

ESCONDIDA | BHP

**“ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
ROTOPALA 337-BW-001
CÁTODOS, MINERA ESCONDIDA LTDA.”**

**MEMORIA DE CÁLCULO
CC18-S-CAT-MC-06
OS N°4507781150**

CAD CAE INGENIERIA LTDA.
Avda. Balmaceda 2472 Piso 12
Antofagasta. Fono 55 2 263814
www.cad-cae.com

REVISIÓN CLIENTE: _____
FECHA: _____

REV.	FECHA	POR	CHK	APROB.	DESCRIPCIÓN
A	12.SEP.19	P.Z.S.	P.C.T.	H.L.L.	EMITIDO PARA REVISION INTERNA
B	30.NOV.19	P.Z.S.	P.C.T.	H.L.L.	COMENTARIOS DEL CLIENTE
0	16.DIC.19	P.Z.S.	P.C.T.	H.L.L.	APROBACIÓN DEL CLIENTE

ÍNDICE

1	RESUMEN EJECUTIVO.....	4
2	INTRODUCCIÓN	5
3	OBJETIVOS	6
4	ALCANCE	6
5	ANTECEDENTES.....	7
5.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	7
5.2	DOCUMENTOS.....	10
5.3	PLANOS.....	10
5.4	MATERIALES.....	11
5.5	CRITERIOS DE VERIFICACIÓN.....	12
5.6	NORMAS Y CÓDIGOS	12
5.7	VALORES ADMISIBLES	13
5.7.1	VALORES ADMISIBLES DE ESFUERZOS.....	13
5.7.2	VALORES ADMISIBLES DE DEFORMACIÓN.....	13
5.7.3	PARÁMETROS PARA ANÁLISIS DE FATIGA	14
5.8	RESISTENCIA A LA FATIGA MEDIANTE MÉTODOS ANALÍTICOS	14
5.8.1	CRITERIOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA (FALLA).....	15
5.8.2	LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA.....	20
5.9	VISITA A TERRENO	21
5.9.1	LEVANTAMIENTO FOTOGRÁFICO	21
5.9.2	HALLAZGOS DE CONDICIÓN ESTRUCTURAL	23
5.9.3	DATOS OPERACIONALES.....	24
6	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	25
6.1	MODELO COMPUTACIONAL.....	25
6.2	CASOS ANALIZADOS	27
6.3	CONDICIONES DE BORDE	27
6.4	CARGAS CONSIDERADAS.....	28
6.4.1	PESO PROPIO (PP).....	29
6.4.2	CARGAS PERMANENTES	29
6.4.3	CARGA DE MATERIAL (CM)	32
6.4.4	FUERZAS DE EXCAVACIÓN TANGENCIAL (FET).....	33
6.4.5	FUERZAS DE EXCAVACIÓN LATERAL APACHOS (FEL)	34
6.4.6	CARGA DE VIENTO (W).....	35
6.5	COMBINACIÓN DE CARGA	36
7	RESULTADOS	37
7.1	CASO 1 - RESULTADOS DE ANÁLISIS A FATIGA.....	37
7.1.1	ESFUERZO ALTERNO EJE.....	37



7.1.2	NÚMERO DE CICLOS EJE	38
7.1.3	FACTOR DE SEGURIDAD	38
7.1.4	ESFUERZO ALTERNO ESTRUCTURA SOPORTANTE	39
7.1.5	NÚMERO DE CICLOS ESTRUCTURA	40
7.2	CASO 2 - ANÁLISIS A CARGA OPERACIONAL EVENTUAL	41
7.2.1	ANÁLISIS CARGA CAPACHO	41
7.2.2	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CAPACHO	41
7.3	CASO 2 - RESULTADOS EN ANÁLISIS DE LA RUEDA	42
7.3.1	ESFUERZO COMBINADO EN LA RUEDA	42
7.3.2	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN LA RUEDA	42
7.4	CASO 2 - ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE	43
7.5	CASO 3 - PÉRDIDA MÁXIMA DE ESPESOR POR EROSIÓN	45
7.5.1	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LOS CAPACHOS	45
8	CONCLUSIONES	46
9	RECOMENDACIONES	48
10	ANEXO	49
10.1	PLANOS	49

1 RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del contrato “Memorias de Cálculo por Elementos Finitos”, Minera Escondida Ltda., en adelante Escondida, ha encargado a la Empresa CAD CAE Ingeniería Ltda. realizar un análisis estructural a través del método de elementos finitos para evaluar la probabilidad de una eventual falla “catastrófica” de sus activos críticos. En este contexto, el presente informe da cuenta de los resultados obtenidos del análisis realizado a las estructuras que conforman la Rotopala (Bucket Wheel Reclaimer). Este equipo forma parte del sistema de remoción de mineral lixiviado (Ripios), que va desde las Pilas Dinámicas de Óxidos (PAD 3) hacia el Botadero de Ripios del Área Seca de la Planta de Cátodos.

La verificación estructural de la Rotopala se ha realizado modelando las estructuras correspondientes a la rueda de cachos, eje motriz de la rueda, estructura reticulada y estructura soportante inferior.

Se evaluó el comportamiento de dichas estructuras en las condiciones actuales de operación de acuerdo a las cargas definidas por la Normativa Vigente y los Criterios de Diseño de Escondida.

Los antecedentes empleados para el informe corresponden a planos relacionados con la construcción de la Rotopala, data sheet del equipo, datos de operación actualizados, normativas vigentes, y parámetros de diseño estructural asociados a las cargas operacionales actuales.

Para la memoria de cálculo se empleó un análisis mediante un modelo tridimensional de elementos finitos, apoyado por el software ANSYS 19, en su módulo de análisis estático estructural. Se realizó la determinación de cargas relacionadas principalmente a fuerzas de excavación, carga de material, funcionamiento de equipos motrices y cargas de viento, generando una combinación de cargas que simulan las condiciones reales de operación de la Rotopala.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede determinar que la estructura global de la Rotopala cumple satisfactoriamente con las solicitaciones a las cuales es sometida de manera permanente o eventual, conforme a las normas y estándares de diseño vigentes. A partir de lo anterior, se establece que el activo cumple con las condiciones estructurales asociadas a un comportamiento dentro de los rangos admisibles, alcanzándose un factor de seguridad de 1,39. En tanto, el desplazamiento máximo corresponde a un valor de 39,105 [mm], permitiendo un correcto comportamiento operacional.

2 INTRODUCCIÓN

Minera Escondida Limitada, está ubicada en el Norte de Chile, a 170 Km. al Sureste de la ciudad de Antofagasta, a 3.100 metros sobre el nivel del mar. Su operación comenzó en 1990, y se basa en la producción de Concentrado de cobre mediante el proceso de Flotación, y Cátodos de cobre mediante los procesos de Lixiviación.

Su infraestructura consiste en dos Minas a rajo abierto, tres Plantas Concentradoras, una Planta de Cátodos y dos Mineroductos que transportan el Concentrado de Cobre desde la Mina hasta la Planta de Filtros ubicada junto al Muelle de Puerto Coloso, en Antofagasta.

Escondida, a través de su Gerencia de Ingeniería Integrada, ha encargado a la Empresa CAD CAE Ingeniería Ltda. realizar un análisis de integridad estructural a través del método de elementos finitos de sus activos críticos, denominados “Asset Integrity”.

En este informe se presentan los resultados y conclusiones del análisis realizado a las estructuras de la Rotopala, de modo de determinar los potenciales puntos críticos de la estructura susceptibles de fallar.

La Rotopala es un activo que forma parte del sistema de “Reclamo de Ripios” emplazado en el Área Seca de la Planta de Cátodos. Su función es la de remover el mineral (Ripios) que ha cumplido el ciclo de lixiviación desde la Pila Dinámica de Oxido (PAD3) hacia el Botadero de Ripios, generando de esta manera “espacio” para una nueva carga de mineral fresco y su posterior Lixiviación. La ubicación de este equipo se representa en la figura N°1.



Figura N° 1: Ubicación y sentido de avance de la Rotopala en el PAD 3.

3 OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es verificar la integridad estructural de la Rotopala 337-BW-001 bajo las condiciones de operación actual. Para ello se realizó una Memoria de Cálculo mediante el Método de los Elementos Finitos. Además, se analizan los Casos para determinar la probabilidad de que ocurra una falla de tipo colapso estructural. Para ello se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un levantamiento de información del sistema estructural de la Rotopala, con el fin de realizar un diseño geométrico en 3D para su posterior análisis.
- Evidenciar potenciales puntos críticos en los resultados de la modelación por elementos finitos de la estructura.
- Analizar a fatiga el sistema motriz de la rueda, bajo condiciones de carga operacionales.

4 ALCANCE

El alcance de esta Memoria de Cálculo es verificar las tensiones admisibles a partir de los resultados del análisis estructural, aplicada a los sistemas compuestos por la rueda motriz-capachos y el sistema estructura soportante compuesto por el Bastidor y la Pluma (bajo condiciones de cargas operacionales actuales) de la Rotopala, mediante una modelación computacional FEM, para predecir posibles fallas estructurales “colapsos”.

En función de las cargas operacionales establecidas, se determinan los puntos críticos y el máximo esfuerzo generado en la estructura de la Rotopala. Además, se determinó la máxima disminución de espesor (espesor mínimo) que pueden tener los capachos de la Rotopala a través, de un cálculo de erosión (desgaste) del material.

Del estudio, quedan excluidas las verificaciones de anclajes y conexiones. Adicionalmente, han quedado excluidas las condiciones generadas por incendio y cargas sísmicas.

5 ANTECEDENTES

5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

La Rotopala fue fabricada y suministrada por la empresa FAM, entró en operación en el año 2014 como parte del Proyecto OLAP (Oxide Leach Project). Está compuesto por una estructura metálica enrejada (Pluma) que soporta la correa CV-020, el Bastidor y una Rueda de Capachos (Cangilones).

El peso total del equipo es de 400 toneladas, tiene una capacidad de diseño para excavar y remover 5.027 toneladas/horas de Ripios para una altura de pila de 6 metros. Este equipo está asociado a una correa puente móvil CV-021, solidario con los movimientos en avance de la Rotopala. Las principales características del equipo son:

• TAG del equipo	:	337-BW-001
• Área	:	Cátodos
• Vendor	:	FAM
• Año de inicio de operación	:	2014
• Densidad del mineral Húmedo	:	1,68 [t/m ³]
• Flujo de diseño	:	5.150 [t/h]
• Flujo operacional actual	:	4.000 [t/h]
• Largo total	:	38 [m]
• Ancho	:	12 [m]
• Diámetro de la rueda	:	12 [m]
• Número de Capachos	:	10
• Velocidad nominal de traslación	:	4,9 [m/min]
• Presión máxima sobre el piso	:	10 [t/m ²]
• Peso total	:	400 [ton]

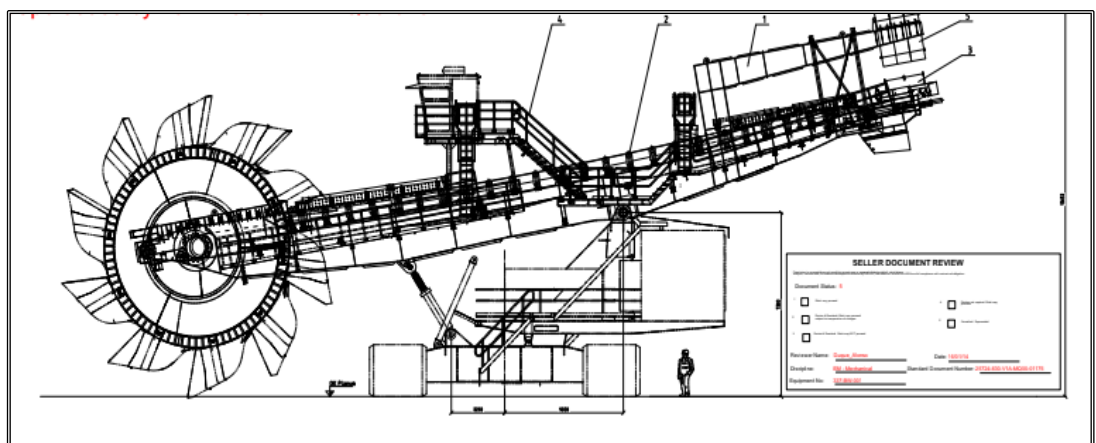


Figura N° 2: Ensamble Rotopala, según plano [9].

La Rotopala corresponde a una mega-estructura móvil, formada por una estructura de acero soportante basal según plano referencia [4], con cilindros hidráulicos que permiten el movimiento vertical de la Rotopala.

Unida a esta estructura, mediante dos ejes o pasadores, existe una estructura o cuerpo reticular según plano de referencia [5] en perfiles de acero. A su vez, sostiene y permite la unión hacia la rueda según plano de referencia [3], de la Rotopala mediante un eje motriz. Esta Rotopala consta de un cuerpo de acero circular (Rueda) de diámetro 12 metros al cual se unen diez capachos de acero según plano de referencia [7].

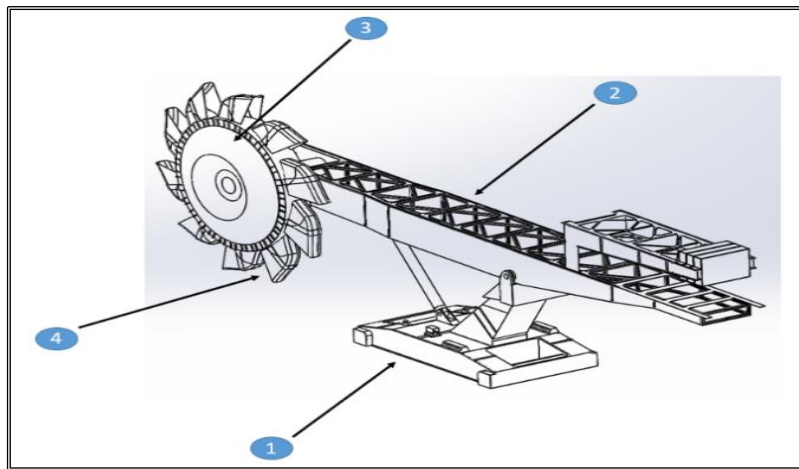


Figura N° 3: Distribución de elementos constituyentes de la Rotopala.

ESTRUCTURA BASAL: La estructura Basal (Figura N°4), es el cuerpo de la Rotopala y permite, mediante la transmisión por ejes y cilindros hidráulicos, el movimiento soportado de la rueda en planos longitudinales. Se constituye principalmente de perfiles y placas de Acero ASTM A572 Grado 50.

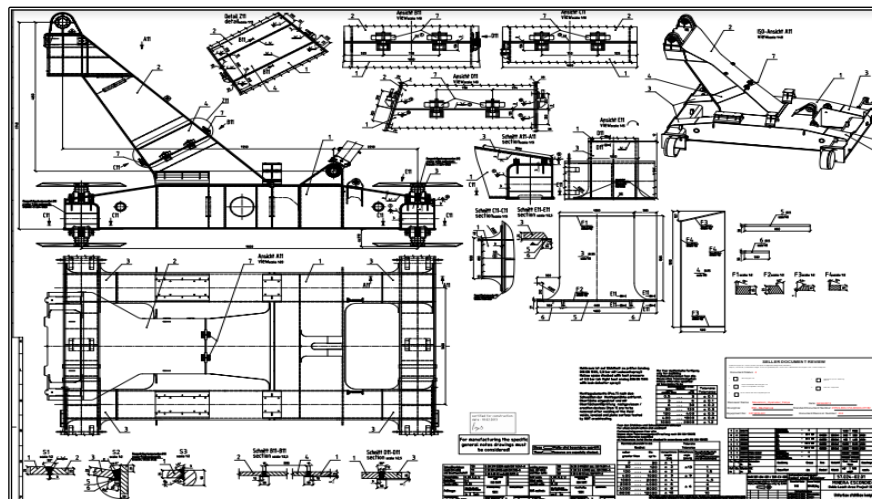


Figura N° 4: Estructura basal soportante, según plano [6]

5.2 DOCUMENTOS

Los documentos de referencia considerados en la verificación son los siguientes:

- [1] Manual de Operación, Bucket Wheel Reclaimer 337-BW-001, Documento N°337-BW-001_337-CV-020_M6_EN.
- [2] Criterio de Diseño Civil Estructural ES-HP4-070-P-7 Ver 3
- [3] Engineering Assesment, Rotopala 0337-BW-001 – Pila Lixiviación PAD 3 – Planta de óxido.

5.3 PLANOS

Los planos utilizados para el análisis del equipo son los siguientes:

- [4] Estructura reticulada: 25724-830-V1A-MQ00-03162r001v1_1
- [5] Estructura reticulada: 25724-830-V1A-MQ00-02019r002v2_1
- [6] Estructura reticulada: 25724-830-V1A-MQ00-01188r002v2_1
- [7] Estructura reticulada: 25724-830-V1A-MQ00-01185r002v2_1
- [8] Estructura soportante: 25724-830-V1A-MQ00-02960r001v1_1
- [9] Estructura soportante: 25724-830-V1A-MQ00-01182r002v2_1
- [10] Estructura soportante: 25724-830-V1A-MQ00-01184r003v3_1
- [11] Rueda y capachos: 25724-830-V1A-MQ00-01190r002v2_1
- [12] Ensamblaje completo: 25724-830-V1A-MQ00-01175r003v2_3
- [13] Eje: 25724-830-V1A-MQ00-01194r003v3_1

5.5 CRITERIOS DE VERIFICACIÓN

Para la verificación estructural de la Rotopala, se considerarán los siguientes criterios:

- Número máximo de ciclos de vida que puede soportar la estructura antes de fallar debido a fatiga.
- Tensiones admisibles, relacionadas a los tipos de materiales empleados y las solicitaciones externas, sin considerar criterios de deformación relacionados, entendiendo que la estructura fallará de ser alcanzadas estas tensiones.

5.6 NORMAS Y CÓDIGOS

DISEÑO GENERAL

- [14] DIN 22261 - Excavators, spreaders and auxiliary equipment in opencast lignite mines.
- [15] NCh 432 – 2010. Cálculo de acción del Viento sobre las Construcciones.
- [16] ISO 5049-1 Mobile Equipment for continuous handling of bulk material.
- [17] DIN 18800-1 Design and construction.
- [18] DIN 18800-2 Stability – Buckling of bars and skeletal structures.
- [19] DIN 18800-3 Stability – Buckling of plates.
- [20] DIN 18800-4 Stability – Analysis of safety against buckling of shells.
- [21] DIN 4114 Stability – Buckling of bars and skeletal structures.
- [22] DIN 22261 Excavators, spreaders and auxiliary equipment in opencast lignite mines – Part 2: Calculations principles.
- [23] NCh 433 Seismic Design of building.
- [24] NCh 2369 Seismic Design for Industrial Structures and Facilities.
- [25] NCh 3171 Load Combinations.
- [26] ASCE 7 – 05 Calculation of the wind load while idle.

DISEÑO DE ACERO ESTRUCTURAL

- [27] AISC325-05, Steel Construction Manual, 13th Edition.
- [28] AISC341-05, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings.
- [29] American Welding Society, AWS.

La verificación del equipo corresponde a las curvas de fatiga para cada material dentro del análisis. Por lo que, se analizan los criterios y factores de diseño según Goodman y Soderberg que establecen los límites de resistencia de los elementos bajo un conjunto de condiciones estandarizadas y muy restringidas.

5.7.3 PARÁMETROS PARA ANÁLISIS DE FATIGA

Para el análisis se han considerado los parámetros empíricos relacionados al ensayo a fatiga del acero ASTM A572 Grado 50. De esta forma resulta la curva de fatiga del material, presentada en la Figura N°7.

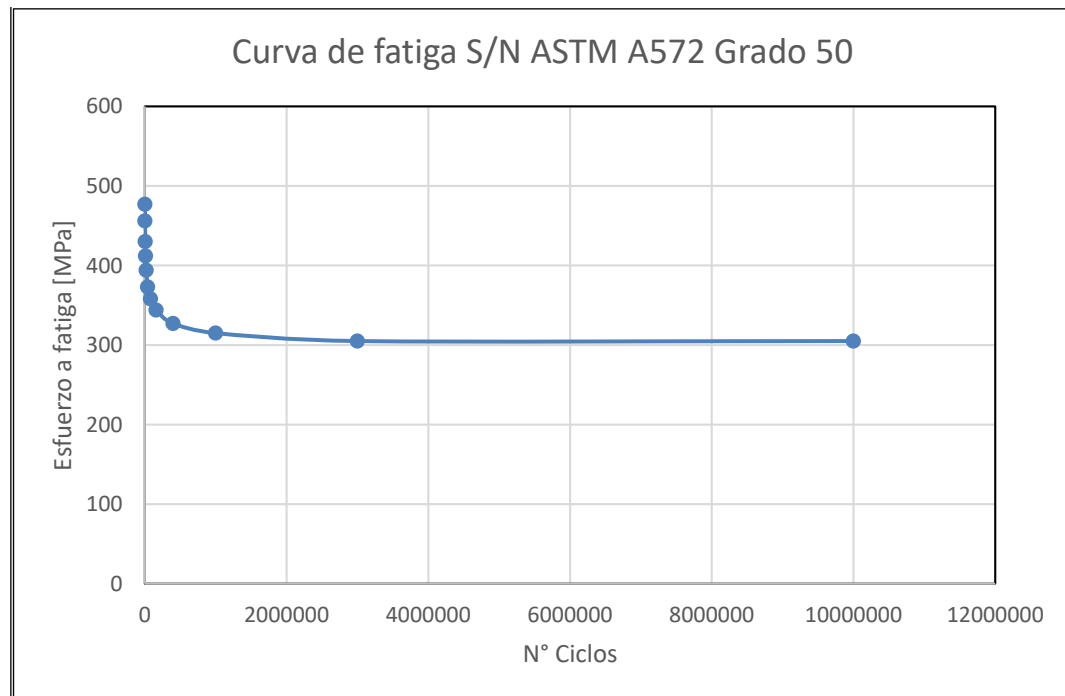


Figura N° 7: Curva S/N ASTM A572 Grado 50.

5.8 RESISTENCIA A LA FATIGA MEDIANTE MÉTODOS ANALÍTICOS

Para el diseño adecuado de un eje, es necesario definir una serie de factores que afectan la resistencia a la fatiga en conjunto con criterios de falla que consideren el efecto del esfuerzo medio. Para el presente estudio es necesario obtener los factores de Marín en conjunto con el criterio de Goodman / Soderberg los cuales se muestran a continuación:



k_a = factor de modificación de la condición superficial
k_b = factor de modificación del tamaño
k_c = factor de modificación de la carga
k_d = factor de modificación de la temperatura
k_e = factor de confiabilidad
k_f = factor de modificación de efectos varios
S'_e = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria
S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

Figura N° 8: Definición de los factores de Marín.

Cabe señalar que según los factores correctores de Marín más importantes y utilizados corresponden al factor de modificación de la condición superficial, factor de tamaño y factor de carga.

Los factores obtenidos se presentan a continuación:

- $K_a = 0,68$
- $K_b = 0,472$
- $K_c = 1$
- $K_d = 1$

Factor de acabado superficial (K_a):

Para el factor de acabado superficial se utilizó un gráfico que relaciona este factor (K_a) con respecto a la resistencia a la tracción (esfuerzo último de tracción) que para el caso del eje en análisis corresponde a 1.227 [MPa], según acero AISI-SAE 4340.

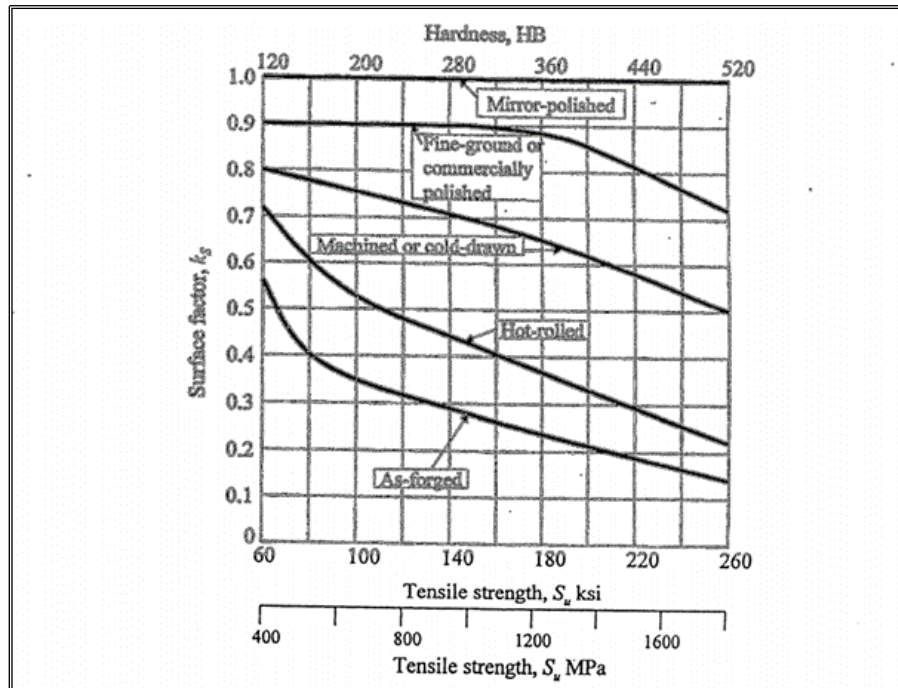


Figura N° 9: Relación entre resistencia a la tracción y factor de acabado superficial (K_a).

Factor de tamaño (K_b):

Para el factor de tamaño se utilizó la siguiente expresión que relaciona el diámetro de los elementos analizados en conjunto y el factor de tamaño K_b :

$$K_b = 1.24d^{-0.107}$$

Dado que el diámetro nominal corresponde a 829,5 [mm] se obtuvo un factor de tamaño K_b igual a 0,472.

Factor de carga (K_c):

Dado que existe una combinación de carga de flexión y torsión se debe utilizar un del factor de carga se utilizó un factor de 1.

Factor de influencia de la temperatura (K_d):

Para el caso del factor de influencia de temperatura (K_d) dado que la temperatura de operación del equipo está en valores menores a los 50 [°C] el factor de temperatura tiene una variación menor al 1%, por lo tanto, se consideró K_d igual a 1.

Corrección del esfuerzo medio.

Dada la dinámica y efectos de carga presentes en el eje del sistema motriz existen esfuerzos medios variando con diferentes niveles de amplitud. Estos esfuerzos medios tienen una influencia importante en los resultados de durabilidad, conjugados con los esfuerzos alternos presentes en la estructura. Es por lo anterior que es necesario corregir los valores de amplitud de esfuerzo alterno, de tal manera que consideren los efectos medios presentes. Para ellos se utilizó la curva de Soderberg, dado que es adecuado para materiales dúctiles como el acero presente en el eje. Una representación de la curva se presenta en la Figura N°10.

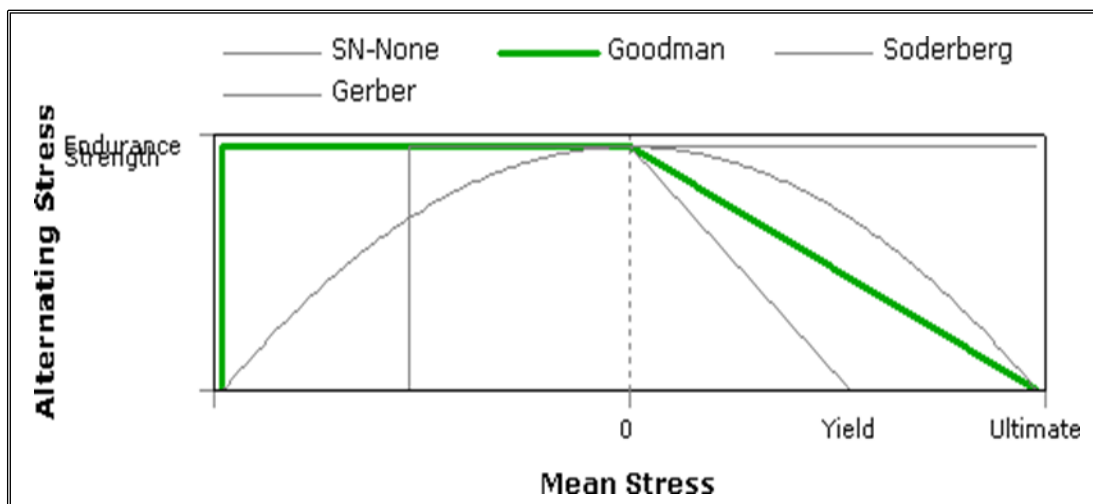


Figura N° 10: Curva de corrección del esfuerzo medio - Goodman.

Factores de concentración de esfuerzo.

Debido al diseño del eje y la unión mecánica con el resto de los elementos que conforman el sistema motriz del tambor, el eje presenta cambios de diámetro y chaveteros, generándose concentradores de esfuerzo, los cuales se evalúan como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Factor de concentración de esfuerzo a la flexión:} & \quad K_f = 1 + q (K_t - 1) \\ \text{Factor de concentración de esfuerzo a la torsión:} & \quad K_{fc} = 1 + q_{fc}(K_{tf} - 1) \end{aligned}$$

Dónde:

- q y q_{fc} : Sensibilidad de la muesca a flexión y torsión respectivamente.
- K_t y K_{tc} : Factor de concentración de esfuerzo por fatiga.

De las Figuras N°11 y N°12, se pueden obtener los parámetros de fatiga por concentración de esfuerzos:

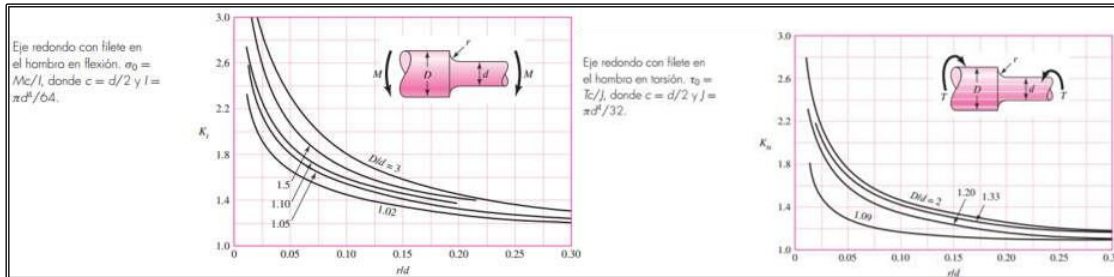


Figura N° 11. Factor de concentración de esfuerzo por fatiga para eje en flexión (K_t) y torsión (K_{tc}).

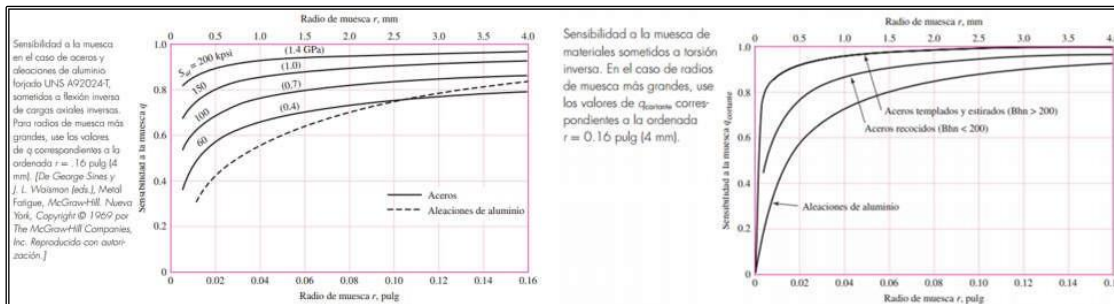


Figura N° 12. Sensibilidad de la muesca a flexión (q) y torsión respectivamente (q_{fc}).

En la Tabla N°1, se muestra los parámetros utilizados para el cálculo de la resistencia a la fatiga, los cuales se obtienen combinando los factores geométricos y ecuaciones anteriormente mostradas.

Tabla N° 1: Parámetros de concentración de esfuerzo.

Parámetros de gráficos	
r/d	0,027
D/d	1,086
K_t aproximado	2
K_{tf} aproximado	1,5
q (flexión)	0,8
q (torsión)	0,9

Dado lo anterior, en la Tabla N°2, se muestran los resultados del cálculo de los factores de concentración de esfuerzo, tanto para flexión como para torsión.

Tabla N° 5: Diferentes diámetros mínimos según factor de seguridad empleado.

Factor de Seguridad	Criterio de falla	Diámetro mínimo [mm]
1	Goodman	775,9
	Soderberg	779,7
2	Goodman	982,4
	Soderberg	977,6
3	Goodman	1.124,6
	Soderberg	1.119
4	Goodman	1237,8
	Soderberg	1231,2

5.9 VISITA A TERRENO

5.9.1 LEVANTAMIENTO FOTOGRÁFICO

Durante la visita a terreno se realizó una inspección visual de la estructura de la Rotopala con el propósito de identificar posibles modificaciones realizadas respecto del diseño original. A continuación, se muestran algunas fotografías relacionadas con las estructuras del activo.



Figura N° 13: Inspección visual en terreno de Rotopala.



Figura N° 14: Inspección visual en terreno de Rotopala.



Figura N° 15: Inspección visual en terreno de carpachos y eje de disco

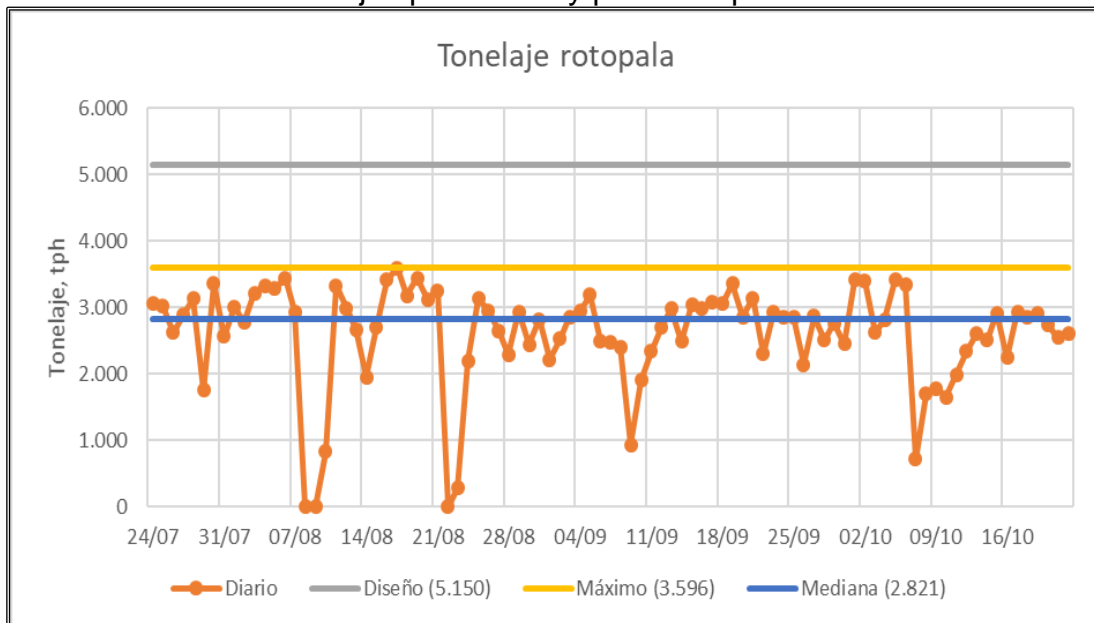
5.9.3 DATOS OPERACIONALES

De acuerdo a los antecedentes entregados por Operaciones Planta en septiembre del 2019, se tienen los siguientes datos de operación actuales de la Rotopala:

- Capacidad de diseño, mineral seco : 5.150 [tms/h]
- Rendimiento promedio instantáneo : 2.821 [ton/h]
- Rendimiento máximo (Peak) : 3.596 [ton/h]

Los datos de tonelajes promedio y máximo fueron obtenidos de Operaciones. A continuación, se presenta una gráfica que muestra los tonelajes (rendimientos) en un periodo de tiempo de 3 meses, en él se representan los valores promedio (media diaria), máximos (peak) y se comparan con la capacidad de diseño.

Gráfico N°1: Tonelajes promedios y peak comparados con el diseño



6 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para el análisis del comportamiento mecánico de la estructura, se utilizó el software ANSYS 2019 R1, específicamente el módulo de análisis estático estructural, basado en la teoría de elementos finitos (FEM).

La metodología propuesta para dar cumplimiento con los objetivos se muestra a continuación:

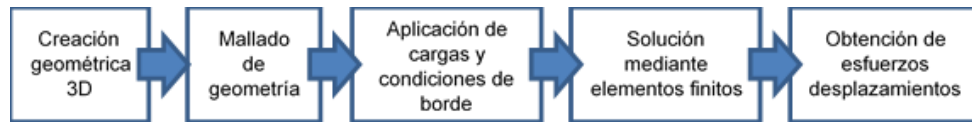


Figura N° 16: Esquema de trabajo de un modelo FEA.

6.1 MODELO COMPUTACIONAL

De acuerdo a los componentes anteriormente descritos, y a los antecedentes disponibles, planos y documentos provistos, se desarrolló el diseño geométrico de la Rotopala (Figura N°17). Para el método de análisis se consideran uniones de soldadura entre perfiles y placas respectivamente, así como la unión por ejes entre las diferentes estructuras.

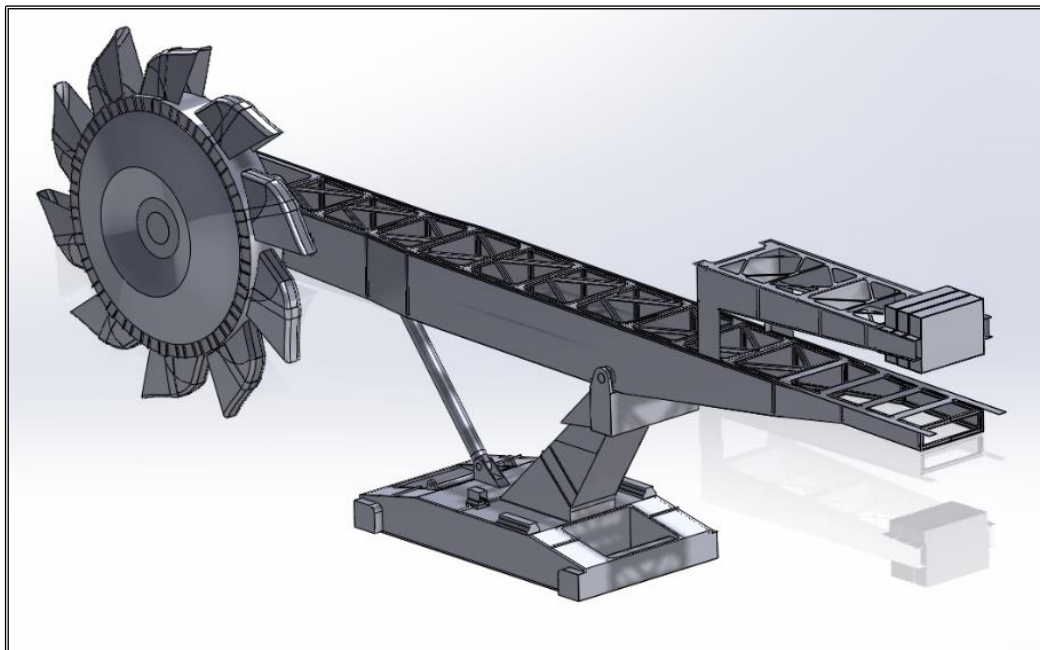


Figura N° 17: Diseño geométrico 3D de la Rotopala.

Se ha empleado una malla de acuerdo a lo presentado en las Figuras N°18 y N°19, en donde es posible identificar una calidad aceptable para la misma de acuerdo al mesh quality (0,88) presentado por ANSYS. La cantidad de elementos empleados en la modelación es de 6.051.223 y la cantidad de nodos fue de 12.053.191.

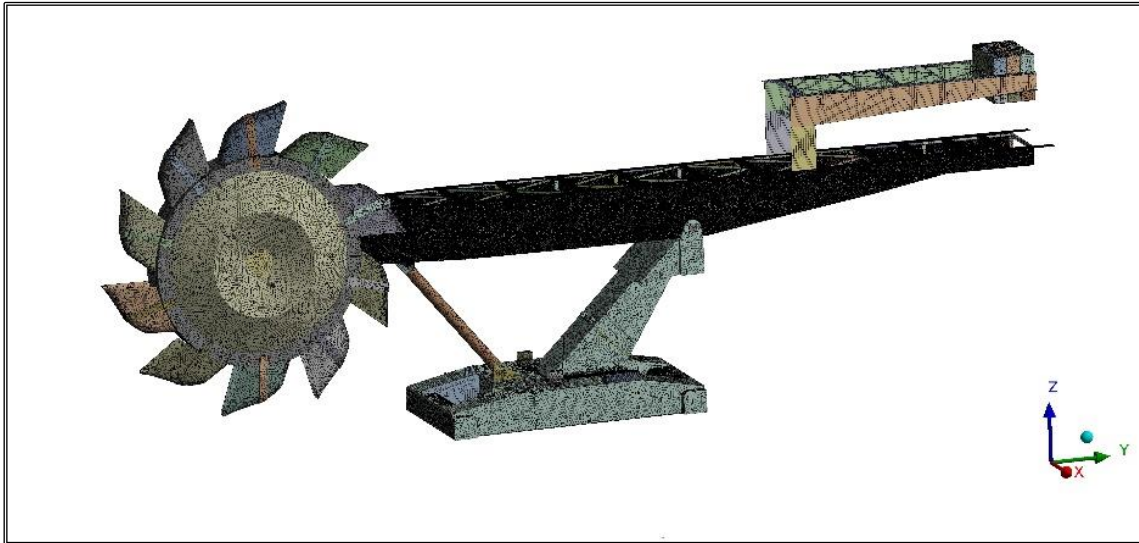


Figura N° 18: Malla por elementos finitos.

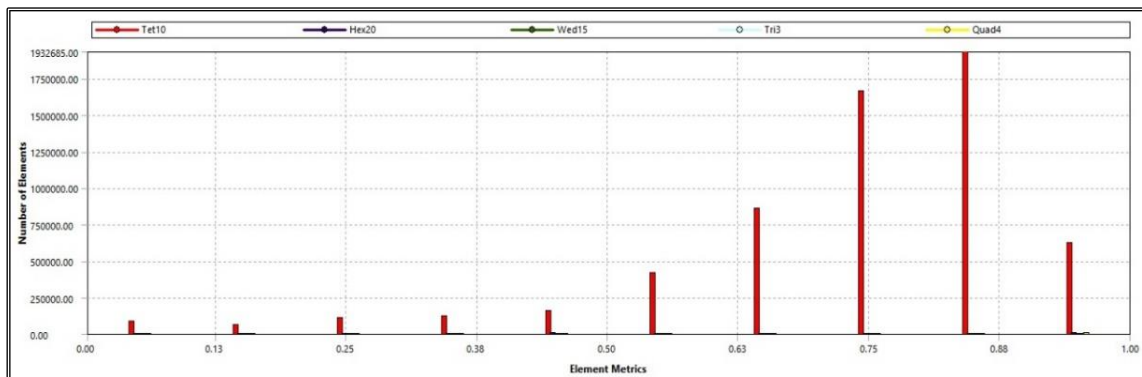


Figura N° 19: Distribución de elementos en la malla.

6.4.1 PESO PROPIO (PP)

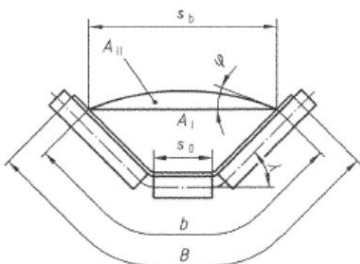
El peso propio de la estructura corresponde a la masa de los perfiles, rueda, capachos y estructuras soportantes de la Rotopala. De acuerdo al documento provisto por la empresa mandante (Operating Instructions, Bucket Wheel Reclaimer 337-BW-001), las masas asociadas a la Rueda, Capacho y ejes corresponden a un total de **54.125 [kg]**.

Además, se debe agregar al peso propio de la estructura, las cargas permanentes en el sistema, las cuales se indican a continuación:

6.4.2 CARGAS PERMANENTES

Carga de Mineral sobre la correa (F):

For the static calculation the material load is determined from the cross-sectional area of the conveyor. Therefore a bulk density of 2.1 t/m^3 is considered. The cross-sectional area is calculated as follows:



$$b = 0.9 \cdot B - 0.05 \text{ m} = 0.9 \cdot 1.834 \text{ m} - 0.05 \text{ m} = 1.6 \text{ m}$$

$$s_b = s_0 + (b - s_0) \cdot \cos \lambda = 0.67 \text{ m} + (1.6 \text{ m} - 0.67 \text{ m}) \cdot \cos 35^\circ = 1.432 \text{ m}$$

$$A_1 = 0.25 \cdot [(1.432 \text{ m})^2 - (0.67 \text{ m})^2] \cdot \tan 35^\circ = 0.28 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{(1.432 \text{ m})^2}{8 \cdot (\sin 12^\circ)^2} \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot 12^\circ}{180^\circ} - \sin(2 \cdot 12^\circ) \right] = 0.072 \text{ m}^2$$

$$A = A_1 + A_2 = 0.28 + 0.072 = 0.352 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow q_{F,St} = 0.352 \text{ m}^2 \cdot 21 \text{ kN/m}^3 = 7.39 \text{ kN/m}$$

For transportation of the material a dynamic load factor of 1.1 is applied.

For fatigue strength calculation a nominal mass flow of 5027 to/h is considered.

$$\Rightarrow q_{F,Fatigue} = \frac{5027 \text{ to/h} \cdot 10}{3600 \text{ s} \cdot 3.6 \text{ m/s}} = 3.90 \text{ kN/m}$$

Carga de Incrustación (V):

Se considera un 15% de la carga de mineral sobre la correa

$$V = 0,15 \cdot 7,39 = 1,1 \text{ [kN/m]}$$

Considerando una capa de 5 [cm] pegado en el disco de la Rotopala de diámetro de 10 [m], se considera una incrustación de

$$V = \pi/4 \cdot (10 \text{ m})^2 \cdot 0,05 \text{ m} \cdot 21 \text{ [kN/m}^3]$$

$$V = 82 \text{ [kN]}$$

6.4.3 CARGA DE MATERIAL (CM)

La carga de material corresponde a la masa de material (Ripios) a sustraer del espacio de excavación mediante el impacto del capacho sobre este. Se determina como se presenta a continuación (Tabla N°7):

$$CM = \rho * V_{exc}$$

En dónde,

CM : Carga de material
 P : Densidad del material a excavar
 V_{exc} : Volumen de material a excavar

Tabla N° 7: Cálculo de carga de material en Capacho.

Parámetros de cálculo		
Parámetro	Unidad	Magnitud
Densidad	[kg/m ³]	1.950
Volumen	[m ³]	2
Carga de material	[kg]	3.900

Esta carga de material se puede apreciar en la Figura N°23 actuando directamente sobre el capacho.

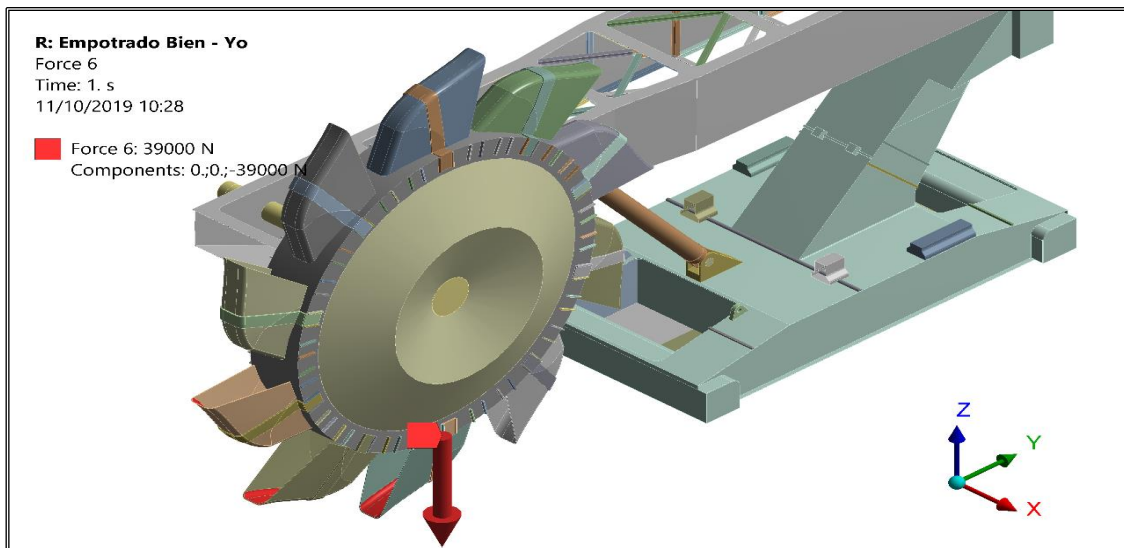


Figura N° 23: Carga de material sobre capacho.

6.4.4 FUERZAS DE EXCAVACIÓN TANGENCIAL (FET)

La fuerza de excavación tangencial sobre los capachos corresponde a una fuerza de corte generada sobre los capachos, la cual se calcula como se presenta a continuación (Tabla N°8):

$$F_{ETC} = K_{uz} * K_e * S_{tm}$$

En dónde:

- F_{ETC} : Fuerza de excavación tangencial sobre capachos
- K_{uz} : Coeficiente relacionado al capacho
- K_e : Resistencia específica del material a recolectar
- S_{tm} : Superficie promedio del capacho

Tabla N° 8: Cálculo carga de excavación tangencial sobre Capacho.

Parámetros de cálculo		
Parámetro	Unidad	Magnitud
Coeficiente capacho	(-)	2
Resistencia específica	[N/cm ²]	60
Superficie promedio	[cm ²]	800
Fuerza de excavación Tc.	[N]	96.360

Esta carga puede verse aplicada directamente sobre el capacho, como se presenta en la Figura N°24.

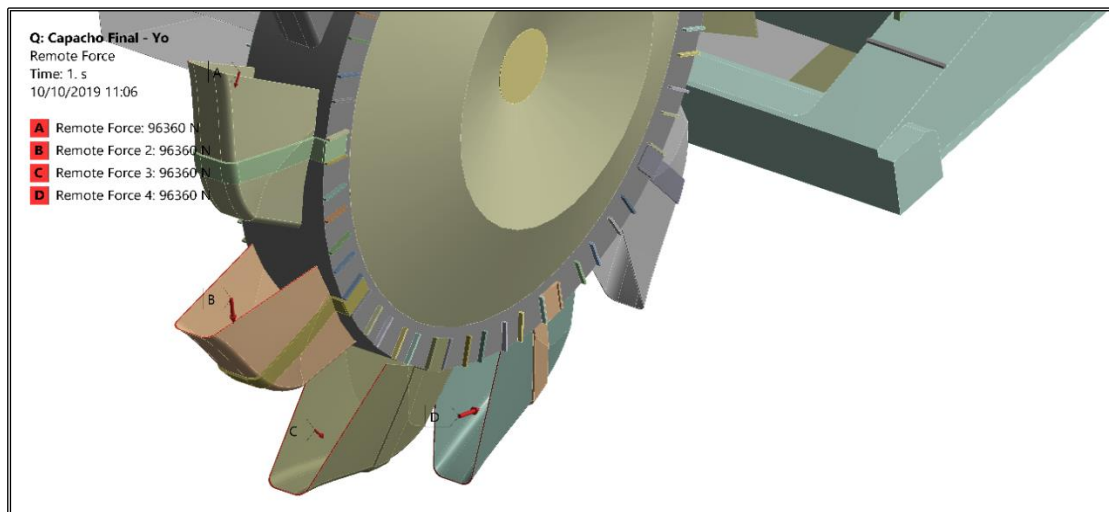


Figura N° 24: Carga tangencial sobre el capacho.

6.4.6 CARGA DE VIENTO (W)

La carga de viento sobre la estructura se aplica a partir de la presión básica de viento, la cual depende tanto de la ubicación de la estructura como de la altura máxima. De esta forma, la presión básica de viento considerada para el análisis depende de los parámetros presentes en la Tabla N°10.

Ubicación de la Rotopala:

Desierto de atacama, a 196 km al sureste de la ciudad de Antofagasta, Faena Minera Escondida Ltda. PAD 3, Elevación: 3.060 msnm, Clima: Desértico (árido). Temperatura: T° mínima: -10°C, T° máxima: 32 °C, T° promedio: 10°C.

Tabla N° 10: Cálculo de Carga de Viento.

Parámetros carga de viento extremo	
Velocidad básica de viento extremo [m/s]	50
Altura media de la Rotopala [m]	12
Presión básica de viento [kg/m ²]	157

Esta carga puede verse aplicada sobre la rueda en su cara externa, tal como lo presenta la Figura N°26.

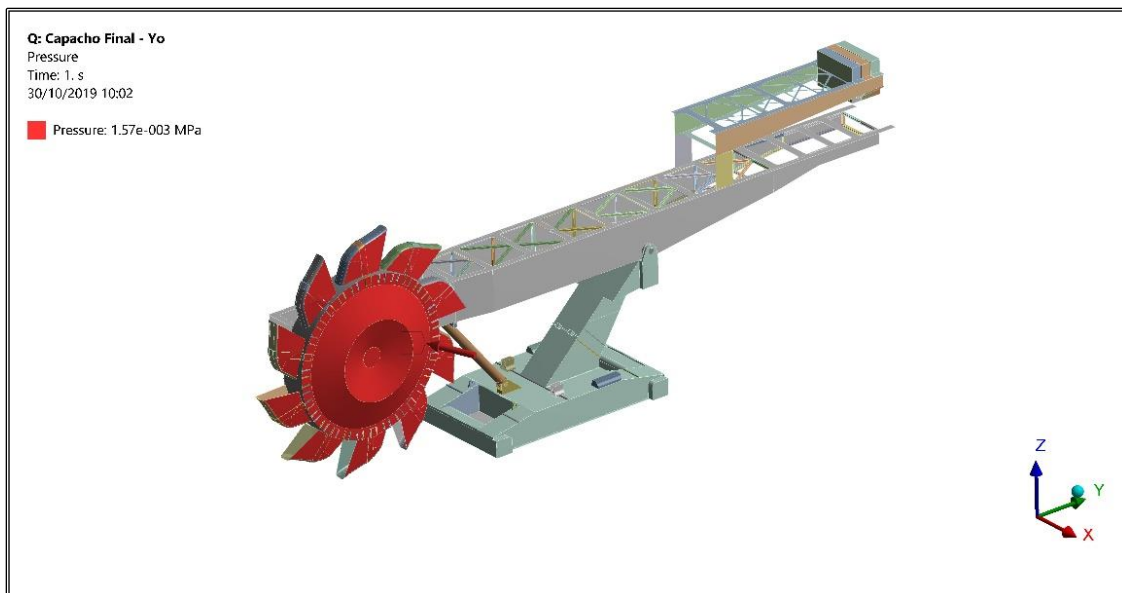


Figura N° 26: Carga de viento sobre la rueda.



6.5 COMBINACIÓN DE CARGA

La combinación de carga para la Rotopala, está definida según su condición de operación más desfavorable. Está representada de la forma: (PP+CM+FET+FEL+CV), implicadas a las partes críticas del equipo.

7 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados para 3 casos analizados. El caso 1 entrega los resultados del análisis a fatiga para el comportamiento del eje y la estructura soporte de la Rotopala. El caso 2 analiza 3 elementos bajo unas combinaciones de cargas mencionadas en el apartado 6.5, estos elementos son: Capacho, Rueda y Estructura. Finalmente, el caso 3 determina la máxima pérdida de espesor por erosión de los capachos.

7.1 CASO 1 - RESULTADOS DE ANÁLISIS A FATIGA

7.1.1 ESFUERZO ALTERNO EJE

A partir de las condiciones adoptadas para el análisis del eje a fatiga, en condiciones operacionales, el esfuerzo alterno generado por los factores de modificación en el eje corresponde a **237,43 [MPa]**, tal como lo presenta la Figura N°27.

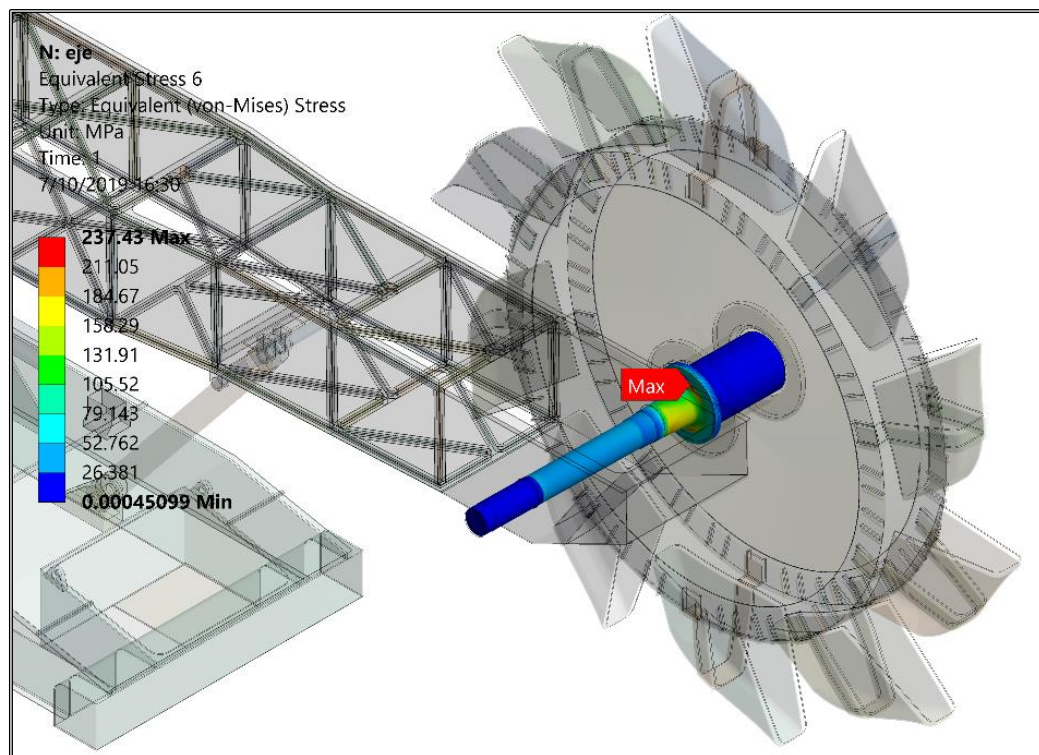


Figura N° 27: Esfuerzo equivalente en el eje motriz de la rueda – Caso 1.

7.1.4 ESFUERZO ALTERNO ESTRUCTURA SOPORTANTE

De acuerdo al análisis empleado, y las condiciones de carga adoptadas, es posible identificar un esfuerzo alterno en la estructura soporte de la Rotopala correspondiente a **219,22 [MPa]**, como es posible identificar en las Figuras N°30 y N°31, esto es considerando los factores de corrección del material de la estructura de la Rotopala.

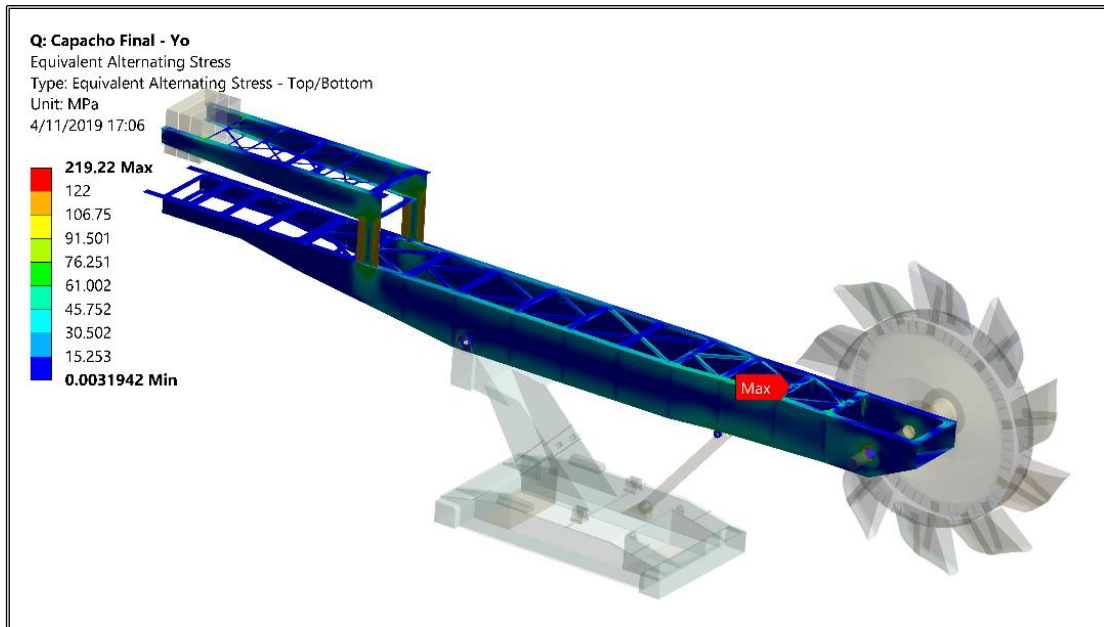


Figura N° 30: Esfuerzo máximo en Estructura Rotopala – Caso 1.

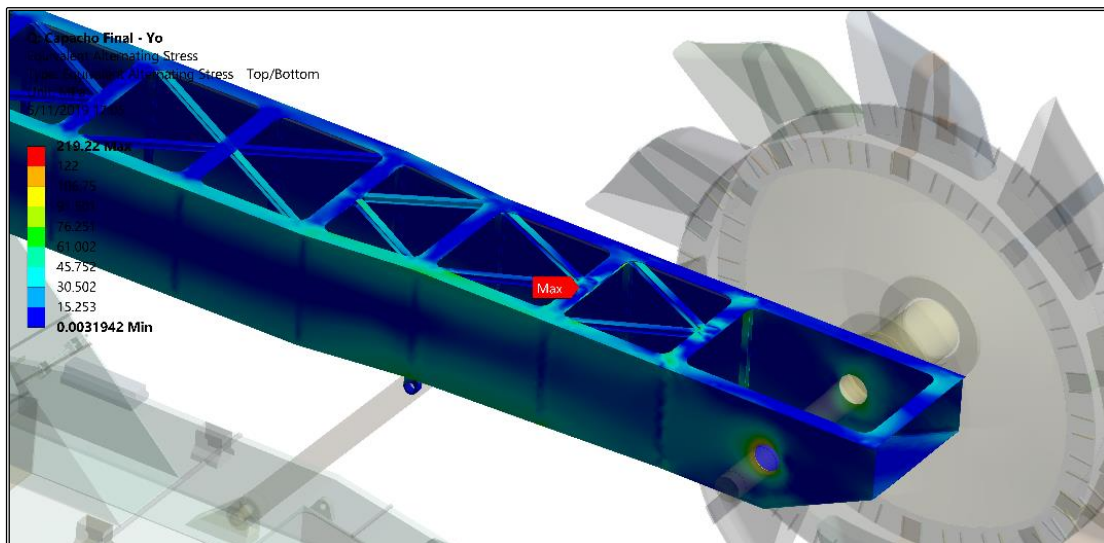


Figura N° 31: Esfuerzo máximo en Estructura Rotopala – Caso 1.

7.3 CASO 2 - RESULTADOS EN ANÁLISIS DE LA RUEDA

7.3.1 ESFUERZO COMBINADO EN LA RUEDA

De acuerdo al análisis empleado, y las condiciones de carga adoptadas, es posible identificar un esfuerzo equivalente en la rueda correspondiente a **93,07 [MPa]**, como es posible identificar en la Figura N°35.

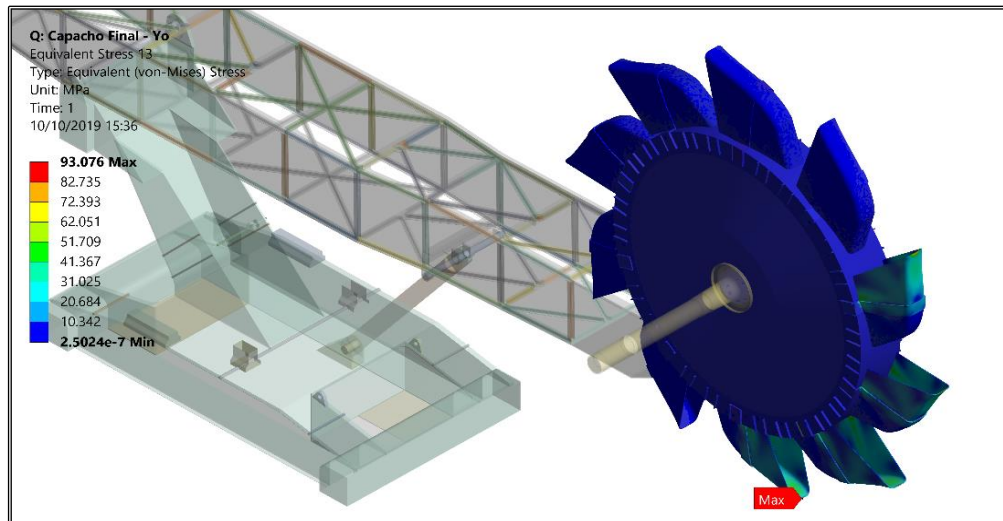


Figura N° 35: Esfuerzo equivalente en la Rueda – Caso 2.

7.3.2 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN LA RUEDA

A partir de las condiciones adoptadas, se ha determinado un desplazamiento máximo en la rueda de **6,44 [mm]**, como se aprecia en la Figura N°36.

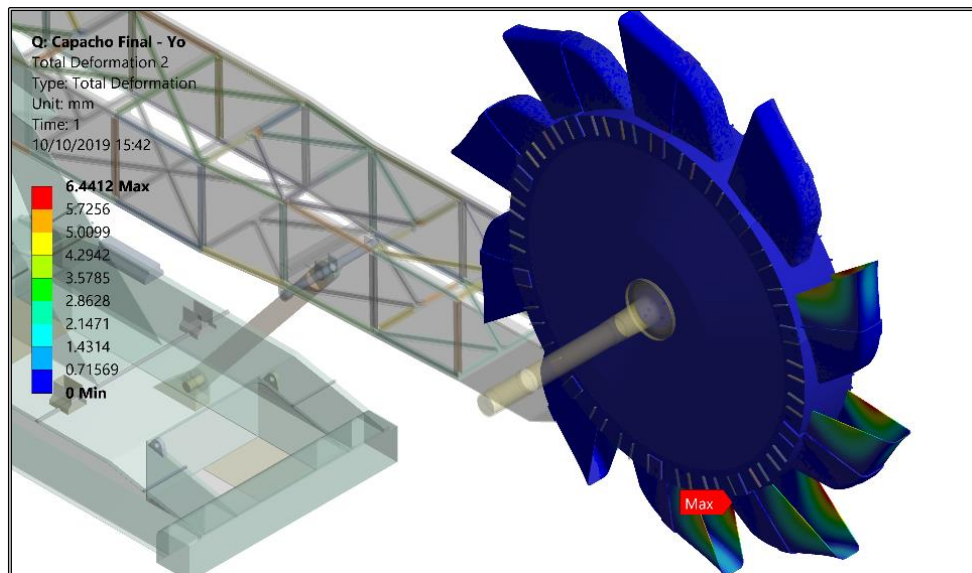


Figura N° 36: Desplazamiento global en la Rueda – Caso 2.

7.4 CASO 2 - ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE

De acuerdo al análisis empleado, y las condiciones de carga adoptadas, es posible identificar un esfuerzo equivalente en la estructura de la Rotopala correspondiente a **255,6 [MPa]**, como es posible identificar en la Figura N°37.

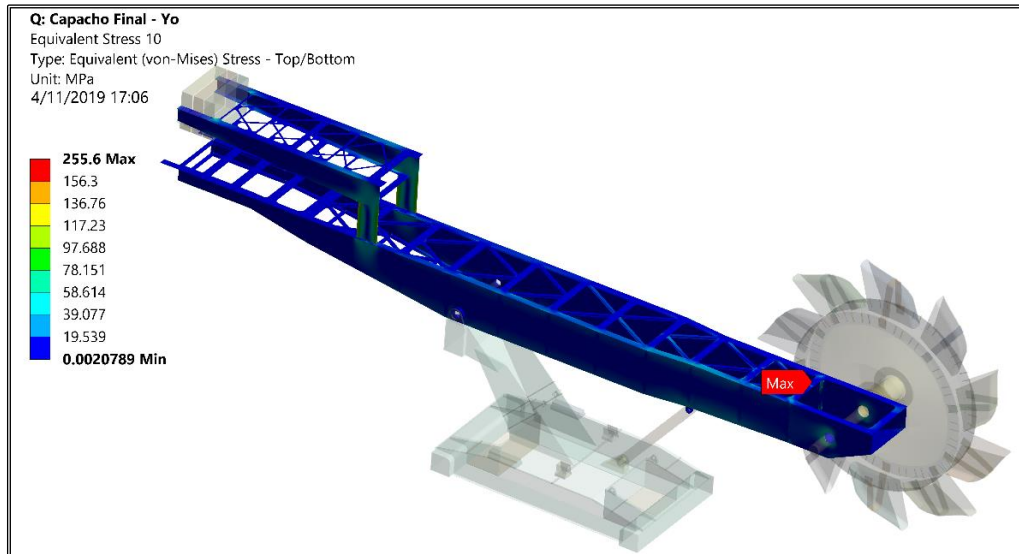


Figura N° 37: Esfuerzo máximo en Estructura Rotopala – Caso 2.

De acuerdo al análisis empleado, y las condiciones de carga adoptadas, es posible identificar un esfuerzo equivalente en el bastidor de la Rotopala correspondiente a **197,87 [MPa]**, como es posible identificar en la Figura N°38.

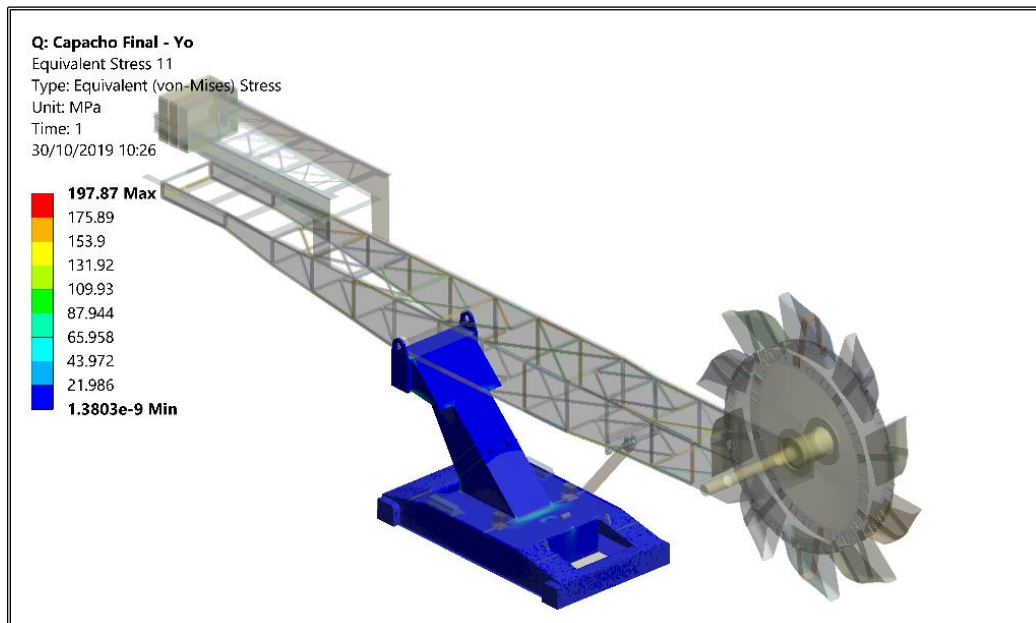


Figura N° 38: Esfuerzo máximo en Bastidor de la Rotopala – Caso 2.

Caso 2:

Para la combinación de cargas más desfavorable (PP + CM + FET + FEL + CV), el factor de seguridad alcanzado es de 1,39, lo cual permite un comportamiento estable, ya que el material se encuentra dentro de los límites elásticos de funcionamiento, cumpliendo con el criterio a tensiones admisibles. Adicionalmente, cumple con lo postulado en la normativa DIN 22261, en donde el factor debe ser de 1,33.

Los desplazamientos horizontales y verticales permiten un correcto funcionamiento operacional de la estructura, y se encuentran dentro de los rangos admisibles, de acuerdo al criterio de diseño ES-HP4-070-P-7 Ver 3, presente en el punto 5.7.2. de esta memoria.

La carga sobre los capachos permite identificar adicionalmente un comportamiento óptimo de los mismos, al presentar un esfuerzo de 89,85 MPa, lo que se traduce en un factor de seguridad de 3,83, cumpliendo con la normativa DIN 22261.

Caso 3:

El análisis de pérdida máxima de espesor por erosión, identificó que el mínimo espesor que puede presentar el capacho, antes de su falla, corresponde a 10 mm, lo que significa un esfuerzo equivalente de 156,28 MPa.

9 RECOMENDACIONES

De acuerdo con la evaluación de ingeniería realizada, se recomienda realizar las siguientes acciones para asegurar la integridad del activo, y de esta manera mantener una condición de operación segura y estable.

Establecer una rutina de inspección periódica de todos de los perfiles que se encuentren expuestos a la corrosión, principalmente en las zonas donde se muestran los menores factores de seguridad en el presente informe.

Ejecutar inspecciones periódicas de las estructuras y soldaduras mediante ensayos no destructivos END, llevando un control de la tasa de desgaste y corrosión de estas, que por su severidad pudiera poner en riesgo la integridad estructural del soporte de los capachos y estructura soportante.

Realizar un levantamiento del eje motriz, verificando los diámetros por desgaste de operación y realizar una inspección no destructivo END de la zona de mayor esfuerzo alterno a fatiga.

Realizar un levantamiento del sistema de unión entre el eje motriz y la estructura soportante, en los puntos de apoyo, debido a un factor de seguridad a fatiga menor a 1, de acuerdo al análisis por elementos finitos (Figura N°31).

Se recomienda mantener siempre nivelada y en buenas condiciones la superficie de la capa drenante del PAD de Lixiviación por donde se desplaza la Rotopala, evitando asentamientos y desniveles de manera de no transmitirle esfuerzos adicionales a las estructuras por esta causa.

