.
- Elementos de primer orden : Son los tipos de elementos que no poseen nodos intermedios y su ecuación es lineal.
- Esfuerzo Admisible Alterno : Valor máximo de esfuerzo que un material puede llegar a soportar producto de la carga tractiva o carga compresiva.
- Esfuerzo Máximo Principal : Es el valor de esfuerzo que un material estará soportando en tracción.
- Esfuerzo Mínimo Principal. : Es el valor de esfuerzo que un material estará soportando en compresión.
- Esfuerzo ultimo : Máximo esfuerzo que un material puede soportar bajo tensión antes de que su sección transversal se contraiga de manera significativa

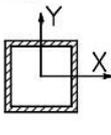
- Esfuerzo de von-Mises : Criterio de resistencia estática, aplicado a materiales dúctiles.
- Gr. B : Grado B (Calidad de acero)
- ISO : International Organization for Standardization.
- I_x : Momento de Inercia en el eje X
- I_y : Momento de Inercia en el eje Y
- J : Joule.
- kg : Kilogramos.
- kg/m : Peso por metro.
- Límite de fluencia : Fatiga a partir de la cual un cuerpo sufre una deformación continua sin por ello aumentar dicha fatiga. También llamado punto de relajamiento.
- m : Metros.
- m^2 : Metros cuadrados.
- mm : Milímetros.
- mm^4 : Milímetros a la cuarta. (Unidad de medida del Momento de Inercia)
- Modelo Viga : Discretización de malla con forma de línea y propiedades de sólidos.
- Modelo Cascara : Discretización de malla del tipo lamina basado en la teoría de Reissner-Mindlin.
- MPa : Mega Pascales (Unidad de Presión).
- m/s^2 : Aceleración de gravedad.
- N : Newton (Unidad de fuerza).
- Nodos : Medio de puntos comunes que unen los elementos finitos.
- Pulg. : Pulgadas.
- RPM : Revoluciones por minuto.
- SAG : Molino del tipo Semi-Autogeno.
- S.p.A. : Sociedad por Acciones.
- Pulpa : Mezcla de mineral molido o pulverizado con agua o una solución acuosa.

- SMT : Paneles modulares Skega.
- ton/m³ : Densidad de material expresado en toneladas por metro cubico.

9. ANEXOS.

9.1 Anexo 1: Tabla de comparación de propiedades de perfiles de Europa, América y Australia.

| Section type | Dimensions | Material | Area | | I _x | | I _y | | Weight per length unit [kg/m] | Continent |
|--|-------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------|
| | | | [mm ²] | [in ²] | x 10 ⁴ [mm ⁴] | [in ⁴] | x 10 ⁴ [mm ⁴] | [in ⁴] | | |
| Rectangular Structural Tubing  | VKR 150x100x10 | S355J2H (SS 2134) | 4490 | 6,96 | 1282 | 30,80 | 665 | 15,98 | 35,3 | Europe |
| | 6"x4"x0.38" (152x102x9.65) | ASTM A500 grade B | 4245 | 6,58 | 1236 | 29,70 | 649 | 15,59 | 33,4 | America |
| | 150x100x9 | AS 1163-1991 Grade C350L0 | 3900 | 6,04 | 1090 | 26,19 | 577 | 13,86 | 30,6 | Australia |
| | VKR 140x80x6.3 | S355J2H (SS 2134) | 2570 | 3,98 | 646 | 15,52 | 265 | 6,37 | 20,2 | Europe |
| | 5"x3"x0,31" (127x76x7.87) | ASTM A500 grade B | 2813 | 4,36 | 549 | 13,19 | 243 | 5,84 | 22,1 | America |
| | 152x76x6 | AS 1163-1991 Grade C350L0 | 2480 | 3,84 | 697 | 16,74 | 235 | 5,65 | 19,4 | Australia |
| | VKR 120x80x6.3 | S355J2H (SS 2134) | 2320 | 3,60 | 440 | 10,57 | 230 | 5,53 | 18,2 | Europe |
| | 5"x3"x0,25" (127x76x6.35) | ASTM A500 grade B | 2316 | 3,59 | 470 | 11,3 | 210 | 5,05 | 18,2 | America |
| | 125x75x6 | AS 1163-1991 Grade C350L0 | 2130 | 3,30 | 416 | 10,0 | 187 | 4,49 | 16,7 | Australia |
| | VKR 100x50x6.3 | S355J2H (SS 2134) | 1690 | 2,62 | 197 | 4,73 | 63 | 1,51 | 13,3 | Europe |
| 4"x2"x0,25 (101,6x50,8x6.35) | ASTM A500 grade B | 1670 | 2,59 | 195 | 4,69 | 64 | 1,54 | 13,2 | America | |
| 100x50x6 | AS 1163-1991 Grade C350L0 | 1530 | 2,37 | 171 | 4,11 | 56,7 | 1,36 | 12 | Australia | |

| Section type | Dimensions | Material | Area | | I _y = I _x | | Weight per length unit [kg/m] | Continent |
|---|----------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------|
| | | | [mm ²] | [in ²] | x 10 ⁴ [mm ⁴] | [in ⁴] | | |
| Square Structural Tubing  | VKR 90x90x6,3 | S355J2H (SS 2134) | 2070 | 3,21 | 238 | 5,72 | 16,2 | Europe |
| | 3.5"x3.5"x0.25" (89x89x6.35) | ASTM A500 grade B | 1994 | 3,09 | 220 | 5,29 | 15,6 | America |
| | 89x89x6 | AS 1163-1991 Grade C350L0 | 1870 | 2,90 | 206 | 4,95 | 14,6 | Australia |
| | VKR 80x80x6.3 | S355J2H (SS 2134) | 1810 | 2,81 | 162 | 3,89 | 14,3 | Europe |
| | 3"x3"x0.31" (76x76x7.9) | ASTM A500 grade B | 2006 | 3,11 | 149 | 3,58 | 15,8 | America |
| | 3.5"x3.5"x0.1875 (89x89x4.76) | ASTM A500 grade B | 1542 | 2,39 | 178 | 4,28 | 12,2 | America |
| | 89x89x5 | AS 1163-1991 Grade C350L0 | 1590 | 2,46 | 181 | 4,35 | 12,5 | Australia |
| | VKR 70x70x5 | S355J2H (SS 2134) | 1270 | 1,97 | 88,5 | 2,13 | 9,99 | Europe |
| | 3"x3"x0.1875" (76x76x4,76) | ASTM A500 grade B | 1303 | 2,02 | 108 | 2,60 | 10,2 | America |
| | 75x75x5 | AS 1163-1991 Grade C350L0 | 1310 | 2,03 | 103 | 2,47 | 10,3 | Australia |

| Section type | Dimensions [mm] | Material | Area | | I _x = I _y | | Weight per length unit [kg/m] | Continent |
|---|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--|---|-------------------------------------|-----------|
| | | | [mm ²] | [in ²] | x10 ⁴ [mm ⁴] | x10 ⁻² [in ⁴] | | |
| Round bars  | φ25 | S235JRG2 | 491 | 0.76 | 1.92 | 4.61 | 3.8 | Europe |
| | φ1" (φ25.4) | ASTM A36 | 507 | 0.79 | 2.04 | 4.90 | 3.9 | America |
| | φ26 | AS 3679-250/300 | 531 | 0.82 | 2.24 | 5.39 | 4.1 | Australia |
| | φ38 | S235JRG2 | 1134 | 1.76 | 10.24 | 24.6 | 8.9 | Europe |
| | φ1.5" (φ38.1) | ASTM A36 | 1140 | 1.77 | 10.34 | 24.8 | 9.0 | America |
| | φ39 | AS 3679-250/300 | 1195 | 1.85 | 11.36 | 27.3 | 9.3 | Australia |
| | φ50 | S235JRG2 | 1964 | 3.04 | 30.68 | 73.7 | 15.4 | Europe |
| | φ2" (φ50.8) | ASTM A36 | 2027 | 3.14 | 32.69 | 78.5 | 15.9 | America |
| | φ50 | AS 3679-250/300 | 1964 | 3.04 | 30.68 | 73.7 | 15.4 | Australia |
| | φ55 | S235JRG2 | 2376 | 3.68 | 44.92 | 107.9 | 18.7 | Europe |
| | φ2 1/4" (φ57.15) | ASTM A36 | 2565 | 3.98 | 52.36 | 125.8 | 20.1 | America |
| | φ56 | AS 3679-250/300 | 2463 | 3.82 | 48.27 | 116.0 | 19.2 | Australia |
| | φ60 | S235JRG2 | 2827 | 4.38 | 63.62 | 152.8 | 22.2 | Europe |
| | φ2 3/8" (φ60.32) | ASTM A36 | 2857 | 4.43 | 64.99 | 156.1 | 22.3 | America |
| | φ60 | AS 3679-250/300 | 2827 | 4.38 | 63.62 | 152.8 | 22.2 | Australia |

9.2 Anexo 2: Tabla de comparación de propiedades de perfiles de Europa, América y Australia.

| Continent | Material | Strength [MPa] | | Chemistry [%] | | | | | |
|-----------|--------------------|----------------|----------|---------------|-----------|-----------|-------|-------|------|
| | | Yield | Ultimate | C | Si | Mn | P | S | Al |
| Europe | S355J2H (SS 2134) | 355 | 490 | 0,22 | 0,55 | 1,6 | 0,035 | 0,035 | |
| America | ASTM A500 grade B | 317 | 400 | 0,26 | | | 0,04 | 0,05 | |
| Australia | AS 1163-Gr. C350L0 | 350 | 430 | 0,20 | 0,25 | 1,6 | 0,04 | 0,03 | 0,10 |
| Europe | S235JRG2 (SS 1312) | 235 | 340 | 0,20 | | 1,4 | 0,045 | 0,045 | |
| America | ASTM A36 | 250 | 400 | 0,26 | 0,15-0,40 | 0,85-1,35 | 0,04 | 0,05 | |
| Australia | AS 3679-Grade 300 | 300 | 440 | 0,25 | 0,40 | 1,6 | 0,05 | 0,04 | 0,15 |

9.3 Anexo 3: Propiedades de acero ASTM A-36.

Acero ASTM A36.

Es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización.

Composición química de la colada.

| | |
|----------------|------------------|
| Carbono (C) | 0,26% máx |
| Manganeso (Mn) | No hay requisito |
| Fósforo (P) | 0,04% máx |
| Azufre (S) | 0,05% máx |
| Silicio (Si) | 0,40% máx |
| * Cobre (Cu) | 0,20% mínimo |

*Cuando se especifique

Propiedades

Como la mayoría de los aceros, el A36, tiene una densidad de 7850 kg/m³ (0.28 lb/in³). El acero A36 en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores de 8 pulg (203,2 mm) tiene un límite de fluencia mínimo de 250 MPA (36 ksi), y un límite de rotura mínimo de 410 MPa (58 ksi). Las planchas con espesores mayores de 8 plg (203,2 mm) tienen un límite de fluencia mínimo de 220 MPA (32 ksi), y el mismo límite de rotura.

Propiedades Mecánicas

| Límite de fluencia mínimo | | Resistencia a la Tracción | | | |
|---------------------------|-------|---------------------------|-------|-----|-----|
| Mpa | Psi | Psi | | Mpa | |
| | | Min | Máx | Min | Máx |
| 250 | 36000 | 58000 | 80000 | 400 | 550 |

Formas

El acero A36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen:

Planchas, Perfiles estructurales, Tubos, Láminas.

9.4 Anexo 4: Propiedades de acero ASTM A-500 GR. B.

ASTM A500 is a standard specification published by the ASTM for cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in round, square, and rectangular shapes. It is commonly specified in the USA for hollow structural sections, but the more stringent CSA G40.21 is preferred in Canada. Another related standard is ASTM A501, which is a hot-formed version of this A500. ASTM A500 defines four grades of carbon steel based primarily on material strength.^[1]

This is a standard set by the standards organization ASTM International, a voluntary standards development organizations that sets technical standards for materials, products, systems, and services.

Density

Like other carbon steels, A500 and A501 steels have a specific gravity of approximately 7.85, and therefore a density of approximately 7850 kg/m³ (0.284 pounds per cubic inch).^[2]

Grades

A500 cold-formed tubing comes in four grades based on chemical composition, tensile strength, and heat treatment. The yield strength requirements are higher for square and rectangular than for round tubing. The minimum copper content is optional. Grade D must be heat treated.^[1]

| Grade | UNS | Composition (% by weight in heat) | | | | | Minimum strength requirements | | | |
|----------|---------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|---------------|----------------|------------|
| | | C | Mn | P | S | Cu | tensile | yield (round) | yield (shaped) | elongation |
| | | max % | max % | max % | max % | min % | MPa (ksi) | MPa (ksi) | MPa (ksi) | % |
| A | K03000 | 0.26 | 1.35 | 0.035 | 0.035 | 0.20 | 310 (45) | 230 (33) | 270 (39) | 25 |
| B | K03000 | 0.26 | 1.35 | 0.035 | 0.035 | 0.20 | 400 (58) | 290 (42) | 315 (46) | 23 |
| C | K02705 | 0.23 | 1.35 | 0.035 | 0.035 | 0.20 | 425 (62) | 315 (46) | 345 (50) | 21 |
| D | K03000 | 0.26 | 1.35 | 0.035 | 0.035 | 0.20 | 400 (58) | 250 (36) | 250 (36) | 23 |

References

[1] ASTM A500/A500M-07.

[2] A500A steel material properties (<http://www.suppliersonline.com/propertypages/A500A.asp>), accessed October 8, 2006.

9.5 Anexo 5: Norma ISO 2768 de tolerancias dimensionales de piezas mecanizadas.

LINEAR DIMENSIONS:

| Permissible deviations in mm for ranges in nominal lengths | f (fine) | Tolerance class designation (description) | | v (very coarse) |
|--|----------|---|------------|-----------------|
| | | m (medium) | c (coarse) | |
| 0.5 up to 3 | ±0.05 | ±0.1 | ±0.2 | - |
| over 3 up to 6 | ±0.05 | ±0.1 | ±0.3 | ±0.5 |
| over 6 up to 30 | ±0.1 | ±0.2 | ±0.5 | ±1.0 |
| over 30 up to 120 | ±0.15 | ±0.3 | ±0.8 | ±1.5 |
| over 120 up to 400 | ±0.2 | ±0.5 | ±1.2 | ±2.5 |
| over 400 up to 1000 | ±0.3 | ±0.8 | ±2.0 | ±4.0 |
| over 1000 up to 2000 | ±0.5 | ±1.2 | ±3.0 | ±6.0 |
| over 2000 up to 4000 | - | ±2.0 | ±4.0 | ±8.0 |

EXTERNAL RADIUS AND CHAMFER HEIGHTS

| Permissible deviations in mm for ranges in nominal lengths | f (fine) | Tolerance class designation (description) | | v (very coarse) |
|--|----------|---|------------|-----------------|
| | | m (middle) | c (coarse) | |
| 0.5 up to 3 | ±0.2 | ±0.2 | ±0.4 | ±0.4 |
| over 3 up to 6 | ±0.5 | ±0.5 | ±1.0 | ±1.0 |
| over 6 | ±1.0 | ±1.0 | ±2.0 | ±2.0 |

ANGULAR DIMENSIONS

| Permissible deviations in degrees and minutes for ranges in nominal lengths | f (fine) | Tolerance class designation (description) | | v (very coarse) |
|---|----------|---|------------|-----------------|
| | | m (middle) | c (coarse) | |
| up to 10 | ±1° | ±1° | ±1°30' | ±3° |
| over 10 up to 50 | ±0°30' | ±0°30' | ±1° | ±2° |
| over 50 up to 120 | ±0°20' | ±0°20' | ±0°30' | ±1° |
| over 120 up to 400 | ±0°10' | ±0°10' | ±0°15' | ±0°30' |
| over 400 | ±0°5' | ±0°5' | ±0°10' | ±0°20' |

STRAIGHTNESS AND FLATNESS

| Ranges in nominal lengths in mm | Tolerance class | | |
|---------------------------------|-----------------|------|-----|
| | H | K | L |
| up to 10 | 0.02 | 0.05 | 0.1 |
| over 10 up to 30 | 0.05 | 0.1 | 0.2 |
| over 30 up to 100 | 0.1 | 0.2 | 0.4 |
| over 100 up to 300 | 0.2 | 0.4 | 0.8 |
| over 300 up to 1000 | 0.3 | 0.6 | 1.2 |
| over 1000 up to 3000 | 0.4 | 0.8 | 1.6 |

PERPENDICULARITY

| Ranges in nominal lengths in mm | Tolerance class | | |
|---------------------------------|-----------------|-----|-----|
| | H | K | L |
| up to 100 | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| over 100 up to 300 | 0.3 | 0.6 | 1 |
| over 300 up to 1000 | 0.4 | 0.8 | 1.5 |
| over 1000 up to 3000 | 0.5 | 0.8 | 2 |

SYMMETRY

| Ranges in nominal lengths in mm | Tolerance class | | |
|---------------------------------|-----------------|-----|-----|
| | H | K | L |
| up to 100 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| over 100 up to 300 | 0.5 | 0.6 | 1 |
| over 300 up to 1000 | 0.5 | 0.8 | 1.5 |
| over 1000 up to 3000 | 0.5 | 1 | 2 |

RUN-OUT

| Tolerance class | | |
|-----------------|-----|-----|
| H | K | L |
| 0.1 | 0.2 | 0.5 |

9.6 Anexo 6: Norma ISO 13920 clase A, tolerancia para piezas soldadas.

Tolerances for linear dimensions

Table 1 — Tolerances for linear dimensions

| Tolerance class | Range of nominal sizes l in mm | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| | 2 to 30 | Over 30 up to 120 | Over 120 up to 400 | Over 400 up to 1 000 | Over 1 000 up to 2 000 | Over 2 000 up to 4 000 | Over 4 000 up to 8 000 | Over 8 000 up to 12 000 | Over 12 000 up to 16 000 | Over 16 000 up to 20 000 | Over 20 000 |
| Tolerances t in mm | | | | | | | | | | | |
| A | ± 1 | ± 1 | ± 1 | ± 2 | ± 3 | ± 4 | ± 5 | ± 6 | ± 7 | ± 8 | ± 9 |
| B | | ± 2 | ± 2 | ± 3 | ± 4 | ± 6 | ± 8 | ± 10 | ± 12 | ± 14 | ± 16 |
| C | | ± 3 | ± 4 | ± 6 | ± 8 | ± 11 | ± 14 | ± 18 | ± 21 | ± 24 | ± 27 |
| D | | ± 4 | ± 7 | ± 9 | ± 12 | ± 16 | ± 21 | ± 27 | ± 32 | ± 36 | ± 40 |

4.2 Tolerances for angular dimensions

The length of the shorter angle leg shall be used to determine in accordance with Table 2 which tolerances are to apply. The length of the leg may also be assumed to extend to a specified reference point. In this case, the reference point concerned shall be indicated on the drawing.

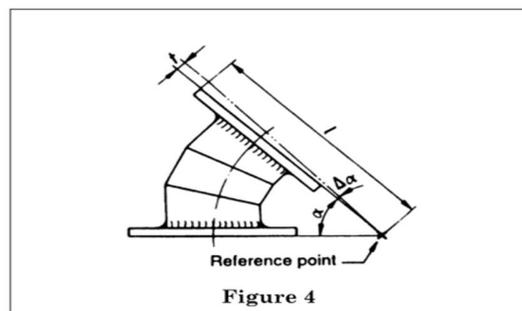
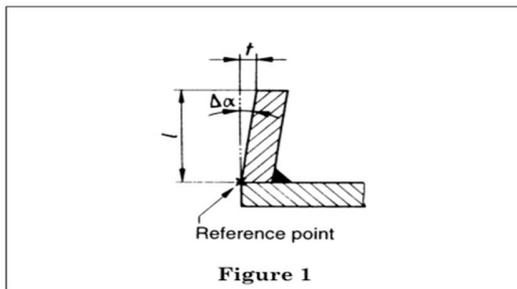
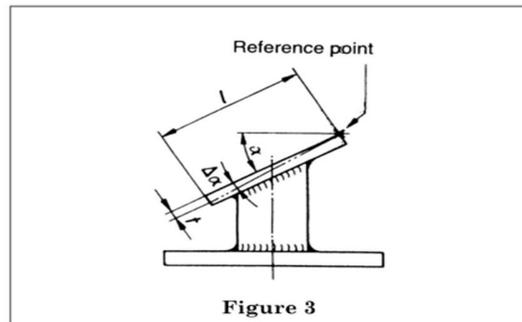
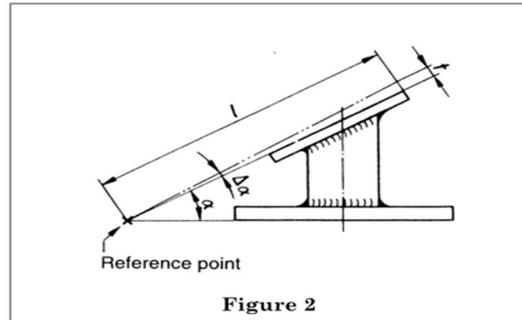
See Table 2 for the relevant tolerances.

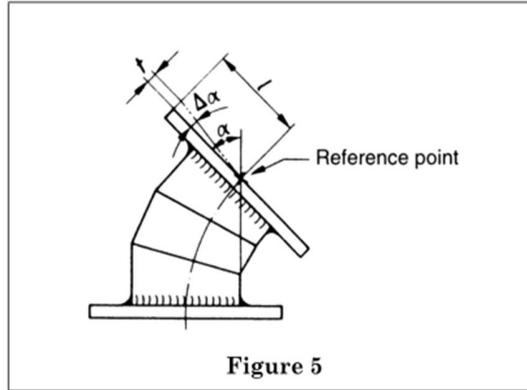
Figure 1 to Figure 5 show examples of how the shorter angle leg, l , is represented.

Table 2 — Tolerances for angular dimensions

| Tolerance class | Range of nominal sizes l in mm (length or shorter leg) | | |
|--|--|----------------------|---------------|
| | Up to 400 | Over 400 up to 1 000 | Over 1 000 |
| Tolerances $\Delta\alpha$ (in degrees and minutes) | | | |
| A | $\pm 20'$ | $\pm 15'$ | $\pm 10'$ |
| B | $\pm 45'$ | $\pm 30'$ | $\pm 20'$ |
| C | $\pm 1^\circ$ | $\pm 45'$ | $\pm 30'$ |
| D | $\pm 1^\circ 30'$ | $\pm 1^\circ 15'$ | $\pm 1^\circ$ |
| Calculated and rounded tolerances t , in mm/m ^a | | | |
| A | ± 6 | $\pm 4,5$ | ± 3 |
| B | ± 13 | ± 9 | ± 6 |
| C | ± 18 | ± 13 | ± 9 |
| D | ± 26 | ± 22 | ± 18 |

^a The value indicated in mm/m corresponds to the tangent value of the general tolerance. It is to be multiplied by the length, in m, of the shorter leg.





4.3 Straightness, flatness and parallelism tolerances

The straightness, flatness and parallelism tolerances as specified in the following Table 3 apply both for the overall dimensions of a weldment, a welding assembly, or a welded structure, and also for sections for which the dimensions are indicated.

Other tolerances of form and position, e.g. coaxiality and symmetry tolerances, have not been specified. If such tolerances are required for reasons of function,

Table 3 — Straightness, flatness and parallelism tolerances

| Tolerance class | Range of nominal sizes l in mm (relates to longer side of the surface) | | | | | | | | | |
|--------------------|--|--------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| | Over 30 up to 120 | Over 120 up to 400 | Over 400 up to 1 000 | Over 1 000 up to 2 000 | Over 2 000 up to 4 000 | Over 4 000 up to 8 000 | Over 8 000 up to 12 000 | Over 12 000 up to 16 000 | Over 16 000 up to 20 000 | Over 20 000 |
| Tolerances t in mm | | | | | | | | | | |
| E | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| F | 1 | 1,5 | 3 | 4,5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| G | 1,5 | 3 | 5,5 | 9 | 11 | 16 | 20 | 22 | 25 | 25 |
| H | 2,5 | 5 | 9 | 14 | 18 | 26 | 32 | 36 | 40 | 40 |

9.7 Anexo 7: Temperatura interpasada según norma AWS D1.1.

Table 3.3
Prequalified Minimum Preheat and Interpass Temperature (see 3.5)

| C a t e g o r y | Steel Specification | Welding Process | Thickness of Thickest Part at Point of Welding | | Minimum Preheat and Interpass Temperature | |
|--------------------------------------|------------------------|---------------------------|--|-----------------------|---|----------------|
| | | | in | mm | °F | °C |
| | | | | | | |
| A | ASTM A36 | | | | | |
| | ASTM A53 | Grade B | | | | |
| | ASTM A106 | Grade B | | | | |
| | ASTM A131 | Grades A, B, CS, D, DS, E | | | | |
| | ASTM A139 | Grade B | | | | |
| | ASTM A381 | Grade Y35 | | | | |
| | ASTM A500 | Grade A | | | | |
| | | Grade B | | | | |
| | | Grade C | | | | |
| | | Grade A | | | | |
| | ASTM A501 | Grade A | | | | |
| | ASTM A516 | | 1/8 to 3/4 incl. | 3 to 20 incl. | 32 ^a | 0 ^a |
| | ASTM A524 | Grades I & II | | | | |
| | ASTM A573 | Grade 65 | | | | |
| | ASTM A709 | Grade 36 | Over 3/4 thru 1-1/2 incl. | Over 20 thru 38 incl. | 150 | 65 |
| | ASTM A1008 SS | Grade 30 | | | | |
| | | Grade 33 Type 1 | | | | |
| | | Grade 40 Type 1 | | | | |
| | ASTM A1011 SS | Grade 30 | Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl. | Over 38 thru 65 incl. | 225 | 110 |
| | Grade 33 | | | | | |
| | Grade 36 Type 1 | | | | | |
| | Grade 40 | | | | | |
| | Grade 45 | | | | | |
| | Grade 50 | | | | | |
| | Grade 55 | | | | | |
| ASTM A1018 SS | Grade 30 | Over 2-1/2 | Over 65 | 300 | 150 | |
| | Grade 33 | | | | | |
| | Grade 36 | | | | | |
| | Grade 40 | | | | | |
| API 5L | Grade B | | | | | |
| | Grade X42 | | | | | |
| ABS | Grades A, B, D, CS, DS | | | | | |
| | Grade E | | | | | |
| B | ASTM A36 | | | | | |
| | ASTM A53 | Grade B | | | | |
| | ASTM A106 | Grade B | | | | |
| | ASTM A131 | Grades A, B, CS, D, DS, E | 1/8 to 3/4 incl. | 3 to 20 incl. | 32 ^a | 0 ^a |
| | | AH 32 & 36 | | | | |
| | | DH 32 & 36 | | | | |
| | | EH 32 & 36 | | | | |
| | ASTM A139 | Grade B | Over 3/4 thru 1-1/2 incl. | Over 20 thru 38 incl. | 50 | 10 |
| | ASTM A381 | Grade Y35 | | | | |
| | ASTM A441 | | | | | |
| | ASTM A500 | Grade A | Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl. | Over 38 thru 65 incl. | 150 | 65 |
| | | Grade B | | | | |
| | | Grade C | | | | |
| ASTM A501 | Grades A and B | | | | | |
| ASTM A516 | Grades 55 & 60 | Over 2-1/2 | Over 65 | 225 | 110 | |
| | 65 & 70 | | | | | |
| ASTM A524 | Grades I & II | | | | | |
| ASTM A529 | Grades 50 & 55 | | | | | |

(Continued)

9.8 Anexo 8: Electrodo recomendados según norma AWS D1.1.

APENDICE XIV

METAL BASE PRECALIFICADO — COMBINACIONES DE METAL DE APORTE PARA ESFUERZOS COMPARABLES

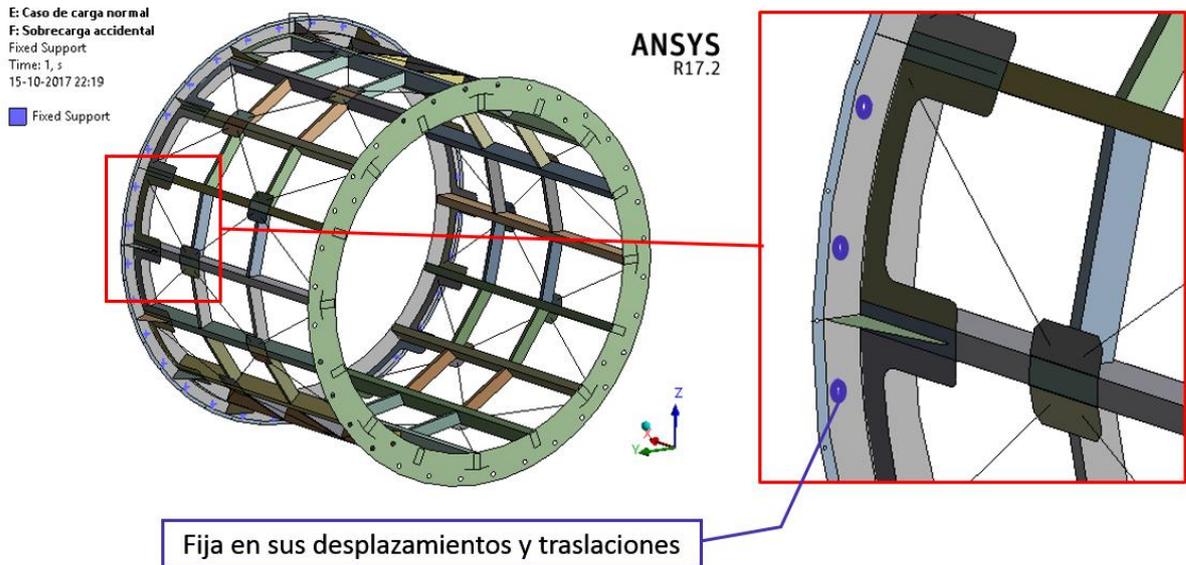
| G R U P O | Requerimientos de Especificación de Acero | | | | Requerimientos de Metales de Aporte | | | |
|------------------------|---|--------------------------------------|-----|------------------|-------------------------------------|---------|--|---|
| | Especificación de Acero ^{a,b} | Punto mínimo de Resistencia cedencia | | Rango de Tensión | | Proceso | Especificación de Electrodo AWS ^c | Clasificación de Electrodo ^d |
| | | ksi | MPa | ksi | MPa | | | |
| | | | | | | | | |
| ASMT A 36 ^e | | 36 | 250 | 58—80 | 400—550 | SMAW | A5.1 | E60XX, E70XX |
| ASMT A 53 | A5.5 | 35 | 240 | 60 min. | 415 min. | | | |
| ASTM A 106 | Grado B | 35 | 240 | 60 min. | 415 min. | | A5.5 ^f | E70XX-X |
| ASTM A 131 | Grados A, B, CS, D, DS, E | 34 | 235 | 58—71 | 400—490 | | | |
| ASTM A 139 | Grado B | 35 | 241 | 60 min. | 414 min. | SAW | A5.17 | F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX |
| ASTM A 381 | Grado Y35 | 35 | 240 | 60 min. | 415 min. | | | |
| ASTM A 500 | Grado A | 33 | 228 | 45 min. | 310 min. | | A5.23 ^f | F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX |
| | Grado B | 42 | 290 | 58 min. | 400 min. | | | |
| ASTM A 501 | | 36 | 250 | 58 min. | 400 min. | | | |
| ASTM A 516 | Grado 55 | 30 | 205 | 55—75 | 380—515 | | | |
| | Grado 60 | 32 | 220 | 60—80 | 415—550 | GMAW | A5.18 | ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodos con sufijos -GS son excluidos) |
| ASTM A 524 | Grado I | 35 | 240 | 60—85 | 415—586 | | | |
| | Grado II | 30 | 205 | 55—80 | 380—550 | | | |
| I ASTM A 529 | | 42 | 290 | 60—85 | 415—585 | | | |
| ASTM A 570 | Grado 30 | 30 | 205 | 49 min. | 340 min. | | A5.28 ^f | ER70S-XXX, E70C-XXX F7XX-ECXXX-XX |
| | Grado B | 42 | 290 | 58 min. | 400 min. | | | |
| ASTM A 501 | | 36 | 250 | 58 min. | 400 min. | | | |
| ASTM A 516 | Grado 55 | 30 | 205 | 55—75 | 380—515 | | | |
| | Grado 60 | 32 | 220 | 60—80 | 415—550 | GMAW | A5.18 | ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodos con sufijos -GS son excluidos) |
| ASTM A 524 | Grado I | 35 | 240 | 60—85 | 415—586 | | | |
| | Grado II | 30 | 205 | 55—80 | 380—550 | | | |
| I ASTM A 529 | | 42 | 290 | 60—85 | 415—585 | | | |
| ASTM A 570 | Grado 30 | 30 | 205 | 49 min. | 340 min. | | A5.28 ^f | ER70S-XXX, E70C-XXX |
| | Grado 33 | 33 | 230 | 52 min. | 360 min. | | | |
| | Grado 36 | 36 | 250 | 53 min. | 365 min. | | | |
| | Grado 40 | 40 | 275 | 55 min. | 380 min. | | | |
| | Grado 45 | 45 | 310 | 60 min. | 415 min. | FCAW | A5.20 | E6XT-X, E6XT-XM, E7XT-X, E7XT-XM (Electrodos con el -2, -2M, -3, -10, -13, -14X, y sufijos -GS están excluidos) |
| ASTM A 573 | Grado 65 | 35 | 240 | 65—77 | 450—530 | | | |
| | Grado 58 | 32 | 220 | 58—71 | 400—490 | | | |
| ASTM A 709 | Grado 36 ^e | 36 | 250 | 58—80 | 400—550 | | | |
| API 5L X | Grado B | 35 | 240 | 60 | 415 | | A5.29 ^f | E6XTX-X, E6XTX-XM, E7XTX-X, E7XTX-XM |
| | Grado X42 | 42 | 290 | 60 | 415 | | | |
| ABS | Grados A, B, D, CS, DS | | | 58—71 | 400—490 | | | |
| | Grado E ^e | | | 58—71 | 400—490 | | | |

Nota: Acero ASTM A 570 Grado 50 ha sido eliminado del grupo I y añadido al grupo II.

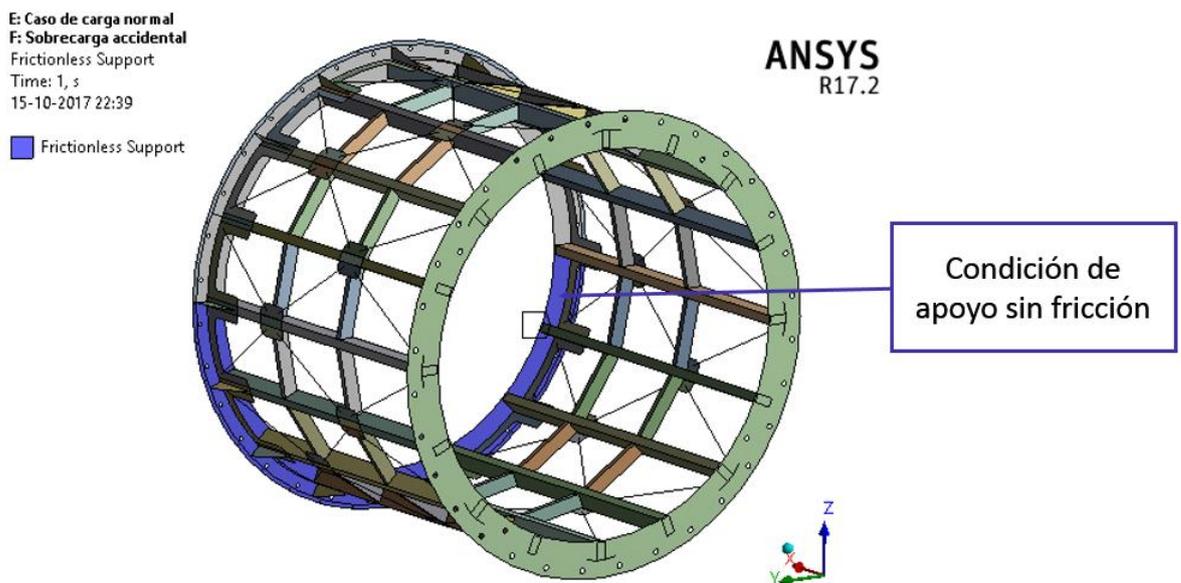
(Continúa)

9.9 Anexo 9: Condiciones de borde del rediseño del Trommel.

9.9.1 Fijaciones de perno.



9.9.2 Condición de apoyo.

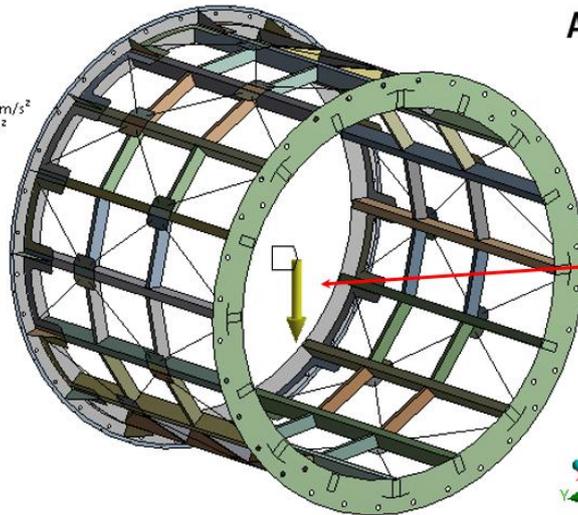


9.9.3 Aceleración de gravedad.

E: Caso de carga normal
F: Sobrecarga accidental
Standard Earth Gravity
Time: 1, s
15-10-2017 22:41

Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²
Components: 0,,0,-9806,6 mm/s²

ANSYS
R17.2



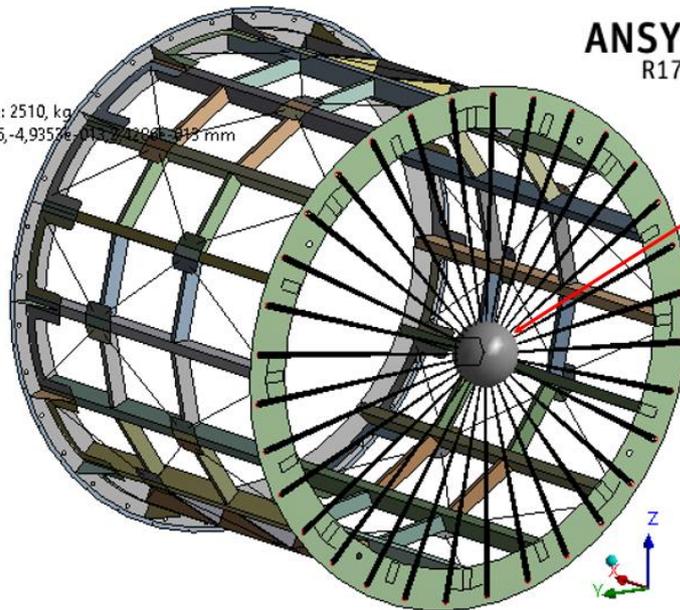
Aceleración de gravedad en dirección eje Z

9.9.4 Peso del Ball Catcher.

Point Mass
16-10-2017 0:15

Point Mass
Mass Magnitude: 2510, kg
Location: -2288,6,-4,9357e-015,72288,915 mm

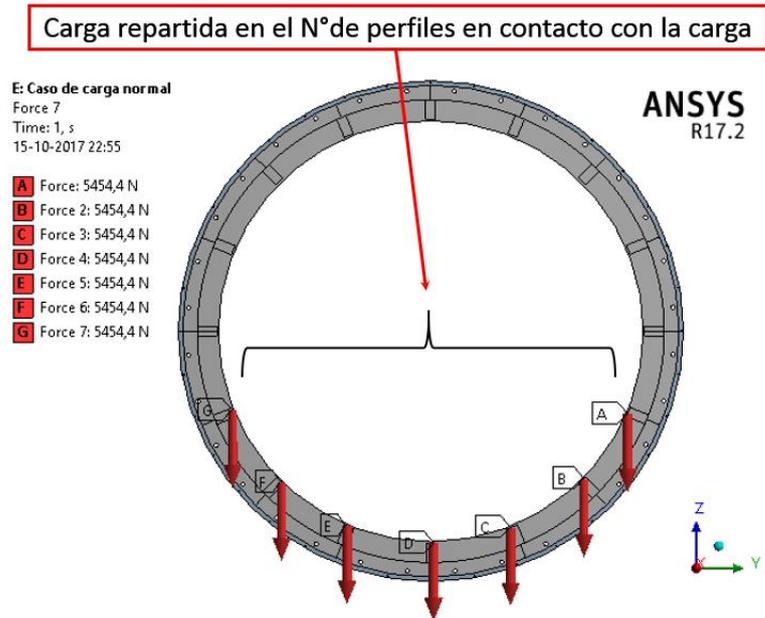
ANSYS
R17.2



Masa concentrada del Ball Catcher

9.10 Anexo 10: Casos de carga del rediseño del Trommel.

9.10.1 Caso 1: Carga de operación normal.



9.10.2 Caso 2: Carga accidental.

