



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

**Diseño de una metodología para la maniobra cambio de trunnion
de descarga de un molino SAG en Minera Los Pelambres**

POR

Diego Alejandro Medina Olate

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

Profesores Patrocinantes:
Dr. Emilio Enrique Dufeu Delarze
Dr. Cristian Alexis Canales Cárdenas

Ingeniero Supervisor:
Pablo Nicolás Bustamante Galaz

Julio 2026
Concepción (Chile)

© 2026 Diego Alejandro Medina Olate

© 2026 Diego Alejandro Medina Olate

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

Agradecimientos

Con profunda estima y gratitud, agradezco al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente a lo largo de estos años. Extiendo este reconocimiento a cada uno de los docentes que formaron parte del proceso, quienes, mediante su exigencia, enseñanza y compromiso, contribuyeron de manera significativa a mi formación como persona y como futuro ingeniero.

A mi familia, especialmente a mis padres y a mi hermano, les agradezco profundamente por su amor incondicional, apoyo constante y confianza en cada una de mis capacidades. Definitivamente han sido el pilar fundamental que me da la fuerza necesaria para perseguir mis metas. Sin ustedes, este camino no habría sido posible.

A mis amigos y compañeros, gracias por su compañía y apoyo durante todo este proceso. De una u otra forma, estuvieron presentes en el clímax de esta etapa académica, entregándome ánimo, confianza y motivación para creer en mí mismo sin rendirse, enfrentando cada desafío impartido a lo largo de este trayecto con actitud positiva.

Finalmente, quiero dedicar unas palabras a una persona muy especial para mí, quien me acompañó y apoyó durante más de dos años, siendo mi red de contención fundamental en los momentos más difíciles. Gracias por tu cariño, amor, comprensión, y muchas gracias por haber sido parte de este gran proceso.

Resumen

En el contexto de la minería nacional, el proceso de conminución mediante molinos SAG forma parte de una de las etapas más críticas debido a su alta incidencia en la producción, costos operacionales y mantenciones mecánicas planificadas. Este último aspecto pasa a ser totalmente necesario cuando los componentes mecánicos del molino sufren algún tipo de desgaste o deterioro, incluso cuando estos no corresponden a elementos de desgaste directo como en el caso del trunnion, donde una pequeña falla en estos elementos puede comprometer la continuidad operacional del equipo, especialmente por efectos que se asocian al ingreso de pulpa, holguras, fricción y golpes de carga. Por lo tanto, dada la necesidad de planificar mantenciones de manera constante en este tipo de componentes, en el presente proyecto se elaboró una metodología para la maniobra de recambio del trunnion de descarga del molino SAG 02, abordando de manera sistemática las etapas de desmontaje, izaje y montaje del nuevo componente. En el desarrollo de estas etapas, se diseñaron dispositivos específicos de retiro e izaje del muñón, estableciendo criterios que se orientan a reducir las cargas presentes en el accionamiento, criterios de resistencia estructural definidos por el cliente y evaluación de cargas mediante análisis estructural de Ansys Mechanical. Además, para el montaje del nuevo componente, se seleccionaron herramientas certificadas y componentes definidos por catálogo según vendor, abarcando aspectos de seguridad operacional en terreno y control de calidad necesarios para ejecutar la intervención de manera confiable. Los resultados de simulación permitieron respaldar la factibilidad estructural de la metodología propuesta, lo cual se validó en terreno durante la ejecución global del proyecto.

Palabras clave: ingreso de pulpa, muñón, análisis estructural, validación en terreno

Abstract

In the context of the national mining industry, the comminution process carried out through SAG mills constitutes one of the most critical stages due to its high impact on production, operating costs, and planned mechanical maintenance. This latter aspect becomes entirely necessary when the mill's mechanical components undergo some type of wear or deterioration, even when they are not direct wear elements, as in the case of the trunnion, where a minor failure in these components may compromise the operational continuity of the equipment, especially due to effects associated with pulp ingress, clearances, friction, and load impacts. Therefore, given the need to continuously plan maintenance for this type of component, the present project developed a methodology for the replacement maneuver of the discharge trunnion of SAG Mill 02, systematically addressing the stages of disassembly, lifting, and installation of the new component. During the development of these stages, specific devices for trunnion removal and lifting were designed, establishing criteria aimed at reducing the loads involved during actuation, structural resistance criteria defined by the client, and load evaluation through structural analysis in Ansys Mechanical. In addition, for the installation of the new component, certified tools and vendor catalog-defined components were selected, encompassing on-site operational safety aspects and quality control measures required to carry out the intervention reliably. The simulation results supported the structural feasibility of the proposed methodology, which was validated in the field during the overall execution of the project.

Keywords: pulp ingress, trunnion, structural analysis, field validation

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Glosario	viii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Marco conceptual de la maniobra de recambio	1
1.2 Antecedentes técnicos del trunnion de descarga	3
1.3 Contexto y estado actual de las maniobras “cambio de trunnion”	4
1.4 Revisión de alternativas para la mantención de molinos SAG.....	5
1.5 Objetivos.....	8
1.5.1 Objetivo general.....	8
1.5.2 Objetivos específicos	9
1.6 Hipótesis	9
1.7 Metodología general para el desarrollo del proyecto	9
1.7.1 Metodología para la ejecución en terreno	9
1.7.2 Contextualización y alcances de la solución propuesta	11
1.7.3 Metodología para el desarrollo de la solución	12
2 CAPÍTULO 2: Diseño y cálculo del dispositivo de retiro en el desmontaje del trunnion	14
2.1 Descripción general del sistema de retiro de trunnion	14
2.2 Configuración geométrica de las consolas de retiro y empuje	16
2.3 Selección de materiales y propiedades mecánicas	18
2.4 Normativa y requerimientos de diseño estructural	22
2.5 Modelación del problema mediante elementos finitos (FEM)	22
2.5.1 Mallado y condiciones de simulación.....	22
2.5.2 Condiciones de borde y restricciones del sistema.....	24
2.5.3 Resultados FEM: deformaciones, esfuerzos de Von Mises y factor de seguridad	28
2.6 Cálculo estructural de la pernería del dispositivo.....	32
3 CAPÍTULO 3: Diseño, cálculo y selección de elementos de sujeción en el izaje del trunnion	36
3.1 Descripción general del sistema de izaje y selección de elementos	36
3.2 Configuración geométrica de los dispositivos triangulares	38
3.3 Selección de materiales y propiedades mecánicas	39
3.4 Normativa y requerimientos de diseño estructural	41

3.5 Modelación del problema mediante elementos finitos (FEM)	42
3.5.1 Mallado y parámetros de simulación	42
3.5.2 Definición de las condiciones de borde	43
3.5.3 Resultados FEM: deformaciones, esfuerzos de Von Mises y factor de seguridad	45
4 CAPÍTULO 4: Análisis y selección de pernos en el montaje del trunnion.....	48
4.1 Descripción del proceso de montaje del trunnion de descarga.....	48
4.2 Descripción del problema en uniones apernadas del molino SAG	48
4.3 Selección de pernos y definición de torque de apriete en uniones críticas.....	50
4.3.1 Uniones apernadas en la sección trunnion-tapa	50
4.3.2 Uniones apernadas en la sección trunnion-adapter	52
4.3.3 Sistema de lubricación en uniones apernadas	53
4.4 Propuesta de sistema de monitoreo de pernos	54
4.5 Procedimientos de control en el montaje.....	56
4.5.1 Verificación de contacto en uniones enflanchadas	56
4.5.2 Acciones correctivas en el junte de flanges	57
5 CAPÍTULO 5: Conclusiones generales del proyecto	58
5.1 Conclusiones de la maniobra cambio de trunnion.....	58
5.2 Trabajos futuros.....	58
6 Referencias	59
7 Anexos.....	61
7.1 Carta Gantt.....	73
7.2 Validación del desmontaje del trunnion de descarga	74
7.3 Análisis estático mediante ecuaciones de equilibrio	77
7.4 Validación del izaje del trunnion de descarga	80
7.5 Validación del montaje del trunnion de descarga.....	83

Lista de Tablas

Tabla 1: Propiedades mecánicas del material de la consola de retiro y empuje.	19
Tabla 2: Propiedades mecánicas del material de los pernos M64 x 650.	20
Tabla 3: Resumen de los parámetros de mallado utilizados en las consolas de retiro y empuje.	24
Tabla 4: Recopilación de resultados asociados a la simulación de la consola de retiro y empuje.	32
Tabla 5: Componentes de izaje seleccionados para el retiro del trunnion de descarga.	37
Tabla 6: Propiedades mecánicas del material de los triángulos de izaje.	40
Tabla 7: Resumen de los parámetros de mallado utilizados en los triángulos de izaje t1 y t2.	43
Tabla 8: Recopilación de resultados asociados a la simulación de los triángulos de sujeción.	47
Tabla 9: Especificaciones técnicas de los productos utilizados en mantención de molinos SAG.	86
Tabla 10: Pernos de conexión entre los componentes mecánicos de descarga del molino SAG.	90

Lista de Figuras

Figura 1: Trunnion de descarga del molino SAG 02 de Minera Los Pelambres.	1
Figura 2: Molino SAG 02 de Minera los Pelambres.	2
Figura 3: Desgaste del trunnion de descarga y holgura asociada al problema, Shapr3D.	3
Figura 4: Corte de eslingas en izaje de trunnion-adapter, Chuquicamata (2025).	5
Figura 5: Sistema de recambio de revestimientos mediante brazos hidráulicos (MRM) [5].	6
Figura 6: Sistema de deslizamiento controlado para transporte horizontal (skidding system) [6].	7
Figura 7: Monitoreo de carga en tiempo real en grilletes instrumentados [7].	8
Figura 8: Componentes en la zona de descarga del molino SAG 02.	10
Figura 9: Uniones apernadas en componentes de descarga, Shapr3D.	10
Figura 10: Esquema secuencial de las actividades para llevar a cabo la solución.	13
Figura 11: Sistema de extracción para trunnion de descarga SAG 02, Shapr3D.	15
Figura 12: Gato hidráulico Enerpac RC1006 para el dispositivo de retiro.	16
Figura 13: Consola de retiro acoplada a trunnion de descarga, Shapr3D.	17
Figura 14: Consola de empuje acoplada a perno M64 x 650 mm, Shapr3D.	17
Figura 15: Esquema de cargas aplicadas a las consolas y apoyo del sistema.	18
Figura 16: Propiedades mecánicas de las consolas de retiro y empuje, Ansys Workbench.	20
Figura 17: Propiedades mecánicas de los pernos largos M64 x 650 mm, Ansys Workbench.	21
Figura 18: Mallado tetraédrico de la consola de retiro, Ansys Mechanical.	23
Figura 19: Mallado tetraédrico de la consola de empuje, Ansys Mechanical.	23
Figura 20: Diámetro del pistón del gato hidráulico RC1006 para extracción de trunnion, Shapr3D.	25
Figura 21: Condiciones de borde asociadas a la consola de retiro, Ansys Mechanical.	25
Figura 22: Diámetro basal del gato hidráulico RC1006 para el retiro del trunnion, Shapr3D.	26
Figura 23: Condiciones de borde asociadas a la consola de empuje, Ansys Mechanical.	27
Figura 24: Deformaciones presentes en la consola de retiro, Ansys Mechanical.	28
Figura 25: Esfuerzos equivalentes de Von Mises de la consola de retiro, Ansys Mechanical.	29
Figura 26: Comando para visualización de elementos sobre 200 MPa, Ansys Mechanical.	29
Figura 27: Deformaciones presentes en la consola de empuje, Ansys Mechanical.	30
Figura 28: Esfuerzos equivalentes de Von Mises de la consola de empuje, Ansys Mechanical.	31
Figura 29: Diagrama de Cuerpo Libre de la unión apernada en la consola de retiro.	33
Figura 30: Sistema de levante para trunnion de descarga SAG 02, Shapr3D.	36
Figura 31: Dispositivo triangular de sujeción superior en maniobra de izaje, Shapr3D.	38
Figura 32: Dispositivo triangular inferior de sujeción en maniobra de izaje, Shapr3D.	39
Figura 33: Propiedades mecánicas de los triángulos de sujeción, Ansys Workbench.	41
Figura 34: Mallado tetraédrico del triángulo de izaje t1, Ansys Mechanical.	42
Figura 35: Mallado tetraédrico del triángulo de izaje t2, Ansys Mechanical.	43
Figura 36: Condiciones de borde asociadas al triángulo superior, Ansys Mechanical.	44
Figura 37: Condiciones de borde asociadas al triángulo inferior, Ansys Mechanical.	44
Figura 38: Deformaciones presentes en el dispositivo triangular t1, Ansys Mechanical.	45
Figura 39: Esfuerzos equivalentes de Von Mises del dispositivo triangular t1, Ansys Mechanical.	45

Figura 40: Deformaciones presentes en el dispositivo triangular t2, Ansys Mechanical.	46
Figura 41: Esfuerzos equivalentes de Von Mises del dispositivo triangular t2, Ansys Mechanical..	47
Figura 42: Pernos contaminados y corroídos por el efecto de la pulpa.....	49
Figura 43: Perno inteligente M64 tipo SPC4 para unión trunnion-tapa.....	50
Figura 44: Golillas planas para pernos SPC4 en la unión trunnion-tapa.	51
Figura 45: Llave de torque hidráulica Enerpac para apriete de pernos SPC4.....	51
Figura 46: Perno Parker M42 para unión trunnion-adapter.	52
Figura 47: Llave de torque hidráulica Hytorc para apriete de pernos Parker.	53
Figura 48: Producto de lubricación Loctite LB 771 Nickel Anti-Seize.....	54
Figura 49: Equipo de medición SPC4 en perno inteligente.	55
Figura 50: Plano de uniones apernadas del conjunto trunnion-adapter-trunnion liner [14].....	55
Figura 51: Feeler gauge de distintos espesores para junte de flanges.	57

Glosario

APDL	:	Ansys Parametric Design Language
ASME	:	American Society of Mechanical Engineers
EPP	:	Elementos de Protección Personal
FEM	:	Finite Element Analysis
MLP	:	Minera Los Pelambres
SAG	:	Semiautógeno
SPC	:	Statistical Process Control

Símbolos

A	:	Área transversal, [mm ²]
C	:	Constante de rigidez
D	:	Diámetro, [mm]
E	:	Módulo de Young, [GPa]
F	:	Fuerza o Carga, [N]
k	:	Rigidez, [N/mm]
l	:	Longitud, [mm]
M	:	Momento, [Nmm]
n	:	Factor de seguridad
W	:	Peso, [N]

Subíndices

A	:	orificio A
adm	:	admisible
B	:	orificio B
b	:	base
ce	:	consola de empuje
cp	:	compresión
cr	:	consola de retiro
D	:	orificio D
E	:	orificio E
eq	:	equivalente
max	:	máximo
p	:	perno
pi	:	pistón
T	:	total
t1	:	triángulo superior
t2	:	triángulo inferior
tr	:	tracción
tr	:	trunnion
y	:	fluencia

Letras griegas

σ	:	Esfuerzo, [MPa]
----------	---	-----------------

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Marco conceptual de la maniobra de recambio

El trunnion corresponde a un componente mecánico rotatorio ubicado en los extremos de molinos de gran tamaño, tanto en la zona de alimentación de mineral como en la de descarga de pulpa, que se acopla estructuralmente a la tapa del shell del equipo. Su función no se limita solo a participar en la conducción del flujo, sino también a la transferencia de cargas del conjunto rotatorio hacia el sistema de apoyo del molino, contribuyendo así a la continuidad operativa del proceso de molienda. Dentro del proceso general de conminución, que abarca las operaciones de chancado y molienda orientadas a reducir el tamaño del mineral para liberar producto útil, los molinos SAG forman parte de una de las etapas más relevantes del proceso, ya que reciben bastante mineral de gran tamaño y lo someten a reducción mediante impacto, fricción y compresión, motivos principales que provocan el cambio de trunnion cuando se llega a puntos de desgaste que superan las tolerancias estipuladas por el dueño del equipo y la normativa aplicable. Además, la propia industria reconoce que el proceso de conminución es una de las operaciones más intensivas en términos de energía dentro de la minería, y que el sistema de descarga del molino SAG debe asegurar un flujo libre y continuo de pulpa, condición en la cual el trunnion y sus elementos asociados adquieren gran importancia operativa, siendo parte también de los componentes encargados de la capacidad, estabilidad y eficiencia del molino.

En el caso particular del presente proyecto, el componente analizado corresponde al trunnion instalado en la zona de descarga del molino SAG 02 de Minera Los Pelambres, cuyas dimensiones lo definen como uno de los elementos más complejos y pesados de esta sección del equipo. Según los antecedentes del proyecto, este trunnion presenta un diámetro exterior de 3.650 mm, un diámetro exterior de flange de 4.180 mm y un ancho total de 1.779 mm, alcanzando un peso aproximado de 42 toneladas. Su configuración geométrica considera, por un lado, una zona de orificios pasantes en el flange para el acople con la tapa del shell y, por otro, un perímetro de orificios roscados para la unión con el adapter de descarga como se ilustra en la Figura 1. Estas características muestran que se trata de un componente estructural crítico, diseñado no solo para conducir pulpa, sino también para garantizar compatibilidad geométrica, resistencia mecánica y estabilidad del sistema de descarga.

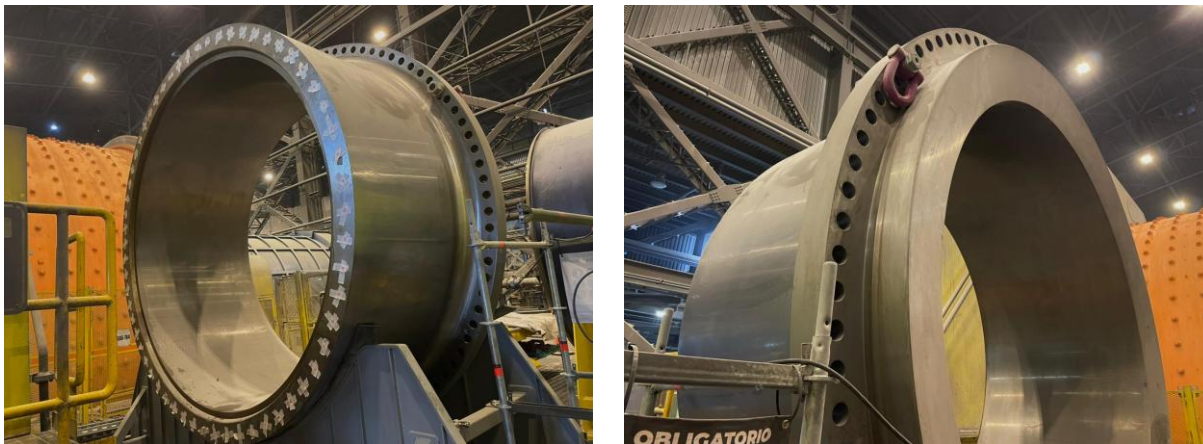


Figura 1: Trunnion de descarga del molino SAG 02 de Minera Los Pelambres.

Respecto de su materialidad, el componente mecánico corresponde a un acero ASTM A536, donde esta norma está asociada a un hierro dúctil o fundición nodular, material ampliamente valorado por su combinación de resistencia mecánica, ductilidad, maquinabilidad y costo, lo que lo hace conveniente para componentes de gran peso y tamaño sometidos a servicios exigentes. En vista de la complejidad de fabricación y su criticidad funcional, el trunnion de descarga pasa siendo un componente de alto costo, alcanzando un valor aproximado de 1.050.000 USD según la información proporcionada por el cliente. Por esta razón, cuando se trata del trunnion de descarga se tiene que dejar a manos de una empresa contratista técnica en este tipo de servicios, aun cuando no corresponde a un elemento considerado como pieza de desgaste periódico. Su mantención e intervención requieren metodologías especializadas, ya que una exposición no prevista al contacto directo y cíclico con pulpa abrasiva puede generar deterioros prematuros en el componente, capaces de justificar su recambio completo.

Los costos asociados a los componentes principales del molino SAG suelen ubicarse, por lo general, en órdenes de magnitud similares al anteriormente mencionado, lo que se explica por la alta criticidad que posee el proceso de conminución, además de la cantidad de material producido. Debido a este nivel de producción que genera cada línea de molienda, entendiendo que una línea está compuesta por un molino SAG y dos molinos de bolas asociados, es que esta etapa es la más técnica y fundamental en la Planta Concentradora. En Minera Los Pelambres, la nave de molienda cuenta con cuatro líneas de estas características, aportando cada una aprox. un 25% de la producción total de la planta.

De acuerdo con antecedentes entregados por personal de la minera, cuando se detiene una línea completa, como la línea 2 que se observa en la Figura 2 (descarga de molino SAG) se genera una pérdida de 63.250 USD por hora correspondiente a material que deja de producirse. Por lo tanto, considerando que el proyecto de mantención expuesto en esta tesis contempla una duración global de 12 días, el impacto económico asociado al material no producido alcanza un valor aproximado de 18.216.000 USD por hora, magnitud que permite dimensionar con claridad la relevancia técnica y operacional de ejecutar este tipo de intervenciones de manera planificada, segura y eficiente.



Figura 2: Molino SAG 02 de Minera los Pelambres.

1.2 Antecedentes técnicos del trunnion de descarga

Antes de desarrollar la solución propuesta para la maniobra de cambio de trunnion de descarga, resulta necesario contextualizar la causa que da origen a este proyecto. En primera instancia, es importante responder a la interrogante de por qué se requiere reemplazar el trunnion de descarga, considerando que el componente forma parte estructural del molino SAG y, en condiciones normales de operación, no corresponde a un elemento de desgaste periódico como sí ocurre con revestimientos, liners u otros elementos internos. Sin embargo, en la práctica industrial, tanto los trunnion de alimentación como los de descarga pueden verse afectados con el paso del tiempo por fenómenos de fricción, desgaste abrasivo o, de manera indirecta, por el ingreso de pulpa proveniente de fallas o desgastes previos en componentes que cubren, como resultó ser en esta situación.

En el caso específico del molino SAG 02 de Minera Los Pelambres, el análisis del componente arrojó que este se encontraba dañado, principalmente en la zona enflanchada del trunnion de descarga, donde conecta con la tapa y con los cajones internos del shell. El estado del muñón fue detectado previamente en terreno y posteriormente estudiado a mayor detalle, observándose una sección de desgaste severo en la esquina interior del flange que da con el cajón, la cual se puede apreciar en la Figura 3. Con el fin de representar la situación de manera más precisa, se proyectó el diseño global de la zona de descarga del molino SAG 02 mediante el software Shapr3D, en donde se logró representar la holgura particular entre la boca bajo el flange del trunnion de descarga (sección afectada) y el cajón del molino, este último con funciones de revestir los componentes estructurales del molino, siendo esta holgura el factor detonante del problema en cuestión.

Luego, tal como se observa en la Figura 3, dicha apertura generó una vía de ingreso no deseada para la pulpa proveniente del interior del molino, específicamente desde las conexiones entre cajones, hasta las pletinas sellantes del trunnion liner, permitiendo así el paso continuo de material abrasivo hacia una zona que no debería estar expuesta directamente a este flujo. Por lo tanto, se dice que la pulpa comenzó a circular por esta abertura impactando de manera repetitiva la superficie interna de la boca del trunnion, lo cual generó un desgaste progresivo por abrasión hasta deteriorar toda esta sección. En este sentido, la necesidad de ejecutar la maniobra de cambio de trunnion de descarga no surge por una falla aislada del componente en sí, sino por una condición de diseño insuficiente en el sistema de cajones o revestimientos internos que conectan directamente con el trunnion y el trunnion liner.

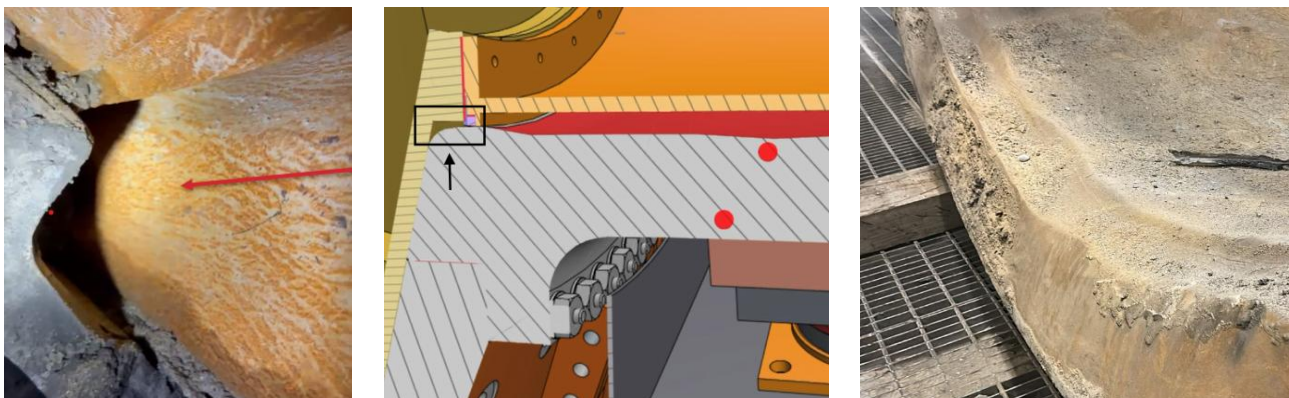


Figura 3: Desgaste del trunnion de descarga y holgura asociada al problema, Shapr3D.

1.3 Contexto y estado actual de las maniobras “cambio de trunnion”

Las operaciones de mantenimiento en molinos SAG forman parte de las actividades más críticas dentro de los procesos de conminución en la industria minera, tanto por su impacto en la continuidad operacional como por los riesgos que se pueden asumir en la manipulación de componentes de gran envergadura y tonelaje. En particular, la maniobra de cambio de trunnion de descarga representa un procedimiento de alta complejidad técnica, debido a las elevadas cargas involucradas, la interacción de múltiples sistemas de izaje y la necesidad de garantizar la integridad estructural de cada unión entre componentes mecánicos durante las etapas de desmontaje, traslado e instalación. En consecuencia, es de suma importancia elaborar una metodología de mantenimiento efectiva para llevar a cabo este tipo de maniobras, del caso contrario, estudios como el de Metso (2023) [1] que se involucran en el mantenimiento de equipos mineros han evidenciado que las detenciones asociadas a fallas en molinos SAG afectan directamente a su continuidad operacional y de producción, pudiendo representar pérdidas económicas del orden de 40.000 USD por hora de detención, considerando costos de producción no realizada y recursos operacionales involucrados, coherente con lo expuesto en el marco teórico del presente informe.

Desde el punto de vista tecnológico y de seguridad operacional, una de las principales problemáticas identificadas en este tipo de maniobras corresponde a fallas en los sistemas de izaje, asociadas especialmente a una distribución no proporcional en las cargas durante el levantamiento de componentes como el trunnion. Investigaciones en ingeniería de izaje y reportes de incidentes en faenas mineras han documentado eventos de fallas en estrobos, grilletes y elementos de sujeción producto de sobrecargas localizadas o contactos indebidos con las superficies rígidas de componentes del molino, generando esfuerzos de corte no previstos. En este sentido, la guía de Occupational Safety and Health Administration (s.f.) [2] habla sobre el uso seguro de eslingas sintéticas establece que estos elementos no deben trabajar directamente sobre aristas sin protección, además de que la carga debe mantenerse balanceada y bajo control durante toda la maniobra. Un caso representativo documentado por la Mine Safety and Health Administration (2003) [3] describe una falla de eslingas de nylon durante el izaje de un contrapeso compuesto por placas de acero, donde la combinación entre una posible carga desbalanceada y el contacto directo de las eslingas con bordes de una superficie de 90° provocó la caída del componente suspendido. Este tipo de eventos es directamente comparable al izaje de un trunnion, debido a la magnitud de las cargas involucradas.

En operaciones a lo largo del país, como en la División Chuquicamata, también se han registrado incidentes donde la inadecuada configuración de los sistemas de izaje (ángulo de levantamiento inadecuado), han derivado en la rotura de elementos de sujeción como se ilustra en la Figura 4, que corresponde al corte de eslingas en el izaje de un trunnion-adapter, producto del contacto indeseado entre ambos componentes. Este tipo de eventos corresponde a una problemática típica en maniobras de izaje dentro de la industria minera, que no solo ocasionan daños estructurales en componentes de elevado costo de reposición, sino que también exponen a riesgos operacionales a los trabajadores.

En este contexto, uno de los objetivos fundamentales del presente proyecto es precisamente mitigar este tipo de errores operacionales, mediante el desarrollo de una solución de izaje que distribuya adecuadamente las cargas, mantenga una separación segura entre los elementos de sujeción y el

componente izado, y reducir así la probabilidad de fallas en maniobras posteriores. También se vuelve fundamental contar con una metodología adecuada para retirar el componente, ya que un desmontaje deficiente puede generar sobrecargas no previstas e impactos en la continuidad operacional.



Figura 4: Corte de eslingas en izaje de trunnion-adapter, Chuquicamata (2025).

Adicionalmente, otra de las problemáticas críticas que se involucra dentro de estas actividades, y que además es reportado de manera recurrente en la literatura y en la práctica industrial, especialmente en Minera Los Pelambres, corresponde al ingreso de pulpa en las uniones apernadas del molino, específicamente en las secciones trunnion-tapa y trunnion-adapter. Este fenómeno genera condiciones altamente desfavorables para el comportamiento de los pernos, debido a la combinación de ambientes corrosivos, pérdida de precarga y esfuerzos constantes asociados a la operación del molino. Estudios sobre fallas en uniones apernadas sometidas a carga constante demuestran que la presencia de contaminantes como pulpa mineral es un factor fundamental en la falla de pernos, ya que la pulpa puede acelerar procesos de corrosión bajo tensión y fatiga, reduciendo significativamente la vida útil de los pernos y aumentando la probabilidad de fallas por corte. En términos cuantitativos, se reporta que una pérdida de precarga del orden del 20% al 30% puede incrementar drásticamente las tensiones alternantes en los pernos, favoreciendo así la falla prematura bajo condiciones de carga dinámica según Bickford (2007) [4].

En consecuencia, la combinación de fallas en sistemas de izaje y deterioro de uniones apernadas evidencia la necesidad de abordar de manera sistemática la maniobra de cambio de trunnion, considerando no solo una correcta ejecución en terreno, sino que también elaborando una planificación centrada en la confiabilidad mediante criterios de diseño mecánico, análisis estructural y control de condiciones en el montaje. La inexistencia de metodologías estandarizadas que combinen todas estas variables representa un desafío sumamente relevante desde el punto de vista técnico para estas industrias, por ello el objetivo apunta al desarrollo de propuestas que permitan mejorar la seguridad, confiabilidad y eficiencia de estas operaciones críticas en la industria minera.

1.4 Revisión de alternativas para la mantención de molinos SAG

En la literatura reciente del rubro minero, una de las soluciones más destacadas para mejorar la seguridad y eficiencia en labores de mantenimiento de molinos SAG, como las actividades de izaje,

corresponde al uso de Mill Reline Machines (MRM) desarrolladas por Metso Outotec (2020) [5], un dispositivo mecanizado para la manipulación de componentes pesados mediante brazos hidráulicos especialmente diseñados para tareas de recambio de componentes al interior del molino. Esta tecnología busca reducir la intervención manual de elementos en zonas de alto riesgo, disminuir la exposición del personal a cargas suspendidas y mejorar el control del posicionamiento en el montaje de los elementos que son manipulados, como se aprecia en la Figura 5. A diferencia de los métodos tradicionales de izaje, donde la manipulación se realiza mediante grúas y sistemas de eslingas, este tipo de soluciones permiten controlar de manera más precisa la trayectoria del componente, reduciendo así las interferencias mecánicas y esfuerzos no deseados sobre los puntos de sujeción.



Figura 5: Sistema de recambio de revestimientos mediante brazos hidráulicos (MRM) [5].

De acuerdo con la información técnica del fabricante, estos equipos tienen un sistema de traslación con tracción y dirección en las cuatro ruedas, lo que le permite maniobrar de manera precisa dentro del área de trabajo, además dispone de un manipulador con siete ejes de movimiento y controles inalámbricos que favorecen la visibilidad del operador y un control fino en la trayectoria de carga. En algunos casos, estas soluciones implementan estrategias de sellado y control de torque en uniones apernadas, con el objetivo de minimizar la entrada de contaminantes y mejorar la vida útil de los pernos.

Sin embargo, si bien estos sistemas representan un avance significativo en términos de seguridad y eficiencia operativa, su aplicación se concentra principalmente en el recambio de revestimientos internos del molino, por lo cual presenta limitaciones cuando se trata de componentes estructurales externos de mayor tamaño y complejidad geométrica, tales como el trunnion de descarga. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar metodologías específicas que vinculen criterios de control de carga, seguridad y precisión a las maniobras de mayor escala, como las abordadas en el presente trabajo.

Existen múltiples alternativas innovadoras que permiten reemplazar los sistemas tradicionales de izaje para equipos de gran tonelaje, en donde, otra de estas opciones corresponde al uso de sistemas de deslizamiento controlado o skidding systems, ampliamente utilizados por empresas de ingeniería pesada como Mammoet (s.f.) [6]. Típicamente en maniobras de izaje, la carga es suspendida completamente por puente grúas y diversos elementos de sujeción, pero el foco de este nuevo sistema se basa en el desplazamiento horizontal del componente en mantención sobre una pista metálica

totalmente acondicionada, revestida por bloques de teflón sobre los cuales se apoya un skid shoe o viga deslizante con una base de acero inoxidable. La combinación entre teflón, acero inoxidable y sistemas de lubricación reduce de manera significativa la fricción en el componente, permitiendo mover cargas extremas con una fuerza relativamente limitada. Además, el sistema incorpora un cilindro horizontal de empuje-tracción que se va anclando sucesivamente a ranuras laterales de la pista, de modo que la carga avance de manera progresiva y controlada como muestra la Figura 6. En este sentido, se trata de una solución viable en escenarios donde el izaje directo de un componente pesado puede implicar altos riesgos de sobrecarga, o interferencia con la geometría del equipo.



Figura 6: Sistema de deslizamiento controlado para transporte horizontal (skidding system) [6].

Analizando el sistema operativo, esta metodología presenta ventajas importantes, ya que la carga se mantiene apoyada durante gran parte de la maniobra, reemplazando así la exigencia que se tendría en sistemas de sujeción como eslingas, grilletes y otros elementos de levante. Mammoet reporta aplicaciones donde este sistema ha permitido desplazar estructuras de miles de toneladas mediante skid shoes y unidades de empuje-tracción controladas de forma sincronizada, logrando movimientos precisos y estables. No obstante, aunque esta solución es altamente eficiente para el traslado de grandes estructuras, su aplicación en maniobras como el cambio de trunnion de descarga puede verse limitada por la geometría del entorno y el espacio disponible, ya que este producto recalca la necesidad de instalar pistas o superficies de deslizamiento.

De manera complementaria a la solución propuesta en el presente trabajo, una línea de desarrollo que mantiene similitud en cuanto a mayor seguridad y control en las maniobras cambio de trunnion, corresponde a los sistemas de monitoreo de carga en tiempo real desarrollados por Crosby Group (2022) [7]. En este caso, el principio no se centra en modificar geométricamente el sistema de izaje, sino en instrumentar sensores medidores a los elementos de sujeción, tales como grilletes y cáncamos, para monitorear en tiempo real las fuerzas transmitidas durante el levantamiento del componente.

El fabricante de esta solución indica que productos como los Wireless Loadshackles (WLS) permiten monitorear la carga aplicada con capacidades comerciales desde 3,25 ton hasta 500 ton, pudiendo fabricarse incluso para cargas de hasta 3.000 ton, con un alcance inalámbrico de 3.280 ft y electrónica sellada bajo estándar IP67/NEMA6, lo que los hace especialmente adecuados para entornos industriales complejos. Las maniobras bajo este sistema de izaje ya no contemplan la estimación de distribución de carga en base a configuraciones geométricas o diversas memorias de cálculo en

elementos específicos, ya que esta solución permite validar directamente el comportamiento real del sistema durante la maniobra, detectando posibles sobrecargas, desbalances o desviaciones en la trayectoria de izaje antes de que estas se traduzcan en una falla del sistema.

Esta tecnología introduce una importante mejora en la gestión del riesgo para el rubro minero, ya que permite supervisar constantemente el comportamiento de las cargas aplicadas, además, la toma de decisiones es fundamental en este tipo de sistemas durante maniobras complejas. De hecho, la propia línea de productos Straightpoint incorpora no solo grilletes instrumentados (Figura 7), sino también software de monitoreo, bases inalámbricas y alarmas de sobrecarga, lo que les permite construir un sistema que integra control absoluto para operaciones de levante, sobre todo aquellas que son más críticas por el tonelaje en juego.



Figura 7: Monitoreo de carga en tiempo real en grilletes instrumentados [7].

Finalmente, se han evidenciado múltiples ventajas que esta técnica presenta en términos de control y seguridad, pero cabe destacar que esta última solución tampoco aborda directamente la optimización estructural del sistema de izaje ni corrige por sí sola los problemas asociados a un diseño de sujeción erróneo o concentraciones de esfuerzo que se maximizan durante el sistema operativo. Por lo tanto, es válido decir que es una opción relevante para disminuir el riesgo durante la ejecución, pero también es válido destacar que todavía persiste la necesidad de profundizar en criterios de diseño, cálculo y validación estructural que permitan asegurar una maniobra técnicamente confiable.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

El objetivo general del proyecto se orienta a diseñar una metodología para la maniobra cambio de trunnion de descarga de un molino SAG presente en la planta concentradora de Minera Los Pelambres, asegurando que el componente mecánico sea retirado y montado sin ningún tipo de daño durante ambas maniobras. Para llevar a cabo el cumplimiento de este objetivo, el trabajo consiste en el análisis y sistematización de las etapas críticas dentro del proceso de desmontaje, izaje y montaje de los componentes estructurales del molino, evaluando criterios de seguridad, secuencia operativa y el uso de elementos de izaje.

1.5.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se han definido tres objetivos específicos que estructuran el trabajo de forma metodológica y medible, estos son:

OE1: Diseñar el dispositivo de retiro de trunnion mediante su configuración geométrica, la selección de materiales, determinando sus condiciones de carga y sus restricciones operacionales, con el fin de evaluar su comportamiento estructural a través de herramientas de análisis por elementos finitos (FEM), verificando tensiones, deformaciones en cada elemento y factor de seguridad para asegurar su correcta operación durante la maniobra de desmontaje.

OE2: Diseñar los componentes triangulares de la suspensión del muñón de descarga a través de su configuración geométrica, selección de materiales y determinación de cargas a partir de ecuaciones de equilibrio, para posteriormente realizar su cálculo y validación mediante herramientas de análisis por elementos finitos (FEM), evaluando su comportamiento mecánico en términos de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad bajo condiciones reales de operación en el izaje.

OE3: Seleccionar los pernos y elementos de fijación para las uniones críticas en el montaje del trunnion, considerando las condiciones operacionales asociadas al ingreso de pulpa, la definición de torque de apriete adecuado y la implementación de criterios de control y monitoreo continuo, con el objetivo de garantizar integridad estructural y así prevenir fallas prematuras durante su operación.

1.6 Hipótesis

Se plantea como hipótesis que la etapa de izaje del trunnion de descarga del molino SAG puede ejecutarse de manera estructuralmente segura con una operación controlada, sin fallas asociadas a sobrecargas puntuales, cortes de elementos de sujeción o interferencias mecánicas, gracias al correcto diseño y validación de las consolas triangulares encargadas de distribuir adecuadamente las fuerzas actuantes durante la maniobra. No obstante, se estima que el tiempo total de ejecución del proyecto podría incrementarse respecto de lo programado, debido a factores logísticos y operacionales, tales como retrasos en la llegada de componentes o sistemas de izaje seleccionados, tiempos adicionales requeridos para la manipulación de elementos de gran tonelaje, tales como la rueda de capacho, trommel, adapter y el trunnion de descarga, o bien contingencias propias del trabajo en terreno en Minera Los Pelambres.

1.7 Metodología general para el desarrollo del proyecto

1.7.1 Metodología para la ejecución en terreno

En primera instancia, cabe mencionar que la solución propuesta del proyecto será ejecutada en terreno en la planta concentradora de Minera Los Pelambres, en colaboración con la empresa ESR Servicios. Por lo tanto, es importante entender que el procedimiento en terreno asociado al proyecto se desarrolla inicialmente en la zona de descarga del molino SAG, donde el acceso al trunnion de descarga requiere una secuencia previa de desmontaje de los componentes que conforman este sector. En primer lugar,

se considera el retiro de la sección superior de la rueda de capacho (se cortan pernos), para posteriormente continuar con el desmontaje del rock box. Posteriormente, se continua con el retiro de la sección inferior de la rueda de capacho y el retiro completo del trommel. A continuación, se procede con el desmontaje del trunnion liner, para poder continuar con el adapter con su respectivo revestimiento, permitiendo finalmente acceder al trunnion de descarga. Luego, la secuencia operativa de retiro de componentes se puede observar en la Figura 8, que corresponde de izquierda a derecha según la ilustración.



Figura 8: Componentes en la zona de descarga del molino SAG 02.

Es fundamental considerar que cada etapa de desmontaje involucra múltiples uniones apernadas críticas entre componentes, tales como la unión bucket wheel-trommel, trommel-trommel, trommel-adapter, que pueden ser observadas en la Figura 9, las cuales deben ser analizadas cuidadosamente desde el punto de vista mecánico y operacional. Además, para cada componente retirado se define una estrategia específica de izaje, seleccionando adecuadamente los elementos de levante y su configuración de trabajo para asegurar resistencia y control durante la suspensión. De forma paralela, durante la ejecución de estas actividades en la zona de descarga, también se contempla la mantención de dos thrust pads ubicados en la zona de alimentación del molino, aunque su intervención aún se encuentra sujeta a evaluación, dado que existe la posibilidad de realizar esta mantención sin necesidad de un desmontaje completo.

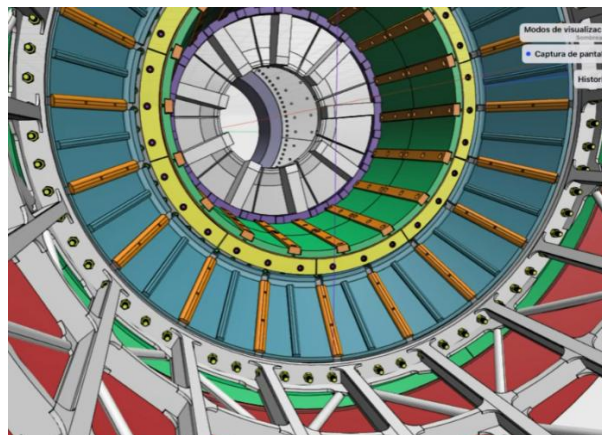


Figura 9: Uniones apernadas en componentes de descarga, Shapr3D.

1.7.2 Contextualización y alcances de la solución propuesta

Frente a este panorama, la solución propuesta del proyecto consiste en el diseño de una metodología estructurada e innovadora para ejecutar de manera efectiva la maniobra de cambio de trunnion de descarga en un molino SAG de Minera Los Pelambres, abordando de manera sistemática las etapas fundamentales del proceso, las cuales son: desmontaje, izaje y montaje del trunnion. El desarrollo de esta metodología se fundamenta en la incorporación de criterios de diseño mecánico, análisis estructural (FEM) y control operativo, con el objetivo de reducir riesgos asociados a fallas en maniobras realizadas anteriormente a lo largo del país, donde la ejecución incompleta de ciertos pasos ha derivado en incidentes operacionales y daños a componentes críticos del sistema. Cabe destacar que esta metodología específica se acota solo al tipo de trunnion mencionado en un molino SAG.

En la etapa previa al desmontaje, se propone el diseño e implementación de un dispositivo de extracción del trunnion basado en un sistema de accionamiento mediante cilindro hidráulico, el cual permite desacoplar de manera controlada el trunnion desde la tapa de descarga del molino SAG. Este proceso es sumamente crítico debido a la fuerte adherencia que existe entre ambos componentes, situación que a nivel histórico ha tenido gran dificultad para su retiro de manera segura. Además, a diferencia de procedimientos tradicionales, este dispositivo se diseña junto con sus dimensiones, mediante herramientas de modelación, evaluando sus propiedades geométricas, materiales y resistencia estructural, con el propósito de garantizar un correcto funcionamiento bajo las condiciones de carga presentes durante el desmontaje.

Posteriormente, sigue la etapa de izaje, en donde la metodología incorpora el diseño de componentes estructurales tipo triángulos, cuya función principal es distribuir adecuadamente las cargas generadas por el peso del trunnion durante su levantamiento. La implementación de estos elementos es clave, ya que permite evitar concentraciones de carga en los demás elementos de izaje, reduciendo de manera significativa el riesgo de fallas como el corte de estobos. Además, el uso de estos triángulos permite mantener una separación adecuada entre los elementos de izaje y las superficies críticas del trunnion, evitando interferencias mecánicas y daños por contacto, situaciones que han sido reportadas en operaciones similares, como en la División Chuquicamata, donde se generó el contacto trunnion-eslinga, generando el corte de eslingas. Es por esto que, los componentes son diseñados bajo criterios ingenieriles, seleccionando elementos que se encuentran certificados según su capacidad de carga, y que además son validados mediante análisis por elementos finitos (FEM), evaluando esfuerzos equivalentes de Von Mises y factores de seguridad, verificando la integridad estructural de las piezas.

Finalmente, en la etapa de montaje, la metodología aborda la problemática asociada al ingreso de pulpa en las uniones críticas del sistema, específicamente en las secciones trunnion-tapa y trunnion-adapter, lo que ha sido identificado como una de las principales causas de fallas prematuras por corte de pernos en Minera Los Pelambres. En este contexto, se plantea la selección adecuada de pernos y elementos de fijación, considerando condiciones de operación, resistencia mecánica y ambientes contaminantes. Se define también el torque de apriete óptimo para cada unión según fabricante de componente, asegurando la correcta precarga de los pernos y fijación de las superficies enflanchadas. Por otro lado, se propone la implementación de un sistema de monitoreo basado en resistencias incorporadas en el perno para reflejar cambios en él, en términos de tensión medida por equipos SPC4,

permitiendo realizar un seguimiento del estado de los pernos post-operación, y de este modo facilitar la detección temprana de fallas y la aplicación de estrategias de mantenimiento preventivo. En conjunto, esta metodología busca aumentar la confiabilidad operativa al igual que las otras etapas, garantizando seguridad en las maniobras y mayor vida útil en los componentes del molino SAG.

1.7.3 Metodología para el desarrollo de la solución

A continuación, se presentan las actividades que conllevan de manera cronológica al desarrollo de la solución propuesta.

Actividad 1: Diseño geométrico y selección de materiales del dispositivo de extracción de trunnion (OE1)

Esta actividad consiste en el desarrollo del diseño del dispositivo de extracción del trunnion mediante herramientas de modelación tridimensional, específicamente utilizando el software Shapr3D. En esta etapa se definen las dimensiones principales del dispositivo, tales como diámetros, longitudes y geometría estructural a través de mediciones realizadas en terreno, además se realiza la selección de materiales adecuados en función de sus propiedades mecánicas y resistencia frente a las condiciones de operación. El objetivo principal es obtener un diseño preliminar que garantice la capacidad del dispositivo para soportar las cargas asociadas al proceso de desmontaje, dejando así el sistema definido para su posterior validación estructural mediante análisis numérico.

Actividad 2: Análisis estructural mediante elementos finitos del dispositivo de extracción de trunnion (OE1)

Se realiza la validación estructural del dispositivo diseñado mediante el uso de Ansys Mechanical, aplicando el método de elementos finitos (FEM). Para ello, se definen previamente las cargas que actúan sobre el dispositivo para llegar a las condiciones de borde y restricciones del sistema, incluyendo la correcta fijación del modelo para representar de manera realista su comportamiento durante la operación. Luego, se procede a generar un mallado adecuado que permita obtener resultados precisos, haciendo ver los esfuerzos equivalentes de Von Mises y deformaciones. A partir de estos resultados, se determina el factor de seguridad del dispositivo de extracción, lo que permite verificar si el diseño cumple con los requisitos de resistencia establecidos o si es necesario realizar modificaciones.

Actividad 3: Diseño geométrico y definición de criterios estructurales de los componentes de izaje tipo triángulo (OE2)

La actividad contempla el diseño de los componentes estructurales de izaje, específicamente los triángulos utilizados para la distribución de cargas durante el levantamiento del trunnion. Se definen sus dimensiones, geometría y puntos de conexión con ayuda de mediciones tomadas en terreno y planos de fabricación correspondientes al muñón de descarga, teniendo como objetivo principal evitar excesos de carga en los elementos de izaje como estrobos, grilletes, tecles y también prevenir interferencias con zonas críticas del trunnion.

Actividad 4: Análisis estructural mediante elementos finitos de los componentes de izaje tipo triángulo (OE2)

En esta etapa se realiza la validación estructural de los triángulos diseñados mediante análisis FEM, evaluando su comportamiento bajo el peso del trunnion. Se definen las condiciones de borde, puntos de carga y restricciones del sistema, junto con la generación de un mallado adecuado que permita representar correctamente la distribución de esfuerzos. Finalmente, se analizan los esfuerzos de Von Mises, deformaciones y factores de seguridad, con el fin de asegurar que los componentes diseñados cumplen con los requisitos estructurales necesarios para operar de manera segura en el izaje.

Actividad 5: Selección de pernos y definición del torque de apriete en uniones críticas del trunnion (OE3)

El foco de esta actividad está en la selección técnica de los pernos y elementos de fijación para las uniones críticas trunnion-tapa y trunnion-adapter, considerando las condiciones asociadas al ingreso de pulpa y el impacto que tiene este problema en la integridad de las uniones. Se definen las características de los pernos, tales como material, dimensiones y tipo de rosca, también se seleccionan las golillas y elementos complementarios. Además, se define el torque de apriete adecuado para cada unión (catálogo) y se utilizan herramientas como cabezales hidráulicos disponibles en Minera Los Pelambres, con el fin de evitar fallas por aflojamiento o por corte de pernos durante la operación.

Actividad 6: Verificación del montaje y propuesta de monitoreo continuo de pernos post-operación (OE3)

Finalmente, la solución propuesta considera la implementación de procedimientos de control para verificar la correcta ejecución del montaje de las uniones apernadas, esto se realiza mediante el uso de técnicas como la inserción del feeler gauge entre las superficies enflanchadas, y así se termina de validar el contacto adecuado entre los flanges. En caso de que se detecten holguras en el procedimiento de verificación, se establecen criterios de rechazo y medidas correctivas. Se propone también instalar un sistema de monitoreo continuo que refleje los cambios en la tensión de los pernos, y ser medida mediante un sistema transductor. Luego, la Figura 10 muestra las actividades de manera secuencial.

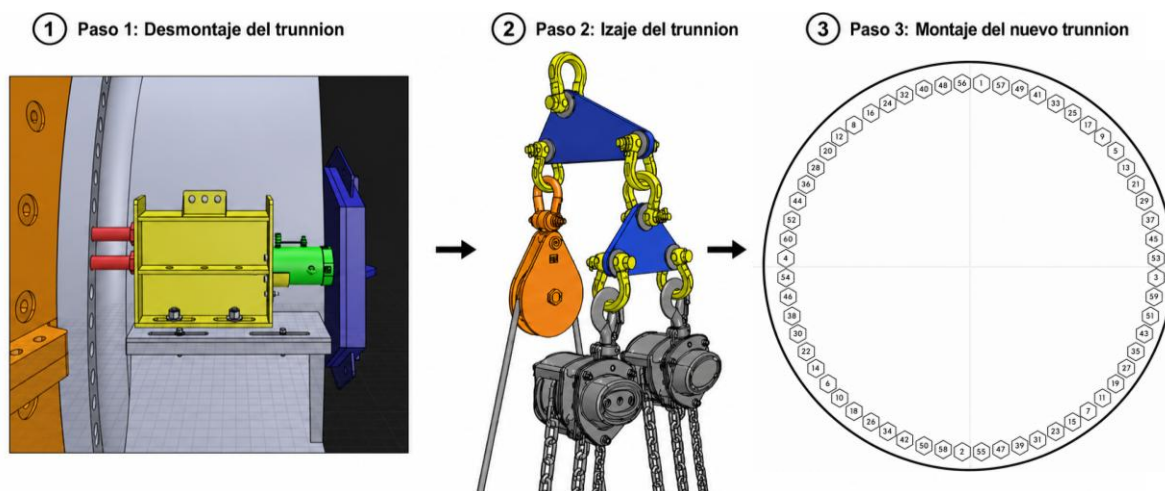


Figura 10: Esquema secuencial de las actividades para llevar a cabo la solución.

CAPÍTULO 2: Diseño y cálculo del dispositivo de retiro en el desmontaje del trunnion

2.1 Descripción general del sistema de retiro de trunnion

Antes de desarrollar los procedimientos brutos correspondientes al retiro del trunnion de descarga del molino SAG 02, es importante señalar que, para poner en contexto el capítulo, se considera el desmontaje hecho tanto del trunnion liner como del adapter de la zona de descarga. Bajo esta condición, el análisis se centra netamente en el trunnion de descarga y en los aspectos mecánicos y operacionales necesarios para ejecutar su desmontaje de manera efectiva, segura y controlada. Siguiendo el contexto, la maniobra parte con un levantamiento del molino lento y controlado, de muy baja altura, aproximadamente 5 mm, mediante el uso de dos gatos hidráulicos instalados por debajo del equipo. Estos gatos se apoyan sobre dos bloques de concreto, en donde, el propósito es que los pistones actúen directamente sobre las cunas de base recta ubicadas abajo del molino y así lograr el levantamiento requerido en la zona de descarga para despegar levemente el trunnion de los cuatro pads de apoyo.

El acople de las cunas a la sección inferior del molino se realiza mediante maniobras de izaje con estrobos que abrazan el arco inferior del shell, y se posicionan en el extremo correspondiente a la descarga del molino, antes de llegar a la tapa. El objetivo de esta operación es elevar sutilmente dicha sección del molino para facilitar el retiro posterior del trunnion. Notar que resulta importante considerar que, una vez extraído completamente el muñón, los gatos hidráulicos continuarán operando bajo el molino hasta que se haya instalado el nuevo componente, reemplazando de manera temporal la función estructural de apoyo que tiene el trunnion sobre el molino SAG. Por otro lado, de forma complementaria, y siguiendo la secuencia de desmontaje, también se requiere descender los cuatro pads sobre los cuales se apoya directamente el trunnion de descarga, con el fin de liberar aún más el componente y favorecer su extracción, considerando que, realizando estos procedimientos, el equipo permanece en su unión apernada con la tapa de descarga en todo momento.

Posteriormente, y previo al inicio del proceso de extracción del trunnion, se procede al retiro de los pernos de unión entre el flange del trunnion y la zona roscada de la tapa del shell, pero siempre es importante dejar una cantidad específica de pernos de seguridad dependiendo de cuantos pernos tenga la circunferencia completa. Este conjunto está compuesto por 96 pernos M64 grado 8.8 tipo SPC4, correspondientes a pernos inteligentes con sistema de monitoreo, distribuidos a lo largo de todo el perímetro de la unión. Importante notar que el retiro de estos pernos no implica un riesgo de desprendimiento del trunnion, ya que este permanece unido a la tapa mediante un ajuste por interferencia y además se encuentran los pernos de seguridad todavía. Por ende, esta etapa tiene como propósito preparar al componente para su posterior desmontaje mediante el sistema de retiro.

Se procede a dar el inicio oficial al sistema de extracción del trunnion de descarga del molino SAG 02, en donde, básicamente este mecanismo se basa en un empuje axial accionado por dos gatos hidráulicos, que transmiten una fuerza de tracción hacia la consola de retiro, permitiendo así su desplazamiento controlado en la dirección axial, puesto que esta consola está apernada directamente

al muñón de descarga, además de poseer dos pernos laterales a presión contra el trunnion, cuyo objetivo principal es minimizar los efectos de flexión que genera la tracción. Por otro lado, el gato hidráulico se apoya sobre una consola de empuje solidaria a dos pernos especiales de apoyo, esto hace que la reacción del sistema durante el accionamiento se transmita a estos dos pernos como una carga de compresión. Estos pernos, al poseer una longitud mayor respecto a los pernos convencionales de la sección enflanchada del trunnion, permiten el deslizamiento del componente sobre sus zonas lisas, facilitando el movimiento axial controlado, tal como se muestra en la Figura 11. Como se mencionó anteriormente, durante el comienzo del proceso de extracción, el trunnion permanece unido a la tapa del shell mediante un ajuste por interferencia, lo que minimiza el riesgo de caída del componente durante el inicio de la maniobra, pero implica un mayor esfuerzo por parte de los gatos hidráulicos.

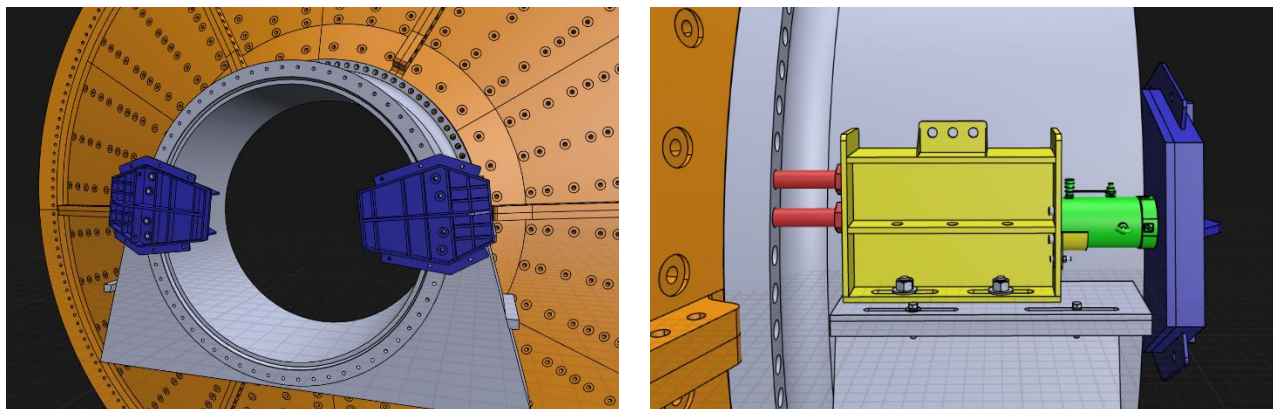


Figura 11: Sistema de extracción para trunnion de descarga SAG 02, Shapr3D.

Conforme el trunnion de descarga avanza en su desplazamiento axial, se alcanza una condición en la cual resulta operativamente seguro incorporar elementos de izaje directamente sobre este componente. En esta etapa, y siempre que se haya verificado la ausencia de interferencias mecánicas entre el trunnion y los elementos de izaje, se procede a la instalación de cáncamos giratorios, los que actúan como puntos ancla de sujeción para el sistema de levante. Se disponen de dos cáncamos roscados en la sección enflanchada del trunnion y dos cáncamos pasantes en la sección opuesta, obteniendo así una base de anclaje adecuada para la conexión del sistema completo de izaje. La incorporación de estos elementos permite compensar parte del peso del trunnion hacia el sistema de levante, reduciendo la carga que deben ejercer los gatos hidráulicos durante las etapas finales de la extracción. De esta manera, se logra una maniobra más controlada y segura, que facilita la transición desde el empuje axial hacia la etapa de izaje del trunnion de descarga mediante el puente grúa.

Para la ejecución del desmontaje, se seleccionan dos gatos hidráulicos Enerpac RC1006 cuyas capacidades máximas son de 100 ton (dispositivo verde en Figura 11), considerando el empuje del peso del trunnion de descarga, estimado en aproximadamente 42 toneladas, y además la resistencia adicional generada por el ajuste por interferencia que presenta el trunnion y la tapa del shell. Estos gatos hidráulicos son accionados por un sistema de presión mediante una bomba hidráulica manual que puede transmitir hasta 10.000 psi y además se puede observar uno de estos gatos Enerpac en la Figura 12. El sistema también incorpora cuatro pernos hexagonales ASTM A193 B7 de características M64, paso 6mm, largo 650 mm, y cumplen la función de mecanismo de apoyo y deslizamiento durante

el retiro axial del trunnion. Sin embargo, siguiendo los criterios de seguridad operacional, normativas aplicables y experiencias previas en este tipo de maniobras, se establece como condición de trabajo aproximadamente el 40% de la capacidad nominal del equipo hidráulico, es decir 40 ton de carga aplicada hacia la consola de retiro (4.000 psi), valor considerado suficiente para desarrollar la extracción de manera estable y controlada.



Figura 12: Gato hidráulico Enerpac RC1006 para el dispositivo de retiro.

2.2 Configuración geométrica de las consolas de retiro y empuje

Como se ha mencionado anteriormente, el dispositivo de extracción del trunnion de descarga se encuentra compuesto por dos componentes de suma relevancia dentro del sistema, que corresponden a la consola de retiro y la consola de empuje, los cuales tienen que cumplir estándares de diseño que no afecten al proceso operativo. La configuración geométrica de ambos elementos no solo debe transmitir adecuadamente las cargas hacia el trunnion durante la maniobra, sino también debe cumplir criterios de resistencia estructural, rigidez y estabilidad mecánica frente a las solicitaciones de tracción y compresión ejecutadas por el sistema hidráulico. A esto se le suma la necesidad de considerar un comportamiento resistente por parte de los pernos incorporados al conjunto, ya que estos forman parte esencial del mecanismo de fijación, guiado y apoyo del sistema, por lo que también se encuentran expuestos a esfuerzos relevantes durante la extracción. Del mismo modo, el diseño de estas consolas debe asegurar que su interacción con el trunnion no genere efectos no deseados sobre este componente, evitando inducir deformaciones, concentraciones de esfuerzo o sobrecargas que puedan afectar a la integridad geométrica del muñón durante su retiro.

Por lo tanto, el diseño de la consola de retiro, como se mencionó, tiene que cumplir un rol específico, el cual es resistir la fuerza de tracción transmitida por el cilindro hidráulico, cuya capacidad máxima corresponde a 100 toneladas, permitiendo así ejecutar el desplazamiento axial controlado del trunnion de descarga en una sola dirección. Esta condición de movimiento unidireccional se logra debido a que el desplazamiento en las direcciones restantes se encuentra restringido por la unión apernada que mantiene la consola con la sección roscada del muñón de descarga, la cual está conformada por cuatro pernos, los que corresponden a los mismos pernos de la unión trunnion-adapter, M42 x 135 mm. Además, el diseño también incorpora dos pernos laterales M64 x 250 mm, que tienen por función

generar presión de contacto contra el trunnion para mantener fija la consola a este componente durante el desplazamiento controlado que se requiere en el desmontaje. Luego, estas zonas críticas de fijación junto con el diseño geométrico de la consola de retiro se pueden apreciar en la Figura 13.

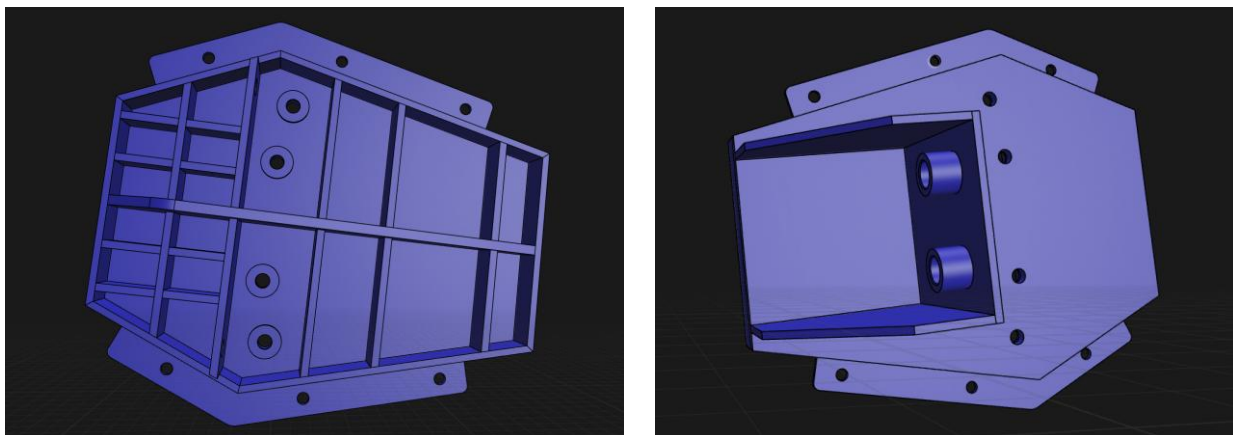


Figura 13: Consola de retiro acoplada a trunnion de descarga, Shapr3D.

Por otro lado, la consola de empuje ha sido diseñada específicamente para resistir la carga de compresión generada por el gato hidráulico durante la maniobra de extracción, la cual se define en términos de carga para la operación en torno a 40 toneladas, de acuerdo con experiencias previas realizadas en este tipo de maniobras, para realizar una operación segura y para no dañar los componentes fabricados. En este caso, el diseño del componente no puede analizarse de forma aislada, ya que el comportamiento estructural en este proceso depende directamente de la interacción que se tiene con los dos pernos largos seleccionados, los cuales cumplen simultáneamente la función de apoyo y deslizamiento del trunnion. Por lo tanto, para representar de manera adecuada las condiciones reales de trabajo en el posterior análisis por elementos finitos, se considera la base de apoyo de dichos pernos y la superficie sobre la cual descansa la consola de empuje como parte de las fijaciones completas del modelo, abordando así el problema con el conjunto consola de empuje-pernos largos fabricados como una sola unidad mecánica, tal como se observa en la Figura 14.

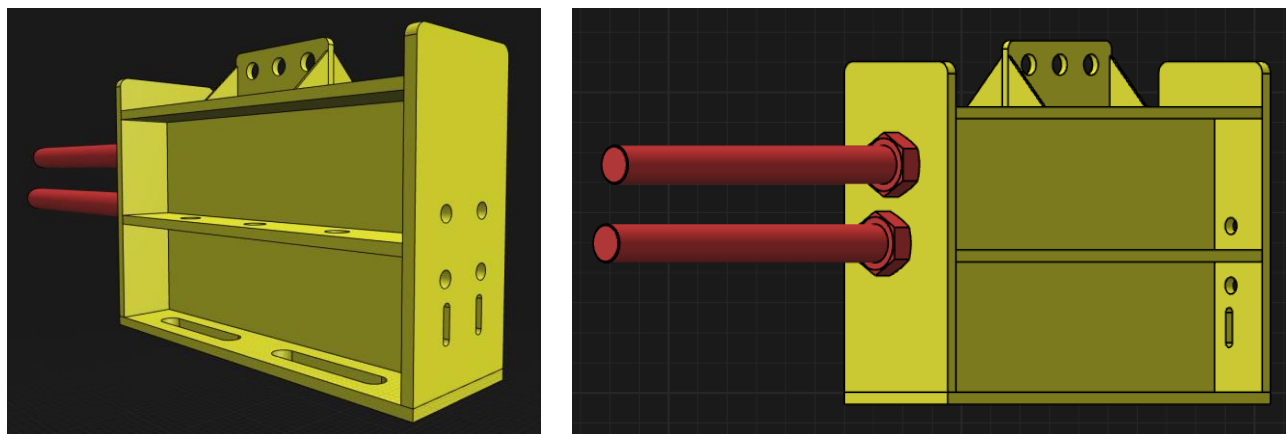


Figura 14: Consola de empuje acoplada a perno M64 x 650 mm, Shapr3D.

Finalmente, para comprender de mejor manera el funcionamiento de las cargas actuantes del sistema de extracción, se ha elaborado un esquema general que se presenta en la Figura 15, en el que se identifican las cargas principales de tracción y compresión que actúan sobre ambas consolas, así como también las restricciones y apoyos necesarios para representar correctamente el problema físico en el análisis por elementos finitos. Este esquema es fundamental para definir de manera consistente las condiciones de borde del modelo numérico y describir claramente el comportamiento mecánico que se espera durante el procedimiento en terreno de la extracción del trunnion de descarga del molino SAG.

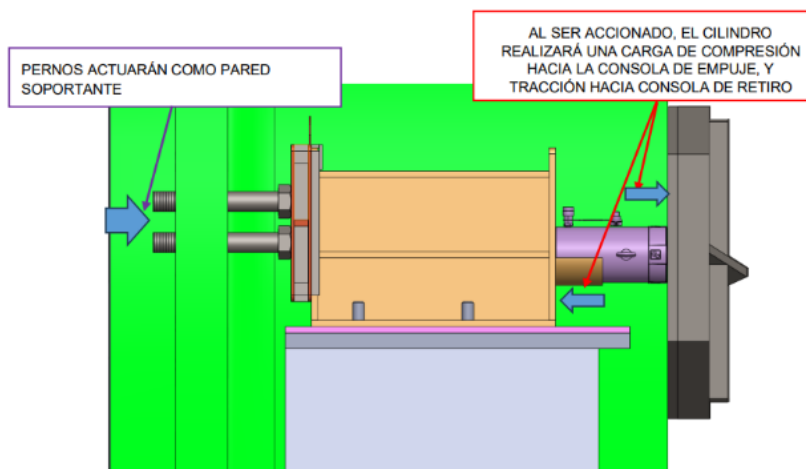


Figura 15: Esquema de cargas aplicadas a las consolas y apoyo del sistema.

2.3 Selección de materiales y propiedades mecánicas

Tanto para la consola de retiro como para la consola de empuje del sistema de extracción del trunnion de descarga, se selecciona un acero estructural con propiedades mecánicas superiores a las de aceros de uso convencional, debido a la criticidad que presenta esta etapa dentro de la maniobra completa de cambio de trunnion. Durante el proceso de extracción se deben resistir las cargas principales asociadas al accionamiento hidráulico, pero no tan solo estas fuerzas de tracción y compresión, puesto que también se debe evitar que, se generen otro tipo de sollicitaciones que comprometan el ensamble apernado del sistema tales como momentos flectores en la misma consola, y de esta forma desplacen al material fuera de su rango elástico de trabajo.

Es fundamental ponerse en este tipo de escenarios en el proceso de retiro del trunnion, ya que se tienen como antecedentes principales por parte de Minera Los Pelambres que el muñón no ha sido desplegado de su interferencia con la tapa del shell para hacerle algún tipo de mantención hace más de 10 años, lo cual implica una causa suficiente para no tener la certeza si es que la presión de diseño que se define para los cilindros hidráulicos, son suficientemente necesarias para efectuar la operación de extracción. Por esta razón, resulta técnicamente conveniente optar por un material con buena capacidad resistente, ya que una falla en esta etapa puede comprometer directamente la continuidad del procedimiento de desmontaje y generar riesgos operacionales antes de iniciar la maniobra de izaje.

Bajo estas condiciones, el material seleccionado para ambas consolas corresponde al acero ASTM A572 Gr. 50.

Luego, la selección de este tipo de acero debe representar de manera realista su comportamiento en el análisis estructural posterior mediante elementos finitos, por lo cual es fundamental contar con un registro adecuado de sus propiedades mecánicas, especialmente de aquellas que se involucran directamente en la respuesta resistente del material bajo carga traccionada y compresiva, siendo el límite de fluencia una de las magnitudes más relevantes al momento de evaluar si las consolas resisten o no las solicitaciones generadas, junto con el esfuerzo máximo equivalente de Von Mises proveniente de la simulación por elementos finitos en Mechanical. Así, las propiedades mecánicas consideradas para el acero ASTM A572 Gr. 50 se presentan en la Tabla 1 según recomendaciones técnicas de [8].

Tabla 1: Propiedades mecánicas del material de la consola de retiro y empuje.

Propiedades mecánicas	
Tipo de acero	Acero ASTM A572 Gr. 50
Límite de fluencia [MPa]	345
Resistencia última de tracción [MPa]	450
Módulo de Young [GPa]	205,7
Módulo cortante [GPa]	80
Módulo volumétrico [GPa]	160
Coefficiente de Poisson	0,286
Densidad [kg/m ³]	7.800

Luego, las propiedades mecánicas del acero ASTM A572 Gr. 50 recopiladas en la Tabla 1, se ingresan directamente en el software Ansys Workbench. Para esto, se tiene que acceder al apartado Engineering Data, ubicado dentro del módulo de análisis Static Structural 3D, que corresponde al criterio de simulación escogido para evaluar estructuralmente las consolas de retiro y empuje. En esta sección se definen las propiedades del material con sus unidades correspondientes, principalmente en GPa, MPa y kg/m³, según el tipo de parámetro ingresado, como se observa en la Figura 16.

Cabe destacar que, dentro de la opción Isotropic Elasticity del módulo Engineering Data, se pueden ingresar el módulo de Young y el coeficiente de Poisson propios del material definido, y el software calcula automáticamente las propiedades elásticas complementarias asociadas al comportamiento isotrópico del material, las cuales corresponden al módulo volumétrico (Bulk Modulus) y al módulo cortante (Shear Modulus). Luego, se observa en la Figura 16 que los módulos obtenidos por el programa coinciden con los registrados de la tabla anterior según la fuente técnica [8], lo que logra verificar la consistencia que tienen estas propiedades mecánicas al ser ingresadas al modelo Ansys.

Por otro lado, para la definición de las propiedades resistentes del material, se asignan a los parámetros Compressive Yield Strength y Compressive Ultimate Strength, los mismos valores en magnitud que las variables Tensile Yield Strength y Tensile Ultimate Strength, respectivamente. Esta decisión se justifica con el hecho de representar de manera adecuada el comportamiento de resistencia estructural frente a las solicitaciones presentes en la simulación, especialmente en escenarios donde hay presencia

de esfuerzos de compresión, como ocurre en el caso de la consola de empuje y los pernos fabricados de apoyo. De esta forma, se mantiene definido correctamente el material dentro del análisis estructural, evaluando así con mayor realismo la respuesta del dispositivo bajo las condiciones de carga impuestas en el accionamiento del sistema de retiro del trunnion del lado de descarga.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7800	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus an...			
8	Young's Modulus	205,7	GPa		
9	Poisson's Ratio	0,286			
10	Bulk Modulus	1,602E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,997E+10	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
20	S-N Curve	Tabular			
24	Tensile Yield Strength	345	MPa		
25	Compressive Yield Strength	345	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	450	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	450	MPa		

Figura 16: Propiedades mecánicas de las consolas de retiro y empuje, Ansys Workbench.

Con el propósito de representar una simulación aún más realista en términos de resistencia a las fuerzas involucradas en el accionamiento del sistema, también se definen las propiedades mecánicas de los pernos hexagonales de apoyo M64 x 650 mm, fabricados en acero ASTM A193 Gr. B7. La incorporación de este material en el modelo resulta sumamente relevante, ya que dichos pernos forman parte crítica del mecanismo resistente del sistema de extracción y, por lo tanto, su comportamiento mecánico influye directamente en la respuesta global de todo el conjunto. En ese contexto, la Tabla 2 recopila las propiedades mecánicas del acero ASTM A193 Gr. B7, manteniendo la misma estructura y lista de variables utilizadas para el material anterior, con el fin de ser consistente en la definición de materiales dentro del software. Además, es importante notar que, las propiedades se obtienen a partir de información técnica proveniente de las fuentes [9] y [10], donde la primera fuente corresponde al límite de fluencia y resistencia última de tracción según el diámetro nominal del perno, mientras que, la segunda fuente entrega propiedades directas del material en sí, tales como módulo de Young.

Tabla 2: Propiedades mecánicas del material de los pernos M64 x 650.

Propiedades mecánicas	
Tipo de acero	Acero ASTM A193 Gr. B7
Límite de fluencia [MPa]	655
Resistencia última de tracción [MPa]	793
Módulo de Young [GPa]	205
Módulo cortante [GPa]	80
Módulo volumétrico [GPa]	140
Coeficiente de Poisson	0,29
Densidad [kg/m ³]	7.850

A continuación, estas propiedades mecánicas se ingresan de manera análoga en Ansys Workbench (Figura 17), con el objetivo de ser asignadas al diseño de los pernos hexagonales de apoyo dentro de las simulaciones desarrolladas en Ansys Mechanical. Para ello, es necesario crear un nuevo material dentro del apartado Engineering Data, correspondiente específicamente al acero ASTM A193 Gr. B7, ya que este no formaba parte del banco de materiales previamente definido para las consolas del sistema. De esta manera, el software puede diferenciar correctamente las propiedades resistentes y elásticas asociadas a los pernos de apoyo respecto de las propiedades del acero ASTM A572 Gr. 50 utilizado en las demás piezas del dispositivo, siempre que una vez ingresado a Mechanical, se separen y se definan correctamente las propiedades mecánicas de cada material a cada diseño, en este caso a la consola de empuje y los pernos hexagonales de apoyo.

También es importante afirmar que la diferencia presente entre el valor de Bulk Modulus reportado directamente en la fuente [10] y el valor calculado automáticamente por Ansys Workbench no se encuentra asociada a las propiedades de resistencia del material, tales como el Tensile Yield Strength o el Compressive Yield Strength, ya que por ecuación estas no intervienen en el cálculo. En este caso, el valor de Bulk Modulus obtenido a través de Ansys, se encuentra cercano a los 162 GPa, lo que entrega indicios directos de que se trata de la combinación entre E y ν pertenecientes al acero ASTM A193 Gr. B7, mientras que, el valor de 140 GPa indicado en las fuentes de ayuda, corresponde probablemente a un parámetro tabulado de carácter general, redondeado o determinado bajo otro criterio de caracterización del material. En consecuencia, la diferencia entre estos valores no representa un error del software, sino una discrepancia entre fuentes de propiedades elásticas, siendo finalmente el valor calculado por Ansys el que se considera coherente para efecto de cálculos y resultados obtenidos en la simulación. Así, al igual que el caso anterior, se ingresan las unidades de medidas de esfuerzos correspondiente a cada propiedad, junto con el ingreso de los parámetros Compressive Yield y Ultimate a partir de Tensile (tracción), y luego estos arreglos se pueden ver en la Figura 17.

Properties of Outline Row 3: Acero ASTM A193 Gr. B7				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus an...		
8	Young's Modulus	205	GPa	
9	Poisson's Ratio	0,29		
10	Bulk Modulus	1,627E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,9457E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	655	MPa	
25	Compressive Yield Strength	655	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	793	MPa	
27	Compressive Ultimate Strength	793	MPa	

Figura 17: Propiedades mecánicas de los pernos largos M64 x 650 mm, Ansys Workbench.

2.4 Normativa y requerimientos de diseño estructural

Los requerimientos de diseño estructural asociados al dispositivo de retiro del trunnion de descarga establecen por condiciones del cliente, en este caso Minera Los Pelambres, que tanto las consolas de retiro y empuje como los pernos hexagonales de apoyo deben trabajar bajo un criterio de esfuerzo admisible equivalente al 60% del esfuerzo de fluencia del material, es decir, la carga aplicada a las consolas y pernos no puede exceder este esfuerzo admisible, del caso contrario, por normativas de MLP se daría de baja el diseño planteado para el dispositivo de extracción. Considerando que el material de las consolas corresponde al acero ASTM A572 Gr. 50, como este material presenta un límite de fluencia inferior al del material seleccionado para los pernos, se opta por mantener este acero como referencia controlante para definir el criterio de diseño mencionado del conjunto. De esta forma, el esfuerzo admisible queda definido como:

$$\sigma_{adm} = 0,6 \cdot \sigma_y = 0,6 \cdot 345 = 207 \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Es importante señalar que este enfoque descrito por parte de Minera Los Pelambres se basa en el diseño Allowable Strength Design (ASD), contenido en la norma ANSI/AISC 360-22. Según la norma ANSI/AISC 360-22 [11], la verificación estructural de aceros fabricados se satisface cuando la resistencia disponible del componente (admisible) resulta mayor o igual que la resistencia requerida (accionada). Luego, para obtener la resistencia disponible, o bien, el valor que resulta de “ $0,6 \cdot \sigma_y$ ”, el enfoque ASD de AISC divide la resistencia límite por un factor de seguridad Ω . En términos prácticos, para límites de fluencia asociados al acero, se utiliza comúnmente $\Omega = 1,67$, por lo que la resistencia admisible resulta $\sigma_y/1,67 \approx 0,6 \cdot \sigma_y$.

2.5 Modelación del problema mediante elementos finitos (FEM)

2.5.1 Mallado y condiciones de simulación

Para llevar a cabo el análisis estructural de la consola de retiro, se genera un mallado adecuado que represente de manera consistente la respuesta mecánica del componente, en términos de esfuerzos, frente a las cargas de tracción ejercidas durante la operación de extracción. En esta fase, se busca discretizar y refinar el modelo, de manera de capturar con mayor precisión la distribución, concentración de esfuerzos y deformaciones en las zonas de interés. En primer lugar, se aplica el comando de Body Sizing sobre el cuerpo completo del dispositivo de retiro, con el objetivo de homogenizar el tamaño general de los elementos y establecer una línea base de mallado en toda la geometría. Posteriormente, se inserta un Edge Sizing en las regiones críticas del modelo, especialmente en los bordes de los orificios de las uniones apernadas (fijaciones completas), donde se espera una mayor concentración de esfuerzos producto de la carga de tracción, conllevando así a un refinamiento local que mejore la calidad de los resultados en estas secciones específicas. Finalmente, se define un Face Sizing sobre la cara principal del componente, correspondiente a la superficie donde actúa de manera directa la carga transmitida por el sistema hidráulico, con el fin de capturar con mayor detalle toda esta zona afectada.

Por otra parte, para la generación de la malla se define un estilo específico dentro de la opción Methods en Mesh, correspondiente al mallado tetraédrico, debido a la facilidad que brinda el método para adaptarse a la geometría irregular que presenta el dispositivo de retiro. Como resultado de este procedimiento se obtiene el mallado final ilustrado en la Figura 18, el cual forma parte de la base numérica para el análisis posterior mediante elementos finitos.

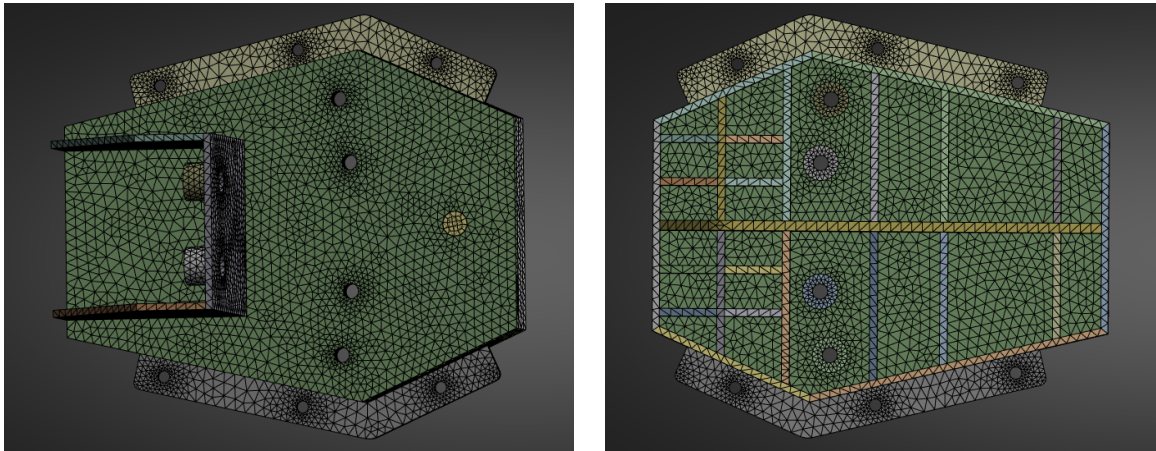


Figura 18: Mallado tetraédrico de la consola de retiro, Ansys Mechanical.

En el caso de la consola de empuje del dispositivo de extracción, una vez definidas las propiedades mecánicas correspondientes tanto para la estructura principal como para los pernos de apoyo, se procede a generar el mallado del conjunto completo. Para ello, se insertan dos funciones de Body Sizing, la primera aplicada al cuerpo total del modelo, con el objetivo de establecer una base general de discretización homogénea en toda la estructura, y la segunda orientada específicamente al cuerpo que recibe de forma directa la carga de compresión ejercida por el gato hidráulico, ya que esta sección corresponde a la de mayor interés en términos de resistencia estructural. Adicionalmente, se ingresa un Edge Sizing en los bordes de las ranuras ubicadas en la base de la consola, tanto para la zona superior como inferior de la base, debido a que en estas secciones se localizan los pernos de anclaje que mantienen fija la estructura frente a la carga aplicada, pudiendo generarse concentraciones de esfuerzo, lo cual requiere un refinado especial. Finalmente, agrupando todas estas condiciones, se obtiene un mallado tetraédrico del conjunto, tal como se muestra en la Figura 19.

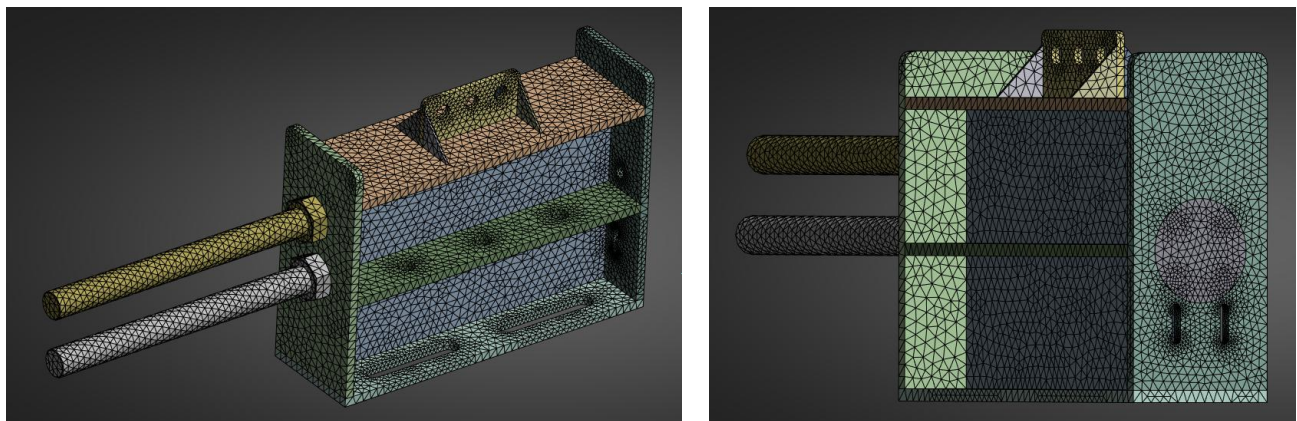


Figura 19: Mallado tetraédrico de la consola de empuje, Ansys Mechanical.

A continuación, se presenta la Tabla 3, en la cual se resumen de manera estructurada los parámetros más relevantes considerados en el mallado de ambas consolas del dispositivo de extracción. Entre estos se incluyen principalmente el tipo de sizing aplicado, la ubicación específica donde se define cada refinamiento, el tamaño de elemento escogido en cada caso y el método de mallado utilizado, y esto con el propósito de dejar claramente establecidos los criterios que se emplean para la discretización geométrica de las consolas de retiro y empuje.

Tabla 3: Resumen de los parámetros de mallado utilizados en las consolas de retiro y empuje.

Tipo de consola	Sizing	Ubicación	Tamaño de elemento [mm]	Method
Consola de retiro	Body sizing	Cuerpo completo	30	Tetraédrico
Consola de retiro	Edge sizing	Unión apernada	20	Tetraédrico
Consola de retiro	Face sizing	Cara traccionada	25	Tetraédrico
Consola de empuje	Body sizing	Cuerpo completo	20	Tetraédrico
Consola de empuje	Edge sizing	Ranura basal	10	Tetraédrico
Consola de empuje	Body sizing	Cuerpo comprimido	15	Tetraédrico

2.5.2 Condiciones de borde y restricciones del sistema

Para definir las condiciones de borde asociadas al accionamiento hidráulico en la consola de retiro, se considera que el diámetro del pistón del gato hidráulico es de 71,16 mm, tal como se muestra en la Figura 20 extraída de Shapr3D. A partir de este valor, la fuerza de tracción ejercida sobre la consola de retiro puede expresarse como una presión equivalente (carga distribuida), utilizando el área transversal del pistón, que se determina mediante la ecuación del área de una sección circular que se expone a continuación.

$$A_{pi} = \frac{\pi \cdot D_{pi}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 71,16^2}{4} = 3.977,06 [mm^2] \quad (2)$$

Luego, mediante la relación entre fuerza y área definidas, se determina la presión que el cilindro del gato hidráulico ejerce sobre la consola de retiro, que puede interpretarse como la presión de contacto, o bien como la sollicitación superficial aplicada por el pistón sobre el componente. Para este cálculo se considera la carga operacional de 40 toneladas, la cual debe expresarse previamente en unidades de Newton, utilizando una masa de 40.000 kg y la aceleración de gravedad de 9,81 m/s². Al relacionar dicha fuerza con el área transversal del pistón, expresada en mm², se obtiene la presión resultante en MPa, magnitud que posteriormente se utiliza en las condiciones de borde en la simulación estructural.

$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A_{pi}} = \frac{392.400}{3.977,06} = 98,67 [MPa] \quad (3)$$

De esta forma, la carga se ingresa en Ansys Mechanical mediante la función Pressure, seleccionando como parámetro geométrico la cara (Face) principal afectada, de modo que la sollicitación quede aplicada sobre la sección circular correspondiente al contacto del pistón y represente adecuadamente la tracción transmitida por el gato hidráulico hacia la consola. Además, la Figura 20 muestra el diámetro del pistón del gato a partir del modelo elaborado en Shapr3D, utilizado como apoyo geométrico para esta definición de carga.

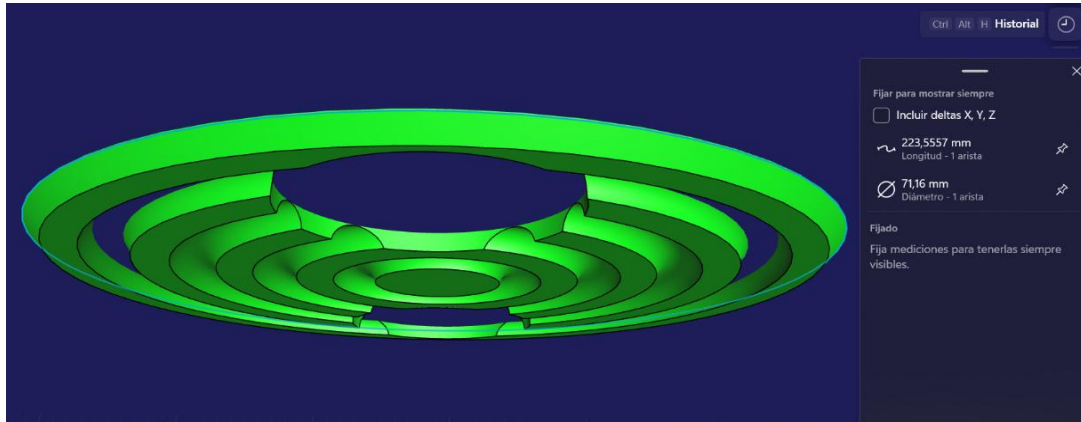


Figura 20: Diámetro del pistón del gato hidráulico RC1006 para extracción de trunnion, Shapr3D.

Para destacar los aspectos más relevantes de esta sección, se presenta la Figura 21, en la cual se ilustran las condiciones de borde definidas para la consola de retiro. Tal como se ha indicado previamente, una de las condiciones principales corresponde a la aplicación de la opción Fixed Support, cuyo propósito es fijar completamente el dispositivo, o bien representar el anclaje del componente frente a la carga de tracción aplicada durante la extracción. Para ello, las caras seleccionadas como superficie de fijación corresponden a las superficies cilíndricas internas de los orificios asociados a las uniones apernadas de la consola. Por otro lado, la condición de borde más crítica del análisis corresponde a la tracción ejercida por el gato hidráulico, la cual se aplica sobre la cara circular de contacto previamente mencionada. Esta carga se proyecta mediante 20 pasos de carga definidos en Analysis Settings, con el objetivo de representar de manera más gradual y realista el accionamiento del sistema hidráulico, simulando así una aplicación progresiva de la fuerza durante la operación de extracción.

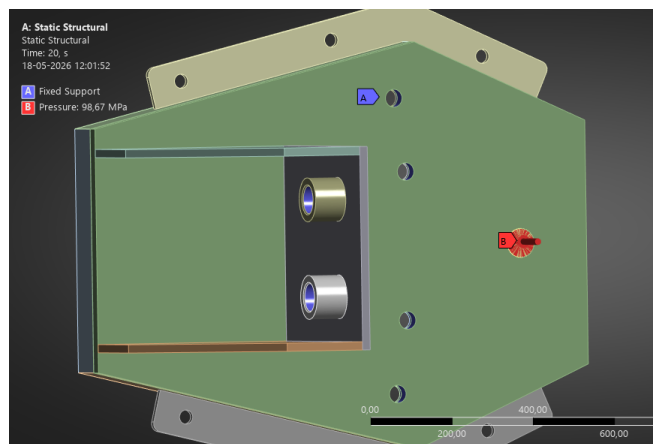


Figura 21: Condiciones de borde asociadas a la consola de retiro, Ansys Mechanical.

Se finaliza la definición de las condiciones de borde asociadas a la consola de retiro, en donde, siguiendo un criterio análogo al utilizado recientemente, se determinan las condiciones para la consola de empuje. Como primer paso, se obtiene el área de contacto sobre la cual se aplica la carga de compresión transmitida por el gato hidráulico hacia la consola, por lo que, es necesario conocer el diámetro de la base de apoyo del cilindro. De acuerdo con la Figura 22, obtenida a partir del modelo desarrollado en Shapr3D, este diámetro corresponde a 170,561 mm, entonces el área circular se define mediante la ecuación presentada a continuación y, posteriormente, se define la presión equivalente de compresión que será aplicada en la simulación FEM.

$$A_b = \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} = \frac{\pi \cdot 170,561^2}{4} = 22.848,06 [mm^2] \quad (4)$$

Obtenida el área transversal del cilindro hidráulico Enerpac, y conociendo además la fuerza de compresión ejercida por el gato, correspondiente a 392.400 N, se procede a calcular la presión equivalente de compresión aplicada directamente sobre la consola de empuje mediante la expresión que se presenta a continuación, en unidades de MPa.

$$\sigma_{cp} = \frac{F_{cp}}{A_b} = \frac{392.400}{22.848,06} = 17,17 [MPa] \quad (5)$$

El valor obtenido de 17,17 MPa representa la acción del sistema hidráulico como una carga distribuida sobre la superficie de contacto definida previamente en el modelo desarrollado en Shapr3D, el cual se muestra en la Figura 22. Esta magnitud se utiliza posteriormente como condición de borde en la simulación estructural realizada en Ansys Mechanical, pudiendo representar de manera más realista la compresión transmitida por el cilindro hacia la consola de empuje. Además, en la misma imagen se observa el diámetro del cilindro medido directamente con funciones de la aplicación, con el propósito de trabajar con dimensiones precisas y así establecer la menor diferencia posible entre el modelo numérico y la condición real de operación.

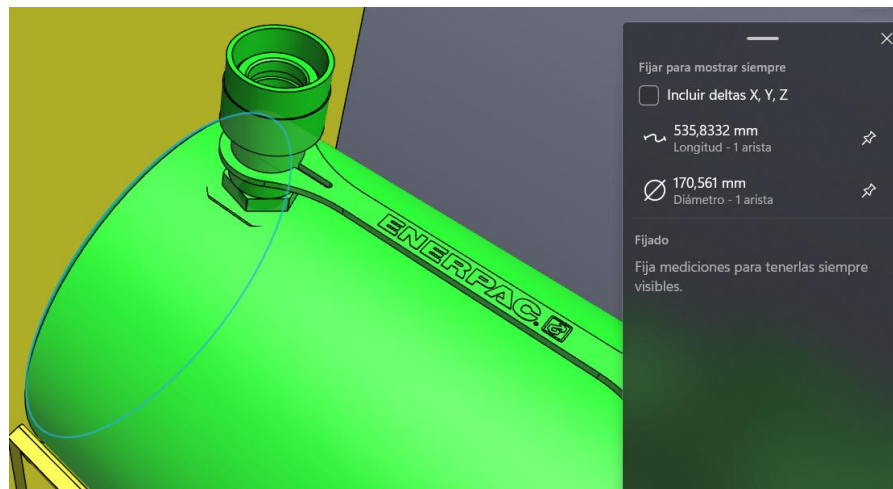


Figura 22: Diámetro basal del gato hidráulico RC1006 para el retiro del trunnion, Shapr3D.

Definida la carga principal como objetivo de simulación, se procede a establecer las condiciones de borde del modelo dentro de la sección Static Structural. En esta etapa, por un lado, se incorpora la carga mediante la función Pressure, aplicada en el sentido negativo del eje X, con la finalidad de representar la compresión ejercida por el sistema hidráulico sobre la consola de empuje. Esta presión se asigna sobre la cara previamente generada en SpaceClaim, para que la carga se distribuya sobre la “Face” completa y represente adecuadamente la distribución de esfuerzos. Por otro lado, se inserta la condición Fixed Support sobre dos zonas críticas de la estructura, la primera corresponde a la base de la consola de empuje, donde se ubican los pernos de anclaje asociados a la ranura basal, y la segunda corresponde a la base de los pernos M64 x 650 mm, los cuales actúan como apoyo directo frente a la compresión ejercida por el gato y transmitida hacia la consola. De este modo, ambas condiciones de borde permiten representar de manera coherente el comportamiento mecánico del sistema durante la operación, y su disposición dentro del modelo se muestra claramente en la Figura 23.

De manera adicional, dentro de la misma sección Static Structural, en la opción Analysis Settings, se definen, al igual que en el modelo anterior, un total de 20 pasos de carga (substeps), con el propósito de proyectar la condición de Pressure de forma progresiva sobre el sistema. Este criterio simula la aplicación gradual de la carga, reproduciendo de mejor manera el comportamiento real del accionamiento hidráulico y favoreciendo a una respuesta numérica confiable. Así, se obtienen resultados más consistentes y acertados en términos de deformaciones, esfuerzos equivalentes de Von Mises y, por consiguiente, en la evaluación del factor de seguridad.

En conjunto, para este modelo se definen solo estos tres parámetros, correspondientes a la presión de compresión aplicada sobre la cara de contacto, las fijaciones principales del sistema y los pasos agregados como se muestra en la Figura 23. De manera análoga al caso de la consola de retiro, no se considera la incorporación de la condición Standard Earth Gravity, ya que en este análisis el foco no se encuentra en las solicitaciones ejercidas en la dirección Y, sino en la respuesta estructural del sistema frente a la compresión aplicada en la dirección X. Entonces, bajo la condición de carga definida, como la gravedad no genera un aporte relevante en la dirección principal de análisis ni introduce reacciones significativas que interfieran en ella, su exclusión no afecta de manera representativa en los resultados que se obtienen de la simulación.

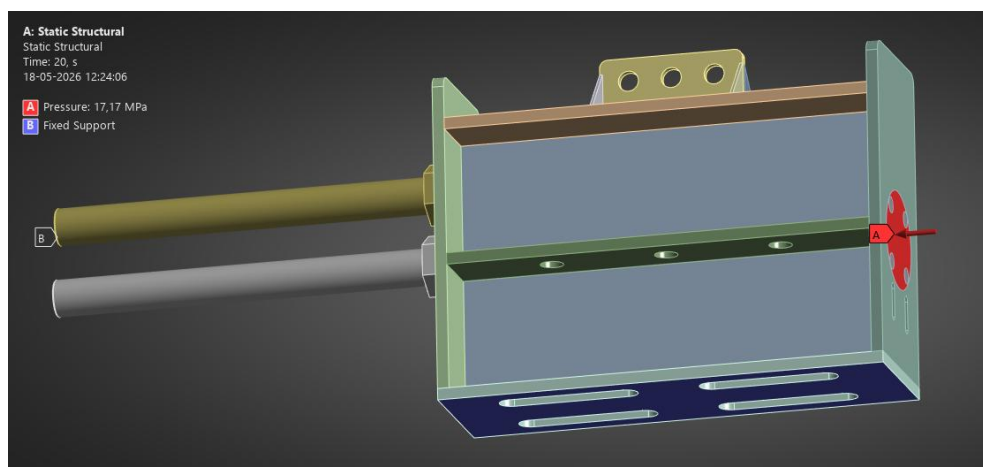


Figura 23: Condiciones de borde asociadas a la consola de empuje, Ansys Mechanical.

2.5.3 Resultados FEM: deformaciones, esfuerzos de Von Mises y factor de seguridad

Los resultados obtenidos a partir de la simulación por elementos finitos se orientan principalmente al análisis de las deformaciones y de los esfuerzos equivalentes desarrollados en la consola de retiro una vez accionado el sistema hidráulico de extracción. En primer lugar, la Figura 24 muestra la distribución de deformaciones de la consola de retiro bajo las condiciones de carga y restricciones definidas previamente. A partir de esta simulación, se registra una deformación máxima de magnitud 1,546 mm, ubicada en uno de los extremos de la consola, en donde no hay presencia de uniones apernadas. Viéndolo desde el ámbito operacional, esta magnitud no se considera crítica para la maniobra de extracción, ya que no intercede en la estabilidad del sistema ni genera interferencias mecánicas relevantes durante el desplazamiento axial del trunnion. En consecuencia, el nivel de deformación obtenido en la simulación se considera aceptable para las condiciones de trabajo analizadas.

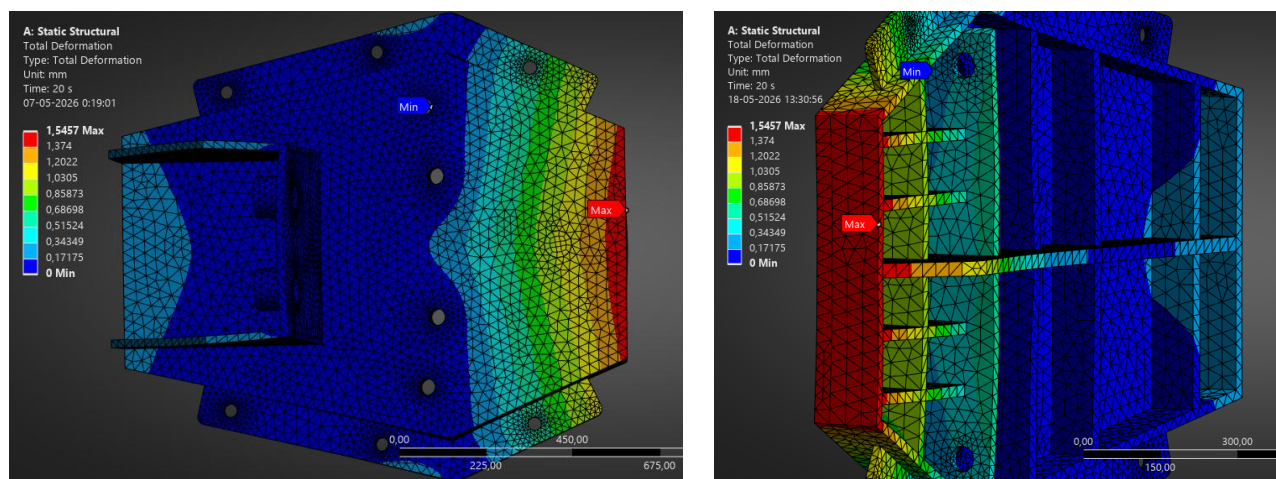


Figura 24: Deformaciones presentes en la consola de retiro, Ansys Mechanical.

Luego, tal como se observa en la Figura 25, el esfuerzo equivalente máximo de Von Mises que se obtiene en la simulación corresponde a un valor cercano a 681 MPa, localizándose principalmente en una de las zonas que corresponde a los orificios de la unión apernada para pernos M64. Ahora bien, la interpretación de este resultado debe realizarse con cautela, ya que este valor máximo por sí solo no representa necesariamente el comportamiento global del componente. Analizando la distribución de esfuerzos mostrada en la figura, se aprecia que las regiones sometidas a esfuerzos elevados son mínimas, mientras que en la mayor parte de la estructura predominan rangos de esfuerzo del orden de 0 a 200 MPa, valores que se mantienen cercanos o por debajo del esfuerzo admisible definido para el diseño.

Bajo esta situación, es necesario complementar la evaluación del máximo esfuerzo con un criterio adicional que permita cuantificar qué fracción real de la consola se encuentra efectivamente expuesta a esfuerzos superiores al valor de 200 MPa. Luego, el fin de este criterio es que logre interpretar con mayor fundamento la validez estructural del diseño, ya que una superación en magnitud del esfuerzo admisible en regiones puntuales, tal como en los bordes de agujeros o discontinuidades geométricas,

no necesariamente implica una falla global de la consola de retiro, especialmente si el resto del cuerpo trabaja dentro de un rango aceptable.

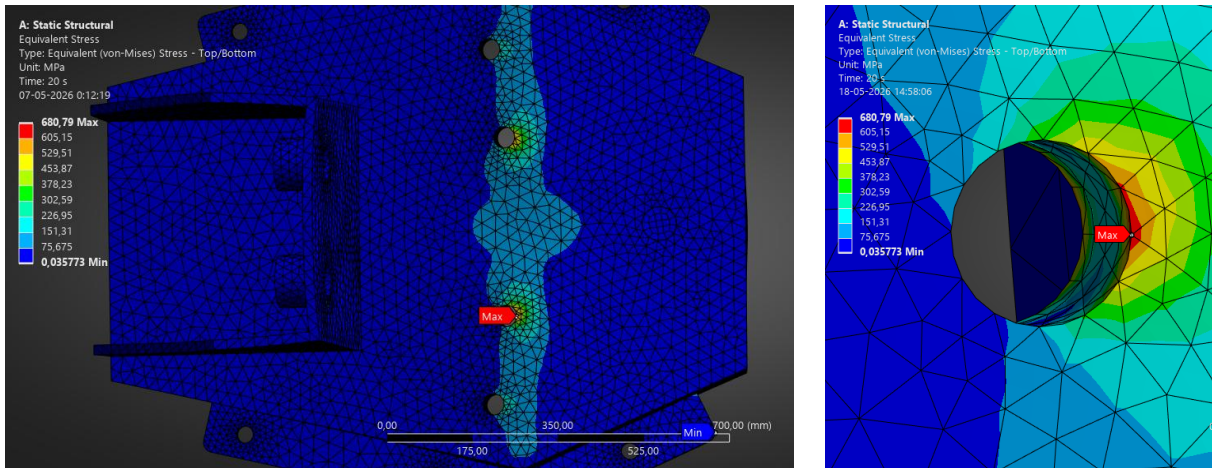


Figura 25: Esfuerzos equivalentes de Von Mises de la consola de retiro, Ansys Mechanical.

Por lo tanto, con el propósito de cuantificar el comportamiento real de la consola de retiro y confirmar si la presencia de esfuerzos superiores al valor admisible corresponde efectivamente a una condición poco representativa dentro del sistema, se recurre al uso de un comando APDL (Ansys Parametric Design Language), lenguaje interno del software Ansys que ejecuta instrucciones específicas para el procesamiento de datos y evaluación de resultados numéricos. Para el caso, el comando se inserta dentro del apartado Solution, mediante la herramienta Commands, y su función consiste en recorrer el conjunto total de elementos generados en la malla del modelo para identificar cuántos de ellos se encuentran sometidos a esfuerzos equivalentes de Von Mises superiores a 200 MPa, tal como se ilustra en la Figura 26. A partir de esta búsqueda, el programa entrega dicho resultado en forma de porcentaje respecto del total de elementos de la estructura, verificando así de manera objetiva si las zonas de altos esfuerzos se encuentran en una fracción baja del dispositivo. Considerando el criterio, cuando estos esfuerzos elevados se concentran en un porcentaje muy bajo de la estructura global (bajo 1%), su incidencia puede considerarse insignificante frente al comportamiento general del componente, obteniendo así una interpretación más realista del desempeño estructural de la consola de retiro.

```

Commands
1  /POST1
2  SET, LAST
3
4  ! Crear tabla con esfuerzo equivalente de Von Mises
5  ETABLE, SEQV, S, EQV
6
7  ! Seleccionar todos los elementos y contar total
8  ALLSEL, ALL
9  *GET, NTOT, ELEM, 0, COUNT
10
11 ! Seleccionar elementos con esfuerzo mayor a 200 MPa
12 ESSEL, S, ETAB, SEQV, 200, 1E20
13 *GET, NSUP, ELEM, 0, COUNT
14
15 ! Calcular porcentaje
16 PCT = (NSUP/NTOT)*100
17
18 ! Escribir resultado a archivo de texto
19 *CFOPEN, porcentaje elementos, txt
20 *VWRITE, NTOT, NSUP, PCT
21 ('TOTAL ELEMENTOS = ', I8, '/', 'ELEMENTOS > 200 MPa = ', I8, '/', 'PORCENTAJE = ', F10.3, ' %')
22 *CFCLOS
23
24 ALLSEL, ALL  Commands inserted into this file will be executed immediately after the ANSYS /POST1 command.
25
26 ! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (mm, kg, N, s, mJ, mN)
27 ! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.
28 ! See Solving Units in the help system for more information.
29
30
31

```

Figura 26: Comando para visualización de elementos sobre 200 MPa, Ansys Mechanical.

Por lo tanto, una vez ejecutado el código correspondiente dentro de Ansys Mechanical, en el apartado Solution, la simulación entrega los resultados asociados a deformaciones y esfuerzos equivalentes, y además genera un archivo externo en formato .txt dentro de la sección donde se encuentra guardado el proyecto de Workbench, denominado como “porcentaje_elementos.txt” al interior de la carpeta “Consola de retiro_files”. En este archivo se registra que el porcentaje de elementos de la consola de retiro sometidos a un esfuerzo equivalente de Von Mises superior a 200 MPa corresponde a 0,703% de la estructura global.

En consecuencia, y tal como se indicó anteriormente, al tratarse de un porcentaje inferior al 1% del total de elementos, se considera que los esfuerzos elevados se aíslan en zonas específicas de la consola, por lo cual no interceden en el comportamiento de la estructura global. Bajo este criterio, se descarta la incidencia de dichos esfuerzos sobre la consola de retiro y se establece como referencia de evaluación del factor de seguridad, el esfuerzo admisible definido en el capítulo. Una vez concluido este análisis, se procede a determinar el factor de seguridad correspondiente al modelo estructural de la consola de retiro, cuyo cálculo se presenta en la expresión indicada a continuación.

$$n_{cr} = \frac{\sigma_{y,cr}}{\sigma_{max,cr}} = \frac{345}{200} = 1,725 \quad (6)$$

Luego, con este resultado se da por concluido el análisis estructural por elementos finitos correspondiente a la consola de retiro, para posteriormente continuar con la evaluación de los resultados asociados a la simulación de la consola de empuje del dispositivo de extracción. En primer lugar, se analizan las deformaciones máximas y mínimas que se obtienen a partir de las condiciones de borde previamente definidas e ingresadas en Static Structural, cuyos resultados se presentan en la Figura 27. En esta imagen, el aspecto más relevante corresponde a la deformación máxima, que alcanza un valor de 0,111 mm, ubicándose principalmente en el cuerpo crítico de la consola, es decir, en la zona donde se aplica de manera directa la carga de compresión proveniente del sistema hidráulico.

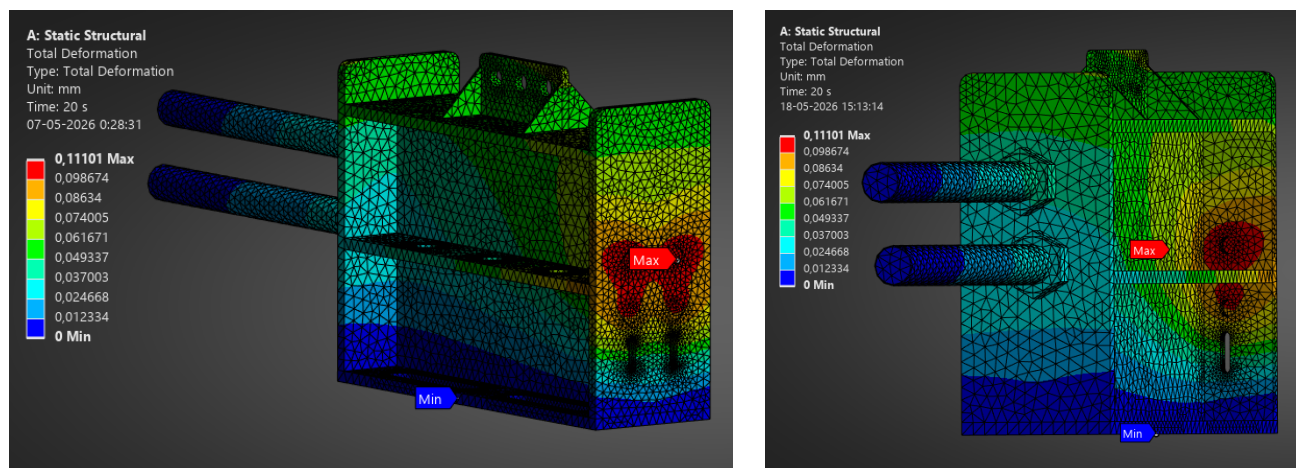


Figura 27: Deformaciones presentes en la consola de empuje, Ansys Mechanical.

Del punto de vista operacional, este valor de deformación resulta sumamente bajo, incluso inferior al obtenido en la simulación de la consola de retiro. En efecto, para la posterior ejecución en terreno, una deformación de esta magnitud se considera despreciable, ya que no compromete la geometría del conjunto ni afecta la correcta transmisión de carga en el mecanismo de extracción. En consecuencia, se valida el comportamiento en términos de deformación, y se procede a analizar la distribución de los esfuerzos equivalentes de Von Mises desarrollados en los distintos elementos de la malla a través de la simulación operativa.

Finalmente, los resultados que se obtienen al evaluar la función Equivalent Stress (Von Mises) dentro de la sección Solution para la consola de empuje se presentan en la Figura 28, donde se observa que la distribución de esfuerzos en el componente resulta bastante baja en comparación con el esfuerzo admisible definido por el cliente. En particular, el esfuerzo equivalente máximo registrado corresponde a 73,259 MPa, localizándose en el cuerpo central de la consola, en cercanías donde se recibe la carga de compresión transmitida por el sistema hidráulico. A partir de este resultado, se establece que el comportamiento estructural del componente es sumamente favorable, incluso más que la consola de retiro, teniendo indicios claros de que el factor de seguridad asociado a la consola será de magnitud elevada, por lo cual se termina de confirmar que el accionamiento del sistema sobre este componente se ejecutará sin inconvenientes en la operación en terreno en el sentido de resistencia estructural.

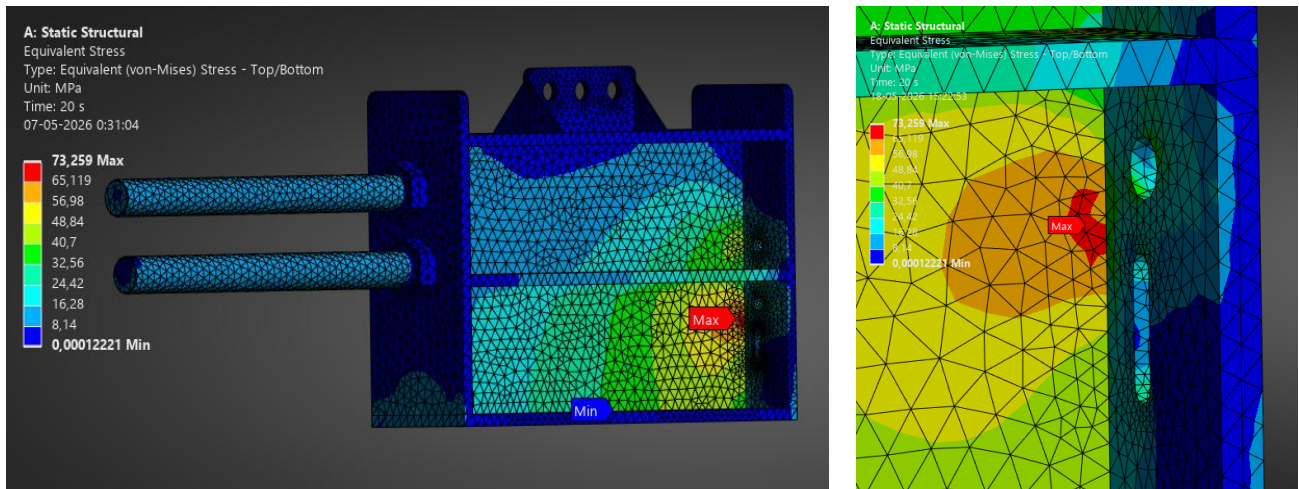


Figura 28: Esfuerzos equivalentes de Von Mises de la consola de empuje, Ansys Mechanical.

El factor de seguridad asociado a este análisis se determina a partir de la relación entre el límite de fluencia del material de la consola, el cual controla el criterio de cálculo al presentar una magnitud menor que la del material correspondiente a los pernos de apoyo, y el esfuerzo equivalente máximo de Von Mises obtenido en la simulación. De esta manera, el criterio evalúa directamente el margen de resistencia de la consola de empuje frente a las solicitaciones desarrolladas durante la operación de extracción. Luego, el cálculo correspondiente se presenta a continuación.

$$n_{ce} = \frac{\sigma_{y,ce}}{\sigma_{max,ce}} = \frac{345}{73,259} = 4,709 \quad (7)$$

Luego, en la Tabla 4 se presentan de forma resumida los resultados más relevantes obtenidos en la simulación estructural de ambas consolas del dispositivo de extracción. Entre los parámetros que se registran se incluyen la deformación máxima, el esfuerzo admisible, el esfuerzo de fluencia del material de las consolas, el esfuerzo equivalente máximo de Von Mises y el factor de seguridad correspondiente a cada componente. Dentro de estos resultados, el parámetro de mayor interés corresponde al esfuerzo equivalente máximo, ya que el cliente exige como criterio de aceptación que se verifique resistencia estructural con las condiciones de [11], y para esto los esfuerzos equivalentes de cada elemento no deben superar el esfuerzo admisible propuesto, en otras palabras, un factor de seguridad mayor o igual a 1,67, considerando los 207 MPa como límite de admisibilidad.

Tabla 4: Recopilación de resultados asociados a la simulación de la consola de retiro y empuje.

Tipo de Consola	Deformación máxima [mm]	Esfuerzo admisible [MPa]	Esfuerzo fluencia [MPa]	Esfuerzo máximo [MPa]	Factor de seguridad
Retiro	1,546	207	345	200	1,725
Empuje	0,111	207	345	73,259	4,709

Por lo tanto, para dar término a la sección de resultados asociados a las simulaciones, se concluye de la teoría que ambas consolas del dispositivo de extracción del trunnion de descarga del molino SAG 02 deberían resistir estructuralmente durante el accionamiento hidráulico ejercido por el sistema cilindro-pistón, permitiendo así que el trunnion logre desacoplarse de su ajuste por interferencia y ser retirado sin inconvenientes. Esta conclusión se sustenta en que los esfuerzos equivalentes de Von Mises obtenidos en las simulaciones no superan el esfuerzo admisible previamente definido para el diseño, condición que se ve reflejada en los factores de seguridad calculados para ambas consolas. En consecuencia, el siguiente paso consiste en complementar esta validación numérica con la ejecución real del procedimiento en terreno en Minera Los Pelambres, temática que será abordada en la “Validación del desmontaje del trunnion de descarga” en los Anexos, donde se verificará mediante evidencia práctica si los dispositivos efectivamente resisten bajo estas condiciones de carga, validando así el análisis FEM propuesto por Ansys Mechanical que se desarrolla en el presente proyecto.

2.6 Cálculo estructural de la pernería del dispositivo

El acople entre la consola de retiro y el trunnion de descarga considera cuatro pernos Parker de cabeza cilíndrica con hexágono interior, tipo DIN 912, M42 y grado 10.9. De acuerdo con la norma ISO 898-1 [12], para pernos de este grado se utiliza un límite de fluencia de 940 MPa, mientras que para el material se considera un módulo elástico de 205 GPa. Con el propósito de representar adecuadamente el comportamiento resistente de esta unión apernada, se elaboró el Diagrama de Cuerpo Libre correspondiente a las solicitaciones presentes durante el accionamiento del sistema de extracción como ilustra la Figura 29. En el esquema se identifican la fuerza de tracción ejercida por el pistón sobre la consola de retiro y las fuerzas de tracción desarrolladas en la pernería, considerando también

las distancias respectivas entre la carga aplicada y el punto de pivoteo del sistema, que corresponde a la última sección de contacto entre la consola de retiro y el trunnion. Este planteamiento establece el equilibrio estático de la unión y, a partir de ello, se realiza el análisis de las sollicitaciones más críticas presentes en el sistema.

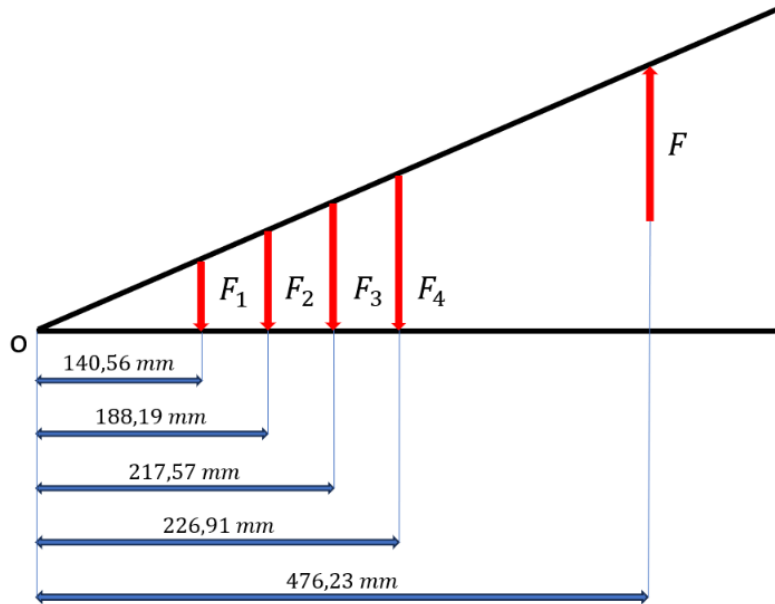


Figura 29: Diagrama de Cuerpo Libre de la unión apernada en la consola de retiro.

Luego, por semejanza de triángulos, a partir de la tracción ejercida por cada perno se obtienen las siguientes relaciones:

$$\frac{F_1}{140,46} = \frac{F_2}{188,19} = \frac{F_3}{217,57} = \frac{F_4}{226,91} \quad (8)$$

De la cual, expresando cada término en función de F_1 , resultan las ecuaciones: $F_2 = 1,34 \cdot F_1$, $F_3 = 1,55 \cdot F_1$ y $F_4 = 1,61 \cdot F_1$.

Se procede a realizar sumatoria de momentos con respecto al punto de pivote del sistema, con el propósito de definir F_1 , y, por consiguiente F_4 , que corresponde a la tracción más significativa dentro de los pernos, ya que se encuentra más alejada del punto de pivote.

$$\begin{aligned} \sum M_o = 0 &\Rightarrow F \cdot (476,23) - F_4 \cdot (226,91) - F_3 \cdot (217,57) - F_2 \cdot (188,19) - F_1 \cdot (140,46) = 0 \quad (9) \\ &\Rightarrow F_1 = 195.740 \text{ [N]} \\ &\Rightarrow F_4 = 315.141 \text{ [N]} \end{aligned}$$

Dado que en el sistema no hay presencia de fuerzas de corte directo sobre los pernos (carga perpendicular a los pernos), las fuerzas de trabajo en cada perno quedan definidas como la fuerza de tracción que se ejerce sobre ellos, siendo el perno 4 la base para cálculos posteriores al poseer

magnitud más alta, esto es: $F_{t,p4} = F_4 = 315.141 [N]$. Luego, la fuerza total sobre cada perno se determina mediante la siguiente expresión rescatada de [13]:

$$F_T = F_i + F_t \cdot C \quad (10)$$

Donde F_i se asocia a la fuerza inicial de cada perno, mientras que C corresponde a la constante de rigidez de la unión. Este último parámetro se determina mediante la ecuación ilustrada a continuación:

$$C = \frac{k_p}{k_p + k_{eq}} \quad (11)$$

Siendo k_p y k_{eq} las rigideces del perno y de la junta equivalente que lo sujeta, las cuales se pueden calcular mediante la expresión mostrada a continuación, que representa la rigidez de un elemento estructural sometido a tracción o compresión.

$$k = \frac{E \cdot A}{l} \quad (12)$$

El perno Parker posee un largo de 135 mm, donde 96 mm corresponden a la longitud roscada. Por otra parte, el área de esfuerzo de tensión para la rosca métrica M42 es de 1.121 mm² según lo establecido en la norma ISO 898-1, mientras que el área del vástago corresponde a 1.385,44 mm², obtenido a partir del diámetro nominal del perno. Conocidos estos datos, se calcula la rigidez del perno siguiendo la ecuación 12, pero modelada como dos resortes en serie, debido a la sección roscada y lisa del perno.

$$\Rightarrow k_p = \frac{E}{\frac{l_v}{A_v} + \frac{l_r}{A_r}} = \frac{205.000}{\frac{39}{1.385,44} + \frac{96}{1.121}} = 1.801.600,3 \left[\frac{N}{mm} \right]$$

Luego, se necesita calcular la rigidez equivalente de los componentes que sujetan al elemento semiroscado, es decir, la consola de retiro y el trunnion de descarga. Para esto, ambos componentes se modelan como planchas en serie que cumplen la función de empaquetadura, esto es:

$$k_{eq} = \frac{k_{cr} \cdot k_{tr}}{k_{cr} + k_{tr}} \quad (13)$$

Si se asume que la junta que sujeta al perno se comporta como empaquetadura, el diámetro de influencia de las planchas que atraviesa el perno debe ser como mínimo 1,5 veces el diámetro nominal d de este último. Con lo anterior se obtiene el área del cono de influencia aproximándolo a un cilindro hueco.

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (1,5 \cdot d - d)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (1,5 \cdot 42 - 42)^2 = 346,36 [mm^2] \quad (14)$$

Por lo tanto, una vez conocidos los parámetros necesarios para el cálculo de las rigideces de los componentes que sujetan al perno, la ecuación 12 se expresa como:

$$\Rightarrow k_{cr} = \frac{E_{cr} \cdot A}{l_{cr}} = \frac{205.700 \cdot 346,36}{42} = 1.696.339,33 \left[\frac{N}{mm} \right]$$

$$\Rightarrow k_{tr} = \frac{E_{tr} \cdot A}{l_{tr}} = \frac{168.000 \cdot 346,36}{93} = 625.682,58 \left[\frac{N}{mm} \right]$$

Reemplazando ambos términos en la ecuación 13, se obtiene:

$$\Rightarrow k_{eq} = \frac{k_{cr} \cdot k_{tr}}{k_{cr} + k_{tr}} = \frac{1.696.339,33 \cdot 625.682,58}{1.696.339,33 + 625.682,58} = 457.088,7 \left[\frac{N}{mm} \right]$$

Se conoce la rigidez del perno y la rigidez equivalente del junte, por lo cual, reemplazando ambos términos en la ecuación 11 se determina el coeficiente de rigidez de la unión.

$$\Rightarrow C = \frac{k_p}{k_p + k_{eq}} = \frac{1.801.600,3}{1.801.600,3 + 457.088,7} = 0,8$$

Para obtener la fuerza total resultante sobre el perno 4, solo queda determinar la fuerza inicial asociada a este elemento, y esto se realiza bajo la condición de que la unión apernada es reutilizable, por ende, la fuerza inicial o de precarga debe ser menor o igual a un 75% de la carga de prueba. En este caso, la fuerza inicial se considera igual al 45% de la carga de prueba para un torque de apriete cercano a los 3.500 [Nm]. La carga de prueba se obtiene a partir del área de esfuerzo de tensión A_p y del esfuerzo de prueba S_p , cuyos valores son 1.121 mm² y 830 MPa según reportes de la norma ISO 898-1 [12].

$$F_i \leq 0,75 \cdot A_p \cdot S_p \Rightarrow F_i = 0,45 \cdot 1.121 \cdot 830 = 418.693,5 [N] \quad (15)$$

Se reemplaza cada término calculado en la ecuación 10, y se obtiene la fuerza total sobre el perno 4.

$$\Rightarrow F_{T,p4} = F_i + F_{t,p4} \cdot C = 418.693,5 + 315.141 \cdot 0,8 = 670.806,3 [N]$$

Finalmente se puede determinar el esfuerzo de tracción de los pernos con la ecuación 16 para luego obtener el factor de seguridad a la fluencia con la ecuación 17.

$$\sigma_T = \frac{F_{T,p4}}{A_p} = \frac{670.806,3}{1.121} = 598,4 [MPa] \quad (16)$$

$$n_p = \frac{\sigma_{y,p}}{\sigma_T} = \frac{940}{598,4} = 1,571 \quad (17)$$

CAPÍTULO 3: Diseño, cálculo y selección de elementos de sujeción en el izaje del trunnion

3.1 Descripción general del sistema de izaje y selección de elementos

El proceso de izaje del trunnion de descarga comienza con el apoyo del dispositivo de extracción desarrollado en el capítulo anterior, puesto que, el sistema de retiro puede llevar al componente hasta una posición segura para incorporar los elementos de levante, siendo primero los cáncamos giratorios y luego el sistema completo con ayuda del puente grúa. Por lo tanto, una vez que se acciona el dispositivo de retiro para completar el desmontaje del trunnion en un 100%, la carga de 42 ton pasa a ser soportada por el sistema de izaje, liberándose totalmente de los pads del descanso y dando el inicio formal de la maniobra de levante del trunnion. Bajo esta condición de carga, el objetivo principal de los dispositivos triangulares diseñados en el proyecto es asegurar una distribución adecuada de los esfuerzos transmitidos hacia los elementos de sujeción seleccionados, disminuyendo concentraciones de carga y favoreciendo a un comportamiento estructural más uniforme durante la maniobra.

En este contexto, los dispositivos triangulares forman parte esencial del sistema de sujeción, el cual se compone de un conjunto de elementos de levante distribuidos jerárquicamente, cuyo propósito es transferir la carga desde los puntos de anclaje del trunnion hasta el puente grúa de manera segura y controlada. El sistema incorpora cuatro cáncamos giratorios apertados a los orificios del trunnion, los cuales actúan como puntos de conexión inferiores del sistema, ya que desde ellos se transmite la carga hacia dos tecles y un estrobo (unido a pasteca), para luego continuar hacia los dos dispositivos triangulares, diseñados para redistribuir las fuerzas hacia los niveles superiores del izaje. Estos triángulos se juntan mediante grilletes y uno de ellos, el que resiste todo el peso del sistema, se encuentra unido a un eslabón maestro conectado finalmente al puente grúa. En total, el sistema considera once grilletes, cada uno con una función específica dentro de la cadena de carga, siendo uno de ellos el grillete superior más relevante, encargado de unir el sistema completo al elemento maestro de levante. El bosquejo general de esta solución puede apreciarse en la Figura 30, donde se observa la configuración completa del sistema de izaje propuesto y la disposición de sus componentes.

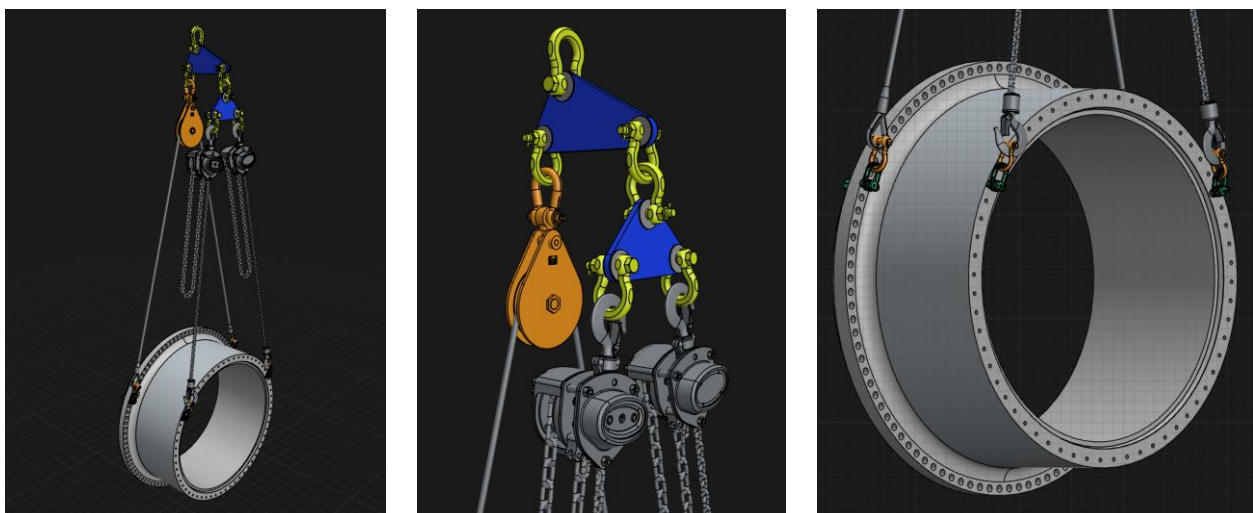


Figura 30: Sistema de levante para trunnion de descarga SAG 02, Shapr3D.

Se ha descrito recientemente el sistema de izaje del trunnion de descarga, destacando el rol fundamental que desempeñan los dispositivos triangulares dentro de esta etapa, ya que son los encargados de distribuir adecuadamente las cargas transmitidas por el componente durante la maniobra. No obstante, el comportamiento seguro y eficiente de este sistema no depende únicamente de estos dispositivos, sino también del conjunto de elementos de sujeción que se involucran en esta cadena de carga, los cuales permiten asegurar una correcta unión entre componentes, aportar capacidad resistente frente a la carga del trunnion y por ende movilizar de manera controlada el componente. Siguiendo esta idea, la tabla que se presentará a continuación muestra un resumen de estos elementos de izaje seleccionados para la maniobra, incluyendo principalmente los cáncamos giratorios, los distintos tipos de grilletes utilizados en el sistema, los tecles seleccionados, el estrobo, la pasteca y, finalmente, el eslabón maestro, que corresponde a la cúspide del arreglo de levante al vincularse directamente con el puente grúa mediante su gancho principal.

El objetivo principal de la Tabla 5 es entregar de forma resumida la información más relevante de cada uno de estos elementos seleccionados, considerando aspectos como su especificación técnica, capacidad máxima de trabajo, ubicación dentro del sistema completo (función principal) y la cantidad requerida de acuerdo con el sistema mostrado previamente en la Figura 30. De esta manera, la tabla permite visualizar el por qué se requiere cada uno de estos componentes dentro de la maniobra, tanto para el traslado del trunnion retirado como para el posicionamiento del trunnion nuevo, verificando que cada pieza cumpla una función específica y complementaria en términos de resistencia, acople y distribución de cargas durante la operación.

Tabla 5: Componentes de izaje seleccionados para el retiro del trunnion de descarga.

Componente de izaje	Especificación técnica	Capacidad máx. [ton]	Ubicación	Cantidad
Cáncamo giratorio	ACP-TUR SMAX, 5T-M64 F250 mm	32	Flange trunnion	2
Cáncamo giratorio	ACP-TUR MAX, M48 F90 mm	20	Zona roscada trunnion	2
Grillete	Crosby 2"	35	Unión cáncamo	4
Grillete	Crosby 2 ½"	55	- Orificios inferiores t1 - Orificio superior t2 - Orificios inferiores t2	5
Grillete	Crosby 3"	85	Orificio superior t1	1
Tecle	Manual NP VS30-8M	30	Unión grillete inferior t2	2
Estrobo	2" con gancho a ambos extremos	54	Unión pasteca	1
Pasteca/Grillete	SMP C Cable 38-51 mm	54	Unión grillete inferior t1	1
Eslabón maestro	Forma 3 argollas	75	Unión puente grúa	1

3.2 Configuración geométrica de los dispositivos triangulares

Una vez seleccionados todos los elementos de sujeción que conforman el sistema de izaje del trunnion de descarga, considerando la capacidad máxima de cada componente, su respectivo factor de seguridad y la posición que ocupan dentro de este mecanismo, corresponde definir la configuración geométrica de los dispositivos triangulares que vinculan de manera adecuada dichos elementos. En este escenario, el diseño de ambos triángulos no solo cumple objetivos en relación con el acople con grilletes, tecles, pasteca, estrobos y cáncamos giratorios, sino también en relación con criterios geométricos que se orientan a evitar interferencias mecánicas de estos elementos con el propio trunnion durante la maniobra. Además, estos componentes deben ser capaces de resistir principalmente solicitaciones de tracción, transmitidas por el peso del trunnion de descarga, considerado en 42 ton, junto con el peso menor que aportan los demás elementos del sistema de izaje.

Por lo tanto, describiendo en primer lugar el dispositivo triangular de mayor tamaño, su diseño tiene que ajustarse a la condición más crítica del sistema de izaje, ya que se ubica en la parte superior del mecanismo y, por ende, debe resistir una carga más exigente frente a los demás elementos. La orientación escogida para este triángulo corresponde a una vista frontal del dispositivo respecto de la vista lateral del trunnion como se observaba en la Figura 30, criterio que se decide con el propósito de reducir la longitud de la base del componente (ancho del trunnion es más corto) y así evitar un sobredimensionamiento innecesario del sistema, contribuyendo a un menor costo de fabricación, o bien un CAPEX más razonable.

Dicho esto, otro de los aspectos relevantes a destacar es que, los dos orificios inferiores del triángulo no reciben cargas equivalentes, lo que constituye un aspecto fundamental para su correcto dimensionamiento en la base. En lo específico, el extremo que soporta la mayor carga debe encontrarse más próximo a la ubicación del puente grúa sobre el triángulo, con el objetivo de minimizar los momentos internos de t_1 generados por el peso del trunnion y, en consecuencia, limitar deformaciones y esfuerzos, además de equilibrar el sistema. De esta forma, el lado más cercano al posicionamiento del puente grúa corresponde a la sección asociada a la unión con la pasteca y los estrobos, los cuales transmiten la carga que proviene del segmento del trunnion donde se encuentra el flange, zona que concentra la mayor masa. En contraste, el otro extremo del triángulo (orificio) se proyecta a una mayor distancia respecto del puente grúa y los eslabones como muestra la Figura 31, quedando asociado a la carga que corresponde a la zona roscada del trunnion, donde la carga es menor.

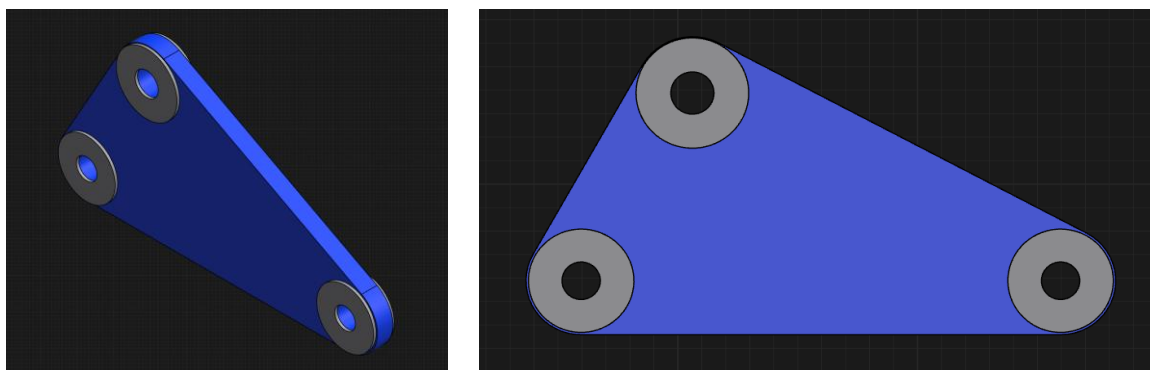


Figura 31: Dispositivo triangular de sujeción superior en maniobra de izaje, Shapr3D.

Además, cabe destacar que la separación total entre ambos extremos de este dispositivo se define de modo que abarque el ancho completo del trunnion, evitando así cualquier interferencia mecánica entre el componente izado y los elementos de sujeción. Finalmente, el orificio superior de este triángulo forma parte de la fijación principal del dispositivo, siendo el punto desde el cual se soporta y redistribuye la carga completa del muñón hacia los orificios inferiores.

En cuanto al segundo dispositivo triangular, su diseño geométrico responde a un criterio distinto. A diferencia del triángulo superior, cuya forma resulta equivalente a la de un triángulo escaleno, este segundo elemento mantiene una geometría análoga a la de un triángulo isósceles como se ilustra en la Figura 32, ya que trabaja bajo una condición de carga más simétrica. Esto se debe a que su diseño se plantea en una vista lateral respecto de la misma vista lateral del trunnion, donde ambas ramas inferiores del sistema de izaje reciben cargas prácticamente iguales, ya que la sección roscada que presenta el trunnion, visto de frente es simétrico sin discontinuidades. Entonces, la carga proviene a partir de los cáncamos giratorios, la cual se transmite a través de los tecles hasta los orificios extremos del triángulo. Como última consideración, el orificio superior de este dispositivo, que se encuentra unido mediante un grillete al triángulo restante, actúa como la fijación principal y es el encargado de resistir la carga total correspondiente a esta sección del sistema, transmitida como una fuerza de tracción por parte del trunnion de descarga.

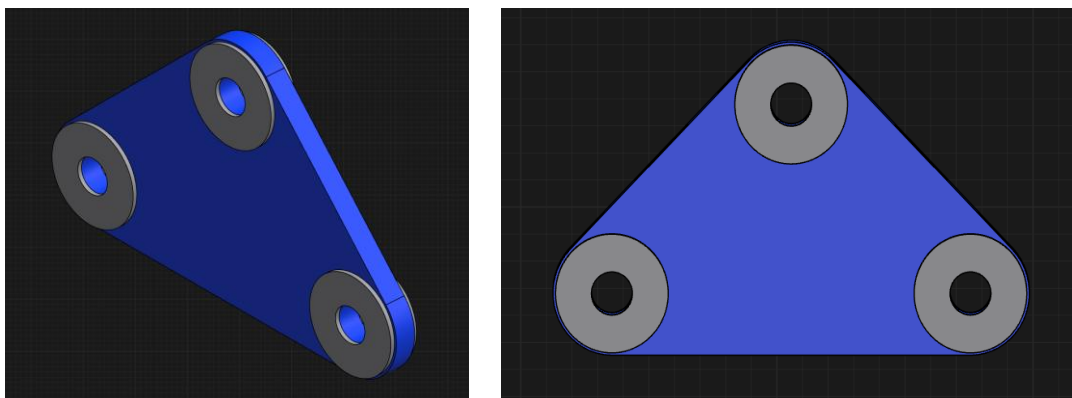


Figura 32: Dispositivo triangular inferior de sujeción en maniobra de izaje, Shapr3D.

3.3 Selección de materiales y propiedades mecánicas

A diferencia de lo expuesto en el Capítulo 2 para las consolas del dispositivo de extracción, donde la selección del material debía ser más rigurosa debido a la criticidad e incertidumbre asociada al desacople por interferencia del trunnion con la tapa, en el caso de los triángulos de izaje la situación se considera más sencilla desde un punto de vista estructural. Esto se debe a que, durante la maniobra de suspensión, la carga no se concentra de manera puntual en una única sección de estos componentes, sino que se distribuye a través de sus distintos puntos de conexión (inferiores), compensando las cargas hacia los demás elementos del sistema. Por esta razón, la operación de izaje no exige un material tan exigente como el requerido para el sistema de extracción, sino más bien un acero estructural que entregue un comportamiento estable bajo cargas controladas principalmente orientadas a la tracción.

En vista de lo descrito, se opta por seleccionar el acero ASTM A36 para ambos triángulos de izaje, material que se utiliza recurrentemente en sistemas sometidos a cargas moderadas y condiciones en donde la distribución de esfuerzos es más uniforme. Es importante destacar que este tipo de acero presenta propiedades mecánicas inferiores a las del acero escogido para las consolas del dispositivo de extracción, pero bien, su capacidad resistente se considera suficiente para la función que deben cumplir estos componentes dentro del sistema de suspensión del trunnion. Además, su elección logra mantener una solución técnicamente adecuada al problema sin tener que recurrir a un aumento innecesario de costos de fabricación ni en un sobredimensionamiento estructural del diseño. Siguiendo este contexto, las propiedades mecánicas consideradas para ambos triángulos de sujeción se presentan en la Tabla 6, manteniendo el mismo orden de nomenclatura empleado en el capítulo anterior, con el propósito de ser consistente en la definición del material y facilitar así el ingreso de aquel en el programa Ansys Workbench, de acuerdo con las recomendaciones técnicas de la fuente [14].

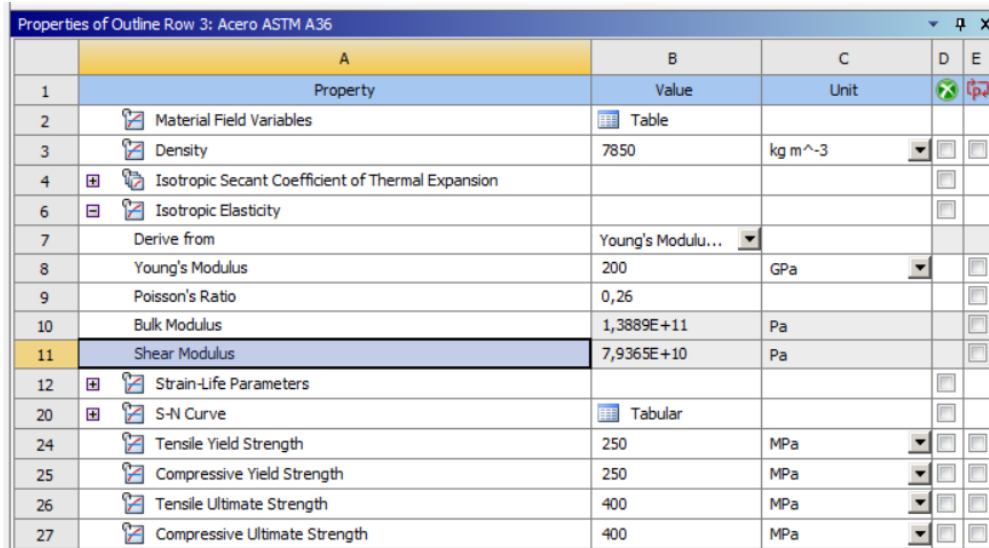
Tabla 6: Propiedades mecánicas del material de los triángulos de izaje.

Propiedades mecánicas	
Tipo de acero	Acero ASTM A36
Límite de fluencia [MPa]	250
Resistencia última de tracción [MPa]	400
Módulo de Young [GPa]	200
Módulo cortante [GPa]	79,3
Módulo volumétrico [GPa]	140
Coefficiente de Poisson	0,26
Densidad [kg/m ³]	7.850

Se puede observar una diferencia notoria en la magnitud de las propiedades mecánicas presentadas en la tabla anterior, especialmente en el esfuerzo de fluencia, que pasa a ser a una de las variables más críticas dentro de la modelación estructural, ya que finalmente es la propiedad que define la capacidad resistente del material frente a las solicitaciones efectuadas en cada dispositivo triangular. No obstante, esta disminución en comparación con el material utilizado anteriormente no debiera ser un impedimento para el cumplimiento de la función principal de estos elementos de izaje, debido a que, como ya se ha mencionado, en esta etapa la distribución de cargas presente en el sistema de izaje cumple un rol sumamente importante en la reducción de concentraciones de esfuerzo sobre los triángulos. Por lo tanto, bajo este contexto sería posible anticipar que ambos dispositivos triangulares deberían resistir estructuralmente las cargas de tracción ejercidas durante la maniobra de traslado, alcanzando un factor de seguridad adecuado.

Luego, en consideración de las propiedades mecánicas recopiladas para el acero ASTM A36, estas se ingresan posteriormente de manera manual en el apartado Engineering Data de Ansys Workbench, con el objetivo de definir correctamente el material asociado a cada uno de los triángulos de izaje propuestos de manera previa a la simulación estructural. Una vez ingresados los parámetros, se actualiza el proyecto correspondiente a cada componente triangular, de modo que dichas propiedades mecánicas pasen a formar parte de los modelos y queden así vinculadas en el diseño de los dispositivos

t1 y t2. De esta forma, ambos triángulos quedan correctamente definidos con su material dentro del entorno de simulación presente en Ansys Mechanical, pudiendo obtener esfuerzos equivalentes acorde a la resistencia real del material agregado. La Figura 33 muestra la ventana utilizada para el ingreso de cada una de las propiedades mecánicas del acero ASTM A36.



Properties of Outline Row 3: Acero ASTM A36				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m^-3	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulu...		
8	Young's Modulus	200	GPa	
9	Poisson's Ratio	0,26		
10	Bulk Modulus	1,3889E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,9365E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	250	MPa	
25	Compressive Yield Strength	250	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	400	MPa	
27	Compressive Ultimate Strength	400	MPa	

Figura 33: Propiedades mecánicas de los triángulos de sujeción, Ansys Workbench.

3.4 Normativa y requerimientos de diseño estructural

En esta etapa del procedimiento, antes de abordar el análisis estático mediante ecuaciones de equilibrio para descomponer las reacciones que actúan directamente en cada triángulo, es importante detallar que los criterios de diseño exigidos por Minera Los Pelambres para las maniobras de izaje no se formulan en términos de un esfuerzo admisible, tal como se presentó en el capítulo anterior para el dispositivo de extracción. En este caso, el criterio de validación estructural se basa en la elaboración de una memoria de cálculo de izaje asociada a una carga nominal de trabajo, en donde, las condiciones establecen que el 80% de dicha carga nominal corresponda al peso efectivo del trunnion de descarga que será suspendido durante la maniobra. A partir de estas reglas se establece la base de diseño para los dispositivos triangulares de sujeción tal como se observa en la ecuación presentada a continuación, pudiendo determinar posteriormente el factor de seguridad que exige ser mayor o igual a 1 por MLP.

$$x \cdot 0,8 = 42 \Rightarrow x = 52,5 \text{ [ton]} \quad (18)$$

Por otro lado, la norma ASME BTH-1 [15] establece criterios de diseño para dispositivos de izaje bajo gancho, es decir, estructuras fabricadas para levantar componentes mediante grúa. Su uso es bastante útil para contrastar el factor de seguridad de los triángulos de izaje del trunnion, a pesar de que Minera Los Pelambres haya definido una carga nominal de análisis, ya que, el FS que se obtiene igualmente puede compararse con la Design Category B de ASME BTH-1, donde se emplea un factor de diseño nominal de 3:1 respecto de la fluencia del material.

3.5 Modelación del problema mediante elementos finitos (FEM)

3.5.1 Mallado y parámetros de simulación

Se han definido tanto la geometría como las propiedades mecánicas de los triángulos t1 y t2, por lo que el paso siguiente, una vez importadas sus estructuras en Ansys Mechanical y antes de definir las condiciones de borde, corresponde al diseño del mallado de ambos dispositivos. Comenzando con el triángulo superior t1, se escoge un método de mallado tetraédrico, al igual que en el caso de las consolas de retiro y empuje, tal como se muestra en la Figura 34, considerando que este tipo de discretización se adapta de manera consistente a las geometrías de esta gama, propensas a capturar concentradores de esfuerzos producto de sus orificios (reacciones), y además logra una distribución homogénea de elementos a lo largo de todo el cuerpo. Además, este método permite aprovechar de manera eficaz la geometría completa del modelo para trabajar con tamaños de elemento reducidos, pudiendo tener así un análisis detallado en cuanto al comportamiento de los esfuerzos que se desarrollan en cada zona del triángulo. Luego, para la refinación de la estructura se incorpora en primer lugar un Body Sizing sobre la geometría completa del dispositivo, estableciendo una base uniforme de discretización. Posteriormente, se define un Edge Sizing en las aristas de los orificios, ya que, en estas secciones el triángulo t1 se encuentra más expuesto a la transmisión de cargas, siendo zonas propensas a concentraciones de esfuerzo. Finalmente, se inserta un Face Sizing en la cara inferior del triángulo, con el fin de disminuir aún más el tamaño de los elementos en la sección donde se presume una mayor exposición a tracción ejercida durante la maniobra de izaje.

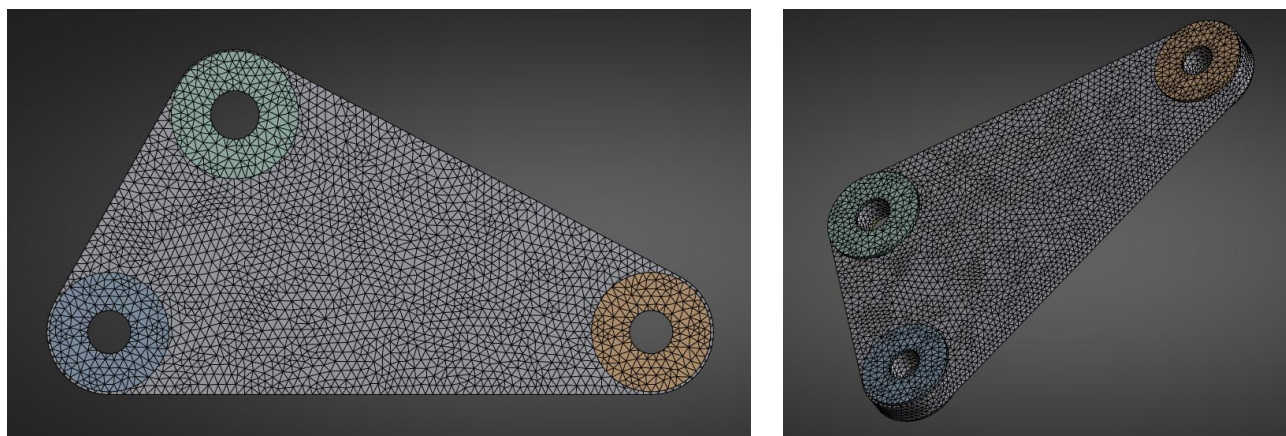


Figura 34: Mallado tetraédrico del triángulo de izaje t1, Ansys Mechanical.

De manera análoga, se prosigue con el mallado del triángulo de izaje inferior t2, diseñando igualmente un estilo de mallado tetraédrico, el cual se ilustra en la Figura 35. Luego, siguiendo las mismas consideraciones que se expusieron para el dispositivo anterior, y además buscando una discretización adecuada frente a la geometría y solicitaciones planteadas, se insertan nuevamente las funciones de Body Sizing, Edge Sizing y Face Sizing. Con estas condiciones se refina el modelo en sus zonas más críticas, especialmente en las cercanías de los orificios de conexión y en las caras donde se ejecuta la tracción durante la maniobra de izaje, para capturar lo más real posible la distribución de esfuerzos equivalentes en la estructura.

Además, en las imágenes que se presentan a continuación, se ve a mayor detalle parte del mallado correspondiente a la vista frontal y a la vista isométrica baja del dispositivo triangular, con el propósito de enseñar un tamaño de elemento reducido en la base del elemento para representar una tracción adecuada en la posterior simulación.

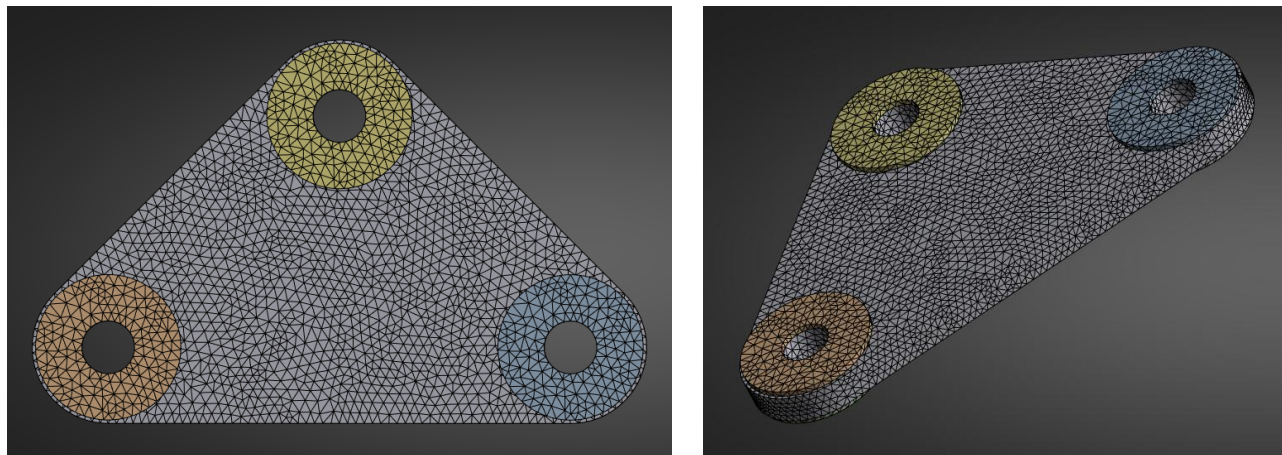


Figura 35: Mallado tetraédrico del triángulo de izaje t2, Ansys Mechanical.

Expuestas ya las configuraciones de mallado asociadas a cada uno de los componentes triangulares, a continuación, se presenta la Tabla 7, en la cual se resumen de manera detallada los principales parámetros de discretización utilizados en ambos dispositivos. Entre los aspectos que se describen se incluyen el tipo de refinamiento aplicado, la ubicación donde este se define, la magnitud del tamaño de elemento asignado en cada condición de sizing y el estilo general de mallado adoptado para cada modelo.

Tabla 7: Resumen de los parámetros de mallado utilizados en los triángulos de izaje t1 y t2.

Tipo de triángulo	Sizing	Ubicación	Tamaño de elemento [mm]	Method
Escaleno	Body sizing	Cuerpo completo	16	Tetraédrico
Escaleno	Edge sizing	Orificio de conexión	10	Tetraédrico
Escaleno	Face sizing	Caras traccionadas	14	Tetraédrico
Isósceles	Body sizing	Cuerpo completo	15	Tetraédrico
Isósceles	Edge sizing	Orificio de conexión	10	Tetraédrico
Isósceles	Face sizing	Caras traccionadas	12,5	Tetraédrico

3.5.2 Definición de las condiciones de borde

Definiendo las condiciones de borde asociadas al triángulo superior t1, se establece en primer lugar dentro de la opción Analysis Settings un total de 20 steps, para aplicar de manera progresiva las reacciones que serán ingresadas posteriormente al modelo. A continuación, se incorpora la fijación

completa del sistema, que corresponde al orificio superior del triángulo, considerando que el componente se encuentra suspendido mediante un grillete de 3" durante la maniobra. Luego, para incluir el peso propio del dispositivo, se agrega la función Standard Earth Gravity disponible dentro de Static Structural. Finalmente, se ingresan las reacciones obtenidas en el apartado del análisis estático mediante ecuaciones de equilibrio presente en los Anexos, las que representan la tracción ejercida sobre el componente producto de parte del peso transmitido por el trunnion de descarga. Estas cargas se aplican mediante la función "Bearing Load", definiéndolas como componente en el eje Z negativo y en formato tabular, de modo que su magnitud escale progresivamente a lo largo de los pasos establecidos. Se escoge esta función, ya que representa de manera más realista la acción radial y distribuida que ejercen los grilletes sobre los orificios del triángulo de izaje. En conjunto, todas estas condiciones de borde se ilustran en la Figura 36, con sus respectivos rótulos y vectores definidos.

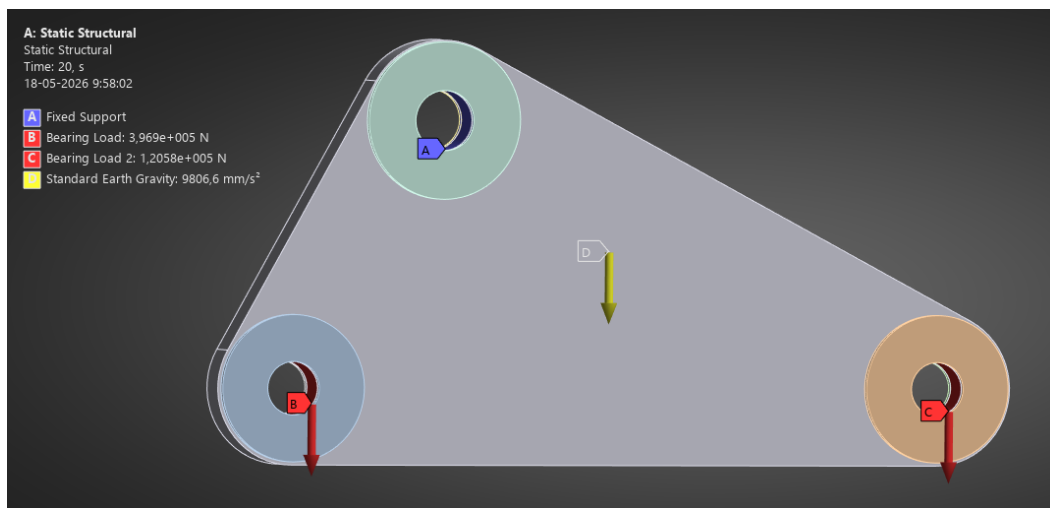


Figura 36: Condiciones de borde asociadas al triángulo superior, Ansys Mechanical.

Luego, de manera equivalente, se insertan las mismas condiciones de borde presentes en t1 para el triángulo de sujeción inferior, pero considerando las magnitudes de fuerza asociadas a los orificios inferiores del dispositivo t2 presentadas anteriormente. Esta configuración se muestra en la Figura 37.

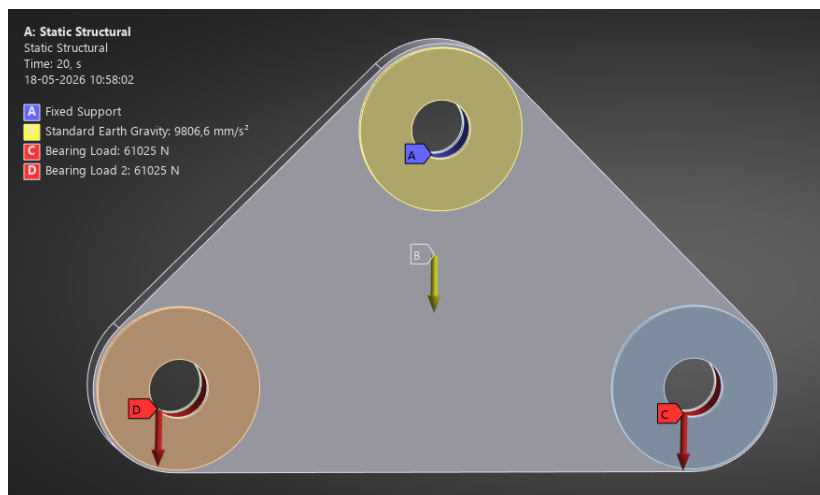


Figura 37: Condiciones de borde asociadas al triángulo inferior, Ansys Mechanical.

3.5.3 Resultados FEM: deformaciones, esfuerzos de Von Mises y factor de seguridad

Una vez definidas la geometría, el material y las condiciones de borde asociadas a los dispositivos triangulares, se procede a ejecutar la opción Solve para obtener los resultados vinculados a la tracción ejercida sobre estos componentes. En el caso del triángulo superior t1, la Figura 38 presenta la distribución de la deformación total desarrollada en el modelo, observándose un desplazamiento máximo de 0,234 mm respecto del conjunto completo del dispositivo. Esta deformación corresponde a una magnitud muy baja en relación con el tipo de maniobra y se ubica principalmente en el extremo inferior más alejado respecto del orificio superior. Por lo tanto, en una primera instancia, los desplazamientos obtenidos para el triángulo t1 se consideran aceptables del punto de vista de diseño, validando así de manera preliminar su comportamiento deformacional frente a la carga aplicada.

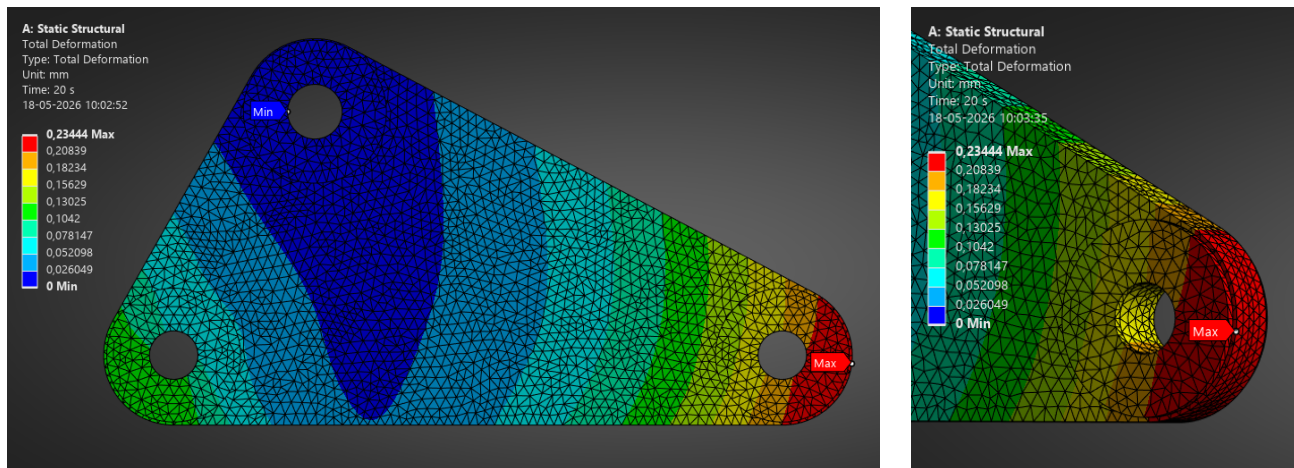


Figura 38: Deformaciones presentes en el dispositivo triangular t1, Ansys Mechanical.

Se prosigue con el análisis de los esfuerzos equivalentes de Von Mises desarrollados en el triángulo superior t1, cuyos resultados se presentan en la Figura 39. A partir de esta simulación, se obtiene un esfuerzo máximo de 163,26 MPa, localizado en el orificio inferior más cercano al eje del puente grúa, lo cual es totalmente esperable debido a que en dicha sección se concentra la reacción de mayor magnitud entre los puntos de conexión inferiores del dispositivo.

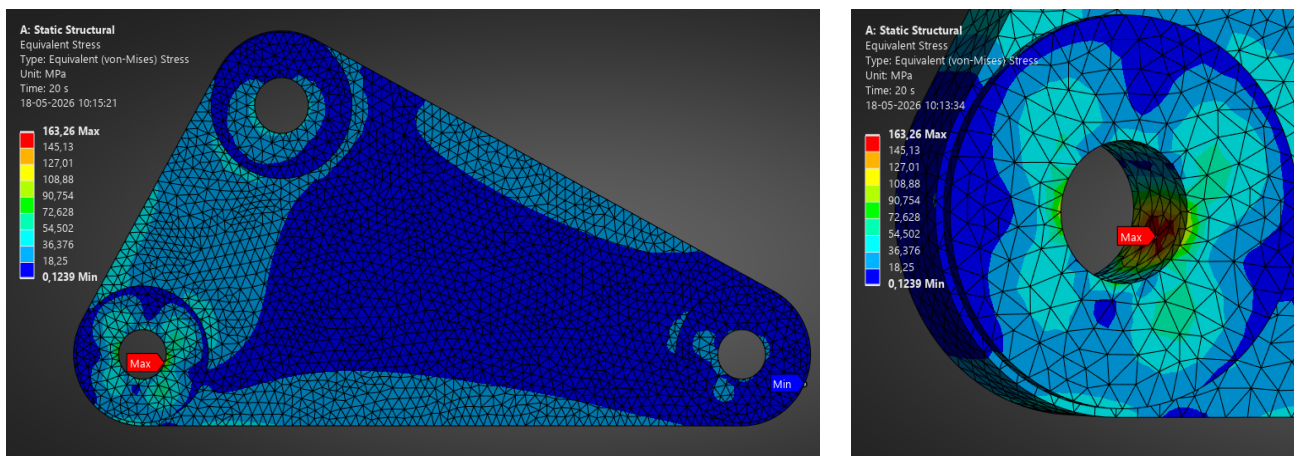


Figura 39: Esfuerzos equivalentes de Von Mises del dispositivo triangular t1, Ansys Mechanical.

Si bien el valor obtenido corresponde a un nivel de esfuerzo a considerar dentro del componente, este no supera el límite de fluencia del acero ASTM A36 seleccionado para el diseño. En consecuencia, el comportamiento del triángulo t1 también se considera aceptable desde una vista resistente, validando también su diseño en términos de esfuerzos frente a las solicitaciones provenientes del trunnion. Como respaldo a lo mencionado, se procede a calcular el factor de seguridad asociado al triángulo superior t1, utilizando la ecuación que relaciona el esfuerzo máximo equivalente de Von Mises obtenido en la simulación con el límite de fluencia del material definido, la cual se presenta a continuación.

$$n_{t1} = \frac{\sigma_{y,t1}}{\sigma_{max,t1}} = \frac{250}{163,26} = 1,531 \quad (19)$$

Finalmente, analizando los resultados de simulación correspondientes al último dispositivo estructural a fabricar dentro de esta metodología de recambio del trunnion de descarga, se presentan en la Figura 40 las deformaciones desarrolladas sobre el triángulo t2. En este caso, la deformación de interés tiene un valor de 0,0364 mm, ubicada en ambos extremos inferiores del triángulo, lo cual es coherente con la simetría del componente y con el hecho de que las reacciones aplicadas en ambos orificios inferiores presentan la misma magnitud. Debido a ello, el comportamiento deformacional del dispositivo tiende a más uniformidad que en el caso de t1, descartando de manera inmediata cualquier riesgo relevante que se asocie a desplazamientos de t2 durante la maniobra de izaje.

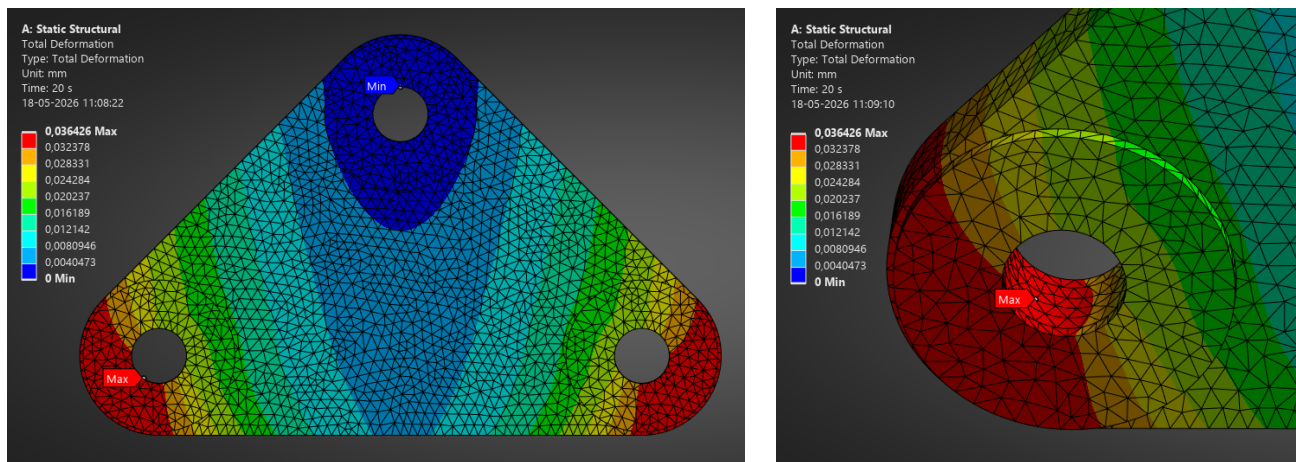


Figura 40: Deformaciones presentes en el dispositivo triangular t2, Ansys Mechanical.

En cuanto al comportamiento del triángulo de sujeción t2 en términos de esfuerzos equivalentes a lo largo de su estructura, tal como se observa en la Figura 41, la simulación arroja una magnitud máxima de Von Mises de 33,108 MPa, localizada en las secciones internas de cada orificio inferior, situación coherente con la condición de simetría previamente mencionada para t2. Por lo tanto, debido a la baja magnitud de esfuerzo equivalente máximo que se presenta en comparación con el límite de fluencia, se considera garantizado que el sistema de izaje de t2 y global debería resistir estructuralmente, de acuerdo con el respaldo que entregan las simulaciones desarrolladas en Ansys Mechanical.

Además, en la imagen puede observarse también que el esfuerzo máximo en ambos orificios se concentra en el lado orientado hacia el interior del triángulo, condición que se atribuye principalmente

a la superposición de los efectos de tracción asociados a las solicitaciones. En términos mecánicos, esta situación genera una mayor concentración de esfuerzos en la zona interna que más se acerca al punto medio entre ambos orificios, donde se combinan los efectos de las reacciones calculadas. Un comportamiento similar se observa también en el triángulo t1, específicamente en la sección donde se ubica su esfuerzo equivalente máximo.

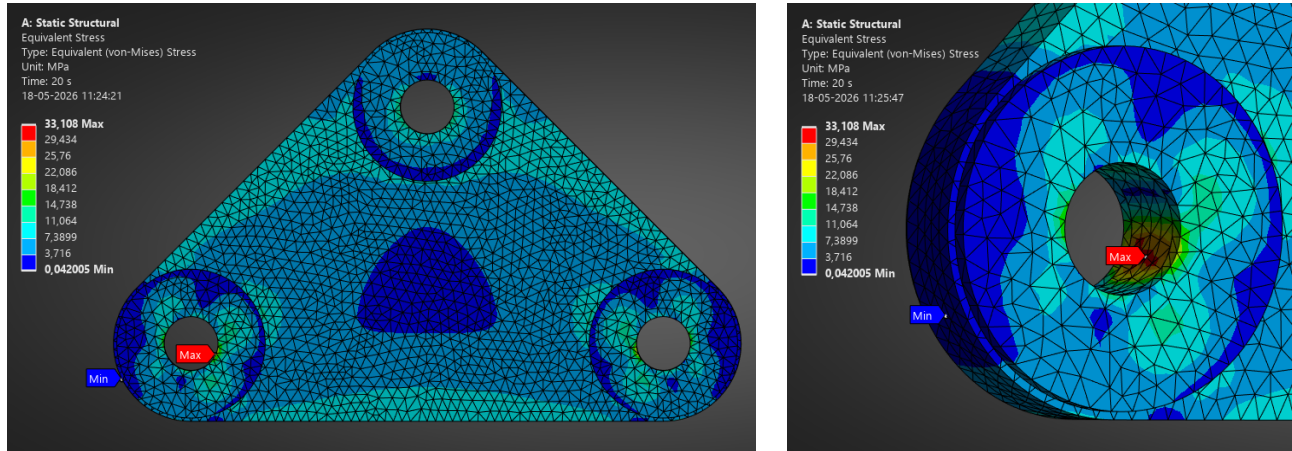


Figura 41: Esfuerzos equivalentes de Von Mises del dispositivo triangular t2, Ansys Mechanical.

Luego, el cálculo del factor de seguridad asociado a estos resultados de simulación se presenta a continuación, utilizando la relación entre el límite de fluencia del material y el esfuerzo equivalente máximo de Von Mises obtenido para el triángulo de sujeción t2.

$$n_{t2} = \frac{\sigma_{y,t2}}{\sigma_{max,t2}} = \frac{250}{33,108} = 7,551 \quad (20)$$

En vista de que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los componentes triangulares alcanzaron valores mayores o iguales a 1, se puede concluir para esta sección que, de manera análoga a lo desarrollado en el capítulo anterior, los dispositivos diseñados y evaluados estructuralmente deberían resistir sin inconvenientes las cargas ejercidas sobre el sistema, considerando las exigencias establecidas por MLP, ya que según [15] el FS de t1 es insuficiente, esto es $1,531 < 3$. Luego, los resultados obtenidos a partir de la simulación quedan respaldados por el análisis desarrollado en Ansys Mechanical y se presentan de forma resumida en la Tabla 8, en la cual se destacan los parámetros más relevantes que permiten validar esta etapa del diseño y garantizar resistencia estructural en t1 y t2.

Tabla 8: Recopilación de resultados asociados a la simulación de los triángulos de sujeción.

Tipo de triángulo	Carga nominal [N]	Deformación máxima [mm]	Esfuerzo fluencia [MPa]	Esfuerzo máximo [MPa]	Factor de seguridad
Escaleno	515.025	0,234	250	163,26	1,531
Isósceles	515.025	0,0364	250	33,108	7,551

CAPÍTULO 4: Análisis y selección de pernos en el montaje del trunnion

4.1 Descripción del proceso de montaje del trunnion de descarga

Finalizada la etapa de izaje del trunnion antiguo, se da inicio al proceso de montaje del trunnion de descarga dentro del molino SAG en su posición de origen, utilizando como apoyo el mismo sistema de sujeción empleado durante el desmontaje. En esta fase, el trunnion es reintroducido mediante un desplazamiento lateral hacia la tapa del shell, considerando inicialmente la boca al lado del flange del trunnion, en donde, el desplazamiento se logra gracias al movimiento del puente grúa disponible en Minera Los Pelambres, con ayuda del posicionamiento de los nuevos pernos hexagonales M64 tipo SPC4 (no reutilizables) y por el montaje de seis pernos guías equidistantes a largo del flange del trunnion, cuyo objetivo es montar el muñón en su posición original. Es importante mencionar que la boca del trunnion está conformada por dos mitades de distinto diámetro, donde la mitad de menor diámetro es la primera que se tiene que acoplar, siempre y cuando se hayan retirado los elementos de izaje luego de ejecutar este leve desplazamiento axial por parte del puente grúa. Principalmente, se retiran los cáncamos giratorios, con sus respectivas tuercas y grilletes, dejando así al trunnion parcialmente introducido en la tapa del shell y correctamente asentado sobre los cuatro pads.

Al terminar este último paso, continua el roscado manual de los pernos SPC4 para posicionarlos lo suficientemente dentro de la sección roscada de la tapa, y ejecutar posteriores torques. Luego, hay un instante en donde resulta imposible seguir roscando de manera manual debido al peso del componente, por lo que, se retiran pocos pernos SPC4 y se introducen pernos M64 de reemplazo diferentes a los originales de catálogo (desechables) para ejecutar un torque preliminar, de esta forma los pernos SPC4 no pierden sus propiedades mecánicas en este paso. El torque preliminar se realiza mediante llaves de impacto para unir completamente la mitad de menor diámetro de la boca del trunnion con la tapa del shell. Luego, se retiran los pernos desechables, se vuelven a reingresar los pernos originales y se prosigue con el torque final según secuencia de apriete cruzado definida por vendor, mediante llaves de torque hidráulicas para completar la unión por interferencia entre la sección de mayor diámetro de la boca con la tapa del shell y además generar un contacto 0:0 entre el flange del trunnion y la tapa.

Una vez finalizado el apriete, se considera también la medición y verificación del torque adecuado mediante el sistema de monitoreo con transductores, que se introducen en la cabeza de los pernos M64, pudiendo estudiar así su comportamiento post-montaje en términos de tensión y además post-operaciones después de cada mantención, lo cual resulta fundamental para la problemática operacional presente en este tipo de molinos. Finalmente, se completan los protocolos de verificación del junte perfecto entre uniones enflanchadas mediante la herramienta feeler gauge, y en caso de presentar deformaciones u holguras muy desproporcionadas se establecen protocolos con acciones correctivas para solucionar dicha problemática.

4.2 Descripción del problema en uniones apernadas del molino SAG

Uno de los problemas fundamentales identificados en la zona de molienda de Minera Los Pelambres corresponde al ingreso de pulpa en uniones apernadas de secciones enflanchadas, tanto en molinos

SAG como en molinos de bolas. Para contextualizar esta problemática, es importante considerar que el mineral ingresa al proceso de conminución en forma de una mezcla entre sólido y fluido, conocido en la industria minera como “pulpa”, lo cual facilita el transporte y desplazamiento del material dentro del circuito de molienda. Sin embargo, debido a su naturaleza altamente abrasiva y contaminante, parte de esta pulpa tiende a infiltrarse en zonas no deseadas del sistema, especialmente en uniones críticas como la del flange del trunnion con la zona roscada de la tapa del shell, así como en la unión entre el trunnion y el adapter, siendo en esta última un ingreso de pulpa menos agresivo.

Como consecuencia de esto, la pulpa se introduce progresivamente en los orificios de estas conexiones, alcanzando el hilo de los pernos distribuidos a lo largo del perímetro de las uniones mencionadas. Este fenómeno favorece procesos de corrosión acelerada, pérdida de precarga y, por ende, debilitamiento en la estructura del perno como se ilustra en la Figura 42, lo que incrementa significativamente la probabilidad de falla prematura por corte en comparación con condiciones sin presencia de contaminantes. Frente a este escenario, surge la necesidad de incorporar sistemas de monitoreo que permitan evaluar el estado de los pernos post-operación, en términos de tensión, con el fin de anticipar fallas y aplicar medidas preventivas frente a esto, como el reapriete de los pernos si fuera el caso.



Figura 42: Pernos contaminados y corroídos por el efecto de la pulpa.

Por otro lado, dentro del mismo proceso de molienda, también se presentan problemáticas operacionales asociadas al transporte de material no deseado dentro del circuito. En particular, se ha observado que las bolas de molienda pueden ser arrastradas por la pulpa hacia zonas no previstas, como el sistema de descarga a través del colado del trommel, permitiendo su ingreso hacia equipos posteriores como tanques de procesos (TK) o bombas centrífugas, donde generan deterioro prematuro y fallas operacionales en estos equipos. No obstante, frente a esta situación en diseños más recientes de molinos se ha comenzado a implementar el uso de trommels magnéticos, los cuales permiten atraer y retener estas bolas mediante campos magnéticos, evitando el paso hacia el circuito posterior. La solución propuesta mejoró la confiabilidad del sistema en operaciones de molienda, ya que se recuperan estos elementos y se reduce el impacto negativo sobre los equipos aguas abajo del proceso de molienda.

4.3 Selección de pernos y definición de torque de apriete en uniones críticas

4.3.1 Uniones apernadas en la sección trunnion-tapa

Siendo la unión trunnion-tapa una de las secciones más críticas abordadas en este proyecto, debido a su exposición directa al proceso de conminución, al ingreso de pulpa y a las solicitaciones dinámicas propias de la operación del molino, surge la necesidad de seleccionar pernos capaces no solo de resistir mecánicamente la unión, sino también de entregar información sobre su condición una vez operado. Frente a este escenario, se seleccionan pernos inteligentes Valley Forge SPC4 Series, de dimensiones M64, paso 6-6g, longitud 250 mm, grado 8.8 ISO 4014 ASTM-F568M 100 Thread length, debido a que este sistema de pernos puede ser monitoreado directamente en términos de su carga de apriete o clamp load, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, mediante la lectura del estado del perno a través de un sensor ubicado en su extremo que se comunica con las resistencias presentes en el perno.

A diferencia de un perno convencional, este tipo de fijación para este proyecto permite verificar la condición del perno una vez torquado en el proceso de instalación y en inspecciones periódicas, lo que resulta ventajoso en una unión donde la presencia de pulpa puede acelerar procesos de corrosión, pérdida de precarga, por ende, falla prematura. El sistema SPC4 entrega la posibilidad de visualizar el estado del perno como porcentaje de su carga de prueba o de fluencia, permitiendo tomar decisiones operacionales como reapriete o reemplazo del elemento antes de una falla inesperada [16]. Por estas razones, y considerando además que el perímetro completo del flange del trunnion requiere 96 pernos junto con igual número de golillas planas, se concluye que esta familia de pernos constituye la alternativa más adecuada para la unión, pudiendo observar uno de estos elementos en la Figura 43.

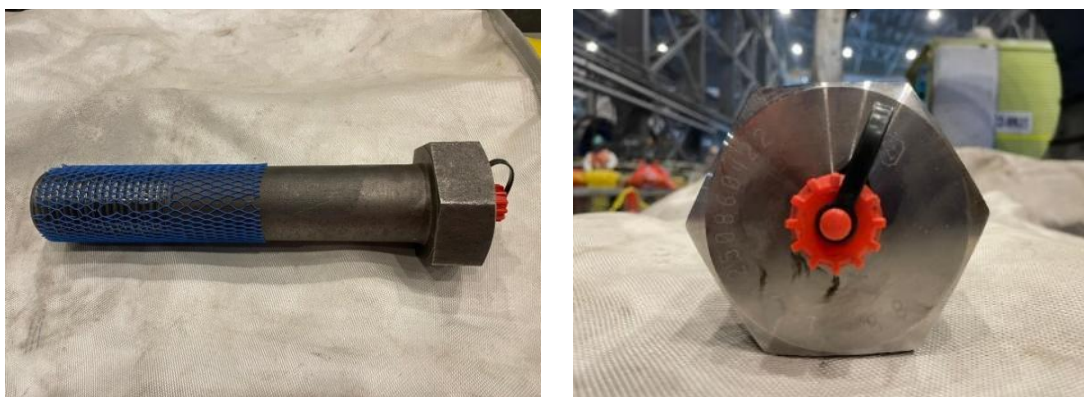


Figura 43: Perno inteligente M64 tipo SPC4 para unión trunnion-tapa.

En cuanto a los elementos complementarios de fijación, se seleccionan para esta unión golillas que dependen directamente del tipo y diámetro del perno utilizado. Por lo tanto, como se trata de pernos M64, se escogen golillas planas A66 DIN 125-300HV, donde la denominación DIN 125 corresponde a la norma dimensional de fabricación para golillas planas, mientras que A66 corresponde a la geometría compatible con el diámetro del perno utilizado en la unión.

El objetivo de usar este tipo de golilla es distribuir de mejor manera la carga de apriete bajo la cabeza del perno en este caso, reduciendo así las concentraciones de esfuerzo sobre la superficie de apoyo de

la unión. Además, es importante destacar que su condición de alta dureza (300 HV) aporta una mayor resistencia frente al aplastamiento o deformaciones superficiales durante el proceso de torque del perno, favoreciendo una transmisión adecuada de la precarga y a una correcta estabilidad mecánica de la unión apernada. Luego, se puede observar esta gollilla plana en la Figura 44, junto con su perno correspondiente.



Figura 44: Golillas planas para pernos SPC4 en la unión trunnion-tapa.

Luego, para llevar a cabo el apriete correcto de este tipo de pernos, que corresponden a elementos de gran tamaño dentro del conjunto de uniones apernadas presentes en la zona de descarga del molino SAG, es necesario disponer de un equipo certificado capaz de aplicar un torque de magnitud suficiente para asegurar un junte adecuado entre las secciones enflanchadas. De acuerdo con el catálogo técnico propuesto por el vendor del molino de Minera Los Pelambres, correspondiente a la empresa FLSmidth [17], el porcentaje de tensión para alcanzar la precarga adecuada en estos pernos inteligentes equivale a un 65%-70% de la tensión máxima que experimenta este elemento (medido con equipo SPC4) y así garantizar una correcta fijación entre el trunnion y la tapa. Esto se logra mediante un torque de 10400 Nm, en donde, el equipo seleccionado para esta operación capaz de realizar este apriete corresponde a una llave de torque hidráulica Enerpac modelo W15312X, con cabezal hexagonal de 95 mm, la cual se ilustra en la Figura 45. Este equipo permite desarrollar el torque especificado trabajando a una presión aproximada de 5000 psi, mediante el uso de una bomba hidráulica eléctrica, resultando ser esta la herramienta apropiada para la ejecución controlada y segura del montaje de esta unión crítica.



Figura 45: Llave de torque hidráulica Enerpac para apriete de pernos SPC4.

4.3.2 Uniones apernadas en la sección trunnion-adapter

En el caso de la unión crítica del molino SAG correspondiente a la sección trunnion-adapter, la conexión apernada presenta condiciones menos destacables en comparación con la unión trunnion-tapa, aun así, mantiene particularidades de diseño que deben ser consideradas de manera rigurosa. En primer lugar, es importante señalar que en esta unión la problemática asociada al ingreso de pulpa en secciones enflanchadas no demuestra gran relevancia, por lo que no existe la necesidad de incorporar pernos inteligentes como los que se utilizan en la sección anteriormente analizada. La razón principal de esta diferencia nace en que la unión trunnion-adapter no se encuentra expuesta de manera directa a los golpes de carga generados por la compactación de pulpa debido a detenciones no planificadas del equipo SAG, lo cual afecta de forma más agresiva a la unión trunnion-tapa, y entre otros fundamentos adicionales del por qué no utilizar pernos lectores, fundamentos que se definen con más detalle en la sección de propuesta de monitoreo de pernos. En consecuencia, el diseño de esta conexión se puede definir bajo criterios más convencionales de resistencia mecánica y geometría mencionados a continuación.

Definido lo anterior, la selección del perno para esta unión ya no se orienta a la necesidad de monitoreo continuo, sino a la compatibilidad geométrica y funcional con la configuración interna que tiene el adapter. A diferencia del trunnion de descarga, cuyo flange se encuentra hacia la sección exterior del componente, el flange del adapter está ubicado en su zona interna, lo que permite aprovechar este diseño para añadir secciones de recubrimiento y protección del perno frente a posibles efectos de carga, abrasión o ambientes corrosivos. Luego, esta condición obliga a seleccionar pernos capaces de ajustarse e introducirse al espacio disponible dentro de la estructura interna de la unión trunnion-adapter, además de tener una cabeza circular que compatibiliza con la condición geométrica. Por ende, se seleccionan pernos Parker M42 x 4,5 x 135 mm de grado 10.9 DIN 912 cuyo proveedor corresponde a Forymec, debido a que cumplen adecuadamente con los requerimientos dimensionales, resistentes y de montaje de esta sección. Para cubrir la circunferencia completa de la unión se requiere un total de 60 pernos, observándose uno de estos elementos en la Figura 46.



Figura 46: Perno Parker M42 para unión trunnion-adapter.

Con respecto al torque requerido para la unión apernada trunnion-adapter, y de acuerdo con las recomendaciones del fabricante [17], el apriete más adecuado para esta sección corresponde a 5.100 Nm, valor considerado suficiente para lograr un junto correcto entre el flange interno del adapter y la

sección roscada del trunnion involucrado en el presente proyecto. Así, esta magnitud de torque permite desarrollar la precarga necesaria en los pernos Parker seleccionados, transmitiendo estabilidad en este tipo de unión crítica y además es mecánicamente confiable durante la operación del conjunto. Para ejecutar esta maniobra de apriete, el equipo más adecuado corresponde a una llave de torque hidráulica Hytorc 10MXT certificada (se encuentra calibrada), que se equipa con un cabezal de pulgada y media, y requiere una presión de entrada del aceite de magnitud 3.300 psi para accionar su cilindro hidráulico que opera en conjunto con una bomba hidráulica eléctrica a través de un sistema de mangueras. El equipo de apriete utilizado para esta operación puede observarse en la Figura 47.



Figura 47: Llave de torque hidráulica Hytorc para apriete de pernos Parker.

4.3.3 Sistema de lubricación en uniones apernadas

Uno de los procesos operativos más relevantes previo al torque de las uniones apernadas presentes en los componentes de descarga del molino SAG corresponde a la lubricación del perno, especialmente en la zona del hilo. Esta tarea se aplica en distintas conexiones del sistema de descarga, tales como trunnion-tapa, trunnion-adapter, trunnion liner-adapter y trommel-adapter, siendo de interés para este proyecto las uniones trunnion-tapa y trunnion-adapter. El objetivo principal de esta operación es favorecer un deslizamiento adecuado del perno durante el apriete, en donde, disminuye la fricción entre hilos, permite una transmisión más eficiente de la carga de apriete hacia la unión, mejora la uniformidad del montaje y finalmente, agrupando todos estos aspectos técnicos, se minimiza el riesgo de deterioro prematuro de estos elementos de fijación.

Para dicha operación se emplea el lubricante Loctite LB 771 Nickel Anti-Seize, el cual puede observarse en la Figura 48, producto utilizado para evitar desgastes por fricción y facilitar el comportamiento mecánico del perno en condiciones exigentes como lo son las operaciones de molienda. En ausencia de este lubricante, la unión apernada queda expuesta a mayores niveles de fricción interna, lo cual incrementa la probabilidad de desgaste, pérdida de precarga, facilitando así el corte prematuro del perno. Esta condición resulta sumamente crítica en molinos SAG y molinos de bolas como se ha mencionado, donde las uniones se encuentran sometidas a golpes de carga

recurrentes producto de la compactación entre el mineral y las bolas (pulpa sólida), generando cargas de tracción y alta fricción en la rosca.

De manera complementaria, en las labores de mantenimiento de la zona de descarga también se utiliza una amplia variedad de productos líquidos con diferentes funciones, y no solo como lubricantes, sino también como sellantes, adhesivos, despegantes, anticorrosivos, desengrasantes, etc. Entre los más utilizados destacan los que se destinan al pegado de gomas de protección contra el manto del shell, revestimientos sobre superficies con goma y uniones específicas entre los componentes del trommel y del rock box (cajón de piedra), donde su aplicación logra una mejora en la adherencia entre piezas, aumenta el rendimiento en la recepción y conducción del material, y además reduce el desgaste prematuro de las superficies expuestas. Por esta razón, el uso de estos productos complementarios termina siendo fundamental para reforzar la confiabilidad de los componentes en la zona de descarga durante la mantención, asegurando una mejor respuesta de estos equipos frente a la criticidad del proceso de molienda.



Figura 48: Producto de lubricación Loctite LB 771 Nickel Anti-Seize.

4.4 Propuesta de sistema de monitoreo de pernos

En relación con la unión crítica trunnion-tapa, se ha mencionado ya que los pernos utilizados en el montaje corresponden a M64 grado 8.8 tipo SPC4, los cuales incorporan un sistema de monitoreo basado en resistencias ubicadas en el perno. Estas resistencias son altamente sensibles a variaciones en parámetros como la tensión del perno, permitiendo evaluar el estado estructural del perno luego de encontrarse en condiciones reales de operación. Para proteger este sistema de medición, cada sensor lector se encuentra cubierto por un elemento plástico en la cabeza del perno, cuya función es evitar daños mecánicos o contaminación que puedan generar lecturas erróneas.

El monitoreo se realiza mediante equipos de medición electrónicos SPC4 406A que operan a través de un transductor con certificación vigente, el cual se instala directamente sobre la cabeza del perno para registrar su estado de deformación mediante su tensión como se observa en la Figura 49. Estos equipos son utilizados principalmente para el cumplimiento de protocolos de torque, por un lado, para asegurar que la tensión de los pernos recién llegados se encuentre en 0 con un rango de $\pm 3\%$ de su tensión máxima (rango de medición entre 0-100%) y por otro, para el post-proceso de montaje del

trunnion, con el objetivo de verificar que la unión apernada haya alcanzado la precarga o torque adecuado y así, que los pernos se encuentren en condiciones óptimas de operación. No obstante, su uso también resulta fundamental durante detenciones programadas en zona de molienda (línea de molino SAG-bolas-bombas), permitiendo evaluar constantemente el estado de los pernos.



Figura 49: Equipo de medición SPC4 en perno inteligente.

Por otro lado, como se mencionó en la selección de pernos para la unión trunnion-adapter, los pernos utilizados son Parker convencionales M42 de grado 10.9, lo cual se justifica principalmente por tres razones: en primer lugar, la unión enflanchada de esta unión no se encuentra expuesta a golpes de carga cuando existen detenciones no programadas como sucede en múltiples ocasiones en la unión trunnion-tapa, lo cual hace que estos pernos se elonguen fuera de rangos permitidos, implicando chequeo constante. En segundo lugar, la cabeza del perno de la unión trunnion-adapter se encuentra totalmente recubierta por un revestimiento de protección llamado “lifter ring”, tal como se ilustra en la Figura 50 (perno superior en el plano de fabricación), y finalmente, la tercera justificación se basa en que, el acceso a esta zona para mantenciones resulta más expedito en términos técnicos.

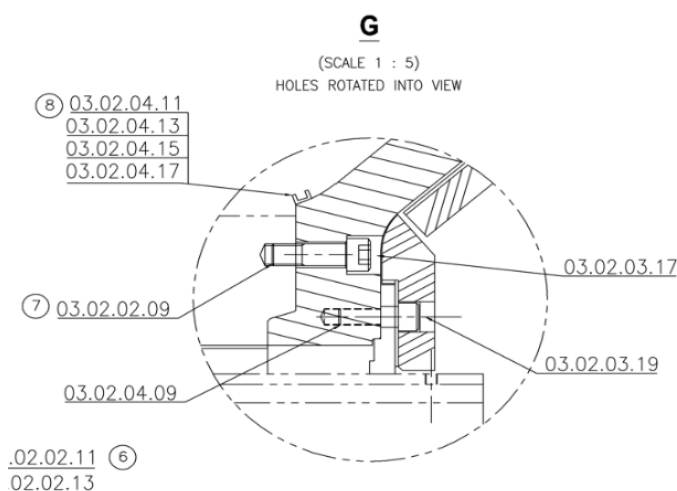


Figura 50: Plano de uniones apernadas del conjunto trunnion-adapter-trunnion liner [18].

4.5 Procedimientos de control en el montaje

4.5.1 Verificación de contacto en uniones enflanchadas

El protocolo de verificación de contacto en uniones enflanchadas forma parte de una de las etapas esenciales una vez finalizado el torque de las uniones apernadas, particularmente en las secciones trunnion-tapa del shell y trunnion-adapter, que corresponden a las uniones críticas abordadas en este proyecto. Uno de los aspectos que hace sumamente importante esta verificación de contacto, es que, a pesar de que los componentes involucrados lleguen nuevos de fábrica, las caras de los flanges de estos equipos no siempre presentan una condición superficial perfectamente lisa, ya que pueden venir con imperfecciones superficiales de pequeña magnitud, tales como rugosidades denominadas como valles o crestas de escala micrométrica, que no se pueden apreciar a simple vista.

En el caso específico de este estudio los antecedentes son diferentes, principalmente exponen que la tapa del shell y el adapter de descarga no son reemplazados por elementos nuevos como en la situación del trunnion. Luego, como no existe el recambio asociado a estos componentes, y además han estado sometido a operación continua y a múltiples golpes de carga, puede ser que en las caras de su flange ya presenten pequeñas deformaciones acumuladas producto de los múltiples servicios. Por lo tanto, aspectos como estos son lo que convierten al junte de flanges en un tema delicado e importante de verificar en el montaje, ya que una unión deficiente puede favorecer problemáticas críticas como el ingreso de pulpa hacia la sección apernada, acelerando el proceso de corrosión y corte prematuro de pernos, o incluso generar solicitaciones adicionales de tracción sobre estos pernos debido a un mal contacto entre caras.

Bajo este contexto, el procedimiento de verificación del junte entre flanges se realiza mediante la utilización de un feeler gauge de bajo espesor principalmente, cuyo objetivo principal es comprobar la existencia o no de separación entre ambas caras de la unión. El criterio esperado en esta operación es que el feeler no logre ingresar entre medio de estos flanges, lo que permite concluir que la unión presenta un contacto cara a cara adecuado, o bien que el apriete de los pernos ha sido logrado correctamente, manteniendo un gap (espacio) prácticamente nulo o dentro de tolerancias de aceptación. Por el contrario, si el feeler gauge definido en el proyecto ingresa con facilidad en la sección que se está evaluando, se activa inmediatamente una condición de alerta, ya que esto indica la posible existencia de deformaciones, rugosidades excesivas, generando así un junte imperfecto entre las superficies.

En estos casos, existen criterios de aceptación asociados a la longitud máxima de ingreso del feeler dentro de cada unión, sin embargo, cuando esta penetración resulta excesiva o demasiado profunda, deben aplicarse acciones correctivas orientadas a prevenir futuras fallas asociadas a dicha apertura, lo cual se debe realizar antes de la puesta en marcha del molino SAG. Además, aparte de este plan de acción planificado, resulta necesario repetir la inspección utilizando feelers de mayor espesor, con el fin de determinar el límite máximo admisible de separación entre los flanges y dejar registro de esta condición. Idealmente, esta verificación debe realizarse a lo largo de todo el perímetro de la sección enflanchada, ya que cualquier holgura específica en alguno de los segmentos puede afectar a largo plazo en el apriete de los pernos de la circunferencia y comprometer la integridad de la unión. A

continuación, la Figura 51 presenta los feeler gauges de distintos espesores que se utilizan para esta verificación dentro del proyecto.



Figura 51: Feeler gauge de distintos espesores para junte de flanges.

4.5.2 Acciones correctivas en el junte de flanges

En aquellos casos en que la profundidad de ingreso del feeler gauge de bajo espesor en la unión enflanchada supera los criterios de aceptación establecidos y pasa a dar alarma a la minera, como se ha mencionado, se deben establecer acciones correctivas de manera inmediata, evitando la puesta en marcha del equipo hasta definir un plan de intervención adecuado. Generalmente, como primera medida se verifica si el problema está asociado a un apriete insuficiente de los pernos de la unión en análisis. En situaciones donde es posible corroborar directamente el nivel de tensión del perno, como ocurre en la unión trunnion-tapa, se chequen los pernos inteligentes SPC4 mediante los equipos de medición por transductor para determinar si el perno ha alcanzado el porcentaje de tensión especificado por catálogo y, por ende, si su apriete es el adecuado. En cambio, en uniones donde no existe esta posibilidad de medición directa, como en la sección trunnion-adapter, la verificación del apriete se realiza mediante las unidades hidráulicas de torque, confirmando que la presión aplicada permita alcanzar el torque recomendado por el fabricante, y esto se hace desapretando los pernos en análisis ligeramente, para evitar excederse de torque. Una vez ejecutadas estas verificaciones y, si corresponde, realizados los reaprietes necesarios, debe repetirse el protocolo de inspección con feeler gauge para comprobar si el junte de flanges ahora satisface los criterios de aceptación establecidos.

Por otro lado, si a pesar de haber confirmado que el torque aplicado en la unión es el correcto, el junte continúa presentando aperturas fuera de aceptación, es altamente probable que el origen del problema corresponda a deformaciones locales o irregularidades en una de las caras del flange. Luego, con el objetivo de prevenir principalmente el ingreso de pulpa hacia la unión, además de reducir el riesgo de solicitaciones adicionales por golpes de carga, se recurre al uso de pastas sellantes especiales en las zonas comprometidas. Estas pastas corresponden a compuestos líquidos de alta viscosidad que, una vez que se aplican y se dejan a temperatura ambiente, endurecen de manera progresiva hasta formar una barrera sólida de sellado, contribuyendo así a restringir el paso de contaminantes hacia la unión.

CAPÍTULO 5: Conclusiones generales del proyecto

5.1 Conclusiones de la maniobra cambio de trunnion

Se diseñó el dispositivo de retiro del trunnion de descarga del molino SAG 02 mediante Shapr3D, conformado por la consola de retiro y la consola de empuje, considerando criterios que se orientan a disminuir las solicitaciones estructurales del sistema (tracción, flexión, etc). Posteriormente, ambas consolas fueron evaluadas en Ansys Mechanical, obteniendo factores de seguridad adecuados bajo el criterio de esfuerzo admisible de 207 MPa definido para los aceros fabricados y sometidos a carga.

Por otro lado, también se diseñaron los componentes triangulares de izaje siguiendo la geometría del muñón, la distribución de peso que tiene el trunnion y datos técnicos de los grilletes seleccionados. Las simulaciones validaron el comportamiento del trunnion suspendido frente a los elementos de izaje, ya que se determinó factor de seguridad confiable para t1, mientras que para t2 se obtuvo un valor aceptable para MLP, pero inferior al que recomienda la norma asociada a [15].

Se seleccionaron los pernos para las uniones trunnion-tapa y trunnion-adapter, justificando su elección según el tipo de unión y la problemática asociada al ingreso de pulpa. Además, se definieron los torques de apriete junto con los equipos hidráulicos requeridos por unión según especificaciones del vendor FLS y se llevaron a cabo los protocolos de control de calidad de tensiones y junte de flanges.

Agrupando estos resultados, se puede concluir que se cumplieron de manera adecuada los objetivos específicos del proyecto, por ende, se diseñó una metodología para la maniobra cambio de trunnion de descarga mediante la definición y selección de componentes con funciones específicas dentro del procedimiento. Luego, con respecto a la hipótesis planteada, la maniobra de izaje fue ejecutada de manera estructuralmente segura, debido al correcto dimensionamiento de los dispositivos fabricados, por la adecuada selección de materiales y elementos de unión. A pesar de los retrasos puntuales que hubo en tareas específicas, el proyecto global se finalizó dentro de los plazos establecidos, pero considerando que la mantención de los thrust pads no se ejecutó por falta de recursos de MLP.

5.2 Trabajos futuros

Como recomendaciones para trabajos futuros, se propone corregir los errores de dimensionamiento hallados en las maniobras de desmontaje e izaje. En el desmontaje, se recomienda definir el largo de los pernos de apoyo a partir de mediciones en terreno, no en proyecciones erróneas de Shapr3D. En el izaje, se sugiere ajustar la geometría de los elementos de sujeción de la sección superior y rediseñar t2 para aumentar su factor de seguridad conforme a la norma ASME expuesta en el presente proyecto.

Por otra parte, para la etapa de montaje del trunnion de descarga, es esencial verificar el torque aplicado en las uniones apernadas críticas mediante equipos distintos al utilizado principalmente, aun cuando este cuente con certificación vigente. Finalmente, se destaca como mejora futura la implementación del monitoreo de tensión en tiempo real de los pernos SPC4, una medida que ya se ha impulsado por MLP incorporando a la empresa Protorq para la instalación de este sistema.

Referencias

- [1] Metso. (2023). *Innovative conveyor upgrades improve safety and throughput at PNG gold mine*. Recuperado de: <https://www.metso.com/insights/case-studies/mining-and-metals/innovative-conveyor-upgrades-improve-safety-and-throughput-at-png-gold-mine/>
- [2] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (s.f.). *Guidance on Safe Sling Use-Synthetic Web Slings*. Recuperado de: <https://www.osha.gov/safe-sling-use/synth-web>
- [3] Mine Safety and Health Administration (MSHA). (2003). *Metal and Nonmetal Mine Fatal Accident Investigation Report*. Recuperado de: <https://arlweb.msha.gov/FATALS/2003/FTL03m05.HTM>
- [4] Bickford, J. H. (2007). *An introduction to the design and behavior of bolted joints* (4th ed.). CRC Press.
- [5] Metso Outotec. (2020). *Mill reline machines*. Recuperado de: <https://www.metso.com/portfolio/mill-reline-machines/>
- [6] Mammoet. (s.f.). *Skidding system*. Recuperado de: <https://www.mammoet.com/equipment/special-equipment/skidding-systems/skidding-system/>
- [7] Crosby Group. (2022). *Load monitoring systems for lifting operations*. Recuperado de: <https://kitocrosby.com/product-category/load-monitoring/>
- [8] MatWeb. (s.f.). *ASTM A572 steel, grade 50*. Recuperado de: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=9ced5dc901c54bd1aef19403d0385d7f
- [9] BeamDimensions. (s.f.). *ASTM A193 steel properties*. Recuperado de: https://beamdimensions.com/materials/Steel/ASTM/ASTM_A193/
- [10] K-Mac Distribution. (s.f.). *B7 alloy material technical data sheet*. Recuperado de: <https://kmac-distribution.com/threaded-rods/b7-alloy-data.htm>
- [11] American Institute of Steel Construction. (2022). *ANSI/AISC 360-22: Specification for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction.
- [12] Fastenal. (2009, March 6). *Mechanical properties of metric fasteners*. Recuperado de: https://crafter.fastenal.com/static-assets/pdfs/Mechanical_Properties_of_Metric_Fasteners.pdf
- [13] Nisbett, J. K., & Budynas, R. G. (2024). *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw Hill.
- [14] AZoM. (2012, 5 de julio). *ASTM A36 mild/low carbon steel*. Recuperado de: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6117>

- [15] American Society of Mechanical Engineers. (2023). *ASME BTH-1–2023: Design of below-the-hook lifting devices*. American Society of Mechanical Engineers.
- [16] Valley Forge & Bolt Mfg. Co. (2020). *SPC4™ Load Indicating System [Data sheet]*.
- [17] FLSmidth Minerals USA INC. (2003). *List of Critical Fasteners*.
- [18] FLSmidth Minerals. (2009). *Installation, Operation, and Maintenance Manual*.

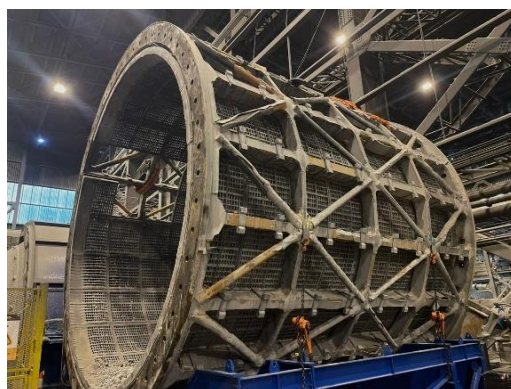
Anexos

A continuación, se puede observar en el Anexo 1 la rueda de capacho desmontada, dejando así la zona de descarga abierta en el molino SAG 02.



Anexo 1: Molino SAG 02 abierto sin rueda de capacho.

Luego, siguiendo la secuencia operativa, el Anexo 2 muestra el paso siguiente de desmontaje, que corresponde al retiro del trommel completo.



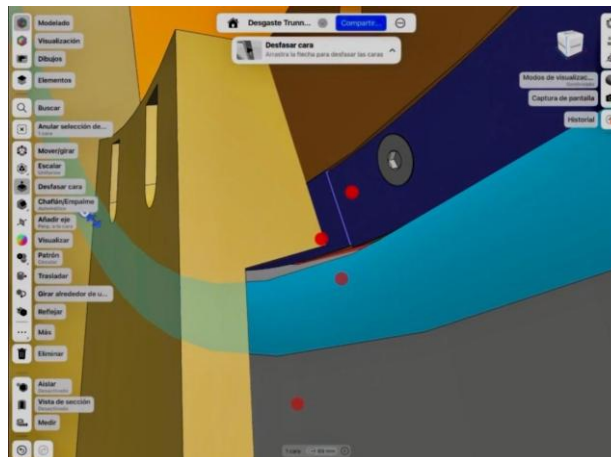
Anexo 2: Trommel retirado y montado en atril.

El Anexo 3 enseña por otro lado, el molino SAG 02 abierto en la zona de descarga sin el trommel ilustrado recientemente. Además, se pueden observar las bolas sobre el trunnion liner.



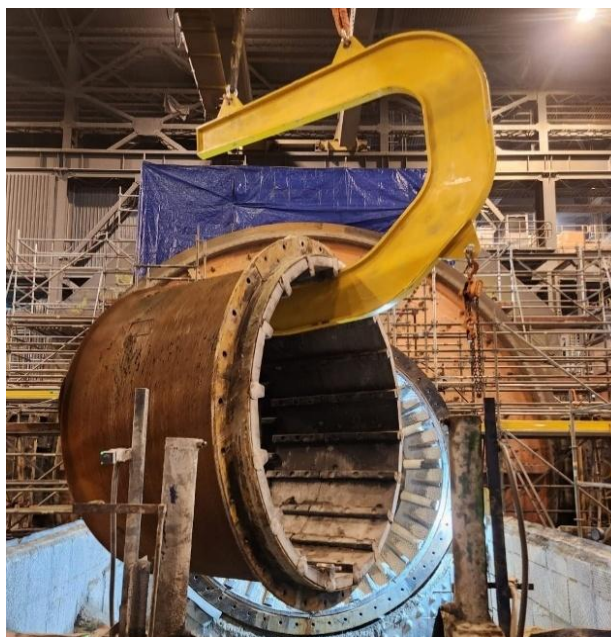
Anexo 3: Molino SAG 02 abierto sin trommel completo.

A continuación, antes de ilustrar el retiro del trunnion liner como sigue la metodología del proceso operativo en terreno, el Anexo 4 muestra la conexión específica entre este último componente y el trunnion de descarga, en donde se puede ver que el componente azul corresponde a las pletinas de revestimiento entre ambos componentes cuya función es evitar el ingreso de pulpa en este paso.



Anexo 4: Conexión trunnion liner y trunnion del molino SAG 02.

Siguiendo con la secuencia de retiro de componentes de descarga, prosigue el retiro del trunnion liner, el cual que desmontar con una actividad de izaje específica y crítica, debido a su disposición de conexión dentro del proceso operativo. Esta maniobra de izaje se puede observar en el Anexo 5, donde el objetivo principal es primeramente maniobrar un desplazamiento axial controlado para luego suspender el componente y posicionarlo en su atril correspondiente mediante el “C hook”.



Anexo 5: Retiro y maniobra de izaje del trunnion liner.

En la imagen correspondiente al Anexo 6 se puede notar el trunnion liner y el cubre descansos ya desmontados de la sección de descarga del molino SAG 02, sin embargo, cabe destacar la necesidad

de incorporar atriles para ambos elementos por protocolos de seguridad específicos definidos en la minera presente.



Anexo 6: Trunnion liner y cubre descansos desmontados.

Una vez desmontado el trunnion liner, se procede con el retiro de los pernos de la unión trunnion-adapter, se mantienen los pernos necesarios de seguridad, se instalan los elementos de izaje (cáncamos) sobre este último componente, dejando el adapter listo para ser desmontado. Luego, en el Anexo 7 se puede observar el adapter ya retirado y ubicado en el lugar gestionado según layout propuesto por Minera Los Pelambres hacia la empresa colaborativa ESR Servicios.

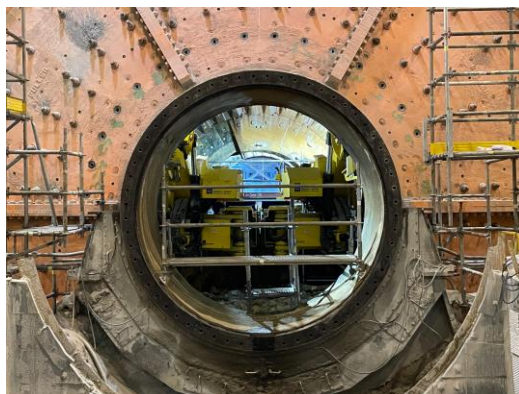


Anexo 7: Adapter retirado mediante maniobras de izaje.

Luego, se puede observar en el Anexo 8 el molino SAG 02 sólo con el trunnion montado en el lado de descarga, y cabe destacar que este es uno de los pasos previos al proceso de extracción del muñón, puesto que ya se encuentra retirada la unión apernada entre el adapter y el trunnion, pero todavía se encuentran apretados los pernos de la unión entre el trunnion y la tapa del shell.

Por lo tanto, para poder desacoplar el trunnion de su unión con interferencia, tal como se mencionó en el Capítulo 2, antes se tiene que levantar el molino en su zona de descarga mediante el uso de gatos

hidráulicos, de esta forma el peso del molino se reduce sobre los descansos, y se dice que el trunnion ya está apto para su retiro, por lo que se procede a retirar los pernos de unión tapa-trunnion.



Anexo 8: Molino SAG 02 abierto con trunnion montado.

Finalmente, en el Anexo 9 se puede observar los componentes en la zona de descarga ya desmontados, correspondientes en orden cronológico a la rueda de capacho, rock box, trommel, trunnion liner, adapter y por último el componente más crítico, el trunnion de descarga.



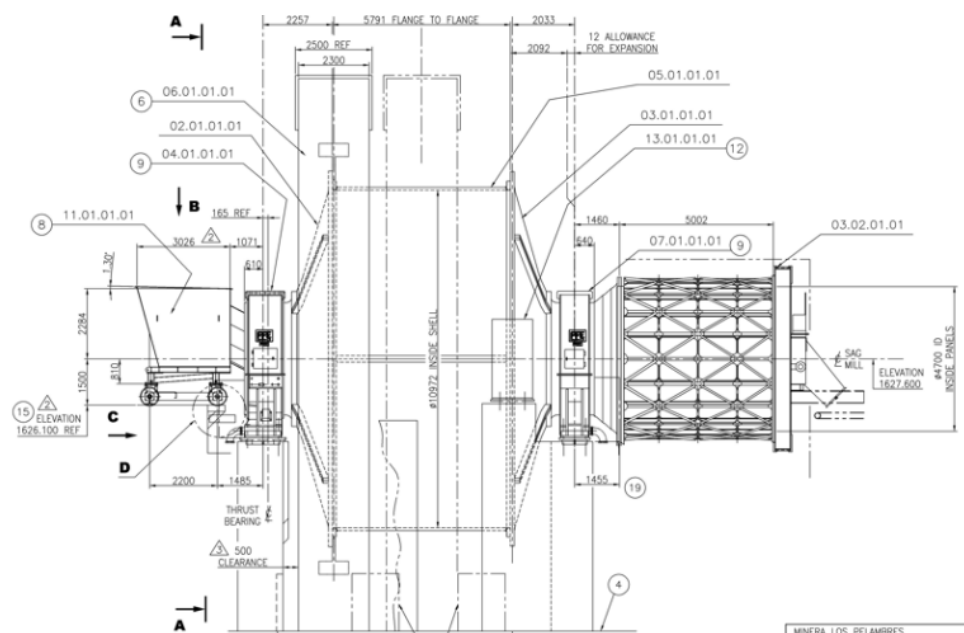
Anexo 9: Componentes de descarga retirados en el molino SAG 02.

Así, retirando todos estos componentes esenciales, queda descubierta la zona de apoyo del muñón que se ilustra en el Anexo 10, en donde se pueden presenciar los cuatro pads con sus bronces de descarga.



Anexo 10: Pads y bronces del trunnion en la zona de descarga.

El plano de fabricación correspondiente al molino SAG 02 completo se ilustra en el Anexo 11 junto a todos sus componentes desde la zona de alimentación hasta la descarga, siendo de especial interés para el proyecto el proceso aguas abajo.



Anexo 11: Plano de fabricación del molino SAG 02 [18].

En el Anexo 12 se puede observar el set que contiene al equipo de medición SPC4 406A para los pernos inteligentes de la unión trunnion-tapa, junto con el dispositivo de calibración para medir tensiones. El set completo debe cumplir con haber sido certificado de antemano al servicio, en donde, es estrictamente necesario que el dispositivo de calibración al ser utilizado para comprobación de la lectura del transductor, garantice que por un extremo muestre una tensión del 0% y por el otro extremo una tensión del 100%, sin error.



Anexo 12: Equipo de medición SPC4 con dispositivo de calibración.

Finalmente, a continuación, se pueden observar los siguientes anexos que corresponden a los protocolos mencionados en el Capítulo 4 pertenecientes al control de calidad presentado por la empresa ESR Servicios/Calafquen a Minera Los Pelambres, que hacen referencia al chequeo de porcentaje de tensión inicial de los pernos SPC4, registro de los torques aplicados y verificación de la junta de flanges, todos en relación con las uniones críticas trunnion-tapa y trunnion-adapter. Luego, siguiendo un orden cronológico de elaboración de protocolos, se da inicio con el protocolo de chequeo de tensión inicial de los pernos inteligentes observado en el Anexo 13.

CALAFQUEN		CONTROL DE CALIDAD		LOS PELAMBRES	
PROTOCOLO CHEQUEO DE ELONGACIÓN INICIAL PERNOS TRUNNION - TAPA					
Proyecto	Cambio Trunnion y Trunnion liner	Equipo	Molino SAG 2	Nº de Plano Ref.	N/A
Nº de Contrato	4540008709	Componente	Trunnion	Rev	
Cliente	Minera Los Pelambres	Unión	Trunnion - Tapa	Fecha Realización	12/04/2026
Pernos utilizados			Equipo de medición de pernos		
Datos			Datos		
Tipo de pernos	Valley	Herramienta	Equipo medidor de tensión		
Diámetro	M84 gr 9.8	Equipo	SPC4		
Longitud nominal	250 mm	Modelo			
Cantidad de pernos	96	Cabezal			
Ref. plano	NA	Rango trabajo	-3% a 3%		
Porcentaje de Tensión (%)		Torque (N.m)		Presión (PSI)	
Nº perno	1 (%)	Nº perno	1 (%)	Nº perno	1 (%)
1	-2%	33	1%	65	-1%
2	-2%	34	1%	66	0%
3	-2%	35	-1%	67	0%
4	-2%	36	2%	68	2%
5	2%	37	-1%	69	0%
6	0%	38	-1%	70	2%
7	-1%	39	-2%	71	-2%
8	2%	40	0%	72	-1%
9	0%	41	2%	73	-2%
10	0%	42	-1%	74	-3%
11	-1%	43	1%	75	-1%
12	1%	44	0%	76	-2%
13	0%	45	-1%	77	-1%
14	0%	46	1%	78	-1%
15	-1%	47	0%	79	0%
16	-1%	48	-2%	80	2%
17	-1%	49	-1%	81	-2%
18	-1%	50	0%	82	0%
19	-1%	51	0%	83	1%
20	-1%	52	0%	84	-2%
21	-2%	53	-1%	85	-2%
22	0%	54	0%	86	-2%
23	-2%	55	-2%	87	1%
24	0%	56	0%	88	-2%
25	-2%	57	-1%	89	-1%
26	0%	58	-2%	90	3%
27	3%	59	3%	91	-1%
28	1%	60	-1%	92	0%
29	-1%	61	-2%	93	-2%
30	2%	62	-1%	94	-1%
31	-1%	63	-1%	95	0%
32	-1%	64	-2%	96	2%
Nota: Torque 1 (N.m) - Tensión 1 (%)		Encargado Ejecución		Encargado Calidad Calafquen	
Status		Jefe Turno		Toma de conocimiento MLP	
☐ Aprobado	Nombre: Diego Medina	Nombre: Diego Medina	Nombre: Diego Medina	Nombre: Diego Medina	Nombre: Diego Medina
☐ Retenido	Firma: [Firma]	Firma: [Firma]	Firma: [Firma]	Firma: [Firma]	Firma: [Firma]
☐ Rechazado	Fecha: 20-04-26	Fecha: [Firma]	Fecha: 20/04/2026	Fecha: [Firma]	Fecha: [Firma]

Anexo 13: Protocolo de chequeo de tensión inicial de pernos de la unión trunnion-tapa.

Luego de elaborar el protocolo de chequeo de tensión inicial de los pernos SPC4, se está apto para proseguir con el torque adecuado de estos pernos inteligentes para alcanzar una tensión de aproximadamente 45% con respecto a su tensión máxima primeramente, puesto que ya se ha verificado su condición de reposo. Por lo tanto, en el Anexo 14 se puede observar protocolo de torque de pernos trunnion-tapa con dichos aspectos de tensión correspondiente a cada perno en la unión.

CALAFQUEN		CONTROL DE CALIDAD		LOS PELAMBRES	
PROTOCOLO DE TORQUE PERNOS TRUNNION - TAPA					
Proyecto	Cambio Trunnion y Trunnion liner	Equipo	Molino SAG 2	Nº de Plano Ref.	N/A
Nº de Control	4540008700	Componente	Trunnion	Rev	
Cliente	Minera Los Pelambres	Unión	Trunnion - Tapa	Fecha Realización	16/04/2026
Pernos utilizados			Equipo de apriete pernos		
Datos			Datos		
Tipo de pernos	Valley	Herramienta	Unidad Hidráulica		
Diámetro	M24 gr 8.8	Equipo	Enerpac		
Longitud nominal	250 mm	Modelo	W 15312 X		
Cantidad de pernos	96	Cabezal	95 mm		
Ref. plano	NA	Rango trabajo	0% - 100%		
Torque de pernos					
Porcentaje de Tensión (%)		Torque (N*m)		Presión (PSI)	
45% ± 3%				3300-3600	
Nº Tapa	1 (%)	Nº Tapa	1 (%)	Nº Tapa	1 (%)
1	45%	27	42%	53	46%
2	45%	28	42%	54	46%
3	45%	29	42%	55	46%
4	45%	30	45%	56	44%
5	44%	31	44%	57	43%
6	44%	32	45%	58	45%
7	44%	33	45%	59	47%
8	45%	34	45%	60	46%
9	44%	35	45%	61	46%
10	44%	36	45%	62	45%
11	46%	37	46%	63	44%
12	46%	38	46%	64	44%
13	45%	39	44%	65	45%
14	43%	40	43%	66	45%
15	45%	41	47%	67	45%
16	46%	42	45%	68	45%
17	46%	43	46%	69	45%
18	44%	44	46%	70	46%
19	45%	45	46%	71	46%
20	46%	46	46%	72	46%
21	46%	47	46%	73	45%
22	45%	48	45%	74	46%
23	44%	49	47%	75	46%
24	47%	50	45%	76	45%
25	43%	51	44%	77	45%
26	43%	52	45%	78	46%
Nota: Torque T (N*m) - Tensión I (%)					
Status		Encargado Ejecución	Jefe Turno	Encargado Calidad Calafquén	Toma de conocimiento MLP
☐ Aprobado ☐ Retenido ☐ Rechazado		Nombre: <u>Jose Medina</u> Firma: <u>[Firma]</u> Fecha: <u>20/04/26</u>	Nombre: Firma: Fecha:	Nombre: <u>Diego Medina</u> Firma: <u>[Firma]</u> Fecha: <u>20/04/2026</u>	Nombre: Firma: Fecha:

Anexo 14: Protocolo de torque de pernos de la unión trunnion-tapa.

Una vez aplicado el torque a los pernos SPC4 tal que tensione a estos elementos al 45% de su tensión máxima, se procede a aplicar el torque de apriete final para el junte de la unión trunnion-tapa, tensionando así a los pernos al 65% como se observa en el protocolo presente en el Anexo 15.

CALAFQUEN		CONTROL DE CALIDAD		LOS PELAMERES	
PROTOCOLO DE TORQUE PERNOS TRUNNION - TAPA					
Proyecto	Cambio Trunnion y Trunnion liner	Equipo	Molno SAG 2	Nº de Plano Ref.	N/A
Nº de Contrato	454008709	Componente	Trunnion	Rev	
Cliente	Minera Los Pelambres	Unión	Trunnion - Tapa	Fecha Realización	16/04/2026
Pernos utilizados			Equipo de apriete pernos		
Datos			Datos		
Tipo de pernos	Valley	Herramienta	Unidad Hidráulica		
Diámetro	M54 gr 8.8	Equipo	Energac		
Longitud nominal	250 mm	Modelo	W15312X		
Cantidad de pernos	95	Caberal	95 mm		
Ref. plano	N/A	Rango trabajo	0% - 100%		
Torque de pernos					
Porcentaje de Tensión [%]		Torque (N.m)		Presión (PSI)	
65% ± 3%				4400 - 5200	
Nº tapa	1 [%]	Nº tapa	1 [%]	Nº tapa	1 [%]
1	67%	27	67%	53	65%
2	66%	28	65%	54	65%
3	66%	29	65%	55	65%
4	66%	30	65%	56	65%
5	66%	31	67%	57	65%
6	66%	32	65%	58	65%
7	66%	33	67%	59	65%
8	65%	34	65%	60	65%
9	65%	35	65%	61	65%
10	67%	36	65%	62	66%
11	65%	37	65%	63	66%
12	67%	38	65%	64	66%
13	65%	39	67%	65	65%
14	65%	40	65%	66	65%
15	65%	41	67%	67	65%
16	65%	42	65%	68	66%
17	65%	43	65%	69	66%
18	65%	44	65%	70	66%
19	65%	45	65%	71	66%
20	65%	46	65%	72	66%
21	65%	47	65%	73	67%
22	65%	48	65%	74	66%
23	65%	49	65%	75	66%
24	65%	50	65%	76	65%
25	66%	51	65%	77	65%
26	66%	52	65%	78	65%
Nota: Torque 1 (N.m) - Tensión 1 [%]					
Status		Encargado Ejecución		Encargado Calidad Calafquen	
☐ Aprobado ☐ Retenido ☐ Rechazado		Nombre: <u>Jose Medina</u> Firma: <u>[Firma]</u> Fecha: <u>20-04-26</u>		Nombre: <u>Diego Medina</u> Firma: <u>[Firma]</u> Fecha: <u>20/04/2026</u>	
		Toma de conocimiento M.P.			

Anexo 15: Protocolo de torque de pernos de la unión trunnion-tapa.

Finalizado el torque con su respectivo protocolo para la union trunnion-tapa, se verifica mediante el feeler gauge la unión enflanchada y se registran los siguientes valores de profundidad del feeler en el protocolo de junta flanges mostrado en el Anexo 16. Se pueden ver que en más de una posición presente en esta sección circular, hay deformaciones que se atribuyen a la tapa del shell desgastada.

CALAFQUEN		CONTROL DE CALIDAD		LOS PELAMBRES																																																			
Protocolo de unión TRUNNION - TAPA GAP junta de flange circunferencial																																																							
Proyecto	Cambio Trunnion y Trunnion liner	Equipo	Molino SAG 2	N° de Plano Ref.																																																			
N° de Contrato	4540008709	Componente	Trunnion Descarga	Rev.																																																			
Cliente	Minera Los Pelambres	Unión	Trunnion - Tapa	Fecha Realización	17/04/2026																																																		
SECCION																																																							
Realizado (%)																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="12">FELLER GAUGE DETH</th> </tr> <tr> <th colspan="12">POSICION</th> </tr> <tr> <th>Feller Gauge</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.05</td> <td>2"</td> <td>5"</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>						FELLER GAUGE DETH												POSICION												Feller Gauge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0.05	2"	5"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FELLER GAUGE DETH																																																							
POSICION																																																							
Feller Gauge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																											
0.05	2"	5"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="12">FELLER GAUGE DETH</th> </tr> <tr> <th colspan="12">POSICION</th> </tr> <tr> <th>Feller Gauge</th> <th>13</th> <th>14</th> <th>15</th> <th>16</th> <th>17</th> <th>18</th> <th>19</th> <th>20</th> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> <th>24</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.05</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>4.15"</td> <td>4.15"</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>2"</td> <td>4.15"</td> </tr> </tbody> </table>						FELLER GAUGE DETH												POSICION												Feller Gauge	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	0.05	0	0	0	0	0	0	4.15"	4.15"	0	0	2"	4.15"
FELLER GAUGE DETH																																																							
POSICION																																																							
Feller Gauge	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24																																											
0.05	0	0	0	0	0	0	4.15"	4.15"	0	0	2"	4.15"																																											
OBSERVACIONES: Cada posición contempla 4 pernos. del número de la tapa 92 al 93, del 4 al 6 y del 76 al 78, el flange de la tapa presenta deformaciones.																																																							
LOS SIGUIENTES CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/RECHAZO																																																							
6 - UN FELLER GAUGE DE 0.05 NO DEBERÁ ENTRAR EN UNA JUNTA DE BRIDA MÁS DE 30 MM EN LA ZONA COMO SE MUESTRA																																																							
Status	Encargado Ejecución	Jefe Turno	Encargado Calidad calafquen	Toma de conocimiento MLP																																																			
☐ Aprobado ☐ Retenido ☐ Rechazado	Nombre: José Hacia Firma: [Firma] Fecha: 20-04-26	Nombre: Firma: Fecha:	Nombre: Diego Medina Firma: [Firma] Fecha: 20/04/26	Nombre: Firma: Fecha:																																																			

Anexo 16: Protocolo de unión trunnion-tapa GAP junta de flange circunferencial.

Iniciando los protocolos correspondientes a la unión trunnion-adapter, se puede observar en el Anexo 17 los torques aplicados a los pernos Parker, que corresponden a un 50% del torque final para esta unión. Se realiza un torqueo por partes para no sobrepasarse de la carga de apriete correspondiente por catálogo, además de estudiar el comportamiento del perno de antemano.

CALAFQUEN		CONTROL DE CALIDAD		LOS PELAMBRES	
PROTOCOLO DE TORQUE PERNOS TRUNNION - ADAPTER					
Proyecto	Cambio Trunnion y Trunnion liner	Equipo	Molino SAG 2	Nº de Plano Ref.	NA
Nº de Control	454000709	Componente	Adapter	Rev	
Cliente	Mina Los Pelambres	Unión	Trunnion - Adapter	Fecha Realización	17/04/2026
Pernos utilizados		Equipo de apriete pernos			
Detalle		Detalle			
Tipo de perno	Parker	Herramienta	Unidad Hidráulica		
Diámetro	M42 gr 10.9	Equipo	Hytorc		
Longitud nominal	135 mm	Modelo	10 MXT		
Cantidad de pernos	60	Catálogo	1" 1/2		
Ref. plano	NA	Rango trabajo	0-100%		
Torque de pernos					
Porcentaje de Torque (%)		Torque (N.m)		Presión (PSI)	
50%		2550		1700	
Nº perno	T (N) Nm	Nº perno	T (N) Nm	Nº perno	T (N) Nm
1	2550	27	2550	53	2550
2	2550	28	2550	54	2550
3	2550	29	2550	55	2550
4	2550	30	2550	56	2550
5	2550	31	2550	57	2550
6	2550	32	2550	58	2550
7	2550	33	2550	59	2550
8	2550	34	2550	60	2550
9	2550	35	2550	61	2550
10	2550	36	2550	62	2550
11	2550	37	2550	63	2550
12	2550	38	2550	64	2550
13	2550	39	2550	65	2550
14	2550	40	2550	66	2550
15	2550	41	2550	67	2550
16	2550	42	2550	68	2550
17	2550	43	2550	69	2550
18	2550	44	2550	70	2550
19	2550	45	2550	71	2550
20	2550	46	2550	72	2550
21	2550	47	2550	73	2550
22	2550	48	2550	74	2550
23	2550	49	2550	75	2550
24	2550	50	2550	76	2550
25	2550	51	2550	77	2550
26	2550	52	2550	78	2550
Nota: Torque (N.m) - Presión (PSI)					
Encargado Ejecución		Jefe Turno		Encargado Calidad Calafquen	
Nombre: <u>Diego Medina</u>		Nombre: <u>Diego Medina</u>		Nombre: <u>Diego Medina</u>	
Firma: <u>[Firma]</u>		Firma: <u>[Firma]</u>		Firma: <u>[Firma]</u>	
Fecha: <u>20-04-26</u>		Fecha: <u>20-04-26</u>		Fecha: <u>20-04-2026</u>	
Estado		Toma de conocimiento M.P.		Toma de conocimiento M.P.	
☐ Aprobado ☐ Retenido ☐ Rechazado		☐ Aprobado ☐ Retenido ☐ Rechazado		☐ Aprobado ☐ Retenido ☐ Rechazado	

Anexo 17: Protocolo de torque de pernos de la unión trunnion-adapter.

Continuando con el torque final de apriete de los pernos Parker trunnion-adapter, en el protocolo presente en el Anexo 18 se puede ver el equipo utilizado para la unión, además la magnitud específica que se aplica en el cabezal.

CALAFQUEN		CONTROL DE CALIDAD		LOS PELAMBRES	
PROTOCOLO DE TORQUE PERNOS TRUNNION - ADAPTER					
Proyecto	Cambio Trunnion y Trunnion Iner	Equipo	Molito SAG 2	N° de Plano Ref.	NA
N° de Contrato	4540008739	Componente	Adapter	Rev.	
Cliente	Mina Los Pelambres	Unión	Trunnion - Adapter	Fecha Realización	17/04/2026
Pernos utilizados		Equipo de apriete pernos			
Detalle		Detalle			
Tipo de perno	Parker	Herramienta	Unidad Hidráulica		
Diametro	M42 gr 10.9	Equipo	Hytorc		
Longitud nominal	135 mm	Modelo	10 MXT		
Cantidad de pernos	60	Cabezal	1" 1/2		
Ref. plano	NA	Rango trabajo	0-100%		
Torque de pernos					
Porcentaje de Torque (%)		Torque [N.m]		Presión [PSI]	
100 %		5100		3300	
N°perno	T [N] Nm	N°perno	T [N] Nm	N°perno	T [N] Nm
1	5100	27	5100	53	5100
2	5100	28	5100	54	5100
3	5100	29	5100	55	5100
4	5100	30	5100	56	5100
5	5100	31	5100	57	5100
6	5100	32	5100	58	5100
7	5100	33	5100	59	5100
8	5100	34	5100	60	5100
9	5100	35	5100	61	5100
10	5100	36	5100	62	5100
11	5100	37	5100	63	5100
12	5100	38	5100	64	5100
13	5100	39	5100	65	5100
14	5100	40	5100	66	5100
15	5100	41	5100	67	5100
16	5100	42	5100	68	5100
17	5100	43	5100	69	5100
18	5100	44	5100	70	5100
19	5100	45	5100	71	5100
20	5100	46	5100	72	5100
21	5100	47	5100	73	5100
22	5100	48	5100	74	5100
23	5100	49	5100	75	5100
24	5100	50	5100	76	5100
25	5100	51	5100	77	5100
26	5100	52	5100	78	5100
Nota: Torque T [N.m] - Torque I (%)					
Estado		Encargado Ejecución		Encargado Calidad Calafquen	
☐ Aprobado ☐ Retenido ☐ Rechazado		Nombre: <u>Jorge Roldán</u> Firma: <u>[Firma]</u> Fecha: <u>20-04-26</u>		Nombre: <u>Jorge Medina</u> Firma: <u>[Firma]</u> Fecha: <u>20/04/2026</u>	

Anexo 18: Protocolo de torque de pernos de la unión trunnion-adapter.

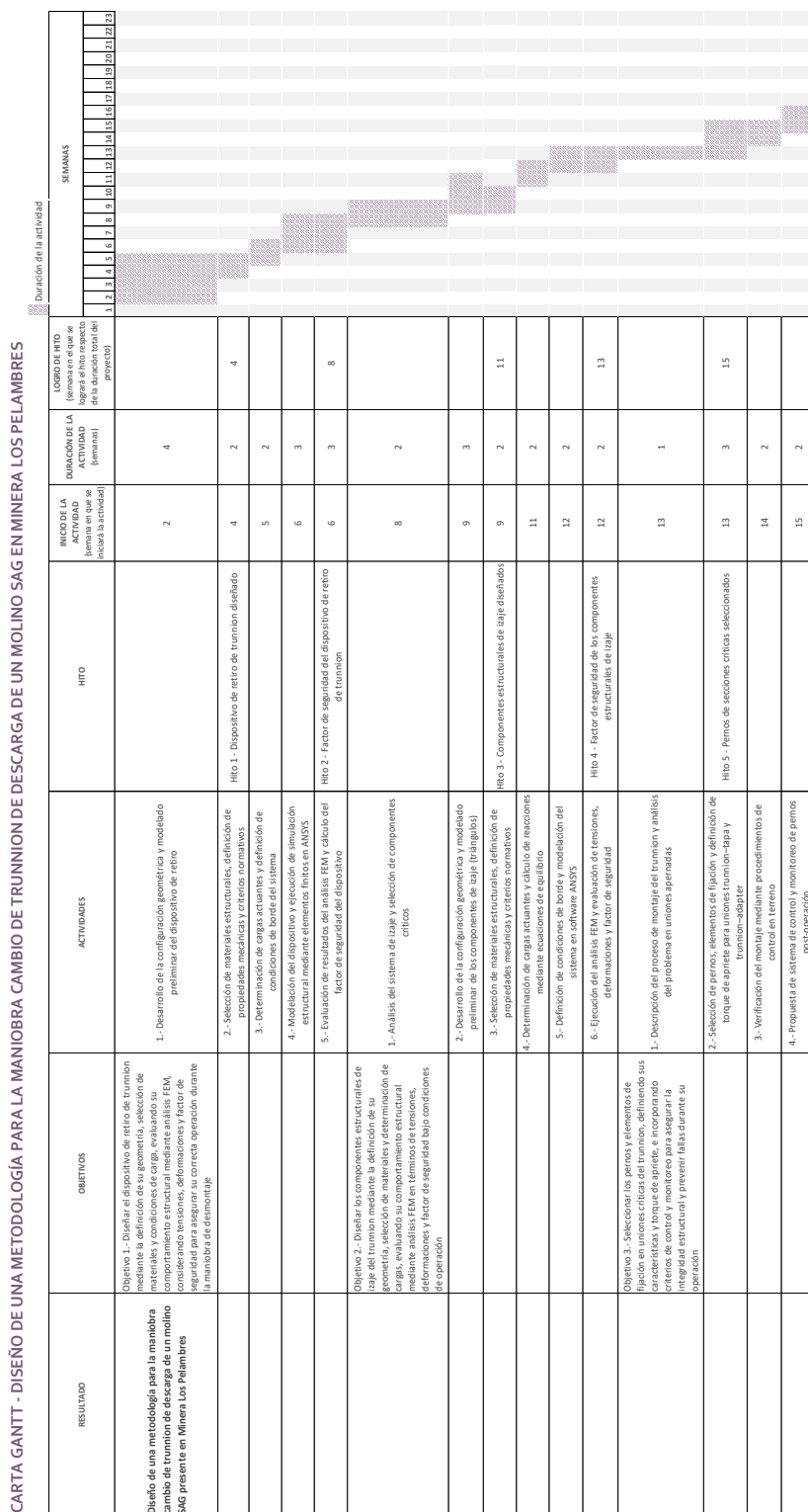
Como último protocolo establecido para efectos de este informe, corresponde el protocolo de junta de flanges para la unión trunnion-adapter, en donde, según el Anexo 19, se puede observar que el junta no presenta ninguna deformación u holgura, asegurando así un junta perfecto de las caras de los flanges gracias al torque aplicado a estos pernos Parker.

CALAFQUEN		CONTROL DE CALIDAD		LOS PELAMBRES																																																																																																									
PR-SGI-08 Protocolo de unión TRUNNION - ADAPTER GAP junta de flange circunferencial																																																																																																													
Proyecto	Cambio Trunnion y Trunnion liner	Equipo	Molino SAG 2	N° de Plano Ref.																																																																																																									
N° de Contrato	4540008709	Componente	Trunnion	Rev.																																																																																																									
Cliente	Minera Los Pelambres	Unión	Trunnion - Adapter	Fecha Realización	18/04/2026																																																																																																								
SECCION																																																																																																													
Realizado (%)																																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="13">FELLER GAUGE DETH</th> </tr> <tr> <th colspan="13">POSICION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Feller Gauge</td> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td> </tr> <tr> <td>0.05</td> <td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="13">FELLER GAUGE DETH</th> </tr> <tr> <th colspan="13">POSICION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Feller Gauge</td> <td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td> </tr> <tr> <td>0.05</td> <td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td> </tr> </tbody> </table>						FELLER GAUGE DETH													POSICION													Feller Gauge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	FELLER GAUGE DETH													POSICION													Feller Gauge	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FELLER GAUGE DETH																																																																																																													
POSICION																																																																																																													
Feller Gauge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																																	
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																	
FELLER GAUGE DETH																																																																																																													
POSICION																																																																																																													
Feller Gauge	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24																																																																																																	
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																	
OBSERVACIONES El junta de flanges trunnion - adapter no presenta deformaciones. Cada posición contempla 5 pernos.																																																																																																													
LOS SIGUIENTES CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/RECHAZO																																																																																																													
6.- UN FELLER GAUGE DE 0.05 NO DEBERÁ ENTRAR EN UNA JUNTA DE BRIDA MÁS DE 30 MM EN LA ZONA COMO SE MUESTRA																																																																																																													
Status	Encargado Ejecución	Jefe Turno	Encargado Calidad Calafquen	Toma de conocimiento MLP																																																																																																									
☐ Aprobado ☐ Retenido ☐ Rechazado	Nombre: <u>José Medina</u> Firma: <u>[Firma]</u> Fecha: <u>20-04-26</u>	Nombre: Firma: Fecha:	Nombre: <u>Diego Medina</u> Firma: <u>[Firma]</u> Fecha: <u>20/04/26</u>	Nombre: Firma: Fecha:																																																																																																									

Anexo 19: Protocolo de unión trunnio-adapter GAP junta de flange circunferencial.

7.1 Carta Gantt

Para cumplir con la metodología que conlleva al desarrollo de la solución propuesta, se elabora una Carta Gantt para planificar la ejecución del proyecto que se ilustra en el Anexo 20.



Anexo 20: Carta Gantt para planificar la ejecución del proyecto.

7.2 Validación del desmontaje del trunnion de descarga

El siguiente apartado tiene como objetivo exponer de manera secuencial el procedimiento que fue ejecutado en terreno en la Planta Concentradora de Minera Los Pelambres, con el fin de validar en la práctica la propuesta de desmontaje del trunnion de descarga desarrollada previamente mediante los criterios de diseño, cálculo y análisis estructural. En este contexto, la Anexo 21 muestra la zona de trabajo una vez retirados los restantes componentes rotatorios de la descarga del molino, observándose los andamios armados sobre y al costado del trunnion, condición necesaria para acceder de manera segura a la unión crítica entre el muñón y la tapa del shell.



Anexo 21: Instalación de andamios y retiro de pernos inteligentes en la unión trunnion-tapa.

El armado de andamios señalado es una de las actividades más relevantes viéndolo desde el contexto de seguridad en terreno, que acredita seguridad en trabajos de altura en alrededores del molino SAG. Antes de esta actividad siempre se exigen una serie de protocolos que acrediten que la ejecución del trabajo se desarrollará bajo condiciones oportunas. Dentro de estos requerimientos son fundamentales la aprobación de cursos para el ingreso a Minera Los Pelambres, como el de trabajo en altura, bloqueo de seguridad, IRL Planta Concentradora, además de contar con la certificación vigente de los equipos y herramientas requeridos para la tarea específica. En este caso, como el desmontaje del trunnion de descarga contempla trabajos en altura, el cliente exige mantener vigentes los arneses de seguridad con sus ganchos de anclaje, cuerda de vida y EPP necesario según tipo de intervención.

Contando con estos antecedentes ya regularizados, durante el turno de trabajo deben firmarse también los documentos que acreditan el conocimiento de la tarea y de sus riesgos asociados. Entre ellos se encuentra la charla de inicio previo al trabajo, en la que se exponen aspectos críticos de seguridad y cuidados de la actividad a ejecutar, el permiso de ingreso al área exigido por MLP, y el ART, uno de los documentos más importantes dentro del proceso, ya que en él se detallan las actividades de riesgo a las que se encuentran expuestos los trabajadores durante la ejecución, revisado y aprobado por el supervisor responsable. Finalmente, el último paso previo al inicio de la actividad corresponde al bloqueo de seguridad, que considera candados y llaves de la propia empresa contratista, cada uno con su respectivo código de identificación, y la tarjeta de información personal del trabajador. Una vez que se cumplen todas estas restricciones, el personal queda acreditado para ingresar al área de trabajo

y continuar con la metodología definida, siempre que el sector se encuentre ya segregado, con sus respectivas barreras, conos de seguridad y además con los andamios instalados para garantizar un trabajo seguro en altura, tal como se ilustró en el Anexo 21.

Cuando se trata del procedimiento de bloqueo de equipos, el criterio de energía cero debe aplicarse con suma cautela, ya que recae en el primer personal responsable del bloqueo la obligación de verificar que el equipo, molino SAG 02 en este caso, quede completamente aislado de toda fuente de energía que genere movimiento, accionamiento o liberación de riesgos asociados a sus componentes. Una vez confirmada esta condición y resguardados los posibles peligros de puesta en marcha, el resto del personal queda autorizado para instalar sus propios bloqueos y acceder a la zona de trabajo. Como aspectos importantes, se considera fundamental retirar la tarjeta personal de bloqueo cuando el trabajador abandone el área en cuestión por un largo periodo, como en horarios de colación o en traslados hacia otras zonas, ya que el equipo no debe operar bajo ninguna circunstancia mientras exista cualquier bloqueo activo en la caja de bloqueo, lo cual es totalmente coherente con la lógica de protección del personal y control que se lleva de la intervención.

En el mismo Anexo 21 también se aprecia a los maestros ejecutando el retiro de gran parte de los pernos inteligentes SPC4 como etapa previa a la instalación de los componentes de extracción, pero siempre dejando los pernos de seguridad correspondientes. Posteriormente, una vez finalizado el desapriete y retiro de todos los pernos, manteniendo siempre la cantidad suficiente para garantizar seguridad y prevención de riesgos, se prepara el trunnion de descarga con su housekeeping en la zona de apoyo donde se montan las consolas de empuje, y se da inicio al izaje de ambas consolas del dispositivo de extracción, donde se posicionan de manera estratégica para ejecutar el accionamiento del cilindro hidráulico sin problemas. El Anexo 22 muestra el izaje y montaje de ambos componentes, donde se montan primero las consolas de retiro, apernando cada una de sus secciones a la zona roscada del trunnion, para posteriormente continuar con la instalación de la consola de empuje, pernos de apoyo y completar así el ensamblaje mecánico del dispositivo de extracción. Es importante notar que, ya instaladas ambas consolas junto con los pernos de apoyo, se procede a soltar los pernos SPC4 de seguridad que inicialmente se dejan montados, de modo que el trunnion se habilite para deslizar axialmente sobre los pernos largos y desacoplarse lentamente de su unión con la tapa de descarga.



Anexo 22: Izaje e instalación de las consolas del dispositivo de extracción.

Durante el proceso de montaje e instalación de los componentes que conforman el dispositivo de extracción del trunnion, la mayor parte de los ensambles se ejecutaron sin inconvenientes. Sin embargo, mientras se montaban los componentes se tuvo que dar aviso de un error operativo relacionado con la fabricación de los pernos de apoyo M64 x 650 mm, elementos que debían cumplir simultáneamente la función de soporte-ensamble con la consola de empuje y de guía para el deslizamiento controlado del trunnion una vez desacoplado de la tapa de descarga. El inconveniente nace de un sobredimensionamiento en el largo de estos pernos producto de una proyección geométrica errónea desarrollada en Shapr3D, lo que derivó en una longitud que no permitió el posicionamiento adecuado del sistema de retiro. Específicamente, se constató que el gato hidráulico no lograba ubicarse correctamente sobre la consola de empuje (completo), impidiendo así alcanzar la configuración requerida para su accionamiento. Esta situación generó la necesidad de reemplazar dichos pernos por otros pernos M64 de menor longitud en esta sección de apoyo, de esta forma poder recuperar la posición de diseño establecida para el gato hidráulico y asegurar el funcionamiento adecuado del mecanismo durante la etapa de extracción.

Finalmente, frente al inconveniente detectado en terreno, se opta por utilizar pernos M64 de mayor longitud que los pernos originales de catálogo FLS correspondientes a esta unión trunnion-tapa, ya que con estos elementos de fijación se logra mantener la función de deslizamiento controlado del componente durante la extracción y apoyo del sistema global. Luego, en el Anexo 23 se pueden observar todos los elementos del sistema ya ensamblados correctamente y preparados para el accionamiento del pistón hidráulico mediante la bomba manual conectada al circuito. Una vez iniciada la ejecución del sistema hidráulico, los resultados operacionales indicaron que para lograr el despegue por interferencia entre el trunnion y la tapa fue necesaria una presión de 6.000 psi por parte de la bomba, equivalente a una carga del pistón de aproximadamente 60 ton, mientras que para continuar el empuje del componente una vez vencida la interferencia solo se requirieron alrededor de 3.000 psi. Si bien la carga utilizada para el desacople resultó superior a las 40 ton consideradas inicialmente en el diseño estructural, el factor de seguridad obtenido para el sistema, correspondiente a 1,725, respalda sin problema que la estructura del dispositivo cuenta con capacidad suficiente para soportar esta carga más alta de 60 toneladas, lo cual se observó en terreno una vez desacopló la interferencia que mantenía el muñón de descarga con la tapa.

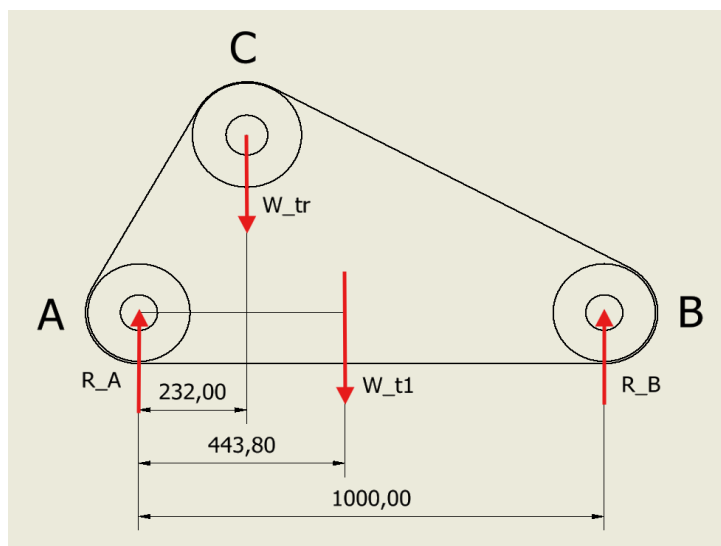


Anexo 23: Accionamiento del dispositivo de extracción del trunnion de descarga.

7.3 Análisis estático mediante ecuaciones de equilibrio

El objetivo principal del respectivo análisis estático consiste en determinar las reacciones inferiores correspondientes a cada uno de los orificios de los triángulos de sujeción, ya que estas forman parte crítica para definir la tracción ejercida sobre estos elementos y, por ende, condicionan las bases de entrada para la modelación estructural posterior mediante elementos finitos. Siguiendo este contexto, las reacciones que se obtienen a partir de las ecuaciones de equilibrio se ingresan directamente a la simulación FEM (Static Structural) en unidades de Newton y como vectores aplicados principalmente en la dirección Y, considerando que la inclinación real de las cargas respecto a la vertical puede despreciarse para efectos del modelo. Esta simplificación se justifica en que el ángulo asociado a dichas reacciones es muy pequeño, condición que se genera porque la longitud de la base de cada triángulo es levemente menor al ancho del trunnion según la vista que se consideró para el diseño de estos componentes triangulares. Como consecuencia, los elementos de izaje complementarios trabajan con una inclinación mínima durante la maniobra, por lo cual se asume que la componente que predomina en la tracción se desarrolla en sentido vertical.

En primer lugar, el análisis estático se desarrolla para el triángulo superior t1, ya que las reacciones del triángulo t2 dependen directamente de la magnitud obtenida en el orificio B de t1, tal como se puede apreciar en el Anexo 24. En la figura también se ilustran las reacciones restantes A y C, en donde las reacciones inferiores son la que se determinan a partir de las ecuaciones de equilibrio aplicadas al triángulo, mientras que la reacción en C se define previamente del análisis de DCL realizado sobre el grillete que conecta con este orificio. A partir de este análisis complementario, se establece que la reacción en C corresponde al mismo peso del trunnion de descarga, considerado anteriormente en 52,5 ton de acuerdo con los criterios definidos por el cliente, equivalente a 515.025 N. Además, es importante detallar que el punto C es la fijación principal del triángulo superior dentro del análisis estructural, por lo que posteriormente se define como punto fijo para representar correctamente la tracción que se genera en los orificios inferiores del dispositivo.



Anexo 24: DCL de cargas aplicadas sobre el triángulo superior, Inventor.

El peso propio del triángulo superior también pasa siendo un parámetro relevante dentro del análisis, ya que, al tener una magnitud considerada alta, afecta directamente en las reacciones que desarrollan los orificios inferiores y, por lo tanto, no puede ser despreciado en el planteamiento del diagrama de cuerpo libre. De acuerdo con la información obtenida mediante Inventor, este componente presenta una masa de 250,309 kg, en donde al ser relacionada con la aceleración gravitatoria, equivale aproximadamente a 2.455,531 N. Para determinar esta masa fue necesario ingresar previamente en el software las propiedades físicas y mecánicas correspondientes al acero ASTM A36, permitiendo así que el programa evalúe la masa total del cuerpo rígido completo a partir de su geometría y material definido. De forma complementaria, utilizando además las herramientas de inspección disponibles en Inventor, fue posible identificar la posición específica del centro de gravedad del triángulo superior, pudiendo definir así de manera adecuada la ubicación del vector peso del componente dentro del análisis estático.

Entonces, una vez conocida la magnitud del peso del triángulo t1, se procede a plantear las ecuaciones de equilibrio estático a partir del DCL mostrado anteriormente, con el fin de determinar las reacciones A y B correspondientes a los orificios inferiores. Para ello, se decide en primer lugar apoyarse de la ecuación de sumatoria de momento respecto de un punto específico, igualándola a cero como condición de equilibrio. En este caso, es conveniente momentar respecto al punto A, con el objetivo de determinar la reacción en B del triángulo superior y, posteriormente, obtener la magnitud de R_A mediante el apoyo de la sumatoria de fuerzas. Este desarrollo se presenta en la ecuación siguiente.

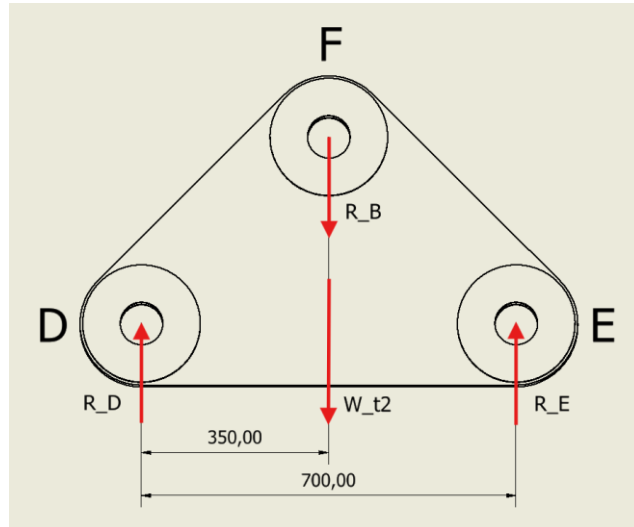
$$\begin{aligned}\sum M_A = 0 &\Rightarrow -232 \cdot W_{tr} - 443,80 \cdot W_{t1} + 1000 \cdot R_B = 0 \\ &\Rightarrow 1000 \cdot R_B = 232 \cdot 515.025 + 443,80 \cdot 2.455,531 \\ &\Rightarrow R_B = 120.575,565 [N]\end{aligned}\tag{21}$$

Luego, para determinar la reacción del orificio A y dejar definidas las cargas actuantes en la tracción del triángulo t1, basta con plantear la sumatoria de fuerzas en la dirección Y e igualarla a cero, tal como se muestra en la ecuación siguiente.

$$\begin{aligned}\sum F_y = 0 &\Rightarrow R_A + R_B = W_{tr} + W_{t1} \\ \Rightarrow R_A &= 515.025 + 2.455,531 - 120.575,565 \\ &\Rightarrow R_A = 396.904,966 [N]\end{aligned}\tag{22}$$

Por lo tanto, conocida ya la magnitud correspondiente a la reacción del orificio B, se procede a vincular esta carga hacia el análisis del triángulo inferior t2. Para esto, se consideran previamente los diagramas de cuerpo libre de los dos grilletes que conectan a ambos dispositivos triangulares, observándose así que cada uno de estos elementos se encuentra sometido únicamente a dos fuerzas que deben ser iguales en magnitud, colineales y de sentido opuesto, las cuales corresponden a la magnitud de R_B obtenida en el análisis del triángulo superior. En consecuencia, esta misma reacción se transmite hacia el orificio superior del triángulo t2 por parte del último grillete.

A partir de este antecedente, se plantea el DCL del triángulo de izaje t2, el cual se presenta en el Anexo 25, elaborado a partir de los planos de fabricación desarrollados en Inventor. El uso de este dibujo geométrico es importante, ya que muestra con precisión las distancias asociadas a cada fuerza, expresadas en mm, fundamental para el confeccionamiento de las ecuaciones de equilibrio estático y la determinación de las reacciones en los orificios inferiores del triángulo t2.



Anexo 25: DCL de cargas aplicadas sobre el triángulo inferior, Inventor.

Ahora bien, es importante mencionar dos aspectos críticos antes de plantear las ecuaciones de equilibrio para el triángulo t2. Por un lado, al igual que en el caso del triángulo t1, la masa propia del componente fue determinada mediante Inventor, determinando un valor de 150,287 kg, equivalente a 1.474,315 N. Esta carga se aplica en el centro de gravedad del componente, ubicación que coincide con el mismo eje vertical del centro del orificio superior de t2, condición que se explica por la geometría simétrica del dispositivo triangular.

Por otro lado, esta misma condición geométrica permite simplificar directamente el análisis estático del triángulo inferior, ya que, al tratarse de un dispositivo de forma isósceles y encontrarse además posicionado en el eje del punto medio de la sección roscada del trunnion de descarga, las reacciones D y E que se muestran en la figura anterior resultan iguales en magnitud. Considerando esto, no es necesario recurrir inicialmente a una ecuación de momentos para obtener cada reacción por separado, siendo suficiente plantear una sumatoria de fuerzas en la dirección Y. De esta manera, se obtienen directamente las reacciones en ambos orificios inferiores del triángulo t2, las que son utilizadas posteriormente como cargas de entrada en las condiciones de borde de Ansys Mechanical para el análisis estructural del componente, esto es:

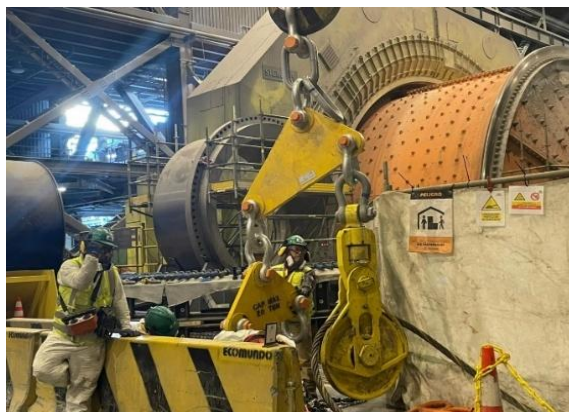
$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Rightarrow R_D + R_E = R_B + W_{t2} \\ \Rightarrow 2 \cdot R_D &= 120.575,565 + 1.474,315 \\ \Rightarrow R_D &= 61.024,94 \text{ [N]} \\ \Rightarrow R_E &= 61.024,94 \text{ [N]} \end{aligned} \tag{23}$$

7.4 Validación del izaje del trunnion de descarga

Mientras se ejecutaba el desacople completo del trunnion de descarga respecto de la tapa del shell, se desarrollaron en paralelo diversas actividades orientadas a preparar la etapa de suspensión del componente. Dentro de estos trabajos se contempló la instalación completa del sistema de izaje del trunnion, tal como se muestra en el Anexo 26, considerando que, en un punto específico del procedimiento de retiro se requeriría incorporar progresivamente este sistema completo una vez instalados los cáncamos giratorios sobre el componente. Por lo tanto, la transición entre ambas etapas se fue ejecutando de manera coordinada, dejando el arreglo de sujeción preparado antes del retiro final del trunnion desde sus apoyos.

Durante el proceso de montaje de los componentes involucrados en la suspensión, se identificaron dos inconvenientes operacionales que pudieron ser corregidos de manera rápida en terreno sin afectar directamente al exceso de carga ni generar interferencias críticas con los demás componentes. El primer error de compatibilidad geométrica se presentó en las conexiones entre el orificio superior del triángulo t1 y el puente grúa disponible en la nave de Minera Los Pelambres. En esta etapa, al intentar montar las argollas del eslabón maestro directamente en el gancho del puente grúa, se advirtió que las argollas no lograban acoplarse adecuadamente dentro del espesor del gancho, puesto que era muy grande. Frente a esta situación, se decide modificar las conexiones de esta zona, posicionando un grillete de 3" directamente en el gancho, acoplando dos argollas del eslabón maestro a dicho grillete, y conectar la sección inferior de dichas argollas a otro grillete de 3" que une al orificio superior de t1.

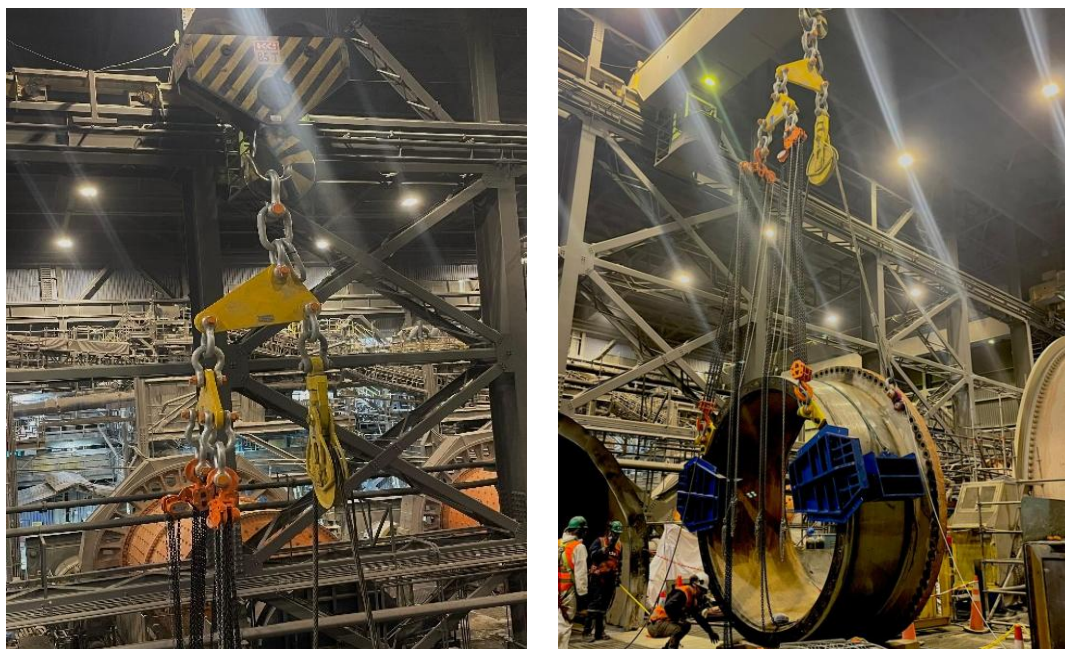
No obstante, el inconveniente más crítico en esta conexión t1-puente grúa se presentó al tratar de ensamblar el grillete de 3" con el orificio superior de t1, ya que el pasador del grillete no entró en este orificio. Esto se atribuye a un error de diseño geométrico del triángulo, particularmente en la definición del diámetro del orificio superior de t1 considerando las dimensiones reales del grillete de 3" seleccionado para el sistema. Como medida correctiva, se decidió reemplazar este último grillete de 3" por uno de 2,5", asegurando así un acople adecuado entre ambos componentes como se ilustra en el Anexo 26. Desde el punto de vista resistente, el ajuste no comprometió la seguridad del sistema, ya que el grillete de 2,5" presenta una capacidad de 55 ton, y además los grilletes seleccionados en la maniobra presentan, en general, un factor de seguridad mínimo del orden de 6, por lo que no se previeron inconvenientes asociados a los cambios de posición realizados entre elementos de izaje.



Anexo 26: Instalación de la maniobra de izaje para el trunnion de descarga.

El segundo inconveniente operacional identificado durante la instalación del sistema de izaje se presentó en la conexión entre los grilletes inferiores del triángulo t2 y los ganchos de los tecles seleccionados. En este procedimiento de instalación se percató que el espesor de los grilletes de 2,5" (orificios inferiores) era de mayor medida que el ancho de ingreso de los ganchos de los tecles, impidiendo así el ensamblaje directo entre ambos componentes. En vista de este panorama, se optó por incorporar un grillete adicional de 2,5" en cada uno de los grilletes ya conectados a los orificios inferiores de t2, con el propósito de utilizar el pasador de este nuevo grillete de menor espesor como punto de conexión para los ganchos de los tecles, logrando así un junte adecuado tal como se muestra en el Anexo 27. Esta modificación no generó interferencias mecánicas relevantes ni una superación de la capacidad máxima de los componentes seleccionados, por lo que la situación pudo resolverse sin inconvenientes técnicos mayores y sin comprometer la seguridad estructural del sistema de suspensión.

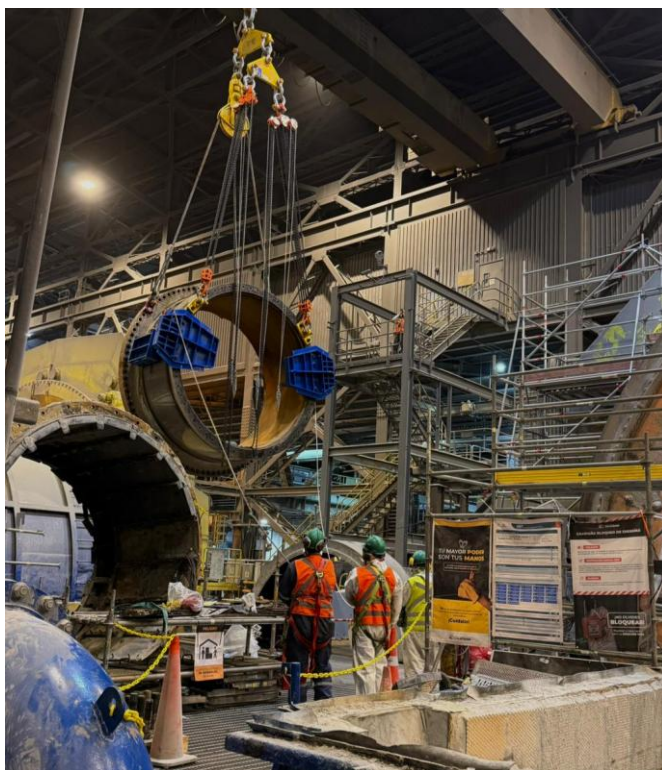
Por otro lado, el propósito principal del Anexo 27 es ilustrar la maniobra de izaje del trunnion de descarga del molino SAG 02 una vez completado el montaje del sistema de suspensión. En la imagen de la izquierda se observa directamente el comportamiento esperado del sistema de levante mientras el muñón se encontraba suspendido, pudiendo apreciarse los elementos de sujeción seleccionados trabajando en condición de carga, tensados por el peso de 42 ton, y respondiendo frente a esto de manera efectiva, tal como fue planteado en la etapa de diseño y validación estructural. A su vez, la imagen de la derecha muestra la posición final del trunnion una vez concluido su trayecto completo mediante el sistema de izaje propuesto, quedando ubicado de acuerdo con el layout definido por Minera Los Pelambres. En esta última instancia también puede observarse que el dispositivo de extracción permanecía aún montado sobre el componente, mostrando así la continuidad operativa que se tuvieron entre la etapa de desmontaje y la posterior maniobra de izaje, si bien es un peso adicional en la estructura, no afecta significativamente debido al orden del peso del trunnion.



Anexo 27: Maniobra de izaje del trunnion de descarga SAG 02.

En este proceso de izaje, establecido por la metodología Carta Gantt del trabajo en terreno, tanto antes como durante la maniobra, también tuvieron que aplicarse los protocolos de seguridad supervisados por los APR. Al igual que en la actividad anterior, entre las normas de seguridad establecidas se necesitó de la aprobación de los cursos modalidad online, la firma de los documentos de seguridad, la revisión de certificaciones de equipos y accesorios, y finalmente el bloqueo del equipo principal. No obstante, uno de los procedimientos de seguridad más involucrado a la maniobra fue la segregación del área de trabajo mediante conos y barreras de seguridad, sobre todo a lo largo de todo el trayecto en que avanza el componente izado con el puente grúa, tal como se muestra en el Anexo 28, trayecto autorizado únicamente por el rigger y operador. En dicha imagen también pueden apreciarse distintos pendones de campañas promotoras de seguridad, entre ellos advertencias por componente en altura, recordatorios permanentes del uso de EPP y el muy importante mensaje preventivo “Yo digo No”, todos estos orientados a reforzar la conducta segura del personal durante la ejecución de la maniobra.

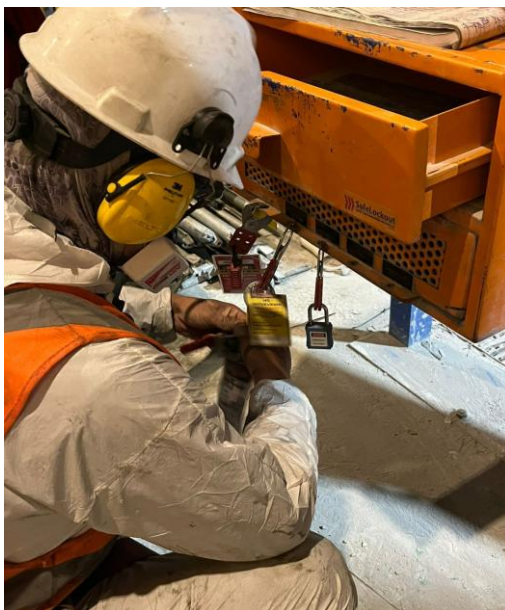
Durante el propio izaje del trunnion, el rigger y el operador del puente grúa asumen el control absoluto tanto del acceso al área de suspensión como del guiado del componente durante su levantamiento, traslado y descenso. En términos prácticos, el rigger dirige la maniobra indicando la forma correcta en que debe desplazarse la carga y se apoya además en un viento para mantener el componente estable y controlar leves desequilibrios durante el movimiento. Junto con ello, como medida adicional de seguridad, se dispone de un silbato de advertencia por parte del rigger y un megáfono por parte del APR, con el propósito de notificar a las áreas de alrededor que se está ejecutando el izaje del componente de mayor tonelaje presente en la sección de descarga del molino SAG 02, por lo cual se tienen que seguir los protocolos de segregación.



Anexo 28: Protocolos de seguridad implementados en el izaje del trunnion antiguo.

7.5 Validación del montaje del trunnion de descarga

Como parte de los protocolos de seguridad exigidos por la minera para esta etapa de montaje, al igual que en las actividades anteriores, se procede en primer lugar a completar el papeleo técnico de seguridad correspondiente a la tarea a ejecutar, en este caso asociado principalmente a labores de izaje y trabajo en altura para el montaje del trunnion. A esto se le suma el proceso de bloqueo, que pasa siendo una de las medidas más importantes dentro de los protocolos de seguridad antes del trabajo y que se ilustra en el Anexo 29, donde se observa a uno de los trabajadores instalando su candado y tarjeta de bloqueo en la sección específica destinada a los procedimientos de mantención mecánica ejecutada en el molino SAG 02. De esta forma, se asegura formalmente que el equipo permanece en estado de mantención, además de tener el control del personal interviniendo en él durante la ejecución.



Anexo 29: Bloqueo de seguridad para la maniobra del montaje del trunnion nuevo.

Ahora bien, abarcando los implementos y estándares de seguridad necesarias para cumplir con los criterios estipulados por MLP, al igual que en la sección anterior, se considera la correcta segregación del área donde se suspende el nuevo trunnion de descarga, limitando el sector mediante conos, barreras y el seguimiento constante del rigger y operador del puente grúa. El siguiente proceso normativo corresponde a la instalación de andamios certificados para las actividades que deben desarrollarse en altura durante el posicionamiento y acople del muñón de descarga. Cuando se cumplen todos estos protocolos, la minera exige para actividades específicas y complejas contar con el documento de Procedimiento de Trabajo de la mantención, ya que este documento explicita la metodología con la que se llevará a cabo la actividad, esto permite que cualquier personal mandante pueda supervisar el paso a paso del proceso y verificar que el trabajo se ejecute de manera correcta. Además, este documento tiene que estar firmado por todos los trabajadores que participan en estas labores, ya que esto garantiza que cada integrante del equipo comprende el procedimiento y seguridad bajo el cual se desarrollará la intervención

La ejecución del montaje del nuevo trunnion de descarga comienza con el izaje de este componente mediante el mismo sistema de suspensión utilizado anteriormente en el retiro del trunnion antiguo. En esta última fase, el componente nuevo puede presentar un peso ligeramente distinto, principalmente porque no posee desgaste ni pérdida de material en su estructura como lo ocurrido con el otro muñón, pero, además incorpora montados los componentes de extracción utilizados en la etapa de desmontaje. Por esta razón, ambos pesos tienden a compensarse, situación que se ve reflejada en las lecturas del puente grúa, que resultaron similares a las lecturas registradas durante la maniobra anterior. El Anexo 30 ilustra la operación de izaje, mostrando el uso del sistema de suspensión por segunda vez y su ejecución sin inconvenientes desde el punto de vista operativo y estructural.

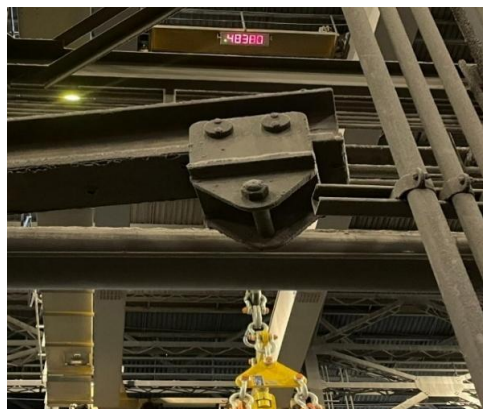
El proceso de montaje en sí se desarrolló de manera relativamente rápida y controlada, favorecido por la experiencia previa realizada en la maniobra de desmontaje, lo que permitió posicionar el componente con mayor facilidad hasta su ubicación de origen sobre el descanso, en conjunto con los broncees y pads correspondientes. Por otro lado, durante la operación que se aprecia en la imagen, es posible observar la leve inclinación que presentan las cadenas y estrobos respecto del eje vertical del trunnion. Sin embargo, esta inclinación se traduce en una magnitud bastante baja, por lo que, su efecto fue despreciado en el planteamiento simplificado de las ecuaciones de equilibrio desarrolladas en esta tesis, sin comprometer por ello la validez general del análisis estructural realizado en el software para el sistema de izaje.



Anexo 30: Nuevo trunnion de descarga suspendido con sistema de izaje.

Tal como se mencionó recientemente, durante el izaje de este nuevo componente el puente grúa registró de manera continua la carga suspendida en kg, observándose en el Anexo 31 una lectura específica de 48.380 kg. Es importante precisar que la lectura entregada por el equipo no permaneció fija en un único valor, sino que variaba en torno a magnitudes cercanas, lo cual se atribuye a pequeños balanceos del sistema de izaje o condiciones de desbalanceamiento de los componentes durante la

maniobra. Aun así, en ambos casos de izaje, las lecturas registradas se mantuvieron por debajo de 55 ton, lo que representa una condición favorable para la validación práctica de la maniobra. En efecto, considerando que el sistema de izaje diseñado en Shapr3D y validado estructuralmente mediante Ansys Mechanical fue definido para una carga nominal de 52,5 ton, y que en ambos casos se obtuvo un factor de seguridad mayor o igual a 1,5, fue posible verificar en terreno que el sistema no presentaría inconvenientes estructurales durante cada una de las suspensiones ejecutadas.



Anexo 31: Carga leída por puente grúa en el izaje del nuevo trunnion de descarga.

La metodología planificada continúa con el Anexo 32 mostrando el montaje del nuevo trunnion sobre el descanso y los pads, utilizando como apoyo el sistema de izaje diseñado para la maniobra. Esta etapa se desarrolló de manera lenta y controlada, ya que fue necesario ir destensando poco a poco las cadenas de los tecles a medida que el componente se apoyaba de forma gradual sobre su soporte, manteniendo así un posicionamiento final estable y acorde a su ubicación de origen.

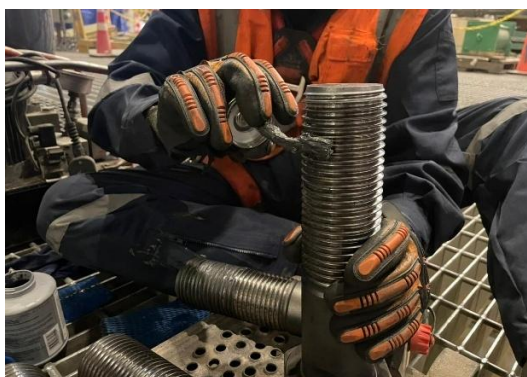


Anexo 32: Montaje del trunnion de descarga en apoyo de bronce.

Luego, tal como se indicó en la descripción del capítulo 4, una vez asentado el trunnion de descarga sobre sus apoyos en el molino SAG 02, el puente grúa realizó un desplazamiento axial de apoyo para introducir la boca bajo el flange del trunnion hacia la tapa del shell. Al mismo tiempo se instaló también gran parte de los 96 pernos SPC4 distribuidos en la circunferencia, y se incorporaron los

pernos guía para recuperar la posición de origen del componente durante el proceso de montaje. Se procedió a retirar los cáncamos giratorios y, por consiguiente, el sistema completo de izaje, dejando el libre acceso para la mitad más pequeña de la boca del trunnion hacia la tapa. Posteriormente, se ejecutó un torque preliminar utilizando pernos M64 de reemplazo, con el objetivo de definir poco a poco la unión sin interferir con las propiedades asociadas a los pernos de catálogo. Para esta actividad se ocuparon llaves de impacto, útiles para completar la tarea de manera controlada y realizar el acople axial del trunnion con la tapa del shell.

Como etapa previa al torque preliminar ejecutado entre el trunnion y la tapa del shell, los pernos SPC4 utilizados para la unión fueron lubricados con el producto Loctite LB 771, tal como se expuso en un apartado del capítulo 4. En este proceso, bastó con aplicar este lubricante sobre aproximadamente la mitad del largo roscado de cada perno, considerando esta cantidad suficiente para cumplir con la función de disminuir la fricción durante el montaje y favorecer a la unión una vez que se realice la puesta en marcha del equipo. Esta aplicación puede observarse en el Anexo 33.



Anexo 33: Lubricación en el hilo de los pernos inteligentes SPC4.

Durante la ejecución del “proyecto de recambio del trunnion de descarga” también fue necesario utilizar otros productos líquidos además del lubricante Loctite LB 771, cumpliendo funciones de sellado, protección anticorrosiva, adhesivos y apoyo a distintas etapas de mantención. La Tabla 9 resume la información técnica más relevante asociada a estos productos, considerando su pertinencia dentro del desarrollo del proyecto.

Tabla 9: Especificaciones técnicas de los productos utilizados en mantención de molinos SAG.

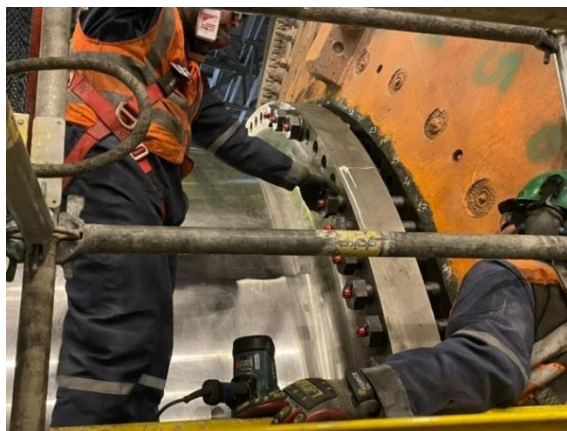
Producto	Función	Aplicación	Empresa encargada
Loctite LB 771	Lubricante	Pernos de unión	ESR
Fourthane silver 5711	Sellado/epóxico	Unión trunnion-cajón	Fourthane
Cantabria Solvente	Desengrasante	Flanges de unión	ESR
Pegamento SC 2000	Adhesivo	Gomas-shell	Fourthane

Es importante hacer una mención específica al producto sellante/epóxico utilizado en la unión entre el trunnion y el cajón interno del molino SAG en la zona de descarga, debido a que esta sección se

encuentra directamente asociada a la problemática de ingreso de pulpa expuesta en la introducción del proyecto, problemática que motivó a la ejecución del recambio del trunnion. En este caso, una vez que ya se monta el nuevo trunnion en el shell por completo con sus respectivos torques definidos por catálogo, se está en condiciones para poder aplicar el producto en la holgura identificada, siempre y cuando se hayan retirado correctamente los revestimientos.

Por lo tanto, ya desmontados los revestimiento internos del shell se puede acceder al perímetro completo del trunnion en la zona afectada e ingresar el compuesto sellante a lo largo de toda la holgura circunferencial. El material utilizado corresponde a un epóxico de relleno, el cual una vez aplicado se endurece en frío y cumple su función de rellenado en toda esta sección vacía. Posteriormente, los revestimientos son nuevamente apernados en toda la zona intervenida, dejando así el problema base solucionado para que no se vuelva a detectar algún tipo de holgura en la que pueda ingresar pulpa y abrasionar el componente, a pesar de que se den condiciones donde el flujo sobrepase las pletinas de revestimiento y el o-ring ubicados entre el trunnion y el trunnion liner como se muestra en el diseño Shapr3D del Anexo 4.

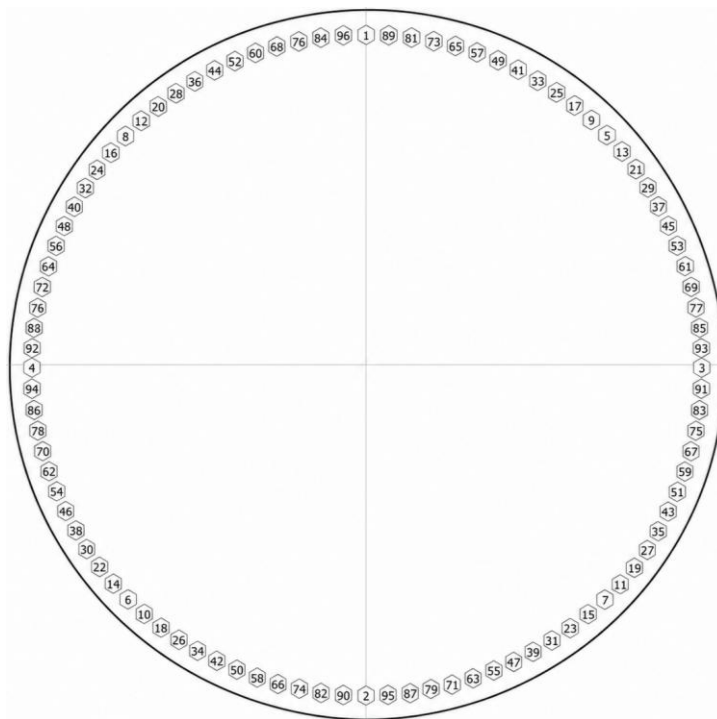
Mencionados el compuesto epóxico y el lubricante correspondiente, se retoma la ejecución del proyecto con el torque preliminar analizado. En el Anexo 34 puede observarse un acople considerable entre la boca del trunnion y la tapa del shell, pero, dado que el flange no está en contacto 0:0, la mitad de mayor tamaño todavía no ha sido introducida, por lo cual solo hay torque preliminar. Todos estos procedimiento se realizan bajo supervisión, verificando en todo momento qué tan próxima se encuentra la cara del flange del trunnion respecto del inicio de la tapa del shell. Cabe destacar que, finalizando esta etapa comienza a haber mayor resistencia al acople, por lo que se vuelve necesario la aplicación de torques finales con equipos hidráulicos que transmitan suficiente presión para el giro.



Anexo 34: Acople controlado del trunnion de descarga con la tapa del shell.

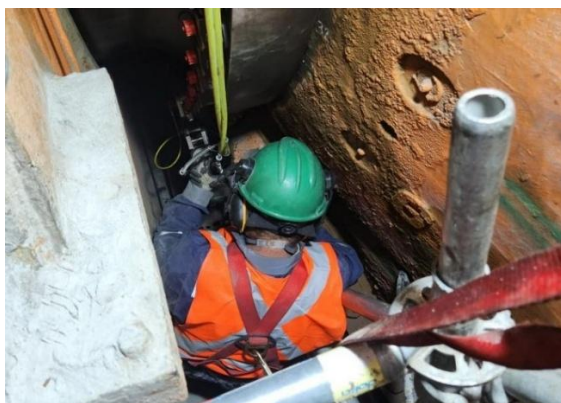
Por lo tanto, una vez que la boca del trunnion se encuentra semi-introducida en la boca de la tapa, comienza a ser operativamente adecuado ejecutar el torque final mediante los equipos hidráulicos mencionados a lo largo del presente capítulo para ya empezar a acoplar la segunda sección de mayor diámetro de la boca. Es por ello que, antes de iniciar este proceso operativo, resulta fundamental considerar la secuencia de torque de estos pernos, ilustrada en el Anexo 35, tanto para el 50% del torque final como para el 100%. Esto con el fin de mantener un apriete homogéneo de las uniones

enflanchadas favoreciendo a una distribución uniforme de carga, disminuyendo la probabilidad de desgaste prematuro por ingreso de pulpa a través de la conexión y prolongando la vida útil de la unión.



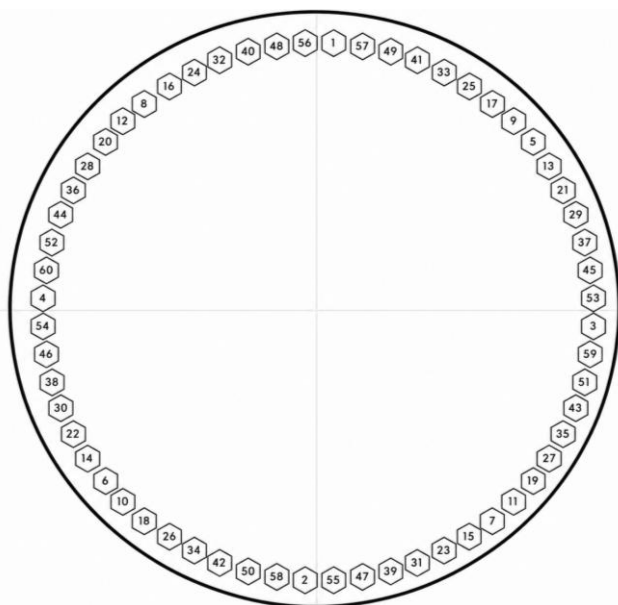
Anexo 35: Secuencia de torque de pernos SPC4 en la unión trunnion-tapa.

El Anexo 36 hace referencia al proceso de torqueado de los pernos trunnion-tapa, en donde puede observarse el equipo montado directamente sobre la cabeza del perno SPC4 durante el accionamiento del sistema a través de la bomba hidráulica. En esta etapa es clave mantener supervisión en terreno y llevar registro del torque aplicado y medido con equipos SPC4, considerando tanto el 50% del valor final como el 100% del torque definido por vendor que garantiza la unión por interferencia de la conexión trunnion-tapa, dejando constancia de estas magnitudes en una de las planillas de control de calidad presentadas anteriormente.



Anexo 36: Torque de pernos SPC4 en la unión trunnion-tapa.

Una vez finalizado el apriete de estos pernos llevando registro de los torque definidos, se tiene que dejar registro también de la holgura presente entre este junte si es que la hubiera, aspecto que se ilustrará luego de la ejecución de torque en la unión trunnion-tapa según el orden de procedimiento realizado en terreno. Continuando entonces con la metodología elaborada, el Anexo 37 presenta la secuencia de torque definida para la unión trunnion-adapter, la cual se compone de un total de 60 pernos Parker distribuidos a lo largo de la circunferencia. El propósito principal de seguir esta secuencia es asegurar una distribución progresiva y equilibrada de la carga de apriete sobre toda la unión enflanchada, por esto en primer lugar se torquean los pernos hasta la mitad de lo que se establece por catalogo, luego siguiendo nuevamente la secuencia se ejecuta el torque final.



Anexo 37: Secuencia de torque de pernos Parker de la unión trunnion-adapter.

Se ejecutó la secuencia de torque tanto al 50% como al 100% dejando así la maniobra de recambio en estado de término como se ilustra en el Anexo 38, donde los pernos trunnion-adapter ya se encuentran montados y torqueados según el procedimiento establecido. El procedimiento de trabajo terminó en sí, pero es importante el completar los protocolos de torque registrando y evidenciando que cada perno quedó apto para la puesta en marcha, tal como se realizó por parte de ESR.



Anexo 38: Pernos Parker de la unión trunnion-adapter torqueados.

Luego, se ha elaborado un resumen de los torques más relevantes que se aplicaron durante el montaje en la zona de descarga que se puede ver en la Tabla 10 con el propósito de recopilar y hacer ver las secciones en las que se utilizan estos equipos hidráulicos de alta presión. Dentro de estas uniones se contemplan los componentes como trunnion-tapa, trunnion-adapter, trunnion liner-adapter y trommel-adapter, además la tabla indica la cantidad y el tipo de perno utilizado en cada una de ellas, así como el tipo de cabeza del componente.

Tabla 10: Pernos de conexión entre los componentes mecánicos de descarga del molino SAG.

Tipo de perno	Unión	Cantidad	Torque [Nm]	Equipo	Presión [psi]
Hexagonal SPC4 M64	Trunnion-tapa	96	10.400	Enerpac W15312X	5.000
Parker M42	Trunnion-adapter	60	5.100	Hytorc 10MXT	3.300
Parker M36	Trunnion liner-adapter	36	3.500	Hytorc 3MXT	8.100
Hexagonal M48	Trommel-adapter	66	8.300	Enerpac W15215X	4.000

Expuesto todo el procedimiento de torque, los protocolos de control de calidad asociados al junte de flanges se llevaron a cabo en terreno para verificar presencia de holguras y asegurar contacto efectivo entre las superficies enflanchadas. En primer lugar, se introdujo el feeler gauge en la unión trunnion-tapa del shell, donde se detectó una holgura de 5 mm como muestra en el Anexo 39, condición diferente a la del trunnion-adapter, donde no se detectó ninguna abertura de magnitud comparable. Debido al tamaño de la holgura, el cliente impuso estados de alerta, optando así por mantener esta separación de flanges, por criterios prácticos y operacionales de MLP, considerando que en un plazo inferior a 5 años se considera el recambio de la tapa de descarga del molino SAG. Siguiendo esa idea, no se considera conveniente aplicar un producto de relleno o adherencia sobre la tapa y el flange, ya que esto podría aumentar la dificultad de un desmontaje futuro por parte de la minera, producto de la adherencia generada en los componentes.



Anexo 39: Deformaciones en la unión enflanchada trunnion-tapa del shell.