

# ESCONDIDA | BHP

**“ANÁLISIS ESTRUCTURAL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS  
MOLINO SAG N°1, Ø28' X 14',  
LOS COLORADOS, MINERA ESCONDIDA LTDA.”**

**MEMORIA DE CÁLCULO  
CC18-S-CON-MC-16  
OS N°4507781150**

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

REVISIÓN:  
FECHA: \_\_\_\_\_

  
CAD CAE INGENIERIA LTDA.  
RUT: 76.028.440 - 8  
AVDA. BALMACEDA 2472 Of. 121  
ANTOFAGASTA - FONOS: (055) 2263814

| REV. | FECHA     | POR     | CHK    | APROB. | DESCRIPCIÓN                  |
|------|-----------|---------|--------|--------|------------------------------|
| A    | 26.JUN.19 | Y.E.CH. | P.C.T. | H.L.L. | REVISIÓN INTERNA             |
| B    | 30.OCT.19 | Y.E.CH. | P.C.T. | H.L.L. | PARA COMENTARIOS DEL CLIENTE |
| 0    | 16.DIC.19 | Y.E.CH. | P.C.T. | H.L.L. | APROBACION DEL CLIENTE       |
|      |           |         |        |        |                              |

## INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.0 RESUMEN EJECUTIVO</b> .....                     | <b>2</b>  |
| <b>2.0 INTRODUCCIÓN</b> .....                          | <b>3</b>  |
| <b>3.0 OBJETIVOS</b> .....                             | <b>4</b>  |
| <b>4.0 ALCANCES</b> .....                              | <b>4</b>  |
| <b>5.0 ANTECEDENTES</b> .....                          | <b>5</b>  |
| 5.1 DESCRIPCIÓN DEL MOLINO SAG N°1 .....               | 5         |
| 5.2 DOCUMENTOS.....                                    | 7         |
| 5.3 PLANOS .....                                       | 7         |
| 5.4 MATERIALES .....                                   | 7         |
| 5.5 CRITERIOS DE VERIFICACIÓN.....                     | 8         |
| 5.6 NORMAS Y CÓDIGOS.....                              | 8         |
| 5.7 VALORES ADMISIBLES .....                           | 9         |
| 5.8 VISITA A TERRENO .....                             | 14        |
| <b>6.0 METODOLOGÍA DE TRABAJO</b> .....                | <b>22</b> |
| 6.1 CASOS ANALIZADOS .....                             | 23        |
| 6.2 MODELO COMPUTACIONAL .....                         | 24        |
| 6.3 MALLA MODELO GLOBAL .....                          | 25        |
| 6.4 CONDICIONES DE BORDE .....                         | 26        |
| 6.5 CARGAS CONSIDERADAS .....                          | 27        |
| 6.6 COMBINACIÓN DE CARGA .....                         | 30        |
| <b>7.0 RESULTADOS</b> .....                            | <b>31</b> |
| 7.1 MODELO GLOBAL.....                                 | 31        |
| 7.2 UNIÓN APERNADA TAPA-MANTO .....                    | 34        |
| 7.3 MANTO.....   | 37        |
| 7.4 TRUNNION.....                                      | 40        |
| 7.5 ANÁLISIS EN DIENTES DE ENGRANAJES.....             | 42        |
| <b>8.0 CONCLUSIONES</b> .....                          | <b>45</b> |
| ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....                         | 46        |
| <b>9.0 RECOMENDACIONES</b> .....                       | <b>48</b> |
| <b>10.0 ANEXOS</b> .....                               | <b>50</b> |
| 10.1 PLANOS GENERALES MOLINO SAG N°1 .....             | 50        |
| 10.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD UNIÓN TAPA-MANTO.....    | 52        |
| 10.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD UNIÓN TAPA-MANTO.....    | 53        |
| 10.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DESGASTE MANTO .....     | 55        |
| 10.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD TRUNNION, DESGASTE ..... | 60        |

## 1.0 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 aplicado al Molino SAG N°1, de 28' x 14' localizado en la Concentradora de Los Colorados.

Los elementos analizados del molino fueron: manto del molino, trunnion, flanges de tapa, uniones apernadas y sistema de corona y piñón. Se evaluó el molino para la condición de carga máxima de diseño. Se realizó, además, un análisis de sensibilidad frente a eventuales fallas locales investigando su efecto en la integridad global del equipo. Las fallas locales analizadas fueron: corte de pernos en flanges, desgastes en manto debido a falla prematura de revestimientos, y desgaste en cara de encuentro entre flanges debido a corrosión.

Se desarrollaron estudios estáticos y de fatiga dada la operación rotatoria del equipo. Los análisis se realizaron por medio del método de elementos finitos (MEF) utilizando el software ANSYS Mechanical 2019 R1. En las simulaciones realizadas se utilizó la técnica de submodelación, la cual extrae resultados de desplazamientos basados en un modelo global del molino y los utiliza como condiciones de borde para un análisis más detallado de las zonas de interés.

El Molino SAG N°1 entro en operaciones el año 1989, se diseñó para una capacidad máxima de carga de 1.250 [ton/h], actualmente trabaja a un rendimiento promedio de 893 [ton/h], 29% menos en relación a su capacidad, solo se registran un peak de 1.278 [ton/h]. Esto significa que el equipo está siendo operado dentro del rango de los parámetros de diseño.

Con respecto al estado y condición actual de la estructura del Molino SAG N°1, se verificó en terreno que no existen cambios en la estructura respecto de la condición de diseño y, además en la estructura no existe pérdida de espesor debido a corrosión o desgaste, ya que es protegido por los recubrimientos.

Del análisis estructural realizado, según datos recopilados de la visita a terreno, planos y data sheet del equipo, se verifica que la estructura actual del Molino SAG N°1 en el caso más desfavorable y con las cargas más severas, cumple en cuanto a esfuerzos con las cargas consideradas por la normativa vigente y bajo las condiciones actuales de operación. Desde el punto de vista estructural este activo no presenta ningún riesgo de falla en condiciones normales de operación y puede seguir operando teniendo presente las recomendaciones de este informe.

## 2.0 INTRODUCCIÓN

Minera Escondida Limitada, en adelante Escondida, 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 aplicado al Molino SAG N°1, ubicado en el área de la Concentradora Los Colorados de Escondida.

El Molino SAG N°1 es un equipo de molienda que reduce el tamaño de las partículas de mineral, principalmente por impacto, la capacidad de tratamiento es de 6.667 [t/h], tiene una potencia instalada de 5500 [hp] para un motor eléctrico y sus dimensiones son 8,534 x 4,267 [m] (28'x14'). El molino se encuentra revestido internamente con liners de acero cromo-molibdeno resistentes al desgaste con el fin de proteger el casco. Además, los levantadores del revestimiento ayudan a elevar la carga durante el proceso de molienda, a través de la rotación del molino.



**Figura N° 1** Planta Los Colorados Molino SAG N°1

### 3.0 OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es la de realizar una memoria de cálculo mediante el Método de los Elementos Finitos del Molino SAG N°1, bajos las condiciones de operación actual. Además, se analizan los siguientes casos para determinar la probabilidad de que ocurra una falla de tipo Colapso Estructural, en las siguientes zonas:

- Manto
- Trunnion
- Uniones apernadas
- Flanges

### 4.0 ALCANCES

Los alcances de este estudio son:

- Estudio de antecedentes disponibles y desarrollo de una estrategia de análisis.
- Simulaciones de Elementos Finitos considerando análisis de fatiga, incluyendo cargas extraídas por antecedentes en base a su funcionamiento de diseño.
- Extraer resultados a través de la técnica de submodelación de las zonas del manto, flange unión T y trunnion.

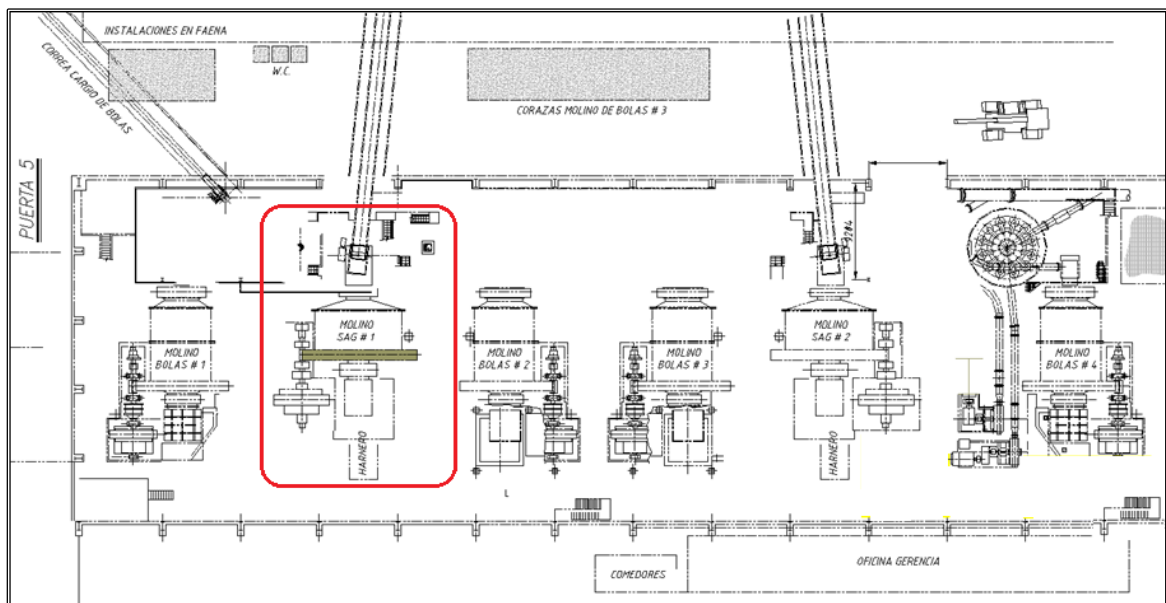
## 5.0 ANTECEDENTES

A continuación, se menciona una breve descripción del equipo, los documentos de referencia, estándares y conceptos utilizados en los análisis.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL MOLINO SAG N°1

Los datos técnicos del equipo son:

|                                  |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Nombre del equipo                | : Molino SAG N°1               |
| Lugar                            | : Los Colorados                |
| Marca                            | : MPSI                         |
| Año                              | : 1989                         |
| Capacidad de carga               | : 1.250 [ton/h]                |
| Dimensiones                      | : 8,534 x 4,267 [m] (28'x14'). |
| Espesor del manto                | : 70 [mm]                      |
| Potencia                         | : un motor 5500 [HP]           |
| Embrague                         | : 1 EATON 66VC 1600 DUAL WIDE  |
| Carga bola Molino en operación   | : 15% (máximo)                 |
| Carga del Molino en operación    | : 30% (máximo)                 |
| Velocidad angular                | : 10,61 [rpm]                  |
| Velocidad eje piñón              | : 200 [rpm]                    |
| Relación corona piñón            | : 18,84 (358/19)               |
| Carga recomendada para el molino | : 720.680 [lb]                 |
| Densidad del mineral             | : 1.800 [kg/m3]                |



**Figura N° 2** Planta Los Colorados Molino SAG N°1

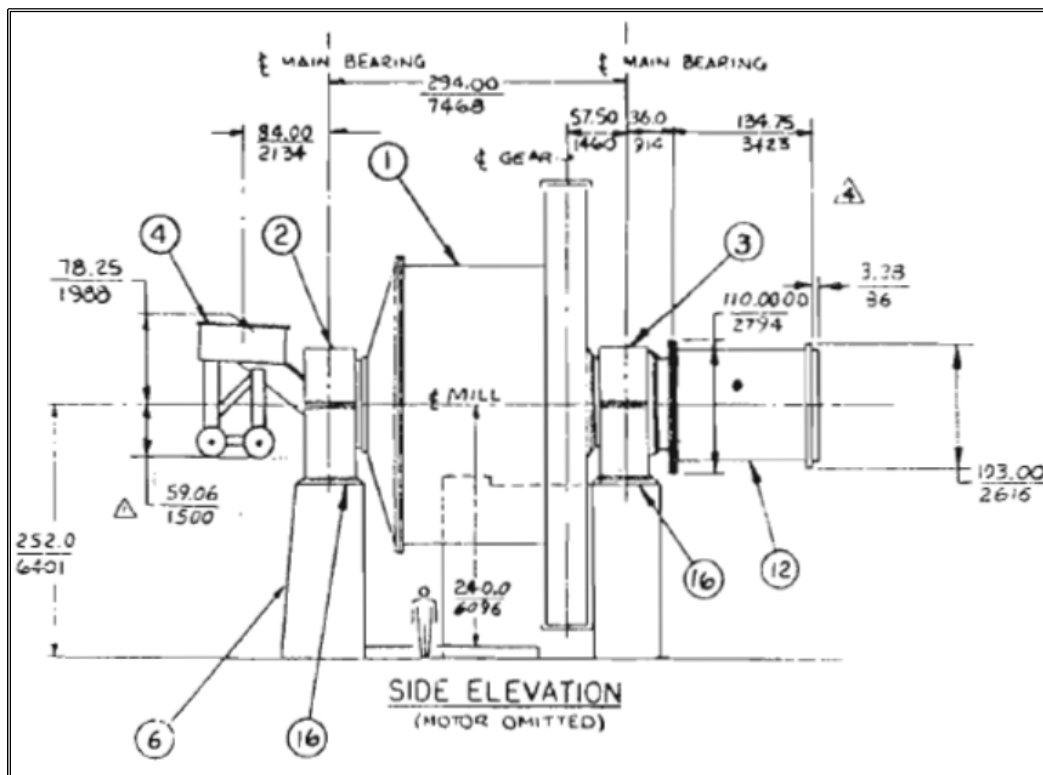
El Molino SAG N°1 es una máquina de molienda que reduce el tamaño de las partículas de mineral en preparación para enviarlo a los circuitos de molienda aguas abajo. Tiene una envergadura de 8,53 [m] de diámetro y 4,27 [m] de largo. El Molino es accionado por un motor de bobinado de potencia 5.500 [HP].

Las estructuras de los molinos SAG consisten en un cuerpo central (shell) cilindrado compuesto por dos mitades que están conectadas en el sentido longitudinal por uniones apernadas, fabricados a partir de planchas de acero estructural ASTM A36 con espesor de 2 3/4" (70 [mm]).

El molino es impulsado por un (01) motor eléctrico de 5.500 [HP] de potencia y con velocidad de 200 [rpm].

El Molino está revestido internamente con acero cromo-molibdeno resistentes al desgaste para proteger el casco, los revestimientos se ajustan con levantadores que ayudan a elevar la carga durante la rotación del Molino. La carga se levanta unos dos tercios hacia el arco de rotación del casco antes de dejarla caer.

A continuación, se presenta una imagen del molino analizado en el informe presente:



**Figura N° 3** Vista de elevación Molino SAG N°1

## 5.2 DOCUMENTOS

A continuación, se entregan los documentos de referencias y conceptos utilizados en el análisis

- [1] Installation, operation, and maintenance manual for 28 FT diameter x 14 FT SAG Mill
- [2] Escondida Copper Project, Mineral Processing Systems, Incorporated

## 5.3 PLANOS

Los planos utilizados como antecedente para el estudio son:

- [3] 05-007745 Planos MPSI General
- [4] 05-007746 Planos MPSI General
- [5] 05-007820 Plano MPSI Manto y Flanges
- [6] 05-006373 Plano MPSI Manto y Trunnium
- [7] 05-007753 Plano MPSI de corazas y lifter
- [8] 05-007864 Plano MPSI de piñon
- [9] 05-007865 Plano MPSI de piñon
- [10] 05-007903 Plano MPSI de trunium
- [11] B-83367 Plano MPSI eje de piñon

## 5.4 MATERIALES

Para el análisis de la estructura se utilizaron los siguientes materiales:

**Tabla N° 1** Propiedades de materiales que conforman el Molino.[2] [5] y [8]

| COMPONENTES      | MATERIAL              | ESFUERZO<br>FLUENCIA<br>[MPa] | ESFUERZO<br>ÚLTIMO [MPa] |
|------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| MANTO/FLANGES    | ASTM A36              | 250                           | 400                      |
| TAPAS Y TRUNNION | ASTM A536 Gr 70-50-05 | 345                           | 485                      |
| PERNOS           | ASTM F568 Class 8.8   | 640                           | 800                      |
| CORONA           | ASTM A-148-58         | 413                           | 620                      |
| PIÑÓN            | SAE 4320              | 785                           | 1100                     |



## 5.5 CRITERIOS DE VERIFICACIÓN

Para los análisis se utilizan los siguientes criterios de verificación:

- Límite elástico
- Vida a la fatiga
- Avance de grietas

## 5.6 NORMAS Y CÓDIGOS

- AISC 360-2010 Specification for Structural Steel Buildings.
- Manual de diseño para estructuras de acero, publicado por el Instituto Chileno del Acero, ICHA 2008.
- ANSI, American National Standard Institute.
- AISC325-05, Steel Construction Manual.
- ASCE7-98, Minimum Design Loads for Buildings and Structures..
- NCh. 1537-2009 Diseño Estructural-Cargas permanentes y cargas de uso.
- NCh. 3171-2010 Diseño estructural-Disposiciones generales y combinaciones de carga.

## 5.7 VALORES ADMISIBLES

### 5.7.1 LIMITE ELÁSTICO

El esfuerzo admisible para los acero estructural es:

$$\sigma_{adm} = 0,6 f_y$$

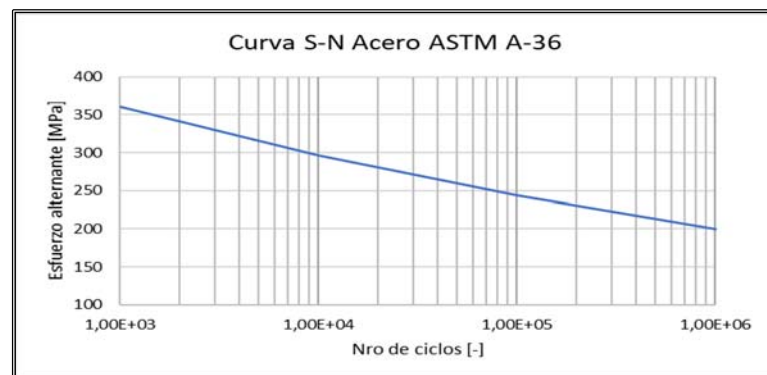
La **Tabla N° 2** muestra los valores admisibles de los materiales de construcción del molino.

**Tabla N° 2:** Propiedades de aceros que conforman el molino

| COMPONENTES      | MATERIAL              | ESFUERZO FLUENCIA [MPa] | ESFUERZO ÚLTIMO [MPa] | Esfuerzo Admisible [MPa] | MÓDULO DE ELASTICIDAD [MPa] | COEF. DE POISSON |
|------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|
| MANTO/FLANGES    | ASTM A36              | 250                     | 400                   | 150                      | $2 \cdot 10^5$              | 0,3              |
| TAPAS Y TRUNNION | ASTM A536 Gr 70-50-05 | 345                     | 485                   | 207                      | $2 \cdot 10^5$              | 0,3              |
| PERNOS           | ASTM F568 Class 8.8   | 640                     | 800                   | 383                      | $2 \cdot 10^5$              | 0,3              |
| CORONA           | ASTM A-148-58         | 413                     | 620                   | 247                      | $2 \cdot 10^5$              | 0,3              |
| PIÑÓN            | SAE 4320              | 785                     | 1100                  | 470                      | $2 \cdot 10^5$              | 0,3              |

### 5.7.2 VIDA A LA FATIGA

Para el diseño a la fatiga de las zonas evaluadas, se utilizaron las siguientes curvas S-N, obtenidas en base al método de cálculo para materiales ferrosos al carbono según referencia [*SHIGLEY, Joseph Edward, et al. Diseño en ingeniería mecánica. México: McGraw-Hill, 1990*]:



**Figura N° 4** Curva S-N para el acero ASTM A-36.

Para el análisis de fatiga se utilizó la Curva Wöhler que es también llamada Curva S-N: el límite de fatiga obtenido en esta curva fue modificado mediante la aplicación de los coeficientes modificativos de Marín que considera:

$$S_e = k_s * k_d * k_c * k_t * k_e * k_f * S'_e$$

$$S'_e = 0,5 * S_{ut}$$

Donde

|          |  |
|----------|--|
| Se       | : Límite de resistencia a la fatiga      |
| S'e      | : Límite de fatiga                       |
| Sut      | : Esfuerzo de ruptura                    |
| Ks= 0,75 | : Factor acabado superficial (laminado)  |
| Ks= 0,92 | : Factor acabado superficial (maquinado) |
| Kd= 0,75 | : Factor de tamaño                       |
| Kc=1     | : Factor de carga                        |
| kt=1     | : Factor por temperatura                 |
| ke=0,897 | : Factor de confiabilidad                |
| kf=1     | : Factor sin corrosión                   |
| kf=0,35  | : Factor corrosión                       |

**Tabla N° 4** Limite de fatiga (valores menores a esto, tienen vida infinita)

| COMPONENTE       | Sut [Mpa] | Ks   | Kd   | Kc | Kt | Ke  | Kf   | Se [MPa]   |
|------------------|-----------|------|------|----|----|-----|------|------------|
| MANTO / FLANGE   | 400       | 0,75 | 0,75 | 1  | 1  | 0,9 | 0,35 | <b>35</b>  |
| TAPA / FLANGE    | 400       | 0,75 | 0,75 | 1  | 1  | 0,9 | 1    | <b>101</b> |
| TAPAS Y TRUNNION | 485       | 0,92 | 0,75 | 1  | 1  | 0,9 | 1    | <b>151</b> |
| PERNOS           | 800       | 0,92 | 0,75 | 1  | 1  | 0,9 | 1    | <b>248</b> |
| CORONA           | 620       | 0,92 | 0,75 | 1  | 1  | 0,9 | 1    | <b>193</b> |
| PIÑÓN            | 1100      | 0,92 | 0,75 | 1  | 1  | 0,9 | 1    | <b>342</b> |

El término “vida infinita” que se menciona a lo largo del informe, indica una condición de esfuerzos que implica que la pieza no presentará falla alguna por fatiga. El límite entregado para vida infinita es para aceros al carbono de un valor de  $10^6$  ciclos, teniendo para esta cantidad de ciclos asociado un límite inferior admisible de esfuerzos, conocido como límite de fatiga ( $S'_n$ ), de manera que, si la amplitud de la tensión aplicada es inferior a este valor, el material no fallará a fatiga.

### 5.7.3 AVANCE DE GRIETAS

El factor de intensidad de esfuerzos (K), se utiliza en la fractomecánica para predecir el estado de esfuerzos cerca de la punta de una grieta provocada por una carga aplicada lejos de ella. Este factor se utiliza para materiales homogéneos, elásticos lineales. Esta magnitud depende de la geometría de la muestra, el tamaño, ubicación de la grieta y de la distribución de cargas.

La curva en la **Figura N° 5** presenta el resultado del ensayo del rango de crecimiento de grieta a la fatiga, versus la intensidad de esfuerzos. En este gráfico se aprecian 3 zonas las cuales están clasificadas según su comportamiento al avance de grietas. Los valores límites que se aprecian son:

**$\Delta K_{th}$** : Valor que delimita la zona en donde las grietas no presentan un avance observable, considerado casi despreciable.

**$K_c$** : Límite que entrega el valor crítico para el cual las grietas alcanzan un estado inestable y la velocidad de propagación es elevada.

En esta última zona es considerado un límite en donde se determina zona de falla. Estos límites entregarán los tamaños máximos que delimitan la zona de no avance de grietas y la zona en que las grietas se vuelven inestables ante los ciclos de carga. Estos límites se determinan de la siguiente manera:

- Para obtener el tamaño máximo para que las grietas no presentan un avance, se utiliza, según la norma ASTM E647 una velocidad de  $10^{-10}$  [m/ciclo], obteniendo de esta manera el  $\Delta K_{th}$  y esta se iguala a la Ley de Paris presentada a continuación.

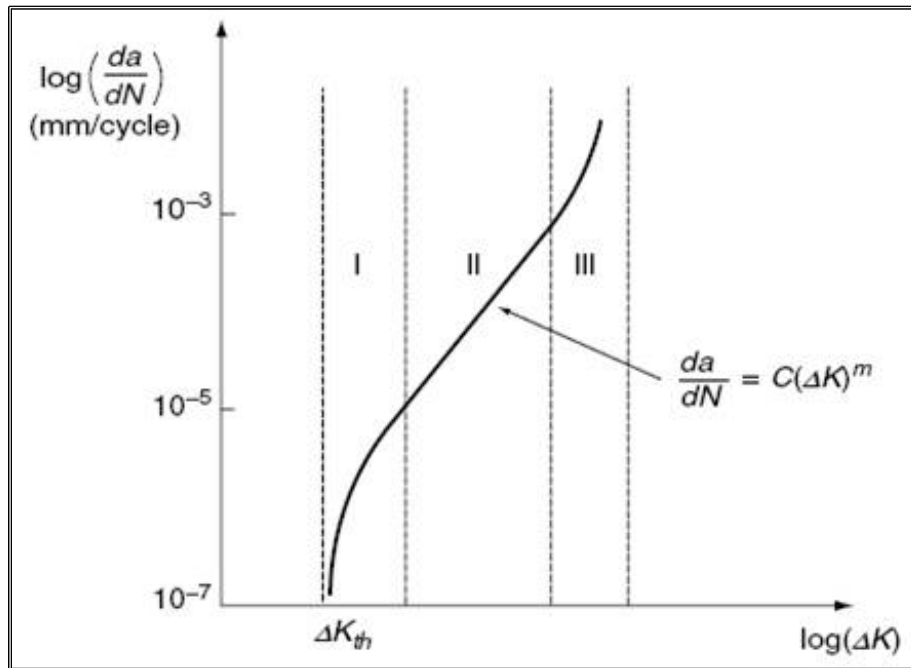
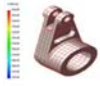
$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n$$

Entonces, con esto, a través de la siguiente relación, se obtiene el valor del tamaño máximo para que la grieta no presente avances ( $a_{th}$ ).

$$\Delta K_{th} = \Delta S \sqrt{\pi a_{th} \alpha}$$

- Para obtener el tamaño para el que la grieta se vuelva inestable, se utiliza la misma ecuación anterior, pero utilizando un valor de  $K_c$ , valor que depende del material en donde se propagará esta grieta. Para este caso en particular, el valor de  **$K_c$  es de 50 [MPa  $\sqrt{m}$ ]** De esta manera se obtiene el límite superior de esta grieta. La ecuación a utilizar entonces será:

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_c}{S_{max} \alpha} \right)^2$$



**Figura N° 6** Ejemplo de gráfico de rango del factor de intensidad de esfuerzos

## 5.8 VISITA A TERRENO

### 5.8.1 LEVANTAMIENTO FOTOGRAFICO

Durante la visita a la Planta pudo realizarse una inspección visual del Molino SAG N°1. A continuación, se incluyen fotografías del equipo.



**Figura N° 7 Molino SAG N°1**



**Figura N° 8 Vista lateral Molino SAG N°1**

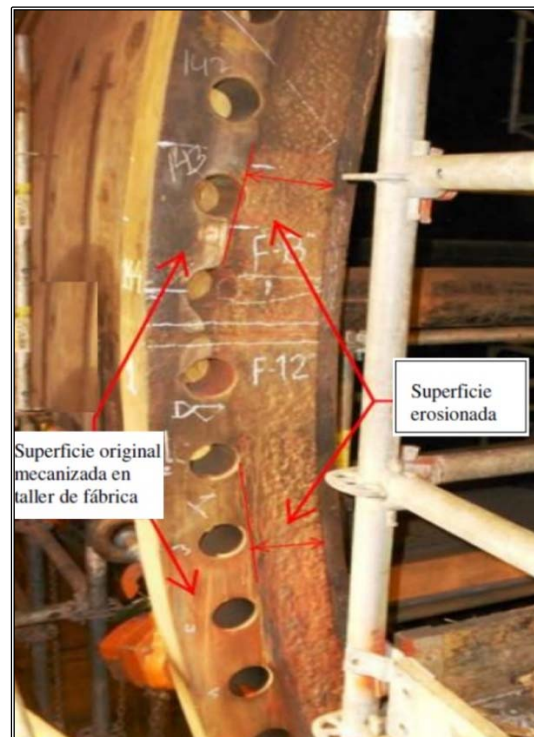
## 5.8.2 HALLAZGOS DE CODICION ESTRUCTURAL

De acuerdo con los antecedentes entregados por el cliente, existen zonas del molino que actualmente presentan fallas recurrentes, las cuales serán analizadas para determinar criterios de falla ante condiciones normales de trabajo. Las zonas de falla que se determinaron analizar son las siguientes:

### Desgaste del flange:

Ante el desgaste de los componentes internos del molino, y debido a un apriete incorrecto de los pernos de los flanges (factores de falla habituales), se produce erosión en las zonas de los flanges producto de la filtración de la pulpa del molino, limitándose el área de contacto de la junta apernada, provocando aumento de las tensiones en los pernos de la unión, en superficie de contacto de los flanges.

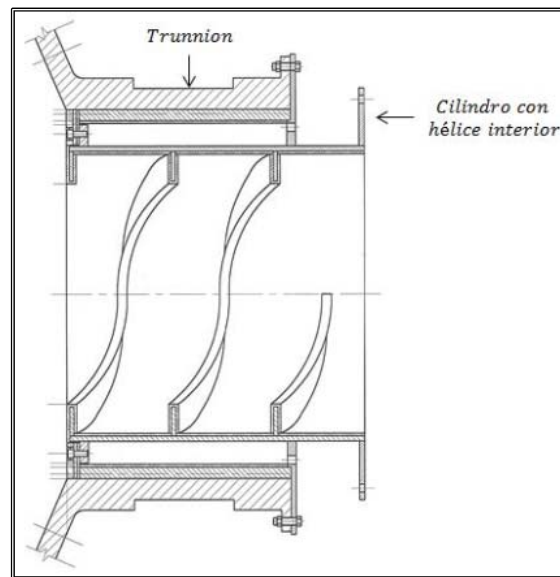
En la **Figura N° 9** se presenta una imagen del resultado de esta falla. Se aprecia que la porción interior del flange se encuentra erosionada y ha perdido su espesor original, reduciendo de esta forma el área de contacto entre los flanges, aumentando así las cargas en esta zona. Además, producto de filtraciones de pulpa hacia el exterior, se agrega un factor de erosión al cálculo de la vida de las piezas involucradas, reduciendo de esta manera la vida útil de estos componentes.



**Figura N° 9:** Foto de ejemplo del tipo de falla en otra Minera. Tipo de falla Manto-Flange, producto de la erosión de pulpa

### Desgaste del trunnion:

La zona del trunnion, tal como muestra la **Figura N° 11**, trabaja sosteniendo en su interior un cilindro de sección variable el cual ayuda a la evacuación del producto de molienda. Este cilindro trabaja sometido a un desgaste constante producto de esta evacuación de material, el cual muchas veces, producto del desgaste de los sellos filtra parte de este material hacia la superficie interior del trunnion, lo que provoca un desgaste indeseado en una parte estructural del molino.



**Figura N° 11:** Esquema del trunnion de un molino.



### Dientes de engranajes:

El Sistema de transmisión de potencia para el molino principalmente cuenta con un sistema de corona y piñón donde este es la parte motriz y la corona es la parte conducida. El sistema debe ser capaz de resistir sin fallar al transmitir una potencia instalada de 5500 [hp].



**Figura N° 12:** Cambio de corona Molino SAG N°1, año 2005



**Figura N° 13:** Febrero 2014. Deslizamiento de babbit de descanso de motor lado libre del Molino SAG N° 1.



**Figura N° 14:** Febrero 2014. Dientes de corona contaminados con material de proceso del Molino SAG N° 1.



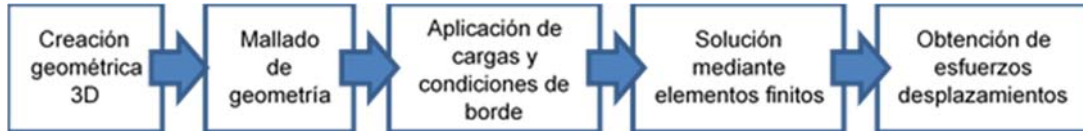
| Medición N°<br>(Campaña actual) | Fecha      | Volumen interior<br>total<br>m <sup>3</sup> | Volumen interior<br>disponible<br>m <sup>3</sup> | Volumen de<br>carga<br>m <sup>3</sup> | Porcentaje de<br>carga<br>% |
|---------------------------------|------------|---|--|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1 (actual)                      | 30-05-2018 | 224,85                                      | 172,63   | 52,49                                 | 23,34                       |
| 2 (actual)                      | 01-08-2018 | 225,57                                      | 195,10   | 30,47                                 | 13,51                       |

**Figura N° 15:** En la figura se muestra que el porcentaje de carga en el interior es 23% menor a la de diseño que es 30%. Por lo que cumple lo requerido por el vendor.

## 6.0 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 (MEF).

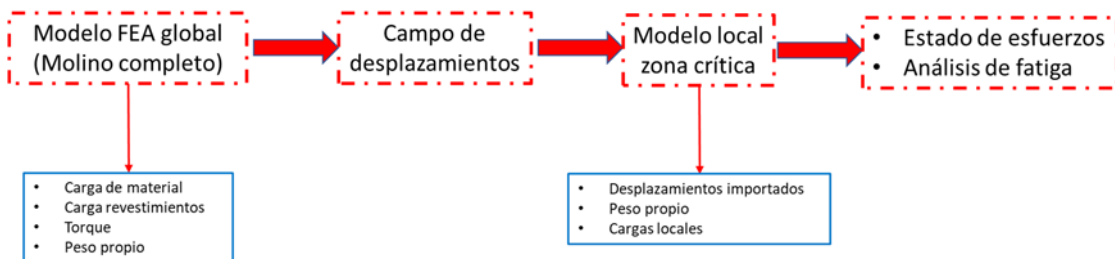
La metodología usada para dar cumplimiento con los objetivos se muestra a continuación:



**Figura N° 16** Esquema de trabajo de un modelo MEF

Se realizará una simulación estática lineal del Molino SAG N°1 sujeto a cargas representativas de trabajo con material junto con las cargas mencionadas anteriormente. Para realizar la simulación MEF del molino, se requiere el modelo geométrico (CAD 3D), condiciones de soporte, cargas y propiedades que definen el comportamiento de los materiales (densidad, coeficiente de Poisson, límite de elasticidad, etc.) las cuales fueron definidas en el capítulo de antecedentes.

La simulación del molino sometido a estas cargas se trabaja como un modelo global, el cual no se utiliza inmediatamente para modelar las zonas específicas detalladas en el capítulo anterior, debido a que, para lograr un modelo adecuado para estas zonas es necesario un nivel de detalle que es difícil de captar en un modelo del molino completo. Es por este motivo que se decide utilizar la técnica de submodelación, la cual tiene como gran ventaja el poder agregar el nivel de detalle necesario para lograr captar las zonas mencionadas.



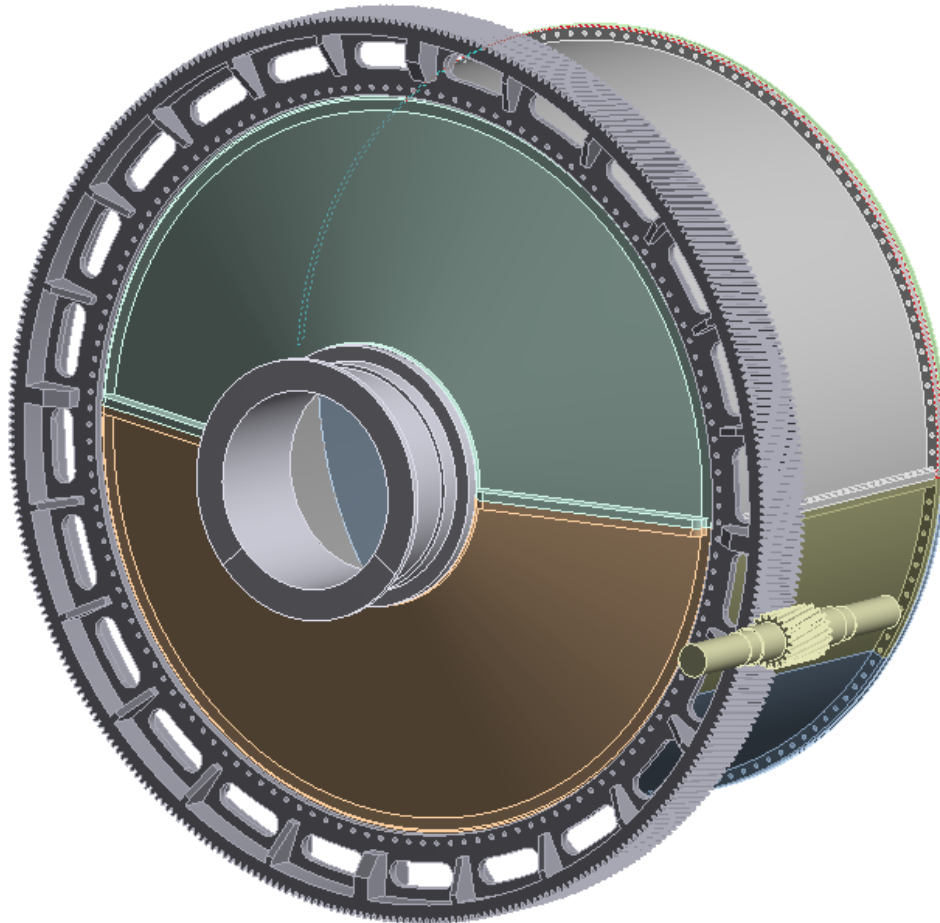
**Figura N° 17** Esquema de la modelación y técnica de su modelación

De los modelos locales se obtuvieron los esfuerzos de Von Mises, y para los casos en que se analiza fatiga, se presenta además el estado de esfuerzo alterno, el cual sirve para comparar estos resultados con la gráfica S-N de los materiales.

## 6.2 MODELO COMPUTACIONAL

En la **Figura N° 18** se muestra el modelo general planteado para el análisis del Molino SAG N°1, según dimensiones de planos de fabricación descritos en el punto 5.3 del presente informe.

La geometría del Molino se considera como mixta, en donde existen componentes generados con geometría “sólida” y otras con geometría del tipo “cáscara”. Posteriormente, los submodelos realizados se trabajan íntegramente con geometría del tipo 3D.

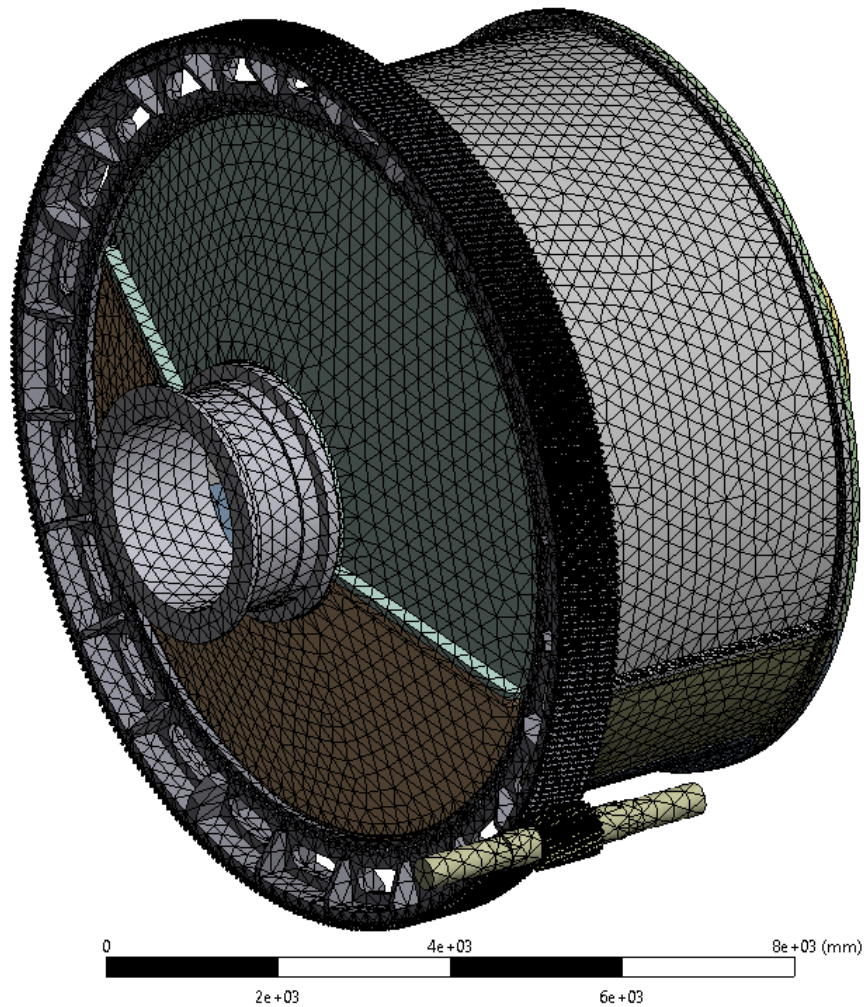


**Figura N° 18:** Geometría 3D para el análisis del modelo global

### 6.3 MALLA MODELO GLOBAL

En la **Figura N° 19** se presenta la malla del modelo global del Molino SAG N°1 Y 2, la cual posee los siguientes parámetros:

- Calidad de malla del modelo global: 0,88 [-].
- Cantidad de elementos del modelo global: 1.140.867 [-].
- Cantidad de nodos del modelo global: 1.770.305 [-].



**Figura N° 19:** Mallado del modelo global del Molino SAG N°1.

## 6.5 CARGAS CONSIDERADAS

A continuación, se presentan las cargas utilizadas para el modelo global.

### 6.5.1 CARGAS MUERTAS (D) REF [2]

a) Peso propio de la estructura 294.288 [kg]. Referencia plano N° 05-007820.

**Tabla N° 5** Peso de componentes de molino.

| COMPONENTE                    | CANTIDAD | PESO [kg] | PESO [lb]    | TOTAL [kg]     | TOTAL [lb]     |
|-------------------------------|----------|-----------|--------------|----------------|----------------|
| MATOS (SHELL)<br>ALIMENTACIÓN | 2        | 53.560    | 118.080      | 107.120        | 236.159        |
| TAPAS LADO<br>ALIMENTACIÓN    | 4        | 24.340    | 53.661       | 97.360         | 214.642        |
| TRUNNION<br>DESCARGA          | 1        | 15.420    | 33.995       | 15.420         | 33.995         |
| TRUNNION<br>ALIMENTACIÓN      | 1        | 15.420    | 33.995       | 15.420         | 33.995         |
| CORONA                        | 4        | 14.742    | 32.501       | 58.968         | 130.002        |
| PIÑÓN                         |          |           |              |                |                |
|                               |          |           | <b>Total</b> | <b>294.288</b> | <b>648.795</b> |

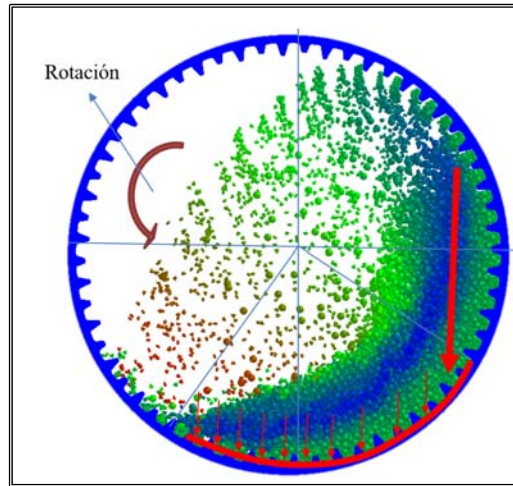
b) Carga producto del peso de los revestimientos, aplicado en tapas y manto, con un total de 256.535 [kg]. Ver **Tabla N° 6**

**Tabla N° 6** Peso de los revestimientos.

| COMPONENTE              | CANTIDAD | PESO [kg]      | PESO [lb]      |
|-------------------------|----------|----------------|----------------|
| SHELL                   | 1        | 120.429        | 265.500        |
| TAPAS LADO ALIMENTACIÓN | 1        | 87.119         | 192.064        |
| TAPAS LADO DESCARGA     | 1        | 48.988         | 108.000        |
| TRUNNION DESCARGA       | 1        | 0              | 0              |
| TRUNNION ALIMENTACIÓN   | 1        | 0              | 0              |
| CORONA                  | 1        | 0              | 0              |
| PIÑÓN                   | 1        | 0              | 0              |
| <b>Total</b>            |          | <b>256.535</b> | <b>565.564</b> |

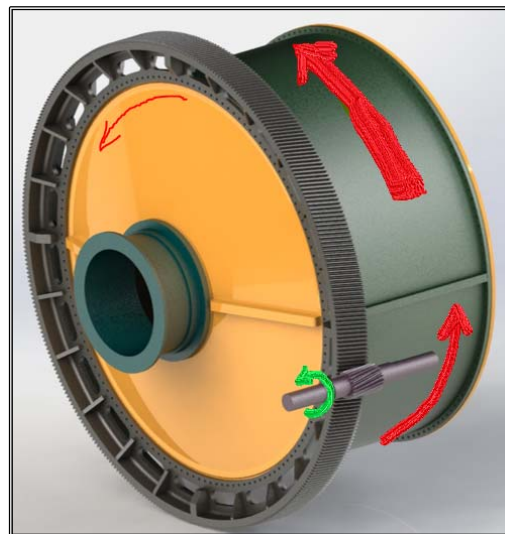
### 6.5.3 CARGAS DE OPERACIÓN (O)

- a) La carga vertical producto del material se aplica en la zona destacada en la **Figura N° 22**, la cual representa la zona en que actúa la carga del mineral que forma el riñón dentro del molino, con un total de 326.900 [kg] (Valor aproximado obtenido en base a los porcentajes de llenado extraídos de [5] aumentando la carga estática en un 10% para simular la carga dinámica).



**Figura N° 22:** Condiciones de carga del material del modelo global.

- b) En la misma zona del riñón indicada anteriormente, se aplica el momento necesario para levantar el material, el cual neutraliza el momento entregado por el motor. En la **Figura N° 23** se explica cómo se aplica este momento, el cual es discretizado en un momento distribuido a lo largo del manto, con un valor de 3.690.000 [Nm].



**Figura N° 23:** Momentos aplicados al modelo global del molino SAG N°1.



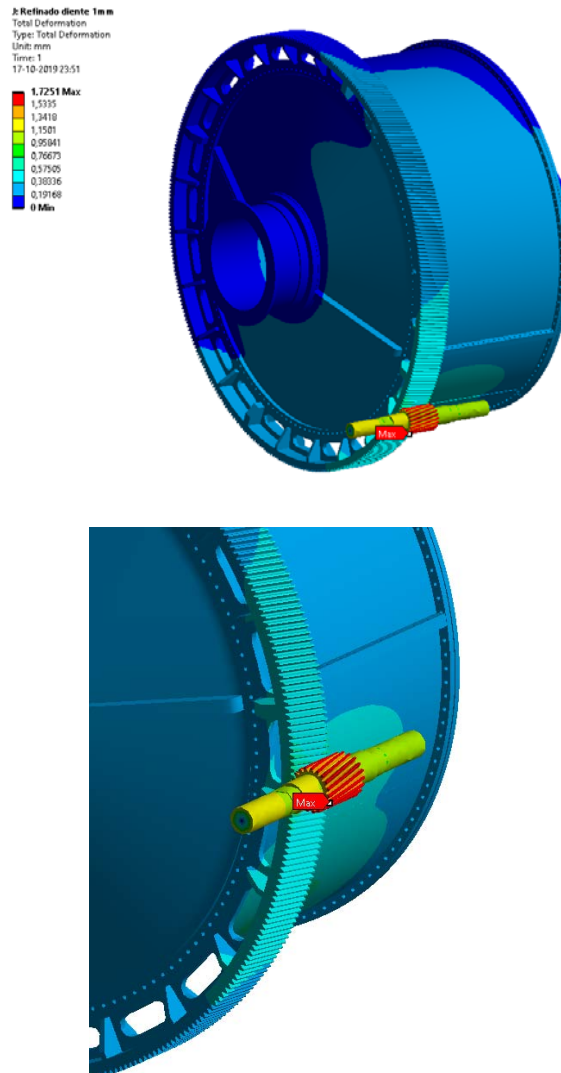
## 7.0 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados del análisis realizado, separándolos entre los resultados del modelo global y de cada submodelo realizado.

### 7.1 MODELO GLOBAL

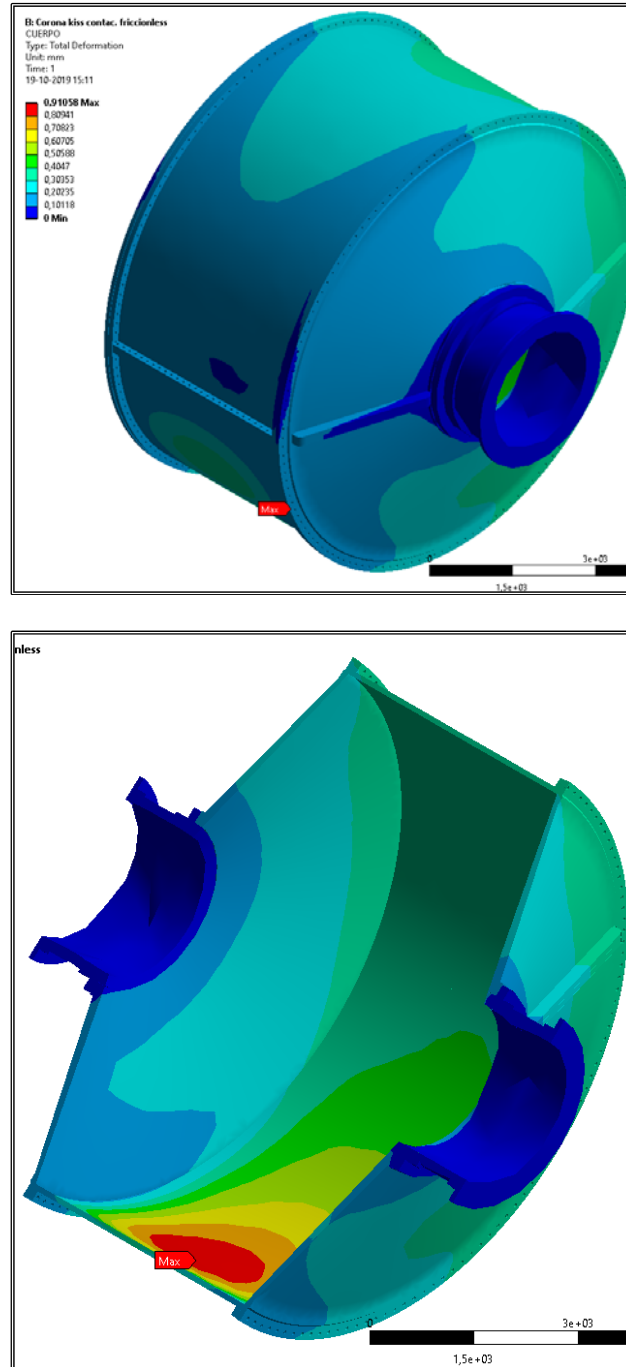
#### 7.1.1 DESPLAZAMIENTOS DEL MODELO GLOBAL

En la **Figura N° 24** se presenta el estado de desplazamientos del modelo global, el cual alcanza un valor máximo de 1.72 [mm], ubicado en la zona lateral del manto.



**Figura N° 24:** Estado de desplazamientos del modelo global 1.72 [mm].

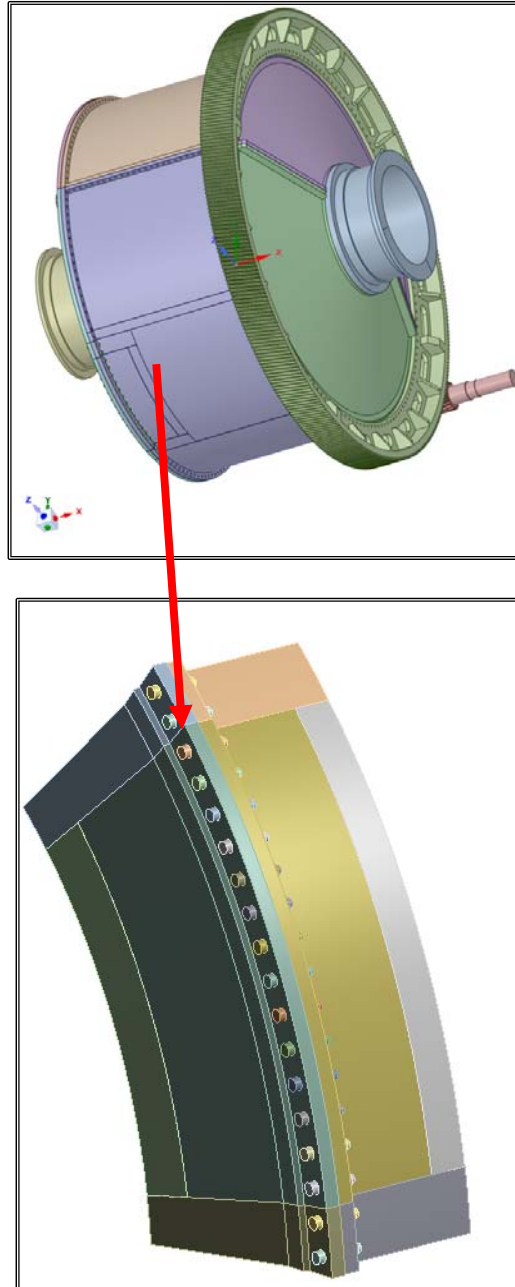
En la **Figura N° 25** se presenta el estado de desplazamientos en el eje vertical (Y), el cual entrega el valor de deflexión del molino. Se aprecia que alcanza un valor máximo de 0,9 [mm] en la zona lateral del manto.



**Figura N° 25:** Estado de desplazamientos para el manto en Y, 0,9 [mm].

## 7.2 UNIÓN APERNADA TAPA-MANTO

En esta parte del informe se presentarán los resultados del submodelo de la unión tapa-manto ubicada en la zona indicada en la **Figura N° 27**. En esta zona se unen los flanges de ambos elementos y además es una zona de unión de 2 partes de la tapa de alimentación, además en esta zona se encuentra la mayor concentración de tensiones. Ver **Figura N° 26**



**Figura N° 27:** Zona del submodelo “unión T”.

### 7.2.1 SUBMODELO UNIÓN TAPA-MANTO, CONDICIÓN DE DISEÑO

A continuación, se presenta el estado de esfuerzos de la zona “unión tapa-manto” bajo los parámetros de diseño antes señalados. Cabe destacar que bajo estos parámetros la zona trabaja con valores de esfuerzos admisibles y con vida infinita, alcanzando un esfuerzo máximo de 24 [MPa], mientras que para el criterio de Tresca, se alcanza un promedio de 2,2 [MPa].

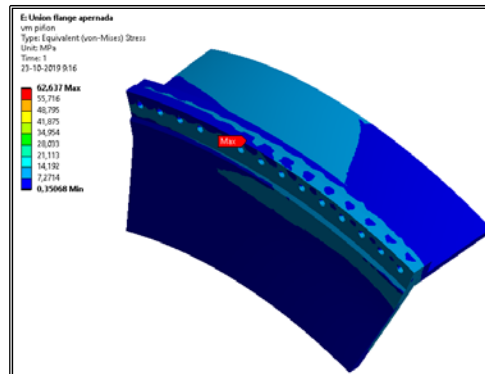


Figura N° 28: Esfuerzos de Von Mises unión tapa manto **62.63 [MPa]**.

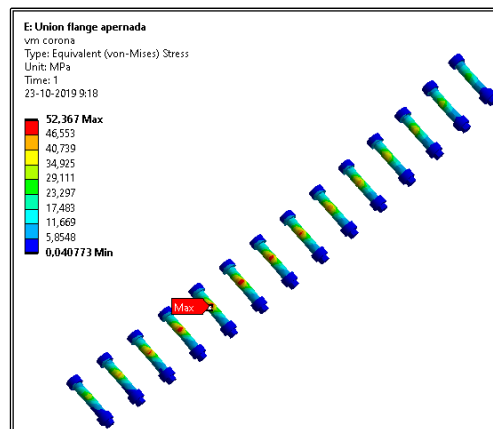


Figura N° 29: Esfuerzos Von Mises para pernos en unión tapa manto **52,3 [MPa]**

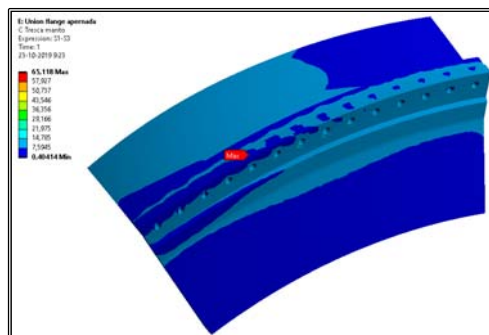
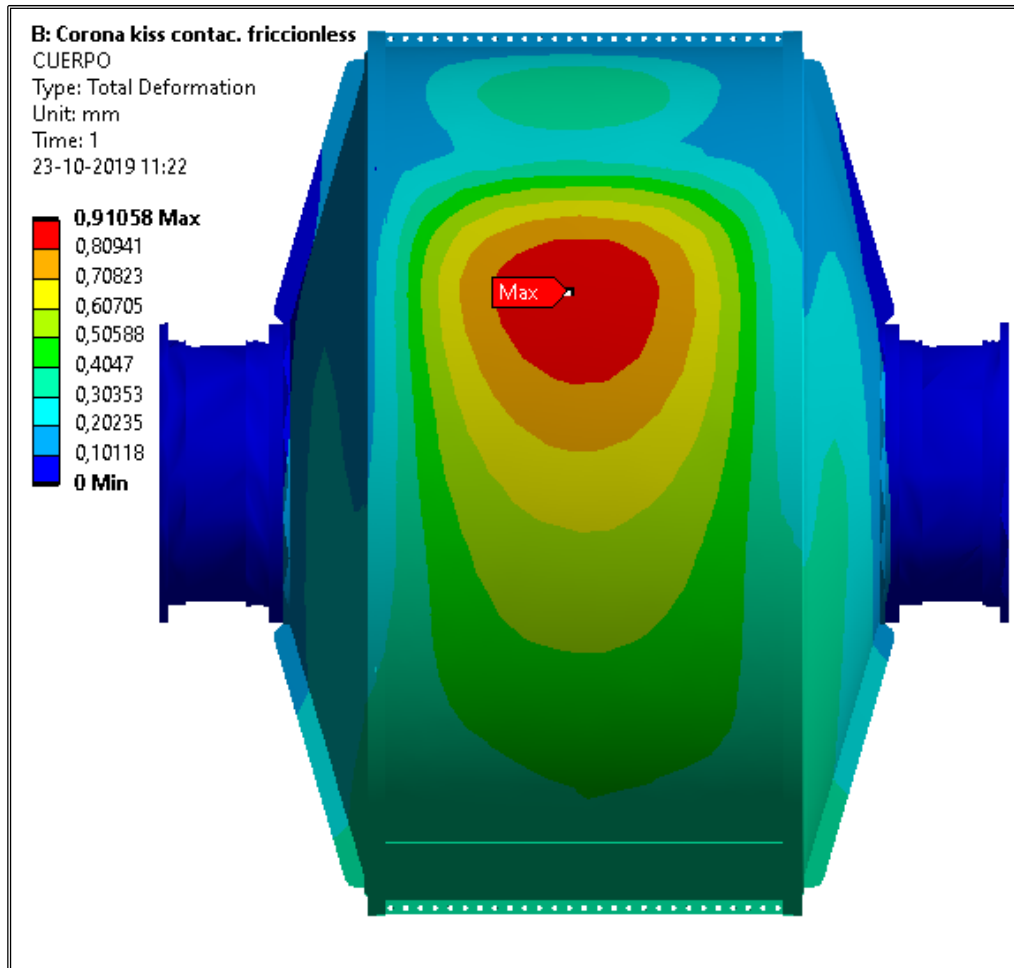


Figura N° 30: Esfuerzo unión Tapa-Manto bajo criterio de Tresca **65,11 [MPa]**.

### 7.3 MANTO

Se realizó un submodelo de la zona de mayores deformaciones. La **Figura N° 32** muestra la región escogida. El submodelo se extrae de una zona desfavorable del Shell, en este caso, debido a la presencia de altas deformaciones se escoge una sección inferior, tal como se muestra en la imagen.

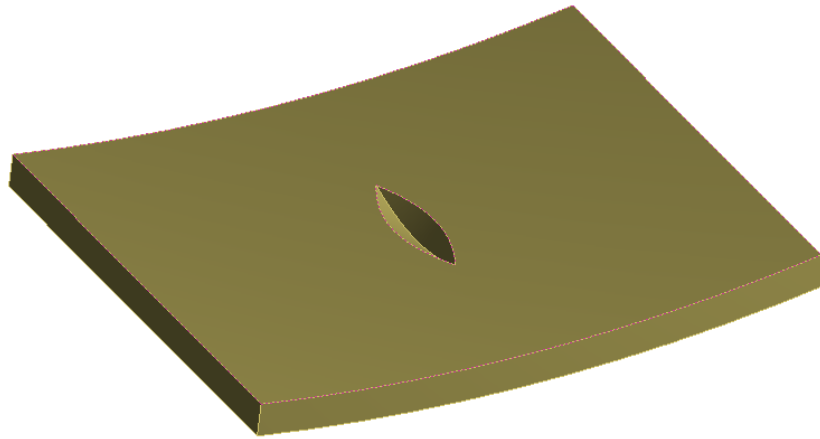


**Figura N° 32** Ubicación del área del manto extraída para el submodelo.

### 7.3.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, DESGASTE Y TAMAÑO GRIETA

Dado que el manto está afecto a eventuales desgastes y/o apariciones de grietas, se realizó un análisis de sensibilidad considerando por separado estos efectos.

Para el análisis del desgaste, se aprecia que se alcanza una condición de “inminente formación de zonas plásticas”, cuando al espesor total del manto le restan 38 [mm], que es el equivalente a un desgaste de un 50% del espesor. La **Figura N° 35** resume lo dicho junto con la **Tabla N° 8**.



**Figura N° 35** Submodelo de sensibilidad al desgaste de manto.

**Tabla N° 8** Resumen de resultados para sensibilidad al desgaste del manto.

| Condición            | Esfuerzo máximo [MPa] | Estado mecánico y/o comentarios  |
|----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Parámetros de diseño | 15,47                 | Trabajo a vida infinita          |
| Desgaste 30%, 20mm   | 56,27                 | Ubicado en el fondo de la muesca |
| Desgaste 40%, 30mm   | 67,95                 | Ubicado en el fondo de la muesca |
| Desgaste 50%, 38mm   | 79,15                 | Arreglo en máximo un mes         |

Para la sensibilidad a la grieta, el valor máximo de grieta que soporta el manto para no presentar avance de grietas es 10 [mm]. Bajo este valor la grieta no crece. El valor del tamaño de grieta bajo el que existirá un avance inestable de la grieta ocurrirá para tamaños mayores a 870 [mm]. Cabe destacar que estos valores obtenidos corresponden a los tamaños cuando esta grieta se encuentra en medio del manto. Cuando esta grieta se encuentre cercano a un borde, el tamaño máximo permitido será la mitad de estos valores entregados.

Más detalles de los análisis pueden encontrarse en ANEXO.

## 7.4 TRUNNION

### 7.4.1 SUBMODELO, CONDICIÓN DE DISEÑO

A continuación, se presenta el estado de esfuerzos de Von Mises para la zona del trunnion bajo parámetros de diseño, bajo estas condiciones se presenta un valor máximo de aproximadamente 39,78 [MPa] ubicados en la zona con mayor sollicitación a la tracción producto de la flexión del componente, mientras que para los resultados del esfuerzo equivalente de Tresca, se tiene un promedio del esfuerzo de 45,72 [MPa].

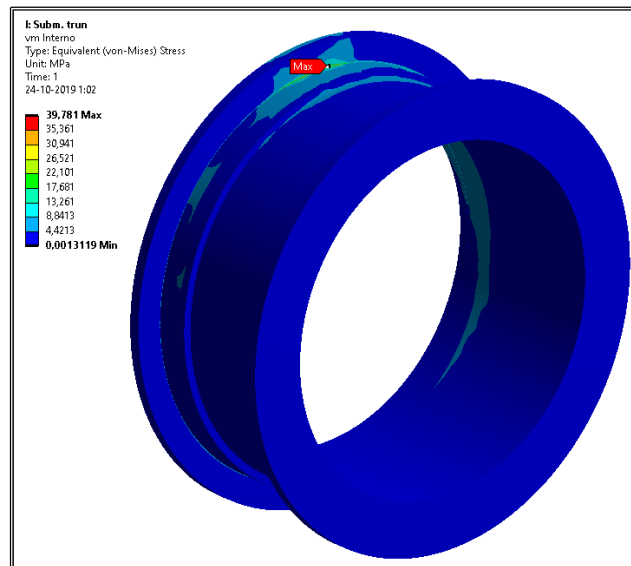


Figura N° 36: Estado de Von Mises para la zona del trunnion, 38 [MPa].

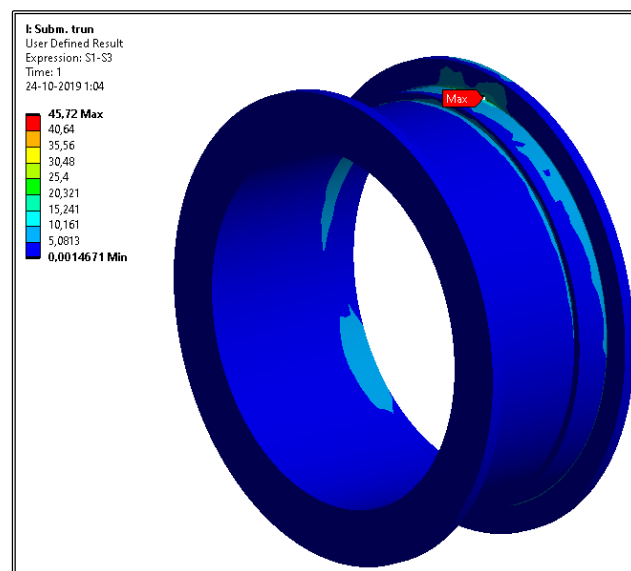
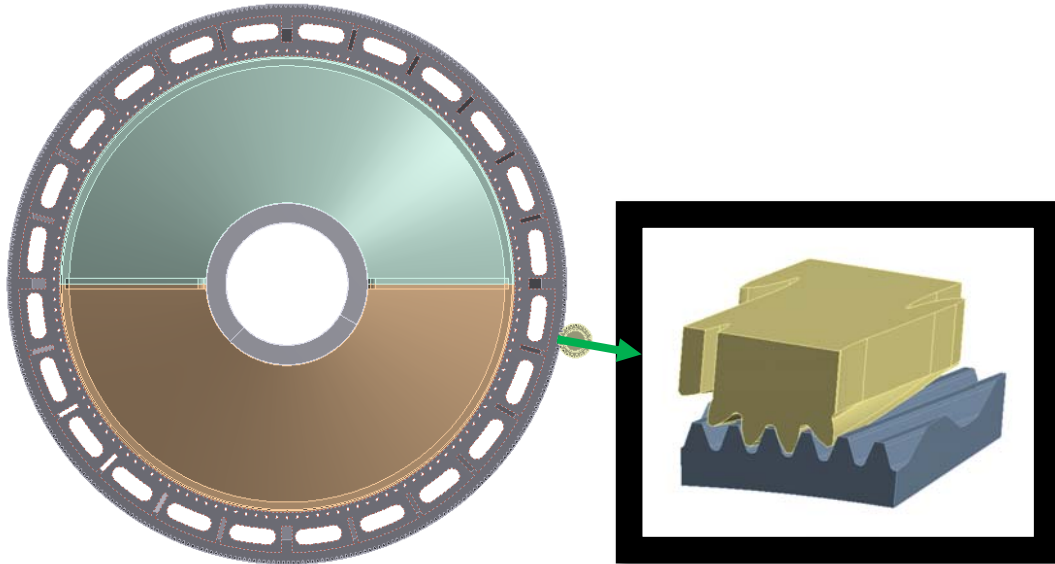


Figura N° 37: Estado de esfuerzos para Trunnion, criterio de Tresca 45 [MPa].

## 7.5 ANÁLISIS EN DIENTES DE ENGRANAJES

La **Figura N° 39** muestra la zona del submodelo para el sistema de piñón y corona de molino.



**Figura N° 39** Detalle de la zona del submodelo dientes de engranaje.

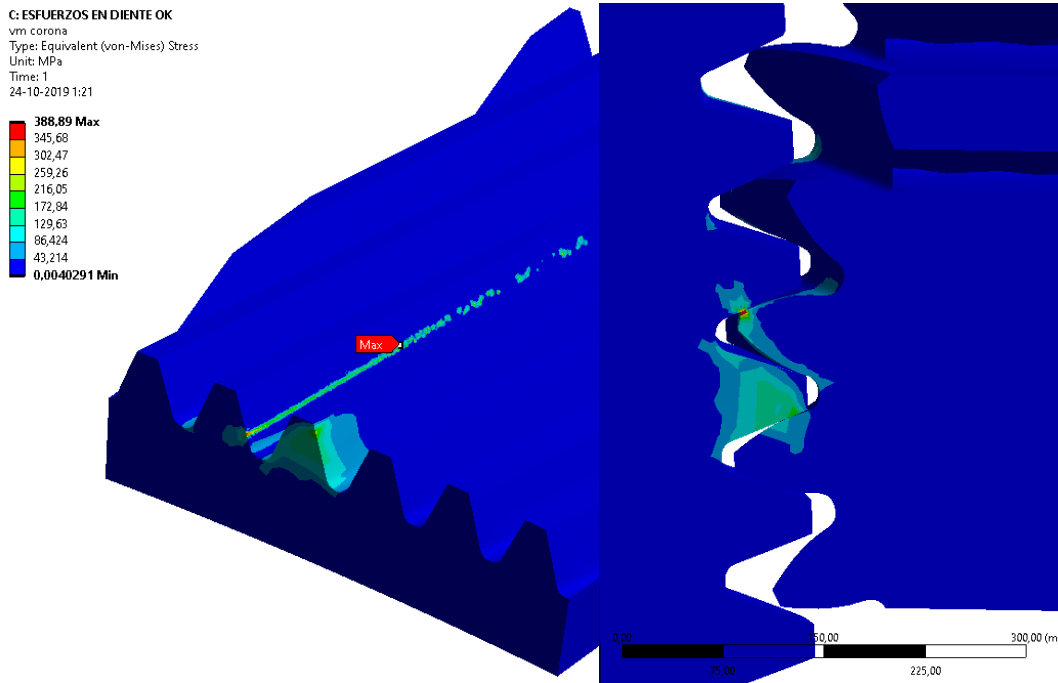
### 7.5.1 SISTEMA DE ENGRANE, CONDICIÓN DE DISEÑO

A continuación, se presentan una serie de representaciones, en las figuras siguientes, las cuales serán detalladas una a una.

Para la **Figura N° 40** se muestra la distribución del esfuerzo de von Mises para la zona localizada del contacto entre dientes. En este submodelo se observa que el máximo esfuerzo será de 389 [MPa].

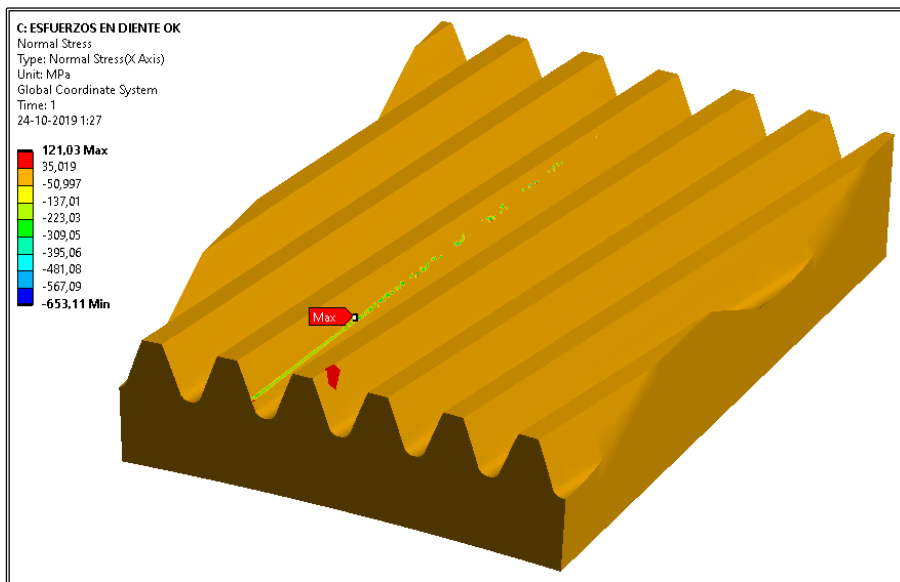
Se puede observar, además, la presión ejercida en el contacto como una línea del tipo helicoidal que valida los resultados obtenidos.





**Figura N° 40** Estado de esfuerzos de Von Mises para la corona bajo parámetros de diseño 388,9 [MPa].

En la **Figura N° 41** se muestra el estado de esfuerzos normales para zona de contacto de dientes 121 [MPa] tracción y -653.11 [MPa] en compresión.



**Figura N° 41** esfuerzos normales, 121 [MPa] tracción y -653.11 [MPa] en compresión.

## Trunnion

El modelo local realizado para la zona del Trunnion entrega que este trabaja bajo los límites de esfuerzo admisible, asegurando así su integridad estructural ante cargas de diseño. Bajo estas condiciones se presenta un valor máximo de 40 [MPa] ubicados en la zona con mayor sollicitación a la tracción y un esfuerzo promedio de 7 [MPa].

### **Análisis de dientes de engranajes.**

El modelo local realizado para esta zona entrega que este trabaja bajo los límites de esfuerzo admisible, alcanzando un valor máximo de 388,9 [MPa] y un esfuerzo promedio de 17 [MPa], asegurando así la integridad estructural de esta zona.

Sin embargo, según lo indicado existen diversos problemas de operación, mantención, alineamiento, lubricación, entre otros, que impiden asegurar desde el punto de vista estático la confiabilidad del sistema. Por tanto, en la práctica, todos esos problemas de operación indicados pueden determinar alejarse significativamente de la condición de diseño, y generando posibles fallas.

## **ANALISIS DE SENSIBILIDAD**

En general, los molinos suelen presentar ciertos modos de fallas producidas bajo condiciones de operación alejadas de los parámetros de diseño, este modo de falla se produce ya sea por corte de pernos, desgaste del manto y sobrecargas operacionales. Estos parámetros fuera de diseño suelen modificar las condiciones de carga del molino, llevándolo a estados de esfuerzos fuera de lo deseado. Dicho lo anterior se realizó un análisis de sensibilidad que entrega la variación de esfuerzos ante estas condiciones fuera de los parámetros de diseño. A continuación, se detallan los resultados y conclusiones correspondientes:

### **Análisis de sensibilidad zona del flange unión:**

- De las diferentes combinaciones de corte de pernos posibles, se determina que existe una combinación que es crítica, la cual se logra soltando los pernos denominados “1, 2, 3 y 4” (Ver **Figura N° 31**). Este estado de corte en particular provocará rotura del flange localmente después de  $10^5$  ciclos (1 mes de operación continua aproximadamente).
- Si bien el corte de pernos es un proceso aleatorio, basado en los esfuerzos alternos estimados existe mayor probabilidad de corte de pernos cerca de la unión del flange.

### **Análisis de sensibilidad en la zona del manto:**

- Sobre un valor de 20 [mm] de desgaste del manto (30% del espesor de diseño) la condición de esfuerzos se eleva lo suficiente para generar una alta probabilidad de falla catastrófica del manto por fatiga. Bajo estas condiciones se estimó una vida a la fatiga de  $10^6$  ciclos (aproximadamente 10 semanas de operación continua).
- Sobre un valor de 38 [mm] de desgaste del manto la falla por fatiga es inminente (alrededor de 1 semana).
- Además, según los antecedentes, se aprecia que un modo de falla muy común es la aparición de grietas en el manto, para lo cual se realizó un análisis de los tamaños críticos de grietas. Se concluyó que, sobre un tamaño de 3,6 [mm] se debe generar un registro y monitorear su avance procurando lo antes posible su reparación, debido a que sobre este tamaño las grietas crecerán. Si se genera una grieta de 94 [mm] la falla por colapso es inminente.

### **Análisis de sensibilidad en la zona del trunnion:**

Se determina que para un desgaste de sólo un 45% del trunnion este presentará condiciones de trabajo riesgosas, mientras que para una altura de desgaste de un 65% aproximadamente del espesor del trunnion, se encontrará en una condición crítica, en donde tendrá que ser reparado en un tiempo menor a un mes.

### **Análisis de contacto de dientes de engranajes.**

De los resultados obtenidos se puede decir que los esfuerzos de contacto o la presión de contacto, debería causar a largo plazo fatiga por contacto (picadura), el tiempo de duración es calculado para 10.000.000 ciclos, esto dependerá de más factores, como son la lubricación, desalineamiento, refrigeración, etc.

recomendados se encuentra el de líquidos penetrantes, ultrasonido y el análisis de vibraciones.

#### **Zona del trunnion:**

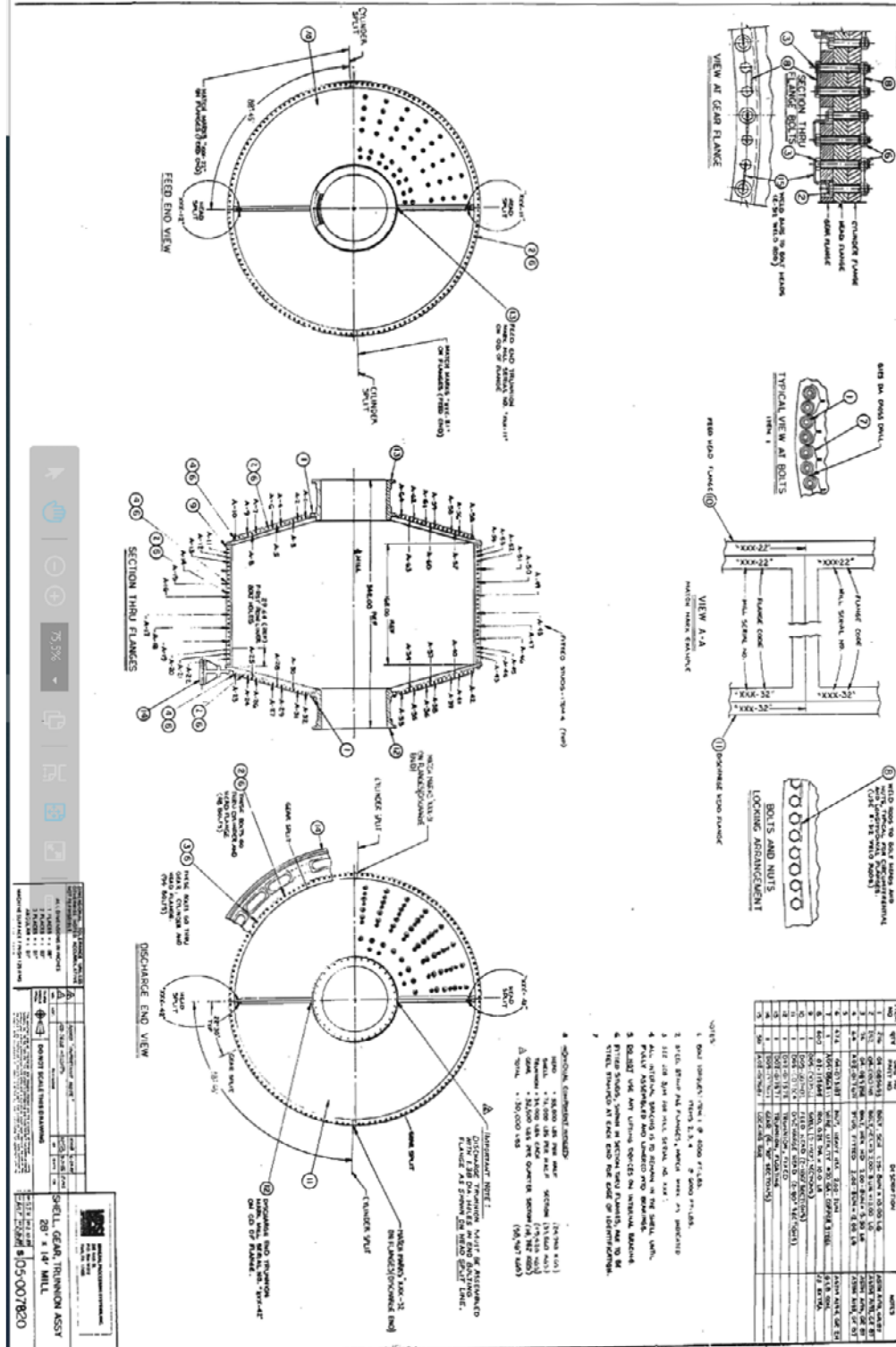
- Dado que existen antecedentes relacionado con modo de falla desgaste y fisuras, se recomienda revisar y reforzar, en caso de ser necesario las pautas de inspección y lubricación de los Trunnion para disminuir la probabilidad de fatiga superficial o tensión de contacto metal-metal, por falta de lubricación.

#### **Zona de engrane.**

- Dado que existen antecedentes relacionado con modo de falla desgaste y fisuras, se recomienda revisar y reforzar, en caso de ser necesario las pautas de inspección y lubricación de los engranajes para disminuir la probabilidad de fatiga superficial o tensión de contacto metal-metal, por falta de lubricación.
- Se recomienda que, ante la presencia generación de cargas externas por mala alineación de componentes, se recomienda un chequeo periódico cada 2 meses con el objeto de no llevar la estructura del molino a sobreesfuerzos.
- Cada 2 meses revisar el torque según diámetro y grado de los pernos de amarre pillow block eje piñon y pillow block motor-estator., con la finalidad de prevenir solturas mecánicas en los componentes en cuestión.
- Mantener un control dinámico de temperaturas en transmisión piñon corona.
- Mantener un control vibraciones del tren de transmisiones y motores principales

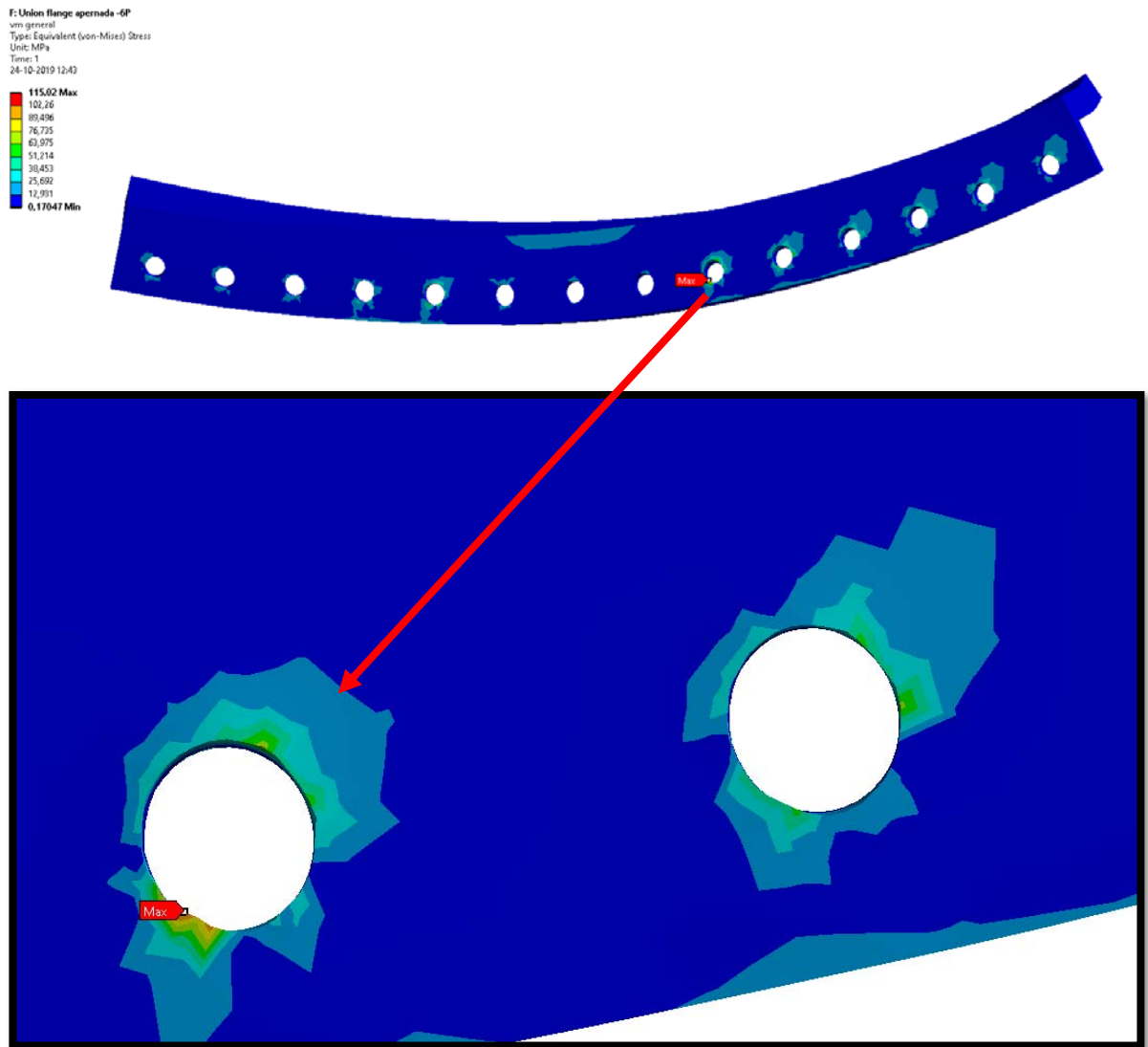
10.0 ANEXOS

10.1 PLANOS GENERALES MOLINO SAG N°1



## 10.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD UNIÓN TAPA-MANTO

A continuación, se presenta el estado de esfuerzos límite para asegurar vida infinita del equipo. Para lograr este estado de carga se eliminó el efecto de apriete y contacto de 3 pernos (1, 2 y 3). Logrando de esta manera un estado de esfuerzo en donde los valores máximos de esfuerzo se encuentran en la zona donde se alojan estos pernos ciegos, llegando a un valor máximo de 115 [MPa] con un promedio de 7,6 [MPa]. Ver **Figura N° 43**.

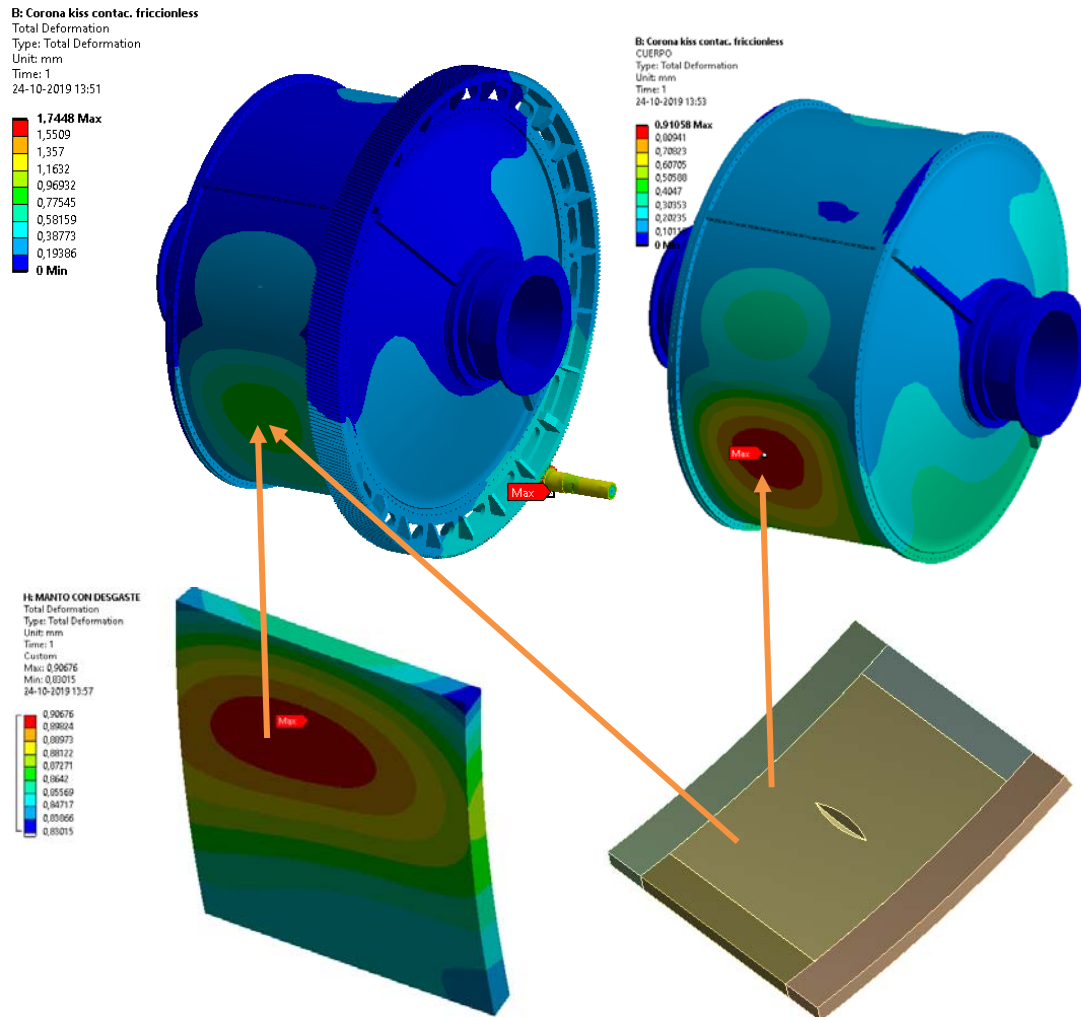


**Figura N° 43:** Estado equivalente de esfuerzos de Von Mises unión tapa-manto bajo límite de vida infinita.

## 10.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DESGASTE MANTO

En esta sección se presentan los resultados de esta zona que es la presentada en la **Figura N° 46**. Los puntos a tener en cuenta para esta zona son los siguientes:

- El submodelo se extrae de una zona desfavorable del Shell, en este caso, debido a la presencia de altas deformaciones se escoge una sección inferior, tal como se muestra en la imagen.
- Tal como muestra la **Figura N° 44**, se busca encontrar las condiciones necesarias para generar una eventual falla a la fatiga, para esto se agrega una muesca en una zona desfavorable (presencia de altos valores de deformación) en donde la muesca genere concentraciones de esfuerzos.
- Un segundo análisis se realiza para determinar los tamaños límites para que la grieta empiece a crecer y el tamaño cuando el crecimiento es inestable.
- Es importante señalar que este desgaste generado es producido por abrasión de la pulpa con la que trabaja el molino en su interior. Por lo tanto, para el análisis a la fatiga se debe tomar en cuenta este factor que hará disminuir el factor de Marín.

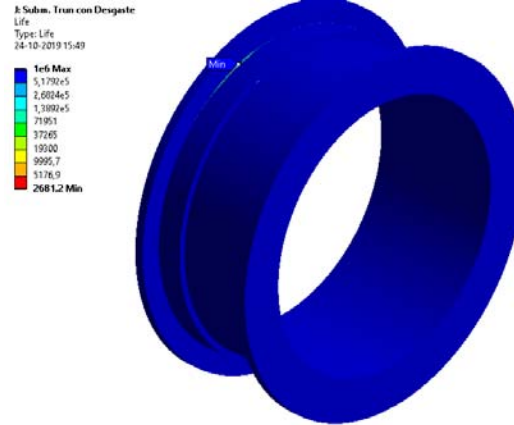


**Figura N° 46** Ubicación del área del manto extraída para el submodelo.

En la se presentan los resultados de esfuerzos equivalentes de Von Mises para el submodelo de la zona del manto, el cual al presentar una altura de desgaste de **20 [mm]**, correspondiente a un 30% del espesor, se alcanza el límite para asegurar un estado de vida infinita.



Se presenta en la **Figura N° 52** la condición de vida a fatiga para el componente (trunnion), en la cual se obtienen valores de vida infinita para todas las zonas de mayor sollicitación (color azul), siendo la que más se ve afectada debido a la deflexión del molino.



**Figura N° 52** Vida para la zona del trunnion para condiciones de trabajo críticas.