



**Universidad
Católica de
Santa María**

Escuela de Postgrado
Maestría en Ingeniería de Mantenimiento

**Mejora del Procedimiento de Cambio de Cóncavos de la Chancadora
Primaria Traylor NT de 60 x 113 pulgadas en base al Mantenimiento
Proactivo en una Unidad del Centro del Perú**

Tesis presentada por:

Callo Zegarra, Juan Washington

ORCID: 0009-0009-7274-5187

para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería de Mantenimiento

Asesor:

Dr. Ticse Villanueva Edwing Jesús

ORCID: 0000-0003-1684-5617

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
ESCUELA DE POSTGRADO
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 06 de Abril del 2026

Dictamen: 015549-C-EPG-2026

Visto el borrador del expediente 015549, presentado por:

2024006022 - CALLO ZEGARRA JUAN WASHINGTON

Titulado:

**MEJORA DEL PROCEDIMIENTO DE CAMBIO DE CÓNCAVOS DE LA CHANCADORA PRIMARIA
TRAYLOR NT DE 60 X 113 PULGADAS EN BASE AL MANTENIMIENTO PROACTIVO EN UNA
UNIDAD DEL CENTRO DEL PERÚ**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29267647 - VALENCIA BECERRA ROLARDI MARIO
DICTAMINADOR**



**30857994 - GORDILLO ANDIA CARLOS ALBERTO
DICTAMINADOR**



**42394111 - COLLADO OPORTO CHRISTIAM GUILLERMO
DICTAMINADOR**



Mejora del Procedimiento de Cambio de Cóncavos de la Chancadora Primaria Traylor NT de 60 x 113 pulgadas en base al Mantenimiento Proactivo en una Unidad del Centro del Perú

INFORME DE ORIGINALIDAD

7 %

INDICE DE SIMILITUD

7 %

FUENTES DE INTERNET

2 %

PUBLICACIONES

3 %

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1 %

2

www.archivogeneral.gov.co

Fuente de Internet

<1 %

3

Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola

Trabajo del estudiante

<1 %

4

alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

5

pt.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

6

repositorio.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

7

repositorio.uia.ac.cr:8080

Fuente de Internet

<1 %

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada con todo mi amor a M.Y.P.A, mi compañera de vida, por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión en cada etapa de este camino. Gracias por ser mi inspiración constante, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por acompañarme con amor y fortaleza en los momentos más difíciles.

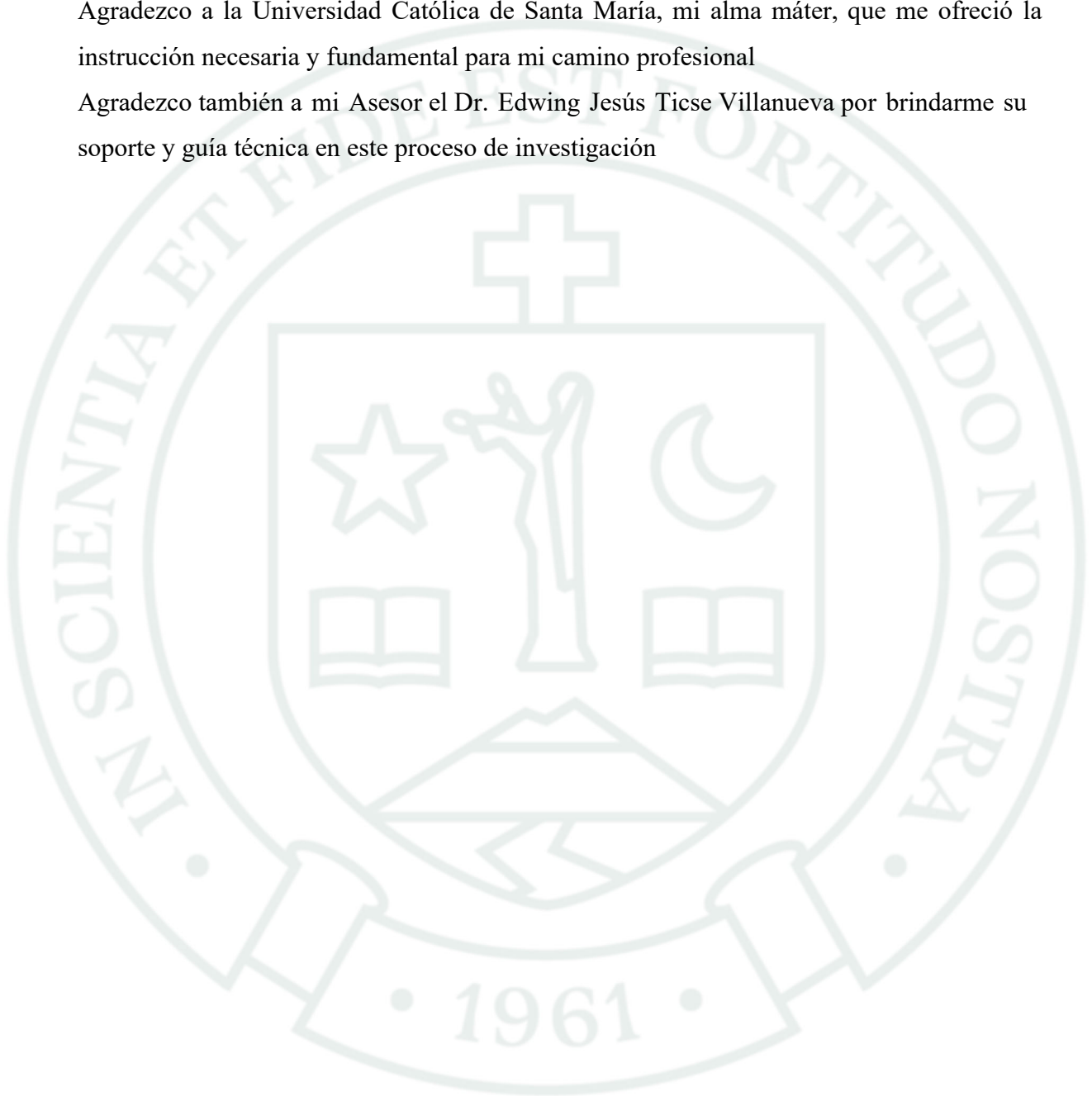


AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación agradezco primero a Dios por permitirme tener la posibilidad de culminar este paso tan importante en mi vida

Agradezco a la Universidad Católica de Santa María, mi alma máter, que me ofreció la instrucción necesaria y fundamental para mi camino profesional

Agradezco también a mi Asesor el Dr. Edwing Jesús Ticse Villanueva por brindarme su soporte y guía técnica en este proceso de investigación



RESUMEN

La investigación se orientó a optimizar el cambio de cóncavos en la chancadora primaria Traylor NT 60" × 113" de una unidad minera de referencia, debido a fallas recurrentes asociadas a brechas de estandarización que redujeron la disponibilidad operativa a 84.64% y limitaron el MTBF a 302 horas; además, se registró un acumulado de 274 horas de parada por fracturas.

Se aplicó una estrategia de mejora estructurada en etapas secuenciales que incluyó recolección y clasificación de evidencias (PETs, manual OEM, registros visuales, reportes SAP y reportes técnicos), análisis técnico mediante AMEF y Análisis de Causa Raíz, validación de hipótesis en campo con observación directa, registro cronológico de variables operativas (p. ej., temperatura) y control visual/dimensional del montaje, y la elaboración del PETS 2.0 incorporando aseguramiento de calidad y verificación metrológica (escaneo 3D).

Se concluyó que los modos de falla dominantes fueron la fractura por tensiones residuales y el desplazamiento vertical, principalmente por el curado del backing sin control térmico ($<10^{\circ}\text{C}$), que alcanzó solo ~20% de la resistencia requerida (26 MPa frente a 110 MPa tras 8 horas), y por deficiencias de supervisión para asegurar el torque de 400 Nm y la preparación de superficies. Se validó que la temperatura de curado (22°C) fue crítica; su control permitió proyectar la reducción del tiempo de intervención de 274 a 168 horas (–30%) y el incremento de disponibilidad (91% a 95% y hasta 97%). La evaluación económica estimó un ahorro anual de S/ 3,600,000, con inversión inicial de S/ 579,700, costo operativo por campaña de S/ 403,400 y recuperación aproximada de 2 meses.

Palabras clave: Disponibilidad, Chancadora primaria, cóncavos.

ABSTRACT

The research aimed to optimize the concave replacement process in the Traylor NT 60" × 113" primary crusher at a reference mining unit, due to recurring failures associated with standardization gaps that reduced operational availability to 84.64% and limited MTBF to 302 hours; additionally, 274 downtime hours due to fractures were recorded.

A staged improvement strategy was applied, including evidence collection and classification (PETs, OEM manual, visual records, SAP reports, and technical reports), technical analysis using FMEA (AMEF) and Root Cause Analysis, field validation of hypotheses through direct observation, chronological recording of operating variables (e.g., temperature) and visual/dimensional assembly control, and the development of PETS 2.0 incorporating quality assurance and metrological verification (3D scanning).

It was concluded that the dominant failure modes were residual-stress fracture and vertical displacement, mainly due to backing curing without thermal control ($<10^{\circ}\text{C}$), which achieved only ~20% of the required strength (26 MPa versus 110 MPa after 8 hours), and due to supervision deficiencies to ensure 400 Nm torque and adequate surface preparation. It was validated that curing temperature (22°C) was critical; its control allowed projecting a reduction in intervention time from 274 to 168 hours (−30%) and an increase in availability (91% to 95% and up to 97%). The economic evaluation estimated annual savings of S/ 3,600,000, with an initial investment of S/ 579,700, an operating cost per campaign of S/ 403,400, and an approximate 2-month payback period.

Keywords: Availability, Primary Crusher, Concaves.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO 5

1.1 Formulación del problema..... 5

1.1.1 Problema general 5

1.1.2 Problemas específicos..... 5

1.2 Formulación de los objetivos..... 5

1.2.1 Objetivo general 5

1.2.2 Objetivos específicos 5

1.3 Formulación de las Hipótesis 6

1.3.1 Hipótesis General 6

1.3.2 Hipótesis Específicas 6

1.4 Antecedentes de la investigación..... 7

1.4.1 Nivel Internacional 7

1.4.2 Nivel Nacional..... 8

1.4.3 Antecedentes Locales 9

1.5 Marco Conceptual 11

1.5.1 Gestión del Mantenimiento 11

1.5.2 Minería y Procesos de Conminución..... 16

1.5.3 Chancadora Primaria Traylor NT 60” x 113” 19

1.6 Análisis de Causa Raíz (ACR) y Herramientas de Diagnóstico..... 26

1.6.1 Diagrama de Ishikawa aplicado a fallas mecánicas..... 27

1.6.2	Técnica de los “5 Por Qué”	29
1.6.3	FMEA (Análisis Modal de Fallas y Efectos).....	30
CAPÍTULO II	METODOLOGÍA.....	31
2.1	Lugar de estudio	31
2.2	Proceso productivo	31
2.3	Población y muestra	33
2.4	Técnicas e instrumentos de recolección	34
2.5	Análisis y procesamiento de información.....	40
2.6	Método de estrategia de mantenimiento proactivo.....	40
2.6.1	Etapas 1: Recolección de evidencias técnicas de fallas	41
2.6.2	Etapas 2: Análisis técnico especializado y formulación de hipótesis	41
2.6.3	Etapas 3: Validación de hipótesis en campo	43
2.6.4	Etapas 4: Mejora del procedimiento técnico estándar.....	43
2.7	Procedimiento de investigación.....	45
CAPÍTULO III	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
3.1	Resultados.....	47
3.1.1	Diagnostico de la situación actual	47
3.1.2	Condiciones operativas y de mantenimiento:	59
3.1.3	Propuesta de mejora del procedimiento de mantenimiento	63
3.1.4	Análisis del Procedimiento de cambio de cóncavos.....	65
3.1.5	Análisis de herramientas de gestión del mantenimiento.....	97
3.1.6	Análisis de confiabilidad mediante distribución de Weibull.....	106
3.1.7	ACR de la gestión del mantenimiento	109
3.1.8	Análisis de modo y efectos de fallo de procesos (AMEF)	113
3.1.9	Comprobación de hipótesis	117
3.1.10	Fundamentación Normativa y Estándares de Ingeniería Aplicados.....	160

3.1.11	Alineamiento con la Gestión de Activos (ISO 55001).....	160
3.1.12	Definición y Aplicación de la Norma EN 13306	160
3.1.13	Estándar de Materiales y Calidad (ASTM A128)	160
3.1.14	Instrumentación y Monitoreo Proactivo (IEEE 1451).....	161
3.1.15	Desarrollo de la propuesta del PETS 2.0.....	161
3.1.16	Mejora del procedimiento general mejorando actividades predictivas.	161
3.1.17	Proyección de metas de ingeniería	234
3.1.18	Análisis económico.....	236
3.1.19	Capacitación y entrenamientos específicos	247
3.1.20	Inversión en equipos, herramientas y materiales	249
3.1.21	Costos operativos de la implementación	251
3.1.22	Presupuesto consolidado por año	253
3.1.23	Análisis de impacto económico	258
3.1.24	Medidas de Mitigación y Control.....	260
3.1.25	Análisis costo–beneficio de la propuesta.....	263
3.2	Discusión	266
3.2.1	Comprobación de hipótesis	266
3.2.2	Discusión de indicadores de mantenimiento	268
3.2.3	Discusión de las causas raíz identificadas	271
3.2.4	Contraste con los antecedentes de la investigación	272
3.2.5	Análisis de variables operativas y factores descartados	273
3.2.6	Discusión del impacto económico.....	275
CONCLUSIONES		277
RECOMENDACIONES		279
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		281

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Lista de partes de la chancadora primaria	23
Tabla 2	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	35
Tabla 3	Formato de Entrevista:.....	36
Tabla 4	Checklist de evaluación del proceso de cambio de cóncavos	39
Tabla 5	Registros documentados de fallas en la chancadora primaria	51
Tabla 6	Indicadores de mantenimiento calculados	53
Tabla 7	Roles principales en el equipo de trabajo para cambio de cóncavos.....	54
Tabla 8	Programas y alianzas de formación en la unidad minera de referencia...	56
Tabla 9	Compromiso con la seguridad en la operación minera	57
Tabla 10	Implementación de metodologías avanzadas de confiabilidad.....	60
Tabla 11	Iniciativas sofisticadas de mantenimiento	61
Tabla 12	Estrategia de formación y capital humano	62
Tabla 13	Estrategia de gestión de contratistas	62
Tabla 14	Requerimientos equipos / herramientas	67
Tabla 15	Requerimientos materiales.....	69
Tabla 16	Fortalezas y debilidades en la movilización y desmovilización	71
Tabla 17	Análisis en la fase de traslado e instalación de equipos	73
Tabla 18	Análisis en la fase de actividades previas y preparación del área	76
Tabla 19	Análisis en la fase de desmontaje de la cúpula del spider	78
Tabla 20	Análisis en la fase de desmontaje del spider (araña)	80
Tabla 21	Análisis en la fase de desmontaje del main shaft	82
Tabla 22	Análisis en la fase de desmontaje de cóncavos desgastados	85
Tabla 23	Análisis de la fase: Armado de los floreros	88
Tabla 24	Análisis en la fase de montaje de los cóncavos nuevos.....	92
Tabla 25	Análisis en la fase de montaje del main shaft y spider	94

Tabla 26	Análisis en la fase de desmovilización	96
Tabla 27	Fases críticas y riesgos principales en el cambio de cóncavos	97
Tabla 28	Taxonomía técnica del chancador primario	112
Tabla 29	AMEF de la chancadora primaria.....	114
Tabla 30	Variación de los parámetros físicos	130
Tabla 31	Parámetros críticos de almacenamiento.....	137
Tabla 32	Cronología Detallada de Falla por "Inchancable"	144
Tabla 33	Personal humano requerido para trazabilidad PETS 2.....	162
Tabla 34	Requerimientos materiales, equipos y herramientas.....	162
Tabla 35	Personal humano requerido para el plan de trabajo.....	164
Tabla 36	Requerimientos para el plan de trabajo	164
Tabla 37	Indicadores clave de rendimiento (KPIs) predictivos.....	166
Tabla 38	Personal humano requerido para instrumentación.....	175
Tabla 39	Requerimientos materiales, equipos y herramientas.....	176
Tabla 40	Personal humano requerido para control pre intervención	184
Tabla 41	Requerimientos materiales, equipos y herramientas.....	184
Tabla 42	Personal humano requerido para inspección previa desmontaje	185
Tabla 43	Requerimientos para inspección previa demontaje	186
Tabla 44	Criterios, rangos y procedimientos	187
Tabla 45	Personal humano requerido para desmontaje superior	189
Tabla 46	Requerimientos para desmontaje superior.....	189
Tabla 47	Personal humano requerido para retiro de cóncavos	191
Tabla 48	Requerimientos para retiro de cóncavos.....	192
Tabla 49	Personal humano requerido para preparación de superficie	193
Tabla 50	Requerimientos para preparación de superficie.....	193
Tabla 51	Personal humano requerido para medición avanzada.....	199

Tabla 52	Equipos y Herramientas para medición avanzada	199
Tabla 53	Parámetros geométricos críticos en chancadora primaria.....	200
Tabla 54	Personal humano requerido para control de gaps.....	201
Tabla 55	Requerimientos para control de gaps.....	201
Tabla 56	Personal humano requerido para torque de cuñas	202
Tabla 57	Requerimientos para torque de cuñas	202
Tabla 58	Personal humano requerido para control tridimensional	209
Tabla 59	Requerimientos para control tridimensional.....	209
Tabla 60	Personal requerido para verificación de dureza de backing	213
Tabla 61	Requerimientos materiales para verificación de dureza de backing.....	213
Tabla 62	Personal requerido para montaje del main shaft y spider.....	219
Tabla 63	Materiales requeridos para montaje de main shaft y spider	220
Tabla 64	Personal requerido para inspección visual y dimensional	220
Tabla 65	Materiales requeridos para inspección visual y dimensional	221
Tabla 66	Personal requerido para entrega de dossier	221
Tabla 67	Materiales requeridos para entrega de dossier.....	222
Tabla 68	Elementos clave para implementar la herramienta.....	223
Tabla 69	Elementos clave para implementar la herramienta.....	226
Tabla 70	Requerimientos de integración con el PETS 2.0	228
Tabla 71	Herramientas de inspección predictiva ara los cóncavos	230
Tabla 72	Sistemas de proyección de vida útil	231
Tabla 73	Herramientas predictivas para el mantenimiento de los cóncavos	233
Tabla 74	Resumen cálculo de indicadore y normativas	236
Tabla 75	Recursos humanos requeridos en la fase	237
Tabla 76	Recursos humanos requeridos en la fase de plan de trabajo.....	238
Tabla 77	Recursos humanos requeridos en la fase de instrumentación	240

Tabla 78	Recursos humanos requeridos en la fase de control predictivo	240
Tabla 79	Recursos humanos requeridos en la fase de desmontaje	241
Tabla 80	Recursos humanos requeridos en la fase de preparación.....	242
Tabla 81	Recursos humanos requeridos en la fase de montaje de cóncavos	242
Tabla 82	Recursos humanos requeridos en la fase de cierre y validación.....	243
Tabla 83	Resumen consolidado de recursos humanos requeridos.....	244
Tabla 84	Comparación de personal operativo en campo.....	246
Tabla 85	Comparación de personal de soporte y gestión.	247
Tabla 86	Programas de capacitación requeridos.....	248
Tabla 87	Inversión en equipos, herramientas y materiales	250
Tabla 88	Costos operativos estimados por la implementación.	252
Tabla 89	Inversión inicial en equipos y herramientas	254
Tabla 90	Costos de capacitación.....	255
Tabla 91	Costos operativos de una campaña.....	255
Tabla 92	Presupuesto consolidado del primer año	258
Tabla 93	Evaluación de factores ambientales.....	260
Tabla 94	Matriz de control de impactos	263
Tabla 95	Comparación de indicadores entre procedimientos.....	264
Tabla 96	Comprobación de hipótesis específicas	267
Tabla 97	Comparación de indicadores.	269
Tabla 98	Contraste de hallazgos con antecedentes de la investigación	272
Tabla 99	Análisis de variables operativas.....	274
Tabla 100	Resumen comparativo del impacto económico	275

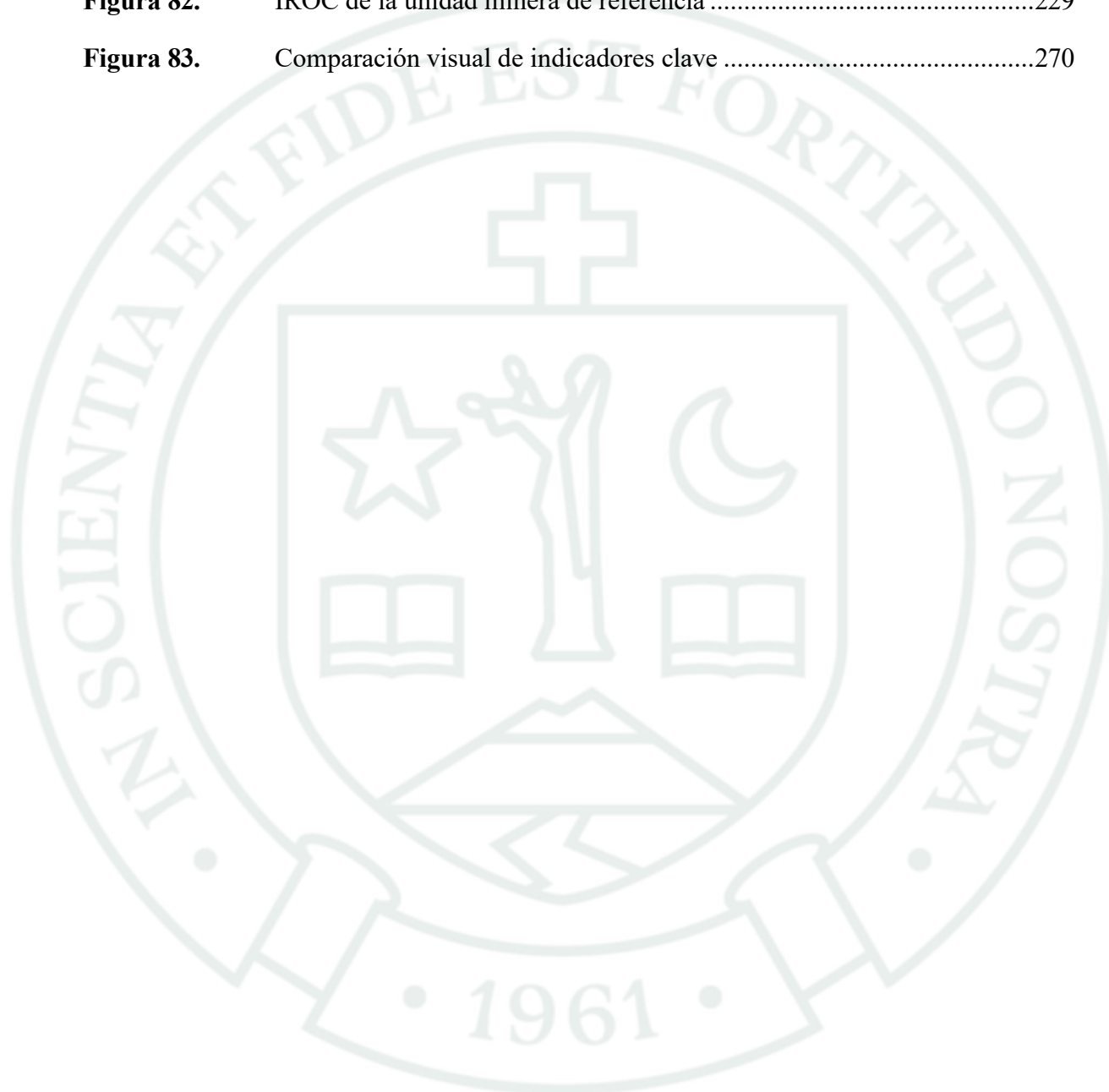
ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Principio de funcionamiento de la chancadora.....	20
Figura 2.	Partes principales de la chancadora primaria	22
Figura 3.	Diagrama de Ishikawa	28
Figura 4.	AMEF	42
Figura 5.	Matriz ACR	43
Figura 6.	Procedimiento para el cambio de cóncavos.....	45
Figura 7.	Organigrama de mantenimiento de la unidad minera.....	49
Figura 8.	Identificación de fuentes de energía para bloqueo	72
Figura 9.	Instalación de líneas de anclaje y acceso seguro.	74
Figura 10.	Maniobra de izaje de la cúpula del spider	77
Figura 11.	Izaje controlado del spider (araña)	79
Figura 12.	Izaje del eje principal (main shaft)	81
Figura 13.	Corte de cóncavos con lanza térmica	84
Figura 14.	Uso del Rockbreaker para retiro de cóncavos	84
Figura 15.	Componentes de cóncavos	86
Figura 16.	Armado en floreros.....	87
Figura 17.	Montaje y preparación para el backing epóxico.....	89
Figura 18.	Sellado de uniones con yeso y cemento (diablo).....	90
Figura 19.	Vaciado del cemento epóxico.....	91
Figura 20.	Centrado y montaje final del spider	93
Figura 21.	Clasificación y disposición final de residuos	95
Figura 22.	Consolidado de fallas	99
Figura 23.	Registros de campo del servicio de instalación de cóncavos	100
Figura 24.	Fractura de cóncavos	101
Figura 25.	Desplazamiento de cóncavos.....	102

Figura 26.	Manual de instalación, operación y mantenimiento	103
Figura 27.	Eventos de fractura de cóncavos	105
Figura 28.	Cálculo temporal de probabilidad de falla.....	107
Figura 29.	Proyección temporal de cambio de cóncavos y mantos	108
Figura 30.	Diagrama de Ishikawa	110
Figura 31.	Desplazamiento vertical de un cóncavo intermedio	118
Figura 32.	Australian crushing and belting group	118
Figura 33.	Variaciones en el gap.....	119
Figura 34.	Backing epóxico con textura quebradiza y coloración atípica	122
Figura 35.	Estructura jerárquica de causas asociadas a la falla del backing	123
Figura 36.	Vaciado del backing en condiciones sin monitoreo visible.....	124
Figura 37.	Backing epóxico LOCTITE PC 9020.....	125
Figura 38.	Hundimiento y fractura en cóncavo sin respaldo estructural.....	126
Figura 39.	Gráfico de resistencia a la compresión vs tiempo	128
Figura 40.	Gráfico de velocidad de curado vs temperatura	128
Figura 41.	Muestras de backing	129
Figura 42.	Secuencia de montaje sin presencia de instrumentos QA/QC.....	132
Figura 43.	Registro de campañas de instalación de cóncavos	133
Figura 44.	Registro de campañas de instalación de cóncavos	134
Figura 45.	Envases de backing almacenados sin control ambiental	138
Figura 46.	Almacenamiento de envases de backing	139
Figura 47.	Hendidura en cóncavos por inchancable	145
Figura 48.	Hendidura provocada por material inchancable en el poste	145
Figura 49.	Impacto de eventos operativos en el chancador primario 1.....	147
Figura 50.	Impacto de eventos operativos en el chancador primario 2.....	148
Figura 51.	Eventos en el detector de metales.....	149

Figura 52.	Evidencia fotográfica.....	150
Figura 53.	Gráfica ampliada de variables operativas.....	152
Figura 54.	Gráfica ampliada de variables operativas.....	153
Figura 55.	Tabla de espesores de cóncavos Escaneo láser.....	155
Figura 56.	Perfil gráfico de desgaste de cóncavos.....	157
Figura 57.	fractura de backing y desprendimiento de cóncavos.....	158
Figura 58.	Áreas críticas de inicio de grietas en cóncavos intermedios.....	159
Figura 59.	Creaform HandySCAN BLACK.....	168
Figura 60.	Formato maestro de control de campaña de cóncavos.....	170
Figura 61.	Zonas y puntos de medición de chancadora.....	171
Figura 62.	Formato 2 control de disponibilidad mecánica.....	172
Figura 63.	Checklist predictivo QA/QC.....	174
Figura 64.	Checklist de calibración y verificación.....	178
Figura 65.	Escáner 3D Portátil Creaform HandySCAN 307 Elite.....	180
Figura 66.	Norbar ProTronic Plus 340.....	180
Figura 67.	Analizador de vibraciones Fluke 805 FC.....	181
Figura 68.	Termómetro de infrarrojos para altas temperaturas.....	182
Figura 69.	Registrador de datos Temperatura y humedad.....	183
Figura 70.	Micrómetro digital Serie 293.....	183
Figura 71.	Checklist técnico para el desmontaje de elementos superiores.....	190
Figura 72.	Procedimiento de inspección por líquidos penetrantes.....	195
Figura 73.	Ficha técnica SKC-S.....	196
Figura 74.	Ficha técnica SKL-SP2.....	197
Figura 75.	Formato para el registro de Torque de Cuñas.....	205
Figura 76.	Formato para Acta de Torque QA/QC.....	208
Figura 77.	Formato para el registro de dureza shore D.....	215

Figura 78.	Formato para el registro de prueba de adherencia ASTM D4541	216
Figura 79.	Formato consolidado QA/QC verificación de respaldo	218
Figura 80.	Monitoreo del backing.....	225
Figura 81.	Plataforma de monitoreo de condición.....	227
Figura 82.	IROC de la unidad minera de referencia	229
Figura 83.	Comparación visual de indicadores clave	270



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1	AMEF.....	288
Anexo N° 2	Medidas generales de chancadora	291



INTRODUCCIÓN

Contextualización del tema

La minería desempeña un papel crucial en la economía global al proporcionar minerales esenciales para industrias estratégicas. Según datos del Banco Mundial, las rentas minerales representaron aproximadamente el 2.5% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial en 2021, lo que evidencia el aporte significativo del sector minero al crecimiento económico internacional. (World Bank, 2023)

En el contexto latinoamericano, Perú se consolida como un actor clave en la industria minera global, ocupando el segundo lugar mundial en la producción de plata, cobre y zinc, de acuerdo con datos del Ministerio de Energía y Minas (MINEM (Ministerio de Energía y Minas del Perú), 2023). Este sector no solo impulsa la economía del país, sino que también tiene un fuerte impacto social. La minería genera empleo tanto directo como indirecto para millones de peruanos, contribuyendo a la reducción de la pobreza y mejorando la calidad de vida en comunidades cercanas a las operaciones mineras (INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática), 2023). Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, la minería fue el principal motor del crecimiento del PBI nacional en 2023, consolidando su rol estructural en la economía peruana. (INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática), 2023)

Dentro de este panorama nacional, la Unidad Minera de Referencia se constituye como una operación de gran escala e importancia estratégica. Aporta aproximadamente el 1% del PBI nacional y cerca del 78% del PBI de la región Apurímac, convirtiéndose en el principal eje económico regional (INFOBAE, 2022). Asimismo, es responsable del 92% de las transferencias mineras hacia Apurímac, beneficiando a más de 84 municipalidades, al gobierno regional y a dos universidades públicas, consolidando su impacto en el desarrollo territorial. (INFOBAE, 2022)

Este escenario reafirma la importancia estratégica de la minería en el crecimiento económico y su impacto en el desarrollo social, tanto a nivel global como en contextos nacionales y regionales. En consecuencia, resulta fundamental atender de manera prioritaria las problemáticas que afectan el desempeño eficiente de las operaciones mineras, especialmente aquellas de interés común. En particular, la gestión de equipos críticos se vuelve determinante para garantizar la continuidad operativa. Tal es el caso de las chancadoras primarias, donde cada hora de parada no programada puede representar pérdidas significativas en producción, costos operativos y cumplimiento de contratos, afectando directamente la rentabilidad del proceso extractivo. Por ello, la identificación,

monitoreo y mantenimiento de estos activos debe ser abordada como un eje clave de la gestión de activos.

Cuando las líneas de chancado primario se detienen de forma inesperada, se generan impactos económicos significativos. Estas interrupciones implican pérdidas considerables debido a la reducción en la cantidad de material procesado y transportado. En términos de producción, en 2024, la unidad minera de referencia produjo un promedio de 885 toneladas diarias de cobre, con un valor estimado de US\$7.96 millones diarios, considerando un precio promedio de \$9,000 por tonelada (ENERGIMINAS, 2024). De este modo, cada hora de parada no programada puede generar pérdidas que superan los \$300,000 comprometiendo gravemente los objetivos de producción.

Planteamiento del problema en términos generales

En la unidad minera del centro del Perú nace la necesidad de investigar la recurrencia de cinco eventos de fractura de cóncavos en los chancadores primarios debido al impacto significativo que estos incidentes han tenido en la producción, generando una detención acumulada de 322 horas. Esta prolongada inactividad no solo interrumpe el flujo normal de la planta, sino que también se traduce en un impacto negativo considerable en la disponibilidad anual de la planta de chancado, cifrado en un -1.86%. Es crucial comprender las razones subyacentes a estas fallas para mitigar estas pérdidas sustanciales de tiempo operativo y asegurar una mayor eficiencia en el proceso de chancado. Asimismo, la necesidad de investigar se fundamenta en la existencia de diversas posibles causas de falla que requieren ser confirmadas y analizadas en detalle las cuales se vienen detallando en diferentes reuniones de ingeniería.

En este sentido, resulta imperativo desarrollar estrategias de mantenimiento que reduzcan la frecuencia y duración de los tiempos de parada para optimizar recursos y maximizar la disponibilidad de activos clave.

Justificación y relevancia

Teórica

La investigación podría aportar al desarrollo del conocimiento en el campo del mantenimiento proactivo, específicamente aplicado a equipos críticos en minería. La formulación de hipótesis y el análisis de causa raíz sobre las fallas en los cóncavos de la chancadora primaria podrían proporcionar nuevas perspectivas teóricas sobre los factores que inciden en el desgaste y fractura de estos componentes. Además, se generaría información relevante para optimizar los procedimientos de mantenimiento basados en

evidencia científica, contribuyendo al enriquecimiento de la literatura académica en gestión del mantenimiento industrial.

Práctica

Desde una perspectiva aplicada, el proyecto podría mejorar la eficiencia y confiabilidad de los equipos de conminución primaria al reducir la frecuencia de fallas y los tiempos de parada en la operación minera de la Chancadora Primaria Traylor NT 60" x 113", ya que afectan significativamente la continuidad operativa, generando impactos económicos negativos al disminuir la capacidad de producción y afectar el cumplimiento de los objetivos extractivos.

Así mismo, el diseño e implementación de un nuevo procedimiento optimizado podrían servir como referencia para otras unidades mineras que enfrentan desafíos similares, fomentando la transferencia de buenas prácticas. Este enfoque contribuiría directamente a garantizar la continuidad operativa y mejorar los resultados productivos.

Relevancia Social

La investigación podría tener implicaciones positivas para el bienestar de los trabajadores involucrados en el mantenimiento y operación de la chancadora primaria. Al minimizar la necesidad de mantenimientos correctivos urgentes y la exposición a riesgos laborales, se promovería un entorno de trabajo más seguro y eficiente. Además, la mejora en los indicadores de productividad y rentabilidad de la operación minera podría generar un impacto positivo en las comunidades circundantes, al fortalecer la contribución económica y social.

Utilidad Metodológica

La metodología utilizada en el proyecto podría servir como modelo para abordar problemas similares en otros equipos industriales. El enfoque basado en el mantenimiento proactivo, el análisis de causa raíz y la implementación de hipótesis comprobadas podría ser replicado y adaptado a diferentes contextos industriales. Esto garantizaría que las estrategias desarrolladas en esta investigación fueran aplicables en un abanico más amplio de aplicaciones, potenciando la utilidad metodológica y su contribución al desarrollo del campo del mantenimiento.

Propósito del estudio

El propósito del estudio es mejorar el procedimiento de cambio de cóncavos aplicando una estrategia de mantenimiento proactivo.

Estructura del documento

La presente investigación expone 3 fases clave; primero se desarrolla el diagnóstico del contexto de la gestión del mantenimiento y se justifica a la chancadora primaria como activo crítico mediante disponibilidad, cabe resaltar que las chancadoras primarias en cualquier unidad minera, como se describe en los antecedentes, es un activo crítico como primera máquina compleja sometida al proceso productivo de trituración. La rotura de cóncavos es uno de los eventos que pueden detener la producción de mineral, siendo el modo de fallo de máquina más relevante durante el periodo investigado. Para ello se realiza un análisis de causa raíz, fase destacada del método de la estrategia del mantenimiento proactivo.

En la siguiente etapa se comprueban en campo las hipótesis sobre la rotura de cóncavos, cada hipótesis es abordada desde el punto de vista experimental, o por ensayo y error.

En la siguiente etapa se plantea el nuevo procedimiento PETS2.0 de cambios de cóncavos, esta propuesta no solo es un cambio procedimental, sino un cambio de la estrategia aplicada a este procedimiento, la cual en base a sus enfoques de estrategia del mantenimiento proactivo, puede replicarse en otros procesos de la chancadora, dichos enfoques aplican; cambio organizacional, consideración de recursos tecnológicos, intervención de otras áreas de manera efectiva, creación de herramientas de gestión de confiabilidad y mantenimiento predictivo. Las cuales son las bases del mantenimiento proactivo

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Formulación del problema

1.1.1 Problema general

¿Cómo mejorar el procedimiento de cambio de cóncavos de la chancadora primaria Traylor NT 60" x 113" en base al mantenimiento proactivo?

1.1.2 Problemas específicos

- ¿Qué limitaciones presentan los procedimientos actuales de mantenimiento de la chancadora primaria y cómo influyen las condiciones operativas en la ocurrencia de fallas?
- ¿Cuáles son las causas principales de las fracturas en los cóncavos de la chancadora primaria?
- ¿Qué hipótesis pueden plantearse respecto a las fallas en los cóncavos y cómo pueden validarse mediante pruebas técnicas y operativas?
- ¿Cómo diseñar un procedimiento optimizado que aborde las fallas en los cóncavos y mejore el desempeño del mantenimiento en la chancadora primaria?
- ¿Qué impacto tienen los costos asociados a la propuesta de mejora en la sostenibilidad económica de la operación minera de referencia?

1.2 Formulación de los objetivos

1.2.1 Objetivo general

Mejorar el procedimiento de cambio de Cóncavos de la Chancadora Primaria Traylor NT 60" x 113" en base al Mantenimiento Proactivo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar la información sobre los procedimientos de mantenimiento de la chancadora primaria y evaluar las condiciones operativas del equipo.
- Llevar a cabo un análisis de causa raíz enfocado en identificar los modos de falla en los cóncavos.
- Formular y comprobar hipótesis relacionadas con las fallas por fracturas de cóncavos.

- Diseñar y proponer un procedimiento optimizado para el mantenimiento de los cóncavos y componentes relacionados.
- Evaluar los costos asociados respecto al periodo de recuperación a la propuesta de mejora del procedimiento de cambio de cóncavos.

1.3 Formulación de las Hipótesis

1.3.1 Hipótesis General

La implementación de un procedimiento optimizado (PETS 2.0) basado en el mantenimiento proactivo, que integre control de calidad (QA/QC) y herramientas predictivas, reducirá la recurrencia de fracturas en los cóncavos y aumentará la disponibilidad operativa del equipo.

1.3.2 Hipótesis Específicas

- Los procedimientos actuales carecen de controles metrológicos y estándares de aseguramiento de calidad (QA/QC), lo que, sumado a condiciones operativas agresivas (bolonería e inchancables), incrementa la variabilidad y el riesgo de falla en el montaje.
- Los modos de falla predominantes en los cóncavos son las fracturas frágiles y los desplazamientos verticales, originados por la pérdida de soporte estructural debido a un backing defectuoso y al torque inadecuado de las cuñas de sujeción.
- La aplicación del backing a temperaturas inferiores a las recomendadas por el fabricante ($<10^{\circ}\text{C}$) y sin control de tiempos de curado impide alcanzar la resistencia a la compresión necesaria (110 MPa), provocando el colapso del soporte y la posterior fractura del cóncavo.
- Un procedimiento estandarizado (PETS 2.0) que incorpore listas de verificación (checklists), escaneo láser 3D y control de torque por etapas, garantizará una instalación dentro de tolerancias y reducirá la variabilidad humana en la ejecución.
- La inversión inicial en equipos de metrología, capacitación y herramientas de calidad se recuperará en un periodo menor a un año gracias a los ahorros generados por la reducción de horas de parada y el aumento de la producción procesada.

1.4 Antecedentes de la investigación

1.4.1 Nivel Internacional

Novak, Hudak y Varga (2021); en su artículo científico exploraron la implementación de tecnologías de la Industria 4.0, como el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de big data y la inteligencia artificial, para el mantenimiento predictivo en sistemas de chancadoras mineras. Su estudio analizó cómo la recopilación y el análisis en tiempo real de datos de sensores pueden utilizarse para monitorear la condición de los componentes críticos de la chancadora, predecir posibles fallas y optimizar los programas de mantenimiento. Se presentaron casos de estudio y modelos conceptuales para la aplicación de estas tecnologías en la mejora de la disponibilidad, la reducción de los costos de mantenimiento y la extensión de la vida útil de las chancadoras. Los investigadores concluyeron que la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 ofrece un potencial significativo para transformar el mantenimiento de las chancadoras de un enfoque reactivo o preventivo a uno predictivo y proactivo, lo que resulta en una mayor eficiencia operativa y una reducción de los riesgos. (Novak et al., 2021)

Smith, Brown y Lee (2022); en su artículo de revisión proporcionaron un análisis exhaustivo de las diversas técnicas de monitoreo de condición aplicables a las chancadoras de cono en la industria minera. Se examinaron en detalle métodos como el análisis de vibraciones, el análisis acústico, la termografía, el análisis de aceite y el monitoreo de partículas de desgaste. Los autores evaluaron la capacidad de cada técnica para detectar diferentes tipos de fallas en los componentes de la chancadora, como rodamientos, engranajes, revestimientos y el sistema hidráulico. También se discutieron las ventajas y desventajas de cada técnica en términos de sensibilidad, costo de implementación y facilidad de interpretación de los datos. La conclusión principal de esta revisión es que la selección de las técnicas de monitoreo de condición más apropiadas depende de los modos de falla específicos que se desean detectar y de las condiciones operativas de la chancadora, recomendando a menudo una combinación de varias técnicas para un diagnóstico más completo y preciso. (Smith et al., 2022)

Chen, Wang y Zhao (2023); en su artículo científico presentaron un modelo de optimización para la programación del reemplazo de los revestimientos (liners) en chancadoras primarias basado en la predicción del desgaste. El modelo consideró factores como la tasa de desgaste de los liners en función de las condiciones de operación y las propiedades del material procesado, los costos de reemplazo, y las pérdidas de producción

debido al tiempo de inactividad. El objetivo del modelo fue determinar el momento óptimo para realizar el reemplazo de los liners, minimizando los costos totales a lo largo del ciclo de vida de los revestimientos. Se presentaron simulaciones y análisis de sensibilidad para ilustrar la aplicación del modelo en diferentes escenarios operativos. La conclusión clave del artículo es que la implementación de un modelo de predicción de desgaste para la programación del reemplazo de liners puede conducir a una reducción significativa de los costos de mantenimiento y a una mayor eficiencia operativa de las chancadoras primarias, al evitar reemplazos prematuros o fallas inesperadas. (Chen et al., 2023)

1.4.2 Nivel Nacional

Quispe Yupanqui y Lapiz Chuquimbalqui (2021); en su tesis de maestría investigaron la gestión del mantenimiento preventivo como una estrategia para mejorar la disponibilidad de una chancadora primaria Traylor 60"x113" en una empresa minera del sur de Perú. Su estudio analizó el programa de mantenimiento preventivo existente, identificando sus fortalezas y debilidades en relación con la disponibilidad del equipo. Los autores propusieron mejoras al plan de mantenimiento preventivo, incluyendo la optimización de la frecuencia de las tareas, la estandarización de los procedimientos y la implementación de un sistema de seguimiento y análisis de indicadores de mantenimiento. Su investigación evaluó el impacto potencial de las mejoras propuestas en la reducción del tiempo de inactividad no planificado y el aumento de la eficiencia operativa de la chancadora. La conclusión principal de su tesis fue la recomendación de implementar un sistema de gestión del mantenimiento preventivo más efectivo, el cual contribuiría significativamente a maximizar la disponibilidad del equipo y a reducir los costos de mantenimiento a largo plazo en la chancadora Traylor. (Quispe Yupanqui & Lapiz Chuquimbalqui, 2021)

Rojas Mendoza (2020); en su tesis de maestría propuso la implementación de un modelo de mantenimiento basado en la condición para los equipos críticos de una planta concentradora en Perú. Su investigación se centró en el desarrollo de una metodología para identificar los equipos críticos, seleccionar las técnicas de monitoreo de condición apropiadas para cada uno y establecer los criterios de evaluación para determinar el estado de los equipos. La tesis también abordó la integración del sistema de monitoreo de condición con el sistema de gestión de mantenimiento existente y la capacitación del personal. La conclusión principal de su trabajo fue que la implementación de un modelo de mantenimiento basado en la condición permite optimizar los recursos de mantenimiento,

reducir los tiempos de inactividad no planificados y aumentar la vida útil de los equipos críticos, contribuyendo a una mayor eficiencia y rentabilidad de la planta concentradora. (Rojas Mendoza, 2020)

Vargas Loayza y Mendoza Bellido (2021); en su artículo científico analizaron la influencia del mantenimiento proactivo en la disponibilidad de la flota de equipos mineros en operaciones peruanas. Su investigación examinó diferentes estrategias y técnicas de mantenimiento proactivo, como el análisis de vibraciones, la termografía y el análisis de aceite, y su impacto en la reducción de fallas y el aumento del tiempo operativo de los equipos. El estudio también consideró los aspectos económicos de la implementación del mantenimiento proactivo. La conclusión principal del artículo fue que la adopción de estrategias de mantenimiento proactivo tiene un impacto positivo significativo en la disponibilidad de la flota de equipos mineros, lo que se traduce en una mayor productividad y una reducción de los costos operativos. (Vargas Loayza & Mendoza Bellido, 2021)

1.4.3 Antecedentes Locales

Mamani Hanco y Volz Oporto (2020); en su tesis de grado propusieron un plan de mantenimiento basado en confiabilidad (CMR) específicamente diseñado para un chancador giratorio Traylor que operaba en una empresa minera ubicada en la región de Arequipa, Perú. Su estudio comenzó con un análisis detallado del equipo, identificando sus componentes críticos y los modos de falla más comunes. Los autores aplicaron la metodología CMR para determinar las tareas de mantenimiento preventivo, predictivo y proactivo más adecuadas para cada modo de falla, con el objetivo de maximizar la confiabilidad y disponibilidad del chancador. Su propuesta del plan de mantenimiento incluyó la definición de la frecuencia de las tareas, los procedimientos de ejecución, los recursos necesarios y los indicadores clave de rendimiento (KPIs) para el seguimiento y la evaluación de su efectividad. La conclusión central de su tesis fue que la implementación del plan CMR propuesto para el chancador giratorio Traylor en la empresa minera de Arequipa generaría beneficios significativos, incluyendo la reducción de los tiempos de inactividad no planificados, la optimización de los costos de mantenimiento y la mejora de la seguridad operativa del equipo. (Mamani Hanco & Volz Oporto, 2020)

Gutiérrez Cartagena (2023); en su tesis de bachiller buscó la mejora de la estrategia de mantenimiento en el armado del eje principal en las Chancadoras Primarias en una Unidad Minera ubicada al Sur del Perú, empleando herramientas como el análisis de causa raíz (ACR) y el análisis de modo y efecto de fallas (AMEF), evaluando los procedimientos con

los datos recopilados. Al evaluar el mantenimiento de la Chancadora y la documentación existente, evidenció que se trabajaba según protocolos, extrayendo el elemento más crítico. Utilizando los procedimientos escritos de trabajo seguro (PETS) del montaje y desmontaje de la Chancadora Primaria, evaluó y modificó las tareas para reconocer las cruciales, logrando encontrar el motivo de falla y solucionando dicho problema con la implementación de controles adecuados para el armado. Sus conclusiones principales fueron la optimización de tiempos de ejecución en el Armado de Main shaft en un 37.5% y en costos de mantenimiento en un 47.6%, además de un beneficio en costo y tiempo del 33% al analizar las pérdidas de producción por soltura de mantos. También se realizaron mejoras en el procedimiento estándar de armado de mantos, utilizando ahora dos piezas en lugar de tres para minimizar la posibilidad de soltura, y se capacitó al personal técnico y supervisión. La investigación identificó como causa principal de la soltura de mantos la calidad inadecuada del respaldo epóxico debido a una preparación incorrecta y el traslado horizontal del Main shaft armado, proponiendo mejoras en el procedimiento de elaboración y curado del respaldo, manteniendo la posición vertical del Main shaft y utilizando dos mantos en el armado. (Gutiérrez Cartagena, 2023)

1.5 Marco Conceptual

1.5.1 Gestión del Mantenimiento

La gestión del mantenimiento se define como el conjunto de actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización con respecto al mantenimiento. Esto incluye la formulación de políticas, objetivos y estrategias de mantenimiento, así como la planificación, ejecución, control y mejora de las actividades de mantenimiento para asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los activos. (García Garrido, 2006)

1.5.1.1 Tipos de Mantenimiento

Existen diversos tipos de mantenimiento, los cuales se pueden clasificar principalmente en:

- Mantenimiento Reactivo (Correctivo): Se realiza después de que ocurre una falla en el equipo, con el objetivo de restaurar su funcionamiento normal. Es el tipo de mantenimiento más básico y suele generar altos costos debido a paradas no planificadas y posibles daños secundarios. (Creus Sole, 2007)
- Mantenimiento Preventivo: Se basa en la realización de inspecciones, revisiones, lubricación y reemplazo de componentes a intervalos predeterminados, con el fin de reducir la probabilidad de fallas. Se planifica en función del tiempo de operación, la cantidad de ciclos o el calendario. (Vilar Burguete, José Luis, 2011)
- Mantenimiento Predictivo: Utiliza técnicas de monitoreo de condición para detectar cambios en los parámetros de funcionamiento de los equipos que puedan indicar una falla inminente. Esto permite programar las intervenciones de mantenimiento antes de que ocurra la falla, optimizando los recursos y minimizando las paradas no planificadas. (Mobley, 2002)

1.5.1.2 Fundamentos del Mantenimiento Proactivo

A. Concepto de mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo es una estrategia que se centra en identificar y eliminar las causas fundamentales de las fallas en los equipos antes de que ocurran. A diferencia de los enfoques reactivos o preventivos, el mantenimiento proactivo busca mejorar las condiciones operativas y de diseño que generan fallas, utilizando herramientas como el análisis de causa raíz y la mejora continua.

Según (Mack Echeverría, 2022), el mantenimiento proactivo implica una filosofía de gestión que prioriza la prevención de fallas mediante la intervención en las causas subyacentes, en lugar de simplemente abordar los síntomas o efectos de dichas fallas.

1.5.1.3 Estrategia de mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo es una filosofía de gestión del mantenimiento que se centra en la prevención de fallas recurrentes y la mejora continua de la confiabilidad de los activos. Su objetivo principal es eliminar las causas raíz de los problemas en lugar de simplemente reparar los síntomas. Esto se logra a través de la implementación de diversas herramientas y técnicas que permiten analizar el comportamiento de los equipos, identificar áreas de mejora y optimizar los procedimientos de mantenimiento. (Vargas Loayza & Mendoza Bellido, 2021)

El mantenimiento proactivo se apoya en diversas herramientas y técnicas para lograr sus objetivos, entre las cuales destacan:

- Análisis de Causa Raíz (ACR): Es un proceso sistemático utilizado para identificar las causas fundamentales de un problema o falla. Su objetivo es ir más allá de los síntomas superficiales y determinar los factores subyacentes que contribuyeron al evento. (Andersen & Fagerhaug, 2017)
- Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF): Es una técnica proactiva utilizada para identificar los posibles modos de falla de un equipo o sistema, sus efectos en el funcionamiento y la probabilidad de ocurrencia. Permite priorizar los riesgos y desarrollar planes de acción para prevenir las fallas más críticas. (Stamatis, 2015)
- Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM): Es una metodología que se utiliza para determinar las políticas de mantenimiento óptimas para cada activo, basándose en sus funciones, modos de falla y las consecuencias de estas fallas. (Nowlan F. Stanley & Heap, 1992)
- Monitoreo de Condición: Incluye diversas técnicas como el análisis de vibraciones, la termografía, el análisis de aceite y las pruebas no destructivas, que permiten evaluar el estado de los equipos en tiempo real y detectar signos tempranos de deterioro o falla. (Smith et al., 2022)
- Análisis de Datos Históricos: El análisis de los registros de mantenimiento y los datos de fallas pasadas puede proporcionar información valiosa sobre las causas recurrentes de problemas y las áreas donde se pueden implementar mejoras proactivas. (Rojas Mendoza, 2020)

A. Ventajas del mantenimiento proactivo en equipos críticos

Implementar un enfoque proactivo en el mantenimiento de equipos críticos ofrece múltiples beneficios:

- **Reducción de tiempos de inactividad:** Al eliminar las causas de las fallas, se minimizan las interrupciones no planificadas.
- **Aumento de la vida útil de los activos:** Al mantener condiciones óptimas de operación, los equipos sufren menos desgaste.
- **Mejora en la seguridad operativa:** Al prevenir fallas, se reducen los riesgos asociados a accidentes laborales.
- **Optimización de costos:** Aunque requiere inversiones iniciales, a largo plazo reduce los gastos asociados a reparaciones y reemplazos.

Estas ventajas son respaldadas por estudios como el de (Moscoso Jácome, 2017), quien destaca la eficacia del mantenimiento proactivo en la reducción de fallas en equipos mecánicos de transporte de hidrocarburos.

1.5.1.4 Indicadores del mantenimiento

Según (Torres Farinha, 2018), en el campo del mantenimiento industrial, los indicadores técnicos desempeñan un papel esencial al permitir evaluar la eficiencia operativa de los activos y respaldar decisiones orientadas a la mejora continua. Indicadores como la confiabilidad, el MTBF, el MTTR y la disponibilidad proporcionan información clave sobre la respuesta de los equipos frente a fallas, los tiempos de reparación y su capacidad de funcionamiento. Estos parámetros son fundamentales para diseñar estrategias de mantenimiento efectivas y maximizar la disponibilidad técnica de los sistemas.

Para evaluar la eficacia de las estrategias de mantenimiento, se utilizan varios indicadores clave:

- MTBF (Mean Time Between Failures):

Según (Torres Farinha, 2018), En su libro *Asset Maintenance Engineering Methodologies*, cita a Ferreira (1998), quien describe el MTBF (Mean Time Between Failures) como un indicador de confiabilidad que refleja el tiempo promedio entre dos fallas sucesivas de un equipo. Este parámetro se obtiene al dividir la suma total de los tiempos entre fallas (TBF) por la cantidad de fallas ocurridas durante el periodo analizado.

Fórmula:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=0}^n TBF_i}{n}$$

(1)



Donde:

MTBF: Tiempo medio entre fallas

TBF: es el tiempo entre fallas

n: el número total de fallas observadas

– MTTR (Mean Time To Repair):

Según (Torres Farinha, 2018), En su libro *Asset Maintenance Engineering Methodologies*, cita a Ferreira (1998), quien señala que el MTTR (Mean Time To Repair) corresponde al tiempo promedio necesario para restaurar un equipo a su estado operativo tras una falla. Este valor se obtiene promediando los tiempos individuales de reparación registrados, y permite valorar la eficiencia del sistema técnico y del personal en devolver la funcionalidad al equipo en el menor tiempo posible. Este indicador resulta fundamental para evaluar la mantenibilidad, ya que menores tiempos de reparación implican una menor afectación en las operaciones.

Fórmula:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=0}^n TTR_i}{n} \quad (2)$$

Donde:

MTTR: Tiempo medio para reparar

TTR: es el tiempo de reparación

n: el número de fallas corregidas

– Disponibilidad:

Según (Torres Farinha, 2018), En su libro *Asset Maintenance Engineering Methodologies*, cita a Ferreira (1998), quien sostiene que la disponibilidad es un indicador que representa el porcentaje de tiempo en que un sistema permanece operativo, tomando en cuenta tanto las fallas como los tiempos requeridos para su reparación. Este parámetro no solo evalúa la capacidad del activo para estar disponible cuando se requiere, sino que también evidencia la eficiencia del sistema de mantenimiento en reducir los periodos de inactividad. En esencia, se trata de una medida de la efectividad operativa del equipo, ampliamente

utilizada para analizar el desempeño en entornos industriales.



Fórmula clásica (steady-state availability):

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

Donde:

MTBF: es el tiempo promedio entre fallas.

MTTR: es el tiempo promedio de reparación.

Esta expresión permite estimar el porcentaje de tiempo disponible para operar un sistema, suponiendo un comportamiento estable del equipo a lo largo del tiempo, (Torres Farinha, 2018).

– Confiabilidad:

Según (Torres Farinha, 2018), En su libro *Asset Maintenance Engineering Methodologies*, cita a Ferreira (1998), quien señala que la confiabilidad en el ámbito del mantenimiento se refiere a la probabilidad de que un equipo o componente opere correctamente dentro de los parámetros de calidad establecidos, durante un tiempo determinado y bajo condiciones operativas definidas. Este enfoque se alinea con la norma EN 13306, que describe la confiabilidad como la capacidad de un bien para desempeñar una función requerida dentro de un intervalo temporal específico, lo que también permite entenderla como una medida probabilística del comportamiento confiable del activo.

Según Torres Farinha (2018), cuando un sistema presenta una tasa de falla constante λ , la confiabilidad en un tiempo t se expresa mediante la siguiente función:

Fórmula (modelo exponencial):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Si se conoce el MTBF (Mean Time Between Failures), se puede expresar:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (I)$$

Donde:

$R(t)$: probabilidad de que el sistema no haya fallado hasta el tiempo t .

λ : tasa de fallas constantes ($\lambda = 1/MTBF$).

t : tiempo de operación.

NOTA: A mayor MTBF, más lentamente disminuye la confiabilidad con el tiempo.

Estos indicadores son fundamentales en la gestión del mantenimiento y se abordan en profundidad en el "Manual de Mantenimiento" de (Rodríguez Machado, 2012).

1.5.2 Minería y Procesos de Conminución

1.5.2.1 Importancia de la minería en el Perú

La actividad minera constituye uno de los pilares fundamentales de la economía peruana, desempeñando un rol estratégico en el crecimiento nacional y el desarrollo regional. De acuerdo con el Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), el sector minero aportó aproximadamente el 9.5 % al Producto Bruto Interno (PBI) en el año 2024, consolidándose como uno de los principales motores económicos del país (El Peruano, 2025). En el ámbito del comercio exterior, el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) informó que entre enero y abril del mismo año, las exportaciones mineras alcanzaron los 13,968 millones de dólares, representando el 31.5 % del total de exportaciones nacionales (MINEM, 2024). Además, este sector desempeña un papel relevante en la generación de empleo, con un promedio de 239,700 puestos directos durante el primer bimestre de 2025 (ENERGIMINAS, 2025b). A nivel descentralizado, la minería contribuye de manera significativa al financiamiento de los gobiernos subnacionales mediante transferencias por canon minero, las cuales superaron los 8,070 millones de soles en 2024 (ENERGIMINAS, 2025a). Asimismo, el Perú cuenta con una cartera activa de 51 proyectos mineros en etapa de desarrollo, que representan una inversión conjunta de aproximadamente 54.6 mil millones de dólares, lo que evidencia el atractivo del país para la inversión extranjera en el sector (EY Perú, 2025). Finalmente, es importante destacar que la minería peruana ha iniciado una etapa de modernización tecnológica, incorporando herramientas como la inteligencia artificial, la automatización y sistemas digitales avanzados, con el objetivo de incrementar la eficiencia operativa y promover una minería sostenible (Cajahuaringa, 2025).

1.5.2.2 Etapas del proceso de conminución

La conminución es el proceso de reducción del tamaño de las rocas y minerales extraídos de las minas. Los equipos utilizados en esta etapa son críticos para la producción minera y suelen operar en condiciones severas. Entre los principales equipos de conminución se encuentran las chancadoras y los molinos. (Wills & Napier-Munn, 2011) a continuación, describiremos las etapas que se involucran en el proceso minero:

1.5.2.2.1 Trituración

La trituración es la primera etapa mecánica del proceso de conminución. Su objetivo principal es reducir el tamaño de las rocas grandes extraídas de la mina a fragmentos más pequeños que puedan ser manejados en etapas posteriores. Este proceso se realiza mediante la aplicación de fuerzas mecánicas, como compresión, impacto, corte y fricción (Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T., 1996). Los equipos utilizados incluyen trituradoras de mandíbulas, giratorias y de cono.

La trituración se clasifica en:

- **Trituración primaria:** Reduce el tamaño del material de aproximadamente 1 metro a 100 mm.
- **Trituración secundaria:** Reduce el tamaño de 100 mm a 10 mm.
- **Trituración terciaria:** Puede llevar el tamaño del material hasta 1 mm, dependiendo de los requerimientos del proceso.

1.5.2.2.2 Molienda

La molienda es la etapa siguiente a la trituración y tiene como objetivo reducir aún más el tamaño de las partículas minerales para liberar los minerales valiosos de la ganga. Este proceso se realiza en molinos que aplican fuerzas de impacto y fricción (Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T., 1996).

Los tipos de molinos más comunes son:

- **Molinos de bolas:** Utilizan bolas de acero como medio de molienda.
- **Molinos SAG (Semi-Autógenos):** Utilizan una combinación de mineral y bolas de acero.
- **Molinos de rodillos de alta presión (HPGR):** Aplican alta presión para triturar el material.

La molienda se clasifica según el tamaño de salida:

- **Molienda gruesa:** Tamaño de salida entre 1-2 mm.
- **Molienda media:** Tamaño de salida entre 200-500 μm .
- **Molienda fina:** Tamaño de salida entre 50-100 μm .

1.5.2.2.3 Clasificación

Después de la molienda, es necesario clasificar las partículas según su tamaño para asegurar una eficiencia óptima en las etapas posteriores del procesamiento de minerales (Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T., 1996).

Los métodos de clasificación más comunes incluyen:

- **Cribas:** Separan partículas según su tamaño mediante mallas.
- **Ciclones:** Utilizan la fuerza centrífuga para separar partículas de diferentes densidades.
- **Clasificadores por gravedad:** Separan partículas basándose en su densidad y forma.

Es importante destacar que la conminución representa una de las etapas con mayor consumo energético en el procesamiento de minerales, llegando a representar entre el 30% y 50% del consumo total de energía de una planta concentradora. Por ello, la optimización de este proceso es crucial para mejorar la eficiencia y reducir los costos operativos.

1.5.2.3 Chancado primario: función e impacto operativo

El chancado primario es la primera etapa del proceso de conminución y tiene como finalidad reducir el tamaño del mineral extraído directamente del yacimiento, usualmente de hasta 1.5 metros, a fragmentos de entre 150 y 200 milímetros. Este proceso se realiza mediante equipos robustos como chancadoras de mandíbulas o giratorias, que aplican fuerzas de compresión e impacto para romper el material. Su función principal es preparar el mineral para las etapas de chancado secundario y molienda, facilitar su transporte dentro de la planta y estabilizar el flujo de alimentación hacia procesos posteriores. Desde el punto de vista operativo, el chancado primario tiene una alta criticidad, ya que cualquier falla puede detener toda la producción aguas abajo. Además, influye directamente en la eficiencia energética global del circuito, dado que un producto mal dimensionado puede sobrecargar la molienda. También requiere mantenimiento frecuente debido al desgaste por abrasión, y tiene impacto sobre la recuperación metalúrgica, al afectar la liberación del mineral valioso. Según (Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T., 1996) la trituración se clasifica en primaria, secundaria y terciaria, en función del tamaño del producto, siendo el chancado primario el responsable de la primera gran reducción de tamaño en el procesamiento de minerales. Por otro lado, las chancadoras son equipos utilizados para la

reducción gruesa y media del tamaño de los materiales. Se clasifican en varios tipos según su principio de funcionamiento:

- Chancadoras de Mandíbulas: Utilizan dos placas, una fija y otra móvil, para triturar el material por compresión. (Gupta & Yan, 2006)
- Chancadoras Giratorias: Consisten en un cono interior que gira dentro de un cono exterior fijo, triturando el material por compresión entre ambos. (King, 2001)
- Chancadoras de Cono: Similares a las giratorias, pero con un diseño más compacto y utilizadas para la trituración secundaria y terciaria. (Kelly & Spottiswood, 1990)
- Chancadoras de Impacto: Utilizan martillos o barras de impacto que giran a alta velocidad para golpear y fracturar el material. (Andreasen, 1997)

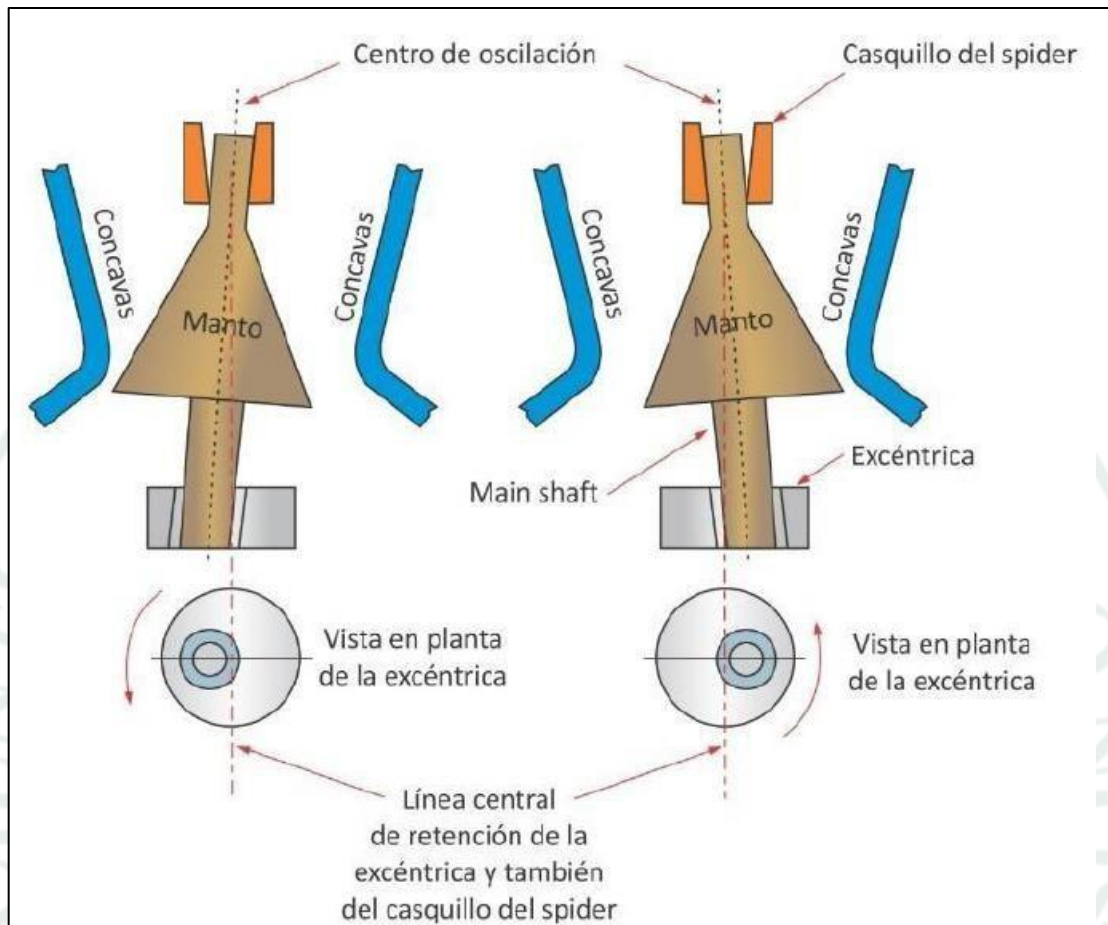
1.5.3 Chancadora Primaria Traylor NT 60” x 113”

1.5.3.1 Principio de funcionamiento de una chancadora giratoria

La chancadora giratoria Traylor NT 60” x 113” opera mediante un eje principal que realiza un movimiento giratorio excéntrico dentro de una carcasa fija. Este movimiento comprime el mineral entre el manto (superficie móvil) y los cóncavos (superficie fija), reduciendo su tamaño. El diseño permite una trituración continua y eficiente de grandes volúmenes de material.

Figura 1.

Principio de funcionamiento de la chancadora.



Nota. Adaptado de (Pacherrez Vines et al., 2020).

1.5.3.2 Componentes principales

La chancadora giratoria Traylor NT 60" x 113" cuenta con una arquitectura robusta que integra diversos subsistemas diseñados para soportar las exigencias de la operación minera a gran escala. Entre sus principales componentes descritos en el manual (FLSmidt, 2011), se encuentran:

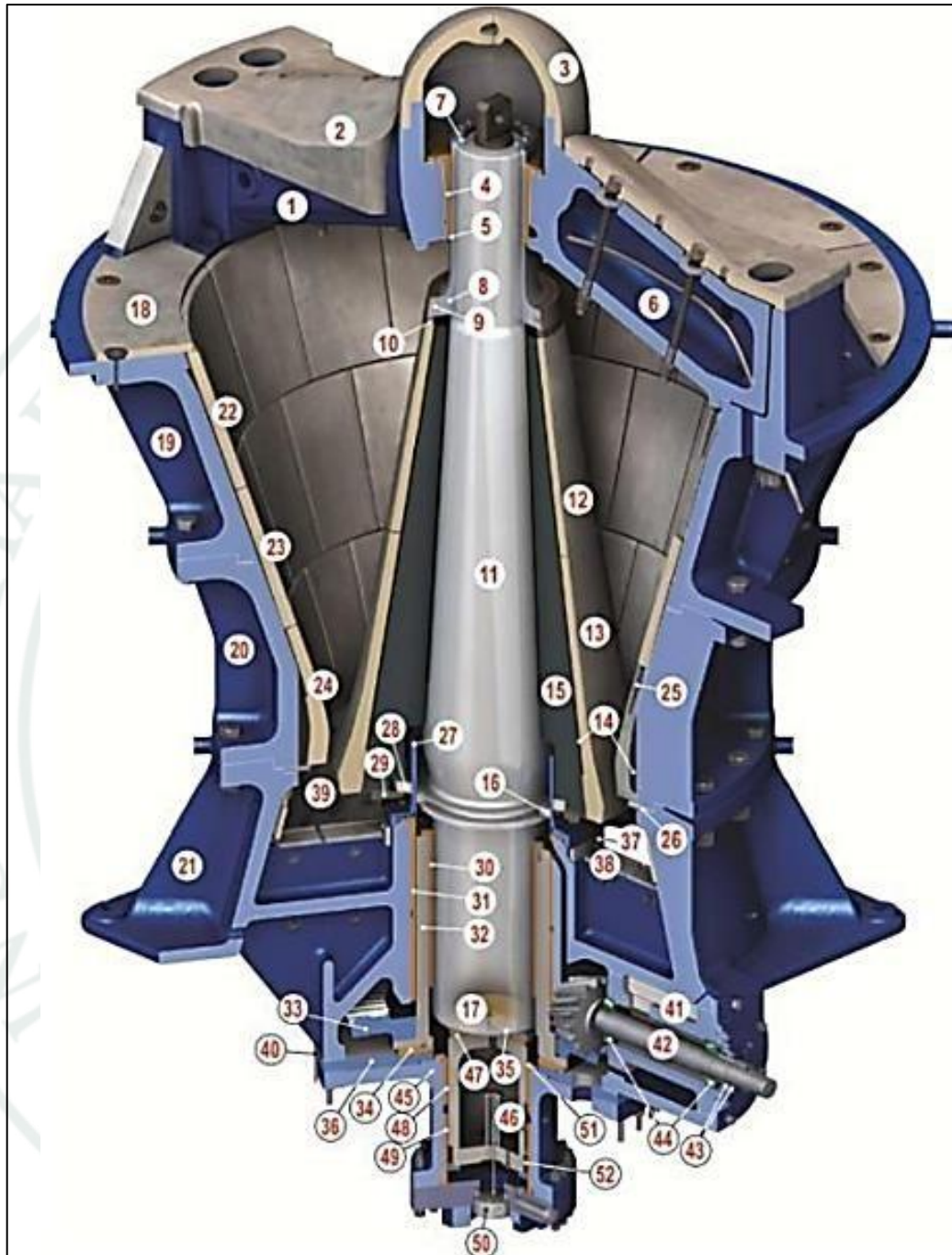
- Araña (Spider): Es la estructura superior que sostiene el extremo del eje principal y sirve como soporte para los revestimientos superiores. Su función estructural es esencial para la estabilidad del conjunto superior (FLSmidt, 2011, p. 5-9).
- Eje Principal (Main Shaft): Es el eje vertical sobre el cual se monta el manto. Su movimiento oscilatorio, generado por el conjunto excéntrico, permite la trituración del mineral por compresión (FLSmidt, 2011p. 5-11).

- Manto (Mantle): Revestimiento móvil que recubre el cono triturador. Al girar junto con el eje, aplasta el material contra los cóncavos (FLSmith, 2011, p. 5-12).
- Cóncavos (Concaves): Revestimientos fijos montados en el casco superior. Junto con el manto, forman la cámara de trituración. Son elementos de desgaste reemplazables, diseñados para ser cambiados en secciones (FLSmith, 2011, p. 5-13).
- Excéntrica (Eccentric Assembly): Es el sistema que imprime el movimiento giratorio al eje principal. Está compuesto por una carcasa excéntrica, cojinetes y sistemas de transmisión. Su movimiento cíclico permite la trituración continua del material (FLSmith, 2011, p. 5-14).
- Sistema de Lubricación: Incluye bombas, depósitos y líneas de distribución que garantizan la lubricación constante de cojinetes y otras partes móviles, previniendo el sobrecalentamiento y desgaste prematuro (FLSmith, 2011, p. 6-1 a 6-5).
- Sistema de Ajuste de Abertura (Setting System): Permite variar la apertura de descarga para controlar el tamaño del producto triturado. Este sistema puede ser hidráulico o mecánico, y es fundamental para la eficiencia del proceso (FLSmith, 2011, p. 7-2).

Estos componentes están diseñados para facilitar el mantenimiento, resistir altos niveles de esfuerzo mecánico y maximizar la disponibilidad operativa del equipo en contextos mineros exigentes. En la FIGURA N°2 se pueden observar las partes principales de la chancadora primaria.

Figura 2.

Partes principales de la chancadora primaria



Nota. Adaptado de (FLSmith, 2011).

La Figura 2 presenta una vista seccionada de las partes principales de la chancadora primaria, permitiendo identificar la disposición interna de componentes críticos como la araña, el eje principal, los mantos, los cóncavos y el conjunto excéntrico. Desde el punto de vista técnico, la imagen evidencia que la trituración depende de la interacción geométrica entre los elementos fijos y móviles, así como del correcto soporte estructural y mecánico del

eje central. Su análisis permite comprender que cualquier desviación en el montaje, desgaste de revestimientos o falla en los sistemas de soporte y transmisión puede comprometer directamente la eficiencia operativa y la confiabilidad del equipo.

Tabla 1

Lista de partes de la chancadora primaria

Lista de partes de la chancadora 60” x 113” Traylor® Type “NT” Gyratory	
1 - Araña	28 - Anillo de sello de polvo
2 - Escudo de brazo de araña	29 - Sello retenedor de polvo
3 - Gorra de araña	30 - Buje excéntrico Interno
4 - Buje de araña	31 - Buje excéntrico Exterior
5 - Junta de grasa de Araña	32 - Excéntrica
6 - Manguera de grasa de araña	33 - Engranaje
7 - Tapa del extremo del eje	34 - Anillo de desgaste de la excéntrica
8 - Manguito del eje principal roscado	35 - Anillo central de desgaste
9 - Tuerca de cabeza (head nut)	36 - Placa inferior
10 - Anillo de sacrificio (filler ring)	37 - Placa protectora
11 - Eje principal	38 - Protector del brazo
12 - Manto superior	39 - Protector externo de la pared
13 - Manto inferior	40 - Protector de cubierta de engranaje
14 - Material de relleno (backing)	41 - Alojamiento del contra eje
15 - Núcleo del manto (mantle core)	42 - Contra eje
16 - Sello de aceite de contacto dividido	43 - Sello de contra eje
17 - Anillo de empuje del eje principal	44 - Rodamiento de contra eje
18 - Revestimientos superiores	45 - Cilindro hidráulico
19 - Casco superior	46 - Pistón
20 - Casco medio	47 - Anillo de desgaste del pistón
21 - Casco inferior	48 - Buje superior del pistón
22 - Cóncavo superior	49 - Buje inferior del pistón
23 - Cóncavo medio	50 - Indicador de posición del manto
24 - Cóncavo inferior	51 - Contacto deslizante del anillo
25 - Pasador de bloqueo cóncavo	52 - Sello del pistón
26 - Anillo de soporte de cóncavo	
27 - Protector de sello de polvo	

Nota. Adaptado (FLSmith, 2011).

La Tabla 1 presenta la lista de partes principales de la chancadora primaria Traylor NT 60” x 113”, ordenando los componentes estructurales, de trituración, transmisión y

sellado que conforman el equipo. En ella se identifican elementos críticos como la araña, el eje principal, los mantos, los cóncavos, la excéntrica y el sistema hidráulico, los cuales intervienen directamente en el proceso de reducción de mineral. Su revisión permite reconocer la complejidad mecánica del conjunto y constituye una base técnica para el análisis funcional, el mantenimiento y la mejora del procedimiento de cambio de cóncavos.

1.5.3.3 Cóncavos: características, función y modos de falla

Según (FLSmidth, 2011) y (Wills & Napier-Munn, 2011) los **cóncavos** son revestimientos internos de acero de alta resistencia al desgaste, diseñados para proteger el cuerpo de la chancadora giratoria y formar la cámara de trituración junto con el manto. Su diseño modular permite su reemplazo por secciones, facilitando el mantenimiento. Están expuestos a altos niveles de abrasión e impacto, por lo que su material suele ser acero manganesíco tratado térmicamente.

- Funciones principales:
 - Proteger el casco de la chancadora.
 - Formar la superficie fija de trituración contra la cual actúa el manto móvil.
 - Garantizar una reducción efectiva del tamaño del mineral alimentado.
- Modos de falla frecuentes:
 - Desgaste abrasivo: producto del roce continuo con el mineral chancado.
 - Fisuración o fractura: por impactos repetitivos de material de alta dureza o cuerpos extraños.
 - Desprendimiento: ocasionado por errores en la instalación o aflojamiento de los sistemas de fijación.

1.5.3.4 Problemas operativos frecuentes en el cambio de cóncavos

El proceso de reemplazo de cóncavos en una chancadora giratoria representa un desafío técnico y de seguridad por el tamaño, peso y entorno de trabajo. Entre los problemas más comunes se encuentran:

- **Dificultad para retirar cóncavos desgastados**, debido a incrustaciones de material, expansión térmica o corrosión.
- **Instalación inadecuada**, que puede provocar desalineación, riesgo de desprendimiento o daño prematuro.
- **Altos tiempos de inactividad**, especialmente si no se cuenta con herramientas de izaje o acceso adecuado.

- **Condiciones inseguras**, como trabajo en altura, manipulación de componentes pesados y exposición a polvo y ruido.

Una planificación cuidadosa, uso de carros de mantenimiento, plataformas móviles y sistemas hidráulicos de izado (como los descritos por FLSmidth) son esenciales para reducir riesgos y tiempos muertos.

1.5.3.5 Procedimiento actual de mantenimiento del equipo

El mantenimiento de la chancadora Traylor NT 60" x 113" está estructurado para asegurar la máxima disponibilidad operativa del equipo y minimizar tiempos de inactividad. Se ejecuta tanto de forma **programada** (preventiva) como **no programada** (correctiva), y está enfocado principalmente en el sistema hidráulico, el sistema de lubricación, las partes estructurales y los componentes de desgaste.

Según (FLSmidth, 2011) y (Keith Mobley, 2004) partimos con el procedimiento contemporáneo de mantenimiento:

1.5.3.5.1 Actividades rutinarias principales:

1.5.3.5.1.1 Sistema hidráulico:

- Toma de muestras del aceite hidráulico cada 6 meses para verificar su condición. Si se detectan contaminantes (agua o partículas), se debe realizar un cambio total y limpieza del depósito.
- Sustitución del filtro de aceite hidráulico cada 6 meses o tras mantenimientos mayores.
- Engrase del motor eléctrico cada 250 horas de operación.

1.5.3.5.1.2 Componentes mecánicos:

- Engrase de niples de la mesa fija y cilindros antes de cada operación (4 puntos en chumacera, 2 en horquilla del émbolo).
- Engrase de los puntos del puente levadizo y las vagonetas antes del uso.
- Verificación de las condiciones estructurales del carro de mantenimiento, revisión de pernos sueltos, presencia de óxido o componentes faltantes.

1.5.3.5.1.3 Sistema de lubricación general:

- Programas establecidos de lubricación para rodamientos y partes móviles. Se emplean grasas de sodio-calcio y aceite ISO VG 46, según el componente y el fabricante.

1.5.3.5.2 Procedimientos de mantenimiento programado:

1.5.3.5.2.1 Reemplazo de cóncavos y mantos:

- Planificado conforme al desgaste operativo o al cronograma de mantenimiento preventivo. Se recomienda ejecutar la tarea con apoyo de plataformas móviles o el carro de mantenimiento excéntrico provisto por FLSmidth.

1.5.3.5.2.2 Ajuste del sistema de descarga:

- Verificación y calibración del espacio entre cóncavos y manto para controlar el tamaño del producto final. Esto se realiza de manera periódica para mantener la calidad de la trituración.

1.5.3.5.2.3 Pruebas funcionales:

- Cada 6 meses se recomienda accionar todos los sistemas: mover el carro, accionar cilindros hidráulicos, y desplegar el puente levadizo para asegurar el correcto funcionamiento bajo carga simulada.

1.5.3.5.3 Recomendaciones generales:

- Es imprescindible que el mantenimiento sea realizado por personal entrenado, siguiendo normas OSHA/MSHA y los protocolos específicos del sitio.
- Se debe llevar un registro técnico detallado de cada actividad de mantenimiento, para efectos de trazabilidad y análisis de confiabilidad.

1.6 Análisis de Causa Raíz (ACR) y Herramientas de Diagnóstico

El Análisis de Causa Raíz (ACR o RCA en sus siglas en inglés) es un método para la resolución de problemas que intenta evitar la recurrencia de una incidencia o defecto a través de identificar sus causas. El análisis de causa raíz se utiliza para investigar cuáles son las causas que han originado un determinado problema o incidencia, poder actuar sobre ellas evitando así su recurrencia en el futuro (Poveda Catalán & Guardiola Aparisi, 2019).

Dicho ello, (Ovalles Acosta et al., 2017) propone diferentes pautas para realizar un análisis de causa raíz (tienen el propósito de identificar la causa o las causas que inicia la generación de los eventos no conformes que atacan a proceso), estas son:

- Identificar el problema
- Definir el problema
- Entender el problema
- Identificar la causa raíz
- Realizar acción correctiva
- Monitorear el sistema

Luego de haber identificado el problema, (Ovalles Acosta et al., 2017) menciona que existen cinco pasos básicos para completar el Análisis de Causa Raíz (ACR). Estas son:

1. Definir el problema: Trata y utiliza el principio SMART (Specific, Measurable, Action oriented, Realistic, Time constrained). A menos de que el problema esté definido de manera precisa, todo el proceso de ARC, puede ser propenso al fracaso.
2. Entender el problema: Verifica la información, obteniendo información real relacionada al problema, ganando un claro entendimiento del problema. Es cuando las herramientas y técnicas, tanto como Causa y Efecto, lluvia de ideas, etc., pueden ser usadas.
3. Acción inmediata: Implementar contramedidas temporales en el lugar del problema. Mientras más lejos se determine la solución de la fuente del problema, menos probable será que la solución sea efectiva.
4. Acción correctiva: Determinar y priorizar la causa más probable del problema, como las contramedidas temporales podrían no resolver la causa raíz. Tomar acciones correctivas para al menos mitigar o preferiblemente eliminar la o las causas.
5. Confirmar la solución: Después de que las medidas han sido determinadas e implementadas el éxito del enfoque adoptado necesita ser establecido. Habiendo confirmado el éxito de las soluciones sugeridas, entonces las reglas o métodos de control necesitan ser establecidos. Esta es probablemente la fase más importante del ACR, pero la que suele omitirse más.

1.6.1 Diagrama de Ishikawa aplicado a fallas mecánicas

El diagrama de Causa-Efecto, también conocido como diagrama de espina de pescado o Ishikawa o análisis de 6Ms, es una técnica bastante útil para realizar un análisis de causa raíz

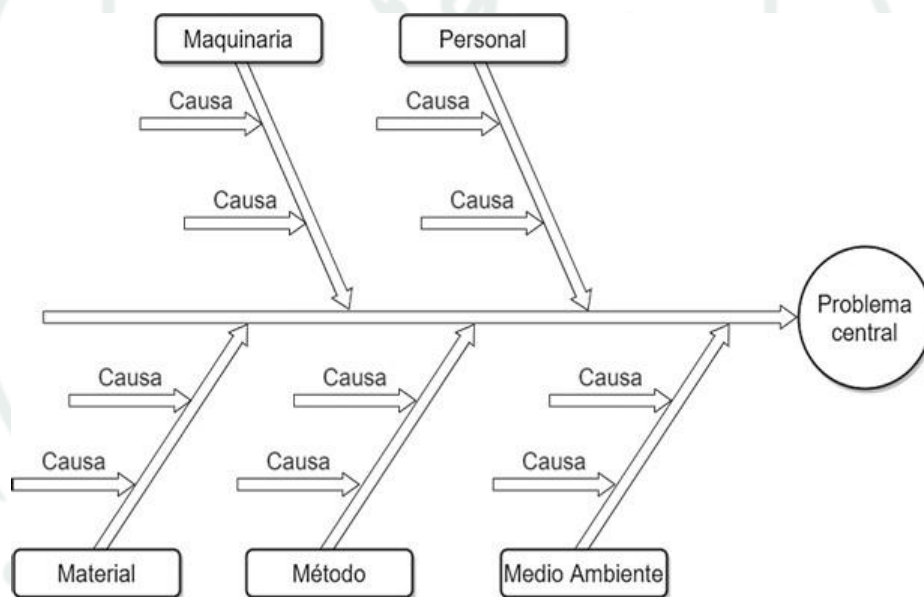
más compleja, profunda y detallada. Este tipo de diagrama identifica todos los potenciales factores que contribuyen a la generación de un problema en el proceso (Ovalles Acosta et al., 2017).

En este diagrama se analizan factores como son los enlistados a continuación:

- Mano de Obra
- Método
- Máquina
- Material
- Medio ambiente
- Medición

Figura 3.

Diagrama de Ishikawa



Nota. Adaptado de (Burgasí Delgado et al., 2021).

El diagrama de Ishikawa mostrado en la figura 3, es utilizado para organizar y visualizar las posibles causas que originan un problema central dentro del proceso analizado. La estructura del gráfico distribuye los factores en categorías como maquinaria, personal, material, método y medio ambiente, permitiendo relacionar cada causa específica con el efecto final de manera ordenada. Esta representación facilita la identificación de factores críticos de falla y sirve como base para profundizar posteriormente en el análisis de causa raíz y en la formulación de acciones de mejora.

1.6.2 Técnica de los “5 Por Qué”

La técnica de los “5 Por Qué” (en inglés *Five Whys*) es una herramienta de análisis de causa raíz desarrollada por Sakichi Toyoda en el contexto del Sistema de Producción Toyota, y formalizada posteriormente por Taiichi Ohno. Esta técnica consiste en formular de forma iterativa la pregunta “¿por qué?” ante un problema, hasta identificar la causa fundamental que lo genera. Generalmente, se considera que cinco iteraciones son suficientes para llegar a la raíz del problema, aunque el número puede variar según la complejidad del caso (Taiichi, 2019).

Desde una perspectiva operativa, esta técnica destaca por su simplicidad, rapidez y aplicabilidad en terreno, especialmente en ambientes industriales donde se requiere una respuesta ágil ante fallas mecánicas, paros no programados o incidentes de calidad. Según (Serrat, s. f.), su efectividad radica en estructurar el pensamiento crítico dentro de un proceso disciplinado, lo que permite comprender las relaciones causa-efecto en entornos complejos sin recurrir inmediatamente a soluciones superficiales o correctivas.

(Barsalou, & Starzynska, s. f.) subrayan que el “5 Por Qué” puede ser especialmente útil cuando se aplica junto con otras herramientas de análisis como el diagrama de Ishikawa, ya que de forma aislada corre el riesgo de generar respuestas sesgadas si no se dispone de información precisa o si la investigación no se realiza con objetividad.

En el contexto del mantenimiento mecánico de chancadoras, la técnica puede utilizarse, por ejemplo, ante una parada no programada por sobrecalentamiento del motor eléctrico:

- ¿Por qué se detuvo la chancadora?
- Porque se activó el sensor de temperatura.
- ¿Por qué se activó el sensor de temperatura?
- Porque el motor se sobrecalentó.
- ¿Por qué se sobrecalentó el motor?
- Porque no había suficiente lubricación.
- ¿Por qué no había suficiente lubricación?
- Porque el sistema presentaba una fuga.
- Porque no se detectó a tiempo en la inspección de rutina.

Este ejercicio revela que la causa raíz no es el sobrecalentamiento en sí, sino una deficiencia en el control preventivo del sistema de lubricación. Así, esta herramienta permite

no solo reaccionar ante la falla, sino rediseñar el proceso de mantenimiento para evitar recurrencias futuras.

1.6.3 FMEA (Análisis Modal de Fallas y Efectos)

Según (Stamatis, 2015), El Análisis Modal de Fallas y Efectos (FMEA, por sus siglas en inglés) es una herramienta de carácter preventivo utilizada en sistemas de ingeniería y mantenimiento para identificar modos de falla potenciales, evaluar sus consecuencias, y priorizar acciones correctivas antes de que ocurran fallos reales. Esta metodología permite sistematizar el análisis de riesgos a través de una tabla estructurada, que considera criterios como la severidad (S) del efecto, la frecuencia de ocurrencia (O) del modo de falla, y la capacidad de detección (D) del sistema actual.

Según (Stamatis, 2015), el resultado de este análisis es el Número de Prioridad de Riesgo (RPN, por sus siglas en inglés), que se calcula como:

$$RPN = S \times O \times D$$

Donde:

- **S (Severidad):** mide el impacto del efecto de la falla.
- **(Ocurrencia):** estima la probabilidad de que ocurra la falla.
- **D (Detección):** evalúa la capacidad de detectar la falla antes de que se manifieste.

Cada uno de estos factores se califica típicamente en una escala del 1 al 10, siendo 10 el valor más crítico. Un RPN alto indica una combinación peligrosa de consecuencias severas, alta probabilidad y baja capacidad de detección, y por lo tanto, exige atención prioritaria (Stamatis, 2015).

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1 Lugar de estudio

La presente investigación se desarrolla en una unidad minera de gran envergadura ubicada en la región sur del Perú, a una altitud aproximada de 4100 m.s.n.m. Esta operación minera se dedica principalmente a la extracción de cobre, siendo uno de los yacimientos de mayor producción a nivel nacional. La ubicación geográfica, las condiciones climáticas y la magnitud de la infraestructura demandan una gestión eficiente de sus procesos y equipos, especialmente aquellos relacionados con el tratamiento primario del mineral.

Dentro de su esquema operativo, la unidad cuenta con un área de chancado altamente tecnificada, que representa la primera etapa en la cadena de procesamiento del mineral extraído. Esta área está equipada con dos plantas de chancado, en donde se llevan a cabo actividades de reducción primaria del mineral para su posterior traslado hacia las fases de molienda y flotación. El sistema de chancado juega un rol crítico en la continuidad operativa de la planta, dado que cualquier falla en esta etapa genera una interrupción directa en el flujo de producción.

El presente estudio se enfoca específicamente en la chancadora primaria modelo Traylor NT de 60" x 113", la cual ha sido seleccionada por su carácter estratégico dentro del proceso productivo. Dado que se trata de un equipo de grandes dimensiones y elevado impacto operativo, su desempeño influye directamente en la eficiencia global de la planta. Por tal motivo, esta investigación se centra en la mejora del procedimiento de mantenimiento de este equipo, considerando tanto las exigencias del entorno como la criticidad operacional.

En este contexto, se propone optimizar las actividades de intervención técnica sobre dicho equipo con el objetivo de reducir los tiempos de parada no programada, asegurar la integridad de los componentes y contribuir a la sostenibilidad del proceso minero en condiciones de alta exigencia operativa.

2.2 Proceso productivo

La empresa minera cuenta con estas etapas de proceso productivo:

- Mina (Extracción)

La operación minera se basa en el método de explotación a tajo abierto, empleando equipos de alta capacidad diseñados para trabajar en condiciones de gran altitud y alto tonelaje. El proceso se estructura en varias etapas críticas:

- Perforación y voladura: Se perforan los bancos del tajo con diámetros adecuados, y se cargan con explosivos industriales (emulsiones o ANFO) para lograr una fragmentación eficiente del macizo rocoso.
 - Carguío y acarreo: El material fragmentado es cargado y transportado hacia las zonas de destino, que incluyen áreas de chancado para el mineral útil y botaderos para el material estéril.
 - Control de calidad del mineral: A través de sistemas automatizados de despacho y muestreo, se asegura el cumplimiento de las leyes mínimas de cobre requeridas para el procesamiento.
- Concentradora (Planta de Procesamiento)

La planta concentradora de esta unidad minera tiene una capacidad instalada de procesamiento de hasta 145 000 toneladas por día, constituyéndose como una de las operaciones más eficientes en cuanto a volumen tratado. Su flujo operacional se estructura de la siguiente manera:

- Chancado primario: El mineral procedente de mina es sometido a una trituración inicial mediante una chancadora giratoria primaria. Esta reduce el tamaño del material hasta aproximadamente 6 pulgadas, adecuado para su almacenamiento temporal.
- Almacenamiento intermedio (stockpile): El mineral chancado se deposita en tolvas o acopios intermedios. Desde este punto, es dosificado hacia la etapa de molienda, permitiendo una alimentación continua y controlada.
- Molienda: El mineral es reducido a un tamaño de partícula fino mediante un circuito compuesto por un molino semiautógeno (SAG) seguido de molinos de bolas. Este proceso permite alcanzar una granulometría menor a 180 micras, condición necesaria para una eficiente liberación de las especies minerales valiosas.
- Flotación: En esta etapa, se agregan reactivos químicos como colectores, espumantes y modificadores, que permiten separar selectivamente los minerales de cobre del resto de la ganga. El proceso se realiza en celdas de flotación, generando una espuma rica en contenido metálico, la cual es recolectada como concentrado.
- Espesamiento y filtración: El concentrado obtenido es sometido a un proceso de espesamiento gravitacional para remover el agua libre, seguido de una

etapa de filtrado que reduce la humedad hasta aproximadamente 8 %. Este producto es apto para su transporte y posterior comercialización.

- Transporte: Finalmente, el concentrado filtrado es impulsado a través de un mineroducto de más de 200 km hasta el terminal portuario, desde donde se realiza el embarque hacia destinos internacionales.

2.3 Población y muestra

Según (Hernández Sampieri et al., 2003):

- La **población** se define como el conjunto total de elementos, individuos, objetos o eventos que comparten una o más características relevantes para el estudio. En el contexto de una investigación, representa el universo sobre el cual se desea obtener conclusiones generalizables.
- La **muestra** corresponde a un subconjunto representativo de esa población, seleccionado bajo criterios metodológicos específicos que aseguren que sus características esenciales reflejan adecuadamente al conjunto total. Esto permite realizar inferencias válidas sin necesidad de estudiar cada elemento de la población.

En contexto con la empresa minera, la población de esta investigación está conformada por el conjunto de activos mecánicos que integran la línea de producción del área de chancado primario en la unidad minera de referencia. Este conjunto incluye equipos como alimentadores, tolvas, zarandas, sistemas de transporte y principalmente las chancadoras, que constituyen los nodos críticos en el proceso de conminución del mineral. Estas unidades operan de forma continua a 4100 m.s.n.m. y son responsables del procesamiento diario de más de 140 000 toneladas de mineral, por lo que cualquier interrupción afecta directamente la producción y la rentabilidad de la operación.

En este contexto, se seleccionó una muestra no probabilística basada en criterios técnicos, correspondiente a la Chancadora Primaria Traylor NT de 60" x 113", por ser un equipo altamente crítico, con impacto directo en la continuidad operativa y en la disponibilidad del sistema. Esta chancadora ha presentado en los últimos dos años (2023–2024) cinco eventos significativos de fractura de cóncavos, generando un total de 322 horas de detención acumulada y afectando en -1.86% la disponibilidad anual de la planta de chancado.

La selección de esta muestra se justifica por su relevancia operativa y por presentar un historial documentado de fallas técnicas con alto impacto económico. Los criterios considerados para su selección fueron los siguientes:

- Equipo con historial documentado de fallas estructurales en los cóncavos, registradas en el sistema de mantenimiento durante los años 2023 y 2024.
- Equipo con condiciones operativas exigentes, representativas del entorno de alta producción continua en el que opera la planta.
- Equipo sin haber sido sometido a modificaciones estructurales ajenas al diseño original del fabricante que puedan sesgar los resultados.
- Equipo con accesibilidad técnica para la recolección de datos históricos, observación directa y validación in situ del procedimiento actual de mantenimiento.
- Equipo cuya criticidad operativa ha sido reconocida formalmente en reuniones de ingeniería y planificación de mantenimiento, según actas técnicas internas.

Esta muestra permite centrar la investigación en un caso representativo y crítico, alineado con el objetivo de diseñar un procedimiento optimizado para el cambio de cóncavos, en base al enfoque de mantenimiento proactivo.

2.4 Técnicas e instrumentos de recolección

Para la investigación se utilizó las siguientes técnicas e instrumentos para la recolección de datos. En la Tabla 2. se describen las técnicas e instrumentos utilizados.

Tabla 2*Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

Técnica	Instrumento
Documental	Órdenes de Trabajo (OTs)
	Historial de fallas
	Registros de paradas de planta
	Fichas técnicas de componentes
	Procedimientos de mantenimiento
	Cronogramas de mantenimiento
	Informes de ingeniería
	Actas de reuniones técnicas
	Reportes de inspección visual/NDT
	Manuales del fabricante (OEM)
Observacional	Lista de verificación (checklist)
	Guía de observación estructurada
	Bitácora de observación
	Formato de cronometraje
	Registro fotográfico
	Registro audiovisual (video)
	Matriz de riesgos observados
	Formulario de interacción operativa
	Mapa de proceso

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 2 presenta las técnicas e instrumentos de recolección de datos considerados para el desarrollo del estudio, organizándolos en dos enfoques principales: documental y observacional. En la técnica documental se incluyen fuentes como órdenes de trabajo, historial de fallas, registros de paradas de planta, fichas técnicas, procedimientos, cronogramas, informes de ingeniería, actas técnicas, reportes de inspección y manuales del fabricante, mientras que en la técnica observacional se contemplan herramientas de campo como checklist, guía de observación, bitácora, formatos de cronometraje, registros fotográficos y audiovisuales, matriz de riesgos, formularios de interacción y mapas de proceso. En conjunto, esta estructura evidencia que la investigación se sustentó en información histórica, técnica y operativa, permitiendo una caracterización integral del proceso analizado y una base sólida para el diagnóstico y la propuesta de mejora.

Como parte del levantamiento de información primaria, se elaboró un formato de entrevista orientado a evaluar el estado de la gestión del mantenimiento y la calidad del proceso de recolección de datos en campo. Este instrumento fue dirigido al personal operativo y de supervisión vinculado a las actividades de mantenimiento mecánico y confiabilidad, con el propósito de identificar el nivel de estandarización de los registros, la disponibilidad de recursos, el cumplimiento de plazos, la articulación entre áreas y las principales limitaciones presentes en el proceso. En la Tabla 3 se presenta la estructura del cuestionario aplicado, conformada por preguntas cerradas de verificación y un espacio destinado a observaciones complementarias.

Tabla 3

Formato de Entrevista

Nº	Pregunta	Sí	No	Observaciones
1	¿Cuenta con un procedimiento estandarizado para el registro de órdenes de trabajo?	☐	☐	
2	¿Los informes de fallas se completan y envían dentro de los plazos establecidos?	☐	☐	
3	¿Recibe capacitación periódica para el uso de formatos y registros de mantenimiento?	☐	☐	
4	¿Considera que dispone de los recursos suficientes (tiempo, formatos, herramientas) para documentar adecuadamente su labor?	☐	☐	
5	¿La información registrada en campo es utilizada en la toma de decisiones de mantenimiento?	☐	☐	
6	¿Existe retroalimentación formal sobre los reportes de mantenimiento enviados al área de confiabilidad?	☐	☐	
7	¿Se validan los registros de fallas con inspecciones en campo antes de cerrar un análisis?	☐	☐	
8	¿Con qué frecuencia encuentra dificultades para llenar los registros o bitácoras de mantenimiento? (describa)			
9	¿Qué mejoras considera necesarias en la recolección y registro de información de fallas?			
10	¿Qué herramientas o apoyos considera indispensables para mejorar			

-
- la trazabilidad y calidad de los datos de mantenimiento?
- 11 ¿Qué dificultades encuentra en la coordinación entre mantenimiento y confiabilidad?
- 12 ¿Qué cambios propondría para facilitar la comunicación y flujo de información entre las áreas?
- Desde su experiencia, ¿qué aspectos son críticos para asegurar la
- 13 confiabilidad de los datos recopilados?
- 14 ¿Qué buenas prácticas de gestión de información ha identificado y que deberían estandarizarse?
- 15 Comentarios adicionales que considere relevantes para mejorar la gestión del mantenimiento y la recolección de información.
-

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 3 muestra el formato de entrevista diseñado para recopilar información directa sobre la gestión del mantenimiento y los mecanismos de registro utilizados en la operación. Las preguntas planteadas permiten evaluar aspectos clave como la existencia de procedimientos estandarizados, el envío oportuno de informes, la capacitación del personal, la suficiencia de recursos, el uso de la información en la toma de decisiones, la retroalimentación entre áreas y la validación de registros con evidencias de campo. En conjunto, este instrumento permite identificar brechas organizativas y operativas que afectan la trazabilidad de la información de mantenimiento, constituyéndose en una base relevante para el diagnóstico del sistema actual y la formulación de acciones de mejora.

Con la finalidad de evaluar de manera estructurada la ejecución real del proceso de cambio de cóncavos, se diseñó un checklist de evaluación orientado a verificar el desempeño operativo, la disponibilidad de recursos, la coordinación del personal y el cumplimiento de condiciones de seguridad durante la intervención. Este instrumento permite valorar cada etapa del procedimiento mediante criterios cualitativos de desempeño, facilitando la identificación de desviaciones, retrasos, deficiencias de coordinación y oportunidades de mejora en la ejecución del trabajo. En la Tabla 4 se presenta el formato propuesto para esta evaluación.

Tabla 4*Checklist de evaluación del proceso de cambio de cóncavos*

Nº	Pregunta	Bueno	Regular	Malo	Observaciones
1	¿Consideras que el procedimiento seguido fue eficiente en general?	☐	☐	☐	
2	¿El tiempo total del cambio de cóncavos fue adecuado según lo planificado?	☐	☐	☐	
3	¿Se identificaron retrasos significativos durante la ejecución del procedimiento?	☐	☐	☐	
4	¿Los recursos (herramientas, equipos y materiales) estuvieron disponibles a tiempo?	☐	☐	☐	
5	¿La coordinación entre el personal de planta y contratistas fue efectiva?	☐	☐	☐	
6	¿Se cumplieron las medidas de seguridad establecidas en todas las etapas del procedimiento?	☐	☐	☐	
7	¿La capacitación previa y las instrucciones recibidas fueron suficientes para la tarea?	☐	☐	☐	
8	¿El uso de equipos de izaje (puente grúa, eslingas, etc.) fue seguro y eficiente?	☐	☐	☐	
9	¿El proceso de desmontaje de cóncavos se realizó sin contratiempos significativos?	☐	☐	☐	
10	¿El montaje de los nuevos cóncavos y aplicación del backing se efectuó correctamente?	☐	☐	☐	
11	¿El tiempo de limpieza, orden y desmovilización del área fue adecuado?	☐	☐	☐	
12	En general, ¿cómo calificarías la eficiencia global del procedimiento de cambio?	☐	☐	☐	

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra el checklist de evaluación del proceso de cambio de cóncavos, compuesto por preguntas relacionadas con la eficiencia general del procedimiento, el cumplimiento del tiempo planificado, la identificación de retrasos, la disponibilidad

oportuna de recursos, la coordinación entre personal, el cumplimiento de medidas de seguridad, la suficiencia de la capacitación, el uso adecuado de equipos de izaje, la ejecución del desmontaje y montaje, y las actividades finales de limpieza y desmovilización. La estructura de calificación en categorías de bueno, regular y malo, complementada con observaciones, permite registrar de forma sistemática la percepción y el desempeño de cada aspecto crítico del proceso. En conjunto, este instrumento constituye una herramienta útil para diagnosticar la calidad de la ejecución actual y sustentar técnicamente la formulación de mejoras en el procedimiento.

2.5 Análisis y procesamiento de información

En síntesis, el procesamiento de la información se realizó a partir del análisis documental y observacional estructurado, con enfoque técnico y estadístico. La revisión de reportes técnicos, perfiles de desgaste, registros de fallas y campañas de mantenimiento permitió identificar patrones recurrentes y causas raíz asociadas a fallas prematuras en los cóncavos. Estos hallazgos fueron complementados con observación directa en campo, donde se evidenciaron desviaciones en el curado del backing, control del CSS y condiciones operativas críticas. La aplicación del modelo de Weibull permitió establecer un umbral técnico de 19.48 millones de toneladas como referencia para la programación de mantenimientos preventivos. Esta integración de evidencias cuantitativas y cualitativas refuerza la necesidad de rediseñar el procedimiento de cambio de cóncavos bajo un enfoque proactivo, orientado a mejorar la confiabilidad operativa y reducir el impacto económico de las fallas.

2.6 Método de estrategia de mantenimiento proactivo

La presente investigación se enmarca en una estrategia de mantenimiento proactivo orientada a la mejora del procedimiento de cambio de cóncavos de la chancadora primaria Traylor NT de 60" x 113", en una unidad minera ubicada en la zona sur del Perú. El enfoque metodológico se sustenta en la identificación anticipada de fallas, análisis técnico de causas raíz y rediseño del procedimiento operativo, con base en evidencias objetivas y validación en campo.

Esta estrategia está estructurada en cuatro etapas secuenciales, integrando herramientas de análisis de confiabilidad como el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) y el Análisis de Causa Raíz (ACR), combinadas con el ciclo de mejora continua y retroalimentación operativa. A continuación, se describe cada una de las etapas:

2.6.1 Etapa 1: Recolección de evidencias técnicas de fallas

Se recopilarán y clasificarán evidencias documentales y físicas provenientes de:

- Procedimientos Estándar de Trabajo (PETs)
- Manual técnico del fabricante (OEM)
- Fotografías y registros visuales de los cóncavos fracturados
- Informes operativos de SAP y hojas de servicio
- Reportes técnicos de backing, montaje y escaneos láser

Estas fuentes permitirán caracterizar técnicamente los eventos de falla y establecer condiciones de contorno.

2.6.2 Etapa 2: Análisis técnico especializado y formulación de hipótesis

Con las evidencias recolectadas, se procederá a:

- Elaborar un AMEF específico para el subsistema de cóncavos, identificando modos de falla, efectos y criticidad.
- Desarrollar un ACR estructurado, considerando causas físicas, humanas y latentes.
- Formular hipótesis técnicas relacionadas con defectos en el backing, control del CSS, prácticas de montaje y condiciones operativas (presencia de inchancables, magnetita, bolonería).

El Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF) es una herramienta estructurada que permite identificar los modos de falla potenciales en un componente, sus causas, efectos y nivel de criticidad. Se basa en una matriz donde se evalúan tres factores principales:

- Severidad (S): grado de impacto de la falla,
- Ocurrencia (O): frecuencia con que puede presentarse,
- Detección (D): probabilidad de que la falla sea detectada antes de generar consecuencias.

A partir de estos factores se calcula el Índice de Prioridad de Riesgo (IPR), que sirve para jerarquizar los modos de falla y establecer líneas de intervención. Con el propósito de identificar de manera estructurada los modos de falla del subsistema de cóncavos y su impacto en la operación de la chancadora primaria, se recurrió al Análisis de Modo y Efecto de Falla. Esta herramienta permite evaluar la severidad, ocurrencia y detectabilidad de cada falla potencial, facilitando su priorización técnica. En la Figura 4 se presenta el formato de AMEF considerado para el desarrollo del análisis.

Figura 4.

AMEF

ANÁLISIS DEL MODO Y EFECTO DE FALLA																	
Función Proceso / Requerimientos	Modo Potencial de Falla	Efecto(s) Potencial(es) de falla	S	Tipo	Causa(s) Potencial(es) /Mecanismos de la falla	O	Controles de procesos actuales / Prevención	Controles de procesos actuales / Detección	D	RPN*	Acción(es) Recomendad a(s)	Responsable y fecha objetivo de terminación	Resultados de acción				
													Acciones tomadas	S	O	D	RPN

Tipo: V: Crítica; CS: Significativa; CI: Importante
(*): Número prioritario de riesgo NPR=5xOxD

Nota. Elaboración propia.

La matriz AMEF de la figura 4, es empleada para registrar la función del proceso, los modos de falla, sus efectos, causas potenciales, controles existentes y las acciones recomendadas. Asimismo, incorpora los criterios de evaluación S, O y D, a partir de los cuales se determina el NPR como indicador de criticidad. Su aplicación permite jerarquizar riesgos y sustentar técnicamente las acciones de mejora sobre el procedimiento de cambio de cóncavos.

Y el Análisis de Causa Raíz (ACR) es una herramienta que permite profundizar en la identificación de las causas fundamentales que originan una falla o conjunto de fallas recurrentes. Esta metodología permite organizar de manera lógica las relaciones entre las causas físicas, humanas y latentes que derivan en la falla principal.

El ACR será empleado para analizar de forma retrospectiva los eventos de falla documentados en los registros técnicos de mantenimiento, considerando los elementos del sistema, los síntomas observados y las condiciones de operación. En la Figura N°5 se presenta la matriz ACR.

Figura 5.

Matriz ACR

Análisis Causa-Raíz					
Sistemas	Función	Descripción de falla o falla funcional	Componentes involucrados	Modo de falla	Causa raíz
Sistema o subsistemas que se encuentran dentro del equipo	Función A	Falla de A	Componente A	Falla de A	Causa raíz de la Falla A

Nota. Elaboración propia.

La matriz ACR de la figura 5, es utilizada para el análisis causa raíz de las fallas identificadas en el equipo. Su estructura permite relacionar el sistema, la función, la falla funcional, los componentes involucrados, el modo de falla y la causa raíz correspondiente. En conjunto, esta herramienta facilita la trazabilidad del análisis y contribuye a plantear acciones correctivas orientadas a eliminar el origen real del problema.

2.6.3 Etapa 3: Validación de hipótesis en campo

Las hipótesis serán comprobadas mediante:

- Observación directa durante el cambio de cóncavos.
- Registro cronológico de variables operativas (temperatura, presión, posición del manto)
- Control visual y dimensional del montaje (gaps, fijación, curado)
- Evaluación de desempeño posterior a la intervención

Esto permitirá confirmar o descartar factores críticos asociados a la fractura prematura.

2.6.4 Etapa 4: Mejora del procedimiento técnico estándar

Con base en los hallazgos validados, se elaborará una versión mejorada del PET, la cual incluirá:

- Instrucciones específicas de preparación, aplicación y curado del backing
- Parámetros críticos de control del CSS/OSS
- Pruebas visuales y mecánicas previas y posteriores al montaje
- Roles y responsabilidades con control de calidad asegurado

- Indicadores de desempeño para evaluar efectividad post implementación

Este documento será revisado y retroalimentado con el equipo de mantenimiento, garantizando su aplicabilidad real.

Un PETS incluye normalmente:

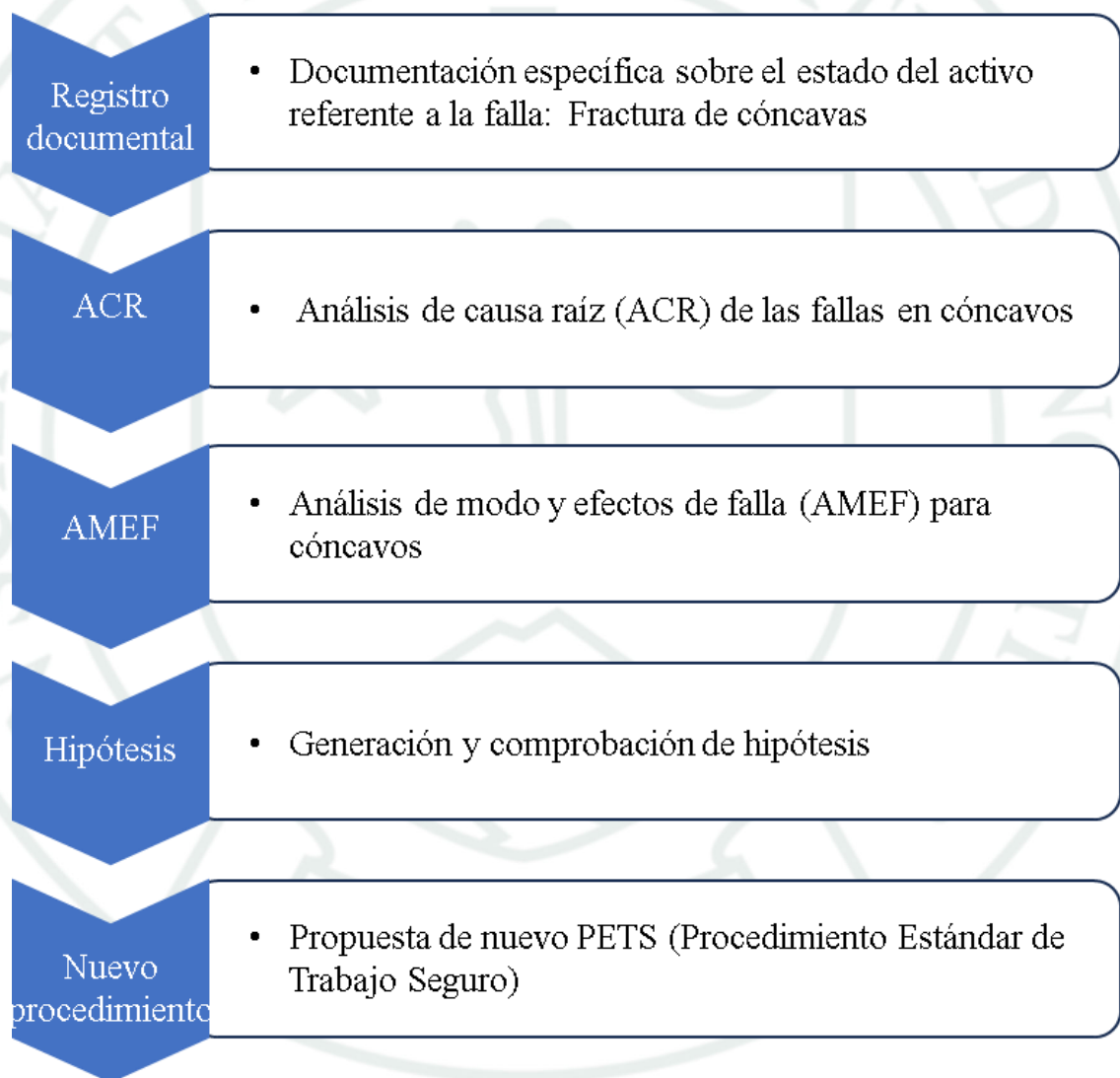
- Nombre del procedimiento y código
- Objetivo (qué se busca con el procedimiento)
- Alcance (a qué equipos, tareas o áreas aplica)
- Referencias técnicas y normativas (manuales, normas ISO, RNE, OSHA, etc.)
- Equipos y materiales requeridos
- Personal responsable y roles asignados
- Riesgos identificados y controles (matriz IPERC o PETAR)
- Pasos secuenciales de la tarea (con tiempo estimado, herramientas y condiciones)
- Controles críticos (Puntos de verificación QA/QC)
- Firma de aprobación por las áreas de Seguridad, Mantenimiento e Ingeniería

2.7 Procedimiento de investigación

La mejora en la estrategia del cambio de cóncavos de la Chancadora Primaria implica, en primer lugar, la recopilación y el levantamiento de información técnica detallada de la fase actual de este mantenimiento. Posteriormente con análisis pertinentes de mantenimiento se verifica el cumplimiento de una hipótesis que culminará con el establecimiento de un nuevo procedimiento de trabajo.

Figura 6.

Procedimiento para el cambio de cóncavos



Nota. Elaboración propia.

La Figura 6 muestra la secuencia metodológica seguida para el análisis y la mejora del procedimiento de cambio de cóncavos, iniciando con el registro documental de la falla y continuando con las etapas de ACR, AMEF y formulación de hipótesis. Esta secuencia

permite estructurar el diagnóstico técnico del problema y culmina con la propuesta de un nuevo PETS orientado a estandarizar y optimizar la intervención.



CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Diagnóstico de la situación actual

El diagnóstico situacional aborda las condiciones actuales del proceso de mantenimiento en la chancadora primaria Traylor NT 60" × 113", con énfasis en las fallas recurrentes en los cóncavos, sus causas principales y las implicancias operativas y económicas. El análisis se centra en tres aspectos: información general de la empresa, estructura organizativa del área de mantenimiento y características del equipo de trabajo que ejecuta actualmente el procedimiento.

La unidad minera en la que se desarrolla este estudio es una de las principales productoras de minerales en la región, destacándose por su compromiso con la eficiencia operativa, la sostenibilidad y el respeto por las comunidades cercanas. Esta unidad ha logrado posicionarse como un actor clave en la industria minera, llevando a cabo sus operaciones bajo estrictos estándares de seguridad y calidad. Su enfoque en la mejora continua y en la innovación tecnológica le permite optimizar sus procesos productivos, mientras que mantiene un compromiso firme con la protección del medio ambiente y el bienestar de sus trabajadores. A continuación, se presenta una descripción detallada de su misión, visión y estructura organizativa, aspectos fundamentales que guían sus operaciones y su impacto en la región.

La operación de la unidad minera de referencia representa aproximadamente el 1% del Producto Bruto Interno (PBI) total del Perú y cerca del 9% del PBI del sector minero nacional. Su impacto es aún más pronunciado a nivel regional, donde la actividad de la mina constituye el 72% del PBI de la región Apurímac, evidenciando su rol como el principal motor económico de la zona. Esta dependencia subraya la importancia de la continuidad operativa de la mina para la estabilidad económica y el desarrollo regional.

En términos de aportes directos al Estado, desde el inicio de sus operaciones, la empresa ha realizado transferencias significativas. Hasta marzo de 2024, la unidad minera ha aportado un total acumulado de S/ 2,644 millones a la región de Apurímac por concepto de canon minero y regalías contractuales. En un panorama más amplio, hasta principios de

2025, la compañía ha pagado más de S/ 6,400 millones en impuestos y ha transferido más de S/ 2,300 millones en regalías mineras, contribuciones que financian directamente la ejecución de obras y servicios públicos en los gobiernos locales y regionales.

En el ámbito laboral, la contribución de la minera es igualmente significativa. La unidad minera de referencia genera más de 8,800 empleos directos e indirectos solo en la región de Apurímac. Sin embargo, su impacto en la empleabilidad se extiende a lo largo de su cadena de valor, llegando a ser responsable de la creación de más de 75,000 puestos de trabajo en las regiones de Apurímac, Cusco y Arequipa. Esta generación de empleo no solo reduce las tasas de desocupación, sino que también dinamiza las economías locales a través del consumo y la demanda de servicios.

3.1.1.1 Misión

Hacer minería con el objetivo de generar riqueza para la sociedad y las comunidades aledañas, priorizando la seguridad y la sostenibilidad de sus operaciones.

3.1.1.2 Visión

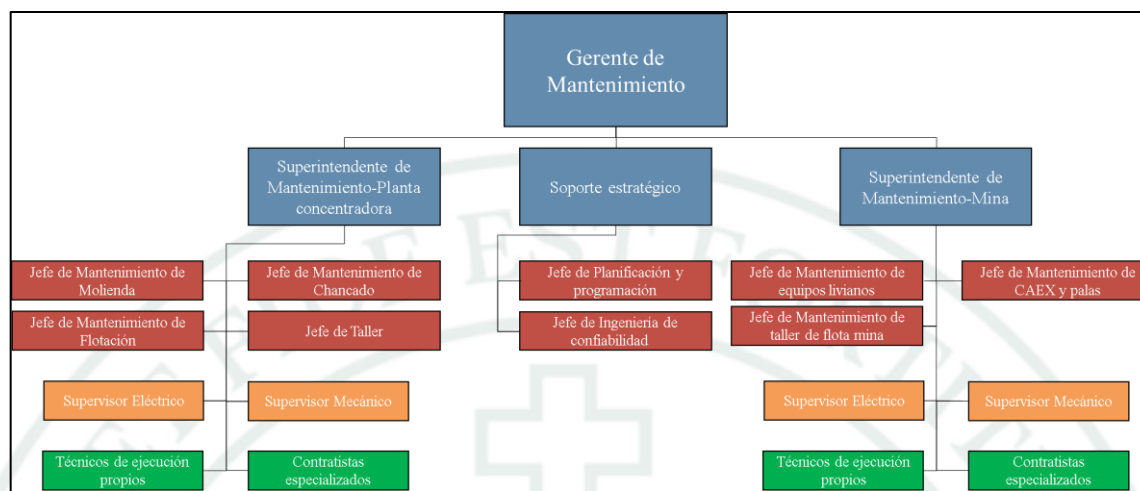
Consolidarse como una empresa minera de referencia a nivel mundial, reconocida por sus prácticas sostenibles y su compromiso con un futuro bajo en carbono.

3.1.1.3 Organización de la empresa

El departamento de Mantenimiento es una gerencia propia que reporta a la alta dirección, no una sub-área de Operaciones.

Figura 7.

Organigrama de mantenimiento de la unidad minera



Nota. La empresa de referencia.

La estructura organizacional del área de mantenimiento en Minera La unidad minera de referencia evidencia un modelo de gestión de activos maduro, diseñado para afrontar con eficacia los desafíos operativos de una de las operaciones mineras más complejas del país. Este modelo no solo refleja una jerarquía técnica, sino una filosofía de trabajo en la que cada nivel, desde la gerencia de mantenimiento hasta los técnicos electromecánicos en campo, contribuye con un rol esencial para garantizar la disponibilidad de los activos críticos y la continuidad operativa. La división clara entre planta y mina, el soporte estratégico de planificación y confiabilidad, y la integración de contratistas especializados permiten optimizar recursos, fortalecer la cultura preventiva y asegurar la seguridad de las personas, colocando a la vida como valor no negociable. Detrás de cada parada de planta, cada diagnóstico predictivo y cada intervención en un CAEX o chancadora primaria, hay un equipo humano comprometido, que aplica conocimiento y disciplina con el propósito de mantener operativa una mina que genera oportunidades y desarrollo para las comunidades y el país. Este enfoque integrado, basado en datos, planificación rigurosa y especialización técnica, no solo contribuye a la excelencia operacional, sino que dignifica la labor de cada trabajador que, con esfuerzo y compromiso, se convierte en protagonista silencioso de la eficiencia de la unidad minera de referencia.

En la operación minera de esta unidad, las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo están conectadas con el área de confiabilidad mediante un esquema formal de planificación, monitoreo y evaluación de fallas. El área de confiabilidad recibe datos de los mantenimientos correctivos a través de informes de campo, analiza tendencias históricas de

fallas, y proporciona criterios técnicos para ajustar los calendarios de mantenimiento preventivo. Además, interviene en la definición de parámetros críticos como vibraciones, aceites, temperaturas y tiempos de reparación (MTTR) y entre fallas (MTBF), con el propósito de anticipar problemas y evitar fallas funcionales severas. De esta forma, aunque no todos los mantenimientos predictivos se ejecutan con frecuencia óptima, hay una coordinación progresiva: primero, el mantenimiento correctivo retroalimenta al área de confiabilidad; luego, esta área propone ajustes en preventivo y predicción, lo que reduce gradualmente las incidencias no programadas.

3.1.1.3.1 Estructura Jerárquica

La estructura jerárquica del área de mantenimiento evidencia un diseño ordenado y funcional que permite la adecuada gestión de los activos críticos en planta y mina. En la cúspide se encuentra la gerencia de mantenimiento, responsable de liderar estratégicamente las acciones de mantenimiento bajo criterios de disponibilidad, confiabilidad y seguridad. Esta gerencia se apoya en dos superintendencias operativas, una dedicada a la planta concentradora y otra a la mina, garantizando la atención especializada de los diferentes activos según su naturaleza y criticidad. Además, se cuenta con un soporte estratégico conformado por áreas de planificación y confiabilidad, asegurando la conexión entre la gestión operativa y la proactividad en el mantenimiento, lo que permite que la estructura se sostenga como un pilar de la productividad de la unidad minera.

Tabla 5

Registros documentados de fallas en la chancadora primaria

Nº	Fecha de ocurrencia	Equipo / código	Tipo de evento	Descripción resumida	Tiempo detenido (h)	Observaciones
				Fractura frágil de 12		Backing
1	20/09/2023	0210-CRG-001	Fractura de cóncavos	cóncavos intermedios y desprendimiento de 1 superior.	113	contaminado y curado deficiente.
2	21/09/2023	0210-CRG-002	Fractura de cóncavos	Fractura de cóncavos intermedios sin desprendimiento completo.	59	Fallo asociado a debilidad en unión backing-cóncavo.
3	29/04/2024	0210-CRG-002	Fractura y desplazamiento	Fractura de intermedios y superiores; 1 desplazado con desprendimiento parcial.	48	Cóncavo mal curado; ingreso de contaminantes.
4	29/06/2024	0210-CRG-001	Fractura localizada	2 cóncavos con fisura y hundimiento; evidencia de falta de backing.	54	Respaldo no homogéneo; fractura con hundimiento.
5	29/06/2024	0210-CRG-002	Fractura inferior	6 cóncavos inferiores con daños en bordes y hundimiento.	En proceso	Campaña en curso, aún sin tiempo total definido.
					274	

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 5 presenta los registros documentados de fallas ocurridas en la chancadora primaria, detallando la fecha, el equipo involucrado, el tipo de

evento, la descripción resumida, el tiempo detenido y las observaciones asociadas. La información evidencia recurrencia de fracturas,



desplazamientos y hundimientos en los cóncavos, con tiempos de parada significativos y causas vinculadas principalmente a deficiencias en el backing, contaminación y curado inadecuado. En conjunto, estos antecedentes confirman la necesidad de intervenir el procedimiento actual para reducir la frecuencia de falla y mejorar la confiabilidad operativa del equipo.



A partir de estos registros se calcularon los principales indicadores de confiabilidad y mantenibilidad. El MTTR se estimó en 54.8 horas por evento, reflejando el promedio del tiempo detenido para la atención de cada correctivo mayor. El MTBF alcanzó un valor de 302 horas, lo que indica que en promedio la chancadora opera menos de dos semanas antes de presentar una nueva falla significativa en los cóncavos. En consecuencia, la disponibilidad operacional se ubica en 84.64 %, un valor inferior al estándar esperado en equipos de chancado primario, que suele situarse entre 90 % y 92 % en operaciones de referencia.

De igual manera, la reincidencia de fallas en un período de seis meses es de dos eventos, lo que confirma la tendencia recurrente y sistemática de los problemas vinculados al montaje y desempeño de los cóncavos. Esta frecuencia elevada de reincidencias implica costos adicionales de mantenimiento y pérdidas de producción no programadas.

Tabla 6

Indicadores de mantenimiento calculados

Ítem	Tiempo	Unidad
Número de paradas	5.00	-
Total, de horas de parada	274.00	h
Total, de tiempo disponible	3396.00	h
Total, de tiempo trabajado	3122.00	h
MTTR	54.80	h
MTBF	624.40	h
Disponibilidad (Ab	91.93	%
Reincidencia de fallas en 6 meses	2.00	eventos

Nota. Elaboración propia.

En síntesis, en la tabla 6 los indicadores confirman que la situación actual del mantenimiento de la chancadora primaria presenta limitaciones críticas en términos de confiabilidad y disponibilidad. Estos resultados sustentan la necesidad de implementar mejoras en el procedimiento de cambio de cóncavos, incorporando controles de calidad más estrictos, herramientas de metrología avanzada y planificación predictiva, con el objetivo de reducir los tiempos de parada y la reincidencia de fallas.

3.1.1.4 Equipo de trabajo

El equipo de trabajo en la unidad minera de referencia para el mantenimiento en áreas críticas como chancado opera bajo un modelo híbrido, que combina personal propio con empresas contratistas especializadas. En el procedimiento de cambio de cóncavos, el

contratista despliega un grupo estructurado por turnos, con funciones específicas para garantizar seguridad y trazabilidad.

Tabla 7

Roles principales en el equipo de trabajo para cambio de cóncavos

Rol / Cargo	Función principal	Observaciones
Supervisor de operaciones (contratista)	Dirige la ejecución en campo, verifica el cumplimiento de seguridad (IPERC, PETS), asegura herramientas y EPP necesarios.	Actúa como enlace con el supervisor de área de la unidad minera.
Supervisor HSE (contratista)	Asesora y fiscaliza cumplimiento de normas y estándares de seguridad. Tiene autoridad para paralizar labores ante condiciones de riesgo.	Su rol es preventivo, no ejecuta labores mecánicas.
Mecánico líder y técnicos (mecánicos/soldadores)	Ejecutores directos del trabajo. Elaboran IPERC continuo, cumplen con el procedimiento, usan herramientas y EPP.	Son responsables de su propia seguridad y de la de sus compañeros.
Vigías (trabajo en caliente / espacios confinados)	Monitorean condiciones de seguridad en tareas críticas, controlan accesos y activan planes de emergencia si es necesario.	No participan en la ejecución directa, solo supervisan condiciones.

Nota. Elaboración propia.

La tabla 7 indica que el modelo asegura que las actividades críticas como el cambio de cóncavos se desarrollen bajo un esquema controlado, donde el contratista aporta personal especializado y la unidad minera conserva la supervisión global. Sin embargo, se observa que la estructura actual está más enfocada en la seguridad y en la ejecución operativa que en controles técnicos avanzados, lo que evidencia un área de mejora para robustecer el aseguramiento de calidad y la confiabilidad en futuras intervenciones.

3.1.1.4.1 Formación y capacitación

La unidad minera de referencia mantiene un programa sólido de capacitación continua, combinando talleres internos de seguridad y procedimientos obligatorios con alianzas educativas externas. El enfoque integra la normativa minera (DS 024-2016-EM), talleres prácticos y programas especializados que garantizan la preparación del personal en seguridad, mantenimiento de equipos pesados y gestión del mantenimiento.



Tabla 8*Programas y alianzas de formación en la unidad minera de referencia*

Tipo de capacitación	Contenido principal	Instituciones / aliados	Observaciones
Talleres internos de seguridad	Difusión de PETS, charlas de 5 minutos, elaboración de IPERC Continuo, cumplimiento del DS 024-2016-EM.	Área de Seguridad y Mantenimiento de la unidad minera	Base obligatoria antes de cualquier tarea.
Programa Talento Local	Formación técnica en mantenimiento de equipos móviles para comunidades	Unidad minera de referencia	Incluye 22 meses de práctica intensiva en talleres de mina.
SENATI	Becas en mecánica, hidráulica y diagnóstico electrónico.	SENATI + Ferreyros	Especialización en mantenimiento preventivo de maquinaria pesada.
TECSUP	Cursos en mantenimiento mecánico, eléctrico e instrumental, y normativa de seguridad.	TECSUP	Formación técnica especializada para personal de planta concentradora.
Otros aliados	Cursos en gestión y mantenimiento minero.	CETEMIN, CAMIPER, Cibertec	Refuerzan el ecosistema educativo y el flujo de talento calificado.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 8 muestra el modelo de capacitación que combina prácticas internas obligatorias con alianzas estratégicas de alto nivel (SENATI, TECSUP, CETEMIN, entre otros), lo que asegura que el personal mantenga competencias actualizadas en seguridad, mantenimiento de maquinaria pesada y normativas legales. Esta estructura fortalece el compromiso con la seguridad y la sostenibilidad, aunque todavía puede potenciarse con un mayor énfasis en técnicas predictivas y herramientas digitales, aspectos que forman parte de la propuesta de mejora en el PETS 2.0.

3.1.1.4.2 Colaboración interdepartamental

El trabajo colaborativo entre los diferentes departamentos es esencial para el éxito de la unidad minera. La interacción entre áreas operativas, como el mantenimiento de equipos y la logística, y las áreas de soporte, como administración y seguridad, permite optimizar los recursos y responder de manera efectiva a los desafíos que puedan surgir durante las

operaciones diarias.



3.1.1.4.3 Compromiso con la seguridad

El marco normativo que rige las actividades mineras en el país se encuentra establecido principalmente en el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS 024-2016-EM y sus modificatorias) y en la Ley N° 29783 de Seguridad y Salud en el Trabajo. Estas disposiciones fijan los estándares mínimos que deben cumplir los titulares mineros, los contratistas y los trabajadores para garantizar la prevención de incidentes, accidentes y enfermedades ocupacionales. La normativa exige que toda actividad de mantenimiento y operación esté respaldada por procedimientos documentados, permisos específicos y la verificación del uso de equipos certificados y elementos de protección personal adecuados. En este contexto, la gestión de la seguridad se articula en torno a un conjunto de herramientas y políticas que aseguran el cumplimiento legal y fomentan la cultura preventiva. Dichas herramientas incluyen la identificación temprana de riesgos, la capacitación continua en trabajos de alto riesgo y la implementación de metodologías estandarizadas de control en campo. Asimismo, se promueve el empoderamiento del trabajador, facultándolo a detener cualquier tarea que represente un riesgo para su seguridad o la de sus compañeros.

Tabla 9

Compromiso con la seguridad en la operación minera

Aspecto normativo y de gestión	Descripción
Marco legal principal	Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS 024-2016-EM y modificatorias) y Ley N° 29783 de Seguridad y Salud en el Trabajo. Establecen obligaciones y estándares mínimos para titulares, contratistas y trabajadores.
Objetivo de la normativa	Prevenir incidentes, accidentes y enfermedades ocupacionales. Exigir trazabilidad documental en procedimientos de trabajo, permisos y acreditaciones.
Cumplimiento técnico	Uso obligatorio de equipos inspeccionados (soldar y oxicorte), cables certificados y EPP completos según el tipo de tarea. - Identificación proactiva de riesgos y capacitación continua. -
Herramientas de gestión de seguridad	Estándares para trabajos de alto riesgo (altura, izaje, energía, espacios confinados). - Herramientas 3Q (“¿Qué voy a hacer?”, “¿Qué podría salir mal?”, “¿Qué debo hacer al respecto?”) y “Trece Reglas por la Vida”.
Empoderamiento del trabajador	Se promueve que cualquier trabajador detenga la tarea si considera que no es segura, reforzando la responsabilidad individual y colectiva
en la prevención de accidentes.	

Nota. Elaboración propia.



La tabla 9 hace hincapié al enfoque integral de seguridad, sustentado en la normativa vigente y complementado con herramientas de gestión modernas, asegura que la operación minera no solo cumpla con la legislación nacional, sino que también fortalezca una cultura organizacional orientada a la prevención y la mejora continua.

3.1.1.4.4 Relaciones comunitarias y desarrollo social

El equipo de trabajo no solo se enfoca en las operaciones mineras, sino que también juega un papel importante en las relaciones comunitarias. La unidad minera se compromete al desarrollo social y económico de la región, promoviendo proyectos y actividades que benefician a las comunidades cercanas. Este enfoque contribuye a fortalecer los lazos con la comunidad y a garantizar la sostenibilidad de las operaciones a largo plazo.

3.1.1.4.5 Contribución al desarrollo sostenible

Cada miembro del equipo de trabajo también está comprometido con la visión de la unidad minera de ser líder en sostenibilidad. Esto se refleja en su participación activa en la implementación de prácticas ambientales responsables, el uso eficiente de los recursos y la minimización del impacto ambiental de las operaciones mineras.

3.1.2 Condiciones operativas y de mantenimiento:

La implementación de metodologías de mantenimiento en minería peruana enfrenta limitaciones estructurales que condicionan su efectividad. El primer desafío es la capacitación y especialización del personal técnico, pues la operación de chancadoras modernas exige competencias avanzadas en sistemas hidráulicos, de lubricación y control. Estudios en operaciones locales identifican que la falta de formación contribuye hasta en un 22 % de las fallas en chancadoras, lo que evidencia la necesidad de estándares de competencia y programas de entrenamiento que no solo fortalezcan la ejecución, sino también la planificación y el análisis técnico.

A ello se suma la alta dependencia de contratistas especializados, quienes realizan tareas críticas como cambios de revestimientos, reparaciones mecánicas mayores y servicios de instrumentación. Esta estrategia permite acceder a personal calificado, pero también introduce riesgos asociados a la supervisión, el control de calidad y la transferencia de conocimiento. Cuando la gestión de contratos es deficiente, el resultado son retrasos, sobrecostos y menor confiabilidad de los activos.

En el plano tecnológico, la gestión moderna requiere plataformas CMMS y EAM para programar órdenes de trabajo, controlar inventarios y analizar datos históricos de fallas. Sin embargo, la falta de integración limita su aporte estratégico y perpetúa la dependencia de enfoques correctivos. Esto se traduce en un uso insuficiente de información para decisiones de mantenimiento confiables y proactivas.

Finalmente, a nivel productivo, la operación de referencia se diseñó para procesar 140 000 t/día de mineral, pero estudios de Ortega, Ñahui y Devcy (2018) muestran que por paradas no programadas el rendimiento efectivo era de 120 000 t/día, generando una pérdida de 20 000 t/día. Este déficit revela la alta criticidad del circuito de chancado y transporte de mineral, operado sin redundancias y altamente vulnerable a fallas, cuya interrupción impacta de manera directa en la productividad y la rentabilidad de toda la planta concentradora.

Diversas investigaciones académicas y reportes técnicos realizados específicamente en la unidad minera han puesto en evidencia limitaciones críticas en la gestión de mantenimiento. Un estudio de Ortega & Nahuin (2018) mostró que, pese a los esfuerzos de mantenimiento preventivo, los equipos de transporte de mineral grueso sufrían de fallas recurrentes, lo que demostraba la ineficacia de las rutinas implementadas para reducir la incidencia de eventos críticos. De igual manera, Huamán (2020) identificó que la falta de análisis sistemático de datos constituía un obstáculo fundamental: no se contaba con

registros confiables de MTBF ni MTTR, lo que imposibilitaba la transición hacia un mantenimiento basado en confiabilidad. En esta misma línea, Valencia (2021) documentó que los problemas operativos derivados del sobre tamaño de mineral, altos niveles de finos y humedad excesiva inducían fallas funcionales en la chancadora primaria y forzaban paradas reactivas, con un impacto directo en la salud de los activos y en la carga de trabajo del área de mantenimiento. Estas deficiencias, confirmadas también en auditorías internas de la unidad minera de referencia, reflejan que la gestión de mantenimiento ha debido enfrentar una alta dependencia de medidas correctivas, lo cual compromete la disponibilidad y confiabilidad de la operación.

En contraposición a las limitaciones previamente descritas, la unidad minera de referencia ha comunicado e implementado diversas iniciativas que evidencian una clara intención de orientar su sistema de mantenimiento hacia la proactividad y la excelencia operativa. Estas acciones se han materializado tanto en la aplicación de metodologías avanzadas de confiabilidad como en el desarrollo de iniciativas sofisticadas de planificación y control, que en conjunto buscan reducir la dependencia de esquemas reactivos.

La primera línea de acción se relaciona con la implementación de metodologías avanzadas, donde la evidencia muestra la aplicación práctica de herramientas como el análisis de criticidad y los AMEF en equipos estratégicos. Estos estudios han permitido identificar fallas funcionales, proponer medidas correctivas y clasificar riesgos en categorías inaceptables, reducibles y aceptables, lo cual representa un avance significativo hacia la práctica de herramientas de RCM en operación minera.

Tabla 10

Implementación de metodologías avanzadas de confiabilidad

Iniciativa	Evidencia	Alcance
Aplicación de análisis de criticidad y AMEF en transporte de mineral	Identificación de fallas funcionales y clasificación de riesgos	Operaciones de acarreo y chancado
Propuesta de medidas correctivas según criticidad	Diferenciación entre riesgos inaceptables, reducibles y aceptables	Planificación de mantenimiento
Uso de RCM en operación	Ejemplos prácticos en flotas y sistemas críticos	Optimización de mantenimiento preventivo

Nota. Elaboración propia.

La segunda línea corresponde a iniciativas de mantenimiento sofisticado, donde se

destacan el desarrollo de modelos de rendimiento y consumo de neumáticos para la flota de



acarreo, el análisis estructural de riesgos materiales integrado al sistema SAP, así como la implementación de procedimientos formales de gestión de paradas de planta (outage management) que permiten planificar con hasta seis meses de anticipación. Estas acciones fortalecen la capacidad predictiva y reducen la exposición a fallas críticas en procesos de chancado y molienda.

Tabla 11

Iniciativas sofisticadas de mantenimiento

Iniciativa	Descripción	Beneficio esperado
Modelos de rendimiento y consumo de neumáticos	Seguimiento detallado de flota	Reducción de costos operativos
Análisis estructural de riesgos materiales	Integración con SAP	Priorización objetiva de riesgos
Gestión formal de paradas (outage management)	Programación anticipada (6 meses)	Mayor control sobre disponibilidad

Nota. Elaboración propia.

Pese a estas buenas prácticas, la coexistencia de medidas proactivas con deficiencias en la ejecución evidencia una dualidad estructural. La operación cuenta con sistemas de gestión de clase mundial, pero los altos niveles de volatilidad en su entorno obligan al área de mantenimiento a operar de manera reactiva. Esto se refleja en interrupciones derivadas de conflictos sociales, bloqueos del corredor vial del sur y fallas recurrentes en la red eléctrica nacional, que han generado pérdidas de cientos de días de transporte desde el inicio de operaciones. Como consecuencia, incluso los equipos de mantenimiento más competentes deben desviar esfuerzos de tareas preventivas a la gestión de crisis, limitando la efectividad de los planes programados.

A esta situación se suma la estrategia de capital humano. El desarrollo de competencias locales ha sido considerado una prioridad estratégica, sustentado en programas formales de capacitación, alianzas con instituciones técnicas y criterios de selección laboral que demandan perfiles altamente especializados. Se trata de un enfoque que busca cerrar la brecha entre la oferta de técnicos disponibles en la región y las exigencias de una operación

minera de clase mundial.



Tabla 12*Estrategia de formación y capital humano*

Línea de acción	Evidencia	Impacto esperado
Programas de capacitación formal	Convenios con SENATI, Tecsup y otros	Formación de técnicos especializados
Selección laboral especializada	Requisitos: 5 años en montaje y reparación, certificación en alineamiento, PLC, TIA Portal	Asegurar talento calificado y reducir dependencia externa
Desarrollo regional	Becas y formación de comunidades cercanas	Reducción de la brecha de competencias locales

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, la gestión de contratistas constituye otro aspecto crítico. La evidencia apunta a una estrategia de tercerización que, si bien permite acceder a personal especializado, también introduce complejidades en la supervisión y el aseguramiento de calidad. Frente a ello, la operación ha priorizado la reducción del número de contratistas y la implementación de un sistema digital de gestión de contratos, con el objetivo de mejorar la eficiencia, la seguridad y la productividad de los socios estratégicos.

Tabla 13*Estrategia de gestión de contratistas*

Medida	Objetivo	Resultado esperado
Reducción del número de contratistas	Optimizar supervisión y costos	Mejora en eficiencia y seguridad
Implementación de sistema digital de gestión de contratos	Trazabilidad y control en tiempo real	Productividad y cumplimiento verificables
Estándares de calidad y seguridad unificados	Homologación de procedimientos	Mayor confiabilidad operativa

Nota. Elaboración propia.

El estudio de las condiciones operativas revela que la unidad minera cuenta con sistemas, metodologías y recursos estratégicos que reflejan un diseño de mantenimiento proactivo y alineado a estándares internacionales. Sin embargo, la evidencia demuestra que

la ejecución de estos planes se ve severamente condicionada por un entorno externo volátil, donde factores sociales y energéticos escapan al control directo de la operación. Por tanto,



la reactividad observada no constituye una deficiencia estructural en la filosofía de mantenimiento, sino un síntoma de la lucha constante por mantener la estabilidad operativa en un escenario de alta complejidad.

3.1.3 Propuesta de mejora del procedimiento de mantenimiento

Los análisis previos evidencian que, pese a contar con un diseño orientado a la proactividad, la gestión de mantenimiento en el área de chancado se ejecuta con alta frecuencia en un esquema reactivo. Esta situación está asociada principalmente a factores externos de volatilidad, como interrupciones prolongadas en la cadena logística y deficiencias en el suministro eléctrico, que generan paradas no programadas y reducen la confiabilidad del proceso.

La dependencia casi exclusiva de la corrección de fallas ha mostrado efectos adversos sobre la disponibilidad de los equipos y la estabilidad del rendimiento operativo, comprometiendo la sostenibilidad en el mediano plazo. En este sentido, resulta crítico diagnosticar con precisión las causas que impulsan la reactividad en el mantenimiento del chancado y plantear un procedimiento mejorado que mitigue esta tendencia, asegurando continuidad operacional y mayor retorno sobre los activos.

3.1.3.1 Causas

Las interrupciones recurrentes en el transporte y las fallas en el suministro eléctrico nacional han sido los factores predominantes que obligan a la operación a priorizar trabajos correctivos por encima de las tareas proactivas. Estas contingencias imprevistas quiebran los cronogramas de mantenimiento planificado y desvían recursos hacia la gestión de emergencias, generando un entorno en el que la prioridad inmediata es retomar la producción, aun cuando ello implique sacrificar la estabilidad a largo plazo.

Investigaciones técnicas recientes (Ortega, 2018; Nahuin, 2019; Devcyx, 2020) evidencian debilidades estructurales que dificultan la transición hacia un esquema plenamente proactivo. Se observa la carencia de análisis sistemático de datos históricos y la ausencia de métricas críticas como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR). Asimismo, la aplicación formal de metodologías como el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) en equipos críticos no ha sido consistente, lo que limita la optimización de frecuencias de intervención y la priorización efectiva de recursos.

Por otro lado, estudios mineros (Aref & Rashad, 2016; Djurdjevic et al., 2018) destacan la importancia del control del CSS/OSS en chancadoras primarias, donde un ajuste inadecuado provoca presiones excesivas que aceleran el desgaste. En condiciones operativas reales, factores como la alimentación de mineral con sobre tamaño, la elevada proporción de finos que genera “packing”, la humedad excesiva que causa apelmazamiento y el suministro irregular de mineral, ejercen un impacto directo sobre la salud de los equipos. Estos problemas inducen paradas reactivas y reducen significativamente el rendimiento de la chancadora, reforzando la necesidad de correctivos inmediatos.

3.1.3.2 Consecuencias

La dependencia de un modelo de mantenimiento correctivo genera impactos críticos en la productividad y la rentabilidad. La brecha entre la capacidad de diseño del área de chancado (140 000 tpd) y el tonelaje efectivamente procesado en periodos de inestabilidad (120 000 tpd) evidencia que las paradas no programadas de equipos primarios son la principal causa de pérdidas. Cada hora de detención de la chancadora primaria representa ingresos no percibidos de gran magnitud.

El efecto económico más inmediato se traduce en el incremento de los costos operativos, ya que la atención reactiva implica pagos de horas extras, transporte aéreo urgente de repuestos, penalidades contractuales y daños colaterales en componentes no contemplados en la planificación.

Desde el punto de vista técnico, operar bajo esquemas correctivos reduce la confiabilidad y la vida útil de los activos, pues exponer equipos a fallas funcionales los somete a condiciones de estrés máximo que aceleran su degradación. Esto genera un ciclo vicioso de fallas cada vez más frecuentes, con pérdida progresiva de disponibilidad.

En materia de seguridad, las reparaciones de emergencia en equipos de gran porte incrementan los riesgos para el personal. La presión por reanudar la producción bajo condiciones de crisis eleva la probabilidad de incidentes y accidentes, al obligar a ejecutar intervenciones en entornos de alta exigencia y peligrosidad.

3.1.3.3 Mejoras posibles

La transición desde un modelo reactivo hacia una gestión proactiva de mantenimiento requiere un cambio estratégico basado en metodologías robustas y procesos estandarizados. El primer paso es consolidar un plan de mantenimiento planificado que combine enfoques preventivos y predictivos, reduciendo la dependencia del correctivo.

En el área de chancado, se propone fortalecer tres líneas principales:

1. Optimización del mantenimiento preventivo: ejecución disciplinada de inspecciones, lubricación, limpieza, ajustes y reemplazo programado de componentes críticos, integrando datos históricos y recomendaciones de fabricante para reducir fallas inesperadas.
2. Implementación de mantenimiento predictivo (PdM): aplicación de técnicas como análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido y tribología para anticipar fallas y planificar intervenciones, extendiendo la vida útil de los activos y evitando paradas no programadas.
3. Metodologías de confiabilidad (RCM y RCA): uso de RCM para sistemas críticos del chancado, seleccionando las tareas más costo-efectivas (predictivas, preventivas o rediseños) según cada modo de falla. Para fallas significativas, institucionalizar el análisis de causa raíz (RCA) que permita identificar y eliminar factores físicos, humanos o sistémicos que originan los problemas, garantizando que no se repitan.

En conjunto, estas mejoras apuntan a reducir la reactividad, aumentar la confiabilidad de los equipos de chancado y asegurar una gestión sostenible en el tiempo.

3.1.4 Análisis del Procedimiento de cambio de cóncavos

3.1.4.1 Responsables

Los responsables a cargo del procedimiento de cóncavos por turno de trabajo son:

- Supervisor de campo (1/turno)

Responsable de la protección de los trabajadores, la correcta ejecución del IPERC, y de proveer las herramientas y materiales necesarios. Es el máximo responsable de la seguridad y salud del personal a su cargo.

- Supervisor de seguridad (HSE) (1/turno)

Encargado de asesorar y hacer cumplir las políticas de seguridad, verificar los procedimientos de bloqueo y paralizar las operaciones en caso de alto riesgo

- Líder mecánico (1/turno)

Dirige al equipo técnico, asegura la participación de todos en la elaboración del IPERC Continuo y controla que el personal conozca los riesgos y medidas de control.

- Mecánicos (3/turno)

Responsables de su propia seguridad y la de sus compañeros, elaboran el IPERC Continuo, usan correctamente el EPP y cumplen con el procedimiento establecido.

- Soldadores (4/turno)

Al igual que los mecánicos, son responsables de la correcta ejecución técnica de sus tareas, cumpliendo con todas las normativas de seguridad y procedimientos.

- Vigía de trabajos en caliente (1/turno)

Asegura que los sistemas contra incendios estén operativos, vigila el área de trabajo, mantiene extintores a la mano y conoce el procedimiento de emergencia.

- Vigía de espacio confinado (1/turno cuando aplica)

Mantiene un conteo exacto del personal dentro del espacio, monitorea las condiciones de seguridad, mantiene comunicación constante y activa el plan de emergencia si es necesario. Este rol es crucial y debe estar presente durante las actividades que lo requieran.

3.1.4.2 Requerimientos

Para la correcta ejecución del procedimiento de cambio de cóncavos y main shaft en la chancadora primaria, es indispensable contar con un conjunto de equipos, herramientas y materiales específicos que garanticen la seguridad, calidad y eficiencia del proceso. Estos requerimientos permiten asegurar la continuidad del flujo de trabajo durante la parada programada, reduciendo tiempos de inactividad y asegurando la correcta instalación de los componentes críticos.

En este apartado se detallan de manera estructurada los requerimientos de equipos y herramientas necesarios para las maniobras de izaje, corte, limpieza y montaje de los cóncavos y el main shaft, así como los materiales necesarios para la fijación, sellado y protección de los componentes durante el proceso de cambio. La planificación y control de estos recursos es fundamental para asegurar el éxito en la ejecución del PETS y para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad y calidad operativa en la unidad minera.

A continuación, se presentan las tablas correspondientes a los requerimientos identificados para el desarrollo de este procedimiento.

Tabla 14

Requerimientos equipos / herramientas

Cantidad	Descripción
2 unidades	Máquinas de soldar tipo SMAW (arco manual, 300-400 A, 380 V trifásica, marcas Miller/Lincoln/ESAB), para soldadura de orejas de izaje, estructuras y fijaciones. Incluye cables de tierra, pinza porta electrodos, cepillo, martillo de escoria
2 juegos	Equipos de oxicorte completos: cilindros de oxígeno y acetileno de 6 m ³ , reguladores, mangueras reforzadas de 13 m, soplete de corte con boquillas N° 0 y N° 1, encendedor de chispa, llave de apertura, llave de válvula de cilindros.
1-Set	Equipo de corte con lanza térmica (Arcair o Thermic Lance), utilizado para corte de orejas soldadas y remoción de pines de fijación, incluye pistola de soplado, mangueras de aire de alta presión y protección facial con visor de impacto.
1 unidad	Calentador eléctrico para baldes de backing epóxico (baño maría), control de temperatura 60-80°C, capacidad de 2-4 baldes simultáneos.
1 unidad	Cinzel neumático industrial, con manguera de aire y juego de cinceles planos y puntiagudos para remoción de material adherido.
6 eslingas	Eslingas de poliéster de 4 m y 6 m, capacidad 2T-5T, con etiquetas vigentes de inspección. Usadas para izaje de cóncavos, main shaft y floreros.
6 grilletes	Grilletes de ¾", 1" y 1 ½" galvanizados de alta resistencia, para asegurar eslingas en izajes con grúa y puente grúa.
4 estrobos	Estrobos de acero de 1 ½" x 8 m, ¼" x 2 m, 3/8" x 3 m, con recubrimiento plástico, usados en amarre de cargas y maniobras en espacios reducidos.
8 unidades	Mantas ignífugas de 2 m x 2 m, para protección de componentes durante soldadura y oxicorte, resistentes a 1000°C.
2 balones	Balones de oxígeno de respaldo, de 6 m ³ con manómetros calibrados, para corte y soplado de lanza térmica.
1 unidad	Compresor de aire portátil de 175 PSI, para operación de cinzel neumático y soplado de área.
2 unidades	Escaleras telescópicas de aluminio de 3.6 m, para acceso a zonas elevadas de chancadora y spider.
2 unidades	Gatas hidráulicas de 40 TON, para posicionamiento de shell y ajuste de alineaciones.
6 unidades	Llaves mixtas 1 1/8" y juego de llaves fijas y combinadas (hasta 2"), para desmontaje de pernos y accesorios.
4 unidades	Combos de 4 lbs y 12 lbs, para ajuste, calce y liberación de piezas durante desmontaje.
4 mangueras s	Mangueras de acople rápido y tipo Chicago (10 m c/u), para conexión de herramientas neumáticas y soplado.
1 unidad	Puente grúa de 10T-15T con vigas de desplazamiento, para izaje de main shaft, spider y cóncavos.
1 unidad	Camión grúa de 25T-50T, para maniobras externas de descarga y carga de cóncavos y componentes.
1 unidad	Retroexcavadora y minicargador, para limpieza de tolva y retiro de material

remanente previo a ingreso de personal en dump pocket.



Nota. Elaboración propia.

La Tabla 14 presenta los requerimientos de equipos y herramientas necesarios para la ejecución del cambio de cóncavos, detallando la cantidad y la descripción técnica de cada recurso involucrado. En conjunto, esta información permite evidenciar que la intervención demanda una adecuada planificación logística y técnica, debido a la diversidad y criticidad de los recursos requeridos para garantizar una ejecución segura y eficiente.



Tabla 15*Requerimientos materiales*

Cantidad	Descripción
1 juego completo	Cóncavos nuevos (Lower, Middle, Upper), fabricados en acero de alta resistencia al desgaste (generalmente aleación de manganeso 18%-21%), con certificado de dureza y peso para control de izaje.
1 unidad	Mainshaft nuevo o reacondicionado, inspeccionado dimensionalmente antes del montaje.
1 juego	Sellos de grasa y de aceite de la araña y mainshaft, originales o equivalentes de alta temperatura, para evitar fugas tras montaje.
80-90 baldes (20 kg c/u)	Backing epóxico de alta resistencia para chancadoras (ej. Copps, Loctite PC 9020), temperatura de mezcla 25-35°C, con vida útil de mezcla de 15 min, resistencia a compresión ≥ 110 MPa.
2 sacos (25 kg c/u)	Yeso de fraguado rápido tipo industrial, para calafateo temporal de gaps antes del vaciado de backing.
2 sacos (42.5 kg c/u)	Cemento Portland tipo I o equivalente, para fijación provisional de piezas si se requiere.
20 kg	Grasa de alto rendimiento NLGI EP1 (ej. Chevron, Shell Gadus), para lubricación de áreas de contacto y componentes móviles durante montaje.
20 litros	Aceite industrial Meropa 320 o similar, para impregnación y prelube de superficies de fricción.
1 galón	Desengrasante industrial biodegradable, para limpieza de superficies antes de aplicar backing o grasas.
5 unidades	Loctite Níquel Anti-Seize o equivalente, para protección de roscas de pernos en zonas de alta temperatura, evitando gripado posterior.
1 kit	Kit de pintura de control (spray) y marcadores industriales, para identificación de piezas y registros de control.
2 juegos	Lanzas térmicas y electrodos de corte (Chamfercord, Inox 29/9, E-7018), de 3.2 mm y 4.0 mm para soldadura y corte de orejas de izaje.
4 unidades	Extintores ABC de 9 kg, colocados en puntos de trabajo donde se realicen cortes o soldaduras.
10 unidades	Tacos de madera de eucalipto (20 cm x 20 cm x 50 cm), para soportar piezas en descanso y facilitar el posicionamiento seguro durante izaje.
6 unidades	Baldes plásticos de 20 litros, para mezcla y traslado de backing epóxico durante el vaciado en los cóncavos.
6 unidades	Trapos industriales sin pelusa, para limpieza final de piezas y superficies antes de aplicar selladores y backing.
6 unidades	Protectores solares FPS 50+ en sachet de 50 ml, para protección del personal durante trabajos prolongados al exterior.
1-Set	Elementos de señalización: conos de seguridad, cinta amarilla/roja y letreros de “Trabajos en caliente” y “Zona de Izaje”.
4 unidades	Cáncamos de izaje M20, M30 y M36, con certificado de carga, para fijación de componentes a eslingas y grúas.
1 juego	Selladores industriales Loctite 518 o similar, para juntas de bridas y tapas de inspección durante el cierre final de la chancadora.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 15 presenta los requerimientos materiales necesarios para la ejecución del cambio de cóncavos, especificando las cantidades y las características técnicas de cada insumo requerido en la intervención. En conjunto, la tabla evidencia que el procedimiento no depende solo de equipos y herramientas, sino también de una provisión oportuna y técnicamente controlada de materiales críticos que aseguren la calidad, continuidad y seguridad del trabajo.

3.1.4.3 Procedimiento

3.1.4.3.1 Movilización y desmovilización de personal

En la etapa de movilización y desmovilización del personal se establece que los trabajadores deben contar con pase médico vigente, fotocheck y tarjeta de riesgos antes de ingresar al área de chancado. El traslado se realiza en buses o camionetas autorizadas, bajo la conducción de choferes acreditados, exigiéndose el uso permanente de cinturón de seguridad y la aplicación de tres puntos de apoyo al momento de subir o descender de los vehículos. Asimismo, se dispone que el personal utilice el EPP básico completo en todo momento y que transite únicamente por zonas señalizadas y libres de obstáculos. Si bien estas medidas constituyen un marco general de seguridad, se advierte que el procedimiento se limita a lineamientos de cumplimiento obligatorio, sin detallar mecanismos de control operativo, tiempos de traslado, logística de ingreso a la zona de chancado ni contingencias ante eventualidades, aspectos que generan vacíos importantes en la gestión de esta fase.

Tabla 16*Fortalezas y debilidades en la movilización y desmovilización*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Requisitos previos	- Pase médico vigente, fotocheck y tarjeta de riesgos aseguran trazabilidad y control de salud.	- No se definen responsables de verificación ni mecanismos de control operativo.
Transporte	- Uso de buses o camionetas autorizadas, con choferes acreditados.	- No hay protocolos frente a contingencias en ruta (accidentes, fallas mecánicas, emergencias médicas).
Seguridad en traslado	- Uso obligatorio de cinturón de seguridad y tres puntos de apoyo.	- Falta de indicadores de gestión (tiempos de traslado, puntualidad, asistencia).
Circulación interna	- Tránsito solo por zonas señalizadas y libres de obstáculos.	- No se establecen protocolos de comunicación durante el traslado (radios, avisos).
Equipos de protección	- Uso de EPP básico completo desde el inicio.	- La desmovilización carece de detalle, en especial en jornadas prolongadas o turnos nocturnos.

Nota. Elaboración propia.

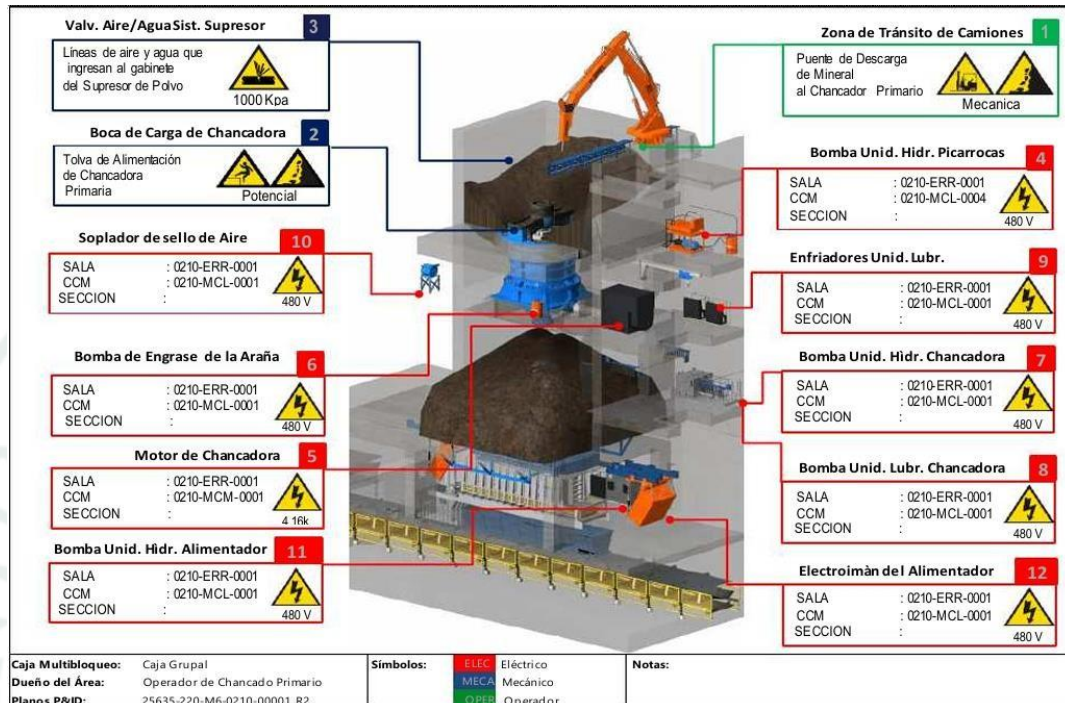
La Tabla 16 presenta las principales fortalezas y debilidades identificadas en la movilización y desmovilización de personal, considerando aspectos como requisitos previos, transporte, seguridad en traslado, circulación interna y equipos de protección. Entre las fortalezas destacan la trazabilidad documental, el uso de transporte autorizado, el cumplimiento básico de medidas de seguridad y el empleo de EPP desde el inicio de la jornada. Sin embargo, también se evidencian debilidades relevantes, como la falta de responsables de control, ausencia de protocolos ante contingencias y limitaciones en la comunicación y planificación de la desmovilización.

3.1.4.3.2 Traslado e instalación de equipos, herramientas y materiales

Bajo la coordinación del Supervisor de Operaciones de la empresa contratada para el mantenimiento de la chancadora y el personal de la unidad minera de referencia, se trasladan todos los equipos, herramientas y materiales necesarios al área de trabajo. Este traslado se realiza con camión grúa y/o camioneta. Antes de su uso, todo el equipo es inspeccionado visualmente para verificar su buen estado y que cuente con la cinta de inspección trimestral correspondiente. Los materiales se almacenan temporalmente en un área cercana, debidamente delimitada y señalizada para evitar interferencias y garantizar el orden.

Figura 8.

Identificación de fuentes de energía para bloqueo



Nota. Unidad minera de referencia.

En la Figura N ° 8 se ilustra el diagrama de identificación de fuentes de energía para bloqueo, el cual muestra todos los puntos de energía (eléctrica, hidráulica, neumática) que deben ser aislados y bloqueados antes de instalar equipos y comenzar el trabajo. La correcta identificación y bloqueo de estas 12 fuentes de energía es un control crítico para prevenir la activación inesperada de la maquinaria.

Tabla 17*Análisis en la fase de traslado e instalación de equipos.*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Coordinación	Participación del Supervisor de Operaciones y personal asignado, lo que asegura control jerárquico.	No se detalla un plan de roles y responsabilidades específicas en cada etapa del traslado.
Transporte de equipos	Uso de camión grúa y camionetas autorizadas para movilizar herramientas y materiales.	No existen protocolos de contingencia frente a fallas mecánicas del transporte o emergencias durante el traslado.
Inspección previa	Verificación visual del estado de los equipos y control de cintas de inspección trimestral.	Falta un registro formal digital o físico que documente cada inspección para trazabilidad y auditoría.
Almacenamiento	Materiales depositados en zona delimitada y señalizada, evitando interferencias.	No se especifican medidas de protección contra condiciones climáticas, ni control de inventarios durante la estadía en el área.
Bloqueo de energías	Identificación clara de 12 fuentes de energía críticas (eléctrica, hidráulica, neumática) a bloquear antes de iniciar trabajos.	El procedimiento se limita a la identificación; no detalla responsables, tiempos ni verificación independiente del bloqueo (doble chequeo).

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 17 presenta el análisis de la fase de traslado e instalación de equipos, herramientas y materiales, identificando fortalezas y debilidades en aspectos como coordinación, transporte, inspección previa, almacenamiento y bloqueo de energías. Entre las fortalezas destacan la participación del personal supervisor, el uso de unidades autorizadas, la verificación visual de equipos y la identificación de fuentes de energía críticas antes del inicio de los trabajos. No obstante, se evidencian debilidades asociadas a la falta de protocolos de contingencia, ausencia de registros formales, limitaciones en el control de almacenamiento y escaso detalle en la asignación y verificación del bloqueo de energías.

3.1.4.3.3 Actividades previas y preparación del área

Esta es la etapa de preparación final antes de la intervención. Se realiza la charla de seguridad, se difunde el PETS y se firman todos los permisos necesarios (ATS, IPERC, trabajos en altura, en caliente, en espacios confinados). El personal realiza el bloqueo de energías y verifica que el área haya sido entregada limpia por operaciones. Se instalan las líneas de anclaje en la parte superior de la tolva, se baja la escalera de acceso al *dump pocket* y se coloca un anillo de mantenimiento alrededor del eje para prevenir caídas, asegurando un entorno de trabajo controlado.

Figura 9.

Instalación de líneas de anclaje y acceso seguro.



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura N° 9 muestra la instalación de las líneas de vida y anclajes de seguridad en el borde de la tolva de alimentación (dump pocket). Este es un paso de seguridad crítico y obligatorio que debe completarse antes de que el personal ingrese al área, garantizando una protección constante contra caídas a distinto nivel durante toda la operación.



Tabla 18*Análisis en la fase de actividades previas y preparación del área*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Planificación y permisos	Charlas de seguridad, difusión del PETS y firma de permisos (ATS, IPERC).	No se evidencia un sistema de control de cumplimiento ni trazabilidad en permisos emitidos.
Bloqueo de energías	Verificación de bloqueo antes de iniciar trabajos.	Falta de estandarización en la metodología de bloqueo y señalización (LOTO parcial).
Instalación de anclajes	Colocación de líneas de vida y puntos de anclaje en la tolva.	No se especifica verificación de resistencia estructural ni inspección de anclajes.
Acceso seguro	Uso de escalera y anillo de mantenimiento para prevenir caídas.	No existen protocolos de rescate en altura ni redundancia en sistemas de protección.
Entorno de trabajo	Área entregada limpia y bajo condiciones controladas.	Carencia de checklist documentado que asegure la limpieza y orden antes de la intervención.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 18 presenta el análisis de la fase de actividades previas y preparación del área, considerando aspectos como planificación, permisos, bloqueo de energías, instalación de anclajes, acceso seguro y condiciones del entorno de trabajo. Como fortalezas, se observan la realización de charlas de seguridad, la difusión del PETS, la verificación inicial del bloqueo y la habilitación de medios de acceso y protección para el personal. Sin embargo, persisten debilidades importantes, como la falta de trazabilidad en permisos, ausencia de estandarización completa del LOTO, limitada verificación estructural de anclajes y carencia de checklist documentado para asegurar orden y limpieza previos.

3.1.4.3.4 Desmontaje de la cúpula del spider

La primera acción de desmontaje mecánico consiste en retirar la cúpula protectora del spider. Un soldador instala una oreja de izaje en la parte superior de la cúpula. Utilizando el gancho auxiliar de 25 toneladas del puente grúa y vientos para guiar la carga, el personal de maniobras de la unidad minera de referencia iza la cúpula y la posiciona en una zona segura designada dentro del dump pocket, despejando el acceso al spider.

Figura 10.

Maniobra de izaje de la cúpula del spider



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura N° 10 ilustra la maniobra para retirar la cúpula. Muestra el uso de un estrobo enganchado a la oreja de izaje soldada y al gancho del puente grúa. Esta es la primera maniobra de izaje del procedimiento, y su correcta ejecución, guiada con vientos, es esencial para evitar golpes a la estructura principal.

Tabla 19*Análisis en la fase de desmontaje de la cúpula del spider*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Preparación de izaje	Uso de oreja de izaje soldada y gancho auxiliar de 25 t.	No se menciona verificación de la soldadura ni ensayo previo de la oreja de izaje.
Maniobra de izaje	Apoyo de vientos para guiar la carga y evitar desplazamientos bruscos.	Ausencia de detalle sobre plan de izaje documentado ni roles de supervisión en la maniobra.
Seguridad del personal	Posicionamiento del personal de maniobras para controlar el izaje.	Riesgo de proximidad al área de carga suspendida, sin referencia a exclusión de zona.
Posicionamiento de carga	Cúpula trasladada a zona segura designada dentro del dump pocket.	No se especifican métodos de aseguramiento en la zona de descarga ni control de vibraciones.
Control de estructura	Correcta ejecución evita golpes a la estructura principal.	Falta de monitoreo estructural en tiempo real para detectar impactos o tensiones accidentales.

Nota. Elaboración propia.

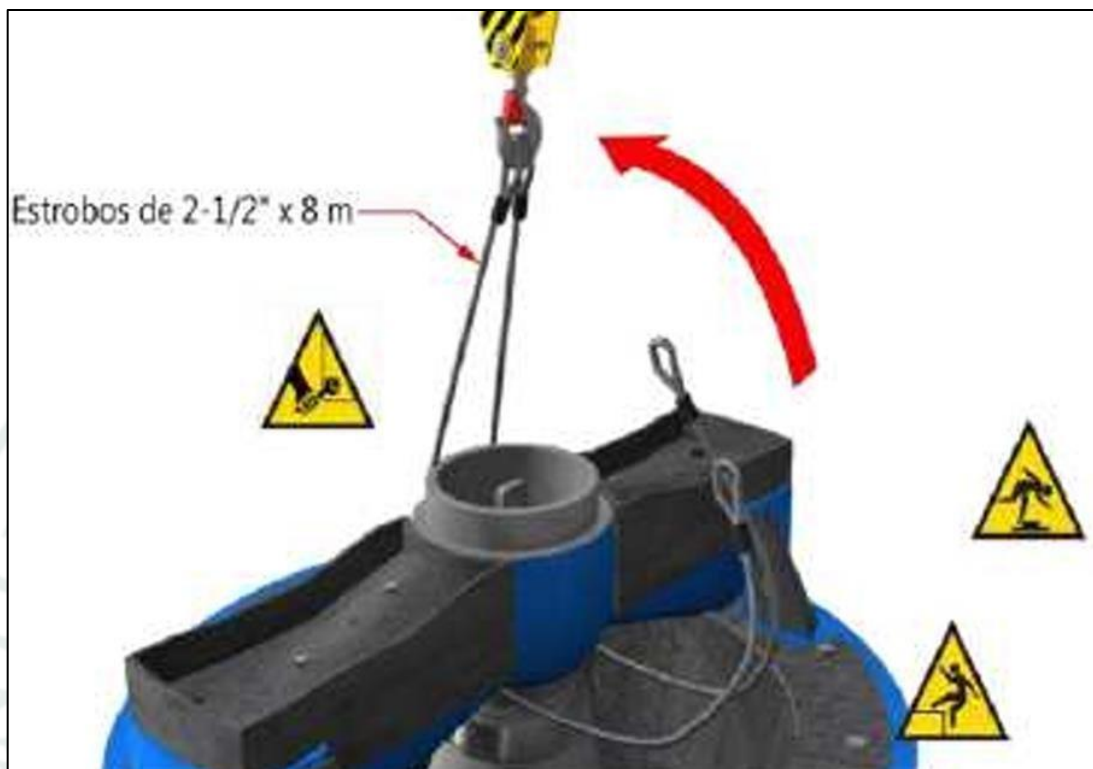
La Tabla 19 presenta el análisis de la fase de desmontaje de la cúpula del spider, evaluando aspectos vinculados al izaje, la maniobra, la seguridad del personal, el posicionamiento de la carga y el control estructural. Como fortalezas, se identifican el uso de elementos de izaje adecuados, el apoyo de vientos para estabilizar la maniobra y la disposición de la carga en una zona segura previamente definida. No obstante, se evidencian debilidades importantes relacionadas con la falta de validación documentada del plan de izaje, ausencia de controles de exclusión y monitoreo, y escaso detalle sobre aseguramiento y supervisión de la maniobra.

3.1.4.3.5 Desmontaje del spider (araña)

Con la cúpula fuera, se procede a desmontar el *spider*, un componente de 23.89 toneladas. Se desconecta la línea de lubricación y se retiran los pernos de las tuercas *Superbolt* con una pistola de impacto. Luego, se instalan cáncamos en los pernos para retirarlos con el puente grúa. Finalmente, se colocan dos estrobos de 2-1/2" en los brazos del *spider* en una configuración en "U". El puente grúa tensa lentamente los estrobos, levanta la araña y la retira de la chancadora, depositándola sobre tacos de madera para su inspección.

Figura 11.

Izaje controlado del spider (araña)



Nota. Unidad minera de referencia.

La figura 11 demuestra la escala del trabajo y la necesidad de una coordinación precisa entre el rigger y el operador para manipular componentes de gran peso de forma segura y evitar daños a las superficies maquinadas.

Previo al desmontaje del spider, resulta necesario evaluar técnicamente las condiciones de preparación mecánica, los accesorios de izaje, la configuración de la maniobra y las condiciones de descarga, debido a que esta fase involucra componentes de gran peso y alto riesgo operativo. En ese sentido, la Tabla 20 presenta un análisis comparativo de fortalezas y debilidades identificadas durante la fase de desmontaje del spider o araña, con el fin de reconocer las prácticas adecuadas ejecutadas y, al mismo tiempo, evidenciar las brechas de control que aún persisten en esta etapa del procedimiento.

Tabla 20*Análisis en la fase de desmontaje del spider (araña)*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Preparación mecánica	Desconexión de líneas de lubricación y retiro de pernos con herramienta adecuada.	No se mencionan pruebas de presión o purga completa de líneas antes del desmontaje.
Uso de pernos/cáncamos	Instalación de cáncamos en pernos para facilitar el izaje con puente grúa.	No se detallan inspecciones previas de integridad de cáncamos o certificación de accesorios.
Configuración de izaje	Estrobos de 2-1/2" x 8 m en configuración "U" para equilibrio de carga.	Riesgo por falta de simulación de izaje o ausencia de plan de balance documentado.
Maniobra de grúa	Izaje lento y controlado, con apoyo del rigger y operador.	No se incluyen medidas ante posibles oscilaciones o viento, ni redundancia en el aseguramiento.
Descarga y soporte	Deposición sobre tacos de madera para inspección, evitando contacto directo.	Ausencia de procedimientos claros para verificar estabilidad de la araña en superficie plana.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 20 evidencia que, si bien existen fortalezas importantes como la desconexión ordenada de líneas, el uso de cáncamos, una configuración de izaje funcional y una descarga sobre tacos de madera, todavía se mantienen debilidades relevantes asociadas a la falta de pruebas previas, ausencia de inspecciones documentadas, escaso detalle del plan de izaje y limitaciones en la verificación de estabilidad durante la descarga. En conjunto, este análisis permite concluir que la maniobra presenta una base operativa aceptable, pero requiere mayor estandarización técnica y control preventivo para reducir riesgos durante el desmontaje del spider.

3.1.4.3.6 Desmontaje del main shaft

El retiro del eje principal (main shaft) con un peso de 105 toneladas representa uno de los procedimientos más críticos. Se utiliza el gancho de 110 toneladas del puente grúa. Dos técnicos mecánicos, usualmente desde una canastilla, enganchan un grillete de 130 toneladas al cáncamo del eje. Siguiendo las señales del maniobrista, el operador del puente grúa levanta el eje con extrema lentitud y cuidado para no dañar el buje de la excéntrica durante la extracción. Una vez liberado, el eje es trasladado y colocado en un soporte de mantenimiento vertical para su inspección.

Figura 12. *Izaje del eje principal (main shaft)*



Nota. Unidad minera de referencia.

En la figura 12 se destaca el uso del gancho principal del puente grúa (capacidad de 110 t) y el punto de enganche correcto. La imagen subraya la magnitud y el riesgo de esta operación, que es uno de los izajes más pesados y delicados de todo el procedimiento.

En la fase de desmontaje del main shaft se concentran maniobras de alta criticidad debido al peso del componente, la necesidad de un izaje controlado y la interacción directa entre puente grúa, accesorios de enganche y personal de apoyo. Por ello, resulta necesario evaluar

esta etapa desde un enfoque técnico y preventivo, identificando tanto las condiciones favorables de ejecución como las debilidades que pueden comprometer la seguridad y la integridad del conjunto. De acuerdo con lo mencionado, la Tabla 21 presenta el análisis correspondiente a esta fase del procedimiento.

Tabla 21

Análisis en la fase de desmontaje del main shaft

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Capacidad de izaje	Uso del gancho principal de 110 t del puente grúa, adecuado al peso de 105 t del eje.	No se menciona verificación documental de la grúa ni ensayo de carga previo al izaje.
Métodos de enganche	Uso de grillete de 130 t acoplado al cáncamo del eje, garantizando resistencia.	Falta de detalle sobre inspección de grilletes, cáncamos y certificación de accesorios.
Control de maniobra	Señales coordinadas por maniobrista y ejecución lenta para evitar daños en el buje.	No se describen planes de contingencia ante oscilaciones, desalineación o falla de izaje.
Personal involucrado	Dos técnicos mecánicos apoyados en canastilla, con rol definido en enganche.	Exposición del personal en canastilla cercana a carga suspendida, incrementando el riesgo.
Descarga y soporte	Colocación en soporte de mantenimiento vertical para inspección y seguridad.	No se especifica si el soporte cuenta con cálculos de estabilidad o certificación estructural.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 21 evidencia que el desmontaje del main shaft cuenta con fortalezas importantes, como la capacidad adecuada de izaje, el empleo de accesorios de alta resistencia, el control progresivo de la maniobra y el uso de un soporte para su descarga e inspección. Sin embargo, también se observan debilidades relevantes vinculadas a la falta de verificaciones documentadas, ausencia de planes de contingencia, exposición del personal durante el enganche y escaso sustento técnico sobre la estabilidad del soporte utilizado. Estas observaciones justifican la necesidad de reforzar los controles operativos en esta etapa crítica.

3.1.4.3.7 Desmontaje de los cóncavos desgastados

Con la chancadora vacía, se retiran los revestimientos. Primero se desmontan las seis "medias lunas" de sujeción. Luego, dos soldadores equipados con trajes de aluminio utilizan una lanza térmica para cortar los segmentos de cóncavos desgastados en piezas manejables.

Los trozos cortados caen en tinas metálicas previamente posicionadas en el fondo y son retirados. Finalmente, se limpia toda la superficie interna del casco (shell) de la chancadora con amoladoras para prepararla para los nuevos revestimientos.



Figura 13.

Corte de cóncavos con lanza térmica



Nota. Unidad minera de referencia.

En la Figura N° 13 se muestra a un soldador en plena operación de corte, evidenciando la intensidad del proceso. El uso del traje aluminizado es un control de seguridad crítico e indispensable para proteger al trabajador de las temperaturas extremas (hasta 4,300°C) y las proyecciones de metal fundido que se generan durante esta tarea.

Figura 14.

Uso del Rock breaker para retiro de cóncavos



Nota. Unidad minera de referencia.

En la Figura 14 se observa el uso del Rock breaker durante la etapa de retiro de cóncavos en la chancadora primaria, como apoyo mecánico para la fragmentación y liberación de elementos adheridos o de difícil extracción. La imagen evidencia que esta maniobra se

ejecuta en un entorno de acceso restringido y con supervisión operativa, debido al riesgo asociado a la caída de material y a la interacción con equipos de gran tamaño. Su empleo contribuye a reducir el esfuerzo manual y a agilizar el desmontaje, aunque exige controles estrictos de seguridad y coordinación durante la intervención.

Previo al análisis del desmontaje de cóncavos desgastados, resulta necesario evaluar esta fase como una de las más críticas del procedimiento, debido a que involucra actividades de corte, manipulación de restos metálicos, limpieza del shell y exposición directa a riesgos térmicos, mecánicos y operativos. En ese sentido, la Tabla 22 presenta las principales fortalezas y debilidades identificadas en esta etapa, permitiendo reconocer tanto las prácticas adecuadas ejecutadas como las brechas de control que aún requieren estandarización.

Tabla 22

Análisis en la fase de desmontaje de cóncavos desgastados

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Retiro de medias lunas	Procedimiento ordenado al desmontar primero los elementos de sujeción.	No se especifica control dimensional ni torque de los pernos retirados.
Corte de cóncavos con lanza térmica	Uso de traje aluminizado que protege contra temperaturas extremas y proyecciones metálicas.	El corte genera riesgo de incendios, gases tóxicos y fatiga térmica; no se mencionan sistemas de ventilación ni monitoreo ambiental.
Manejo de restos cortados	Colocación de trozos en tinas metálicas para facilitar retiro.	Posibilidad de caída de material al fondo de la tolva, no se detallan barreras de contención ni limpieza inmediata.
Limpieza del casco (shell)	Uso de amoladoras garantiza superficie preparada para montaje de nuevos revestimientos.	No se define un control de calidad posterior a la limpieza (rugosidad, planitud, inspección visual con líquidos penetrantes).
Seguridad laboral	El procedimiento reconoce el uso de EPP especializado como el traje aluminizado.	Se limita a EPP personal, sin incluir medidas colectivas (pantallas térmicas, sistemas de extracción, checklists de seguridad).

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 22 evidencia que, si bien existen fortalezas relevantes como el desmontaje ordenado de elementos de sujeción, el uso de traje aluminizado, la disposición controlada de restos cortados y la preparación superficial del casco, persisten debilidades importantes relacionadas con la falta de controles dimensionales, ausencia de ventilación y monitoreo

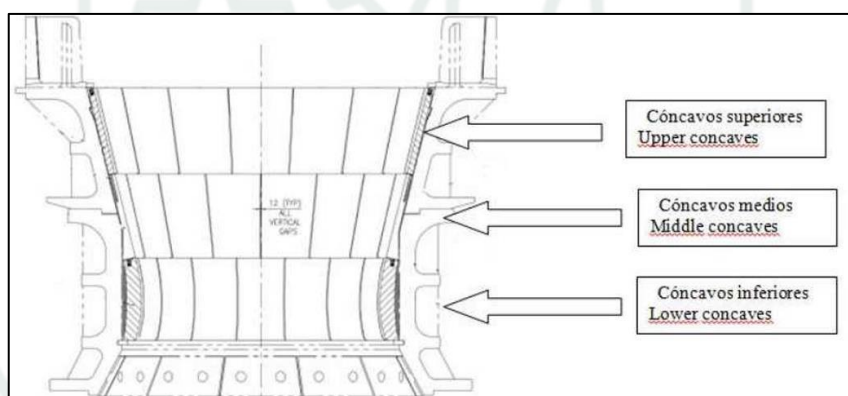
ambiental, limitaciones en la contención de material y escaso control de calidad posterior a la limpieza. En conjunto, este análisis permite concluir que la fase de desmontaje de cóncavos demanda mayores controles técnicos y medidas colectivas de seguridad para asegurar una ejecución más confiable y segura.

3.1.4.3.8 Armado de los floreros

Esta actividad se realiza en paralelo para optimizar los tiempos. Los "floreros" son estructuras metálicas o plantillas donde se pre-ensambla una fila completa de 16 segmentos de cóncavos nuevos. Se limpian los cóncavos y se montan uno por uno en el florero utilizando un camión grúa. Una vez completado, se alinean para que todos los segmentos queden a un mismo nivel, listos para ser instalados como un solo paquete dentro de la chancadora.

Figura 15.

Componentes de cóncavos



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura 15 muestra la distribución de los componentes de cóncavos en la cámara de trituración, diferenciándolos en tres zonas: superior, media e inferior. Esta clasificación resulta clave para el análisis del procedimiento, ya que cada segmento presenta condiciones particulares de desgaste, manipulación y montaje, lo que exige criterios técnicos diferenciados durante la intervención.

Figura 16.

Armado en floreros



Nota: Unidad minera de referencia

La Figura 16 evidencia el armado en floreros como una actividad de soporte para la maniobra de izaje, en la que intervienen personal, equipo auxiliar y condiciones de control en campo. Esta operación permite asegurar y organizar los componentes antes de su manipulación final, contribuyendo a mantener la secuencia del trabajo, reducir riesgos durante el montaje o desmontaje y mejorar la estabilidad de la maniobra.

Tabla 23*Análisis de la fase: Armado de los floreros*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Preparación de segmentos	- Uso de estructuras (“floreros”) que permiten preensamblar hasta 16 segmentos, optimizando tiempos. - Inspección previa y limpieza de cóncavos antes del montaje.	- No se detalla un control dimensional riguroso (alineación, concentricidad) previo al armado. - Falta de criterios para rechazar piezas con defectos superficiales o de mecanizado.
Logística de izaje	- Apoyo con camión grúa para el montaje de cada cóncavo. - Permite trabajar por bloques, reduciendo movimientos repetitivos.	- Riesgo elevado por peso de cada fila, especialmente la inferior (>16 t). - Ausencia de protocolos claros sobre capacidad residual del equipo de izaje en maniobras prolongadas.
Seguridad	- Actividad se realiza en zona delimitada y controlada. - Personal con EPP especializado para manipulación de cargas pesadas.	- Exposición prolongada del personal en zona de alto riesgo por caídas de objetos o fallas en estrobos. - No se menciona redundancia en sistemas de izaje (doble sujeción, eslingas secundarias).
Control de calidad	- Distribución en filas (superiores, medios e inferiores) documentada, lo que facilita la planificación.	- No se describe verificación metrológica del armado final antes del izaje conjunto. - Ausencia de check-list independiente que valide la correcta disposición y fijación de cada cóncavo.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 23 analiza el armado de floreros, destacando fortalezas en pre-ensamblaje frente a debilidades críticas en control dimensional, metrología e izaje. Si bien es una fase funcional, el análisis evidencia que requiere una mayor estandarización técnica. Esta mejora es indispensable para garantizar la precisión, estabilidad y seguridad operativa del procedimiento.

3.1.4.3.9 Montaje de los cóncavos nuevos

Se realiza el izaje de los floreros con el puente grúa y se posicionan cuidadosamente dentro de la chancadora, comenzando por la fila inferior. Se verifica el correcto asentamiento sobre el anillo de sujeción y se ajusta la separación (gap) entre uniones según el manual. Se sellan todas las juntas con una mezcla de yeso y cemento para evitar fugas. Finalmente, se

prepara y vierte el compuesto epóxico (backing) en el espacio entre los cóncavos y el casco, un paso crucial para dar soporte estructural. Este proceso se repite para las tres filas.

Figura 17.

Montaje y preparación para el backing epóxico



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura 17 muestra el montaje de la primera fila de cóncavos mediante accesorios de izaje y soportes, evidenciando controles visuales ante riesgos de carga suspendida y atrapamiento. Esta etapa es determinante, ya que la coordinación operativa y la correcta alineación del conjunto garantizan la aplicación adecuada del backing y la estabilidad de los revestimientos.

Figura 18.

Sellado de uniones con yeso y cemento (diablo)

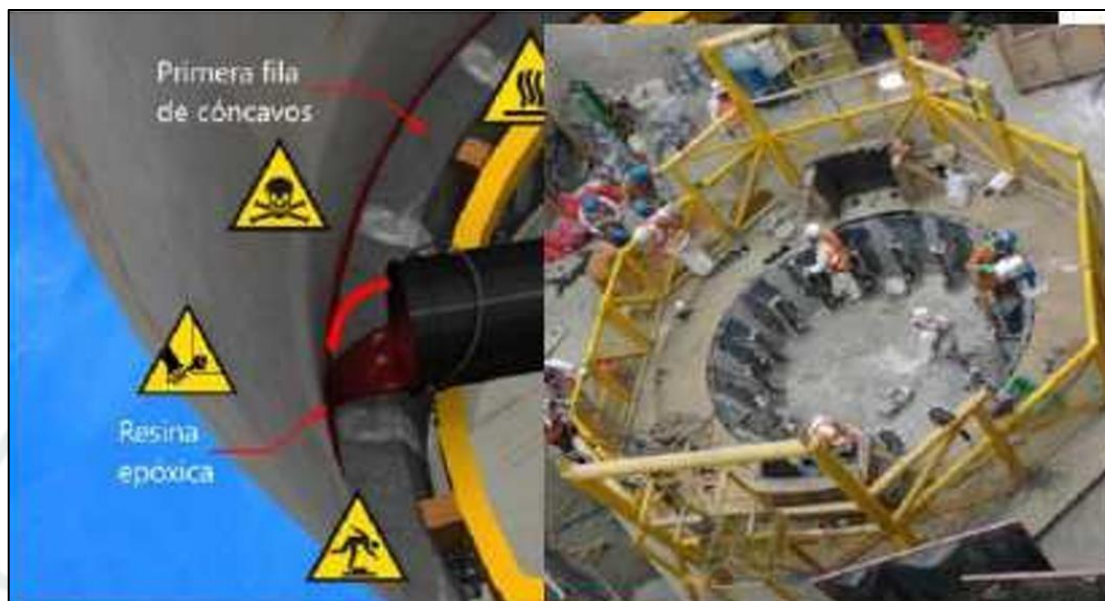


Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura 18 muestra el sellado de uniones con yeso y cemento para evitar fugas durante el vaciado del backing epóxico, mediante la intervención directa del personal en la cámara de trituración. Esta fase es técnicamente crítica, ya que un sellado deficiente compromete la contención del relleno y la fijación de los cóncavos. Por tanto, su correcta ejecución es indispensable para garantizar la confiabilidad y estabilidad del montaje final.

Figura 19.

Vaciado del cemento epóxico



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura N° 19 muestra el uso del "florero" para instalar un anillo completo de cóncaos de manera eficiente. También ilustra el paso posterior de sellado de juntas con yeso y cemento, una preparación fundamental para garantizar que el compuesto epóxico llene la cavidad de manera uniforme y proporcione el soporte estructural necesario a los revestimientos.

Se prepara el material de respaldo epóxico (termobacking o cemento epóxico) mezclándolo con sus aditivos mediante un taladro con paleta. El procedimiento indica textualmente "Prepare y vierta el material de relleno de respaldo entre el casco y las cóncaos de acuerdo con la información suministrada por el fabricante del material de relleno". Se advierte tener cuidado de no llenar por completo el espacio entre los segmentos. Este ciclo de sellado, preparación y vaciado del backing se repite para cada una de las tres filas de cóncaos a medida que se van montando.

Tabla 24*Análisis en la fase de montaje de los cóncavos nuevos*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Izaje de cóncavos	- Uso de florero y puente grúa para manipulación segura. - Posicionamiento cuidadoso dentro de la chancadora, comenzando por la fila inferior.	- Riesgo de golpes por deficiente comunicación entre operador y rigger. - No se describe protocolo de izaje redundante (guías, tag lines adicionales).
Asentamiento y ajuste	- Verificación de asiento sobre anillo de sujeción y ajuste de separación (gap) según manual.	- No se mencionan herramientas de medición certificadas para validar el gap. - No se definen tolerancias máximas de desviación.
Sellado de juntas	- Uso de mezcla de yeso y cemento para evitar fugas.	- Materiales de sellado tradicionales con baja durabilidad. - Posible incompatibilidad con el backing epóxico en condiciones de alta temperatura.
Preparación y vaciado de backing	- Uso de compuesto epóxico para soporte estructural, garantizando adherencia entre cóncavos y casco. - Procedimiento documentado de mezcla y vaciado.	- Dependencia de mezcla manual con taladro de paleta, riesgo de proporciones inexactas. - Falta de control de temperatura y viscosidad del epóxico durante aplicación.

Nota. Elaboración propia.

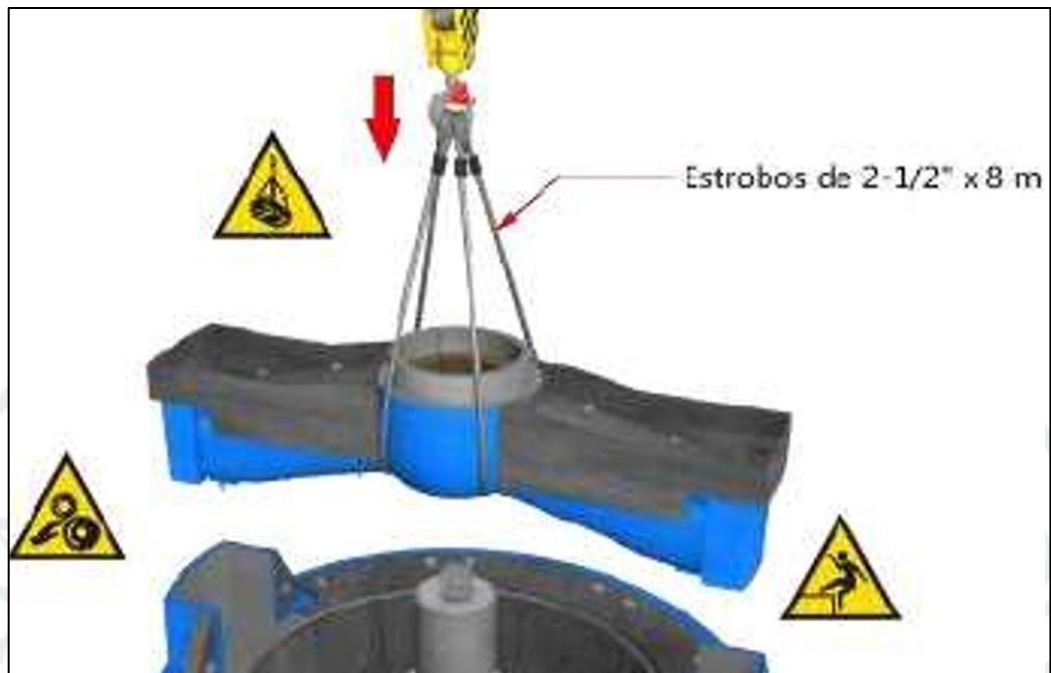
La Tabla 24 analiza el montaje de cóncavos nuevos, destacando fortalezas en el uso de herramientas de izaje, verificación del asiento y aplicación del soporte epóxico. No obstante, se identifican debilidades críticas en la redundancia de protocolos, certificación de mediciones y control de la mezcla del backing. Por ello, se concluye que la fase requiere una mayor estandarización técnica para asegurar la precisión y confiabilidad del montaje.

3.1.4.3.10 Montaje del main shaft

Una vez curado el backing, se reinstalan los componentes principales. Se monta el eje principal, guiándolo cuidadosamente para que los sellos y bocinas asienten correctamente en la excéntrica. A continuación, se monta el spider, posicionándolo sobre la chancadora y bajándolo lentamente mientras un técnico guía el centrado del buje. Se instalan y torquean los pernos Superbolt a 400 Nm, se engrasa el buje y se conecta la línea de lubricación, dejando el conjunto mecánicamente listo.

Figura 20.

Centrado y montaje final del spider



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura N° 20 muestra la reinstalación de la araña, destacando la necesidad de alinearla con precisión tanto en los bordes del casco como en el eje principal ya instalado. La indicación de que un técnico debe dirigir la maniobra desde arriba subraya la importancia del centrado para el correcto funcionamiento y la lubricación del buje, siendo uno de los últimos pasos de ajuste fino.

Tabla 25*Análisis en la fase de montaje del main shaft y spider*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Montaje del eje principal	- Alineamiento cuidadoso para garantizar correcto asiento de sellos y bocinas. - Supervisión de técnico especializado durante el centrado.	- No se mencionan instrumentos de alineación láser u otras técnicas de metrología avanzada, lo que limita la precisión. - Dependencia de maniobra manual aumenta el riesgo de desviaciones.
Montaje del spider	- Posicionamiento lento y controlado con estrobos de 2-1/2" y guía técnica. - Proceso documentado paso a paso.	- Riesgo de golpes en el descenso si falla la comunicación entre operador y técnico guía. - No se definen medidas de redundancia en el izaje (tag lines adicionales, plan de contingencia).
Torqueado de pernos	- Especificación clara de apriete (400 Nm con Superbolt). - Uso de pernos de alta capacidad.	- No se menciona verificación del torque con instrumentos calibrados ni registro en sistema de trazabilidad. - Ausencia de control de secuencia de torque cruzado para uniformidad.
Lubricación	- Engrase del buje y reconexión de línea de lubricación antes de dar por concluido el montaje.	- No se establecen volúmenes exactos ni especificaciones de lubricante. - Falta de checklist de confirmación de lubricación funcional antes de cierre.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 25 analiza la fase de montaje del main shaft y spider, identificando fortalezas en alineación, control de maniobra, torque y lubricación. Sin embargo, evidencia debilidades en metrología, control de izaje, verificación de torque y estandarización de lubricación.

3.1.4.3.11 Desmovilización, orden y limpieza del área

Concluido el montaje, el personal retira todas las herramientas, equipos y materiales sobrantes del área de trabajo. Se realiza una limpieza general y se segregan los residuos (metálicos, peligrosos, generales) para su correcta disposición. Finalmente, se realiza el desbloqueo de todas las fuentes de energía, se retira la señalización y se cierran todos los permisos, entregando formalmente el equipo al área de operaciones del cliente para su puesta en marcha.

Figura 21.

Clasificación y disposición final de residuos

DISPOSICIÓN DE RESIDUOS						
Re aprovechables					No Re aprovechables	
						
RESIDUOS METÁLICOS	RESIDUOS DE VIDRIO	RESIDUOS DE PAPEL Y CARTÓN	RESIDUOS DE PLÁSTICO	RESIDUOS ORGÁNICOS	RESIDUOS GENERALES	RESIDUOS PELIGROSOS

Nota. Unidad minera de referencia.

En la Figura 21 se muestran las directrices para la correcta segregación de todos los residuos generados (chatarra, envases de químicos, trapos contaminados, etc.), una tarea clave de la desmovilización que asegura el cumplimiento de las normas ambientales y de seguridad de la operación minera.

Tabla 26*Análisis en la fase de desmovilización*

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Retiro de equipos y materiales	- Retiro total de herramientas, equipos y sobrantes. - Procedimiento ordenado que libera el área.	- No se mencionan responsables asignados ni tiempos estándar para esta tarea. - Ausencia de control de inventario para verificar herramientas retiradas.
Limpieza general	- Se realiza limpieza integral del área tras la intervención.	- No se definen estándares de limpieza ni uso de listas de verificación.
Manejo de residuos	- Clasificación en residuos metálicos, peligrosos y generales. - Uso de segregación por colores para cumplimiento ambiental.	- No se establece trazabilidad del manejo posterior (almacenamiento temporal y disposición final). - Falta de auditorías ambientales documentadas en esta fase.
Desbloqueo y cierre de permisos	- Retiro de señalización y cierre formal de permisos. - Formalización de entrega del equipo a operaciones.	- No se mencionan pruebas de verificación funcional antes de entrega. - Carencia de acta de cierre con firmas responsables (operaciones y mantenimiento).

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 26 analiza la fase de desmovilización, orden y limpieza, destacando el retiro ordenado de equipos, limpieza integral y segregación de residuos. No obstante, evidencia debilidades en control, trazabilidad, verificación final y formalización del cierre del proceso.

3.1.4.3.12 Identificar punto críticos (cóncavos , mainshaft)

En el análisis integral del procedimiento de cambio de cóncavos, se identifican como fases más críticas aquellas que concentran mayores riesgos operativos, de seguridad y de impacto en la confiabilidad del equipo. Destaca el desmontaje de los cóncavos desgastados, por el uso de lanza térmica y la exposición a temperaturas extremas, así como el montaje de los nuevos cóncavos y aplicación del backing epóxico, donde una ejecución deficiente compromete directamente la vida útil de los revestimientos y la estabilidad del chancador. Igualmente, el izaje y manipulación de componentes pesados como la cúpula del spider y el main shaft, debido a la magnitud de las cargas y la necesidad de alineación milimétrica, representan puntos de alto riesgo por la posibilidad de accidentes graves o daños estructurales. Finalmente, la fase de desmovilización y limpieza, aunque menos compleja técnicamente, constituye un punto crítico por la gestión de residuos peligrosos y la

verificación del desbloqueo de energías, condiciones indispensables para garantizar la seguridad y la correcta puesta en marcha de la planta.

Tabla 27

Fases críticas y riesgos principales en el cambio de cóncavos

Fase crítica	Riesgos principales
Desmontaje de cóncavos desgastados	Exposición a altas temperaturas, proyecciones de metal fundido, quemaduras, incendios.
Montaje de cóncavos nuevos y backing epóxico	Mala preparación o vaciado deficiente del epóxico que genera asentamiento incorrecto, fallas prematuras y riesgo de colapso estructural.
Izaje de la cúpula del spider	Golpes a estructuras principales, caída de carga, atrapamientos por falta de control en vientos o estrobos.
Izaje del main shaft y montaje del spider	Alineación incorrecta que compromete la lubricación y el funcionamiento, accidentes por sobrepeso o falla de eslingas.
Desmovilización y limpieza	Exposición a residuos peligrosos, errores en desbloqueo de energías, incidentes ambientales y de seguridad.

Nota. Elaboración propia.

Según la tabla 27, se concluye que la correcta identificación y gestión de las fases críticas permite enfocar los esfuerzos de mejora en los puntos de mayor impacto para la seguridad, la confiabilidad y la continuidad operativa del chancador primario. Estas etapas concentran tanto riesgos técnicos como organizacionales, por lo que requieren controles específicos, procedimientos estandarizados y una supervisión estricta. De este modo, se sientan las bases para transformar el procedimiento actual de cambio de cóncavos en un proceso más seguro, eficiente y alineado con las mejores prácticas de mantenimiento en minería.

3.1.5 Análisis de herramientas aplicadas a la gestión del mantenimiento

Estos instrumentos permiten identificar los equipos con mayor recurrencia de

incidentes, registrar el tiempo de inactividad asociado y dejar trazabilidad de las actividades correctivas realizadas. Sin embargo, la información recogida se maneja de manera fragmentada, con limitaciones en la estandarización de formatos y en la sistematización de datos, lo que reduce su utilidad para el análisis de tendencias y la planificación preventiva.



A continuación, se analizan las herramientas de gestión fundamentales empleadas en el área de chancado.

3.1.5.1 Registros Históricos de Fallas y Mantenimiento

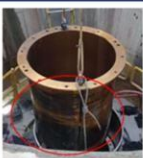
Los registros históricos son la memoria institucional de la gestión de activos. Constituyen la base empírica sobre la cual se construyen las estrategias de mantenimiento más sofisticadas. En el área de chancado de la unidad minera de referencia, se emplean registros de fallas e intervenciones, como la bitácora de mantenimiento de la chancadora primaria giratoria. Este tipo de documento es una herramienta de análisis de primer nivel, típicamente, captura datos vitales para cada intervención, tales como:

- Fecha y tipo de trabajo: Registra cuándo se realizó una intervención y su naturaleza (ej. "Cambio de cóncavos y Main shaft").
- Identificación de componentes: Asocia la intervención a componentes específicos del equipo (ej. Manto, Código 113").
- Estado de los componentes reemplazados y revisados: Documenta la condición "as-found" (tal como se encontró) de múltiples partes críticas, utilizando descriptores cualitativos como "Normal", "Pulido", "Quemaduras" o "Rajado".
- Decisión de mantenimiento: Indica la acción tomada, como "No cambio" o "Cambio".

Figura 22.

Consolidado de fallas

CR002									
Item	Descripción	Manto	Código	Fecha	Trabajo	Cambio de componentes			
						Inner Bushing	Center Wearing	Mainshaft Wearing	Bottom Piston Wearing
1	Cambio de cóncavos y Mainshaft	113"	M2 C2	4/01/2019	1era Falla	No cambio	Center Wearing sale entero (Cambio)	Mainshaft armado M2 C2 (Cambio)	No cambio
2	Cambio de Mainshaft	115"	M4 C2	24/02/2019	2da Falla	Quemaduras, Pulido (No cambio)	No cambio	No cambio	No cambio
3	Cambio de Mainshaft	117"	M3 C2	25/03/2019	Normal	Quemaduras, Pulido (No cambio)	Center Wearing sale entero (Cambio)	-	No cambio
4	Cambio de cóncavos y Mainshaft	113"	M4 C2	10/05/2019	3ra Falla	No cambio	No cambio	No cambio	No cambio
5	Cambio de Mainshaft	115"	M3 C2	17/06/2019	Normal	No cambio	Pulido (No cambio)	Pulido (No cambio)	No cambio
6	Cambio de Mainshaft	117"	M4 C2	12/07/2019	Normal	No cambio	Center Wearing sale entero (Cambio)	Cambio	No cambio
7	Cambio de cóncavos y Mainshaft	113"	M3 C2	11/09/2019	4ta Falla	Quemaduras, pulido (No cambio)	No cambio	Cambio	No cambio
8	Cambio de Mainshaft (usado)	Usado	M1 C2	30/10/2019	Normal	Quemaduras, pulido (No cambio)	Pulido (No cambio)	Pulido (No cambio)	No cambio
9	Cambio de Mainshaft	115"	M3 C2	14/11/2019	Normal	Quemaduras, rajado (parte inferior) Cambio	Cambio	Cambio	No cambio
10	Cambio de cóncavos y Mainshaft	113"	M2 C2	9/01/2020	Normal	Quemaduras, rajado (parte inferior) Cambio	Cambio	Cambio	(Pulido) No cambio



Inner Bushing quemado



Quemadura y rajadura



Mainshaft quemado



Rajaduras y quemaduras en Inner Buhsing

Nota. Unidad minera de referencia.

La figura 22 ilustra la utilidad de esta herramienta que reside en su capacidad para revelar patrones de falla recurrentes. Por ejemplo, al analizar el "Consolidado de fallas", un ingeniero de confiabilidad puede observar que el componente Inner Bushing presenta repetidamente "Quemaduras" y "pulido", o incluso "rajaduras", llevando a su reemplazo en múltiples ocasiones. Esta observación es fundamental, pues indica que el simple cambio del componente es un paliativo, no una solución. El registro histórico se convierte así en el punto de partida para un Análisis de Causa Raíz (RCA) que investigue las causas subyacentes del sobrecalentamiento y el desgaste acelerado, que podrían estar relacionadas con problemas de lubricación, desalineación o condiciones operativas anómalas. De esta forma, una herramienta de registro se transforma en un catalizador para la mejora continua.

3.1.5.2 Informes de Campo y Listas de Verificación (Checklists)

Estas herramientas estandarizan la recopilación de datos en terreno, asegurando que las inspecciones sean consistentes, exhaustivas y que la información crítica sobre la condición del equipo sea capturada de manera sistemática.

Figura 23.

Registros de campo del servicio de instalación de cóncavos

CHANCADOR PRIMARIO N° 01						
Cóncavas	Inicio Op.	Fin Op.	N° meses	M-Ton	CONDICION	INSTALADO POR:
Campaña 1	14-Oct-15	21-Jul-16	9.4	14.30	NORMAL	
Campaña 2	21-Jul-16	03-Mar-17	7.4	15.80	NORMAL	
Campaña 3	03-Mar-17	13-Aug-17	5.4	12.10	NORMAL	
Campaña 4	14-Aug-17	04-Apr-18	7.8	17.40	NORMAL	
Campaña 5	10-Apr-18	16-Feb-19	10.4	21.68	NORMAL	
Campaña 6	19-Feb-19	02-Apr-20	13.5	30.00	NORMAL	
Campaña 7	02-Apr-20	16-Apr-21	12.6	26.89	NORMAL	
Campaña 8	16-Apr-21	4/09/2022	16.9	32.18	NORMAL	
Campaña 9	05-Sep-22	21/09/2023	12.7	29.09	FRACTURADO	
Campaña 10	21-Sep-23	29/06/2024	9.4	21.18	FRACTURADO	
Campaña 11	02-Jul-24	continua ...	9.4	21.18	Observaciones en Lower	

CHANCADOR PRIMARIO N° 02						
Cóncavas	Inicio Op.	Fin Op.	N° meses	M-Ton	CONDICION	INSTALADO POR:
Campaña 1	14-Oct-15	15-Jun-16	8.2	10.90	NORMAL	
Campaña 2	15-Jun-16	05-Feb-17	7.8	12.92	NORMAL	
Campaña 3	05-Feb-17	05-Jul-17	5.0	11.14	NORMAL	
Campaña 4	05-Jul-17	01-Feb-18	7.1	15.70	NORMAL	
Campaña 5	04-Feb-18	12-Sep-18	7.3	15.56	NORMAL	
Campaña 6	12-Sep-18	03-Sep-19	11.7	25.09	NORMAL	
Campaña 7	02-Sep-19	09-Feb-21	17.5	32.09	NORMAL	
Campaña 8	11-Feb-21	17/04/2022	14.3	29.24	NORMAL	
Campaña 9	17-Apr-22	7/10/2023	17.9	37.42	FRACTURADO	
Campaña 10	07-Oct-23	29/04/2024	6.9	15.73	FRACTURADO	
Campaña 11	01-May-24	continua ...			Observaciones en Lower	

Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura 23 presenta los registros de campo del servicio de instalación de cóncavos en dos chancadoras primarias, detallando campañas, fechas de operación, duración, toneladas procesadas y condición del equipo. Se observa que la mayoría de las campañas operaron en condición normal hasta la aparición de eventos de fractura en periodos recientes, evidenciados en rojo. Esta información permite identificar tendencias de desempeño y sustentar el análisis de fallas recurrentes en el subsistema de cóncavos.

3.1.5.3 Modos de falla y hallazgos principales

En este apartado se presentan los modos de falla identificados durante el análisis técnico de los eventos de fractura de cóncavos en las chancadoras primarias de la unidad minera. Estos resultados han sido determinados a partir de la inspección en campo, el análisis de reportes de fallas, el estudio de imágenes de evidencia y la revisión de antecedentes técnicos relacionados con el comportamiento mecánico de los cóncavos bajo condiciones operativas de mineral de alta dureza y abrasividad. Los hallazgos expuestos permiten comprender las causas físicas y operativas que contribuyen a la ocurrencia de fracturas,

desplazamientos y fisuras en los cóncavos, así como el impacto que estas fallas tienen sobre la disponibilidad y confiabilidad de las chancadoras primarias en la operación minera.

Como resultados se exponen modos de falla como:

- Fracturas frágiles en cóncavos intermedios, superiores e inferiores.
- Desplazamientos verticales de cóncavos por fallas de backing, mal curado, contaminado o con propiedades mecánicas fuera de rango.
- Fisuras en esquinas superiores e inferiores, desprendimientos parciales y hundimientos localizados.

Figura 24.

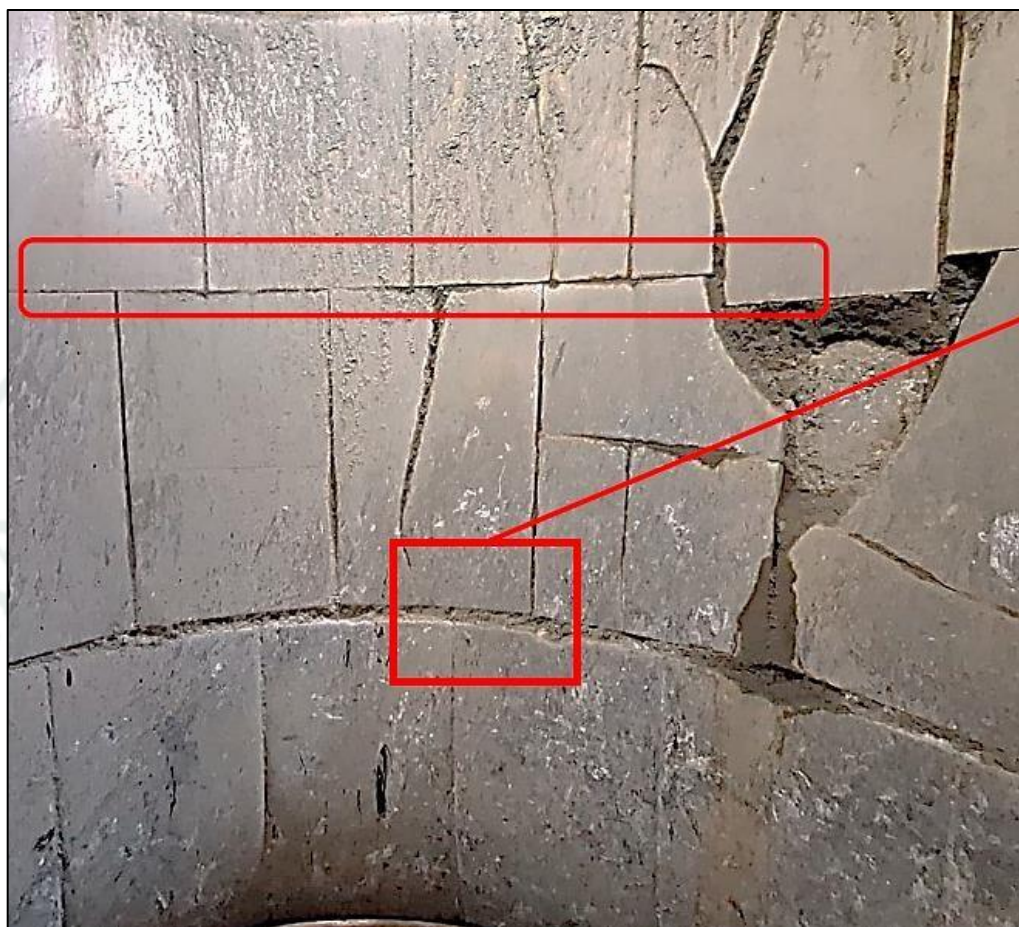
Fractura de cóncavos



Nota. Unidad minera de referencia.

Figura 25.

Desplazamiento de cóncavos



Nota. Unidad minera de referencia.

Este movimiento provoca un cambio en las separaciones (gaps) entre las filas de revestimientos: la separación entre la fila inferior e intermedia aumenta, mientras que la separación entre la fila intermedia y superior disminuye

La Figura N° 24 y la Figura N° 25 muestran las fallas mecánicas mixtas fragilidad del backing, sobrecarga estructural y montaje deficiente. Técnicamente, este patrón combina fallas por carga excesiva (sobrecarga CSS/OSS mal controlado), impactos localizados (inchancables y bolonería) y fatiga estructural agravada por la alta abrasividad de la magnetita, la cual se confirma como mineral presente de forma recurrente en ambas líneas de chancado.

3.1.5.4 Manual de instalación, operación y mantenimiento

Este manual expone de forma clara los modos de falla más comunes en cóncavos de chancadoras primarias, sus causas típicas y las acciones recomendadas.

Figura 26.

Manual de instalación, operación y mantenimiento

Installation, Operation, and Maintenance Manual 59001613 5 Operation Document 7.500300		
Fault	Cause	Remedy
Concaves cracking.	Crusher jammed by an uncrushable object.	Keep uncrushable objects out of the crushing chamber. Notify maintenance.
	Concaves too thin.	Notify maintenance.
Concaves falling out.	Poor installation.	Notify maintenance.
Concaves wearing rapidly.	Condition caused by the rock being crushed.	Notify maintenance.
Broken concave segment ring.	Damaged when removing concaves.	Notify maintenance.

Nota. Unidad minera de referencia.

Esta tabla sintetiza cuatro fallas críticas:

- Fractura de cóncavos, causada por la presencia de inchancables que bloquean la cámara de chancado o por cóncavos desgastados excesivamente delgados.
- Desprendimiento de cóncavos, asociado a instalaciones deficientes o sin inspección de fijación.
- Desgaste acelerado de cóncavos, relacionado directamente con las condiciones del mineral chancado, especialmente cuando contiene altos niveles de dureza y abrasividad (magnetita, pórfidos).
- Fractura de segmentos de cóncavos durante el retiro, atribuida a técnicas inadecuadas de desinstalación.

La acción correctiva recomendada en todos los casos es notificar a mantenimiento, reforzando la necesidad de contar con procedimientos formales, seguimiento de condiciones de operación y entrenamiento del personal.

De este manual documentado en campo podemos deducir a nivel de chancado en la unidad minera de referencia que:

- La presencia de inchancables está identificada como un factor crítico, generando impactos localizados que exceden la resistencia mecánica de los cóncavos, provocando fisuras y fracturas.
- La instalación deficiente (sin filler gauge, sin control de torque, sin control de alineación) facilita desprendimientos y desplazamientos verticales.
- El desgaste acelerado, impulsado por mineral competente, sin un plan de control predictivo ni escaneo de desgaste, acelera el ciclo de fallas, afectando la disponibilidad operativa.
- Los daños durante el retiro de cóncavos, debido a herramientas inadecuadas o falta de capacitación en el uso de lanzas térmicas, causan roturas que incrementan costos y tiempos de detención.

Esta tabla de la empresa encargada de los mantenimientos de la chancadora en la unidad minera de referencia, valida la necesidad urgente de fortalecer la cultura de mantenimiento predictivo en la unidad minera, con procedimientos formales y personal capacitado para controlar los factores operacionales que provocan fallas recurrentes en los cóncavos de la chancadora primaria.

3.1.5.5 Impactos operativos

El registro de eventos de fractura de cóncavos expone que los últimos eventos, a diferencia de las primeras ejecutadas por la empresa contratada para el mantenimiento de la chancadora, muestran rendimiento menor al estimado (por ejemplo: de 32 Mton esperadas, algunas quedaron en 15.7 Mton y otras apenas 4.87 Mton). Este patrón muestra claramente la falta de control de calidad posterior en el montaje, almacenamiento y curado de backing.

Figura 27.

Eventos de fractura de cóncavos

EVENTOS POR FRACTURA DE CONCAVAS					
	0210-CRG-001	0210-CRG-002	0210-CRG-002	0210-CRG-001	0210-CRG-002
Fecha Ocurrencia	20-Set-23	21-Set-23	29-Abr-24	29-Jun-24	29-Jun-24
Rendimiento Esperado	32Mton	32Mton	32Mton	32Mton	32Mton
Ratio (Altura Poste/M-Tn)	0.063	0.082	0.044	0.093	Campaña en Proceso
Límite de Retiro de Cóncavas	Alerta: 50% Crítico: 35%	Alerta: 50% Crítico: 35%	Alerta: 50% Crítico: 35%	Alerta: 50% Crítico: 35%	Alerta: 50% Crítico: 35%
Rendimiento (M-Tn)	29.10	36.00	15.73	21.18	4.87
Duración (Meses)	12.6	18.0	6.8	9.3	1.9
Fecha Inicio	6-Set-22	15-Abr-22	7-Oct-23	24-Set-23	3-May-24
Fecha Fin	20-Set-23	7-Oct-23	29-Abr-24	29-Jun-24	29-Jun-24
Tiempo Detenido (Hrs)	113.0	59.0	48.0	54.0	Campaña en Proceso
Proveedor	FLS - Diseño MMG	FLS - Diseño MMG	FLS - Diseño Chinalco	FLS - Diseño MMG	Elecmetal
Descripción de Evento	Fractura frágil de 12 Cóncavas intermedias y desprendimiento de 01 cóncava superior.	Fractura de cóncavas intermedias, sin desprendimiento de las mismas.	Fractura de cóncavas intermedias y superiores. 01 Intermedia desplazada y desprendida parcial	Fractura de 2 Cóncavas, una superior con fisura en zona central y una intermedia con una fisura en borde lateral y hundimiento.	Fractura de 6 Cóncavas inferiores, daños se localizan en las esquinas y borde superior del Lower

Nota. Unidad minera de referencia.

De acuerdo con el informe de la figura 27, los cinco eventos analizados generaron 322 horas de detención de producción y una disminución de -1.86% de la disponibilidad anual de la planta de chancado. Este impacto revela que la planta deja de procesar entre 3 y 6 millones de toneladas por parada, con una consecuencia directa en la productividad de la unidad minera y en el cumplimiento de contratos de venta de mineral.

El hecho de que la fractura ocurra con distintos tipos de cóncavos es un indicador poderoso de que la causa raíz no reside en un defecto de fabricación de un proveedor específico, sino en un proceso interno de la planta, como lo es el procedimiento de instalación y aplicación del backing.

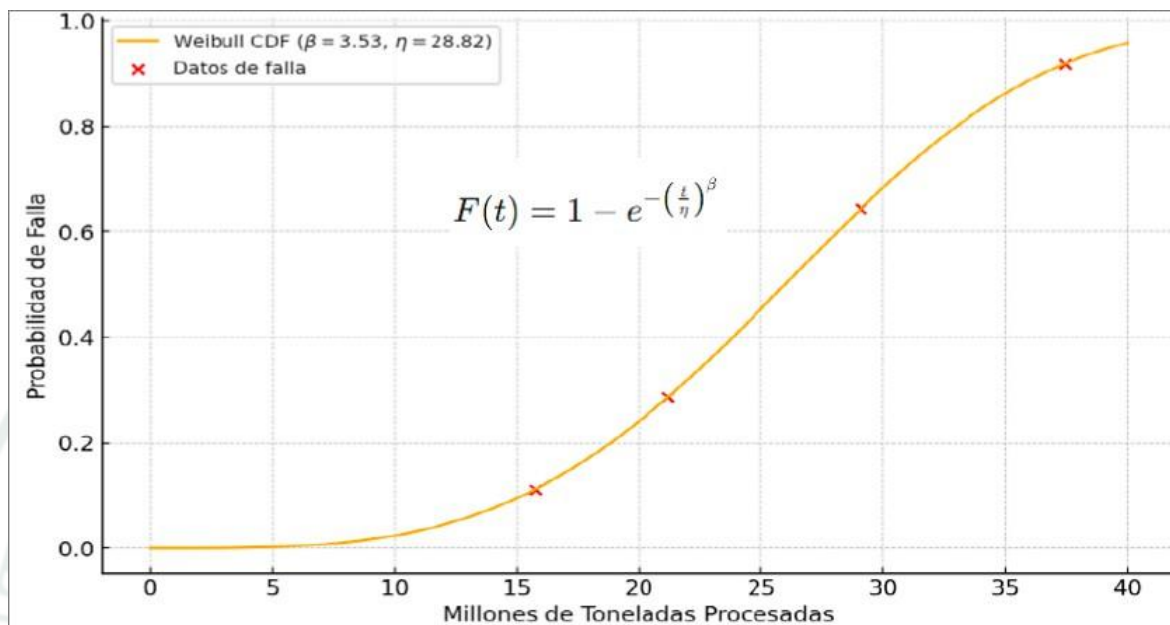
3.1.6 Análisis de confiabilidad mediante distribución de Weibull

La gestión de mantenimiento proactivo requiere establecer intervalos de recambio basados en el comportamiento estadístico de las fallas. Para ello se aplicó un análisis de confiabilidad empleando la distribución de Weibull, utilizando como base cuatro eventos de fractura registrados en los chancadores primarios durante los años 2023 y 2024. Estos eventos ocurrieron tras procesar 15.73, 21.18, 29.09 y 37.42 millones de toneladas respectivamente, constituyendo un conjunto de datos representativo para modelar la vida útil de los cóncavos.

Los parámetros obtenidos del ajuste fueron un valor de forma $\beta = 3.53$ y un valor de vida característica $\eta = 28.82$ millones de toneladas. El valor de β mayor a 1 indica un modo de falla por desgaste progresivo, mientras que η refleja la vida media esperada de los cóncavos antes de que se alcance un nivel de riesgo significativo. Bajo este modelo, la probabilidad acumulada de falla alcanza el 20% aproximadamente a los 19.48 millones de toneladas procesadas, lo que constituye un umbral de referencia para la planificación preventiva.

Figura 28.

Cálculo temporal de probabilidad de falla



Nota. Unidad minera de referencia.

La gráfica de la función de distribución acumulada de Weibull de la figura 28, muestra cómo el riesgo de falla se incrementa de forma exponencial conforme aumenta la cantidad de mineral procesado. En los primeros 10 millones de toneladas la probabilidad de fractura es casi nula, pero a partir de los 20 millones se ubica en el rango de riesgo aceptable para mantenimiento preventivo. Este resultado confirma la necesidad de programar el cambio de cóncavos con una periodicidad máxima de 10 meses, equivalente a 19 a 20 millones de toneladas procesadas, para evitar desplazamientos prematuros o fracturas críticas.

Con base en estos resultados, se elaboró una proyección temporal de los recambios de cóncavos y mantos en ambos chancadores primarios. La planificación considera la alternancia de cambios cada 10 meses para cóncavos y cada 5 meses para mantos, con la meta de extender nuevamente la vida útil hasta 15 meses (30 millones de toneladas), una vez implementadas las mejoras en el procedimiento de curado del backing.

Figura 29.

Proyección temporal de cambio de cóncavos y mantos

PROYECCION DE CAMBIO DE CONCAVAS Y MANTO CON NUEVA PROYECCION (PROBABILIDAD DE FALLA)										
EQUIPO	1-May-24	2-Jul-24	28-Sep-24	29-Nov-24	25-Feb-25	28-Abr-25	25-Jul-25	25-Sep-25	22-Dic-25	22-Feb-26
CRG001		Cóncavos				Cóncavos				Cóncavos
		Manto 112.5		Manto 113.5 Plg		Manto 112.5		Manto 113.5 Plg		Manto 112.5
CRG002	Cóncavos	-			Cóncavos				Cóncavos	
	Manto 112.5 Plg	-	Manto 113.5 Plg		Manto 112.5 Plg		Manto 113.5 Plg		Manto 112.5 Plg	

Nota. Unidad minera de referencia.

La figura 29 muestra que el chancador CRG001 requiere cambio de cóncavos en julio de 2024 y abril de 2025, mientras que el CRG002 presenta un patrón similar con recambios proyectados en mayo de 2024 y abril de 2025. En ambos casos, los mantos deben ser sustituidos en intervalos de cinco meses debido a la mayor tasa de desgaste. Esta planificación asegura que las intervenciones no se realicen de forma reactiva tras fallas críticas, sino de manera programada en base a criterios estadísticos de confiabilidad.

La integración del análisis Weibull con la proyección de cambios permite cerrar el ciclo de diagnóstico y pasar a la propuesta de mejora, donde el rediseño del procedimiento de curado y aplicación del backing será clave para extender los intervalos de servicio sin comprometer la seguridad ni la continuidad operativa.

3.1.7 ACR de la gestión del mantenimiento

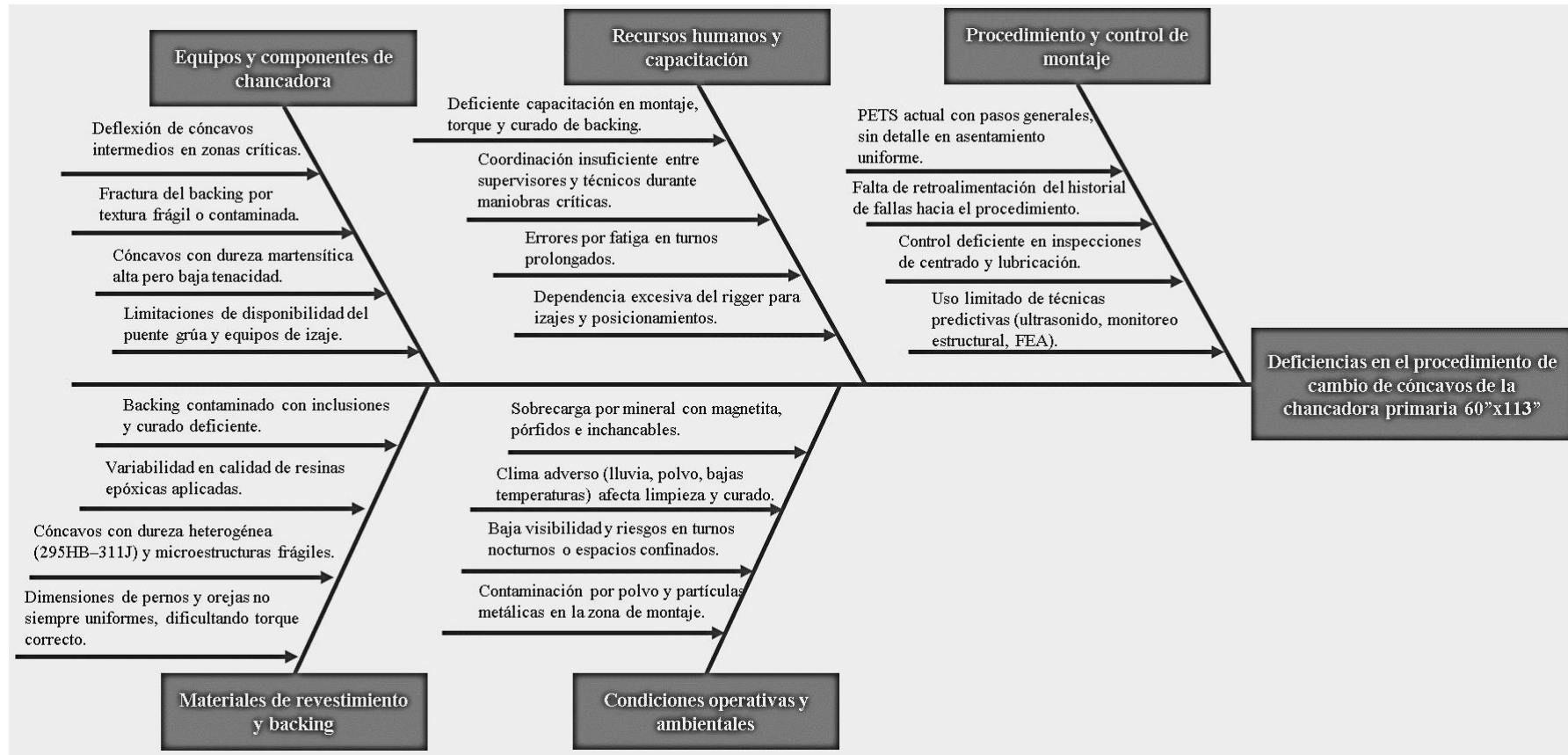
El análisis causa raíz (ACR) aplicado a la gestión del mantenimiento en el cambio de cóncavos de la chancadora primaria 60" x 113" constituye una herramienta clave para identificar las deficiencias críticas que originan fallas recurrentes en los componentes. La metodología seguida se fundamenta en la identificación de evidencias físicas, la formulación de hipótesis de falla y la validación con información histórica y técnica, en línea con los lineamientos del procedimiento PETS vigente.

En este contexto, los eventos registrados entre 2023 y 2024 revelaron fracturas prematuras en cóncavos intermedios y superiores, desplazamientos verticales por curado deficiente del backing, así como un comportamiento heterogéneo en la dureza martensítica de los revestimientos. Dichas fallas generaron más de 322 horas de detención acumulada y una disminución del 1.86% en la disponibilidad de la planta de chancado, lo que resalta la criticidad del problema y la necesidad de optimizar los procesos de mantenimiento.

Para representar gráficamente las causas que convergen en estas deficiencias, se elaboró un diagrama de Ishikawa (Figura X), el cual integra tanto los factores técnicos de la chancadora como los aspectos operativos, ambientales y de gestión. Este esquema permite visualizar cómo las fallas de materiales, procedimientos, condiciones de operación y recursos humanos interactúan en la generación de fracturas y desplazamientos de cóncavos.

Figura 30.

Diagrama de Ishikawa



Nota. Elaboración propia.

La figura 30 muestra un diagrama de Ishikawa que identifica las causas de las deficiencias en el cambio de cóncavos, agrupadas en equipos, personal, procedimiento, materiales y condiciones operativas.



De acuerdo con el ACR, las causas raíz priorizadas se relacionan directamente con la aplicación y curado del backing, las condiciones de almacenamiento del producto epóxico y la competencia mineralógica del material chancado (magnetita e inchancables). Estos factores no solo afectan la integridad estructural de los cóncavos, sino que también limitan la efectividad de los procedimientos de mantenimiento actuales.

El diagrama de Ishikawa y los hallazgos del reporte ACR evidencian que las deficiencias en el procedimiento de cambio de cóncavos tienen un carácter multifactorial. Esto implica que la mejora no debe centrarse únicamente en la actualización del PETS, sino también en la estandarización del curado del backing, la capacitación técnica continua y la integración de herramientas predictivas que permitan anticipar las condiciones de falla.

Taxonomía del equipo

Tabla 28

Taxonomía técnica del chancador primario

Sistema principal	Subsistema	Componentes principales
Cámara de chancado	Cóncavos	Cóncavos superiores, cóncavos intermedios, cóncavos inferiores, pernos de sujeción, orejas de fijación, backing (resina epóxica), sellos de juntas de cóncavos
	Araña y tapa superior	Araña, muñón maquinado, sello de la araña, cojinetes superiores
	Manto y eje principal	Manto (liners móviles), eje principal, tuerca de sujeción, anillo de fijación, camisa del eje
	Casco superior e inferior	Casco superior (top shell), casco inferior (bottom shell), bridas de fijación, ranuras de orejas
Mecanismo excéntrico	Excéntrica y conjunto de transmisión	Excéntrica, engranaje corona, piñón de contra eje, cojinetes de excéntrica, bujes
	Sistema de ajuste hidráulico	Cilindros hidráulicos, pistones, sellos, válvulas de alivio
	Sistema de lubricación	Bombas de lubricación, enfriadores de aceite, filtros, tuberías, sensores de presión y temperatura
Sistemas auxiliares	Sistema eléctrico e instrumentación	Motor principal, sensores de posición OSS/CSS, sistema de control local (PLC), tableros eléctricos
	Sistema de sellado y juntas	Sellos múltiples (taconite), juntas verticales y horizontales de concavos, empaques de grasa

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 28 presenta la taxonomía técnica de la chancadora primaria Traylor NT 60"x113", organizando el equipo en sistemas, subsistemas y componentes principales. Se

identifican tres grandes bloques: cámara de chancado, mecanismo excéntrico y sistemas auxiliares, cada uno con sus respectivos elementos funcionales. Esta clasificación permite estructurar el análisis del equipo y facilita la identificación de componentes críticos para mantenimiento y confiabilidad.

3.1.8 Análisis de modo y efectos de fallo de procesos (AMEF)

Con el propósito de identificar de manera sistemática los posibles modos de falla y sus consecuencias en el desempeño del chancador primario, se elaboró una matriz de Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF). Esta herramienta permite relacionar cada sistema y subsistema con sus funciones principales, las fallas funcionales que pueden presentarse, los modos de falla más probables y los efectos que generan sobre la operación. El énfasis se ha puesto en el subsistema de cóncavos, dado que concentra la mayor criticidad en términos de seguridad, confiabilidad y continuidad operacional, aunque también se consideran otros subsistemas relevantes para brindar una visión integral del equipo.

Tabla 29

AMEF de la chancadora primaria

Sistema	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto de falla
Chancador giratorio primario 60"x113"	Cóncavos	1 Suministrar una superficie de trituración continua y resistente, capaz de reducir el mineral hasta el CSS requerido bajo condiciones de presión >220 MPa e impactos repetitivos.	A Incapacidad de mantener la reducción granulométrica según parámetros de diseño (CSS/OSS).	1 Fractura frágil de cóncavos intermedios o superiores	Pérdida súbita de sección útil de la cámara, sobrecarga en cóncavos restantes y riesgo de colapso parcial.
				2 Desplazamiento vertical de cóncavo	Pérdida de alineamiento, ingreso de contaminantes al backing, incremento de desgaste irregular.
				3 Desgaste acelerado por magnetita, pórfidos e inchancables	Reducción del espesor útil antes del ciclo esperado, necesidad de cambio prematuro, incremento de costos y paradas.
				4 Fisuración en bordes y esquinas de cóncavos	Desprendimiento parcial, ingreso de finos, aumento de vibraciones y riesgo de propagación de grietas.
				5 Superficie de trituración irregular por montaje incorrecto	Pérdida de eficiencia de reducción, mayor consumo energético y posible daño al mainshaft.
		2 Proporcionar soporte estructural estable junto al backing, transmitiendo uniformemente	A Incapacidad de sostener cargas de compresión de manera uniforme sin generar	Backing	Formación de cavidades internas, fractura prematura del cóncavo, deflexión excesiva y pérdida de soporte estructural.
				1 contaminado o mal curado	Resistencia desigual, zonas débiles que concentran esfuerzos,
				2 Variabilidad en calidad del material del backing	propagación acelerada de grietas.

Cámara de chancado	Araña y tapa superior	3	A	Sostener el manto y transmitir cargas hacia la carcasa.	Incapacidad de soportar cargas de compresión e impacto.	3	Cóncavos con dureza martensítica alta y baja tenacidad	Fractura frágil bajo cargas dinámicas, sin aviso previo, pérdida crítica de operatividad.
						4	Cóncavos con dureza heterogénea (295–311 HB)	Áreas blandas se desgastan rápido, áreas duras se agrietan → comportamiento disparejo, desgaste prematuro.
						5	Montaje inadecuado de cuñas, pernos y orejas	Ajuste insuficiente, holguras estructurales, desprendimiento parcial de cóncavos.
						6	Deflexión excesiva de cóncavos intermedios en zonas críticas	Concentración de esfuerzos → inicio de microgrietas y propagación acelerada.
						7	Condiciones ambientales adversas (baja T°, polvo, humedad) durante el curado del backing	Curado incompleto o contaminado → pérdida de resistencia mecánica, fallas tempranas del soporte estructural.
						8	Ingreso de partículas metálicas en la zona de asentamiento	Inclusiones en backing → puntos de fractura y pérdida de rigidez.
						1	Fisuración en brazos de araña	Vibraciones, riesgo de colapso estructural.
						2	Desgaste en muñón de araña	Fugas de lubricante, calentamiento y pérdida de soporte.
chancado	Manto y eje			Triturar mineral por compresión	Incapacidad de ejercer fuerza de	1	Fisura en manto	Reducción de capacidad de trituración.

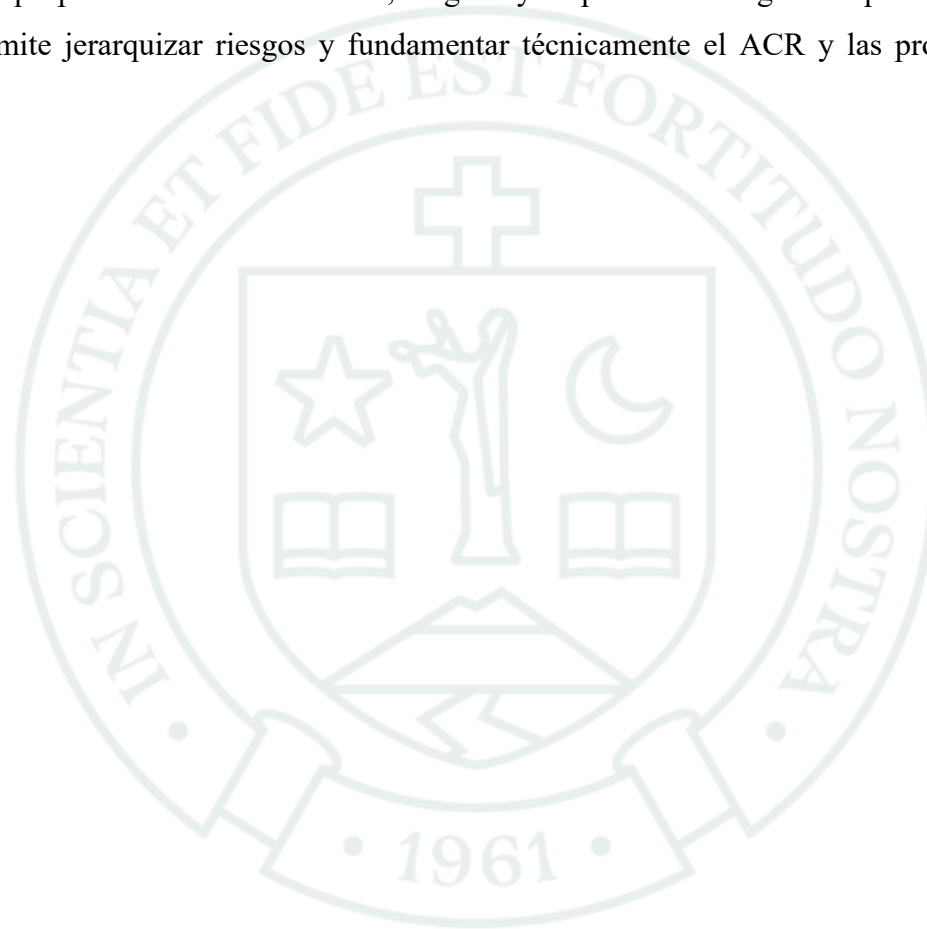
principal	4	contra los cóncavos.	A	chancado uniforme.	2	Desgaste irregular del manto	Pérdida de granulometría de producto, incremento de energía específica.
-----------	---	-------------------------	---	-----------------------	---	---------------------------------	---



	Casco superior e inferior	5	Alojar revestimientos y resistir cargas transmitidas.	A	Pérdida de integridad estructural.	1	Grietas en casco superior/inferior	Parada mayor para reparación o reemplazo.
Mecanismo excéntrico	Excéntrica y transmisión	6	Generar movimiento oscilante del eje principal. Regular el	A	Incapacidad de transmitir movimiento oscilante. Incapacidad de	1 2	Desgaste de bujes de excéntrica Falla de engranaje corona-piñón Fuga en cilindros	Vibraciones, holguras, reducción de eficiencia. Parada inmediata del chancador.
Mecanismo excéntrico	Ajuste							Imposibilidad de ajustar
	hidráulico	7	OSS/CSS según operación.	A	variar la abertura de descarga.	1	hidráulicos	granulometría, aumento de inchancables.
Sistemas auxiliares	Lubricación	8	Suministrar flujo de aceite limpio y refrigerado. Suministrar	A	Incapacidad de lubricar o refrigerar bujes y engranajes. Incapacidad de	1 2 1	Obstrucción en filtros Falla de bomba de lubricación Falla de motor	Aumento de temperatura, desgaste prematuro. Parada automática por protección de equipos. Parada inmediata del chancador.
Sistemas auxiliares	Eléctrico e instrumentación	9	energía y controlar operación. Impedir ingreso	A	accionar motor principal y controles. Incapacidad de	2	eléctrico Sensor CSS/OSS fuera de calibración	Error en ajustes, producto fuera de especificación.
Sistemas auxiliares	Sellado y juntas	10	de polvo y contaminantes al interior.	A	mantener hermeticidad.	1	Desgaste de sellos taconite	Ingreso de polvo, desgaste acelerado de bujes y engranajes.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 29 presenta el AMEF de la chancadora Traylor NT, identificando fallas críticas en cóncavos y backing ante condiciones de operación severas. El análisis revela que problemas como fracturas, desgaste y desplazamientos generan pérdida de eficiencia, sobrecostos y riesgos estructurales. Este diagnóstico permite jerarquizar riesgos y fundamentar técnicamente el ACR y las propuestas de mejora en el proceso de mantenimiento.



El análisis de la matriz AMEF evidencia que los modos de falla asociados a los cóncavos, tales como fracturas, desplazamientos o problemas de backing, representan un riesgo significativo de pérdida de disponibilidad y aumento de costos de mantenimiento. Asimismo, los subsistemas de apoyo, como el mecanismo excéntrico, el sistema hidráulico y el de lubricación, también constituyen puntos críticos que pueden derivar en paradas inmediatas si no se gestionan adecuadamente. La identificación detallada de estos escenarios de falla proporciona la base para priorizar acciones de mejora, implementar controles preventivos y orientar el rediseño del procedimiento de cambio de cóncavos, con el fin de incrementar la confiabilidad del chancador y optimizar la gestión de mantenimiento.

3.1.9 Comprobación de hipótesis

3.1.9.1 Desplazamiento vertical de cóncavos

Durante las campañas de mantenimiento de la chancadora primaria en la unidad minera de referencia, se ha identificado un patrón recurrente de desplazamiento vertical en las filas intermedias de los cóncavos, particularmente entre los anillos “middle” y “upper”. Esta alteración en la posición relativa de los revestimientos genera una pérdida de la geometría interna de trituración, produce concentraciones anómalas de tensión y, en casos críticos, desencadena fracturas estructurales.

Fuentes especializadas como CSP Muhendislik y Australian Mining Services, explican que el compuesto de respaldo (backing) está diseñado precisamente para prevenir estas fallas, actuando como una capa de soporte que rellena los vacíos entre el revestimiento y la carcasa de la chancadora. Su función es distribuir las fuerzas y tensiones de manera uniforme, reduciendo la vibración y el riesgo de desgaste localizado y fallas estructurales.

La hipótesis técnica formulada plantea que dicho desplazamiento ocurre como resultado de fallas en el proceso de instalación, principalmente por la pérdida de adherencia entre el backing y el casco de la chancadora, así como por inadecuado control de separación (gaps) entre cóncavos. La falta de supervisión metrológica durante el montaje, junto con condiciones operativas agresivas, acelera este fenómeno.

Figura 31.

Desplazamiento vertical de un cóncavo intermedio



Nota. Unidad minera de referencia.

El modo de falla se presenta como:

- Incremento de separación entre Lower–Middle.
- Disminución simultánea de separación Middle–Upper.
- Hundimiento parcial del revestimiento.
- Pérdida de contacto de base, lo que implica despegue del backing.

El portal especializado Auscbgroup.com.au confirma que una instalación incorrecta de los revestimientos es una de las causas principales de fallas prematuras, ya que provoca una distribución desigual de la tensión, acortando la vida útil del revestimiento y aumentando el riesgo de fractura.

Figura 32.

Australian crushing and belting group



Nota. Unidad minera de referencia.

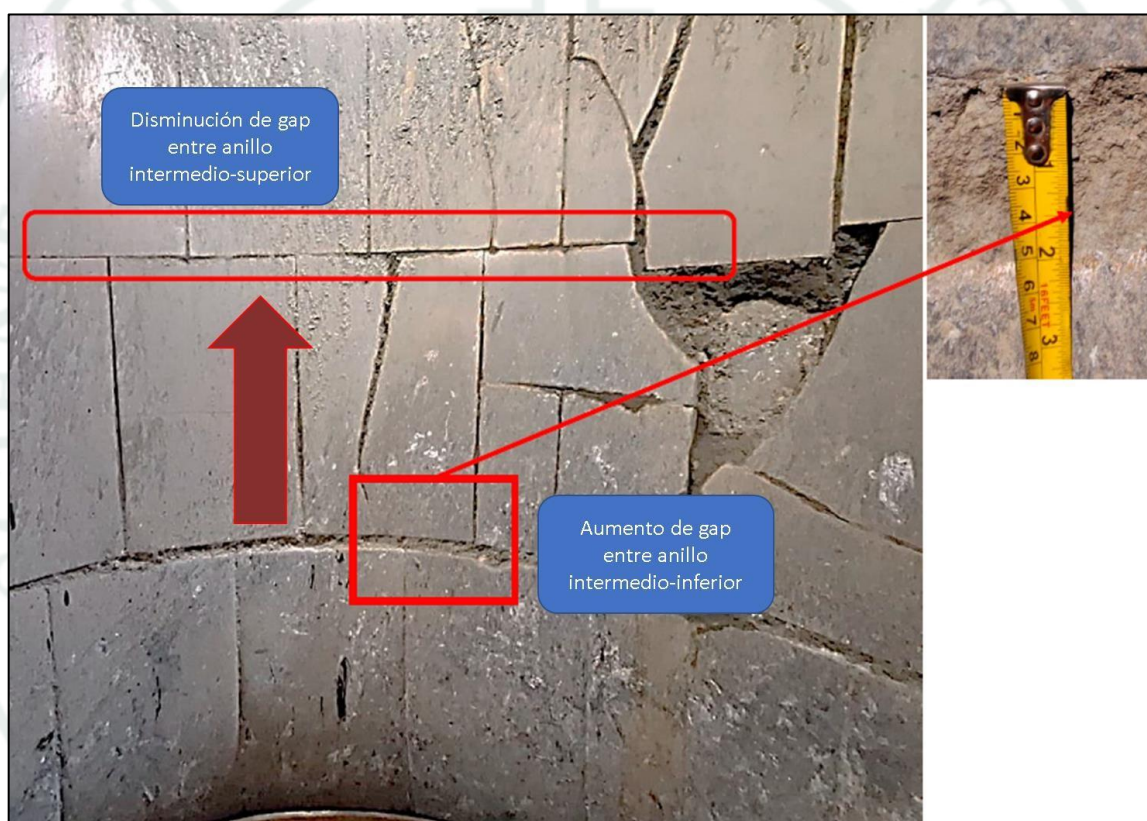
De acuerdo con reportes de campo que datan de julio 2024, se observó desplazamiento vertical en al menos dos eventos críticos (29/04/2024 y 29/06/2024). En

estas inspecciones post-falla, los cóncavos intermedios aparecían elevados respecto a la línea de instalación original. Esta condición generó pérdida de contacto efectivo con el backing, exposición de bordes y acumulación de tensiones residuales.

Una observación crítica fue la reducción o desaparición del espacio entre el anillo intermedio y el superior, junto con un aumento del gap en la parte inferior. Esta redistribución no planificada de fuerzas puede interpretarse como un colapso parcial del cóncavo por empuje vertical desde la zona de impacto.

Figura 33.

Variaciones en el gap



Nota. Unidad minera de referencia.

Este comportamiento se explica por una combinación de fallas en el montaje y pérdida progresiva de adherencia estructural. Las posibles causas del desplazamiento vertical son:

- Curado incompleto o backing contaminado, que no logra anclar adecuadamente los revestimientos.
- Falta de control de separaciones (gaps) entre cóncavos durante el armado, generando zonas de esfuerzo no uniformes.

- Ausencia de procedimientos de inspección post-curado, como escaneo o verificación por galgas.
- Carga operativa excesiva, incluyendo presencia de inchancables y mineral de alta dureza.
- Falta de control de torque en las cuñas y sistemas de anclaje.
- Adicionalmente, una fuente de la industria como Auscb group añade como causa crítica el uso de backing expirado. Señala que, con el tiempo, el compuesto puede deteriorarse y perder su integridad estructural, resultando en un soporte inadecuado para los revestimientos, lo que puede provocar grietas en el material de respaldo y daños a la propia chancadora.

Estas condiciones aparecen combinadas en los eventos documentados, especialmente en campañas ejecutadas por contratistas sin protocolos QA/QC estandarizados.

El desplazamiento vertical de cóncavos no debe analizarse de forma aislada, sino como una consecuencia interrelacionada dentro de un sistema de fallas que involucra causas técnicas, de proceso y operativas. Al construir una estructura jerárquica de causa-efecto, se identifican relaciones directas entre el desplazamiento y fallas previas vinculadas al material de respaldo (backing), su aplicación y su preparación. Tal como se presenta en la figura previa, el desplazamiento de cóncavos aparece como una de las dos manifestaciones críticas originadas por una falla del backing, compartiendo origen con el fenómeno de contaminación del respaldo epóxico. A su vez, ambas condiciones derivan de causas más profundas: tiempos de curado inadecuados, fallas en el almacenamiento previo al uso, y en la raíz del problema, el incumplimiento de los procedimientos establecidos en la ficha técnica del producto.

Este tipo de visualización permite comprender que el desplazamiento vertical no es un evento puntual, sino una respuesta estructural a fallas sistémicas de proceso. Por tanto, su mitigación requiere una estrategia que actúe en el origen del problema: asegurar la calidad del backing desde su almacenamiento hasta su curado final, con parámetros estrictos de control de proceso, ambiente y ejecución.

Esta dependencia del backing se fundamenta en la evolución histórica de la tecnología de chancado. La patente estadounidense US2970775A detalla que los backing's modernos de resina epoxi termoestable fueron desarrollados para corregir las fallas de los métodos anteriores que utilizaban zinc fundido. Dicha patente explica que el zinc, al ser vertido, se solidificaba de manera desigual, creando vacíos y sufriendo una contracción

sustancial que impedía un soporte completo. Bajo el constante impacto de la operación, este respaldo de zinc se pulverizaba y dejaba de cumplir su función. En contraste, la resina epoxi fue diseñada para llenar completamente la cavidad, ofrecer estabilidad dimensional (mínima contracción) y proporcionar un soporte total y eficiente durante toda la vida útil del revestimiento, actuando además como un amortiguador de impactos.

La hipótesis del desplazamiento vertical de los cóncavos se valida con evidencia empírica, visual y documental. Este fenómeno representa una condición crítica dentro del sistema de revestimiento, pues actúa como precursor directo de la fractura estructural, incluso en presencia de cóncavos nuevos o de buena calidad. En este sentido, la literatura técnica de fabricantes como Copps Industries refuerza esta conclusión, al afirmar que, si los revestimientos de la chancadora no están debidamente soportados por el backing, las fuerzas extremas de trituración y el impacto generado durante las operaciones pueden causar la falla prematura de estos componentes de desgaste.

3.1.9.2 Backing con propiedades mecánica fuera de rango

Uno de los modos de falla recurrentes observados en la chancadora primaria de la unidad minera de referencia ha sido la fractura de cóncavos causada por backing contaminado o defectuoso. El backing (material epóxico termoestable) cumple un rol estructural fundamental: transfiere las cargas de chancado desde los revestimientos metálicos al cuerpo del equipo. Su calidad es crítica para mantener la integridad mecánica del sistema.

Durante las campañas de mantenimiento analizadas, se observaron múltiples eventos donde el backing presentaba apariencia blanquecina, textura porosa, fragilidad al impacto y pérdida de adherencia, lo que sugiere una alteración en sus propiedades mecánicas, posiblemente debido a contaminación, curado incompleto o deficiencias en el proceso de mezcla y vaciado.

Figura 34.

Backing epóxico con textura quebradiza y coloración atípica



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura N° 34 evidencia un patrón común en los eventos de fractura: el respaldo epóxico no logra mantener su cohesión, presentando zonas grises blanquecinas, roturas en superficie, y separación entre backing y el cóncavo, lo que indica pérdida total de soporte estructural.

El backing es un compuesto bicomponente que requiere condiciones precisas de mezcla, vertido y curado. Su resistencia final depende de factores como la proporción de mezcla, tiempo de vida útil, temperatura ambiente, y la ausencia de contaminantes (humedad, polvo metálico, grasa residual, entre otros). Las condiciones adversas pueden alterar completamente su comportamiento, generando:

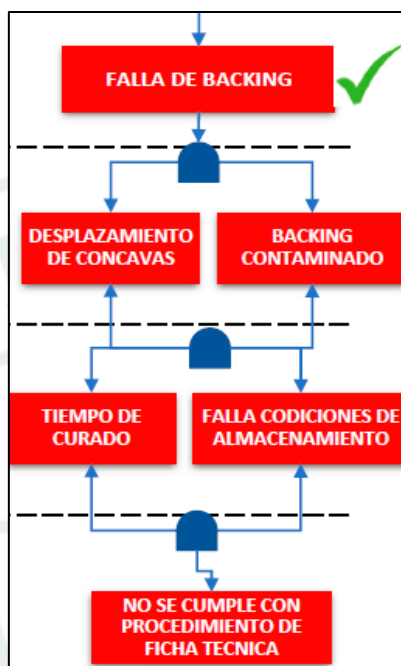
- Fallas de adherencia al cóncavo o al casco.
- Fragilidad a compresión e impacto.
- Formación de cámaras de aire internas.
- Separación posterior a vibraciones o ciclos térmicos.

En los casos analizados, estos síntomas fueron comunes en cóncavos intermedios y superiores, sugiriendo una deficiencia sistémica en el control de calidad del respaldo.

El backing contaminado no es un fenómeno aislado, sino que forma parte de una cadena causal que agrupa fallas técnicas, humanas y de procedimiento. En el siguiente diagrama, se observa cómo la falla del backing es consecuencia directa de errores en curado, almacenamiento y falta de cumplimiento de ficha técnica como pasaba con el desplazamiento de cóncavos analizado anteriormente.

Figura 35.

Estructura jerárquica de causas asociadas a la falla del backing



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura N° 35 confirma que el backing contaminado es una causa técnica inmediata, pero con raíces en deficiencias organizacionales, como el incumplimiento de estándares de mezcla y almacenamiento.

A modo de contraste, en operaciones de referencia como se cuentan con procesos de cambio de cóncavos presentes en la web a otras empresas mineras, y se denota que, los procedimientos de montaje de cóncavos exigen en su mayoría:

- Precalentamiento controlado del backing.
- Registro obligatorio de temperatura ambiente y del componente.
- Vaciado continuo sin interrupciones.
- Checklist de mezcla y curado supervisado por QA/QC.

Estos pasos están formalizados en sus respectivos PETS y permiten garantizar la resistencia mínima del respaldo. En cambio, en las campañas donde se registraron fallas, no se cuenta con evidencia de que estas condiciones hayan sido controladas.

Figura 36.

Vaciado del backing en condiciones sin monitoreo visible



Nota. Unidad minera de referencia.

La parte izquierda de la Figura N° 36 muestra un esquema del proceso de vaciado de la resina epóxica entre los cóncavos y el casco. Mientras que, a la derecha se observa la intervención real durante el montaje, donde se evidencia la ausencia de instrumentos de control de temperatura, registros de mezcla o supervisión visible del proceso. Esta ejecución representa una brecha frente a los procedimientos documentados en operaciones como Cerro Verde o Hudbay, donde estos parámetros son obligatorios.

3.1.9.3 Tiempos de curado de backing inefficientes

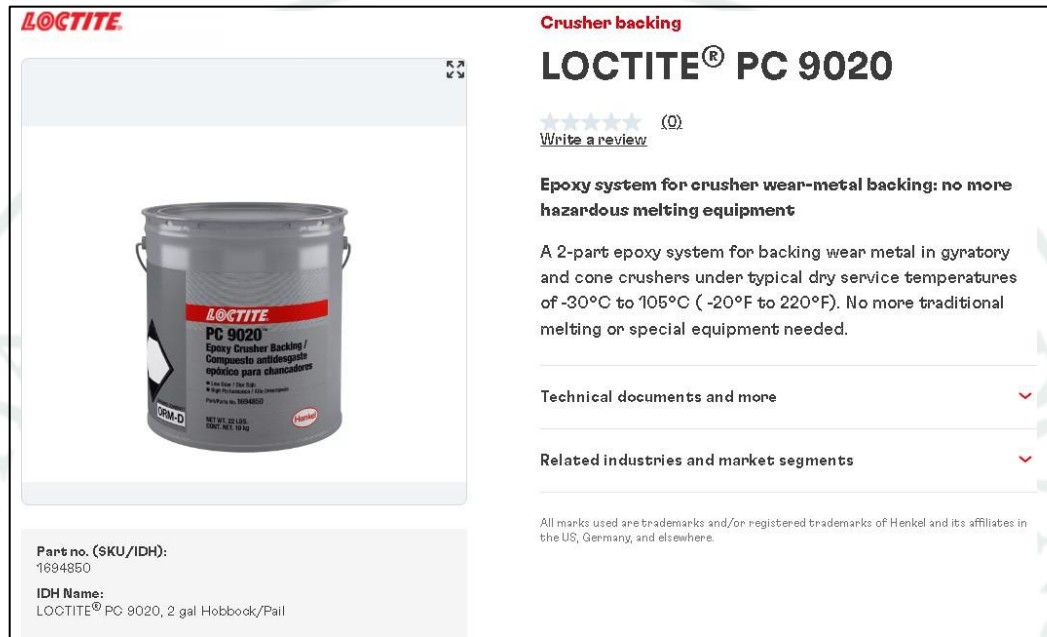
Una de las hipótesis técnicas más críticas asociadas a la fractura de cóncavos en la chancadora primaria Traylor NT 60" x 113" es el tiempo de curado insuficiente del backing epóxico. Este componente, aplicado como soporte estructural entre el casco y los cóncavos, cumple una función esencial: garantizar el asiento rígido, la transferencia de carga y la disipación de energía durante el proceso de chancado. Si no se logra un curado completo y conforme a especificaciones, la resistencia mecánica se reduce drásticamente, favoreciendo desplazamientos, fracturas y desgaste prematuro.

Según la hoja técnica del respaldo epóxico LOCTITE PC 9020, ampliamente utilizado en la industria minera para respaldar cóncavos y mantos en chancadoras giratorias, el tiempo mínimo requerido para lograr resistencia funcional es de 8 horas a una temperatura constante de 22 grados Celsius. Este producto alcanza su curado completo en 24 horas bajo estas condiciones. Se especifica además que el producto no debe ser aplicado si la temperatura ambiente está por debajo de los 13 °C, ya que esto inhibe la reacción de

polimerización y reduce drásticamente la resistencia mecánica del compuesto. Además, el producto tiene una resistencia a la compresión de 110 MPa y una resistencia a la tracción de 10 MPa al final del proceso de curado.

Figura 37.

Backing epóxico LOCTITE PC 9020



Nota. Fabricante epóxico Henkel.

En campo, sin embargo, se ha detectado que no se realiza un control térmico ni se lleva registro de temperatura ambiente o del propio backing durante el proceso de curado, lo que impide validar si efectivamente se alcanzó la resistencia especificada por el fabricante. Adicionalmente, en operaciones de altura como en la unidad minera de referencia, las temperaturas ambientes durante trabajos nocturnos o en sombra pueden descender por debajo de 10 grados Celsius, lo que invalidaría el curado sin que el personal de supervisión lo advierta.

Figura 38.

Hundimiento y fractura en cóncavo sin respaldo estructural



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura N° 38 muestra un caso crítico en el cual el cóncavo inferior ha colapsado verticalmente, dejando en evidencia la falta del material de respaldo en la zona afectada. Se observa una fractura pronunciada en el área de asentamiento, lo que indica una ausencia total o parcial del soporte epóxico, posiblemente por un curado deficiente o incluso por no haber sido vaciado. La fractura inicia en la base del cóncavo y se extiende hacia zonas laterales, lo cual es típico en fallas por impacto repetitivo sin absorción de carga. La superficie del contacto está irregular, con decoloración que indica ingreso de contaminantes.

La hipótesis de curado insuficiente del backing encuentra respaldo en múltiples eventos operativos. En los reportes técnicos se ha evidenciado que los cóncavos mal curados se desplazan verticalmente pocos días después de la puesta en marcha, generando separaciones entre filas de revestimientos que comprometen la integridad de toda la cámara de chancado. En estos casos se ha observado también el ingreso de finos, agua y magnetita hacia el espacio entre el casco y el revestimiento, lo cual acelera el daño. Además, se ha identificado que el procedimiento actual de aplicación y curado del backing no contempla registro de temperatura, humedad ni validación mecánica posterior al curado, lo cual impide verificar su efectividad.

De acuerdo con las especificaciones de Loctite PC 9020 y Copps BA-1000, los parámetros críticos para asegurar un curado adecuado son los siguientes:

- Temperatura ambiente mínima: 21 a 25 grados Celsius
- Tiempo mínimo de curado antes de carga: 8 horas a 22 grados Celsius
- Tiempo total para curado completo: 24 horas
- No aplicar si la temperatura es menor a 13 grados Celsius
- Humedad relativa máxima recomendada: 70 por ciento
- Monitoreo obligatorio durante las primeras 2 horas

En la práctica minera, sin embargo, no se cuenta con sistemas de control térmico ni con trazabilidad sobre condiciones ambientales durante el curado, lo cual refuerza esta hipótesis como una de las más plausibles para explicar la falla.

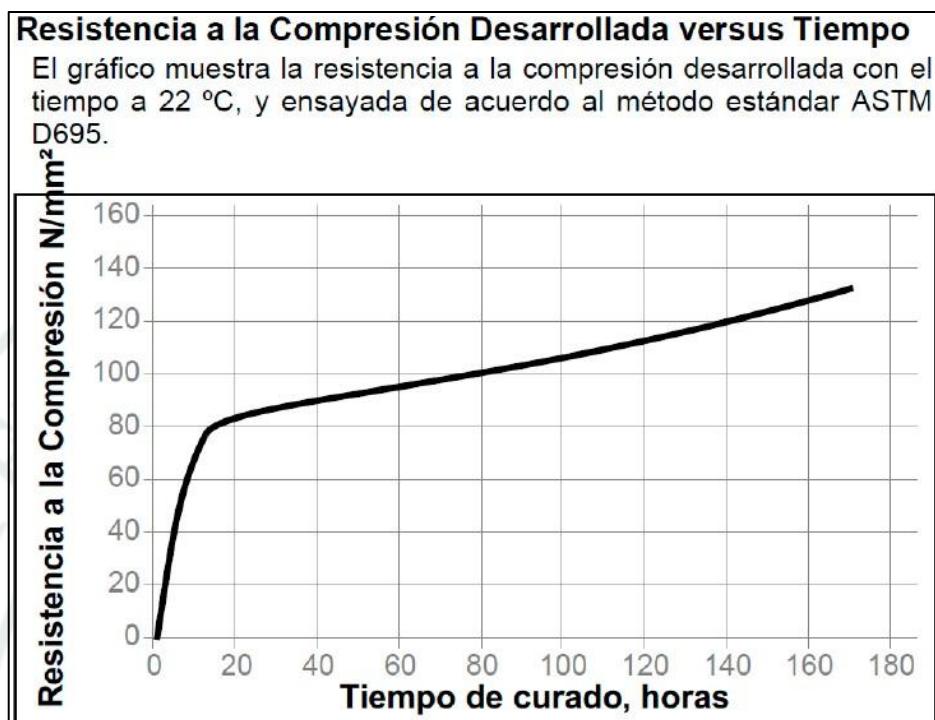
Cuando el backing no alcanza su resistencia óptima, se presentan los siguientes efectos:

- Desplazamiento vertical del cóncavo inferior
- Pérdida de alineación entre filas de cóncavos
- Generación de espacios irregulares que favorecen impactos laterales
- Fisuración por fatiga en zonas sin soporte
- Ingreso de contaminantes abrasivos entre superficies de contacto
- Fractura prematura de segmentos intermedios

De acuerdo con los ensayos normalizados ASTM D695 para resistencia a la compresión y ISO 4587 para resistencia a cortadura, el respaldo epóxico presenta un comportamiento altamente dependiente de la temperatura de curado. A 22 °C, se alcanza aproximadamente el 80 % de la resistencia total a la compresión en un periodo de 8 horas, completando su curado en 24 horas.

Figura 39.

Gráfico de resistencia a la compresión vs tiempo

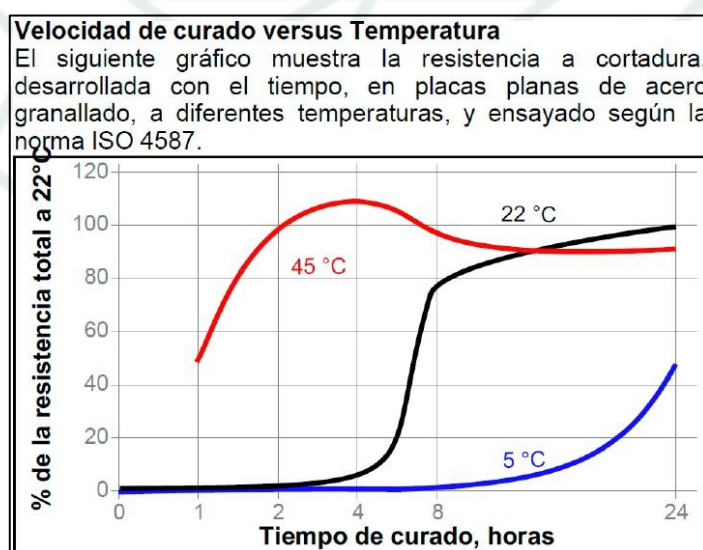


Nota. Fabricante epóxico Henkel.

Cuando la temperatura se eleva a 45 °C, el tiempo para alcanzar la resistencia óptima se reduce drásticamente, mientras que a temperaturas de 5 °C el desarrollo de resistencia se ve severamente ralentizado, requiriendo más de 24 horas para lograr niveles comparables.

Figura 40.

Gráfico de velocidad de curado vs temperatura

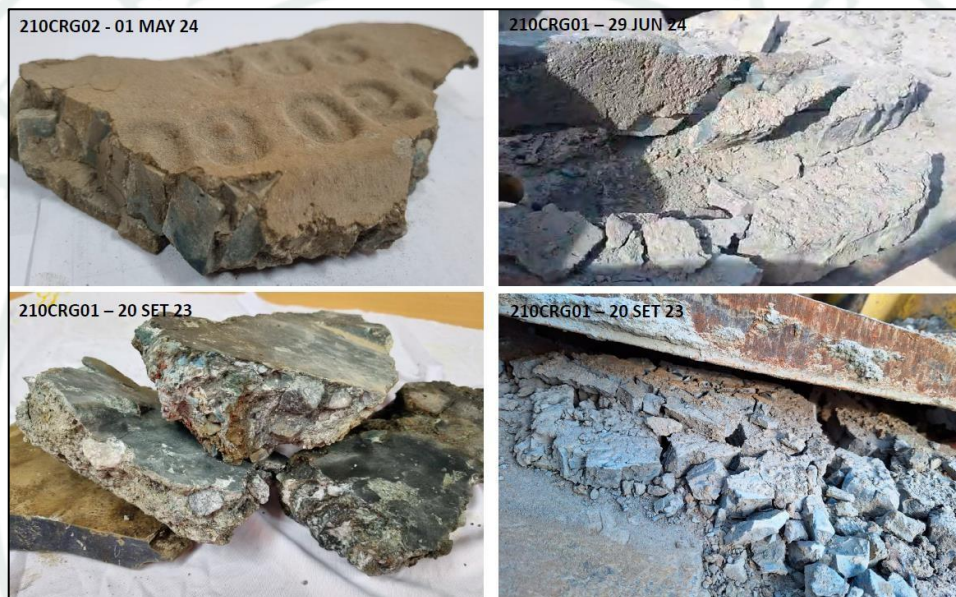


Nota. Fabricante epóxico Henkel.

Estos datos confirman que trabajar a temperaturas por debajo de las recomendadas por el fabricante compromete el desempeño mecánico inicial del respaldo, aumentando el riesgo de desplazamientos y fisuras prematuras en los cóncavos. En las operaciones de altura de la unidad minera de referencia, donde las temperaturas nocturnas pueden descender bajo los 10 °C, la ausencia de control térmico incrementa significativamente la probabilidad de un curado ineficiente.

Figura 41.

Muestras de backing



Nota. Unidad minera de referencia.

La figura 41 muestra que el informe de campo de la unidad minera de referencia es contundente y presenta evidencia física que respalda la hipótesis del curado deficiente. En todos los eventos de fractura se encontró que el backing estaba "contaminado, frágil, con una coloración blanquecina y quebradiza", lo cual indica una reacción química incompleta y una baja resistencia al impacto y la compresión.

Crucialmente, la información obtenida de campo confirma que no existen registros de las temperaturas alcanzadas durante la preparación y curado del backing, lo que impide validar si se alcanzó la resistencia especificada por el fabricante. Esta ausencia de controles documentados es un factor determinante en la recurrencia de la falla.

Una revisión del Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro (PETS) oficial para el cambio de cóncavos en la unidad minera de referencia revela una conciencia parcial del problema de la temperatura. La lista de materiales incluye un "Calentador para los baldes de

Backing", lo que indica que se reconoce la necesidad de calentar el compuesto. Este método, conocido como "baño maría", se ha documentado en informes de otros emplazamientos mineros donde se registran las temperaturas de la mezcla antes del vertido, demostrando un nivel de control del proceso. Mientras que, el PETS de la unidad minera de referencia presenta una omisión crítica: mientras describe la preparación y el vertido, carece de cualquier instrucción para monitorear, controlar o registrar la temperatura durante la fase de curado de varias horas. Este lapso es el período más crítico donde la reacción de polimerización debe mantenerse dentro de su ventana térmica para tener éxito. En la Tabla 30 se cuantifica esta relación crítica, traduciendo los datos del gráfico a implicaciones operacionales directas para la mina.

Tabla 30

Variación de los parámetros físicos

Temperatura de Curado	Tiempo de Curado (Horas)	% de Resistencia Total Alcanzada (vs. 22°C)	Resistencia a la Compresión Estimada (N/mm²)	Implicación Operacional
5 °C	8	~20%	~26	Falla catastrófica inminente. El material no tiene integridad estructural.
5 °C	24	~55%	~73	Críticamente insuficiente. Incapaz de soportar cargas operativas, alto riesgo de fractura prematura del backing y desplazamiento del cóncavo.
22 °C (Óptima)	8	~80%	~106	Resistencia funcional alcanzada. El equipo puede volver a operar de forma segura según el diseño del fabricante.
45 °C	4	~90%	~119	Curado acelerado, permite un retorno al servicio más rápido si es necesario, pero

requiere un control
estricto del tiempo de
trabajo.

Nota. Elaboración propia.



La Tabla 30 demuestra que la falta de control de temperatura durante el almacenamiento y la aplicación del backing es la causa directa de que el material se instale en un estado químicamente incompleto y mecánicamente deficiente. La práctica de pre-acondicionar los baldes de backing mediante calentadores o "baño maría" es un paso de control de calidad esencial para revertir la cristalización y asegurar que el material esté dentro de su ventana de aplicación de 15 °C a 65 °C.⁶ La ausencia de este procedimiento en la unidad minera de referencia resulta en una aplicación con resultados deficientes.

La hipótesis del curado insuficiente del backing se sustenta en evidencia técnica, imágenes de campo, análisis de propiedades fisicoquímicas y en la ausencia de controles documentados en el proceso actual. La implementación de procedimientos de verificación térmica y mecánica post-curado es esencial para garantizar la confiabilidad del montaje y evitar daños estructurales tempranos.

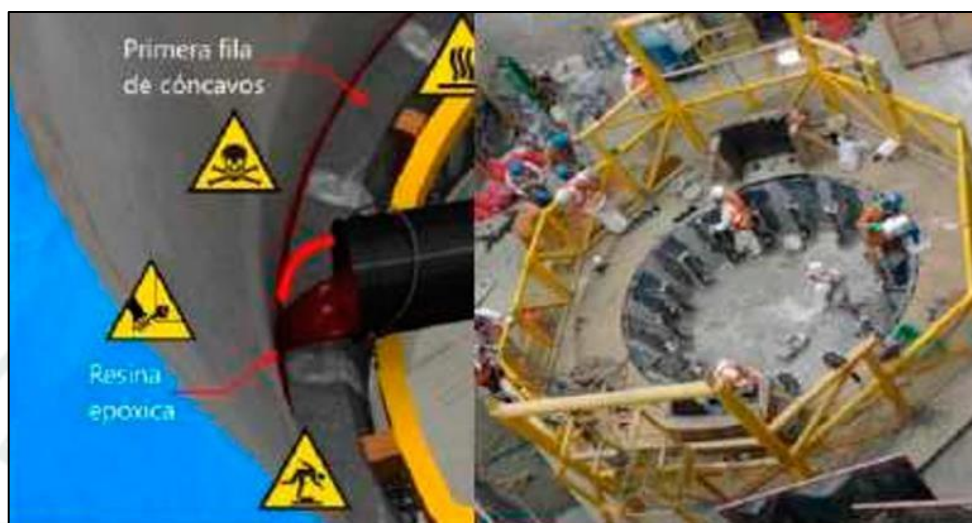
3.1.9.4 Deficiente servicio de tercerizado

La hipótesis plantea que la fractura recurrente de cóncavos podría estar vinculada a la subcontratación del servicio de cambio de revestimientos sin la debida implementación de controles QA/QC (Aseguramiento y Control de Calidad). La ausencia de estos mecanismos puede permitir que variables críticas, como preparación del respaldo epóxico, alineación de cóncavos, precarga de cuñas y control de tiempos de curado, se gestionen sin trazabilidad ni evidencias documentadas.

En procedimientos industriales de referencia, el montaje de cóncavos por terceros incluye un plan de inspección y ensayo (ITP) con hitos de verificación obligatorios, supervisión continua por personal QA/QC de la mina, y entrega de un dossier técnico que contiene fotografías, registros de torque, temperaturas y certificados de materiales. La falta de estos requisitos puede derivar en vaciados incompletos, errores de montaje y curados deficientes que no son detectados a tiempo.

Figura 42.

Secuencia de montaje sin presencia de instrumentos QA/QC



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura N° 42 muestra al personal realizando el vaciado del backing y posicionamiento de cóncavos sin indicadores visibles de control de temperatura, registro de mezcla o uso de checklists. No se evidencian termómetros de superficie ni medidores de humedad, lo cual representa una brecha frente a las mejores prácticas. En el esquema se resaltan puntos críticos como el derrame de resina, la exposición de operarios a vapores y la falta de aislamiento térmico, todos factores que pueden comprometer la calidad del respaldo.

La tercerización del montaje introduce un factor humano adicional: el personal no siempre cuenta con experiencia específica en el modelo de chancadora y sus tolerancias mecánicas. Esto se agrava si la contratación se orienta únicamente al costo y no a la certificación técnica del proveedor. En la revisión del ACR se identificó que, en varias campañas, no existió un procedimiento formal de verificación cruzada por parte del QA/QC de la mina, permitiendo que fallas en la mezcla del epóxico, limpieza de superficies y ajuste de cuñas pasaran desapercibidas.

En aplicaciones críticas de chancado primario, la supervisión QA/QC debería incluir:

- Checklists firmados por el supervisor de calidad y el contratista.
- Registros de temperatura ambiente y de superficies antes y durante el vaciado
- Ensayos de dureza del respaldo antes de poner en carga el equipo.
- Evidencia fotográfica de cada etapa del montaje.
- Certificados de lote del epóxico y trazabilidad de su uso.

Estos requerimientos están contemplados en las normas internas de grandes operaciones mineras y en lineamientos del fabricante de backing, como Henkel (Loctite PC 9020), que especifica condiciones de aplicación y verificación obligatoria para garantizar el rendimiento.

Consecuencias de la ausencia de QA/QC

- Montajes fuera de tolerancia que generan gaps irregulares.
- Respaldo con resistencia mecánica inferior a la de diseño.
- Desplazamientos prematuros de cóncavos por falta de adherencia.
- Pérdida de vida útil de los revestimientos y aumento de paradas no programadas.
- Incremento del riesgo de accidentes por desprendimiento súbito de piezas.

Figura 43.

Registro de campañas de instalación de cóncavos

CHANCADOR PRIMARIO N° 01						
Cóncavas	Inicio Op.	Fin Op.	N° meses	M-Ton	CONDICION	INSTALADO POR:
Campaña 1	14-Oct-15	21-Jul-16	9.4	14.30	NORMAL	FLSmidth
Campaña 2	21-Jul-16	03-Mar-17	7.4	15.80	NORMAL	FLSmidth
Campaña 3	03-Mar-17	13-Aug-17	5.4	12.10	NORMAL	FLSmidth
Campaña 4	14-Aug-17	04-Apr-18	7.8	17.40	NORMAL	FLSmidth
Campaña 5	10-Apr-18	16-Feb-19	10.4	21.68	NORMAL	FLSmidth
Campaña 6	19-Feb-19	02-Apr-20	13.5	30.00	NORMAL	FLSmidth
Campaña 7	02-Apr-20	16-Apr-21	12.6	26.89	NORMAL	FLSmidth
Campaña 8	16-Apr-21	4/09/2022	16.9	32.18	NORMAL	FLSmidth
Campaña 9	05-Sep-22	21/09/2023	12.7	29.09	FRACTURADO	FH INGENIEROS
Campaña 10	21-Sep-23	29/06/2024	9.4	21.18	FRACTURADO	FH INGENIEROS
Campaña 11	02-Jul-24	continua ...	9.4	21.18	Observaciones en Lower	SINAR

Fuente. Unidad minera de referencia.

De la figura 43 se interpreta que en la Chancadora Primaria N° 01 se identifican 11 campañas desde octubre de 2015 hasta julio de 2024. Las primeras ocho campañas, ejecutadas por FLSmidth, alcanzaron duraciones operativas que oscilaron entre 5,4 y 16,9 meses, con tonelajes procesados entre 12,1 y 32,18 Mton, todas concluyendo con condición “NORMAL”. A partir de la Campaña 9, con la intervención de FH Ingenieros, se observa una reducción notable en la duración operativa, especialmente en la Campaña 10 (9,4 meses y 21,18 Mton), ambas marcadas como “FRACTURADO”. Esta disminución de vida útil respecto a campañas previas, combinada con la repetición del modo de falla en dos intervenciones consecutivas, sugiere deficiencias en el control de calidad del montaje, posiblemente relacionadas con tiempos de curado inadecuados del backing epóxico, ajustes inexactos de cuñas o insuficiente supervisión QA/QC. El cambio de proveedor a SINAR en

la Campaña 11 aún está en curso, lo que representa una oportunidad para validar si la implementación de controles rigurosos mejora la durabilidad.

Figura 44.

Registro de campañas de instalación de cóncavos

CHANCADOR PRIMARIO N° 02						
Cóncavas	Inicio Op.	Fin Op.	N° meses	M-Ton	CONDICION	INSTALADO POR:
Campaña 1	14-Oct-15	15-Jun-16	8.2	10.90	NORMAL	FLSmidt
Campaña 2	15-Jun-16	05-Feb-17	7.8	12.92	NORMAL	FLSmidt
Campaña 3	05-Feb-17	05-Jul-17	5.0	11.14	NORMAL	FLSmidt
Campaña 4	05-Jul-17	01-Feb-18	7.1	15.70	NORMAL	FLSmidt
Campaña 5	04-Feb-18	12-Sep-18	7.3	15.56	NORMAL	FLSmidt
Campaña 6	12-Sep-18	03-Sep-19	11.7	25.09	NORMAL	FLSmidt
Campaña 7	02-Sep-19	09-Feb-21	17.5	32.09	NORMAL	FLSmidt
Campaña 8	11-Feb-21	17/04/2022	14.3	29.24	NORMAL	FLSmidt
Campaña 9	17-Apr-22	7/10/2023	17.9	37.42	FRACTURADO	FH INGENIEROS
Campaña 10	07-Oct-23	29/04/2024	6.9	15.73	FRACTURADO	FH INGENIEROS
Campaña 11	01-May-24	continua ...			Observaciones en Lower	DIMARZA & FH

Nota. Unidad minera de referencia.

En la figura 44 se indica que en la Chancadora Primaria N° 02 se registran 11 campañas desde octubre de 2015 hasta mayo de 2024. Las ocho primeras, a cargo de FLSmidt, presentan duraciones que van de 5 a 17,5 meses y tonelajes entre 11,14 y 32,09 Mton, todas con condición “NORMAL”. La Campaña 9, ejecutada por FH Ingenieros, alcanzó 17,9 meses y 37,42 Mton, pero finalizó con condición “FRACTURADO”, lo que indica que, aunque el rendimiento en tonelaje fue elevado, existieron fallas estructurales prematuras. La Campaña 10, también de FH Ingenieros, mostró una drástica reducción en duración (6,9 meses) y tonelaje (15,73 Mton), repitiendo el modo de falla “FRACTURADO”. La alta variabilidad entre campañas consecutivas con el mismo contratista apunta a una posible inconsistencia en los procedimientos de instalación, en especial en la aplicación y curado del respaldo epóxico, así como en la verificación dimensional y ajuste de cóncavos. La Campaña 11, realizada por DIMARZA & FH, se encuentra en ejecución, representando un caso de interés para evaluar si la colaboración entre contratistas logra mitigar los problemas observados.

La reducción en la durabilidad de las campañas ejecutadas por FH Ingenieros sugiere posibles fallas en:

- Preparación y curado del respaldo epóxico.
- Control dimensional y de alineación de cóncavos.
- Trazabilidad de torque en elementos de sujeción.
- Monitoreo de temperaturas y humedad durante el montaje.

Esta reducción en la vida útil no es solo un problema técnico, sino un golpe financiero directo. Considerando estudios de la industria que estiman el costo de oportunidad por parada de una chancadora primaria en aproximadamente \$6,650 USD por hora, las fallas prematuras y las paradas no programadas para reemplazos urgentes representan una pérdida económica sustancial para la unidad minera de referencia.

Existe una aparente tensión entre dos objetivos corporativos legítimos de la unidad minera de referencia: por un lado, la necesidad de garantizar la máxima confiabilidad operacional y, por otro, el compromiso con el desarrollo económico local a través de la contratación de empresas de la región.

El Informe de Sostenibilidad 2023 de la unidad minera de referencia destaca un esfuerzo significativo y loable para aumentar la participación de proveedores locales.³⁶ Los datos cuantitativos son claros:

- El gasto en proveedores locales de las provincias de Cotabambas y Grau aumentó un 57%, pasando de 64.6 millones de USD en 2022 a 101.5 millones de USD en 2023.
- El número de empresas locales contratadas directamente casi se triplicó, pasando de 96 en 2022 a 281 en 2023.

Si bien esta estrategia es fundamental para la licencia social para operar de la mina, su implementación debe ser cuidadosamente gestionada para no comprometer la excelencia técnica en áreas críticas. La secuencia de eventos, un cambio de un OEM global a contratistas locales, seguido inmediatamente por una serie de fallas operativas costosas, sugiere que la presión para cumplir con las metas de compras locales puede haber influido en la selección de proveedores para un servicio que exige un nivel de especialización de clase mundial.

Esto no implica que los contratistas locales sean inherentemente incapaces. Más bien, apunta a una falla en el sistema de adquisiciones y gestión de contratos. El sistema actual podría no diferenciar adecuadamente entre servicios generales (donde la preferencia local es más fácil de aplicar) y servicios altamente especializados y de alto riesgo. Para estos últimos, los criterios de selección primarios deben ser la competencia técnica demostrada, la certificación específica del OEM y un historial de rendimiento verificable, independientemente del origen del contratista. La solución no es abandonar el apoyo a las empresas locales, sino desarrollar un marco de contratación más sofisticado y de dos niveles que equilibre los objetivos sociales con los imperativos de confiabilidad operacional.

3.1.9.5 Condiciones inadecuadas de almacenamiento

El respaldo epóxico (backing) es un material de dos componentes que requiere condiciones estrictas de almacenamiento para mantener sus propiedades químicas y mecánicas. Cuando es almacenado en ambientes con alta humedad, temperaturas extremas o exposición prolongada a la radiación solar, puede sufrir degradación prematura. Esta degradación se traduce en pérdida de viscosidad controlada, formación de grumos, polimerización parcial y reducción de su capacidad de adhesión y resistencia a la compresión.

Según el fabricante Henkel, el compuesto Loctite PC 9020 debe almacenarse entre 10 y 27 °C, en envases herméticamente cerrados, en lugares secos y protegidos de la luz solar directa. Su vida útil bajo estas condiciones es de 12 meses desde la fecha de fabricación. La exposición a temperaturas por encima de 35 °C o por debajo de 5 °C puede alterar el tiempo de curado, disminuir la resistencia final y provocar separación de componentes en el envase.

La tabla 31 consolida estos parámetros críticos, estableciendo la línea base de calidad contra la cual se deben evaluar las prácticas en la unidad minera.

Tabla 31*Parámetros críticos de almacenamiento*

Parámetro	Rango Óptimo	Límite Crítico	Consecuencia de la Desviación
Temperatura de Almacenamiento	8 °C a 21 °C	< 8 °C o > 28 °C	Cristalización de la resina, aumento de viscosidad, polimerización prematura, reducción de vida útil. Contaminación por agua, curado
Humedad Relativa	Lugar seco, envase hermético	Exposición a alta humedad, envases abiertos	incompleto, propiedades mecánicas reducidas (fragilidad). Degradación química de los componentes, pérdida de reactividad, curado impredecible y deficiente.
Vida Útil (Shelf Life)	12 meses desde fabricación	> 12 meses	Viscosidad excesiva (mezcla y vertido deficientes) o tiempo de trabajo muy corto (curado prematuro). Tiempo insuficiente para verter correctamente, riesgo de solidificación durante la aplicación.
Temperatura de Aplicación	15 °C a 65 °C (producto y sustrato)	< 15 °C o > 65 °C	Tiempo de curado prolongado, riesgo de puesta en servicio del equipo con el backing sin la resistencia necesaria.
Tiempo de Trabajo (Pot Life)	25 minutos a 25 °C	Temperatura elevada	Resistencia final significativamente menor, incapacidad para soportar las cargas de chancado.
Tiempo de Curado Funcional	8 horas a 22 °C para alcanzar ~80% de resistencia	Temperaturas bajas	
Resistencia a la Compresión Final	132 N/mm ² (19,145 psi)	Curado a baja temperatura o con contaminación	

Nota. Elaboración propia.

En las inspecciones documentadas por la unidad minera de referencia, se hallaron

envases de backing almacenados en depósitos sin control de temperatura ni humedad,



algunos directamente sobre el suelo, lo que aumenta el riesgo de absorción de humedad por condensación. También se evidenció material vencido y recipientes con tapas parcialmente abiertas, lo que permite el ingreso de polvo y contaminantes. Estas condiciones pueden producir reacciones de polimerización no controladas, que afectan la homogeneidad de la mezcla durante la instalación.

Figura 45.

Envases de backing almacenados sin control ambiental



Nota. Unidad minera de referencia.

En la Figura N° 45 se muestra baldes de compuesto epóxico almacenados en una zona abierta, expuestos a cambios bruscos de temperatura y a acumulación de polvo. No se observan estanterías elevadas ni aislamiento del piso, condiciones que incumplen las recomendaciones del fabricante. Un análisis detallado de esta imagen revela múltiples incumplimientos graves:

- Ausencia Total de Control Climático: Los baldes de compuesto epóxico se encuentran almacenados en una jaula metálica de malla abierta. Esta configuración expone los contenedores directamente a las condiciones ambientales del exterior, incluyendo las amplias fluctuaciones de temperatura diarias típicas de una operación minera de gran altitud, la radiación solar directa y la deposición de polvo y otros contaminantes aéreos. El informe de campo de la unidad minera de referencia confirma el hallazgo de "envases de backing almacenados en depósitos sin control de temperatura ni humedad".
- Contacto Directo con el Suelo: Los envases están apilados sobre un palet que reposa directamente sobre el suelo. Esta práctica, desaconsejada por expertos en almacenamiento de epóxicos, facilita la transferencia de frío desde el suelo hacia

los contenedores, especialmente durante las noches, lo que aumenta significativamente el riesgo de que la temperatura del producto caiga por debajo del umbral crítico de 8 °C, promoviendo la cristalización de la resina.⁷ Además, aumenta el riesgo de absorción de humedad por condensación.

- Sellado Inadecuado y Riesgo de Contaminación: El informe documenta "recipientes con tapas parcialmente abiertas". Esta condición anula la protección hermética del envase, permitiendo el ingreso de polvo y, más críticamente, de humedad atmosférica. La humedad es un agente contaminante que interfiere directamente en la reacción de polimerización, resultando en un curado incompleto y propiedades mecánicas deficientes.⁸
- Inexistencia de un Sistema de Inventario Organizado: La disposición desordenada de los baldes, apilados sin una clasificación visible por lote o fecha de fabricación, es una clara indicación de la ausencia de un sistema de gestión de inventario como FIFO. Esta falta de organización hace imposible garantizar que el material más antiguo se utilice primero, aumentando exponencialmente la probabilidad de utilizar producto vencido y químicamente degradado.

Figura 46.

Almacenamiento de envases de backing



Nota. Unidad minera de referencia.

En la figura 46 se observa que la degradación del backing por almacenamiento deficiente compromete directamente el desempeño del sistema de revestimientos, incluso si el proceso de mezcla y curado se ejecuta correctamente. Un compuesto con propiedades químicas alteradas presenta menor adhesión al casco y a los cóncavos, reduciendo su

capacidad para transferir cargas y absorber vibraciones. Esto se traduce en un mayor riesgo de desplazamiento vertical, generación de grietas y fracturas en zonas críticas.

Consecuencias de almacenamiento inadecuado

- Reducción de la vida útil del producto.
- Alteración del tiempo de curado y de la viscosidad óptima.
- Disminución de la resistencia mecánica final.
- Aumento de probabilidad de fallas prematuras en los cóncavos.
- Pérdida de trazabilidad y uso de material vencido.

En operaciones mineras externas de referencia, el almacenamiento de backing incluye control de temperatura mediante cámaras climatizadas, registro de lotes y fechas de vencimiento, y rotación FIFO (First In, First Out) para evitar uso de material vencido. Además, cada lote es inspeccionado antes de su uso para verificar que no haya signos de separación, endurecimiento parcial o contaminación. Obteniendo así un ordenamiento con los lotes más antiguos claramente identificados y posicionados para su uso prioritario. Cualquier material que esté vencido (más de 12 meses desde la fabricación), cuyos sellos estén comprometidos, o que muestre signos visibles de degradación (cristalización, grumos) debe ser segregado y dispuesto de acuerdo con las hojas de datos de seguridad del material (MSDS).

Las mejores prácticas incluyen:

- Almacenes Climatizados: Uso de sistemas HVAC para mantener una temperatura y humedad estables dentro de los rangos óptimos especificados por el fabricante.
- Estanterías Adecuadas: Almacenamiento de los productos en estanterías que los aíslan del contacto directo con el suelo.
- Sistemas de Trazabilidad: Implementación de un sistema de gestión de inventarios (como SAP) que controle los lotes y fechas de vencimiento, y que opere bajo el principio FIFO.
- Control y Registro: Monitoreo y registro continuo de las condiciones ambientales del almacén como parte integral del sistema de aseguramiento de la calidad (QA).

La ausencia de estas medidas en la unidad minera de referencia no representa un simple descuido, sino una falla sistémica en el proceso de gestión de materiales críticos. Las condiciones de almacenamiento observadas crean un entorno que garantiza la degradación del producto antes de su uso, predeterminando un resultado deficiente en la aplicación y, en última instancia, contribuyendo a la falla del equipo.

3.1.9.6 Falla operativa de sobrecarga

En el contexto de una chancadora primaria de gran capacidad como la Traylor NT 60" × 113", las condiciones de operación están directamente influenciadas por la naturaleza del mineral y la presencia de material no fragmentable. La sobrecarga mecánica producida por alimentación no controlada o la entrada de elementos inchancables incrementa exponencialmente las tensiones sobre los cóncavos, el backing y el mainshaft. Este fenómeno se ve agravado cuando el mineral presenta alta dureza y densidad, como en el caso de la magnetita, o cuando se produce la caída de fragmentos de roca de gran tamaño (bolonería) o piezas metálicas provenientes de procesos aguas arriba.

La magnetita, con una dureza Mohs aproximada de 5,5–6, y una densidad de hasta 5,2 t/m³, produce impactos de alta energía cinética que no solo aceleran el desgaste superficial de los revestimientos, sino que también generan esfuerzos puntuales que pueden fracturar secciones del cóncavo, especialmente si existe alguna debilidad previa en el respaldo epóxico. El impacto repetitivo contra zonas sin soporte adecuado produce microfisuras que evolucionan a fracturas completas.

En el caso de la bolonería, los fragmentos de gran tamaño (superiores a 1 m de diámetro y más de 3T de peso) generan cargas estáticas y dinámicas que exceden la capacidad de absorción del sistema. Un solo impacto de este tipo puede desencadenar desprendimientos, pérdida de alineación y deformación localizada del casco. La bolonería es particularmente crítica en chancadoras giratorias, ya que el diseño de la cámara permite que estas rocas grandes impacten directamente sobre los cóncavos inferiores, transmitiendo fuerzas que comprometen tanto al revestimiento como a la estructura portante.

Los inchancables metálicos (pernos, elementos de soporte de faja, partes de volquetes) constituyen otra amenaza operativa. Su resistencia al aplastamiento y su alta densidad provocan daños instantáneos y, en ocasiones, bloqueos totales de la cámara. En campañas anteriores, la unidad minera de referencia ha registrado eventos donde piezas metálicas de 30–50 kg causaron daños severos a los cóncavos, deformación del spider y desplazamiento vertical del conjunto.

La falla operativa por sobrecarga e impacto de mineral es un fenómeno multifactorial. Requiere la concurrencia de tres elementos: presencia de material de alta dureza o densidad, ausencia de filtrado efectivo en la etapa previa (scalping o parrillas) y deficiencias en la protección del sistema (detectores de metal, trampas de inchancables).

Consecuencias operativas

- Fractura inmediata de cóncavos en zona de impacto.
- Deformación localizada del casco y del spider.
- Pérdida de soporte del backing en la zona afectada.
- Detenciones no programadas prolongadas.
- Incremento de costos por cambio prematuro de revestimientos.

Los eventos de sobrecarga pueden clasificarse en función de la naturaleza de la fuerza aplicada:

- Sobrecarga por Compactación (Choking): Este fenómeno ocurre cuando la cámara de trituración se llena con material que, aunque es triturable, tiene una granulometría y una tasa de alimentación que impiden su flujo libre hacia la descarga. El material se compacta, aumentando drásticamente la densidad de la carga y la fricción interna. Esto provoca un aumento exponencial en la demanda de potencia del motor, que puede superar su capacidad nominal y activar las protecciones eléctricas, deteniendo la máquina.¹² Aunque no suele causar una fractura inmediata, el "choking" crónico somete a todo el tren de potencia, desde el motor hasta la excéntrica, a un estrés cíclico severo, acelerando la fatiga de los componentes.
- Sobrecarga por Impacto: Este es el tipo de sobrecarga más destructivo y relevante para la falla de los cóncavos. Se caracteriza por la colisión súbita y de alta energía de un objeto singular de gran masa o dureza contra los revestimientos. A diferencia de la carga distribuida de la trituración normal, un impacto genera una fuerza puntual inmensa en una pequeña área del cóncavo.¹¹ La energía del objeto se disipa en una fracción de segundo, generando ondas de choque que se propagan a través del revestimiento y la estructura de la chancadora. Las fuentes de esta sobrecarga son principalmente tres: mineralogía adversa, "bolonería" y la contaminación con "inchancables".

La naturaleza del mineral es un factor determinante en la vida útil de los revestimientos. En la unidad minera de referencia, la presencia de zonas con alta concentración de magnetita (Fe_3O_4) representa un desafío operativo significativo. La magnetita presenta dos propiedades que la convierten en un agente de sobrecarga particularmente agresivo:

- Alta Dureza: Con una dureza en la escala de Mohs de aproximadamente 5.5 a 6, la magnetita es un mineral competente y abrasivo. Esta dureza significa que resiste la fractura, requiriendo mayores fuerzas de compresión, lo que se traduce en un mayor desgaste abrasivo en los cóncavos.
- Alta Densidad: La magnetita tiene una densidad que puede alcanzar hasta 5.2 t/m³, considerablemente mayor que la de la ganga silicatada típica. Para un fragmento de roca de un tamaño dado, una mayor densidad se traduce en una mayor masa (m).

El efecto combinado de estas propiedades es un aumento dramático en la energía cinética de los bloques de mineral que impactan los cóncavos. Un bloque de magnetita no solo es más difícil de fracturar, sino que golpea los revestimientos con una fuerza significativamente mayor que un bloque de tamaño similar de otro mineral. Estos impactos de alta energía no solo aceleran el desgaste superficial, sino que también son capaces de generar esfuerzos puntuales que superan la resistencia a la fluencia del acero, iniciando microfisuras en la superficie del cóncavo, especialmente si existen defectos preexistentes o zonas de soporte de backing deficientes.

Para comprender la dinámica real de una falla por sobrecarga, es invaluable analizar un incidente documentado. El análisis de falla de un evento en la mina Rosario, que involucró una chancadora giratoria y la entrada de "inchancables", proporciona una plantilla detallada de la secuencia de eventos, los datos operativos y los daños resultantes.²² Este estudio de caso sirve como un análogo poderoso para los riesgos que enfrenta la unidad minera de referencia.

El incidente se desarrolló a lo largo de aproximadamente 10 horas, marcado por tres eventos distintos que culminaron en una falla catastrófica. La cronología, reconstruida a partir del informe de investigación, se resume en la Tabla 32.

Tabla 32

Cronología Detallada de Falla por "Inchancable"

Fecha y Hora	Evento	Descripción y Acción Operativa	Observaciones Clave
		El detector de metales detiene la faja de	El sistema de detección
28-Feb, 22:51	1	alimentación. Se encuentra un diente de pala y fragmentos en el electroimán.	funcionó, pero el objeto ya estaba en la faja.
28-Feb, 23:20		Se retira el metal y se reinicia la operación con la chancadora aún con carga.	El equipo es puesto en marcha inmediatamente después de un evento de alto riesgo.
01-Mar, 02:25	2	La chancadora se detiene por una alarma de bajo nivel del eje principal ("poste"). El personal de mantenimiento encuentra un "inchancable" en la cámara.	La caída del eje es un indicador directo de un evento de sobrecarga severo.
01-Mar, 02:25 - 07:30		El personal mecánico retira la pieza metálica con equipo de oxicorte.	Se observa un fuerte olor a balata quemada del limitador de torque, indicando un deslizamiento por sobrecarga extrema.
01-Mar, 07:30		El equipo es entregado a operaciones y puesto en marcha nuevamente, con carga en la cámara. Se procesan 3 camiones.	La decisión de reiniciar sin una inspección interna más profunda fue crítica.
01-Mar, 08:28	3	El operador escucha un "ruido extraño" y detiene la chancadora de inmediato.	Este es el síntoma final de una falla mecánica interna grave.
Post-08:28		La inspección posterior revela daños catastróficos en los bujes de la excéntrica, requiriendo un desarme mayor.	La falla final fue el resultado acumulativo de los dos impactos previos.

Nota. Mina Rosario.

La Tabla 32 muestra que, tras retirar el objeto metálico, el equipo fue reiniciado sin inspección interna completa, lo que permitió la progresión del daño; finalmente, ruidos

anómalos y la inspección confirmaron una falla severa acumulativa por sobrecargas no gestionadas.



Figura 47.

Hendidura en cóncavos por inchancable



Nota. Mina Rosario.

Figura 48.

Hendidura provocada por material inchancable en el poste



Nota. Mina Rosario.

Esta secuencia revela varios puntos críticos: la eficacia de los sistemas de detección, las decisiones operativas de reiniciar el equipo después de eventos de alto riesgo, y los síntomas físicos de la sobrecarga (caída del eje, olor a quemado, ruido anómalo).

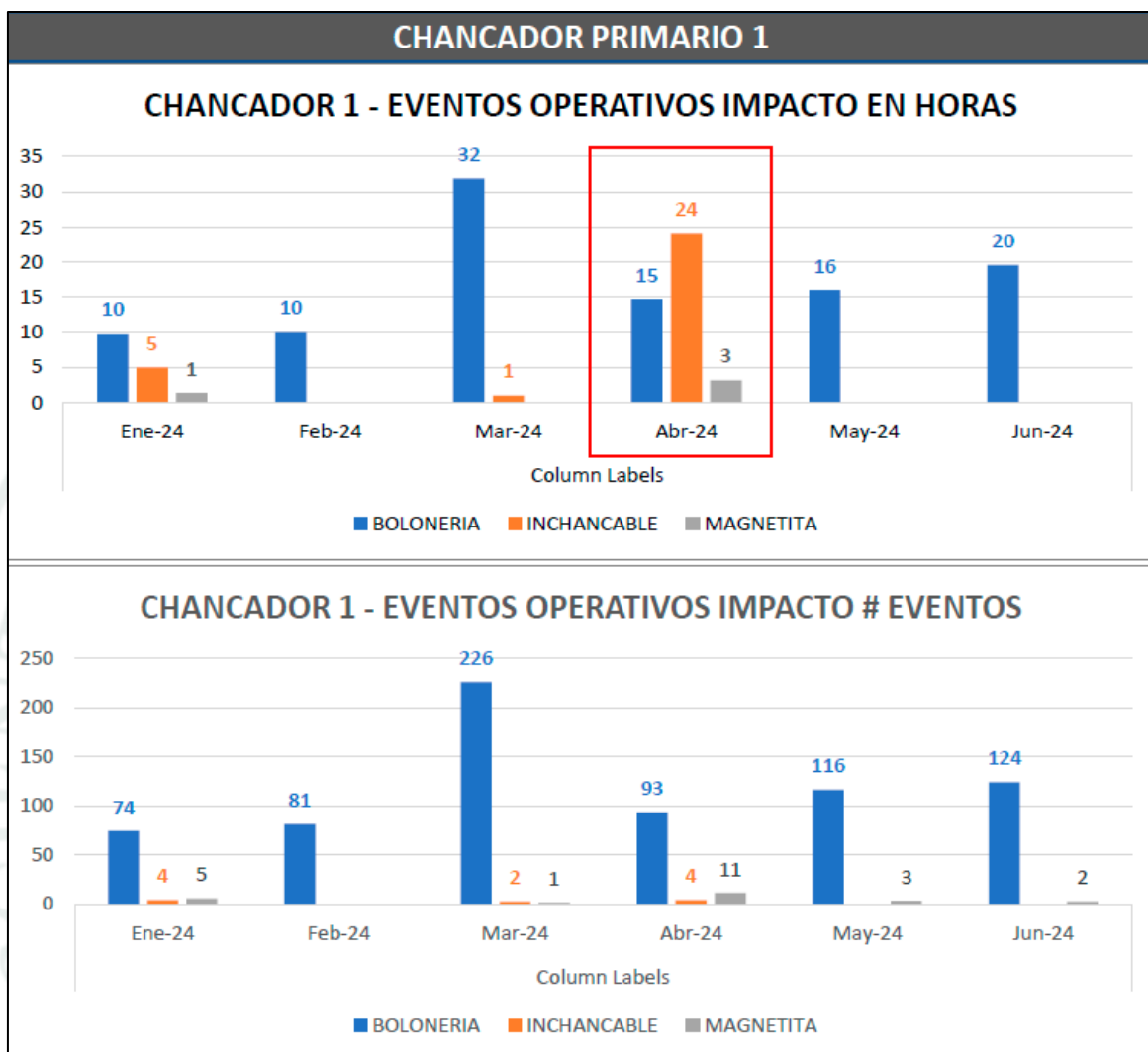
3.1.9.7 Impacto de los eventos operativos en la validación de hipótesis

El análisis de eventos operativos durante el año 2024 constituye una fuente crítica para comprobar la hipótesis planteada. Los registros de los chancadores primarios 1 y 2 evidencian cómo las interrupciones por bolonería, inchancables y presencia de magnetita afectan directamente la estabilidad mecánica del equipo. Estas condiciones representan esfuerzos adicionales sobre los cóncavos y el backing, cuya resistencia se ve comprometida cuando el proceso de curado no se realiza de manera adecuada.

En el caso del Chancador Primario 1, se observa un comportamiento marcado en el mes de abril de 2024, donde se registraron 24 horas de impacto por inchancables y 15 horas asociadas a bolonería. Este evento aislado, pero de alta criticidad, coincide con un aumento en la frecuencia de fallas de desplazamiento de cóncavos. La evidencia sugiere que, ante cargas extraordinarias, el backing no alcanzó la cohesión requerida para absorber los esfuerzos dinámicos, lo que se tradujo en un deslizamiento del conjunto de revestimientos. Esta relación es consistente con la hipótesis de que un curado deficiente o tiempos reducidos de fraguado exponen a la chancadora a fallas prematuras.

Figura 49.

Impacto de eventos operativos en el chancador primario 1

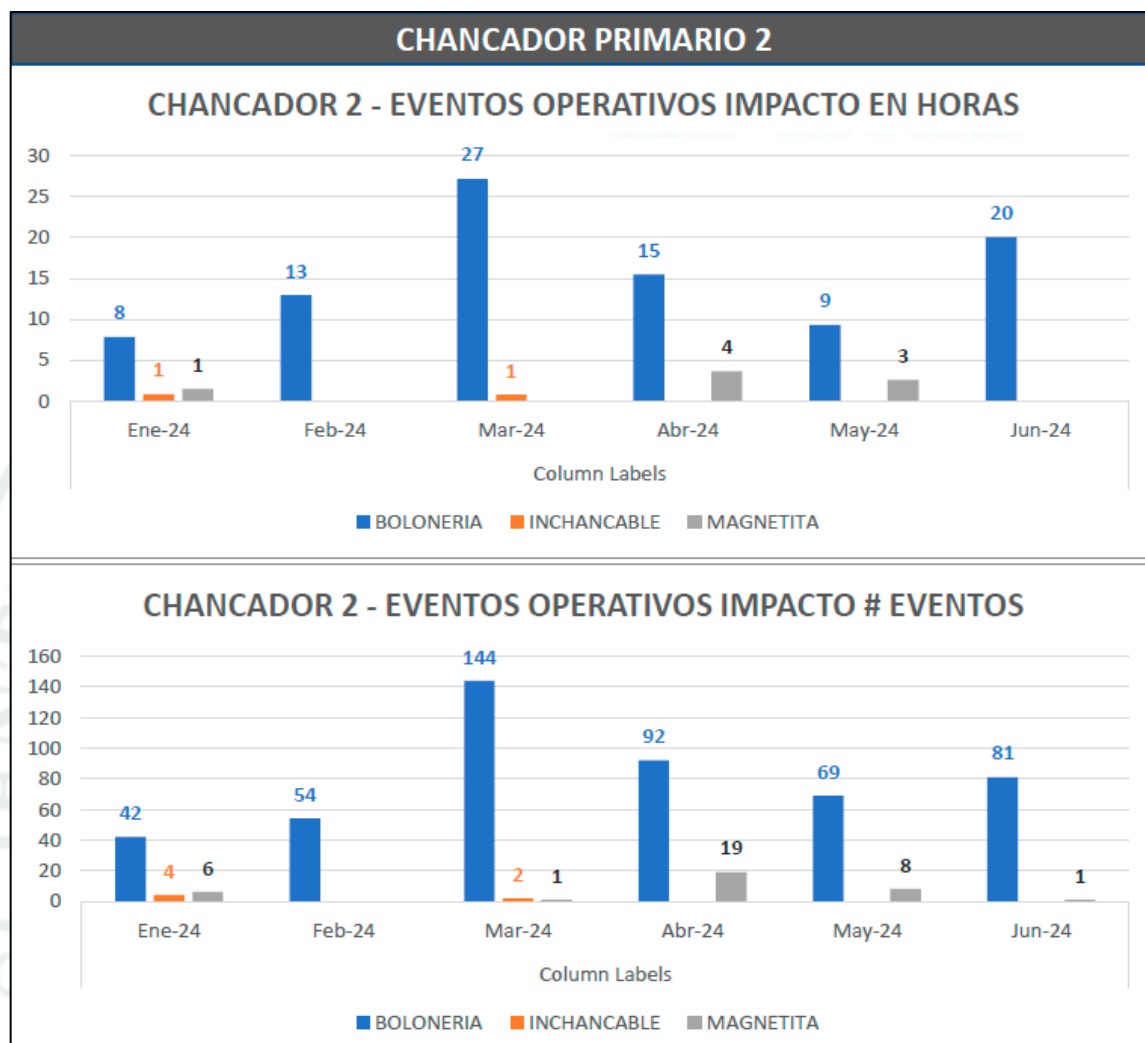


Nota. Unidad minera de referencia.

Por su parte, el Chancador Primario 2 muestra una tendencia similar en marzo y abril de 2024, con 27 y 15 horas de impacto respectivamente por bolonería, además de un aumento significativo en el número de eventos asociados a magnetita (19 casos en abril). La magnetita, por su elevada dureza y propiedades abrasivas, genera esfuerzos adicionales que amplifican cualquier deficiencia en el anclaje del backing. El incremento simultáneo de eventos operativos de alta exigencia, combinado con un material de respaldo sin el tiempo de curado óptimo, produce microfisuras en el compuesto epóxico que actúan como origen de fallas mayores.

Figura 50.

Impacto de eventos operativos en el chancador primario 2



Nota. Unidad minera de referencia.

El comportamiento registrado en ambos equipos valida parcialmente la hipótesis central: la recurrencia de eventos operativos severos no debería traducirse en desplazamiento crítico de cóncavos si el backing estuviera correctamente curado y con propiedades mecánicas dentro de especificación. Sin embargo, la evidencia de campo muestra que, bajo condiciones de sobrecarga y contacto con inchancables, los fallos en la fijación se hicieron más recurrentes. Esto confirma que los problemas en el proceso de curado del backing son un factor determinante en la pérdida de integridad estructural de los revestimientos.

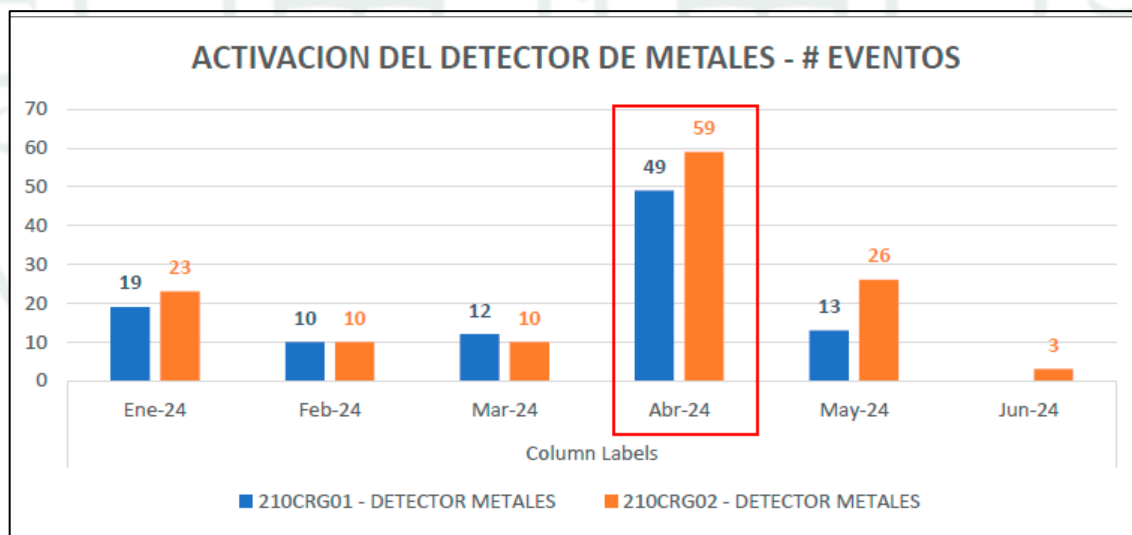
El análisis de los registros de litologías procesadas en el chancado primario confirma la presencia de minerales de elevada dureza como la magnetita y el skarn de granate. En el correo mostrado de junio de 2024 se detalla que el granate presenta una dureza de 7.5 en la escala de Mohs, superior al cuarzo, y que durante el proceso de conminución se fractura en

aristas agudas que actúan como microherramientas de corte. Este comportamiento lo convierte en un material altamente abrasivo, con capacidad de acelerar el desgaste y generar esfuerzos puntuales de gran magnitud sobre los cóncavos y el backing. La propia comunicación técnica reconoce que, aunque el granate es resistente a la fricción, su tenacidad es quebradiza, lo que significa que tiende a producir fragmentos cortantes que incrementan el riesgo de falla localizada.

A este factor mineralógico se suma la evidencia operacional. En abril de 2024 los detectores de metales de ambos chancadores registraron un pico histórico de 49 y 59 activaciones respectivamente. Este indicador refleja que, además de la abrasividad del mineral, existió un ingreso recurrente de cuerpos extraños y de alta dureza al sistema, elevando el nivel de sollicitación mecánica sobre los revestimientos. Bajo condiciones normales, un backing correctamente curado debería proveer suficiente rigidez y adherencia para resistir estos esfuerzos. Sin embargo, los eventos de desplazamiento de cóncavos ocurridos tras estos registros evidencian que el material de respaldo no alcanzó la cohesión necesaria, confirmando la hipótesis del curado deficiente.

Figura 51.

Eventos en el detector de metales



Nota. Unidad minera de referencia.

Finalmente, las inspecciones visuales posteriores corroboran la magnitud de la falla. Las fotografías muestran cóncavos fracturados y desprendidos, con evidencia de pérdida de anclaje en la interfaz backing–revestimiento. Este tipo de daño no responde únicamente a la presencia de minerales abrasivos o inchancables; más bien, se trata de la combinación de ambos factores con un backing que no completó el proceso de polimerización. La

consecuencia directa es la pérdida de soporte estructural, que facilita el desplazamiento vertical de los cóncavos ante impactos súbitos.

Figura 52.

Evidencia fotográfica



Nota. Unidad minera de referencia.

En conjunto, estas tres líneas de evidencia mineralógica, operacional y visual consolidan la comprobación de la hipótesis. Las fallas críticas en los chancadores primarios no se deben exclusivamente a la dureza del mineral o a la frecuencia de inchancables, sino a la interacción de estas condiciones con un proceso inadecuado de curado del backing. De haber contado con un respaldo correctamente preparado, el sistema habría mostrado mayor tolerancia frente a los impactos y abrasión, reduciendo la incidencia de desplazamientos de cóncavos y fallas prematuras.

3.1.9.8 Análisis de variables operativas

El monitoreo en línea de variables operativas constituye un indicador fundamental para descartar o confirmar la influencia de la operación sobre las fallas de desplazamiento de cóncavos. En la gráfica correspondiente al año 2024 se observa que la temperatura del aceite de retorno mantiene un valor promedio cercano a 50 °C, con ligeras variaciones hacia la baja en determinados periodos. Esta estabilidad térmica indica que el sistema de lubricación trabajó dentro de parámetros aceptables y no generó un factor adicional de debilitamiento en el backing.

En relación con la posición del manto hidráulico, la tendencia mostrada es gradual y ascendente, en concordancia con los ajustes típicos de desgaste de revestimientos. No se

registran saltos bruscos ni cambios abruptos que pudieran sugerir interferencias anómalas o un comportamiento irregular del sistema hidráulico. Este patrón de estabilidad refuerza la conclusión de que la operación hidráulica no fue la causa primaria de los desplazamientos, sino que existió otro factor estructural que condicionó la falla.

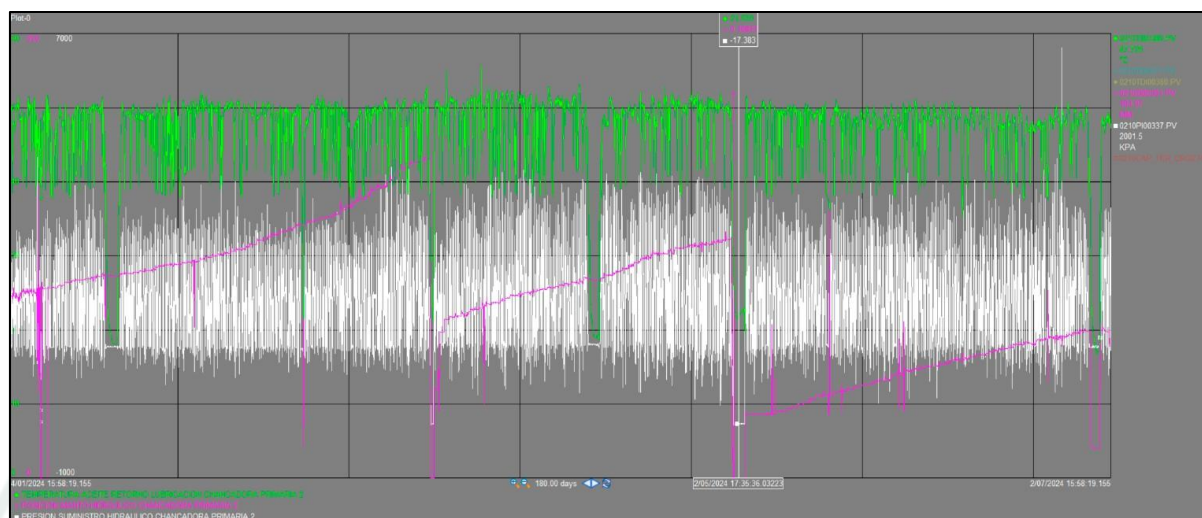
La variable de presión hidráulica muestra un promedio en torno a 2 350 kPa, manteniendo una tendencia general estable a lo largo del semestre analizado. Aunque se aprecian picos transitorios de caída, estos son eventos puntuales y típicos de la dinámica de chancado, sin que lleguen a comprometer el desempeño global del sistema. El hecho de que la presión se mantuviera en rango confirma que los cilindros y componentes hidráulicos respondieron de forma adecuada frente a la carga operativa.

Al analizar en detalle la segunda gráfica, donde se visualizan las tres variables de forma simultánea, se corrobora esta conclusión. La línea verde, correspondiente a la temperatura del aceite de retorno, se mantiene cercana a 50 °C con oscilaciones normales. La línea blanca, que representa la presión de suministro hidráulico, conserva un patrón de oscilación en torno a los 2 000 a 2 350 kPa sin presentar desviaciones críticas. Finalmente, la línea fucsia, vinculada a la posición del manto, muestra un crecimiento progresivo, propio del desgaste gradual. En conjunto, el análisis indica que la operación no presentó anomalías significativas durante el periodo en estudio.

Esto resulta crucial para comprobar la hipótesis, ya que permite descartar que el desplazamiento de cóncavos y la pérdida de anclaje se deban a deficiencias en el sistema hidráulico o a condiciones térmicas adversas. Al mantenerse las variables en rangos normales, la causa raíz se centra en la integridad del backing y en la calidad de su curado. De haberse cumplido un proceso de curado completo y adecuado, el respaldo habría resistido las cargas dinámicas registradas sin evidenciar fallas de adherencia o desplazamiento.

Figura 53.

Gráfica ampliada de variables operativas



Nota. Chancador 2 Unidad minera de referencia.

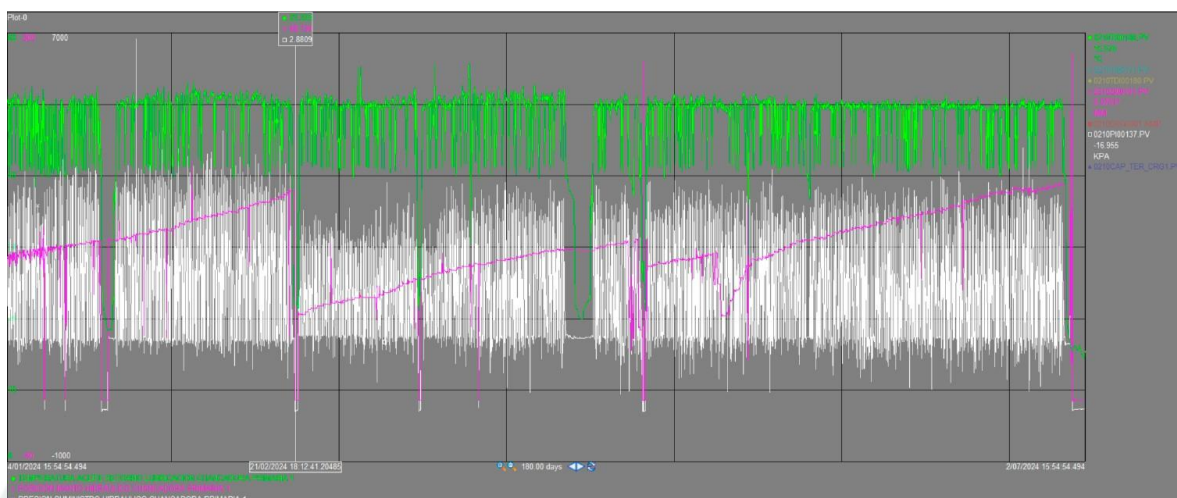
En el caso del Chancador Primario 1 las variables operativas registradas durante el año 2024 muestran un comportamiento también estable. La temperatura del aceite de retorno se mantiene con valores promedio de 50 °C, sin evidenciar tendencias de incremento que puedan asociarse a problemas de sobrecalentamiento o pérdidas de capacidad de enfriamiento. Esto confirma que la lubricación trabajó de manera confiable y no representó un factor de debilitamiento del respaldo.

La posición del manto hidráulico refleja incrementos graduales propios del desgaste normal de los revestimientos, sin irregularidades abruptas que evidencien fallas del sistema hidráulico. Lo más resaltante en este caso es la clara mejora posterior al cambio de manto realizado en febrero de 2024, lo cual se traduce en un comportamiento más uniforme de la posición y confirma la adecuada calibración mecánica después de la intervención.

En cuanto a la presión hidráulica, se observa un promedio cercano a 2 500 kPa, con una tendencia estable y mejoría notoria luego del reemplazo de manto. La gráfica indica que, a diferencia de los primeros registros, la presión se estabilizó progresivamente en un rango seguro y sin oscilaciones críticas. Este comportamiento es coherente con un sistema hidráulico en condiciones óptimas y que responde adecuadamente a la demanda operativa.

Figura 54.

Gráfica ampliada de variables operativas



Nota. Chancador 1 Unidad minera de referencia.

La comparación entre ambos chancadores muestra coincidencias importantes. Tanto en el chancador primario 1 como en el 2 la temperatura del aceite de retorno permaneció estable en torno a 50 °C, lo que descarta un origen térmico de la falla. Las presiones hidráulicas se mantuvieron en rangos operativos normales, con promedios de 2 350 kPa en el chancador 2 y 2 500 kPa en el chancador 1, lo que refleja un desempeño confiable del sistema. En ambos casos los incrementos de posición del manto fueron graduales, asociados a desgaste natural y sin patrones abruptos.

Este análisis comparativo confirma que las fallas observadas no pueden atribuirse a un mal funcionamiento de las variables hidráulicas ni térmicas. El hecho de que los dos equipos muestren condiciones operativas normales y aun así hayan registrado eventos de desplazamiento de cóncavos refuerza la hipótesis de que el problema central está en la integridad del backing y en su proceso de curado. De haberse realizado un curado completo y conforme a especificaciones, los sistemas habrían soportado las cargas dinámicas asociadas a bolonería, inchancables y magnetita sin mostrar pérdidas de anclaje.

3.1.9.9 Evaluación del perfil de desgaste de cóncavos mediante escaneo láser

El análisis de espesores obtenidos por escaneo láser en el chancador primario 1 evidencia que, tras 9.3 meses de servicio y un acumulado de 21.2 millones de toneladas procesadas, las superficies del Middle y Upper apenas alcanzan alrededor del 50% de su espesor nominal. Este nivel de desgaste está por encima del límite de cambio establecido por

el fabricante, que se encuentra en 35%, por lo que los revestimientos todavía no deberían considerarse en condición de reemplazo.

El perfil de desgaste refleja que la vida útil de los cóncavos aún se encuentra dentro de parámetros aceptables. Sin embargo, se identifican ratios de desgaste más elevados en la zona del Middle y el Upper. Estos comportamientos se asocian directamente con los cambios en la mineralogía del material proveniente de la zona de Chalcobamba, caracterizado por un mayor contenido de minerales abrasivos como el granate y la magnetita. Dichos materiales incrementan las tasas de desgaste, pero lo relevante es que incluso bajo estas condiciones los cóncavos no han llegado a su límite de cambio.

Este resultado es crítico para la comprobación de la hipótesis. Si los cóncavos no han alcanzado su límite de vida útil y mantienen espesores que aún superan ampliamente el 35% establecido, entonces la causa principal de los desplazamientos o fracturas no se puede atribuir a un desgaste excesivo. El problema radica en la pérdida de anclaje y fijación, lo que refuerza la conclusión de que el curado inadecuado del backing fue determinante en las fallas observadas. En otras palabras, los cóncavos no fallaron por agotamiento de material, sino por fallas prematuras relacionadas a la integridad del respaldo.

Figura 55.

Tabla de espesores de cóncavos Escaneo láser

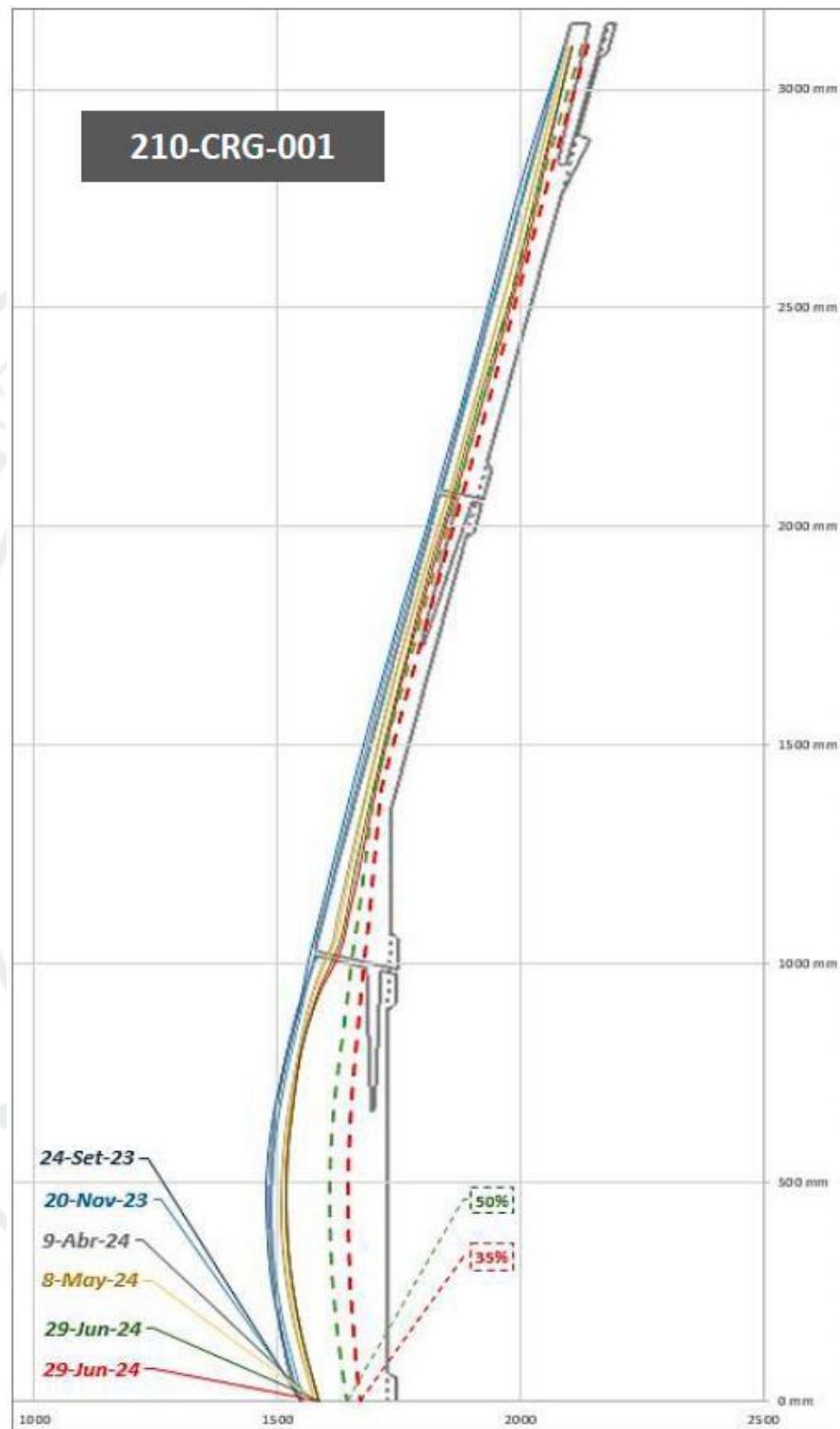
ESPESTORES CONCAVO				24-Sep-23 0.00 M-Ton (M-Ton)	29-Jun-24 21.18 M-Ton (M-Ton)	INGAD SERVICE			
Componente	NP R/LA	Posición de Altura mm	Localón	Espeor Nominal tra Medición	Espeor Medido Medición	Espeor Mínimo a 50%	Espeor Mínimo a 35%	Desgaste	Ratio Desgaste
			z (mm)	B (mm)	B' (mm)	Bm (mm)	Bm (mm)	B-B' (mm)	(mm/M-Ton)
Utilización Pin		3.100	3100 mm	74.57	60.17	37.29	26.10	14.41	0.59
		3.050	3050 mm	77.03	58.65	38.52	26.96	18.38	0.87
		3.000	3000 mm	80.31	57.14	40.15	28.11	23.17	1.09
		2.950	2950 mm	82.77	55.88	41.38	28.97	26.89	1.27
		2.900	2900 mm	84.38	55.03	42.19	29.53	29.34	1.39
3 SUP		2.850	2850 mm	85.83	54.35	42.92	30.04	31.48	1.49
		2.800	2800 mm	87.03	52.80	43.51	30.46	34.22	1.62
		2.750	2750 mm	87.56	49.26	43.78	30.65	38.30	1.81
		2.700	2700 mm	87.56	49.26	43.78	30.65	38.30	1.81
		2.650	2650 mm	86.85	48.19	43.43	30.40	38.66	1.83
		2.600	2600 mm	86.08	46.60	43.04	30.13	39.49	1.86
		2.550	2550 mm	85.68	45.20	42.84	29.99	40.48	1.91
		2.500	2500 mm	85.42	45.75	42.71	29.90	39.67	1.87
		2.450	2450 mm	85.02	47.34	42.51	29.76	37.68	1.78
		2.400	2400 mm	84.61	48.26	42.31	29.61	36.35	1.72
		2.350	2350 mm	84.36	49.34	42.18	29.52	35.02	1.65
		2.300	2300 mm	84.40	50.89	42.20	29.54	33.51	1.58
		2.250	2250 mm	84.89	51.51	42.44	29.71	33.37	1.58
		2.200	2200 mm	86.20	52.53	43.10	30.17	33.67	1.59
		2.150	2150 mm	86.91	52.71	43.45	30.42	34.20	1.62
Utilización Pin		2.100	2100 mm	87.01	52.47	43.51	30.45	34.54	1.63
		2.050	2050 mm	86.60	52.88	43.30	30.31	33.72	1.59
		2.000	2000 mm	87.04	54.67	43.52	30.46	32.37	1.53
		1.950	1950 mm	88.43	57.03	44.22	30.95	31.41	1.48
		1.900	1900 mm	90.13	57.90	45.07	31.55	32.23	1.52
		1.850	1850 mm	91.65	57.30	45.63	32.08	34.36	1.62
2 MED		1.800	1800 mm	92.52	57.31	46.26	32.38	35.21	1.66
		1.750	1750 mm	92.59	55.59	46.30	32.41	36.00	1.70
		1.700	1700 mm	92.87	55.49	46.44	32.51	37.38	1.77
		1.650	1650 mm	93.65	55.51	46.83	32.78	38.14	1.80
		1.600	1600 mm	94.30	54.83	47.15	33.01	39.47	1.86
		1.550	1550 mm	94.51	53.88	47.26	33.08	40.63	1.92
		1.500	1500 mm	94.49	52.91	47.25	33.07	41.58	1.96
		1.450	1450 mm	94.43	51.51	47.21	33.05	42.92	2.03
		1.400	1400 mm	94.46	50.12	47.23	33.06	44.34	2.09
		1.350	1350 mm	103.57	57.16	51.78	36.25	46.41	2.19
		1.300	1300 mm	115.01	67.62	57.51	40.26	47.40	2.24
		1.250	1250 mm	125.45	77.84	63.23	44.25	48.61	2.30
		1.200	1200 mm	137.93	87.32	68.97	48.28	50.61	2.39
		1.150	1150 mm	149.47	95.63	74.73	52.31	53.83	2.54
		1.100	1100 mm	160.87	104.75	80.43	56.30	56.12	2.65
Utilización Pin		1.050	1050 mm	170.37	113.11	85.18	59.63	57.26	2.70
		1.000	1000 mm	179.28	129.84	89.64	62.75	49.43	2.33
		950	950 mm	185.47	148.97	92.73	64.91	36.50	1.72
		900	900 mm	192.54	162.69	96.27	67.39	29.85	1.41
		850	850 mm	203.73	175.99	101.86	71.30	27.74	1.31
		800	800 mm	215.64	186.64	107.62	75.47	29.00	1.37
		750	750 mm	227.47	194.28	113.74	79.61	33.19	1.57
		700	700 mm	238.11	200.64	119.06	83.34	37.47	1.77
1 INF		650	650 mm	246.60	206.57	123.30	86.31	40.03	1.89
		600	600 mm	253.12	211.79	126.56	88.59	41.33	1.95
		550	550 mm	257.93	215.39	128.96	90.27	42.54	2.01
		500	500 mm	260.61	216.87	130.30	91.21	43.74	2.07
		450	450 mm	260.84	217.05	130.42	91.29	43.79	2.07
		400	400 mm	259.42	216.10	129.71	90.80	43.31	2.05
		350	350 mm	257.05	213.51	128.53	89.97	43.54	2.06
		300	300 mm	253.05	209.08	126.52	88.57	43.96	2.08
		250	250 mm	246.63	202.90	123.31	86.32	43.73	2.06
		200	200 mm	238.18	195.18	119.09	83.36	43.00	2.03
		150	150 mm	228.34	186.00	114.17	79.92	42.34	2.00
		100	100 mm	217.35	175.33	108.67	76.07	42.02	1.98
		50	50 mm	205.03	163.33	102.51	71.76	41.69	1.97
		0	0 mm	190.08	150.64	95.04	66.53	39.44	1.86

Nota. Unidad minera de referencia.

El registro de espesores de la figura 55, muestra que tras procesar 21.8 millones de toneladas, los cóncavos mantienen valores por encima del 35% mínimo de cambio recomendado. En la zona del Upper se observan espesores medios reducidos hasta 42.5 mm con desgastes de hasta 34.4 mm, lo que representa una ratio de desgaste cercano a 2.0 mm por millón de toneladas procesadas. En el Middle los espesores se mantienen en torno a 47 a 52 mm con ratios similares, mientras que en el Lower los valores alcanzan pérdidas de 49 mm con una ratio de 2.33 mm/Tn. En el sector inferior los desgastes llegan a 43 mm, pero siempre por encima del umbral de seguridad. Estos resultados demuestran que, aunque existe un incremento de desgaste acelerado en las zonas de mayor contacto con minerales abrasivos, los espesores residuales aún aseguran capacidad de trabajo. Por tanto, los desplazamientos de cóncavos no se explican por agotamiento de material, sino por pérdida de fijación vinculada al estado del backing.

Figura 56.

Perfil gráfico de desgaste de cóncavos



Nota. Unidad minera de referencia.

La Figura 56 de evolución de desgaste obtenida mediante escaneo láser permite visualizar la progresión temporal de la pérdida de espesor entre septiembre de 2023 y junio

de 2024. Las curvas sucesivas evidencian una reducción sostenida que alcanza el 50% del espesor nominal en puntos del Middle y Upper, aunque sin llegar al límite de cambio de 35% establecido. El comportamiento es uniforme, sin saltos abruptos que sugieran fallas mecánicas localizadas, y refleja una correlación directa con la variación en la mineralogía alimentada desde Chalcobamba. La comparación de las distintas fechas confirma que, en nueve meses de operación, los cóncavos mantuvieron un desgaste progresivo pero controlado, lo que refuerza que las fallas observadas no derivan de espesores críticos sino de deficiencias en el proceso de anclaje. La evidencia gráfica respalda la hipótesis de que el curado deficiente del backing es la causa raíz de los desplazamientos prematuros, al no haber un agotamiento real del espesor que justifique el fallo.

3.1.9.10 Análisis de evento similar reportado en el AFA 2023

El evento documentado en el AFA 2023 (Análisis de Falla realizado en 2023, estudio técnico efectuado tras un evento de fractura o desprendimiento de cóncavos con el fin de determinar causas raíz) constituye un antecedente directo y comparativo para las fallas observadas en los chancadores primarios de la unidad minera de referencia. Evidencia fotográfica de fractura de backing y desprendimiento de cóncavos

Figura 57.

Fractura de backing y desprendimiento de cóncavos



Nota. Unidad minera de referencia.

Como se presenta las evidencias en la Figura 57 el análisis metalúrgico determinó que los cóncavos fueron fabricados en un acero de baja aleación Cr-Ni-Mo con 0.26 % de carbono, compatible con la especificación del fabricante. Las mediciones de dureza mostraron valores elevados, con un promedio de 311 HB en la base y mínimos de 295 HB en zonas sin tratamiento térmico, lo que evidencia una microestructura predominantemente

martensítica. Esta condición confiere alta dureza inicial, pero limitada capacidad de endurecimiento por deformación y menor tenacidad, incrementando la susceptibilidad a fractura frágil ante sollicitaciones de flexión localizada.

El mecanismo de falla fue clasificado como fractura frágil, con iniciación interna o próxima a los bordes de apoyo, asociada a concentraciones de esfuerzo superiores a la capacidad de absorción del material. La evidencia observada indica que la causa principal estuvo vinculada al deterioro del backing de los cóncavos intermedios, cuya textura deficiente redujo de forma significativa su resistencia a compresión e impacto. La fractura del backing generó pérdida de soporte estructural, mayor deflexión de los cóncavos y un asiento irregular, condiciones que favorecieron tensiones mal distribuidas y culminaron en la fractura de los elementos metálicos.

El análisis de la geometría de instalación, ilustrado en los diagramas técnicos, confirma que las zonas centrales y los bordes de los cóncavos son sitios recurrentes de iniciación de grietas cuando existen deficiencias de asentamiento. Estas áreas, identificadas con marcas azules y rojas en los registros, coinciden con los puntos de mayor flexión y transmisión de carga, lo que demuestra que el factor desencadenante fue el mal desempeño del backing y no un desgaste excesivo del acero.

Figura 58.

Áreas críticas de inicio de grietas en cóncavos intermedios



Figura 22. Las zonas centrales (puntos azules) e intermedio de los bordes (puntos rojos) de los cóncavos son sitios probables de iniciación de grietas por deformación excesiva.

Nota. Unidad minera de referencia.

En síntesis, la Figura 58 muestra un evento similar registrado en 2023 valida la hipótesis actual al mostrar que los problemas de desplazamiento y fractura prematura no se originan en el material del cóncavo en sí mismo, sino en la pérdida de anclaje y soporte

derivada de un backing mal curado o contaminado. La fractura frágil observada es la consecuencia final de un proceso que inicia con la falla del respaldo, lo que se repite en las condiciones actuales del chancador primario evaluado.

3.1.10 Fundamentación Normativa y Estándares de Ingeniería Aplicados

La mejora del procedimiento de cambio de cóncavos no solo se basa en las recomendaciones del fabricante (OEM FLSmidth), sino que integra estándares internacionales para garantizar la rigurosidad científica y la sostenibilidad de la gestión del mantenimiento.

3.1.11 Alineamiento con la Gestión de Activos (ISO 55001)

La propuesta aplica explícitamente el requisito 8.1 (Planificación y Control Operacional) de la norma ISO 55001. El PETS 2.0 se diseña como una herramienta de control para mitigar los riesgos identificados en el ciclo de vida del activo (chancadora primaria), asegurando que el proceso de cambio de componentes de desgaste (cóncavos) maximice el valor del activo a través de la reducción de la indisponibilidad no programada.

3.1.12 Definición y Aplicación de la Norma EN 13306

Para levantar la ambigüedad en la medición de resultados, se adopta la terminología de la norma EN 13306 (Mantenimiento - Terminología de mantenimiento). La aplicación es explícita en el cálculo de los indicadores de éxito:

- Confiabilidad (MTBF): Se define bajo el estándar de la norma como el tiempo de funcionamiento entre fallos, excluyendo paradas por mantenimiento preventivo.
- Mantenibilidad (MTTR): Se utiliza la metodología de la norma para medir el tiempo medio de reparación, enfocándose en la optimización de los tiempos de curado de la resina y ajuste de pernos.

3.1.13 Estándar de Materiales y Calidad (ASTM A128)

Considerando que la fractura prematura de los cóncavos es el problema principal, el PETS 2.0 establece que la recepción y verificación de los repuestos deben cumplir con la norma ASTM A128/A128M.

Aplicación: Se exige que el certificado de calidad del proveedor valide la composición de acero al manganeso y la dureza Brinell, asegurando que el material tiene la capacidad de endurecimiento por deformación necesaria para soportar las cargas de trituración de mineral de alta dureza (magnetita).

3.1.14 Instrumentación y Monitoreo Proactivo (IEEE 1451)

Para la implementación del monitoreo proactivo (uso de sensores de carga y escaneo láser 3D para verificar alineamiento), se siguen las directrices de la norma IEEE 1451.

Aplicación: Esta norma garantiza la interoperabilidad de los datos recolectados por los sensores inteligentes durante el proceso de izaje y ajuste de los cóncavos, permitiendo que la información de campo sea analizada con precisión metrológica para prevenir fallas por mala instalación.

3.1.15 Desarrollo de la propuesta del PETS 2.0

3.1.16 Mejora del procedimiento general mejorando actividades predictivas

3.1.16.1 Preparación y gestión inicial

1.1.1.1.1. Revisión documental y trazabilidad de materiales

Antes de iniciar cualquier intervención, se revisa la documentación técnica del backing, certificados de lote, fecha de fabricación, condiciones de almacenamiento y compatibilidad con el tipo de chancadora. Esta revisión incluye la verificación de registros históricos de fallas y condiciones operativas de campañas previas para correlacionar patrones.

Con el propósito de asegurar la trazabilidad del nuevo procedimiento PETS 2.0 en el cambio de cóncavos, se definieron los recursos humanos y materiales necesarios que permitan garantizar el control técnico, documental y operativo durante la ejecución del mantenimiento. Esta estructuración busca asegurar la validación de información crítica, el registro de evidencias y el análisis de datos para la toma de decisiones.

Tabla 33*Personal humano requerido para trazabilidad PETS 2*

Cargo	Cantidad	Función principal
Supervisor mecánico senior	1	Validar fichas técnicas y certificados del backing.
Ingeniero de control de calidad de materiales	1	Revisar trazabilidad documental y aprobar uso de materiales.
Analista de datos de mantenimiento	1	Comparar con registros históricos para identificar riesgos potenciales.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 33 presenta el personal humano requerido, identificando roles clave como el supervisor mecánico senior, el ingeniero de control de calidad de materiales y el analista de datos de mantenimiento, quienes cumplen funciones de validación técnica, control documental y análisis de información histórica.

Tabla 34*Requerimientos materiales, equipos y herramientas*

Equipo/Herramienta	Cantidad	Especificación técnica
Carpeta de fichas técnicas y certificados	1	Incluye ASTM D695 e ISO 4587 del backing.
Cámara industrial de alta resolución	1	Mínimo 12 MP, función macro.
Plataforma de gestión documental	1 licencia	Integrada al CMMS de la planta.

Nota. Elaboración propia.

Por su parte, la Tabla 34 detalla los requerimientos materiales, equipos y herramientas necesarios para la trazabilidad, incluyendo medios de registro como carpetas técnicas, equipos de captura de evidencia como cámaras industriales y plataformas digitales integradas al CMMS, asegurando una gestión sistemática y verificable del proceso.

Se asigna un supervisor mecánico senior y un ingeniero QA/QC porque la revisión documental no solo implica verificar papeles, sino detectar incompatibilidades entre el respaldo epóxico y el diseño de la chancadora. El analista de datos es clave para correlacionar fallas históricas con el tipo de material usado y condiciones de aplicación, permitiendo tomar decisiones preventivas. La cámara de alta resolución garantiza la trazabilidad fotográfica

para auditorías técnicas y la plataforma documental facilita que esta información quede integrada al sistema de mantenimiento, evitando pérdidas o registros incompletos.

La trazabilidad de la documentación debe ser digital. En este contexto, una plataforma adecuada sería SAP Document Management System (DMS), que es plenamente integrable con el SAP PM/CMMS ya usado en la unidad minera de referencia. Esta integración permite que cada lote de material, con su ficha técnica y certificado, quede vinculado directamente a la orden de trabajo preventiva o correctiva correspondiente. De esta manera, cualquier auditoría técnica posterior puede rastrear desde la campaña de montaje hasta el certificado de fábrica del producto. Otra opción viable es Infor EAM Document Control, que también se integra con sistemas de gestión de activos (EAM/CMMS) y permite control de versiones, firma digital y vinculación de documentos a equipos específicos mediante código SAP.

El analista de datos de mantenimiento es clave en esta etapa. Usando herramientas de minería de datos integradas al CMMS, genera reportes de correlación entre lotes de backing y fallas de desprendimiento, detectando patrones asociados a condiciones de operación, como sobrecarga en el dump pocket o mineral con alta dureza abrasiva. Con ello se cierran los bucles de aprendizaje que alimentan el plan predictivo.

Además, la trazabilidad no solo abarca materiales, sino también herramientas calibradas. Cada torque wrench o calibrador usado en la campaña debe tener su certificado vigente cargado al CMMS. Para ello se sugiere el uso de un módulo de gestión de activos metrológicos, como el de SAP PM – Measurement Equipment, que mantiene la vigencia de calibración y emite alertas si se intenta usar un equipo vencido.

3.1.16.1.1 Plan de trabajo QA/QC con puntos críticos predictivos

Se elabora un plan que define responsables, checklists y puntos de control, incluyendo inspecciones previas y variables críticas que puedan anticipar fallas (temperatura, humedad, vibraciones, alineación).

Con el objetivo de estructurar adecuadamente el plan de trabajo para el cambio de cóncavos bajo un enfoque de confiabilidad, se definieron los recursos humanos y los medios técnicos necesarios para asegurar una planificación efectiva, controlada y alineada a indicadores de desempeño. Esta organización permite integrar criterios predictivos, gestión del tiempo y seguimiento en campo.

Tabla 35*Personal humano requerido para el plan de trabajo*

Cargo	Cantidad	Función principal
Jefe de mantenimiento	1	Aprobar plan de trabajo y responsables.
Ingeniero de confiabilidad	1	Incorporar variables predictivas y KPIs de vida útil esperada.
Planner de mantenimiento	1	Integrar plan y controles en el cronograma de parada.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 35 presenta el personal humano requerido, destacando roles clave como el jefe de mantenimiento, el ingeniero de confiabilidad y el planner, quienes intervienen en la aprobación, incorporación de variables predictivas y programación de la parada.

Tabla 36*Requerimientos para el plan de trabajo*

Equipo/Herramienta	Cantidad	Especificación técnica
Checklist predictivo QA/QC	1	Incluye puntos de vibración, termografía y escaneo 3D.
Software de planificación	1 licencia	MS Project, Primavera P6.
Panel de control en campo	1	Con indicadores de avance y alertas de desviación.

Nota. Elaboración propia.

Por su parte, la Tabla 36 detalla los requerimientos de equipos y herramientas, incluyendo checklist predictivo QA/QC, software de planificación y paneles de control en campo, los cuales permiten monitorear avances, detectar desviaciones y asegurar el cumplimiento del plan establecido.

Para garantizar la eficacia del plan QA/QC con puntos críticos predictivos en el procedimiento de cambio de cóncavos en la unidad minera de referencia, se han definido indicadores clave de rendimiento (KPIs) que permiten evaluar de manera objetiva la condición de los componentes, la eficiencia operativa y la adherencia a estándares de calidad. Estos KPIs han sido seleccionados en función de las variables que más influyen en la vida útil de los cóncavos y en la disponibilidad del sistema de chancado primario, integrando

prácticas de mantenimiento basado en condición (CBM) y referencias normativas internacionales. La siguiente tabla resume los indicadores propuestos, su definición, unidad de medida y los valores de referencia (benchmarks) recomendados para el contexto operativo de la minera.



Tabla 37

Indicadores clave de rendimiento (KPIs) predictivos

Indicador (KPI)	Definición	Unidad de medida	Benchmark recomendado
Horas efectivas de operación por campaña de cóncavos	Tiempo total en horas que los cóncavos operan antes del cambio, excluyendo paradas no programadas	h	> 4,500 h por campaña
Tasa de desgaste promedio por zona	Reducción de espesor (mm) en puntos de control por hora de operación	mm/h	< 0,005 mm/h en zonas críticas (superiores)
Porcentaje de backing remanente en puntos críticos	Espesor de material de respaldo vs. espesor inicial	%	> 70% al 80% en el 90% de los puntos críticos antes de campaña
Número de microfisuras detectadas por inspección NDT	Conteo de indicaciones relevantes por campaña	unidades	0 (meta); intervención si ≥ 1 fisura crítica
Cumplimiento de torque de cuñas	Porcentaje de cuñas dentro del rango de torque especificado	%	100% (meta)
Disponibilidad mecánica asociada al sistema de chancado primario	Porcentaje de tiempo que el sistema está disponible	%	> 92%
Tiempo promedio de intervención (cambio completo de cóncavos)	Tiempo total desde inicio a fin del procedimiento	h	≤ 72 h
Ratio de cumplimiento de plan predictivo	% de inspecciones predictivas ejecutadas respecto a las	%	$\geq 95\%$

planificadas

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 37 presenta los indicadores clave de rendimiento (KPIs) predictivos para el control del cambio de cóncavos. En conjunto, estos KPIs permiten monitorear la condición del sistema, anticipar fallas y optimizar la planificación y ejecución del mantenimiento.



Cada indicador ha sido diseñado para cubrir un aspecto crítico del proceso de cambio y operación de cóncavos en chancadoras primarias:

- Horas efectivas de operación por campaña de cóncavos

Evalúa la duración operativa antes del reemplazo, excluyendo paradas no programadas. El benchmark de $>4,500$ h proviene de análisis históricos internos y de recomendaciones de fabricantes, considerando el perfil mineralógico de la unidad minera de referencia.

- Tasa de desgaste promedio por zona

Permite identificar patrones diferenciales de desgaste (por ejemplo, mayor en zonas superiores por impacto de mineral grueso). El límite de $<0,005$ mm/h deriva de datos de escaneo 3D en campañas previas y de literatura técnica especializada.

El formato “Registro de tasa de desgaste promedio por zona” será llenado siguiendo un procedimiento estandarizado para asegurar la precisión y comparabilidad de los datos entre campañas. La medición de espesores se realizará en campo utilizando un escáner 3D portátil con precisión mínima de $\pm 0,1$ mm, previamente calibrado, siguiendo un patrón de puntos predefinidos en las zonas Norte (N), Sur (S), Este (E) y Oeste (O) del conjunto de cóncavos. Estas zonas corresponden a cuadrantes establecidos respecto al eje central de la chancadora, garantizando la cobertura total de las áreas críticas expuestas a desgaste diferencial por flujo de mineral y condiciones de alimentación.

Para cumplir con la precisión mínima de $\pm 0,1$ mm en condiciones de campo, se sugiere el uso del Creaform HandySCAN 3D | BLACK Series. Este equipo es portátil, tiene certificación metrológica ISO 17025, funciona con tecnología de escaneo láser múltiple y logra una precisión de hasta 0,025 mm, superando ampliamente el requisito. Es resistente a vibraciones y polvo, lo que lo hace adecuado para entornos mineros.

Figura 59.

Creaform HandySCAN BLACK



Nota. Creaform 3D.

En la figura 59 se muestra el escáner que en cada medición, el operador registrará la fecha y el código único de identificación (ID) del escaneo 3D. Se documentará el espesor inicial (mm) registrado al inicio de la campaña y el espesor actual (mm) medido en el momento de la inspección. Las horas acumuladas corresponden al total de horas efectivas de operación desde el inicio de la campaña hasta la fecha de medición, las cuales se obtendrán del sistema SCADA o de los registros de horas efectivas (Formato 1).

El desgaste (mm) se calculará como la diferencia entre el espesor inicial y el espesor actual. La tasa de desgaste (mm/h) se obtendrá dividiendo el desgaste acumulado entre las horas acumuladas de operación en la campaña hasta ese punto:

$$Tasa\ de\ desgaste\ (\frac{mm}{h}) = \frac{Desgaste\ acumulado\ (mm)}{Horas\ acumuladas\ (h)}$$

El responsable de la medición será el técnico de mantenimiento predictivo o el especialista en metrología designado, quien firmará el formato. La validación final estará a cargo del ingeniero de confiabilidad, cuya firma certificará que las mediciones cumplen con los estándares de precisión y que se han seguido los protocolos de seguridad y procedimiento.

Este método permite identificar tendencias de desgaste por zona, detectar anomalías localizadas y anticipar intervenciones antes de que se alcance el límite crítico establecido en el PETS 2.0, optimizando el tiempo de cambio de cóncavos y reduciendo riesgos de falla.

- Porcentaje de backing remanente en puntos críticos

Controla la integridad del material epóxico de respaldo. El umbral de 70–80% se fundamenta en recomendaciones de OEM y estudios de resistencia a cargas dinámicas.

- Número de microfisuras detectadas por inspección NDT

Asegura la detección temprana de fisuras internas o superficiales que puedan comprometer la operación. El estándar de 0 fisuras críticas y la metodología de detección se basan en normas ASTM E1444 e ISO 9934, ampliamente usadas en minería para control de componentes estructurales.

- Cumplimiento de torque de cuñas

Verifica que todas las cuñas se encuentren en el rango de apriete especificado por el fabricante, evitando desplazamientos o fallas prematuras. El 100% de cumplimiento es indispensable para la seguridad operacional.

- Disponibilidad mecánica del sistema de chancado primario

Mide la proporción de tiempo que el sistema está en condiciones operativas. El valor de referencia >92% se ajusta a estándares de confiabilidad en minería de gran escala.

- Tiempo promedio de intervención

Controla la eficiencia del cambio completo, buscando minimizar la indisponibilidad del activo. El objetivo de ≤ 72 h está alineado con benchmarks internos y buenas prácticas en operaciones similares.

- Ratio de cumplimiento del plan predictivo

Evalúa la disciplina de ejecución de inspecciones programadas. El $\geq 95\%$ asegura que las decisiones de mantenimiento se basen en datos completos y confiables.

Estos benchmarks integran referencias normativas (ASTM, ISO), recomendaciones de fabricantes de chancadoras primarias, datos históricos de la unidad minera de referencia y estándares de confiabilidad aplicados en la minería internacional. Su implementación permitirá no solo un control más estricto de la condición de los cóncavos, sino también la optimización de la programación de cambios y la reducción de paradas no planificadas.

Figura 60.

Formato maestro de control de campaña de cóncavos

Fecha	Equipo	ID Escaneo 3D	Zona (N/S/E/O)	Puntos de medición (P1/P2/P3)
___/___/___				

	Hora inicio	Hora fin	Totales
Horas de trabajo			

Horas efectivas (h)	Horas no productivas (h)	Horas acumuladas campaña (h)

Espesor inicial (mm)	Espesor actual (mm)	Desgaste (mm)	Tasa desgaste (mm/h)

% Backing remanente	Microfisuras detectadas (unid)	Criticidad microfisura (Alta/Media/Baja)

Torque de cuñas dentro de rango (%)	Ratio cumplimiento plan predictivo (%)

Observaciones

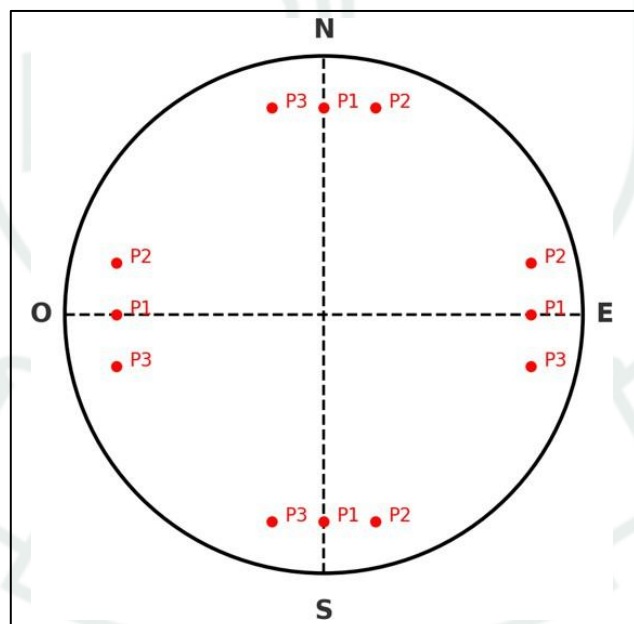
Responsable medición	Firma

Nota. Elaboración propia.

La descripción de los campos de los formatos PETS 2.0 detalla los parámetros necesarios para garantizar un registro completo y trazable de la operación e inspección de cóncavos. La fecha corresponde al día en que se realiza la medición o inspección, mientras que el campo “Equipo” identifica a la chancadora, por ejemplo, NT 60”x113” N° 1. El “ID Escaneo 3D” es un código único que permite la trazabilidad del archivo de escaneo. La “Zona (N/S/E/O)” indica el cuadrante donde se realiza la medición y los “Puntos de medición (P1/P2/P3)” representan posiciones específicas definidas en el layout de referencia. Los campos “Hora inicio” y “Hora fin” registran los tiempos exactos desde que el equipo inicia su operación hasta que se detiene para inspección. Las “Horas efectivas (h)” reflejan el tiempo de operación neto, excluyendo paradas no programadas, mientras que las “Horas no productivas (h)” cuantifican el tiempo total de dichas paradas en ese turno o campaña parcial, especificando en “Motivo parada no productiva” la causa principal, que puede ser mecánica, eléctrica, operativa o externa. Las “Horas acumuladas campaña (h)” representan la suma progresiva de horas efectivas desde el inicio de la campaña.

Figura 61.

Zonas y puntos de medición de chancadora



Nota. Elaboración propia.

En la figura 61 el “Espesor inicial (mm)” se refiere a la medición base antes de iniciar la campaña, y el “Espesor actual (mm)” al valor registrado en el momento de la inspección. El “Desgaste (mm)” es la diferencia entre ambos valores, mientras que la “Tasa de desgaste (mm/h)” resulta de dividir el desgaste acumulado entre las horas acumuladas. El “% Backing

remanente” compara el espesor de respaldo actual con el inicial en puntos críticos, y el campo “Microfisuras detectadas (unidades)” contabiliza las fisuras identificadas mediante ensayos no destructivos, complementado con la “Críticidad microfisura”, que evalúa ubicación, profundidad y riesgo asociado. El “Torque de cuñas dentro de rango (%)” expresa el porcentaje de cuñas que cumplen el torque especificado, y el “Ratio cumplimiento plan predictivo (%)” mide el porcentaje de inspecciones ejecutadas respecto a las planificadas. Finalmente, “Observaciones” recoge notas relevantes de la inspección, mientras que “Responsable medición” identifica con nombre y cargo a quien realiza la medición, y “Firma” corresponde a la rúbrica física o digital de dicho responsable.

Figura 62.

Formato 2 control de disponibilidad mecánica

Fecha inicio intervención	Fecha fin intervención	Equipo	Fuente de datos (SCADA / Parte diario)
__/__/__	__/__/__		

Tipo de intervención (Programada/No programada)	Duración total intervención (h)	Disponibilidad mecánica (%)

Tiempo total disponible (h)	Tiempo total indisponible (h)	Motivo intervención

Responsable medición	Firma

Fuente. Elaboración propia.

La descripción que indica la figura 62, indica los campos del formato de control de disponibilidad mecánica y tiempos de intervención se orienta a registrar con precisión la información asociada a las paradas de la chancadora. El campo “Fecha inicio intervención” consigna el momento exacto en que comienza el trabajo, mientras que “Fecha fin intervención” marca su finalización real. “Equipo” identifica la chancadora intervenida, y

“Tipo de intervención” especifica si se trata de una acción programada, planificada con antelación, o no programada, que corresponde a un correctivo de urgencia. La “Duración total intervención (h)” refleja el tiempo total transcurrido desde el inicio hasta el fin de la actividad. La “Disponibilidad mecánica (%)” se obtiene mediante el cálculo del tiempo disponible sobre el tiempo total multiplicado por 100, y se complementa con el “Tiempo total disponible (h)”, que indica las horas en las que el equipo estuvo operativo, y el “Tiempo total indisponible (h)”, que cuantifica las horas fuera de servicio debido a mantenimiento o fallas. El “Motivo intervención” describe de forma breve la causa de la parada, mientras que “Responsable registro” identifica al trabajador que consolida y valida la información, con su nombre y cargo. El campo “Fuente de datos (SCADA / Parte diario)” especifica el origen de la información registrada, y finalmente, “Firma” corresponde a la rúbrica física o digital del responsable del registro.

– Elaboración y guía de uso del checklist

El formato propuesto para el Checklist Predictivo QA/QC está diseñado para ser llenado en campo de manera secuencial, siguiendo un recorrido por todos los puntos de control definidos en el layout de zonas N/S/E/O. La columna de fecha se utiliza para registrar el día exacto de la inspección, mientras que en el campo de equipo se anota el código o nombre específico de la chancadora inspeccionada, por ejemplo, NT 60”x113” N°1. La ubicación se indica seleccionando el cuadrante correspondiente, y en el punto de control se especifica si la medición corresponde a P1, P2 o P3 según el esquema de referencia.

Figura 63.

Checklist predictivo QA/QC

Fecha	Equipo	Zona (N/S/E/O)	
___/___/___			

Punto de control	Parámetro evaluado	Método de verificación	

Valor medido	Unidad	Límite de aceptación	Cumple (Sí/No)

Observaciones	Evidencia Fotográfica / ID Escaneo

Responsable medición	Firma

Nota. Elaboración propia.

En el parámetro evaluado de la figura 63, se detalla la variable técnica que está siendo medida, como vibración, temperatura, espesor, torque, presencia de fisuras, porcentaje de backing o alineación. El método de verificación indica la técnica o el equipo utilizado, ya sea un escáner 3D portátil, una cámara termográfica, un equipo de ultrasonido o un medidor de torque calibrado. El valor medido corresponde a la lectura exacta obtenida en la inspección, expresada en la unidad correspondiente, que puede ser milímetros, porcentaje, grados Celsius, Newton metro, entre otras.

El límite de aceptación se establece según estándares o normas técnicas como ASTM E1444 o ISO 9934, y se utiliza para determinar si el valor medido cumple con los criterios definidos. En la columna de cumplimiento se consigna “Sí” o “No” dependiendo de si el valor está dentro del rango permitido. Las observaciones se utilizan para anotar hallazgos relevantes o condiciones atípicas detectadas durante la inspección. La columna de evidencia

fotográfica o ID de escaneo contiene el código único que vincula la medición con su registro visual o archivo 3D almacenado, asegurando la trazabilidad.

Finalmente, el campo de responsable identifica con nombre y cargo al inspector que ejecutó la medición, y la columna de firma valida la autenticidad de la información consignada. Este checklist debe ser complementado con un sistema de almacenamiento digital donde las evidencias se guarden bajo el mismo ID consignado en el formato. El responsable de mantenimiento predictivo consolidará semanalmente la información para analizar tendencias y generar acciones correctivas inmediatas cuando se detecten valores fuera de especificación. El documento deberá conservarse tanto en formato físico como digital para cumplir con auditorías QA/QC internas y externas.

La inclusión de un ingeniero de confiabilidad desde esta etapa garantiza que las variables de monitoreo predictivo queden integradas desde el inicio, evitando que se conviertan en controles reactivos. El planner coordina con el jefe de mantenimiento para que cada actividad y verificación esté alineada al cronograma global, minimizando tiempos muertos. El panel de control en campo facilita decisiones rápidas durante la intervención y el checklist predictivo asegura que no se omitan inspecciones clave para la vida útil de los cóncavos.

3.1.16.1.2 Instrumentación predictiva

Para implementar un sistema de instrumentación predictiva eficaz, se requiere definir el personal especializado responsable de la medición, control y validación de datos en campo.

Tabla 38

Personal humano requerido para instrumentación

Cargo	Cantidad	Función principal
Técnico de metrología	1	Calibrar y configurar equipos de medición.
Ingeniero de QA/QC	1	Supervisar mediciones y asegurar registros precisos.
Operador de escáner 3D	1	Realizar modelado previo y posterior del área de montaje.

Nota. Elaboración propia.

Según la tabla 38 el técnico de metrología asegura que cada equipo de medición opere dentro de tolerancias, mientras que el operador de escáner 3D permite obtener un registro

dimensional exacto del área antes y después del montaje, esencial para detectar desplazamientos futuros.

Para asegurar un control predictivo confiable, se definen los equipos e instrumentos necesarios para la medición y monitoreo de variables críticas durante la intervención.

Tabla 39

Requerimientos materiales, equipos y herramientas

Equipo/Herramienta	Cantidad	Especificación técnica
Termómetros infrarrojos	2	Rango -20 °C a 550 °C, precisión ± 2 %.
Dataloggers T°/HR	2	Registro continuo cada 5 min, memoria ≥ 30 días.
Analizador de vibraciones portátil	1	FFT 10 kHz, 4 canales.
Escáner 3D portátil	1	Precisión $\pm 0,1$ mm.
Torquímetros calibrados	2	Rango 200–2000 Nm, certificado vigente.

Nota. Elaboración propia.

Según la tabla 39, se usan dos termómetros y dos dataloggers para cubrir simultáneamente el casco y el ambiente, generando un perfil térmico confiable. El analizador de vibraciones y los torquímetros calibrados son críticos para correlacionar el montaje con el comportamiento operativo posterior.

En el PETS actual de la unidad minera de referencia no existe un procedimiento equivalente al subcapítulo de Instrumentación predictiva que incluya la preparación, calibración y verificación de equipos de medición para parámetros críticos y predictivos como temperatura, humedad, gaps, torque, vibraciones o alineación tridimensional. Esto es una novedad incorporada en el PETS 2.0, adaptada al contexto operacional de la unidad minera de referencia y específicamente a sus chancadoras primarias Traylor NT 60"x113".

En el PETS 2.0, la calibración de equipos se realiza siguiendo un protocolo estricto para garantizar que cada instrumento opere dentro de las tolerancias metrológicas establecidas. La calibración comienza con la verificación del certificado vigente del equipo (conforme a normas ISO 17025 o equivalente) y la revisión de su historial de mantenimiento y ajustes. A continuación, el técnico de metrología conecta el equipo a un patrón de referencia calibrado (por ejemplo, un bloque patrón para medición dimensional o un

dinamómetro patrón para torquímetros) y ajusta el equipo hasta que las lecturas coincidan con el valor nominal del patrón dentro del margen de error permitido.

La verificación de la calibración se efectúa inmediatamente después, repitiendo las mediciones con el mismo patrón y también con un segundo patrón independiente, para confirmar que el equipo mantiene la precisión en todo el rango de uso. En entornos mineros como la presente unidad minera de referencia, esta verificación también incluye pruebas funcionales en condiciones simuladas de campo (polvo, vibración y temperatura ambiente) para validar que el equipo no se descalibre bajo condiciones reales de operación. La calibración de equipos de medición tiene el siguiente procedimiento:

- Revisar certificados de calibración vigentes y trazabilidad del equipo.
- Inspeccionar visualmente el instrumento para detectar daños físicos o suciedad que pueda afectar la medición.
- Encender y estabilizar el equipo durante el tiempo recomendado por el fabricante.
- Conectar o aplicar el patrón de referencia adecuado según el tipo de medición (dimensional, torque, temperatura, vibración, etc.).
- Ajustar el equipo hasta que las lecturas coincidan con el patrón dentro de la tolerancia especificada.
- Registrar las lecturas iniciales y finales en el formato de control de calibración.
- Repetir la prueba con un segundo patrón o en un rango diferente para verificar consistencia.
- Etiquetar el equipo con la fecha de calibración y la fecha de próxima calibración.
- Archivar el registro digital y físico en el sistema de gestión documental del área de mantenimiento predictivo.

A continuación, se presenta el formato para el checklist de calibración y verificación para la instrumentación predictiva, este checklist se debe completar cada vez que un equipo de medición (por ejemplo: escáner 3D, termómetro infrarrojo, torquímetro, analizador de vibraciones, datalogger) sea calibrado o verificado antes de ser usado en inspecciones críticas como el cambio de cóncavos de la chancadora primaria. En la unidad minera de referencia, se recomienda llenarlo en tres momentos clave:

- Previo a campaña de cambio de cóncavos.
- Después de cualquier reparación o ajuste del equipo.
- En la fecha programada de calibración periódica según el plan metrológico.

Figura 64.

Checklist de calibración y verificación

Fecha	Código del Equipo	Tipo de Equipo	Marca / Modelo	N° Serie
___/___/___				

Paso / Ítem de verificación	Cumplimiento (Sí/No)	Observaciones	Firma Técnico	Firma QA/QC
Verificar disponibilidad del equipo de medición en el inventario y su certificación vigente conforme a ISO 17025.				
Inspeccionar visualmente el equipo para detectar daños, suciedad, desgaste de conectores o alteraciones físicas.				
Encender el equipo y permitir el tiempo de estabilización recomendado por el fabricante antes de cualquier medición.				
Configurar rango de medición, unidades y parámetros de registro conforme a los estándares operativos de Las Bambas.				
Seleccionar y preparar patrón de referencia certificado (bloque patrón, dinamómetro, sensor patrón) trazable a ISO 17025.				
Aplicar el patrón de referencia al equipo de medición siguiendo el método de calibración especificado por el fabricante.				
Registrar lecturas iniciales y compararlas con los valores nominales del patrón, evaluando desviaciones.				
Ajustar el equipo si la desviación excede el límite permitido por especificaciones técnicas.				
Realizar verificación secundaria usando un patrón independiente para confirmar la exactitud y repetibilidad.				
Registrar condiciones ambientales durante la calibración (temperatura, humedad relativa) con datalogger calibrado.				
Etiquetar el equipo con la fecha de calibración, próxima calibración y estado de aptitud para uso.				
Archivar digitalmente el registro de calibración en el sistema de gestión documental de mantenimiento predictivo.				
Realizar pruebas funcionales en condiciones simuladas de operación minera (polvo, vibración, temperatura ambiente).				
Verificar compatibilidad del equipo calibrado con los formatos y software de adquisición de datos de Las Bambas.				
Confirmar con el área de QA/QC que el equipo queda autorizado para uso en la inspección de cóncavos.				
Documentar en observaciones cualquier desviación, reparación o condición especial detectada durante la calibración.				

Nota. Elaboración propia.

El checklist de la figura 64, debe ser completado únicamente por personal calificado en metrología y mantenimiento predictivo, bajo la supervisión del responsable del área de QA/QC. El llenado inicia con la identificación del equipo, registrando la fecha de la calibración, el código único asignado en el inventario metrológico, el tipo de equipo, su marca, modelo y número de serie. Cada ítem del checklist corresponde a un paso específico

del proceso de calibración o verificación. Las condiciones ambientales, como temperatura y humedad relativa, deben ser medidas con un datalogger calibrado y anotadas en el momento de la ejecución, ya que estas pueden influir en la precisión de las mediciones. El patrón de referencia empleado debe contar con certificación vigente y trazabilidad a ISO 17025, y su número de certificado debe quedar registrado. En la columna de cumplimiento, se marcará “Sí” cuando el paso se ejecute de manera conforme y “No” cuando existan desviaciones o no se cumpla lo establecido, en cuyo caso no se debe autorizar el uso del equipo hasta corregir la anomalía. Las observaciones deben contener detalles sobre ajustes realizados, desviaciones detectadas o condiciones especiales encontradas. Finalmente, el documento debe contar con la firma del técnico ejecutor y la validación del responsable de QA/QC, archivándose tanto en formato físico como digital en el sistema documental corporativo.

Escáner 3D Portátil – Creaform HandySCAN 307 Elite

- Normas de referencia: ISO 10360-8, ISO 17025 (trazabilidad de patrones).
- Tolerancia aceptable: $\pm 0,025$ mm sobre patrón tridimensional certificado.
- Procedimiento de calibración: Realizar en ambiente controlado (20 ± 2 °C y HR 40-60%), utilizando patrón volumétrico certificado. Configurar software VXelements, ejecutar autocalibración, validar resultados comparando con el patrón.
- Frecuencia de calibración: Antes de cada campaña y cada 6 meses.
- Consideraciones especiales: Evitar fuentes de vibración durante el proceso; comprobar limpieza de ópticas; registrar condiciones ambientales en checklist.
-

Figura 65.

Escáner 3D Portátil Creaform HandySCAN 307 Elite



Nota. Adaptado de Creaform.

Torquímetro Digital - Norbar ProTronic Plus 340

- Normas de referencia: ISO 6789:2017.
- Tolerancia aceptable: ± 2 % de la lectura.
- Procedimiento de calibración: Usar banco de calibración de torque certificado; aplicar cargas de verificación en el 20 %, 60 % y 100 % de la escala. Ajustar si se excede tolerancia.
- Frecuencia de calibración: Cada 6 meses o tras 5000 ciclos de uso.
- Consideraciones especiales: Configurar unidad de medida según plan (Nm o lb-ft); verificar batería; registrar fecha de próxima calibración en etiqueta del equipo.

Figura 66.

Norbar ProTronic Plus 340



Nota. Adaptado de Norbar.

Analizador de Vibraciones Portátil – Fluke 805 FC

- Normas de referencia: ISO 10816 / ISO 20816.
- Tolerancia aceptable: $\pm 5\%$ en amplitud y $\pm 1\%$ en frecuencia.
- Procedimiento de calibración: Conectar a simulador de vibraciones calibrado (shaker), aplicar señal patrón en distintos niveles, comparar lectura y ajustar si es necesario.
- Frecuencia de calibración: Anual o posterior a reparaciones.
- Consideraciones especiales: Comprobar firmware actualizado; verificar sensibilidad del sensor; registrar compatibilidad con software de análisis interno.

Figura 67.

Analizador de vibraciones Fluke 805 FC



Fuente. Adaptado de Fluke.

Termómetro Infrarrojo – Fluke 572-2

- Normas de referencia: ASTM E2847, ISO/IEC 17025.
- Tolerancia aceptable: $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $\pm 1\%$ de la lectura, lo que sea mayor.
- Procedimiento de calibración: Comparar lecturas contra termómetro patrón de contacto en superficie controlada; ajustar emisividad según material del cóncavo (0,95 recomendado para acero pintado).
- Frecuencia de calibración: Anual o si se detecta desviación.

- Consideraciones especiales: Evitar mediciones a través de polvo o vapor; limpiar lente previo a uso; registrar distancia de medición para repetibilidad.

Figura 68.

Termómetro de infrarrojos para altas temperaturas



Nota. Fluke 572-2.

Datalogger Temp/HR – Testo 174H

- Normas de referencia: ISO 7726 (condiciones ambientales).
- Tolerancia aceptable: $\pm 0,4$ °C en temperatura, ± 2 % HR en humedad.
- Procedimiento de calibración: En cámara climática certificada, exponer a 3 puntos de temperatura (10 °C, 25 °C, 40 °C) y humedad (35 %, 60 %, 80 % HR); registrar desviaciones.
- Frecuencia de calibración: Anual.
- Consideraciones especiales: Sincronizar hora antes de uso; verificar autonomía de batería; asegurar intervalo de registro acorde a duración de campaña.

Figura 69.

Registrador de datos Temperatura y humedad



Nota. Testo 174H.

Micrómetros de Precisión – Mitutoyo Serie 293

- Normas de referencia: ISO 3611, ISO 17025.
- Tolerancia aceptable: $\pm 0,002$ mm.
- Procedimiento de calibración: Usar bloques patrón certificados en 3 puntos (mínimo, medio y máximo del rango); registrar desviaciones y ajustar según procedimiento del fabricante.
- Frecuencia de calibración: Anual o cada 2000 mediciones.
- Consideraciones especiales: Evitar golpes y exposición a polvo; almacenar en estuche protector; limpiar caras de medición antes y después de uso.

Figura 70.

Micrómetro digital Serie 293



Nota. Mitutoyo.

3.1.16.1.3 Control predictivo pre-intervención

Ejecución de mediciones previas para identificar condiciones anómalas que podrían afectar la nueva instalación:

- Análisis de vibraciones del spider y main shaft.
- Termografía infrarroja para detectar puntos de calor anormales.
- Escaneo 3D del desgaste interno de la cámara de chancado.
- Muestreo tribológico del aceite del main shaft para detectar partículas metálicas.

Para garantizar un control previo efectivo, se establece el personal especializado encargado de la evaluación predictiva antes de la intervención.

Tabla 40

Personal humano requerido para control pre-intervención

Cargo	Cantidad	Función principal
Ingeniero de confiabilidad	1	Definir puntos de medición y criterios de aceptación.
Analista de vibraciones	1	Realizar mediciones espectrales y análisis.
Técnico tribólogo	1	Tomar y analizar muestras de aceite.
Operador de dron/escáner	1	Capturar nubes de puntos para evaluación dimensional.

Nota. Elaboración propia.

Para asegurar una evaluación previa efectiva, se definen los equipos e instrumentos necesarios para el monitoreo predictivo antes de la intervención.

Tabla 41

Requerimientos materiales, equipos y herramientas

Equipo/Herramienta	Cantidad	Especificación técnica
Analizador de vibraciones	1	Sensibilidad <0,1 g, rango 0,5–10 kHz.
Cámara termográfica	1	Resolución térmica ≤ 50 mK.
Kit de muestreo tribológico	1	Incluye frascos estériles y etiquetas QR.
Dron industrial	1	Cámara 4K y LIDAR.

Nota. Elaboración propia.

Aquí el objetivo es anticipar posibles fallas antes de que los nuevos cóncavos entren en operación. El analista de vibraciones identifica problemas de alineación o desbalanceo, el técnico tribólogo detecta desgaste interno mediante el análisis de partículas metálicas, y el operador de dron/escáner permite mapear con precisión el desgaste de la cámara. La cámara termográfica aporta datos para detectar anomalías de temperatura que puedan estar asociadas a fricción excesiva o problemas de lubricación.

3.1.16.1.4 Desmontaje controlado

3.1.16.1.4.1 Inspección previa

Antes de iniciar el desmontaje, se realiza una inspección integral con técnicas predictivas para evaluar la condición real de los cóncavos, su asiento y la carcasa de la chancadora. Esta etapa busca identificar anomalías mediante mediciones de vibración, termografía, escaneo 3D y análisis tribológico, lo que permite anticipar fallas y ajustar el alcance del desmontaje. La información recogida servirá como línea base para el análisis comparativo post-intervención.

Tabla 42

Personal humano requerido para inspección previa desmontaje

Cargo	Cantidad	Función principal
Ingeniero de confiabilidad	1	Coordinar inspección y definir criterios de aceptación.
Analista de vibraciones	1	Medir y evaluar patrones vibratorios previos al desmontaje.
Técnico de termografía	1	Detectar puntos de calor anómalos que indiquen fricción o desgaste.
Técnico tribólogo	1	Analizar muestras de aceite previo al desmontaje.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 43*Requerimientos para inspección previa desmontaje*

Equipo/Herramienta	Cantidad	Especificación técnica
Analizador de vibraciones	1	FFT, rango 0,5–10 kHz, sensibilidad <0,1 g.
Cámara termográfica	1	Resolución ≤ 50 mK, rango -20 a 350 °C.
Kit de muestreo tribológico	1	Frascos estériles con etiquetado QR.
Escáner 3D portátil	1	Precisión $\pm 0,1$ mm.

Nota. Elaboración propia.

Esta inspección previa evita desmontajes innecesarios si se detecta un problema localizado. El uso de escáner 3D permite registrar la geometría real de los cóncavos y compararla con modelos CAD, identificando zonas con pérdida de material anormal. La cámara termográfica puede señalar puntos calientes derivados de fricción por desplazamientos o mal asentamiento, y el análisis de aceite permite correlacionar el desgaste interno con la condición de operación antes del desmontaje.

Tabla 44

Criterios, rangos y procedimientos

Parámetro evaluado	Procedimiento de medición	Criterio de aceptación	Norma / referencia
Espesor de cóncavos	Escáner 3D portátil (precisión $\pm 0,1$ mm) en puntos predefinidos N/S/E/O (P1, P2, P3)	Desgaste $\leq 20\%$ en zonas críticas Desgaste $\geq 80\%$ de espesor remanente antes de campaña	Interno Unidad minera de referencia + patrón CAD inicial
Patrón vibratorio	Analizador de vibraciones FFT (0,5–10 kHz, sens. $< 0,1$ g), medición en carcasa, eje principal y asiento de cóncavos	RMS global $< 4,5$ mm/s; ausencia de picos asociados a defectos en rodamientos o engranajes; sin aumento $> 15\%$ respecto histórico	ISO 10816-3 / ISO 20816-1
Puntos de calor	Cámara termográfica (< 50 mK, -20 °C a 350 °C), inspección en carcasa y asiento	Diferencia térmica ≤ 15 °C entre zonas similares; sin puntos calientes localizados > 20 °C sobre promedio	ISO 18434-1
Análisis de aceite	Muestreo tribológico con frasco estéril y etiquetado QR, análisis ICP y PQI en laboratorio	Elementos de desgaste $\leq$ límites internos Viscosidad dentro $\pm 10\%$ del valor nominal; PQI ≤ 30	ASTM D5185, ISO 4406
Fisuras / deformaciones	Inspección visual directa y revisión de modelo 3D comparado con CAD	Ausencia de fisuras críticas; deformación ≤ 2 mm respecto a plano de referencia	ASTM E1444 / ISO 9934

Nota. Elaboración propia.

El ingeniero de confiabilidad deberá establecer criterios de aceptación que definan cuándo los cóncavos y su asiento pueden continuar en operación sin comprometer la seguridad ni la eficiencia. Estos criterios incluyen límites máximos de desgaste permitidos según el espesor medido, niveles de vibración por debajo de umbrales críticos (por ejemplo, valores RMS globales menores a 4.5 mm/s para frecuencias operativas específicas), y ausencia de fisuras o deformaciones estructurales detectadas por inspección visual o escaneo 3D. También se consideran aceptables ligeras variaciones térmicas siempre que no superen diferencias mayores a 15 °C entre zonas similares.

Los patrones vibratorios a evaluar se determinan mediante un analizador de

vibraciones portátil FFT que registra el espectro de frecuencias en puntos definidos sobre el eje principal, la carcasa y la zona de acople de cóncavos. Se buscarán incrementos en



frecuencias armónicas asociadas a desalineación, desequilibrio o resonancia estructural, así como picos a frecuencias específicas que correspondan a fallas incipientes en cojinetes o engranajes. La tendencia de estos valores en comparación con registros históricos servirá para decidir si es necesario un desmontaje inmediato.

La detección de puntos de calor anómalos se realiza con una cámara termográfica calibrada, que permite obtener imágenes infrarrojas de la superficie interna de la carcasa y la zona de asiento de los cóncavos. Las zonas que presenten temperaturas significativamente superiores al promedio circundante pueden indicar fricción excesiva, contacto metálico no deseado o flujo anormal de material. El análisis se basa en la comparación con un patrón térmico esperado para la operación nominal, ajustado por la carga y las condiciones de alimentación de mineral.

El análisis de aceite se efectúa recolectando muestras con un kit tribológico estéril, siguiendo un protocolo para evitar contaminación. Estas muestras se envían al laboratorio, donde se determinan concentraciones de elementos de desgaste (Fe, Cu, Cr, Pb) mediante espectrometría ICP, así como contaminantes (Si, Na, agua) y propiedades físicas (viscosidad, PQI). El resultado se compara con valores de referencia internos y externos (ASTM D5185 y normas ISO relacionadas) para determinar el estado de lubricación y la presencia de desgaste anormal.

3.1.16.1.4.2 Desmontaje de elementos superiores (spider y cúpula)

El retiro de la cúpula y el spider es una operación crítica, ya que involucra componentes estructurales que soportan cargas importantes. Un enfoque predictivo incorpora instrumentación para monitorear las cargas de izaje y posibles desplazamientos estructurales durante la maniobra, con el fin de evitar deformaciones permanentes y asegurar que las piezas puedan reinstalarse sin problemas de alineación. Para ello se necesitan personal y herramientas.

Tabla 45*Personal humano requerido para desmontaje superior*

Cargo	Cantidad	Función principal
Supervisor mecánico	1	Dirigir desmontaje y asegurar integridad estructural.
Operadores de izaje	2	Maniobrar grúa y accesorios de elevación.
Técnico de metrología	1	Medir deformaciones y asentamientos durante el izaje.

Nota. Elaboración propia.**Tabla 46***Requerimientos para desmontaje superior*

Equipo/Herramienta	Cantidad	Especificación técnica
Grúa puente	1	Capacidad ≥ 30 t, certificado vigente.
Celdas de carga inalámbricas	2	Rango 0–50 t, precisión ± 1 %.
Sensores de desplazamiento láser	2	Precisión $\pm 0,05$ mm.
Llaves hidráulicas	2	Rango 200–2000 Nm.

Nota. Elaboración propia.

La adición de celdas de carga y sensores láser permite monitorear en tiempo real las fuerzas y desplazamientos durante el izaje, lo que reduce el riesgo de esfuerzos no previstos que puedan dañar la estructura. La supervisión metrológica evita micro deformaciones en la cúpula y el spider, que luego podrían traducirse en problemas de alineación al reinstalar.

El desmontaje del spider y la cúpula en las chancadoras primarias Traylor NT 60” x 113” requiere un control estricto de integridad estructural y seguridad. Este procedimiento contempla el uso de instrumentación predictiva para monitorear en tiempo real las cargas de izaje y los desplazamientos estructurales, evitando deformaciones permanentes que comprometan el reensamble.

Figura 71.

Checklist técnico para el desmontaje de elementos superiores

Unidad Minera:		Chancadora:	
Fecha:		Supervisor mecánico:	

Nº	Actividad	Detalle técnico / Rango de aceptación	Verificación (✓/X)	Observaciones
1	Revisión documental	Planos de montaje, reportes de inspección previa (termografía, vibraciones, escaneo 3D, tribología).		
2	Criterios de aceptación definidos	- Carga ≤ 85 % de capacidad nominal de celdas. - Desplazamiento $\leq \pm 1,5$ mm. - Alineación $\leq \pm 0,3^\circ$.		
3	Instalación de celdas de carga inalámbricas (Straightpoint Radiolink Plus)	Ubicadas en puntos de izaje designados. Calibración vigente. Precisión ± 1 %.		
4	Instalación de sensores de desplazamiento láser (Keyence LK-G5000)	Precisión $\pm 0,05$ mm. Ubicados en posiciones opuestas para medición de flexión y asentamiento.		
5	Verificación de calibración de todos los instrumentos	Comprobación contra patrones certificados. Certificados vigentes y registrados.		
6	Preparación de grúa puente (Konecranes CXT 5025)	Capacidad ≥ 30 t. Certificado vigente OSHAS. Inspección visual de ganchos, eslingas y estrobos.		
7	Retiro de elementos auxiliares	Guardas, conexiones eléctricas, mangueras hidráulicas, fijaciones secundarias retiradas.		
8	Afloje de pernos con llaves hidráulicas (HYTORC AVANTI)	Patrón cruzado para evitar tensiones desiguales. Rango 200–2000 Nm.		
9	Maniobra de izaje controlada	Levante lento, monitoreo en tiempo real de cargas y desplazamientos.		
10	Pausa por excedencia de parámetros	Detener si carga > 90 % prevista o desplazamiento $> \pm 1,5$ mm.		
11	Traslado de piezas a zona de almacenamiento seguro	Uso de soportes especiales con amortiguadores de goma y topes de madera.		
12	Etiquetado y registro de piezas	Código QR con fecha, equipo y responsable.		

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con la figura 71, el desmontaje de los elementos superiores de la chancadora primaria, incluyendo el spider y la cúpula, constituye una de las maniobras más

críticas del procedimiento, dado el peso y la importancia estructural de estos componentes. La aplicación de un enfoque metrológico y predictivo, mediante el uso de celdas de carga, sensores láser y control estricto de torque, garantiza que las operaciones de izaje se realicen dentro de parámetros seguros, evitando deformaciones y daños que comprometan la integridad estructural o dificulten el posterior montaje. Gracias a la integración de estos controles con procedimientos estandarizados y equipos calibrados, se asegura la preservación de las tolerancias de alineación, optimizando la confiabilidad y disponibilidad de la chancadora en el contexto operativo exigente de la unidad minera de referencia.

3.1.16.1.4.3 Retiro de cóncavos desgastados con inspección concurrente

Durante el desmontaje de los cóncavos desgastados, se aplican técnicas de inspección concurrente para detectar daños en el casco y validar el estado del respaldo epóxico remanente. Esto incluye ensayos no destructivos, mediciones geométricas y registros de vibración en tiempo real. Con este enfoque se evita reinstalar nuevos cóncavos sobre superficies dañadas o fuera de tolerancia, lo que incrementaría el riesgo de fallas prematuras.

Tabla 47

Personal humano requerido para retiro de cóncavos

Cargo	Cantidad	Función principal
Supervisor QA/QC	1	Garantizar cumplimiento de checklist de retiro.
Técnico inspector NDT	1	Realizar ensayos no destructivos en la carcasa.
Operarios de mantenimiento	3	Ejecutar el desmontaje y manipulación.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 48*Requerimientos para retiro de cóncavos*

Equipo/Herramienta	Cantidad	Especificación técnica
Kit de ensayos NDT (líquidos penetrantes y ultrasonido)	1	ASTM E165, ASTM E1444.
Escáner 3D portátil	1	Precisión $\pm 0,1$ mm.
Monitores de vibración portátiles	2	Análisis en sitio durante desmontaje.
Grilletes y eslingas certificadas	6	Capacidad ≥ 5 t.

Nota. Elaboración propia.

El uso de ensayos no destructivos durante el retiro permite detectar grietas o fisuras en la carcasa antes de instalar nuevos cóncavos, reduciendo el riesgo de fallas tempranas. El escáner 3D permite generar un modelo digital del estado interno de la cámara, que servirá como referencia para futuras comparaciones y para validar la calidad del asiento del nuevo respaldo epóxico.

3.1.16.1.5 Preparación de superficies y verificación dimensional

3.1.16.1.5.1 Limpieza y preparación de superficies de asiento

Este subproceso se centra en garantizar que las superficies del casco y las zonas de asiento de los cóncavos estén libres de restos de respaldo epóxico, óxidos, partículas abrasivas y contaminantes. Se emplean métodos mecánicos (lijado, fresado fino) y químicos (limpiadores no corrosivos), supervisados con inspección visual y endoscópica para detectar microfisuras o irregularidades. El enfoque predictivo incluye la toma de fotografías de alta resolución y escaneo 3D previo al montaje, lo que permitirá comparar con mediciones futuras y evaluar asentamientos o desplazamientos.

Tabla 49*Personal humano requerido para preparación de superficie*

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Supervisor de mantenimiento	1	Supervisar el cumplimiento del procedimiento y estándares predictivos	Con conocimiento en QA/QC y técnicas de inspección
Técnico mecánico especializado	2	Ejecución de limpieza mecánica y preparación de superficies	Experiencia en chancadoras giratorias
Inspector NDT (ensayo de partículas magnéticas)	1	Detección de microfisuras mediante líquidos penetrantes	Certificación nivel II mínima
Asistente de mantenimiento	1	Apoyo en manipulación de herramientas y limpieza	Entrenado en seguridad industrial
Fotógrafo técnico / operador de escáner 3D	1	Registro visual y modelado tridimensional de superficies	Manejo de software CAD

Nota. Elaboración propia.**Tabla 50***Requerimientos para preparación de superficie*

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Amoladora angular con disco abrasivo	2	220V, disco grano fino	Remoción de residuos de epóxico Registro dimensional
Escáner 3D portátil	1	Precisión $\pm 0,1$ mm	para comparación predictiva
Kit de inspección endoscópica	1	Cámara HD, luz LED	Verificación de zonas no visibles
Juego de cepillos metálicos	4	Acero inoxidable	Limpieza manual de superficies
Limpiador industrial no corrosivo	10 L	Base neutra	Eliminación de contaminantes
Aspiradora industrial	1	Filtro HEPA	Retiro de partículas finas
EPP completo	-	Casco, lentes, guantes, respirador, arnés	Seguridad del personal

Nota. Elaboración propia.



De acuerdo con la tabla 49 y 50, la cantidad de técnicos y equipos propuestos busca optimizar el tiempo de intervención sin comprometer la calidad del proceso. El uso de escaneo 3D en esta etapa es clave para establecer un patrón geométrico de referencia, permitiendo en futuras inspecciones detectar asentamientos o deformaciones antes de que generen fallas. La inclusión de un inspector NDT en esta fase asegura que no se pasen por alto microfisuras que, bajo carga, podrían provocar fallas catastróficas.

Ahora se establece un formato para el procedimiento del ensayo de líquidos penetrantes en asientos de cóncavos, con el objetivo de detectar microfisuras y discontinuidades superficiales en las zonas de asiento de cóncavos, carcasa y componentes estructurales de la chancadora primaria, asegurando la integridad antes del montaje. Aplicable a las superficies metálicas de asiento del casco y áreas críticas de contacto de los cóncavos en la chancadora Traylor NT 60" x 113", posteriores a la limpieza mecánica y química.

Figura 72.

Procedimiento de inspección por líquidos penetrantes

Unidad Minera:		Chancadora:	
Fecha:	__/__/__	Firma Inspector NDT nivel II:	
Fecha:	__/__/__	Firma Ingeniero de Confiabilidad:	

Nº	Actividad	Descripción detallada	Producto / Equipo	Tiempo / Parámetros	Verificación
1	Preparación de superficie	Limpieza mecánica y química de la zona de asiento de cóncavos y carcasa. Retirar óxidos, grasa y polvo con amoladora de grano fino y aspiradora industrial.	Amoladora angular, disco grano fino, aspiradora HEPA	Hasta superficie seca y libre de contaminantes	Inspección visual y tacto
2	Aplicación de limpiador	Aplicar limpiador base solvente sobre toda el área a inspeccionar. Retirar con paños sin pelusa.	Magnaflux SKC-S (Cleaner)	Evaporación 1-3 min	Superficie uniforme y sin residuos
3	Aplicación del penetrante	Pulverizar penetrante rojo visible en capa fina y continua cubriendo toda la superficie crítica.	Magnaflux SKL-SP2	Tiempo de penetración: 10-30 min (10-50 °C)	Cobertura total sin escurrimientos
4	Remoción del exceso de penetrante	Retirar el exceso con paño humedecido en SKC-S, sin aplicar directamente sobre la superficie.	Paño sin pelusa + SKC-S	Inmediato	Superficie limpia sin remover penetrante de discontinuidades
5	Aplicación de revelador	Aplicar capa fina de revelador seco sobre toda la zona inspeccionada.	Magnaflux SKD-S2	Esperar 7-10 min para revelado	Capa blanca uniforme
6	Inspección visual	Evaluar indicaciones con iluminación ≥ 1000 lux. Registrar ubicación y características de cada indicación.	Linterna LED industrial certificada	Durante el tiempo de revelado	Registro fotográfico y en croquis
7	Registro y liberación	Completar formato NDT con resultados, firmar por inspector NDT Nivel II y ingeniero de confiabilidad.	Formato control NDT	Inmediato post inspección	Firma de ambas partes

Nota. Elaboración propia.

Según la figura 72, la ejecución del procedimiento de inspección por líquidos penetrantes se empleará el kit LP de la marca Magnaflux, compuesto por el limpiador y removedor SKC-S, utilizado para eliminar impurezas, aceites o partículas que puedan

obstruir la detección de discontinuidades; el penetrante rojo visible SKL-SP2, que permite identificar fisuras superficiales gracias a su alto contraste cromático; y el revelador SKD-S2, encargado de absorber el penetrante retenido en las fisuras y generar un patrón visible para su evaluación. Como soporte a la aplicación, se utilizarán paños sin pelusa para evitar contaminaciones cruzadas y asegurar una limpieza óptima de la superficie, así como un sistema de iluminación LED con intensidad mínima de 1000 lux, que garantiza la adecuada visibilidad de indicaciones. Adicionalmente, se contará con paños y guantes desechables para prevenir transferencias de contaminantes y proteger la integridad de la inspección, junto con el uso obligatorio de equipo de protección personal completo, que incluye casco de seguridad, lentes de protección, guantes de nitrilo resistentes a productos químicos y respirador para minimizar la exposición a vapores durante el proceso.

El producto SKC-S (Limpiador / Removedor) se utiliza para la limpieza previa de la superficie y para eliminar el exceso de penetrante.

Figura 73.

Ficha técnica SKC-S

Limpiador y Removedor para NDT

SKC-S es un limpiador/removedor base solvente aprobado para END , para realizar una limpieza previa antes de los ensayos no destructivos, elimina el exceso de líquido penetrante superficial de un área de inspección antes de aplicar el revelador durante la inspección por líquidos penetrantes.

Este removedor base solvente no halogenado puede usarse para eliminar aceites, grasas y otros contaminantes. SKC-S seca rápidamente y no deja residuos; además, cumple con los requisitos de bajo contenido de residuos para inspecciones por líquidos penetrantes aeroespaciales y para END.



Nota. Magnaflux.

El producto SKL-SP2 (Penetrante rojo visible) es el líquido penetrante de color rojo que se introduce en las discontinuidades de la superficie.

Figura 74.

Ficha técnica SKL-SP2

Penetrante Visible Removible al Solvente

SKL-SP2 es un penetrante portable removible al solvente, particularmente para operaciones de soldadura, y es pos-emulsificable para una mayor resolución de indicaciones de defectos. Produce un contraste de color rojo visible y tiene características de penetración sobresalientes. El SKL-SP2 es muy confiable para la ubicación de defectos abiertos e interrupciones superficiales y puede usarse en cerámicas no porosas y materiales similares. Se usa típicamente en soldaduras, forjas, recipientes a presión, piezas de fundición, trabajos en general realizados en metales, pruebas de filtración y en aplicaciones de plantas de energía y construcción.

El SKL-SP2 se incluye en la lista de productos calificados por las normas QPL SAE AMS 2644.



Nota. Magnaflux.

El producto SKD-S2 (Revelador) crea una capa blanca que extrae el penetrante de las fisuras para hacerlas visibles.

Revelador Base Solvente

SKD-S2, es un revelador blanco brillante, crea un fondo blanco opaco para la inspección por líquidos penetrantes de alto contraste, para generar indicaciones confiables más sólidas y claras.

Compatible con aleaciones especiales, como el acero inoxidable, aluminio, magnesio y titanio, SKD-S2 es un revelador no halogenado que puede usarse con penetrantes de tipo 1 y 2. Este revelador solvente cumple con los requisitos del sector aeroespacial y nuclear, así como con las principales especificaciones para END, incluida la norma ISO 3452.

SKD-S2 permite acelerar el proceso de inspección gracias a su fácil distribución, secado rápido, rápida generación de indicaciones y fácil limpieza posterior a la inspección. Es ideal para talleres mecánicos, pruebas de soldadura y aplicaciones en el campo.

SKD-S2 aparece en la lista de productos calificados por las normas QPL, SAE y AMS 2644. Es aprobado por numerosas empresas del sector aeroespacial, como Boeing, GE y Honeywell.



Nota. Magnaflux.

La selección del kit Magnaflux SKL-SP2 como herramienta principal para inspección por líquidos penetrantes en los asientos y superficies críticas de los cóncavos de la chancadora primaria Traylor NT 60" x 113" responde a criterios estrictamente técnicos y operativos adaptados al entorno de la unidad minera de referencia. Este producto presenta una compatibilidad comprobada con aceros estructurales de alta resistencia, asegurando que la interacción química entre el penetrante y el sustrato no altere las propiedades mecánicas ni genere corrosión superficial. Esto es particularmente relevante para la carcasa y los

asientos de cóncavos, donde las tolerancias dimensionales y la integridad superficial son críticas para garantizar el correcto asentamiento y fijación de los elementos.

En cuanto a desempeño, el SKL-SP2 ofrece alta sensibilidad en la detección de discontinuidades superficiales, incluyendo microfisuras finas y abiertas, cumpliendo con los estándares internacionales ASTM E165 y ISO 3452. Estas normativas establecen parámetros exigentes en términos de contraste, tiempo de penetración y capacidad de revelado, lo que permite que el kit sea idóneo para inspecciones preventivas y predictivas en equipos de gran criticidad, incluso en superficies con geometrías complejas.

Desde una perspectiva operativa, el kit presenta una facilidad de aplicación en campo que elimina la necesidad de corrientes eléctricas o equipos pesados, reduciendo la logística de transporte e instalación en zonas de difícil acceso. Esto resulta esencial en la inspección de componentes que se encuentran en altura o en áreas confinadas, donde la manipulación de equipos de gran tamaño puede incrementar riesgos y tiempos de intervención. Adicionalmente, su disponibilidad comercial en el mercado peruano a través de distribuidores industriales autorizados y con soporte técnico local garantiza la continuidad operativa y la reposición inmediata de consumibles, evitando retrasos por tiempos de importación. El SKL-SP2 posee una resistencia comprobada frente a las condiciones ambientales propias de la unidad minera de referencia, soportando variaciones de temperatura y humedad sin pérdida de sensibilidad, lo que lo convierte en una solución confiable y consistente para el monitoreo de la integridad estructural de los cóncavos y sus asientos.

3.1.16.1.5.2 Verificación dimensional con equipos de medición avanzada

La correcta alineación y dimensiones dentro de tolerancia son fundamentales para evitar esfuerzos irregulares en los cóncavos. En esta etapa se emplean equipos de medición láser, ultrasonido y galgas calibradas para verificar diámetros internos, concentricidad y paralelismo. Además, se registran parámetros en una base de datos predictiva que permitirá correlacionar la geometría con el comportamiento en operación, facilitando la detección temprana de deformaciones estructurales.

Tabla 51*Personal humano requerido para medición avanzada*

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Supervisor QA/QC	1	Validar y certificar mediciones dimensionales	Experiencia en metrología industrial
Técnico metrologo	2	Ejecución de mediciones láser y calibración de equipos	Certificación en metrología
Asistente técnico	1	Apoyo logístico y manipulación de herramientas	Capacitado en manejo seguro de equipos de precisión

Nota: Elaboración propia.**Tabla 52***Equipos y Herramientas para medición avanzada*

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Estación de medición láser 3D	1	Alcance 35 m, precisión $\pm 0,05$ mm	Verificación de concentricidad y geometría general
Micrómetros y galgas calibradas	1-Set	Certificadas ISO 17025	Comprobación de tolerancias
Medidor ultrasónico de espesores	1	Rango 1–300 mm	Evaluar desgaste en zonas críticas
Software de análisis dimensional	1 licencia	Compatible con escáner 3D	Procesamiento de datos y generación de informes
Termohigrómetro	1	Precisión ± 2 % HR	Registro ambiental para correlación predictiva
EPP completo	-	Casco, guantes, gafas, respirador, arnés	Seguridad del personal

Nota: Elaboración propia.

La incorporación de medición láser y ultrasonido proporciona un control dimensional integral, minimizando el riesgo de montaje fuera de tolerancia que pueda provocar puntos de concentración de esfuerzo. El registro de datos en software especializado permite la trazabilidad histórica y facilita análisis predictivos, correlacionando deformaciones con

patrones de falla. La combinación de metrología avanzada y control ambiental refuerza la confiabilidad de esta etapa, alineándola con las mejores prácticas de mantenimiento proactivo y predictivo.



Los parámetros geométricos que deben correlacionarse en la verificación dimensional de las chancadoras primarias Traylor NT 60” x 113” incluyen las medidas críticas que influyen en la alineación, concentricidad y asentamiento de los cóncavos y sus componentes asociados.

Tabla 53

Parámetros geométricos críticos en chancadora primaria

Parámetro geométrico	Descripción técnica	Rango de aceptación	Método de medición	Justificación operacional
Diámetro interno del aro de asiento de cóncavos	Medida del diámetro central donde apoyan los cóncavos en la carcasa	$\pm 0,5$ mm respecto al valor nominal	Estación láser 3D y galgas calibradas	Garantiza un asiento uniforme que evite esfuerzos localizados y desprendimientos prematuros
Concentricidad del aro de asiento	Desviación máxima entre el centro del aro y el eje de rotación de la chancadora	$\leq 0,3$ mm	Estación láser 3D y software de análisis	Minimiza desbalance y vibraciones excesivas durante la operación
Paralelismo entre superficies de asiento	Diferencia máxima de altura entre puntos opuestos de la superficie de asiento	$\leq 0,2$ mm	Láser 3D y micrómetros de profundidad	Asegura un contacto homogéneo entre cóncavo y carcasa, reduciendo deformaciones
Alineación vertical del eje principal	Desviación angular respecto a la línea vertical de referencia	$\leq 0,05^\circ$	Estación láser 3D	Evita cargas excéntricas y desgaste desigual de cóncavos
Espesor residual de carcasa en zonas críticas	Medición del espesor restante de material en puntos de desgaste conocido	Según límite mínimo definido por fabricante (ej. ≥ 90 % del espesor original)	Ultrasonido calibrado	Permite planificar reparaciones antes de alcanzar un estado crítico de desgaste
Altura de referencia del spider	Distancia desde un punto fijo en la estructura hasta la base del spider	$\pm 0,5$ mm	Láser 3D	Sirve como referencia para reinstalación y para detectar deformaciones estructurales
Diámetro y ovalidad de la carcasa	Diferencia máxima entre diámetros medidos en distintos ejes	Ovalidad $\leq 0,3$ mm	Estación láser 3D	Controla deformaciones plásticas que dificultarían el montaje

superior

Nota. Elaboración propia.

200



La Tabla 53 presenta los parámetros geométricos críticos para la verificación dimensional de la chancadora primaria, incluyendo tolerancias, métodos de medición y justificación operativa. Estos criterios aseguran alineación, contacto uniforme y control de desgaste para un montaje confiable

3.1.16.1.6 Montaje de cóncavos nuevos

3.1.16.1.6.1 Colocación con control de gaps mediante galgas calibradas

Este subproceso consiste en posicionar los cóncavos nuevos en sus asientos, asegurando que los gaps (holguras) se mantengan dentro de las tolerancias especificadas por el fabricante. Se utilizan galgas calibradas y registros fotográficos como evidencia, además de dejar trazabilidad en fichas QA/QC. El control predictivo incluye el registro digital de las medidas y su integración en la base de datos de mantenimiento para comparaciones en futuras campañas.

Tabla 54

Personal humano requerido para control de gaps

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Supervisor QA/QC	1	Supervisar medición de gaps y registrar tolerancias	Experiencia en montaje de chancadoras
Técnico mecánico especializado	2	Posicionamiento y ajuste de cóncavos	Certificación en uso de galgas y manejo de cargas
Asistente de montaje	1	Apoyo en manipulación de herramientas	Entrenado en seguridad industrial

Nota. Elaboración propia.

Tabla 55

Requerimientos para control de gaps

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Juego de galgas calibradas	2	Rango 0,05 – 5 mm, precisión $\pm 0,01$ mm	Medición de gaps
Cámara fotográfica industrial	1	Resolución ≥ 12 MP	Registro de evidencias

Software de registro QA/QC	1	Integración con base de datos	Almacenamiento de mediciones
EPP completo	-	Casco, lentes, guantes, arnés	Seguridad del personal



Nota. Elaboración propia.

La medición de gaps con galgas calibradas asegura un asentamiento uniforme de los cóncavos, evitando esfuerzos concentrados que pueden derivar en fracturas. El registro fotográfico y digital aporta trazabilidad, un punto crítico en un PETS predictivo, ya que permitirá analizar patrones de asentamiento entre campañas.

3.1.16.1.6.2 Torque de cuñas con patrón y secuencia especificados.

El apriete de cuñas se realiza siguiendo un patrón en cruz o circular definido por el fabricante, con valores de torque documentados. El uso de llaves hidráulicas calibradas y registro digital de cada apriete garantiza la uniformidad de carga y la trazabilidad del proceso.

Tabla 56

Personal humano requerido para torque de cuñas

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Técnico mecánico especializado	2	Ejecución de torque siguiendo patrón	Certificado en herramientas hidráulicas
Inspector QA/QC	1	Verificación de secuencia y valores	Experiencia en control de torque
Operador de llave hidráulica	1	Manejo de equipo de torque	Certificación vigente

Nota. Elaboración propia.

Tabla 57

Requerimientos para torque de cuñas

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Llave dinamométrica hidráulica	2	0-3000 Nm, precisión $\pm 2\%$	Aplicación de torque
Calibrador de torque digital	1	Precisión $\pm 1\%$	Verificación
Sistema de registro digital	1	Integración con QA/QC	Almacenamiento de datos
EPP completo	-	Casco, lentes, guantes, botas	Seguridad personal

Nota. Elaboración propia.

El control de torque es un factor crítico para garantizar que las cuñas mantengan el cóncavo en su lugar bajo carga dinámica. El registro predictivo de los valores de torque



permite correlacionar la pérdida de apriete con patrones de vibración o fallas detectadas en el futuro. A continuación, se detallan los pasos para el torque de cuñas:



3.1.16.1.6.3 Prerrequisitos y alistamiento (QA/QC + equipo de torque)

- Bloqueo y señalización del área y del equipo conforme LOTOTO (Lock Out – Tag Out – Try Out) de la unidad minera de referencia.
- Verificación metrológica en sitio, con el calibrador de torque digital, realizar una verificación de punto (spot-check) de la llave al torque objetivo y a un punto intermedio (~60%). Aceptación: lectura de la llave dentro de $\pm 2\%$ del set-point y coherente con el transductor (diferencia $\leq \pm 3\%$). Registrar en el sistema digital (código de herramienta, fecha, N° de certificado).
- Revisión de especificaciones, confirmar valor de torque, condición de aplicación (seco/ligeramente lubricado/anti-seize), y secuencia de apriete definida por el fabricante/planos. Cargar el patrón y valores en el sistema de registro.
- Inspección previa de roscas y apoyo: limpiar roscas/ caras de apoyo; reemplazar elementos dañados. Aplicar la condición de fricción definida (p. ej., seco o película fina de anti-seize de grado recomendado). Nota: cambiar la condición de fricción altera el torque efectivo; solo usar lo aprobado en el plan QA/QC.

3.1.16.1.6.4 Identificación, marcado y patrón de apriete (Técnicos + QA/QC)

- Numerar todas las cuñas en sentido horario (C1, C2, ... Cn) con pintura testigo.
- Cargar el patrón en cruz o circular “salteado” (p. ej., 1-n/2-2-(n/2+1)) para repartir cargas. QA/QC valida el patrón antes de comenzar.
- Definir etapas de torque progresivo: 30% a 60% a 100% del valor objetivo (o el escalonado recomendado por fabricante). Establecer tiempo de asentamiento entre etapas (p. ej., 60 s por vuelta) para acomodar relajación.

3.1.16.1.6.5 Aplicación del torque por etapas (Operador a Técnicos)

- Etapa 1:30% del set-point: aplicar siguiendo el patrón. QA/QC registra cuñas “pasadas/no pasadas”.
- Etapa 2:60%: repetir patrón completo. Si alguna cuña rota, pausar y verificar apoyo/roscado.
- Etapa 3:100% (final): completar patrón y realizar una vuelta de verificación en la misma secuencia a 100% (read-back).
- Pintura testigo en cada tuerca/espárrago y cara de apoyo al terminar, para evidenciar futuros desplazamientos.

“Torque aplicado (Nm)” indica el valor realmente alcanzado en campo. “Fecha/Hora” consigna el momento exacto de la operación, y “Herramienta usada (código)” especifica el identificador de la llave hidráulica o torquímetro, el cual debe tener calibración vigente. “Operador” se refiere al nombre completo del técnico que ejecuta la operación. En “Resultado (OK/No Conforme)” se marca si el torque aplicado cumple o no cumple con el set point, mientras que en “Observaciones” se deben anotar incidencias como repeticiones, ajustes adicionales, o cualquier anomalía detectada.

- Adjuntar fotografía del punto con pintura testigo si el sistema lo permite.
- No conformidades: si el torque medido $< -5\%$ o $> +5\%$, des-apretar y repetir la etapa final tras revisar condición de fricción/ asiento. Si hay indicios de fluencia/plasticidad, reemplazar el elemento y repetir el ciclo completo.

3.1.16.1.6.7 Re-torque programado y vigilancia predictiva

- Re-torque 1: tras 2–4 horas de finalizado el montaje o al completar el vaciado y curado del backing (según el plan), repetir vuelta de verificación al 100%.
- Re-torque 2: tras 8–24 h de operación o al finalizar el primer calentamiento operacional, repetir verificación.
- Condicionado a vibraciones: si el analizador de vibraciones reporta incremento del pico $1\times$ o aparición de banda lateral asociada a holgura, ejecutar una verificación de torque fuera de ciclo.
- Histórico predictivo: el sistema almacena la curva “Torque aplicado vs. cuña vs. tiempo”. Con ello se correlacionan futuros eventos (micro-movimientos detectados por láser/3D o vibración) con pérdida de pre-carga, lo que activa acciones antes de que haya daño.

3.1.16.1.6.8 Seguridad y buenas prácticas (todos)

- Mantener manos/cuerpo fuera del radio del brazo de reacción.
- Usar llave de respaldo para evitar giro del espárrago completo.
- No usar extensiones no certificadas ni “cheater bars”.
- Parar ante ruidos anómalos, movimiento de la pieza o desplazamientos $> 1,5$ mm; investigar causa.
- Cumplir el permiso de trabajo y comunicación por radio durante todo el apriete.

3.1.16.1.6.9 Documentación de cierre (QA/QC)

- Acta de torque firmada por Inspector QA/QC y Supervisor de Mantenimiento: lista de cuñas, set-points, resultados, herramientas (códigos), certificados, re-torques programados y fotografías.



Figura 76.

Formato para Acta de Torque QA/QC

ID cuña	Set point (Nm)	Torque aplicado (Nm)	Resultado (OK/NC)	Herramienta usada (código)	Certificado de calibración	Re torques programados (fecha/hora)	Fotografía (archivo o código)

Nota. Elaboración propia.

Esta acta será consolidada al final del proceso por el Inspector QA/QC y el Supervisor de Mantenimiento, quienes deben firmar y certificar los resultados. La columna “ID cuña” corresponde al mismo código usado en el registro operativo para garantizar la trazabilidad. “Set point (Nm)” indica el valor definido en el procedimiento oficial, mientras que “Torque aplicado (Nm)” recoge el dato validado en campo. En “Resultado (OK/NC)” se registra la conformidad o no conformidad de acuerdo con la tolerancia definida. “Herramienta usada (código)” debe señalar el código único de la herramienta aplicada, con trazabilidad a su certificado. “Certificado de calibración” se refiere al número o archivo asociado a la calibración vigente de la herramienta usada. En “Re-torques programados (fecha/hora)” se consignan las fechas de futuras verificaciones, y en “Fotografía” se indica el archivo digital o código de imagen que evidencia la operación realizada.

- Carga del acta al repositorio QA/QC y link en el histórico del equipo (EAM/CMMS) para trazabilidad.

3.1.16.1.6.10 Control tridimensional de alineación por láser tracker o escáner 3D

Se verifica la correcta alineación y concentricidad del conjunto mediante escaneo 3D o láser tracker, comparando con el modelo CAD de referencia. Esto permite detectar

desviaciones geométricas que, de no corregirse, pueden generar esfuerzos no uniformes y desgaste prematuro.

Tabla 58

Personal humano requerido para control tridimensional

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Especialista en metrología	1	Operar láser tracker / escáner 3D	Certificado en metrología industrial
Asistente de metrología	1	Apoyo en montaje y registro	Experiencia en entornos industriales

Nota. Elaboración propia.

Tabla 59

Requerimientos para control tridimensional

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Láser tracker	1	Precisión $\pm 0,02$ mm	Medición tridimensional
Escáner 3D portátil	1	Precisión $\pm 0,1$ mm	Registro geométrico
Software de análisis CAD	1	Compatibilidad con formatos STEP/IGES	Comparación con modelo
EPP completo	-	Casco, lentes, guantes, arnés	Seguridad personal

Nota. Elaboración propia.

Este control eleva el estándar del montaje, ya que no solo garantiza la alineación inicial, sino que genera un archivo digital de referencia para comparaciones predictivas en futuras inspecciones.

Preparación previa y seguridad

- Coordinar con operaciones la entrega limpia del dump pocket, ejecutar bloqueo y etiquetado de todas las energías, instalar líneas de vida y accesos, controlar polvo con aspersión local.

- Revisar certificados vigentes de los equipos de metrología, estación láser tracker con precisión $\leq \pm 0,02$ mm a 10 m o escáner 3D con precisión volumétrica $\leq \pm 0,10$ mm, termohigrómetro de precisión ± 2 % HR y $\pm 0,5$ °C, juego de esferas SMR y dianas adhesivas, trípodes y bases magnéticas.



- Acondicionar el ambiente, temperatura estable entre 10 y 30 °C sin corrientes de aire, HR 30 a 70 %, limpiar con paños sin pelusa las superficies que serán referenciadas, calentar electrónicamente el tracker por 20 a 30 minutos para estabilizar el haz, registrar las condiciones ambientales iniciales porque se compensarán en el software.
- Verificar que la geometría instalada corresponda a la etapa, para control pre-montaje de cóncavos medir casco y spider, para control post-montaje incluir main shaft y corona de cóncavos.

Definición de datums y del sistema de coordenadas de trabajo

- Datum A plano, cara superior maquinada del casco superior, se materializa con tres puntos espaciados 120° para fijar el plano $Z=0$.
- Datum B eje, eje teórico del conjunto definido midiendo dos circunferencias coaxiales, opción 1 diámetro interno de asiento del buje del spider en dos alturas, opción 2 anillo de apoyo de cóncavos superior y un segundo círculo en el anillo medio cuando el spider está desmontado, la recta que une los centros es el eje Z del equipo.
- Datum C círculo radial de referencia, diámetro interior del anillo de soporte de cóncavos o del aro de sellado superior, permitirá evaluar concentricidad de los anillos de cóncavos y el runout del manto.
- Origen, intersección del eje Z con el centro del círculo datum C sobre el plano A, orientación, eje Z vertical positivo hacia arriba, eje X hacia cualquier brazo del spider marcado como brazo 1, eje Y completa el sistema dextrógiro.

Instrumentación, mallado y levantamiento de puntos

- Con láser tracker, montar el trípode fuera de la vertical del eje, colocar 6 a 8 esferas SMR en puntos rígidos y accesibles alrededor del borde del casco y en dos brazos del spider, definir al menos dos estaciones del tracker que vean las mismas SMR para redundancia, ejecutar compensación ambiental automática del equipo, hacer set-up con medición de las SMR y fijar el sistema de coordenadas en software.
- Con escáner 3D, colocar 24 a 36 dianas adhesivas alrededor del anillo superior e interior del casco, densidad mínima 4 dianas por metro lineal, escanear en alta

resolución 0,5 a 1,0 mm de paso, realizar al menos dos pasadas cruzadas para reducir sombras y registrar el patrón de ruido ambiental.

- Medir las entidades geométricas críticas en el software, círculos de los asientos de cóncavos inferior, medio y superior, círculo del alojamiento del buje del spider, caras planas de apoyo de cada anillo, superficies del manto o del core si el manto no está montado, puntos de control de runout sobre el manto o anillo de referencia cada 15° alrededor de 360°.
- Guardar proyecto con sello de tiempo, temperatura y HR, asignar ID de equipo y de instrumento.

Parámetros geométricos y criterios de aceptación a verificar

- Verticalidad del eje geométrico, desviación del eje vs vertical medida como mm por metro, aceptación $\leq 0,20$ mm/m.
- Coaxialidad eje main shaft con eje de la excéntrica o del alojamiento del spider, TIR en 600 mm de longitud, aceptación $\leq 0,30$ mm.
- Concentricidad anillos de cóncavos respecto al eje Z, TIR por anillo, aceptación $\leq 1,00$ mm en cada anillo, diferencia entre anillos contiguos $\leq 0,80$ mm.
- Planitud de los asientos de cóncavos por anillo, máxima separación a plano de referencia, aceptación $\leq 0,50$ mm.
- Paralelismo entre plano de apoyo del spider y plano A del casco, aceptación $\leq 0,50$ mm por metro.
- Circularidad del alojamiento del buje del spider, error de forma, aceptación $\leq 0,20$ mm.
- Runout circunferencial del manto o del core medido a radio operativo, aceptación TIR $\leq 0,80$ mm.
- Uniformidad del OSS/CSS de referencia alrededor de 360°, con galgas calibradas o cálculo CAD a partir del manto digitalizado, aceptación variación máx-mín $\leq \pm 5$ mm respecto al objetivo de montaje definido para la etapa.
- Posición axial del manto respecto al anillo de referencia, diferencia de altura entre generatrices opuestas, aceptación $\leq 0,50$ mm.
- Desviación de centros de apoyo del spider entre brazos, aceptación diferencia de radio $\leq 0,50$ mm.

Procesamiento, comparación con CAD y diagnóstico

- Importar el modelo CAD de referencia en formato STEP o IGES, alinear por best-fit restringido a los datums A, B y C para evitar distorsionar el eje, calcular mapas de color de desviación para superficies extensas, escala de ± 2 mm para asientos y ± 1 mm para eje y alojamientos.
- Generar tablas de TIR y reportes numéricos por entidad, por ejemplo, TIR anillo superior 0,62 mm conforme, TIR manto 1,05 mm no conforme, paralelismo spider-casco 0,28 mm por m.
- Correlacionar con registros ambientales y de montaje, si hay deriva térmica volver a medir las SMR maestras y aplicar recompensación.

Acciones de corrección cuando un parámetro no cumple

- Planitud y paralelismo, aplicar limpieza fina y lapeado local, retirar rebabas y restos de epóxico, si persiste colocar shims calibrados de acero inoxidable $\leq 0,30$ mm bajo las cuñas de apoyo del cóncavo afectado, reapretar al patrón.
- Concentricidad de anillos, reubicar cuñas o bloques de centrado, aflojar patrón cruzado 30-60-90, recentrar externamente con gatos de empuje y medir en vivo, reapretar con llave hidráulica al valor especificado, verificar TIR.
- Runout del manto y uniformidad OSS/CSS, girar el manto al mejor ajuste si el diseño lo permite, verificar asiento del mantle core sobre el main shaft, eliminar partículas atrapadas, repetir medición y registrar nuevos gaps, el objetivo es que la variación del gap quede dentro de ± 5 mm.
- Coaxialidad y verticalidad, revisar asentamiento del conjunto excéntrico y del pistón hidráulico, verificar que no existan cuerpos extraños bajo asientos, si el desvío supera 0,30 mm suspender y escalar a ingeniería para inspección del buje y del pistón.

Verificación final y cierre metrológico

- Repetir un barrido rápido para confirmar que todas las correcciones mantuvieron conformidad, registrar las SMR maestras, congelar el sistema de coordenadas y generar el paquete de evidencias, informe PDF con portada de equipo, plano con datums, tablas con TIR, mapas de color, lista de no conformidades y acciones correctivas, condiciones ambientales y firmas digitales, nube de puntos o fichero de tracker nativo para trazabilidad, fotos de ubicación de dianas y SMR, croquis de medidas clave, exportar un dataset reducido para QA/QC.

- Emitir acta de conformidad, el especialista en metrología emite acta de control tridimensional, el supervisor QA/QC valida, si existe alguna no conformidad menor que no compromete seguridad ni integridad se levanta plan de acción con responsable y fecha, se autoriza el avance a la siguiente actividad del PETS 2.0.

3.1.16.1.6.11 Verificación de dureza y adherencia del respaldo epóxico

Como parte del enfoque predictivo, se añade este subpaso para evaluar mecánicamente el respaldo antes de la puesta en marcha. Se realizan ensayos de dureza Shore y pruebas de adherencia según normas ASTM e ISO.

Tabla 60

Personal requerido para verificación de dureza de backing

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Inspector QA/QC	1	Ejecución de ensayos de dureza y adherencia Apoyo en	Capacitado en ensayos mecánicos
Técnico de mantenimiento	1	preparación de probetas y equipos	Entrenamiento en manipulación segura

Nota. Elaboración propia.

Tabla 61

Requerimientos materiales para verificación de dureza de backing

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Durómetro Shore D	1	Rango 0-100	Medición de dureza del respaldo
Kit de adherencia	1	Cumplimiento ASTM D4541	Ensayo de adherencia
EPP completo	-	Casco, lentes, guantes	Seguridad personal

Nota. Elaboración propia.

Este paso reduce la probabilidad de fallas prematuras por mala calidad del respaldo. Los datos obtenidos se integran a la base de datos predictiva, permitiendo correlacionar

propiedades mecánicas con el desempeño real del componente en operación.

Preparación del área



Antes de iniciar las pruebas se delimita y señala el área de trabajo siguiendo las normas de seguridad establecidas en la unidad minera. Se verifica que el respaldo epóxico ya haya alcanzado el tiempo mínimo de curado recomendado por el fabricante (generalmente entre 24 y 48 horas). El inspector QA/QC confirma que las condiciones ambientales (temperatura y humedad) se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma ASTM para evitar resultados no representativos.

Selección y calibración de equipos

El durómetro Shore D se calibra in situ utilizando probetas patrón de referencia certificadas. Se revisa que el kit de adherencia cuente con fecha vigente de calibración, cumpliendo con ASTM D4541. El técnico de mantenimiento apoya en la preparación de las herramientas y en el montaje de los accesorios.

Ensayo de dureza Shore D

El inspector QA/QC aplica el durómetro en diferentes puntos estratégicos del respaldo epóxico: superficie de asiento del cóncavo, bordes del respaldo y áreas cercanas a zonas de mayor carga. Se realizan al menos cinco lecturas por zona para obtener un valor promedio representativo. El rango esperado de dureza se encuentra entre 75 y 85 Shore D, lo cual asegura una adecuada resistencia al aplastamiento y rigidez para transmitir la carga.

Figura 77.

Formato para el registro de dureza shore D

[illegible]

Nota. Elaboración propia.

Ensayo de adherencia

Figura 78.

[illegible]

El inspector QA/QC es responsable directo, con apoyo del técnico de mantenimiento para fijar los dollies. En cada columna, Fecha indica el día de ejecución, Equipo corresponde al modelo del kit de adherencia, y N° certificado calibración garantiza la trazabilidad. Dolly N° identifica el adhesivo metálico colocado, Adhesivo usado señala el tipo (ejemplo: epoxy

estructural), y Tiempo de curado adhesivo consigna las horas transcurridas antes de la prueba. Área de ensayo detalla si el dolly se fijó en borde, centro o zona crítica. Carga aplicada y Valor obtenido en MPa son los resultados de la medición, mientras que Criterio de aceptación fija el mínimo de 3 MPa para aceptación. Resultado se consigna como OK o NC según cumplimiento, Observaciones describe hallazgos (ejemplo: desprendimiento en interfaz adhesivo–respaldo), y el inspector firma validando la información.

Registro de resultados

Todos los valores de dureza y adherencia se documentan en formatos QA/QC, registrando: equipo utilizado, número de certificado de calibración, fecha, hora, ubicación exacta del punto medido, valor obtenido y observaciones. En caso de resultados fuera de rango se activa una acción correctiva inmediata, informando al supervisor de mantenimiento.

Análisis y correlación predictiva

Los resultados obtenidos se integran en la base de datos predictiva de la minera la unidad minera de referencia. Estos valores permiten correlacionar la calidad del respaldo con el comportamiento real del conjunto en operación. Una disminución progresiva de adherencia o dureza registrada en históricos puede anticipar la necesidad de un recambio preventivo antes de la falla.

Informe final

El inspector QA/QC emite un informe técnico que incluye tablas con los resultados de los ensayos, fotografías de los puntos de prueba, certificados de calibración de equipos y conclusiones sobre la aceptación o rechazo del respaldo evaluado. Este informe se adjunta al PETS 2.0 como parte de la trazabilidad del procedimiento.

Formato consolidado QA/QC verificación de respaldo

Nota. Elaboración propia.

Es llenado por el inspector QA/QC y validado por el supervisor de mantenimiento. En cada columna, Fecha indica el cierre del informe, Equipo(s) usados enumera todos los instrumentos aplicados, N° certificados consigna los documentos de calibración vigentes. Resultados dureza y Resultados adherencia muestran valores promedio comparados con su criterio de aceptación. Fotografías adjuntas hace referencia al registro visual de los puntos ensayados. Acciones correctivas aplicadas se detalla si algún resultado fue NC, como repicar respaldo o repetir mezcla epóxica. Finalmente, el documento se cierra con la firma conjunta del QA/QC y el supervisor de mantenimiento, otorgando trazabilidad y validez oficial al procedimiento.

3.1.16.1.7 Cierre y Validación

Este paso final se centra en asegurar que el montaje del main shaft, spider y cóncavos cumpla con las especificaciones técnicas, las tolerancias dimensionales y los requisitos de QA/QC. La verificación es integral, incorporando mediciones post-montaje, ensayos mecánicos y entrega de un dossier de trazabilidad que permita análisis comparativos en futuras intervenciones.

3.1.16.1.7.1 Montaje del main shaft y spider

El montaje se realiza siguiendo el procedimiento del fabricante y verificando interferencias, concentricidad y acoplamientos. La manipulación se efectúa con grúas y aparejos certificados, con supervisión QA/QC.

Tabla 62

Personal requerido para montaje del main shaft y spider

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Supervisor de mantenimiento	1	Supervisar montaje según procedimiento	Con conocimiento de QA/QC
Operador de grúa certificado	1	Maniobrar grúa de izado	Certificado vigente
Rigger / señalero	1	Guiar maniobras de izado	Certificado en izaje seguro
Técnico mecánico especializado	2	Posicionar y ajustar componentes	Experiencia en chancadoras giratorias

Nota. Elaboración propia.

Tabla 63*Materiales requeridos para montaje de main shaft y spider*

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Grúa puente / móvil	1	Capacidad ≥ 50 t	Izado del main shaft y spider
Eslingas y grilletes certificados	-	Con registro de inspección vigente	Sujeción de componentes
Llaves dinamométricas	2	0–2000 Nm	Ajuste de pernos
EPP completo	-	Casco, guantes, arnés	Seguridad personal

Nota. Elaboración propia.

La asignación de roles especializados y el uso de equipos certificados minimizan el riesgo de daños a los componentes o accidentes. El control de concentricidad tras el montaje es clave para evitar vibraciones y desgaste irregular.

3.1.16.1.7.2 Inspección visual y dimensional final

Se ejecuta una revisión completa de todos los elementos instalados, verificando ausencia de grietas, deformaciones o daños superficiales. Se utilizan herramientas de medición calibradas y escaneo 3D para validar tolerancias.

Tabla 64*Personal requerido para inspección visual y dimensional*

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Inspector QA/QC	1	Verificación final de montaje	Experiencia en control dimensional
Especialista en metrología	1	Operar escáner 3D / láser tracker	Certificación vigente
Técnico mecánico	1	Apoyo en mediciones	Con conocimiento de tolerancias

Nota. Elaboración propia.

Tabla 65*Materiales requeridos para inspección visual y dimensional*

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Escáner 3D / láser tracker	1	Precisión $\pm 0,02$ mm	Verificación dimensional
Galgas calibradas	1-Set	Rango 0,05–5 mm	Medición de gaps
Linterna táctica LED	1	≥ 1000 lúmenes	Inspección visual
EPP completo	-	Casco, lentes, guantes	Seguridad personal

Nota. Elaboración propia.

La verificación dimensional con tecnología 3D permite generar un modelo digital del estado final del equipo, que servirá como referencia para inspecciones predictivas posteriores. Esto reduce la subjetividad y asegura la repetibilidad en el control.

3.1.16.1.7.3 Entrega de dossier QA/QC

El dossier documenta la trazabilidad y el cumplimiento de especificaciones en toda la intervención. Contiene:

- Registro de temperatura y humedad durante curado del backing
- Certificados de calibración de herramientas y equipos de medición
- Fotografías de cada etapa del montaje
- Ensayos mecánicos post-curado (dureza y adherencia del respaldo)
- Informe de metrología final (modelo 3D, comparativa con CAD)

Tabla 66*Personal requerido para entrega de dossier*

Cargo	Cantidad	Función principal	Observaciones
Supervisor QA/QC	1	Revisión y validación de documentación	Con conocimiento de normas internas
Documentador técnico	1	Compilación y organización del dossier	Manejo de software documental

Nota. Elaboración propia.

Tabla 67*Materiales requeridos para entrega de dossier*

Equipo / Herramienta	Cantidad	Especificación	Uso
Computadora portátil	1	Procesador $\geq$ i5, SSD $\geq$ 512 GB	Gestión documental
Software de gestión QA/QC	1	Compatible con formatos CAD y PDF	Archivo de evidencias
Cámara fotográfica industrial	1	Resolución $\geq$ 12 MP	Registro de etapas

Nota. Elaboración propia.

La entrega de un dossier completo no solo cumple con los requisitos de calidad, sino que alimenta la base de datos histórica para el análisis predictivo. Esto permitirá correlacionar parámetros de montaje y condiciones ambientales con el desempeño real de los cóncavos, fortaleciendo la capacidad de anticipar fallas.

3.1.16.1.7.4 Reunión de cierre técnico y lecciones aprendidas

Reunión entre personal de la mina, QA/QC y contratista para identificar oportunidades de mejora y documentar hallazgos que puedan optimizar el próximo cambio de cóncavos. Este paso asegura la retroalimentación continua del PETS y fomenta la mejora progresiva de estándares y procedimientos, alineándose con la filosofía de mantenimiento predictivo y proactivo.

3.1.16.2 Desarrollo y propuesta herramientas predictivas

A continuación, se presenta una propuesta integral de herramientas predictivas orientadas a reducir la probabilidad de fallas en los cóncavos de la chancadora primaria, optimizar el tiempo de intervención y mejorar la disponibilidad operacional. Se integran metodologías basadas en datos en tiempo real, inspecciones avanzadas y gestión digital de la información para crear un ecosistema predictivo capaz de anticipar problemas y programar mantenimientos correctivos solo cuando sea estrictamente necesario.

1.1.1.1.1. Registro predictivo de desgaste de backing

El registro predictivo de desgaste de backing es una estrategia basada en condición (CBM) que sustituye los intervalos fijos de reemplazo por un monitoreo continuo de la degradación real del material de respaldo epóxico en la araña de la chancadora. Se toman mediciones en puntos de referencia previamente estandarizados, midiendo espesor y



calculando la tasa de desgaste en mm/día. Estos datos alimentan modelos predictivos que proyectan la fecha óptima para realizar el “rebaking” antes de que la integridad estructural se vea comprometida.

Tabla 68

Elementos clave para implementar la herramienta

Componente / Recurso	Descripción	Requisitos para implementación	Observaciones
Puntos de medición estandarizados	Ubicación fija (Norte, Sur, Este, Oeste) para repetibilidad	Definir en plano técnico, señalar físicamente en la estructura	Evita variabilidad entre mediciones
Instrumentación de medición	Galgas calibradas y/o medidor ultrasónico	Precisión mínima $\pm 0,1$ mm, resistente a polvo y humedad	Compatible con superficies curvas y con pintura residual Debe permitir consultas y generación de reportes automáticos
Base de datos digital	Almacenamiento histórico de mediciones	Integración con CMMS/EAM o base SQL	Incluye análisis de regresión y proyección lineal/no lineal
Algoritmo de cálculo de tasa de desgaste	Cálculo automático del ratio mm/día	Desarrollo en software predictivo o Excel avanzado	Permite decisiones basadas en condición y no en calendario
Reporte visual predictivo	Gráficas y proyección de fecha de rebaking	Integración con dashboard de mantenimiento	Evita errores humanos que distorsionen tendencias
Capacitación técnica	Entrenamiento del personal de inspección	Curso práctico en medición, registro y análisis	

Nota. Elaboración propia.

Un ejemplo específico y altamente técnico de esta categoría es el registro de backing utilizado para el monitoreo del material de respaldo epóxico en la araña de la chancadora ya implementado en la unidad minera de referencia. Este no es un checklist genérico, sino un formato de inspección predictiva que captura:

- Puntos de medición estandarizados: Define puntos específicos (Norte, Sur, etc.) para tomar mediciones, garantizando la consistencia de los datos.
- Mediciones de desgaste: Registra el espesor del material de respaldo en

milímetros en fechas específicas.

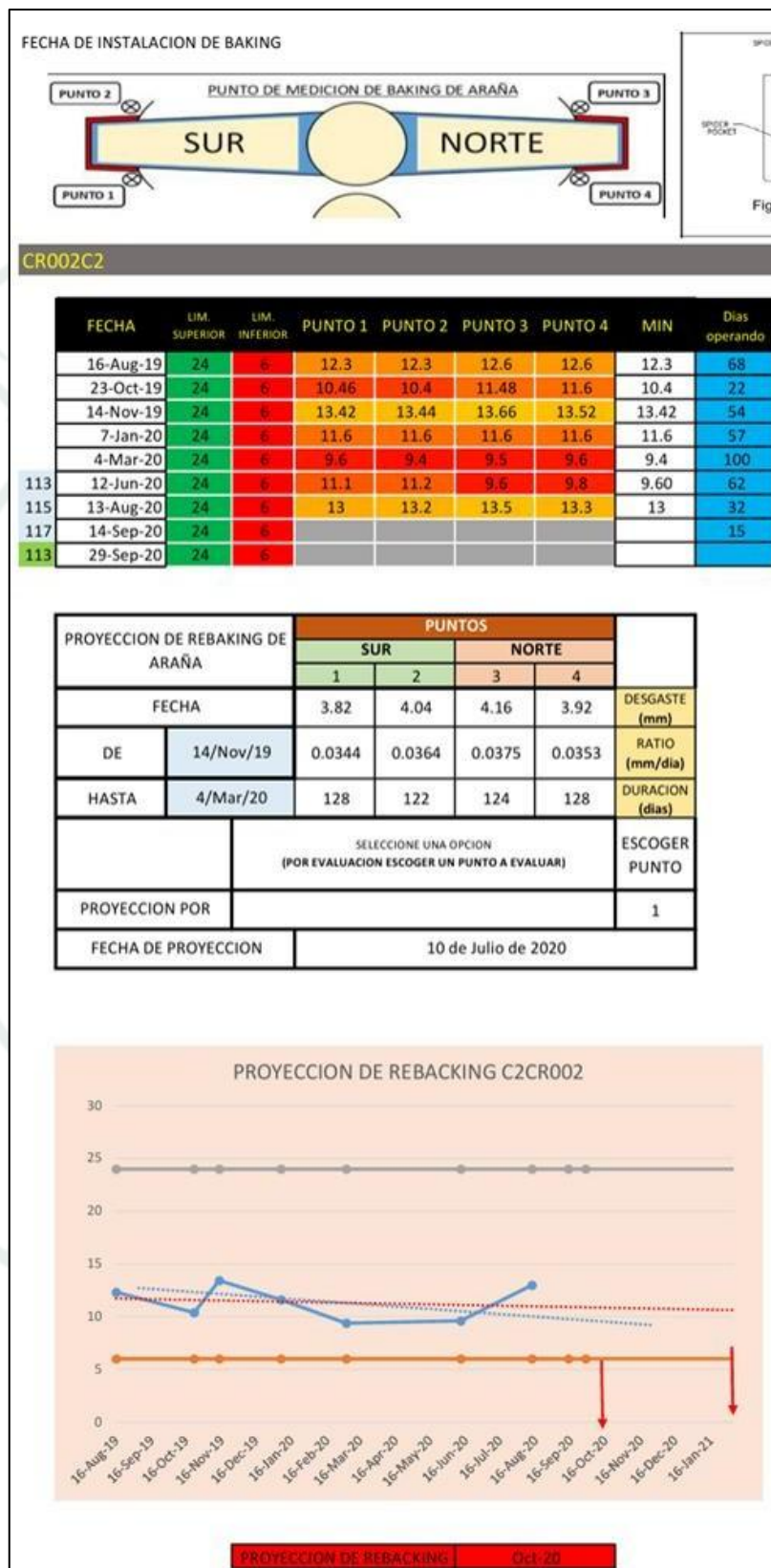


- Cálculo de la tasa de desgaste: Permite calcular un ratio (mm/día), que es una métrica clave de la velocidad de degradación del componente.
- Proyección de vida útil: Basado en la tasa de desgaste, el sistema permite proyectar la fecha futura en la que será necesario realizar el "rebaking" (reemplazo del material de respaldo)

Esta herramienta es un claro ejemplo de la transición de un mantenimiento preventivo (basado en tiempo) a un mantenimiento predictivo o basado en la condición (CBM). En lugar de cambiar el backing en un intervalo fijo (ej. cada 6 meses), el equipo de mantenimiento utiliza los datos de desgaste real para intervenir solo cuando es necesario. Esto optimiza el uso de los materiales, minimiza la intervención en el equipo y evita paradas no programadas que ocurrirían si el material fallara inesperadamente. La capacidad de proyectar la fecha de la intervención permite una planificación y programación mucho más eficientes, asegurando que los recursos (personal, materiales, andamios) estén disponibles sin afectar otras prioridades.

Figura 80.

Monitoreo del baking



Nota. Unidad minera de referencia.

Esta herramienta permite anticipar el momento exacto en que el backing perderá su capacidad de soporte, reduciendo intervenciones innecesarias y evitando fallas súbitas. La integración de la medición periódica con un algoritmo predictivo convierte datos dispersos en un sistema de alerta temprana. En operaciones de chancado primario, donde una parada no planificada puede costar más de 100 mil dólares por día, la capacidad de programar el cambio de backing con semanas de antelación representa una ventaja operativa crítica. Además, el uso de un sistema digital para almacenar y graficar los datos facilita la trazabilidad y el cumplimiento con estándares QA/QC.

3.1.16.2.1 Plataforma de monitoreo de condición y analítica avanzada

Esta herramienta integra sensores de última generación y un sistema centralizado de adquisición de datos para vigilar en tiempo real parámetros críticos de la chancadora, como vibraciones, temperaturas, niveles de ruido, presiones hidráulicas y consumo eléctrico. La información es procesada por algoritmos de analítica avanzada e inteligencia artificial que detectan patrones de falla incipientes. Esto permite activar alertas tempranas y ajustar planes de mantenimiento antes de que la falla ocurra.

En el contexto del PETS 2.0, esta plataforma no solo actúa como sistema de vigilancia continua, sino como un nexo entre la operación y el mantenimiento, alineando la disponibilidad del equipo con la ventana de intervención más segura y económica.

Tabla 69

Elementos clave para implementar la herramienta

Componente / Recurso	Descripción	Requisitos para implementación	Observaciones
Sensores de vibración triaxiales	Miden aceleración, velocidad y desplazamiento	Rango ± 50 g, frecuencia hasta 10 kHz, IP67	Detectan desbalanceo, holguras y desalineaciones
Sensores de temperatura infrarrojos	Medición sin contacto en rodamientos y puntos críticos	Precisión ± 1 °C, respuesta < 1 s	Permiten monitoreo en zonas de difícil acceso
Sensores de presión y caudal hidráulico	Monitoreo en circuito de lubricación y sistema hidráulico	Integración con PLC existente	Detectan fugas, obstrucciones y variaciones anormales
Gateway de comunicación	Transmite datos de sensores a la nube o servidor local	Protocolo OPC-UA o MQTT, redundancia de conexión	Evita pérdida de datos por fallos de red



Plataforma analítica	Software con algoritmos predictivos y visualización	Integración con CMMS/EAM, interfaz web	Permite generar reportes automáticos y alertas
Servidor / nube segura	Almacenamiento y procesamiento de datos	Cifrado AES-256, backup diario	Garantiza disponibilidad y seguridad de la información
Capacitación en analítica de datos	Formación del personal en interpretación de tendencias	Curso especializado en monitoreo de condición	Facilita decisiones correctas y oportunas

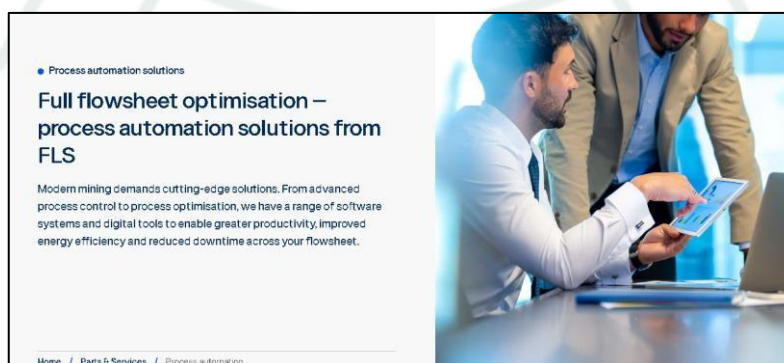
Nota. Elaboración propia.

La implementación de esta plataforma transforma el mantenimiento de reactivo a proactivo. El análisis en tiempo real reduce el tiempo entre la detección de una anomalía y la acción correctiva, minimizando el riesgo de daños mayores. Además, el almacenamiento histórico de datos permite modelar el comportamiento de la chancadora bajo distintas condiciones operativas, optimizando parámetros como la granulometría de alimentación y la carga de operación.

Los fabricantes de equipos de chancado han desarrollado plataformas digitales que permiten el monitoreo remoto del rendimiento de los equipos. Estas plataformas utilizan sensores para recopilar datos en tiempo real sobre vibración, temperatura y otros parámetros operativos. Mediante el uso de analítica de datos e inteligencia artificial, estos sistemas pueden predecir fallas inminentes, optimizar el rendimiento del proceso y maximizar la eficiencia energética.

Figura 81.

Plataforma de monitoreo de condición



Nota. Unidad minera de referencia.

En la minería de alta producción, donde una falla imprevista en la chancadora primaria puede afectar todo el circuito de conminución, esta herramienta se convierte en un seguro operacional que protege la continuidad de la producción y reduce costos por paradas no planificadas.

3.1.16.2.2 Centros de Operación Remota (IROC)

El Centro de Operación Remota (IROC) es una instalación centralizada que concentra la supervisión, análisis y toma de decisiones operativas y de mantenimiento de la chancadora, sin necesidad de que el personal esté físicamente en la mina. Se basa en una red de comunicación robusta, sistemas de control distribuidos (DCS) y software de gestión avanzada.

En el contexto del PETS 2.0, el IROC actúa como un cerebro operativo que procesa en tiempo real las señales provenientes de plataformas de monitoreo de condición, datos del CMMS/EAM, informes de inspecciones predictivas y tendencias históricas. Esto permite coordinar intervenciones de mantenimiento de forma precisa, optimizar la asignación de recursos y reducir la exposición del personal a zonas de alto riesgo.

Tabla 70

Requerimientos de integración con el PETS 2.0

Componente / Recurso	Descripción	Requisitos para implementación	Observaciones
Infraestructura de comunicaciones	Enlaces redundantes de fibra óptica o microondas	Latencia <100 ms, ancho de banda >50 Mbps	Garantiza transmisión continua de datos operativos
Estaciones de monitoreo	Consolas con acceso a plataformas SCADA, CMMS y analítica predictiva	Múltiples pantallas, ergonomía certificada	Facilita supervisión simultánea de varias chancadoras
Integración con CMMS/EAM	Sincronización de órdenes de trabajo y planes de mantenimiento	API abierta o conectores SAP/EAM	Permite coordinar inspecciones y paradas programadas
Software de visualización en tiempo real	Dashboards de KPIs, alarmas y tendencias	Capacidad de personalización por rol de usuario	Mejora la toma de decisiones y priorización de tareas
Protocolos de operación remota	Procedimientos estandarizados para control y respuesta	Capacitación certificada del personal	Asegura ejecución coherente con estándares de



Seguridad informática (ciberseguridad)	Firewalls, VPN y cifrado de extremo a extremo	Cumplimiento con normativas ISO/IEC 27001	Protege datos críticos y evita intrusiones
Personal especializado	Ingenieros de confiabilidad, analistas de datos y operadores de control	Turnos 24/7, formación en monitoreo predictivo	Asegura disponibilidad continua del servicio

Nota. Elaboración propia.

La unidad minera de referencia ha sido pionera en Perú con la implementación de su Centro Integrado de Operaciones Remotas (IROC) en Lima. Este centro permite gestionar y monitorear las operaciones de la mina a distancia, integrando procesos, tecnología y personas. Para el mantenimiento, esto significa que los especialistas pueden analizar datos de la condición de las chancadoras en tiempo real sin estar físicamente en la mina, permitiendo una toma de decisiones más ágil y basada en un análisis completo de toda la cadena de valor.

Figura 82.

IROC de la unidad minera de referencia



Nota: Unidad minera de referencia

La integración de estas herramientas digitales crea un ecosistema de gestión de activos altamente sofisticado. Los datos de un checklist de campo pueden ser ingresados en un dispositivo móvil y sincronizados instantáneamente con el EAM (SAP). El IROC puede visualizar estos datos junto con los parámetros operativos en tiempo real. Los algoritmos de analítica avanzada, a su vez, pueden usar esta información combinada para ajustar los modelos predictivos de falla. Este nivel de integración permite a la gestión de la unidad minera pasar de una visión fragmentada a una comprensión holística y en tiempo real de la

salud de sus activos, optimizando la planificación, reduciendo costos y maximizando la productividad de manera continua.

La incorporación del IROC en el PETS 2.0 permite pasar de una supervisión local reactiva a una gestión predictiva global. El acceso remoto a datos en tiempo real, combinado con algoritmos analíticos, posibilita anticipar fallas y planificar la logística del cambio de cóncavos con semanas de antelación, ajustando inventarios y disponibilidad de contratistas.

Además, el IROC permite coordinar de manera simultánea la información de varias plantas y equipos críticos, reduciendo el tiempo de respuesta ante incidencias y evitando la duplicidad de esfuerzos. Desde el punto de vista de seguridad, reduce la presencia física del personal en áreas peligrosas, cumpliendo con estándares internacionales de seguridad industrial y salud ocupacional.

3.1.16.2.3 Herramientas predictivas para cóncavos

Este conjunto de herramientas está diseñado para evaluar la integridad física de los cóncavos sin necesidad de desmontarlos, detectando desgaste, deformaciones y fisuras antes de que representen un riesgo operativo. Combina métodos de inspección visual asistida, mediciones 3D de alta precisión y ensayos no destructivos (NDT).

El PETS 2.0, en su aplicación permite programar cambios de cóncavos en función de su condición real, evitando tanto la sustitución prematura como la falla catastrófica en operación.

Tabla 71

Herramientas de inspección predictiva para los cóncavos

Herramienta / Técnica	Función principal	Requisitos para implementación	Observaciones
Escaneo 3D con láser o fotogrametría	Detectar pérdida de espesor y deformaciones	Equipo portátil, software CAD para análisis	Útil para comparar con geometría nominal
Endoscopia industrial	Inspección visual de zonas no accesibles	Cámaras HD resistentes a polvo y temperatura	Permite detección temprana de fisuras y desprendimientos
Ensayos no destructivos por ultrasonido	Identificación de fisuras internas	Transductores calibrados, gel acoplante	Ideal para cóncavos en zonas críticas
Líquidos penetrantes	Detección de fisuras superficiales	Área limpia, iluminación UV	Aplicable en paradas programadas



Drones
industriales

Inspección rápida de
interior de la tolva

Piloto
certificado,

Reduce riesgo humano
en altura

cámara 4K

Nota. Elaboración propia.

La aplicación sistemática de estas herramientas proporciona un diagnóstico preciso del estado de los cóncavos, minimizando la incertidumbre en la planificación de cambios. La comparación de modelos 3D antes y después de la operación permite cuantificar el desgaste por campaña, correlacionándolo con el tipo de mineral procesado. Esto no solo optimiza la programación de mantenimientos, sino que también retroalimenta las decisiones de compra y diseño de cóncavos más resistentes.

3.1.16.2.4 Sistemas de proyección de vida útil por tonelaje y tipo de mineral

Este sistema se basa en la correlación entre los datos de producción (toneladas procesadas) y el comportamiento de desgaste de los cóncavos, considerando variables como dureza del mineral, presencia de magnetita, granulometría y contenido de pórfidos. La información histórica se modela para generar curvas de desgaste específicas, lo que permite proyectar la vida útil restante con un alto grado de confianza.

En el PETS 2.0, esta herramienta se integra al CMMS/EAM y al dashboard QA/QC, vinculando datos de producción con mediciones reales de desgaste para programar intervenciones de forma predictiva.

Tabla 72

Sistemas de proyección de vida útil

Componente / Recurso	proyección	Función principal	Requisitos para implementación
Registro histórico de campañas		Base de datos de duración y condiciones de cada campaña Toneladas	Estandarizar formatos de reporte
Datos de producción diaria		procesadas por la chancadora Dureza, abrasividad,	Integración con sistema de planta
Caracterización mineralógica		granulometría Modelo matemático de desgaste vs.	Ensayos de laboratorio y datos geometalúrgicos
Algoritmo de			Desarrollo en software estadístico

Observaciones	confiable	datos de	proyecciones
	e	desgaste	
Permite análisis estadístico	Se cruza con	Clave para ajustar	Permite escenarios “qué pasaría si”
	tonelaje		



Dashboard de visualización	Presenta curvas de desgaste y vida útil restante	Integración web/móvil	Facilita la toma de decisiones en terreno
----------------------------	--	-----------------------	---

Nota. Elaboración propia.

Este sistema transforma datos de operación y desgaste en información estratégica para la toma de decisiones. La proyección por tonelaje y tipo de mineral permite ajustar campañas de mantenimiento según el mix de alimentación, reduciendo el riesgo de desgaste acelerado no previsto. Además, facilita la negociación con proveedores de cóncavos, respaldando técnicamente la elección de materiales y diseños más resistentes a condiciones específicas de la unidad minera.

El diseño del PETS 2.0 para el cambio de cóncavos de la chancadora primaria se apoya en un ecosistema de herramientas predictivas que permiten transformar el mantenimiento desde un enfoque basado en intervalos fijos hacia uno basado en condición real y pronósticos de falla. La estrategia combina inspecciones periódicas estandarizadas, monitoreo continuo y análisis centralizado de datos, creando un ciclo de mejora continua que reduce el riesgo operativo y optimiza la disponibilidad del equipo.

Tabla 73

Herramientas predictivas para el mantenimiento de los cóncavos

Herramienta predictiva	Rol dentro del PETS 2.0	Frecuencia / Tiempo de aplicación	Recursos clave para su implementación
Registro predictivo de desgaste de backing	Determinar fecha óptima de rebaking y prevenir desprendimientos	Inspección mensual / tras campañas de cambio	Puntos de medición, medidor ultrasónico, base de datos
Plataforma de monitoreo de condición	Detección temprana de vibraciones, temperatura y presiones anormales	24/7 en tiempo real	Sensores, gateway, software analítico
Centro de Operación Remota (IROC)	Centralizar análisis y toma de decisiones	Continuo	Infraestructura de comunicación, SCADA, CMMS/EAM
Escaneo 3D post-montaje	Validar asentamiento y concentricidad	En cada cambio de cóncavos	Escáner 3D, software CAD
Ensayos no destructivos (NDT)	Detectar microfisuras en cóncavos y estructura	Anual o post-evento	Líquidos penetrantes, ultrasonido
Algoritmo de proyección de vida útil de cóncavos	Calcular desgaste por tonelaje y mineral procesado	Mensual	Datos de producción, historial de campañas
Dashboard QA/QC integrado	Centralizar indicadores de montaje y calidad	Continuo	Plataforma web, acceso multiusuario

Nota. Elaboración propia.

Estrategia de implementación

1. Fase de integración tecnológica
 - Implementar sensores, gateways y software analítico.
 - Configurar el flujo de datos hacia el IROC y el CMMS/EAM.
 - Establecer puntos de medición y protocolos de inspección física.
2. Fase de estandarización de datos
 - Crear plantillas y formatos digitales para todas las mediciones.
 - Unificar nomenclaturas y unidades de medida en todos los reportes.

- Integrar el dashboard QA/QC con los datos predictivos.
3. Fase de operación predictiva
- Activar alertas automáticas para valores fuera de rango.



- Ajustar planes de mantenimiento según tendencias y pronósticos.
 - Realizar reuniones mensuales entre el equipo de mantenimiento y el IROC para validar la programación.
4. Fase de retroalimentación y mejora continua
- Comparar pronósticos con resultados reales de desgaste y fallas.
 - Ajustar algoritmos y criterios de alerta.
 - Documentar lecciones aprendidas en cada campaña

La combinación de estas herramientas convierte el PETS 2.0 en un sistema vivo, capaz de aprender de cada intervención y de anticipar fallas con suficiente margen para planificar acciones correctivas o preventivas. Además, la reducción de paradas no programadas incrementa la producción anual y disminuye los costos de mantenimiento, generando un retorno de inversión medible.

En contextos de alta exigencia como la unidad minera de referencia, donde la chancadora primaria procesa decenas de miles de toneladas diarias, este ecosistema predictivo no solo asegura la continuidad operacional, sino que establece un estándar de clase mundial en la gestión de activos críticos.

3.1.17 Proyección de metas de ingeniería

Para validar la viabilidad técnica de la propuesta, se desarrolla a continuación la memoria de cálculo que sustenta los beneficios esperados tras la implementación del PETS 2.0. Este análisis correlaciona los indicadores base diagnosticados con los objetivos de diseño de mantenimiento proactivo, bajo el rigor de la normativa internacional.

3.1.17.1 Marco Normativo para el Cálculo de Indicadores

La determinación de la eficacia de la propuesta se rige estrictamente por los estándares:

- EN 13306 (Terminología de Mantenimiento): Define los parámetros de tiempo y disponibilidad.
- ISO 14224 (Recolección e intercambio de datos de confiabilidad): Provee la taxonomía para clasificar las fallas en chancadoras primarias.

3.1.17.2 Cálculo de Indicadores de la Situación Base (Escenario Actual)

Antes de proyectar la mejora, se formaliza el cálculo del diagnóstico actual utilizando los datos registrados en la unidad:

- MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) [h]: 302 [h] (Basado en 5 eventos de fractura prematura)
- MTTR (Tiempo Medio para Reparar) [h]: 54.8 [h] (Promedio de intervenciones correctivas por falla de componentes).

Cálculo Explícito de Disponibilidad Base (A_{base}):

$$A_{base} = \frac{624.4h}{624.4h + 54.8h} \times 100 = 91.93\%$$

3.1.17.3 Proyección de metas tras la implementación PETS 2.0

La propuesta de mantenimiento proactivo permite proyectar una mejora sustancial basada en la optimización de los parámetros críticos de instalación y el control de calidad de los materiales.

Mediante la implementación del control térmico de curado (8 horas a 22°C), se asegura que la resina alcance una resistencia de 110 MPa según la norma ASTM C579, eliminando las fracturas por falta de soporte. Se establece como meta de ingeniería duplicar la confiabilidad operativa.

- MTBF Proyectado: 1248 [h]

A través de la estandarización de tareas, el uso de herramientas de torque calibradas 400 Nm según ISO 898-1 y la planificación de recursos del PETS 2.0, se proyecta una reducción del 5% en los tiempos de intervención durante al menos las 2 primeras campañas

- MTTR Proyectado: $54.8 [h] \times 0.95 = 52.06 [h]$
- Cálculo Explícito de la Disponibilidad Proyectada (A_{proy}):

$$A_{proy} = \frac{1248h}{1248h + 52.06h} \times 100 = 96\%$$

Tabla 74*Resumen cálculo de indicadores y normativas*

Parámetro de Ingeniería	Unidad	Línea Base (Real)	Meta Proyectada	Norma de Referencia
MTBF (Confiabilidad)	[h]	624.4	1248.8	ISO 14224
MTTR (Mantenibilidad)	[h]	54.8	52.06	EN 13306
Disponibilidad Mecánica	[%]	91.93	96	ISO 55001
Resistencia del Backing	[MPa]	< 26	110	ASTM C579
Torque de Pernos	[Nm]	N/D	400	ISO 898-1

Nota. Elaboración propia.

El incremento de la disponibilidad del 91.93% al 96.00% representa una mejora del 4.07% absoluto. En el contexto de gran minería, este aumento es altamente significativo, pues garantiza una mayor continuidad del flujo de mineral hacia la planta, sustentado en la eliminación de la reincidencia de fallas por fractura de componentes de desgaste.

3.1.17.4 Proyección de Resultados Esperados (Escenario Proactivo)

La propuesta de mantenimiento proactivo busca eliminar la causa raíz de la fractura de cóncavos. Al aplicar el PETS 2.0, se establecen las siguientes metas de ingeniería:

3.1.17.4.1 Determinación de la Confiabilidad Meta (MTBF)

Al asegurar la integridad estructural mediante el curado controlado del backing según ASTM C579 (resistencia de 110 [MPa]), se elimina la fatiga del componente. Se proyecta que el equipo operará continuamente hasta su cambio programado por desgaste

3.1.18 Análisis económico

3.1.18.1 Recursos humanos

La implementación del PETS 2.0 requerirá una estructura de personal más especializada en comparación con el procedimiento tradicional. Esta nueva dotación

incorporará perfiles orientados al aseguramiento de la calidad, la confiabilidad y la instrumentación predictiva, respondiendo a la necesidad de incluir fases adicionales de control, verificación metrológica y análisis de condición que no estaban contempladas en el procedimiento inicial.

En términos de roles, además del equipo operativo convencional (supervisores, mecánicos y operadores de izaje), será necesario integrar especialistas en control de calidad de materiales, inspectores NDT, técnicos de metrología, analistas de vibraciones y termografía, así como un ingeniero de confiabilidad encargado de coordinar las actividades de monitoreo predictivo. La presencia de estos perfiles permitirá asegurar que cada etapa del procedimiento, desde el desmontaje hasta el montaje final de los cóncavos, cuente con validación dimensional y trazabilidad técnica.

La siguiente sección detalla, mediante tablas, la cantidad de personal requerido en cada fase del procedimiento y el costo estimado de su participación, con el fin de dimensionar el impacto económico de la propuesta.

3.1.18.1.1 Fase de preparación y gestión inicial

En la fase de preparación y gestión inicial del PETS 2.0 se establecen las condiciones organizativas y técnicas necesarias para iniciar el procedimiento de cambio de cóncavos. Esta etapa no involucra aún labores mecánicas directas, pero resulta crítica para garantizar que las actividades posteriores se desarrollen bajo un marco de planificación robusto, con trazabilidad documental y coordinación efectiva entre las áreas de mantenimiento, seguridad y confiabilidad. La asignación de personal se orienta a cubrir tres frentes: la supervisión mecánica para definir lineamientos técnicos, el control de calidad de materiales para asegurar cumplimiento de estándares y la analítica de datos de mantenimiento para correlacionar registros históricos de fallas con la intervención programada.

Tabla 75

Recursos humanos requeridos en la fase

Personal requerido	Cantidad	Justificación
Supervisor mecánico senior	1	Dirige la planificación técnica del procedimiento, define secuencia de actividades y coordina con operaciones.

Ingeniero de control de calidad de materiales	1	Verifica documentación técnica de repuestos (backing, cóncavos, pernos), asegurando trazabilidad y cumplimiento de estándares.
Analista de datos de mantenimiento	1	Procesa registros históricos de fallas y correlaciona con intervenciones previas para identificar patrones y ajustar la planificación.
Asistente de planificación	1	Apoya en la elaboración del cronograma detallado de la parada, controlando tiempos y recursos asignados.

Nota. Elaboración propia.

La incorporación de estos perfiles permite que la fase de preparación trascienda la mera coordinación logística, integrando la gestión de calidad y el análisis de información histórica como elementos centrales para anticipar riesgos y reducir la probabilidad de desviaciones en las etapas posteriores. Si bien esta dotación inicial incrementa el número de recursos frente al procedimiento tradicional, asegura que el PETS 2.0 se ejecute con mayor nivel de control y con una base documental sólida para auditar el proceso.

3.1.18.1.2 Plan de trabajo de control de calidad de materiales y control predictivo

En esta fase, el PETS 2.0 contempla la formalización del plan de intervención a través de la integración de criterios de calidad, confiabilidad y programación de mantenimiento. Se definen los hitos de control, se ajustan los indicadores clave de desempeño (KPIs) y se asegura la alineación entre el cronograma de la parada y la disponibilidad de recursos. La presencia de perfiles especializados en confiabilidad, control de calidad de materiales y planificación es indispensable para transformar los lineamientos técnicos en un plan verificable y trazable.}

Tabla 76

Recursos humanos requeridos en la fase de plan de trabajo

Personal requerido	Cantidad	Justificación
Jefe de mantenimiento	1	Aprueba el plan integral de trabajo y garantiza su alineación con la estrategia global de la operación.



Ingeniero de confiabilidad	1	Integra datos de vida útil esperada de componentes, analiza riesgos y define puntos críticos de control predictivo.
Planner de mantenimiento	1	Elabora y actualiza el cronograma detallado, asegurando disponibilidad de recursos y coordinación con las áreas involucradas.
Ingeniero de control de calidad de materiales	1	Supervisa la inclusión de estándares de calidad en cada etapa, asegurando la trazabilidad técnica y validando que los criterios de control estén debidamente documentados.

Nota. Elaboración propia.

La conformación de este equipo asegura que el PETS 2.0 no solo se ejecute como una secuencia de actividades, sino como un plan integral con indicadores de confiabilidad y calidad. A diferencia del procedimiento actual, donde la planificación es general y reactiva, esta fase introduce un esquema más estructurado y con trazabilidad, lo que permite anticipar desviaciones y reducir la probabilidad de retrabajos o paradas prolongadas.

3.1.18.1.3 Fase de instrumentación predictiva

Esta etapa introduce el uso de equipos especializados de metrología y digitalización para verificar condiciones iniciales y prevenir desviaciones dimensionales o de torque. Se incorpora personal técnico entrenado en escaneo 3D y verificación metrológica.

Tabla 77*Recursos humanos requeridos en la fase de instrumentación*

Personal requerido	Cantidad	Justificación
Técnico de metrología	1	Realiza calibración de instrumentos y verificación de equipos de medición.
Ingeniero de control de calidad de materiales	1	Supervisa la correcta aplicación de la instrumentación predictiva y asegura la trazabilidad de los resultados frente a los estándares establecidos.
Operador de escáner 3D	1	Ejecuta el levantamiento digital de superficies y genera nubes de puntos para comparación con modelos CAD.

Nota. Elaboración propia.

La instrumentación predictiva permite que los parámetros técnicos se controlen desde el inicio, evitando ajustes tardíos que prolongan el tiempo de parada.

3.1.18.1.4 Fase de control predictivo pre-intervención

Se orienta a verificar la condición del equipo antes del desmontaje mediante técnicas de análisis predictivo y ensayos no destructivos.

Tabla 78*Recursos humanos requeridos en la fase de control predictivo*

Personal requerido	Cantidad	Justificación
Ingeniero de confiabilidad	1	Lidera el análisis de riesgos técnicos previos y determina criticidad de componentes.
Analista de vibraciones	1	Evalúa espectros de vibración para detectar anomalías en rodamientos y ejes.
Técnico tribólogo	1	Realiza muestreos y análisis de aceite para detectar contaminación o desgaste incipiente.
Operador de dron/escáner	1	Apoya con inspecciones visuales de zonas de difícil acceso, reduciendo riesgos al personal.

Nota. Elaboración propia.

El control predictivo previo permite anticipar condiciones anómalas y ajustar la estrategia de intervención, mejorando la seguridad y confiabilidad del procedimiento.

3.1.18.1.5 Fase de desmontaje controlado

Durante el desmontaje se concentran los mayores riesgos de izaje, atrapamiento y daño a componentes. Por ello se asigna personal con competencias específicas en maniobras seguras y control dimensional.

Tabla 79

Recursos humanos requeridos en la fase de desmontaje

Personal requerido	Cantidad	Justificación
Supervisor mecánico	1	Coordina todas las maniobras de izaje y desmontaje, asegurando cumplimiento de estándares.
Operadores de izaje	2	Ejecutan maniobras con grúa y puente grúa, siguiendo protocolos de seguridad.
Técnico de metrología	1	Verifica tolerancias dimensionales durante el desmontaje de componentes.
Inspector NDT	1	Evalúa la integridad de piezas críticas mediante ensayos no destructivos.
Operarios de mantenimiento	3	Realizan tareas de apoyo en corte, liberación y retiro de cóncavos y subcomponentes.

Nota. Elaboración propia.

La combinación de técnicos especializados y operarios de apoyo asegura que el desmontaje se realice con seguridad y precisión, reduciendo riesgos de daños a los equipos.

3.1.18.1.6 Fase de preparación de superficies y verificación dimensional

Una vez retirados los cóncavos, se requiere preparar las superficies de contacto y validar las dimensiones antes del montaje.

Tabla 80*Recursos humanos requeridos en la fase de preparación*

Personal requerido	Cantidad	Justificación
Supervisor de mantenimiento	1	Supervisa la correcta preparación de superficies y asegura cumplimiento del procedimiento.
Técnicos mecánicos	2	Ejecutan limpieza, rectificado y adecuación de superficies de asiento.
Inspector NDT	1	Verifica que no existan fisuras ni defectos ocultos en las superficies críticas.
Técnico de metrología	2	Realizan mediciones dimensionales y tolerancias de contacto.
Asistente de mantenimiento	1	Apoya en el traslado y acondicionamiento de equipos menores.

Nota. Elaboración propia.

Esta fase asegura que las superficies queden en condiciones óptimas, evitando fallas prematuras durante la operación del equipo.

3.1.18.1.7 Fase de montaje de cóncavos nuevos

Se centra en la colocación, ajuste y validación de los nuevos cóncavos, etapa crítica para garantizar el desempeño futuro de la chancadora.

Tabla 81*Recursos humanos requeridos en la fase de montaje de cóncavos*

Personal requerido	Cantidad	Justificación
Supervisor de aseguramiento técnico.	1	Supervisa cada paso de montaje y asegura cumplimiento del torque especificado.
Técnicos mecánicos	2	Ejecutan instalación de cóncavos, colocación de pernos y cuñas.
Operador de llave hidráulica	1	Realiza apriete controlado de pernos con torque verificado.
Inspector de aseguramiento técnico	1	Verifica cumplimiento de parámetros de montaje y registra evidencia documental.
Especialista en metrología	1	Verifica alineación tridimensional de cóncavos y contacto con superficies de asiento.

Nota. Elaboración propia.

El montaje con control dimensional asegura que los cóncavos trabajen de forma homogénea, reduciendo riesgo de desplazamiento o desgaste irregular.



3.1.18.1.8 Fase de cierre y validación

En la fase final se reinstalan los componentes principales y se valida integralmente la intervención, asegurando que el equipo quede operativo y con trazabilidad documental.

Tabla 82

Recursos humanos requeridos en la fase de cierre y validación

Personal requerido	Cantidad	Justificación
Supervisor de mantenimiento	1	Coordina el montaje final del main shaft y spider, asegurando secuencia correcta.
Operador de grúa certificado	1	Ejecuta maniobras de izaje de componentes mayores bajo protocolos de seguridad.
Rigger	1	Da señales al operador de grúa, garantizando maniobras controladas.
Técnicos mecánicos	2	Ejecutan la instalación final y ajustes menores.
Inspector QA/QC	1	Verifica el cumplimiento de especificaciones y autoriza el cierre de la intervención.
Especialista en metrología	1	Valida tolerancias finales y emite informe dimensional.
Documentador técnico	1	Compila reportes, checklists y evidencias fotográficas para el dossier de entrega.

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 82 se conjetura que el cierre y validación permiten que la chancadora regrese a operación con garantías de calidad, respaldo documental y registros útiles para próximas intervenciones.

La implementación del PETS 2.0 exige una mayor dotación de personal especializado en comparación con el procedimiento actual de cambio de cóncavos. Esto se debe a la incorporación de fases adicionales de control predictivo, verificación dimensional y aseguramiento de calidad, las cuales requieren perfiles técnicos avanzados. Con el fin de visualizar de manera integral la demanda de personal, se consolidaron los recursos humanos identificados en cada etapa en dos bloques: personal operativo en campo y personal de soporte y gestión.

Tabla 83

Resumen consolidado de recursos humanos requeridos

Personal operativo en campo		
Rol / Cargo	Cantidad total	Fases principales en las que interviene
Supervisor mecánico senior	1	Preparación inicial, desmontaje controlado
Supervisor de mantenimiento	2	Preparación de superficies, cierre y validación
Técnicos mecánicos	9	Desmontaje, preparación de superficies, montaje, cierre
Operadores de izaje	2	Desmontaje controlado
Operador de grúa certificado	1	Cierre y validación
Rigger (especialista en maniobras de izaje y aparejos)	1	Cierre y validación
Operador de llave hidráulica	1	Montaje de cóncavos nuevos
Inspector NDT	2	Desmontaje y verificación dimensional
Técnicos de metrología	4	Instrumentación predictiva, desmontaje, verificación dimensional, cierre
Especialistas en metrología	2	Montaje y cierre (alineación tridimensional, validación final)
Ingeniero de aseguramiento técnico	3	Preparación inicial, plan de aseguramiento técnico, instrumentación predictiva
Inspector de aseguramiento técnico	2	Montaje de cóncavos nuevos, cierre y validación
Ingeniero de confiabilidad	2	Plan de aseguramiento técnico, control predictivo
Analista de vibraciones	1	Control predictivo pre-intervención
Técnico tribólogo	1	Control predictivo pre-intervención
Técnico de termografía	1	Control predictivo pre-intervención
Operador de escáner 3D	1	Instrumentación predictiva
Personal de soporte y gestión		
Rol / Cargo	Cantidad total	Fases principales en las que interviene
Jefe de mantenimiento	1	Plan de trabajo de aseguramiento técnico y control predictivo
Planner de	1	Planificación y cronograma



Analista de datos	1 Preparación inicial
Asistente de planificación	1 Apoyo en cronograma y logística
Asistentes de mantenimiento	2 Apoyo en preparación de superficies y logística
Documentador técnico	1 Cierre y validación
Fotógrafo /	1 Registro visual y digitalización

operador CAD

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 83 refleja que la mayor carga de personal se concentra en el bloque operativo en campo, con un 79 % del total. Este grupo corresponde a técnicos mecánicos, supervisores, operadores de izaje, especialistas en metrología, aseguramiento técnico y analistas predictivos, quienes intervienen directamente en la ejecución del desmontaje, montaje y validación de los cóncavos. Su alta participación responde a la complejidad del procedimiento y a la necesidad de cubrir frentes simultáneos de izaje, control dimensional y aseguramiento de calidad.

En contraste, el personal de soporte y gestión representa el 21 % del total. Estos perfiles, entre los que destacan jefe de mantenimiento, planner, analista de datos y documentador técnico, no permanecen de forma continua en el área de chancado, pero cumplen un papel estratégico en la trazabilidad documental, el análisis predictivo y la consolidación de reportes finales. Su presencia asegura que la intervención no solo se ejecute, sino que quede registrada y auditada bajo un enfoque de mejora continua.

En conjunto, el PETS 2.0 demanda 43 recursos humanos especializados, superando al procedimiento tradicional. Este incremento, lejos de ser un exceso, se justifica en la medida en que mejora la seguridad del proceso, reduce la probabilidad de fallas reincidentes y optimiza la disponibilidad de la chancadora primaria en el mediano plazo.

3.1.18.1.9 Comparación de personal actual y propuesto

La comparación del personal requerido en el procedimiento actual frente al propuesto en el PETS 2.0 permite evidenciar las diferencias en términos de especialización, formalización de roles y redistribución de tareas críticas. Mientras que en el esquema tradicional ciertos puestos eran asumidos de manera ocasional o mediante la reasignación de técnicos disponibles, el PETS 2.0 plantea una estructura definida que incorpora perfiles especializados en confiabilidad, metrología y aseguramiento técnico, asegurando una mayor

trazabilidad y control en cada fase de la intervención.



Tabla 84*Comparación de personal operativo en campo*

Tipo de profesional	PETS actual (Nº)	PETS 2.0 propuesto (Nº)	Observaciones
Supervisor mecánico / operaciones	1	1	Similar número, pero en PETS 2.0 con mayor rol técnico en planificación.
Supervisor de seguridad	1	-	En PETS 2.0 se reemplaza por especialistas en confiabilidad y aseguramiento técnico.
Técnicos mecánicos	-	9	Incorporación masiva en el PETS 2.0 para tareas de desmontaje, montaje y ajuste dimensional.
Operadores de izaje	-	2	PETS 2.0 asigna personal específico, mientras que antes se redistribuían técnicos disponibles.
Operador de grúa certificado	1	1	No cambia, se mantiene como rol crítico.
Rigger	1	1	Se mantiene como rol formalizado, aunque antes podía ser asumido por técnicos ocasionales.
Vigía de trabajo en caliente	1	-	Redistribuido, PETS 2.0 incorpora sistemas de control documentado.
Vigía en espacio confinado	1	-	Redistribuido, ahora bajo control de supervisores de metrología y confiabilidad.
Operador de llave hidráulica	-	1	Nuevo rol en PETS 2.0 para torque controlado de pernos.
Inspector NDT	-	2	Se añade para asegurar integridad de piezas críticas.
Técnicos de metrología	-	4	Incorporados para control predictivo e inspección dimensional.
Especialistas en metrología 3D	-	2	Nuevo rol para alineación tridimensional de cóncavos.
Ingeniero de aseguramiento técnico	-	5	Sustituye QA/QC, enfocado en trazabilidad y estándares técnicos.
Ingeniero de confiabilidad	-	2	Introducido para riesgos y control predictivo.
Analista de vibraciones	-	1	Nuevo especialista en diagnóstico predictivo.
Técnico tribólogo	-	1	Introducido para análisis de aceites y desgaste.
Técnico de termografía	-	1	Nuevo especialista en monitoreo predictivo.
Operador de escáner 3D	-	1	Introducido para digitalización y comparación CAD.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 85*Comparación de personal de soporte y gestión.*

Tipo de profesional	PETS actual (Nº)	PETS 2.0 propuesto (Nº)	Observaciones
Jefe de mantenimiento / operaciones	1	1	Se mantiene, pero en PETS 2.0 su rol es estratégico, con enfoque en confiabilidad y planificación.
Planner de mantenimiento	-	1	Nuevo rol formalizado para cronograma y logística.
Analista de datos	-	1	Incorporado para correlación de fallas y soporte predictivo.
Asistente de planificación	-	1	Añadido para apoyo en cronogramas y coordinación logística.
Asistentes de mantenimiento	-	2	Apoyo en preparación de superficies y logística.
Documentador técnico	-	1	Nuevo rol para trazabilidad documental.
Fotógrafo / operador CAD	-	1	Nuevo rol para registro visual y digitalización.

Nota. Elaboración propia.

De esta comparación se desprende que el PETS 2.0 incrementa significativamente la cantidad de personal técnico especializado, reduciendo la dependencia de redistribuciones improvisadas y fortaleciendo la calidad del procedimiento mediante perfiles orientados a la verificación, control predictivo y documentación técnica. Si bien este incremento representa un mayor número de recursos humanos respecto al esquema actual, también garantiza un procedimiento más seguro, predecible y alineado a estándares de confiabilidad, lo que se traduce en una reducción de fallas reincidentes y en la optimización de la disponibilidad de la chancadora primaria.

3.1.19 Capacitación y entrenamientos específicos

La implementación del PETS 2.0 requiere que el personal involucrado cuente con competencias adicionales a las habituales en labores mecánicas de cambio de cóncavos. Esto se debe a la inclusión de herramientas de control predictivo, verificación dimensional avanzada y procedimientos QA/QC. Por tanto, es necesario planificar programas de capacitación diferenciados por especialidad, de modo que cada rol pueda desempeñar sus funciones de forma segura, eficiente y con trazabilidad.

Tabla 86

Programas de capacitación requeridos

Programa de capacitación	Público objetivo	Duración estimada	Modalidad	Justificación
Inducción en seguridad minera y PETS 2.0	Todo el personal involucrado (43 personas)	8 h	Teórica	Asegura conocimiento del procedimiento, riesgos IPERC y roles específicos en la parada.
Trabajo en altura y espacios confinados	Técnicos mecánicos, operadores de izaje, supervisores (12 personas)	16 h	Mixta	Imprescindible para maniobras dentro de la tolva y sobre estructuras de gran altura.
Manejo de grúas y rigging seguro	Operadores de izaje, rigger, operadores de grúa (4 personas)	24 h	Práctica	Minimiza riesgos en desmontaje y montaje de componentes pesados.
Ingeniería de aseguramiento técnico en procedimientos de mantenimiento	Ingenieros de aseguramiento técnico, inspectores de aseguramiento técnico (5 personas)	12 h	Mixta	Estandariza aplicación de protocolos de control de calidad en montaje y cierre.
Metrología avanzada y escaneo 3D	Técnicos de metrología, especialistas 3D (5 personas)	20 h	Práctica	Capacita en uso de equipos de medición, tolerancias y nubes de puntos para verificación dimensional.
Análisis predictivo (vibraciones, tribología, termografía)	Ingenieros de confiabilidad, tribólogo, analistas (4 personas)	20 h	Mixta	Garantiza que el personal interprete resultados de técnicas predictivas y los incorpore en la planificación.
Manejo de materiales y aplicación de backing	Técnicos mecánicos, supervisores de montaje (8 personas)	12 h	Práctica	Estandariza el preparado, vaciado y control del material de respaldo (epóxicos y cementos).
Documentación técnica y reportes de cierre	Documentador técnico, supervisores (3 personas)	8 h	Teórica	Asegura la generación de informes trazables con fotos, checklist y registros de torque.

Nota. Elaboración propia.

Por medio de la tabla 86 se entiende que el plan de capacitación inicial demandará

aproximadamente entre 100 y 120 horas-hombre por persona en promedio, considerando la combinación de cursos que cada rol debe recibir según sus funciones específicas. Esta



inversión en entrenamiento garantiza que el personal no solo ejecute el procedimiento de manera estandarizada, sino que cuente con competencias verificadas y certificadas. Con ello se reduce de manera significativa el riesgo de errores de montaje, fallas por deficiente inspección o manejo inadecuado de materiales, lo que a su vez disminuye la probabilidad de paradas no programadas. En términos económicos, esta preparación anticipada representa un beneficio al evitar pérdidas de producción y al fortalecer la autonomía técnica de la organización en futuras paradas de chancadora primaria.

3.1.20 Inversión en equipos, herramientas y materiales

El PETS 2.0 incorpora un conjunto de recursos técnicos que no forman parte del procedimiento actual. La necesidad de controlar con mayor precisión el desmontaje, montaje y validación dimensional obliga a disponer de herramientas especializadas, equipos de metrología avanzada y consumibles de respaldo de mayor calidad. Esta inversión inicial resulta clave para asegurar la confiabilidad del procedimiento y reducir riesgos de fallas prematuras. La siguiente tabla muestra la inversión necesaria.

Tabla 87

Inversión en equipos, herramientas y materiales

Total	Ítem principal	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)	Justificación
Equipos de izaje	Grúa puente con accesorios certificados	1	350,000	350,000	Permite izaje controlado de main shaft y spider.
	Camión grúa 40 t	1	250,000	250,000	Transporte y posicionamiento de floreros con cóncavos.
	Eslingas, estrobos y grilletes certificados	12	2,500	30,000	Maniobras de izaje seguras y certificadas.
Metrología avanzada	Escáner 3D portátil	1	150,000	150,000	Levantamiento digital comparativo con CAD. Equipos industriales robustos con soporte/calibración local.
	Medidor láser de alineamiento	1	120,000	120,000	Verificación de tolerancias en montaje.
	Llave hidráulica de torque (4000 Nm)	2	40,000	80,000	Torque controlado y registro digital. Precio acorde a catálogo de herramientas TorcUP y marcas reconocidas.
Inspección y control	Kit NDT (líquidos penetrantes, ultrasonido)	2 kits	15,000	30,000	Detecta fisuras ocultas en componentes.
	Termógrafo portátil	1	20,000	20,000	Evaluación térmica predictiva.
Consumibles críticos	Backing epóxico de alta resistencia	12 baldes	1,800	21,600	Anclaje estructural y disipación de cargas.
	Cemento y yeso técnico	6 sacos	250	1,500	Sellado de juntas y refuerzo de
	para sellado				enmangues.

Protección y seguridad	Grasa NLGI EP-1	20 kg	80	1,600	Lubricación de araña y bujes.
	Arnés con líneas retráctiles certificadas	12	900	10,800	Seguridad en altura y espacios confinados.
	Mantas ignífugas y extintores ABC 9 kg	6	600	3,600	Riesgo control en trabajos en caliente.
Documentación y control	Cámara industrial y software de registro	1	25,000	25,000	Evidencia fotográfica y reportes QA/QC.
TOTAL			1,093,100		

Nota. Elaboración propia.

Según la tabla 87 el costo de esta inversión inicial se justifica porque dota al procedimiento de capacidades de control y predictibilidad que no estaban contempladas en el PETS tradicional, elevando el nivel de confiabilidad del cambio de cóncavos. Además, una parte importante de los equipos incorporados, como los escáneres 3D, las llaves de torque hidráulicas y los kits de inspección no destructiva, cuentan con una vida útil prolongada que permite su reutilización en futuras paradas de chancadora primaria y en otros mantenimientos mayores, lo que amortigua el gasto a lo largo del tiempo. De este modo, la inversión no solo responde a una necesidad operativa inmediata, sino que constituye un activo técnico estratégico que fortalece la capacidad de la organización para ejecutar intervenciones críticas con menor riesgo de errores y con mayor trazabilidad.

3.1.21 Costos operativos de la implementación

Más allá de la inversión inicial en equipos y materiales, la ejecución de cada intervención bajo el PETS 2.0 implica costos operativos asociados al uso de recursos humanos, consumo de insumos, utilización de equipos de izaje y contratación de servicios de apoyo. Estos costos se distribuyen en función de la duración de la parada programada y de la cantidad de personal involucrado en cada fase. En la siguiente tabla se detallan los costos operativos.

Tabla 88

Costos operativos estimados por la implementación.

Categoría de costo	Descripción	Unidad de medida	Cantidad estimada	Rol(es) incluidos en "Horas-hombre"	Tarifa aplicable (S/./h)	Costo estimado (S/.)
Horas-hombre de personal	Supervisores, técnicos mecánicos, ingeniería de aseguramiento técnico, metrología, confiabilidad (39 personas promedio)	h (horas)	3,120 h	Mezcla ponderada: 10 sup., 25 técnicos mecánicos, 4 espec.	Promedio ponderado ≈ S/ 14.00/h	≈ S/ 43,680
Uso de grúa puente	Operación de puente grúa para desmontaje y montaje	turno (8 h)	20 turnos	Operador de izaje / grúa	S/ 17.00 (especializado)	≈ S/ 2,720
Alquiler de camión grúa 40 t	Equipo con operador certificado	turno (8 h)	10 turnos	Similar tarifa operador grúa	S/ 13.10/h (técnico)	≈ S/ 1,048
Consumo de backing epóxico	Material de respaldo de alta resistencia	balde (20 kg)	12 baldes	—	—	Igual que antes (sin cambio)
Consumo de cemento y yeso técnico	Sellado de juntas y refuerzo estructural	saco (25 kg)	5 sacos	—	—	Igual que antes
Lubrificantes y grasas EP-1	Engrase de bujes, araña y componentes móviles	kg	20 kg	—	—	Igual que antes
EPP y consumibles de seguridad	Arnés, líneas retráctiles, mantas	kit	39 kits	—	—	Igual que antes



Servicios de apoyo	respiradores (39 kits, uno por trabajador asignado) Ensayos NDT, inspecciones externas, calibración metrológica	servicio	4 servicios	Ensayadores/inspectores especializados	Asumido tarifa especializada S/ 17/h × horas requeridas	Estimado adicional
Energía y consumibles eléctricos	Uso de soldadoras, oxicorte, termógrafo, iluminación portátil	turno (8 h)	15 turnos	—	—	Igual que antes

Nota. Elaboración propia.

Se estima que de la tabla 88 el costo operativo se concentra principalmente en las horas-hombre del personal especializado, que representan cerca del 55 % del total. A esto se suma el uso intensivo de grúas, insumos críticos como el backing y la grasa EP-1, así como la contratación de servicios externos para ensayos e inspecciones.

En comparación con el procedimiento actual, estos costos operativos son mayores debido al incremento de personal especializado y de controles predictivos. Sin embargo, este incremento se compensa con la reducción proyectada de horas de parada y el menor riesgo de fallas reincidentes, generando un retorno económico positivo en el corto plazo.

3.1.22 Presupuesto consolidado por año

La ejecución del PETS 2.0 requiere una inversión inicial en equipos y herramientas de control predictivo, un programa de capacitación especializado y costos operativos derivados de la ejecución de la parada de chancadora. A continuación, se integran los rubros más representativos en un presupuesto anual, expresado en soles (S/). Los precios se han estimado tomando como referencia tarifas promedio de proveedores de servicios mineros en el Perú, catálogos de equipos de metrología y reportes de costos de mantenimiento en unidades de gran minería.

Tabla 89

Inversión inicial en equipos y herramientas

Categoría	Ítem	Cantidad	Costo		Justificación breve
	principal		unitario (S/.)	total (S/.)	
Metrología	Escáner 3D				Permite verificación
avanzada	Estación láser	1	180,000	180,000	nubes de puntos. dimensional con
	de alineamiento	1	120,000	120,000	Control preciso en montaje de cóncavos.
Torque controlado	Llave hidráulica 4000 Nm	2	45,000	90,000	Apriete controlado y registro digital de pernos.
	Kit NDT completo	2	25,000	50,000	Detección de fisuras ocultas en componentes críticos.
Inspección avanzada					Evaluación
	Termógrafo portátil	1	35,000	35,000	predictiva de puntos de sobrecalentamiento.
Seguridad y EPP	Arnés con línea retráctil	12	1,500	18,000	Seguridad en trabajos en altura en el área de chancado.
Documentación	Cámara industrial + software de ingeniería de aseguramiento técnico	1	25,000	25,000	Evidencias fotográficas y generación de informes trazables.
Subtotal inversión				518,000	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 90*Costos de capacitación*

Programa de capacitación	Público objetivo	N° personas	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)	Justificación
Inducción en	Todo el				Requisito normativo y
seguridad y PETS 2.0	personal en campo (36)	36	400	14,400	conocimiento del procedimiento.
Ingeniería de aseguramiento técnico en mantenimiento y torque	Ingenieros de aseguramiento técnico y técnicos mecánicos (10)	10	1,200	12,000	Aplicación de estándares de calidad y torque seguro.
Metrología y escaneo 3D	Técnicos especializados (5)	5	2,500	12,500	Uso de equipos de alineamiento y escaneo digital.
Predictivo (vibraciones, tribología, termografía)	Ingenieros y analistas (6)	6	2,000	12,000	Interpretación de técnicas predictivas aplicadas al equipo.
Rigging y trabajos en altura	Operadores de izaje, rigger (6)	6	1,800	10,800	Maniobras críticas en desmontaje y montaje.
Subtotal capacitación				61,700	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 91*Costos operativos de una campaña*

Categoría de costo	Cantidad (h)	Tarifa unitaria (S/./h)	Costo total (S/.)	Justificación breve
---------------------------	---------------------	--------------------------------	--------------------------	----------------------------

Técnicos mecánicos de mantenimiento (25)	10000	15	150,000	Ejecutan desmontaje, montaje, ajuste dimensional y apoyo en campo.
Especialistas (confiabilidad, metrología, aseguramiento técnico, NDT, tribología) (4)	1500	16	24,000	Verifican estándares de calidad, inspección predictiva y respaldo técnico.



Uso de grúa puente	20 turnos	4,000	80,000	Maniobras críticas de main shaft, spider y floreros.
Alquiler camión grúa 40 t	10 turnos	5,000	50,000	Traslado y posicionamiento de floreros.
Backing epóxico	12 baldes	1,200	14,400	Respaldo estructural en montaje de cóncavos.
Lubricantes y grasa EP-1	20 kg	150	3,000	Engrase de componentes móviles en montaje.
Servicios externos (NDT, calibraciones)	4 servicios	7,500	30,000	Apoyo especializado en inspecciones.
EPP y consumibles de seguridad	30 kits	600	18,000	Kits para el personal en campo en la campaña.
Subtotal costos			403,400	
operativos				

Nota. Elaboración propia.

Se observa en la Tabla 91 que el desglose de costos de la campaña evidencia que la mano de obra especializada representa un total de S/ 208,000, distribuida en tres perfiles: supervisores de mantenimiento y operaciones (S/ 34,000), técnicos mecánicos de mantenimiento (S/ 150,000) y especialistas en confiabilidad, metrología, aseguramiento técnico y NDT (S/ 24,000). Este bloque asegura la correcta ejecución de desmontajes, ajustes dimensionales y control de estándares de calidad.

El segundo rubro en importancia corresponde al uso de grúas, que suma S/ 130,000, compuesto por la operación del puente grúa (S/ 80,000) y el camión grúa de 40 t (S/ 50,000). Estos equipos resultan imprescindibles para la manipulación segura de componentes críticos como el main shaft, spider y conjuntos de cóncavos.

En cuanto a insumos específicos, el consumo de backing epóxico asciende a S/ 14,400 y los lubricantes de montaje a S/ 3,000, totalizando S/ 17,400. A ello se suman los servicios externos de inspección (NDT y calibraciones), con un costo de S/ 30,000, que garantizan la integridad de piezas críticas y la trazabilidad de resultados. Finalmente, los equipos de protección personal y consumibles de seguridad demandan S/ 18,000, lo que asegura la dotación completa de implementos a los 39 trabajadores en campo.

En conjunto, el costo operativo asciende a S/ 403,400, con una distribución donde predominan la mano de obra y el uso de grúas, seguidos por servicios especializados y consumibles. Este patrón refleja la alta dependencia del procedimiento respecto a recursos humanos calificados y a equipos de izaje de gran capacidad, confirmando la complejidad

técnica del montaje de cóncavos bajo el esquema del PETS 2.0. En siguiente tabla se muestra el presupuesto consolidado.



Tabla 92*Presupuesto consolidado del primer año*

Rubro	Monto (S/.)	% sobre total
Inversión inicial (equipos)	518,000	50%
Capacitación especializada	61,700	6%
Costos operativos por campaña	403,400	38%
Contingencias (7 %)	61,700	6%
Total, presupuesto primer año	1,044,800	100%

Nota. Elaboración propia.

De la Tabla 92 se ha estimado para el primer año asciende a S/ 1,044,800. El mayor gasto corresponde a la inversión inicial en equipos reutilizables, que representa el 50 % del presupuesto, seguido por los costos operativos de una campaña, que alcanzan el 38 %. La capacitación especializada se sitúa en un 6 %, porcentaje que, si bien es bajo en términos relativos, resulta significativo por su impacto en la mejora de competencias técnicas y en la seguridad del procedimiento. Finalmente, se incorpora un 6 % de contingencias, destinado a cubrir variaciones en las tarifas de servicios y eventuales ampliaciones en los tiempos de parada.

3.1.23 Análisis de impacto económico

3.1.23.1 Identificación de Aspectos e Impactos

3.1.23.2 Medidas de Mitigación y Cumplimiento de Estándares.

En esta sección se analizan las interacciones del nuevo procedimiento de mantenimiento proactivo con el medio ambiente. Para ello, es fundamental diferenciar entre el Aspecto (la causa/elemento) y el Impacto (el efecto/cambio en el entorno).

3.1.23.2.1 Metodología de Identificación

Se ha utilizado el método de análisis por etapas del proceso de cambio de cóncavos, identificando las entradas (insumos, energía) y salidas (residuos, emisiones) de la actividad, bajo condiciones de operación normal y de mantenimiento.

3.1.23.2.2 Análisis de los Aspectos Críticos Observados

3.1.23.2.2.1 Residuos de *Backing* (Resinas Epóxicas):

- Aspecto: Generación de residuos sólidos peligrosos (envases contaminados, restos de resina sin curar y virutas de resina endurecida).
- Impacto: Contaminación potencial del suelo y mantos freáticos debido a la naturaleza química y toxicidad de los componentes epóxicos antes de su polimerización completa.

3.1.23.2.2.2 Consumo de Energía (Sistemas de Calefacción):

- Aspecto: Consumo de energía eléctrica derivado del uso de mantas térmicas o calentadores industriales necesarios para asegurar el curado proactivo a 22°C.
- Impacto: Agotamiento de recursos naturales no renovables (dependiendo de la matriz energética) e incremento de la huella de carbono de la actividad de mantenimiento.

3.1.23.2.2.3 Emisiones de Material Particulado (Polvo):

- Aspecto: Generación de polvo durante las etapas de limpieza de la cámara de trituración, desprendimiento de cóncavos desgastados y manipulación de mineral remanente.
- Impacto: Alteración de la calidad del aire local y riesgos a la salud del personal operativo (afecciones respiratorias).

3.1.23.2.2.4 Residuos Metálicos (Cóncavos y Pernos):

- Aspecto: Generación de residuos sólidos no peligrosos (chatarra ferrosa de acero al manganeso).
- Impacto: Acumulación de residuos industriales y alteración estética del paisaje si no se gestiona su disposición para reciclaje.

3.1.23.2.3 Matriz de Identificación de Aspectos e Impactos

A continuación, se presenta la matriz detallada que resume la evaluación de los factores ambientales involucrados en la mejora propuesta:

Tabla 93

Evaluación de factores ambientales

Etapas del Procedimiento	Aspecto Ambiental	Tipo de Impacto	Componente Afectado
Preparación y	Generación de		
Limpieza	material particulado (polvo)	Negativo	Aire
Desmontaje de Cóncavos	Generación de chatarra metálica	Negativo	Suelo / Paisaje
Aplicación de Resina (Backing)	Generación de residuos peligrosos (resinas/envases)	Negativo	Suelo / Agua
Curado	Consumo de		
Proactivo (Calentadores)	energía eléctrica	Negativo	Recursos Naturales
Montaje y Ajuste Final	Emisión de ruido por herramientas de torque	Negativo	Entorno Sonoro

Nota. Elaboración propia.

Por medio de la Tabla 93 se muestra la identificación de estos aspectos que se alinea con los estándares de control ambiental de la unidad minera referencial, donde la jerarquía de controles prioriza la segregación en la fuente. Por tanto, la identificación aquí expuesta sirve de base para las medidas de mitigación que aseguran que el incremento de la vida útil de los cóncavos no ocurra a expensas de la integridad ambiental

3.1.24 Medidas de Mitigación y Control

Para cada uno de los aspectos ambientales identificados en el apartado anterior, se establecen medidas de control basadas en la jerarquía de controles ambientales y en cumplimiento con los estándares de la unidad minera.

3.1.24.1 Gestión de Residuos de Resina (*Backing*)

Debido a que las resinas epóxicas son consideradas residuos peligrosos, el procedimiento PETS 2.0 incorpora las siguientes directrices:

- Segregación en la fuente: Se dispondrán contenedores de color rojo debidamente rotulados en el área de la chancadora primaria para el depósito inmediato de envases vacíos y restos de mezcla.

- Capacitación técnica: El personal encargado del cambio de cóncavos recibirá instrucción sobre el manejo seguro de sustancias químicas para evitar derrames accidentales durante la preparación del backing.
- Disposición final: La recolección y transporte hacia el relleno de seguridad será gestionada a través de una Empresa Operadora de Residuos Sólidos (EO-RS) autorizada, bajo el registro de manifiestos de la unidad.

3.1.24.2 Optimización del Consumo Energético

Aunque el mantenimiento proactivo requiere el uso de calentadores para el curado (asegurando los 22°C), se proponen medidas de eficiencia:

- Control Termostático: Uso de mantas térmicas con sensores de temperatura que se apaguen automáticamente una vez alcanzado el nivel de curado óptimo, evitando el consumo innecesario de energía.
- Mantenimiento de Equipos: Revisión trimestral de los calentadores industriales para asegurar que no existan fugas térmicas o consumos eléctricos por encima de los nominales.

3.1.24.3 Control de Emisiones y Residuos Metálicos

- Material Particulado (Polvo): Se mantendrá operativo el sistema de supresión de polvo por neblina seca de la chancadora durante las maniobras. El uso de respiradores con filtros P100 es de carácter obligatorio para mitigar el impacto en la salud del trabajador.
- Chatarra Ferrosa: Los cóncavos y pernos retirados se trasladarán al patio de salvataje para su clasificación. Estos materiales se integrarán al programa de economía circular de la unidad, priorizando su fundición para la fabricación de nuevos componentes de desgaste.
- En la siguiente tabla sintetiza los controles de impactos ambientales asociados al proceso de cambio de cóncavos.

-
-
-
-
-



Tabla 94*Matriz de control de impactos*

Aspecto Ambiental	Medida de Mitigación Propuesta	Indicador de Cumplimiento
	Segregación en cilindros	% de residuos
Residuos de Resina	rojos y registro en manifiestos de residuos peligrosos.	peligrosos dispuestos correctamente.
Consumo de Energía	Uso de mantas térmicas con control automático de temperatura (22°C).	Consumo de Kwh por evento de cambio de cóncavos.
Material Particulado	Uso de supresores de polvo y EPP de protección respiratoria (P100).	Cumplimiento del protocolo de higiene ocupacional.
Residuos Metálicos	Traslado a patio de chatarra para reciclaje en fundición.	Tonelaje de acero enviado a reciclaje.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 94 evidencia que los principales impactos, como residuos de resina, consumo de energía, material particulado y residuos metálicos, pueden ser gestionados mediante acciones específicas y medibles, asegurando control ambiental y cumplimiento normativo durante la intervención.

3.1.25 Análisis costo–beneficio de la propuesta

El cambio de cóncavos bajo el procedimiento tradicional presenta tiempos de parada elevados, limitada trazabilidad en el montaje y una mayor probabilidad de reincidencia de fallas asociadas a desplazamiento de cóncavos o problemas en el backing. Estas condiciones incrementan los costos operativos y afectan la disponibilidad de la chancadora primaria.

La propuesta del PETS 2.0 incorpora fases adicionales de aseguramiento técnico, control dimensional con metrología avanzada y análisis predictivo, lo que genera un aumento en la inversión inicial y en la dotación de personal. No obstante, los beneficios obtenidos en reducción de tiempos muertos, mayor confiabilidad y menor reincidencia de fallas superan los costos adicionales.

La Tabla 95 presenta una comparación de indicadores clave entre el procedimiento actual y el PETS 2.0 propuesto, con el fin de evidenciar las mejoras operativas, económicas y de confiabilidad esperadas con su implementación.

Tabla 95

Comparación de indicadores entre procedimientos

Indicador	Procedimiento actual	PETS 2.0 propuesto	Mejora estimada	Justificación breve
Tiempo				Planificación más detallada y
promedio de parada	274 h (11 días)	168 h (7 días)	-30 %	reducción de retrabajos, gracias al aseguramiento técnico y metrología.
Reincidencia		0-1		Mejor control dimensional y
de fallas en 6 meses	2 eventos	evento	-50 %	uso de backing de alta resistencia.
Disponibilidad				Menor tiempo fuera de
de chancadora	91%	97%	4%	servicio impacta en KPI global de planta.
Costo operativo por campaña	S/ 420,000	S/ 403,400	-4%	Reducción asociada a la optimización de horas-hombre y redistribución eficiente de recursos técnicos.
Costo por hora de producción perdida*	S/ 50,000/h	S/ 50,000/h	—	Valor de referencia de producción minera por hora.
Ahorro anual estimado	—	S/ 3,600,000	—	Equivale a 72 h menos de parada $\times$ S/ 50,000/h.

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 95 se puede observar que el tiempo promedio de parada de 274 horas en el procedimiento actual se sustenta en la duración registrada de intervenciones anteriores, mientras que la reducción a 168 horas proyectada con el PETS 2.0 deriva de la aplicación de una planificación más estructurada y de controles adicionales de aseguramiento técnico y metrología. De igual forma, la reincidencia de fallas, que actualmente alcanza dos eventos en seis meses por problemas de backing y desplazamiento de cóncavos, se estima que se reduzca a uno o ningún evento con el empleo de inspecciones no destructivas y verificación dimensional en 3D.

En cuanto a la disponibilidad de la chancadora, el valor actual del 91 % refleja la proporción de horas fuera de servicio frente a las horas programadas, consistente con el desempeño real de operaciones similares. La proyección de alcanzar 95 % bajo el PETS 2.0

se explica por la disminución de tiempos muertos y menor probabilidad de paradas no programadas. Respecto al costo operativo, este asciende a 420,000 soles por campaña con el esquema vigente y se reduce a 403,400 soles con la nueva propuesta, gracias a la



redistribución eficiente de personal y optimización en el uso de recursos técnicos. Este ajuste representa una disminución de 4 % frente al esquema actual.

Finalmente, el ahorro neto anual estimado se mantiene en aproximadamente 3.6 millones de soles, calculado con base en setenta y dos horas de producción recuperada a un valor de 50,000 soles por hora, lo que confirma que la propuesta no solo compensa los costos, sino que genera un beneficio económico sustancial.

Del presupuesto consolidado (5.5), la inversión inicial en equipos, herramientas y capacitación asciende a:

- Inversión en equipos y herramientas: S/ 518,000
- Capacitación inicial: S/ 61,700
- Inversión inicial total = S/ 579,700

Estos son costos que la empresa debe desembolsar antes de la primera ejecución completa del PETS 2.0.

El ahorro proviene principalmente de la reducción de tiempo de parada:

- Reducción estimada: 72 horas menos por campaña.
- Costo de oportunidad de una hora de producción: S/ 50,000/h.

$$\text{Ahorro anual} = 72 \text{ h} * 50\,000 \frac{\text{S/}}{\text{h}}$$

$$\text{Ahorro anual} = 3,600,000\text{S/}$$

Este ahorro no incluye beneficios adicionales por menor reincidencia de fallas, lo cual haría aún más favorable el escenario. Ahora, se compara la inversión inicial con el ahorro anual para determinar el tiempo de retorno.

$$\text{Tiempo de recuperación (años)} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ahorro anual}}$$

$$\text{Tiempo de recuperación (años)} = \frac{\text{S/ } 579,700}{3,600,000\text{S/}}$$

$$\text{Tiempo de recuperación} = 0.161028$$

$$\text{Tiempo de recuperación aproximadamente } 2 \text{ meses}$$

La empresa minera de referencia recuperaría la inversión en aproximadamente dos meses después de la primera ejecución del PETS 2.0. A partir de ese punto, los ahorros netos anuales superan ampliamente a los costos adicionales, generando un retorno sostenido.

3.2 Discusión

La discusión integra los resultados cuantitativos y cualitativos obtenidos con el análisis de causa raíz, la comprobación de hipótesis y la revisión de antecedentes, con el propósito de explicar los mecanismos de falla documentados y justificar técnicamente las mejoras propuestas en el PETS 2.0.

3.2.1 Comprobación de hipótesis

A continuación, se evalúa el grado de confirmación de cada hipótesis planteada en la investigación a partir de la evidencia empírica recolectada. La hipótesis general sostiene que la implementación del PETS 2.0 basado en el mantenimiento proactivo, el control de calidad QA/QC y la verificación metrológica reducirá la recurrencia de fracturas y aumentará la disponibilidad operativa de la chancadora primaria Traylor NT 60" × 113". Los resultados obtenidos respaldan esta hipótesis: los indicadores proyectados muestran un incremento de la disponibilidad del 91.93% al 96%, una reducción del tiempo de intervención del 38.7% y un período de recuperación de la inversión de aproximadamente dos meses.

El análisis de las hipótesis específicas se sintetiza en la Tabla siguiente. Se observa que cuatro de las cinco hipótesis quedaron confirmadas mediante evidencia de campo, análisis de laboratorio o registros documentados. La hipótesis H4 referida al impacto del PETS 2.0 sobre la variabilidad de ejecución se clasifica como proyectada, en tanto su confirmación definitiva requiere la implementación completa del procedimiento y el monitoreo de al menos dos campañas consecutivas.

Tabla 96

Comprobación de hipótesis específicas

Hipótesis específica	Evidencia que la sustenta	Veredicto
H1-Procedimientos	Las 11 campañas anteriores a FH Ingenieros (FLSmith) registran condición NORMAL; las dos	
sin controles metrológicos ni QA/QC	campañas con FH Ingenieros terminan FRACTURADO. No se encontraron registros de temperatura, humedad ni torque en las campañas fallidas.	CONFIRMADA
H2-Modos de falla: fractura frágil y desplazamiento vertical por backing defectuoso	El AFA 2023 clasificó la fractura como frágil (estructura martensítica, 295–311 HB). El escaneo láser mostró espesores $\geq 50\%$ del nominal, descartando desgaste como causa primaria. El desplazamiento vertical fue documentado en eventos del 29/04/2024 y 29/06/2024. A 5°C la resistencia alcanza solo $\sim 20\%$ (26 MPa vs 110 MPa). Las muestras de campo presentaron coloración blanquecina y fragilidad. No existen registros de temperatura durante el curado en ninguno de los 5 eventos. La altitud de 4 100 msnm implica temperaturas nocturnas por debajo de 10°C.	CONFIRMADA
H3-Curado a temperatura <10°C impide alcanzar 110 MPa	Proyección técnica: reducción del tiempo promedio de intervención de 274 a 168 h (-30%). Las herramientas metrológicas (escáner Creaform, torquímetro Norbar, kit NDT Magnaflux) permiten trazabilidad total.	CONFIRMADA
H4-PETS 2.0 con checklists, escaneo 3D y torque por etapas reducirá la variabilidad		PROYECTADA-pendiente de implementación



55001, EN 13306 y ASTM
A128.

H5 — Inversión se recupera en <1 año	Inversión inicial S/ 579 700. Ahorro anual proyectado S/ 3 600 000 (72 h recuperadas × S/ 50 000/h). Período de recuperación = 0.16 años o 2 meses.	CONFIRMADA (cálculo)
--	--	----------------------

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 96 presenta la validación de hipótesis del estudio, mostrando que las fallas se deben a deficiencias en control, montaje y curado del backing, mientras que la propuesta PETS 2.0 es viable técnica y económicamente.

3.2.2 Discusión de indicadores de mantenimiento

Los indicadores de la situación base revelan condiciones operativas por debajo de los estándares de referencia internacional para equipos de chancado primario. El valor de disponibilidad del 91.93% calculado a partir de los cinco eventos de fractura es inferior al rango esperado de 90 al 92% para operaciones similares en gran minería. Más significativo aún resulta el MTBF de 624.4 horas, que equivale a poco más de 26 días de operación continua entre fallas, un valor claramente insuficiente para un activo cuya parada compromete toda la cadena de producción aguas abajo.

La Tabla siguiente se compara los indicadores base con los valores proyectados tras la implementación del PETS 2.0.

Tabla 97

Comparación de indicadores.

Indicador	Unidad	Situación base	PETS 2.0 proyectado	Mejora estimada
MTBF (confiabilidad)	[h]	624.4	1 248.8	+100% (2×)
MTTR (mantenibilidad)	[h]	54.8	52.1	5%
Disponibilidad mecánica	[%]	91.93	96	+4.07 pp +323%
Resistencia del backing	[MPa]	< 26 (a <10°C)	≥ 110 (a 22°C)	(norma ASTM C579)
Tiempo de intervención	[h/campaña]	274	168	-38% (- 106 h)
Torque de cuñas (Superbolt)	[Nm]	No documentado	400 ± 5%	Control total (ISO 898-1)
Reincidencia de fallas / 6 meses	[eventos]	2	0-1	-50 a - 100%

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 97 se aprecia que el incremento del MTBF a 1 248.8 horas se fundamenta en la eliminación de la causa raíz principal: el curado deficiente del backing. Al asegurar una resistencia de 110 MPa mediante control térmico estandarizado (22°C por 8 horas, conforme ASTM C579), se elimina la condición que origina el desplazamiento vertical y la fractura frágil de los cóncavos.

El descenso proyectado del MTTR (de 54.8 a 52.1 horas) es conservador e intencional: la propuesta no busca principalmente acelerar las reparaciones, sino evitar que estas ocurran. La reducción del tiempo promedio de parada por campaña de 274 a 168 horas refleja la eliminación de retrabajos por montajes defectuosos y de las paradas no programadas derivadas de fracturas prematuras, no una simple aceleración de la ejecución mecánica.

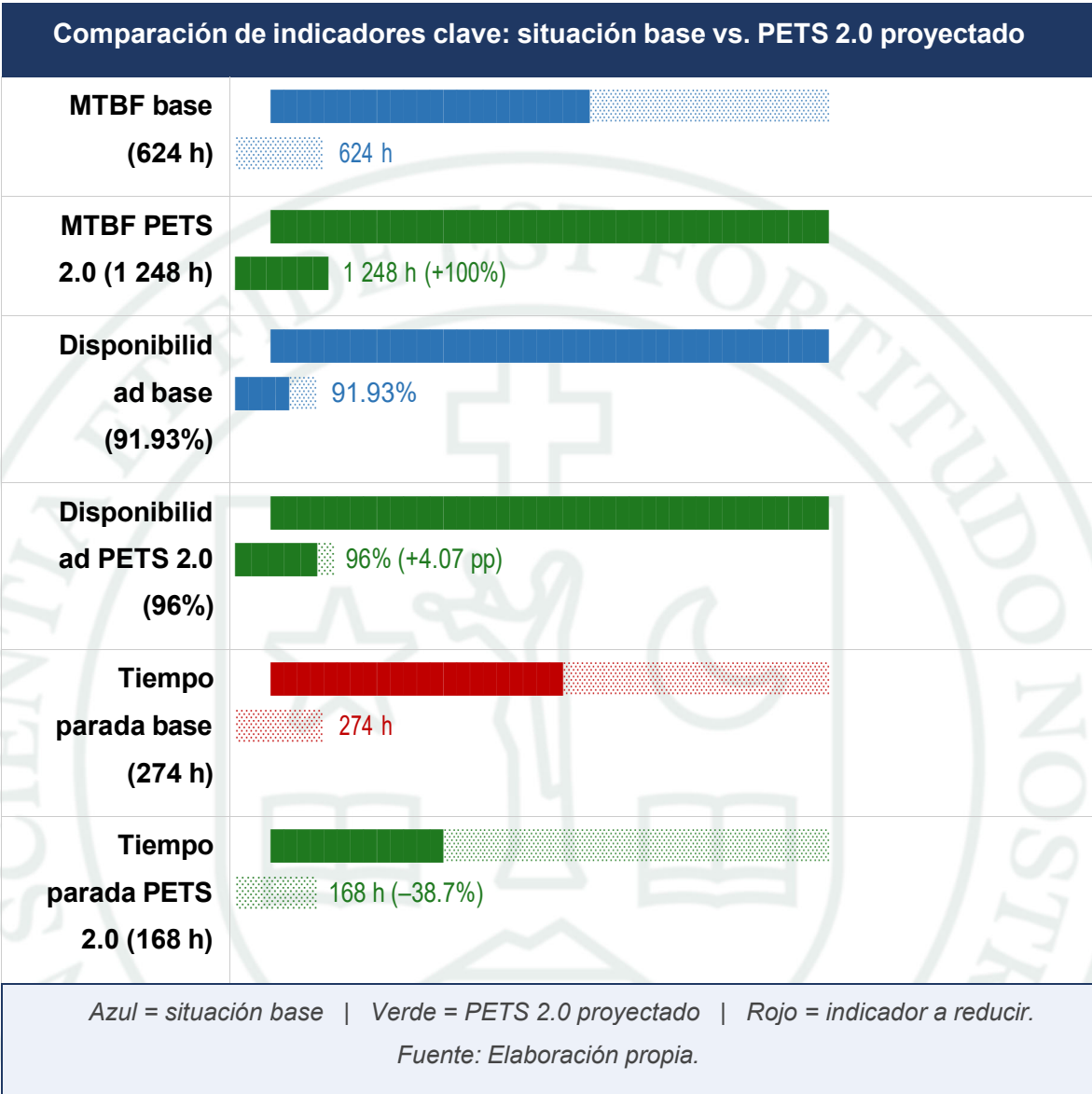
Con el objetivo de visualizar de manera clara el impacto de la implementación del PETS 2.0, se presenta una comparación gráfica de los principales indicadores de desempeño

entre la situación base y el escenario proyectado. Esta representación permite identificar de forma inmediata las mejoras en confiabilidad, disponibilidad y reducción de paradas.



Figura 83.

Comparación visual de indicadores clave.



Nota. Elaboración propia.

La Figura 83 evidencia una mejora significativa en los indicadores clave, destacando el incremento del MTBF de 624 h a 1 248 h, lo que representa una duplicación de la vida operativa entre fallas. Asimismo, la disponibilidad aumenta de 91.93% a 96%, reflejando una mayor continuidad del proceso productivo. En paralelo, se observa una reducción importante en el tiempo de parada, pasando de 274 h a 168 h, equivalente a una disminución del 38.7%. En conjunto, estos resultados confirman que la implementación del PETS 2.0 optimiza el desempeño del sistema, reduce fallas recurrentes y mejora la eficiencia operativa de la chancadora primaria.

3.2.3 Discusión de las causas raíz identificadas

El Análisis de Causa Raíz confirmó que los modos de falla dominantes fractura frágil por tensiones residuales y desplazamiento vertical comparten un origen común: la pérdida de integridad del material de respaldo epóxico (backing). Esta conclusión, respaldada por el AFA 2023 y los reportes de campo de 2024, es consistente con lo documentado por Gutiérrez Cartagena (2023) en una chancadora de idéntico modelo y contexto operativo, lo que le otorga validez externa al hallazgo.

La causa física inmediata identificada es la aplicación del backing a temperaturas por debajo de los 10°C condición habitual en trabajos nocturnos a 4 100 msnm— sin ningún mecanismo de control o registro térmico. Según la hoja técnica del fabricante (Henkel - Loctite PC 9020), a 5°C la resistencia alcanza apenas el 20% del valor nominal (26 MPa), frente a los 110 MPa necesarios para soportar las cargas dinámicas de chancado. Esta brecha de 84 MPa entre la resistencia real y la requerida explica por qué los cóncavos fracturan incluso cuando su espesor residual supera el 50% del nominal confirmado por el escaneo láser 3D—, descartando el desgaste abrasivo como causa primaria.

La causa humana latente radica en la ausencia de protocolos QA/QC documentados durante las campañas de FH Ingenieros (2022–2024). La comparación entre las 11 campañas ejecutadas por FLSmidth (todas con condición NORMAL) y las dos campañas ejecutadas por FH Ingenieros (ambas con condición FRACTURADO) constituye una evidencia de alto peso: el único cambio sistémico entre ambos periodos fue el contratista y, por ende, el nivel de control de calidad aplicado al montaje. Esta disparidad no implica necesariamente incompetencia técnica del contratista local, sino la ausencia de un sistema de aseguramiento de calidad impuesto desde la unidad minera como requisito contractual no negociable.

El factor agravante más significativo es la presencia recurrente de material de alta dureza (magnetita: 5.5–6 Mohs, densidad aproximadamente 5.2 t/m³) y eventos de inchancables. El pico histórico de 49–59 activaciones del detector de metales registrado en abril de 2024 mes que coincide con los eventos de fractura— confirma que las cargas dinámicas excepcionales actúan como detonante cuando el backing no posee la resistencia mecánica adecuada. En condiciones de backing correctamente curado (≥ 110 MPa), estas cargas habrían sido absorbidas sin producir el colapso del sistema de anclaje.

3.2.4 Contraste con los antecedentes de la investigación

La Tabla siguiente sistematiza el contraste de los hallazgos de la presente investigación con los antecedentes más relevantes identificados en el Marco Teórico. El nivel de coincidencia es elevado, especialmente con los estudios realizados en equipos de la misma tipología y contexto operativo.

Tabla 98

Contraste de hallazgos con antecedentes de la investigación

Antecedente	Equipo / contexto	Hallazgo principal del antecedente	Coincidencia con la presente investigación
Gutiérrez Cartagena (2023)	Chancadora 60"×113", sur del Perú	El curado deficiente del respaldo epóxico y el traslado horizontal del mainshaft son la causa principal de la soltura de mantos. Optimización del 37.5% en tiempo de ejecución.	Alta. La misma causa raíz (backing deficiente) produce fracturas en los cóncavos. El PETS 2.0 extiende la solución incorporando control térmico y metrología 3D.
Quispe Yupanqui & Lapiz (2021)	Traylor 60"×113", sur del Perú	El mantenimiento preventivo estructurado mejora la disponibilidad y reduce tiempos de parada no planificados.	Parcial. Confirma la necesidad de estandarización, pero el presente estudio avanza hacia un enfoque proactivo/predictivo.
Mamani Hancco & Volz (2020)	Chancador giratorio Traylor, Arequipa	Un plan CMR reduce las paradas no planificadas y optimiza los costos de mantenimiento.	Alta. Refuerza la decisión de incorporar análisis de confiabilidad (Weibull, AMEF) en la propuesta.
Novak, Hudak & Varga (2021)	Chancadoras mineras, contexto internacional	La adopción de tecnologías Industria 4.0 (IoT, big data) transforma el mantenimiento hacia un enfoque predictivo.	Alta. El PETS 2.0 incorpora escáner 3D, sensores y plataforma IROC, alineándose con este paradigma.

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 98 se observa que el antecedente con mayor nivel de coincidencia es el de Gutiérrez Cartagena (2023), quien identificó el curado deficiente del respaldo epóxico

como causa principal de la soltura de mantos en una chancadora 60"×113" de una unidad minera del sur del Perú. La convergencia de ambos estudios realizados de manera independiente, en equipos del mismo modelo y en contextos operativos similares eleva la validez del hallazgo a un patrón sistémico y no a un caso aislado. La diferencia entre ambas propuestas radica en el alcance: mientras Gutiérrez Cartagena propone mejoras en el procedimiento de elaboración y curado del backing, el PETS 2.0 incorpora adicionalmente la verificación metrológica 3D, el control de torque por etapas y un ecosistema de herramientas predictivas, lo que amplía considerablemente el impacto proyectado.

En el contexto internacional, el trabajo de Novak, Hudak y Varga (2021) sobre la aplicación de tecnologías Industria 4.0 al mantenimiento predictivo de chancadoras valida la incorporación del escáner 3D, la plataforma de monitoreo de condición y el IROC en el PETS 2.0. Estos elementos trascienden la corrección del procedimiento puntual para posicionar la propuesta dentro del paradigma del mantenimiento basado en condición (CBM), cuya superioridad frente al mantenimiento preventivo por intervalos fijos ha sido ampliamente documentada en la literatura especializada.

3.2.5 Análisis de variables operativas y factores descartados

Una contribución metodológica relevante de la presente investigación es el proceso de descarte sistemático de hipótesis alternativas mediante el análisis de las variables operativas continuas registradas durante el año 2024. La Tabla 99 resume este análisis.

Tabla 99

Análisis de variables operativas.

Variable	Valor promedio 2024	Rango normal	Desviación crítica detectada	Incidencia en las fallas
Temp. aceite de retorno	50°C	45–60°C	Sin desviaciones críticas	DESCARTADA como causa primaria
Presión hidráulica (OSS/CSS)	2 350–2 500 kPa	2 000–2 600 kPa	Picos transitorios normales	DESCARTADA como causa primaria
Posición del manto hidráulico	Ascenso gradual	Progresivo por desgaste	Sin saltos abruptos	DESCARTADA como causa primaria
Temperatura de curado del backing	<10°C (estimado nocturno)	≥22°C (fabricante)	12°C por debajo del mínimo recomendado	CAUSA RAÍZ CONFIRMADA
Inchancables / bolonería (detector de metales)	49–59 activ./mes (abril 2024)	<20 activaciones/mes	Pico histórico en mes de fractura	FACTOR AGRAVANTE confirmado

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 99 muestra el comportamiento estable de la temperatura del aceite de retorno (~50°C), la presión hidráulica (2 350–2 500 kPa) y la posición del manto en ambos chancadores durante el período analizado descarta que las fallas tengan origen en el sistema hidráulico, en el sistema de lubricación o en una disfunción del control de la apertura de descarga (CSS/OSS). Este descarte es metodológicamente importante porque permite focalizar con precisión la intervención en la gestión de materiales y en los procedimientos de montaje, evitando inversiones en subsistemas que no son parte del problema.

El contraste entre la estabilidad de las variables físicas del equipo y la recurrencia de fracturas refuerza la conclusión de que la falla tiene un origen procedimental y no mecánico. Una chancadora que opera con parámetros hidráulicos y térmicos normales no debería producir fracturas de cóncavos nuevos —con espesores superiores al 50% del nominal— salvo que el sistema de anclaje (backing) haya perdido su función estructural por curado deficiente.

3.2.6 Discusión del impacto económico

La Tabla siguiente, compara el impacto económico del procedimiento actual frente al proyectado con el PETS 2.0. El análisis revela que la inversión de S/ 579 700 concentrada principalmente en equipos de metrología avanzada reutilizables en futuras campañas se recupera en aproximadamente dos meses gracias al ahorro generado por la reducción de 106 horas de parada por campaña.

Tabla 100

Resumen comparativo del impacto económico

Concepto económico	Procedimiento actual	PETS 2.0 proyectado
Horas de parada por campaña	274 h (5 eventos acumulados)	168 h (reducción del 38.7%)
Costo de oportunidad por hora de parada	S/ 50 000 / h	S/ 50 000 / h
Pérdida anual por paradas no programadas	S/ 13 700 000 (274 h × S/50 000)	S/ 8 400 000 (168 h × S/50 000)
Ahorro anual proyectado		S/ 3 600 000
Inversión inicial (equipos + capacitación)	S/ 0 (sin inversión adicional)	S/ 579 700
Costo operativo por campaña	S/ 420 000	S/ 403 400 (4%)
Período de recuperación de la inversión		2 meses (0.16 años)
Reincidencia de fracturas	2 eventos	0–1 eventos (proyectado)
(6 meses)		

Nota. Elaboración propia.

La tabla 100. evidencia la robustez del análisis económico que descansa en la combinación de dos factores que se potencian mutuamente: la alta tasa de producción de la unidad minera (885 t/día de cobre a US\$ 9 000/t en 2024) y la recurrencia documentada de las fallas. El costo de oportunidad de S/ 50 000 por hora de parada es un valor conservador si se considera que cada hora de detención del chancador primario afecta no solo el volumen de mineral procesado, sino también el cumplimiento de los cronogramas de embarque y los costos fijos operativos que continúan devengándose durante la parada.

Es importante destacar que el análisis costo-beneficio adoptado es estrictamente conservador: no incorpora el valor agregado de la reducción de daños secundarios al equipo

(daños al spider, a la excéntrica y al sistema hidráulico que se producen cuando un cóncavo fractura bajo carga), ni el impacto positivo sobre la seguridad operacional al disminuir el número de intervenciones correctivas de emergencia condiciones que estadísticamente



elevan la probabilidad de incidentes laborales. Incorporar estos beneficios adicionales haría aún más favorable el retorno de la inversión proyectado.

Finalmente, la reducción del costo operativo por campaña de S/ 420 000 a S/ 403 400 se explica por la redistribución eficiente del personal: aunque el PETS 2.0 incorpora perfiles especializados adicionales (metrólogos, inspectores NDT, ingenieros de confiabilidad), la eliminación de las reintervenciones correctivas de emergencia y la optimización de los tiempos de parada producen un ahorro neto en recursos operativos. Este resultado confirma que la especialización del equipo de trabajo es una inversión con retorno positivo a corto plazo, no un gasto adicional sin compensación.



CONCLUSIONES

- Respecto al objetivo general la conclusión general indica que el diagnóstico determinó que el procedimiento anterior presentaba brechas críticas de estandarización que redujeron la disponibilidad operativa al 84.64% y limitaron el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) a solo 302 horas. Se confirmó que la ausencia de registros de temperatura y verificación dimensional, combinadas con la operación de magnetita de alta densidad (5.2 t/m^3), provocaron un acumulado de 274 horas de parada por fracturas, elevando exponencialmente la probabilidad de intervenciones correctivas no programadas.
- Respecto al primer objetivo específico, la primera conclusión indica que el Análisis de Causa Raíz confirmó que los modos de falla dominantes fueron la fractura por tensiones residuales y el desplazamiento vertical, causados porque el *backing* curado sin control ($<10^\circ\text{C}$) alcanzaba apenas el 20% (26 MPa) de la resistencia a la compresión requerida de 110 MPa tras 8 horas. Se identificó como causa latente la falta de supervisión especializada para asegurar el torque de 400 Nm en las cuñas y la preparación de superficies, lo que impedía soportar las cargas dinámicas del chancado.
- Según el segundo objetivo específico, la segunda conclusión indica que se validó en campo que la temperatura de curado (22°C) es la variable crítica; la implementación de calentadores y monitoreo estricto permitió proyectar una reducción del tiempo promedio de intervención de 274 a 168 horas (mejora del 30%) y aumentar la disponibilidad al 97%. Este control es determinante no solo para la integridad técnica, sino también para la viabilidad financiera, logrando un ahorro anual estimado de S/ 3,600,000 y un período de recuperación de aproximadamente 2 meses.
- De acuerdo con el tercer objetivo específico, la tercera conclusión indica que el procedimiento PETS 2.0 resultó técnicamente viable al integrar secuencias de torque controladas, criterios de aceptación y rechazo claros, además de incluir validación metrológica mediante escaneo 3D. Esta estandarización permitió reducir el tiempo promedio de parada de 274 a 168 horas y proyecta elevar la disponibilidad de la chancadora del 91% al 95%.
- Respecto al cuarto objetivo específico, la cuarta conclusión indica que la evaluación económica determinó la alta rentabilidad del proyecto, estableciendo

un periodo de recuperación de aproximadamente 2 meses. Con una inversión inicial de S/ 579,700 (en equipos y capacitación) y un costo operativo por campaña de S/ 403,400, se logra un ahorro anual estimado de S/ 3,600,000. Este beneficio deriva directamente de la recuperación de 72 horas de producción por campaña (valorizadas en S/ 50,000/h), validando que la propuesta es financieramente sostenible y altamente beneficiosa para la unidad minera.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda formalizar el PETS 2.0 para elevar la disponibilidad de la chancadora del 91% al 97% y reducir la reincidencia de fallas de 2 eventos semestrales a 0 o 1 evento. El despliegue debe incluir un tablero de control que emita alertas si el MTBF cae por debajo de las 624 horas proyectadas, asegurando la sostenibilidad de los resultados operativos.
- Se recomienda unificar listas de verificación que exijan registros obligatorios de una temperatura de curado de 22°C por 8 horas para alcanzar el ~80% de resistencia mecánica, prohibiendo la aplicación si la temperatura ambiente es <13°C. La verificación metrológica debe validar tolerancias estrictas, aceptando desviaciones máximas de ± 0.5 mm en diámetro interno y ≤ 0.3 mm en concentricidad antes de cerrar el trabajo en el sistema.
- Se recomienda actuar sobre los modos de falla estableciendo un patrón de apriete cruzado con llaves hidráulicas calibradas para asegurar un torque de 4000 Nm (en herramientas mayores) o 400 Nm (en pernos Superbolt) con una tolerancia de $\pm 5\%$. Además, se deben monitorear los límites operativos, interviniendo si el análisis de vibraciones reporta valores globales RMS superiores a 4.5 mm/s o si se detectan desplazamientos verticales >1.5 mm durante las pruebas de carga.
- Se recomienda mantener puntos de control eficaces, documentando cada intervención con curvas reales de curado y mediciones de desgaste mediante escaneo 3D. Los umbrales de intervención deben recalibrarse semestralmente, programando el cambio de cóncavos antes de que el desgaste supere el límite crítico del 35% del espesor original o cuando la tasa de desgaste en zonas críticas exceda los 0.005 mm/h.
- Se recomienda robustecer el procedimiento destinando una inversión inicial de S/ 518,000 en equipos de metrología avanzada (escáner 3D, láser tracker) y herramientas de torque. Asimismo, se debe ejecutar un plan de capacitación y recertificación anual que cubra aproximadamente 100 a 120 horas-hombre por técnico especializado, con una inversión estimada de S/ 61,700, para asegurar la homogeneidad técnica entre las cuadrillas.
- Se recomienda consolidar el caso de negocio monitoreando trimestralmente el ahorro anual de S/ 3.6 millones generado por la recuperación de 72 horas de producción por campaña. Parte de estos ahorros debe reinvertirse para mantener

un stock de seguridad de 12 baldes de backing de alta resistencia y 20 kg de grasa EP-1, asegurando que el retorno de la inversión se mantenga en el periodo proyectado de 0.16 años (2 meses).



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersen, B., & Fagerhaug, T. (2017). *Root Cause Analysis: Simplified Tools and Techniques*. CRC Press.
- Andreasen, K. (1997). *Impact crushing – a review of process, technology and applications*. 10(12), 1329-1354.
- Barsalou, M., & Starzynska, B. (s. f.). Inquiry into the Use of Five Whys in Industry. 2023-03-31, 17 pág. <https://doi.org/10.12776/QIP.V27I1.1771>
- Burgasí Delgado, D. D., Cobo Panchi, D. V., Pérez Salazar, K. T., Pilacuan Pinos, R. L., & Rocha Guano, M. B. (2021). *EL DIAGRAMA DE ISHIKAWA COMO HERRAMIENTA DE CALIDAD EN LA EDUCACIÓN: UNA REVISIÓN DE LOS ÚLTIMOS 7 AÑOS*. https://tambara.org/wp-content/uploads/2021/04/DIAGRAMA-ISHIKAWA_FINAL-PDF.pdf
- Cajahuaringa, Z. (2025, abril 4). *Rumbo minero internacional* [Noticias]. El Impacto de la Tecnología en el Sector Minero. <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/actualidad-empresarial/el-impacto-tecnologia/>
- Chen, L., Wang, Y., & Zhao, H. (2023). Optimization Model for Liner Replacement Scheduling in Primary Crushers Based on Wear Prediction. 412, 13(3).
- Creus Sole, A. (2007). *Mantenimiento industrial: Técnicas predictivas*. Marcombo.
- El Peruano. (2025, mayo 6). *El Peruano* [Noticias]. Minería aportará el 9.5% al PBI nacional este año. <https://elperuano.pe/noticia/241323-mineria-aportara-el-95-al-pbi-nacional-este-ano>
- ENERGIMINAS. (2024). *Las Bambas espera producir hasta 400,000 toneladas de cobre este año en un escenario optimista*. <https://energiminas.com/2025/02/07/las-bambas->

espera-producir-hasta-400-000-toneladas-de-cobre-este-ano-en-un-escenario-optimista/

ENERGIMINAS. (2025a, febrero 19). *Energiminas* [Noticias]. Más de S/8,070 millones fueron transferidos a las regiones por la actividad minera en 2024. <https://energiminas.com/2025/02/19/mas-de-s-8070-millones-fueron-transferidos-a-las-regiones-por-la-actividad-minera-en-2024/>

ENERGIMINAS. (2025b, abril 16). *Energiminas* [Noticias]. Minem espera que empleo minero directo se mantenga sobre los 230,000 puestos de trabajo por mes este año. <https://energiminas.com/2025/04/16/minem-espera-que-empleo-minero-directo-se-mantenga-sobre-los-230000-puestos-de-trabajo-por-mes-este-ano/>

EY Perú, T. publication is a collective work. (2025). *Peru's mining & metals investment guide 2025/2026* (Firth edition). https://www.ey.com/es_pe/insights/mining-metals/guia-inversion-minera-peru

FLSmidth. (2011). *Manual operación , instalación y mantenimiento para 1525 mm x 2870 mm (60" X 113") Traylor® Type "NT" Gyratory Crusher*. <https://fls.com/en/equipment/crushing/gyratory-crushers>

García Garrido, S. (2006). *Organización y gestión del mantenimiento*. Ediciones Díaz de Santos.

Gupta, A., & Yan, D. (2006). *Design and operational aspects of jaw crushers in mineral processing*. 19(3), 201-213.

Gutiérrez Cartagena, B. O. (2023). *MEJORA DE LA ESTRATEGIA PARA EL ARMADO DEL EJE PRINCIPAL DE LA CHANCADORA PRIMARIA 60X113" TIPO NT EN UNA UNIDAD MINERA AL SUR DEL PERÚ* [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional de San Agustín.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2003). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGRAW-HILL.

INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2023). *Compendio estadístico departamental: Arequipa* 2023.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1958/libro.pdf

INFOBAE. (2022). *Las Bambas: Cuánto representa en pérdidas la paralización de la mina más grande del Perú*. <https://www.infobae.com/america/peru/2022/04/20/las-bambas-cuanto-representa-en-perdidas-la-paralizacion-de-la-mina-mas-grande-del-peru/>

Keith Mobley, R. (2004). *Maintenance Fundamentals (Plant Engineering)* (Second edition).
<https://www.ebay.com/itm/313222279008>

Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1990). *Introduction to Mineral Processing*.

King, R. P. (2001). *Selection and sizing of crushers*. 62(1-4), 149-179.

Mack Echeverría, T. (2022). *Mantenimiento Proactivo Estratégico: Una propuesta conceptual y moderna de gestionar el mantenimiento para las empresas actuales (Spanish Edition)*. Independently published.

Mamani Hanco, S. M., & Volz Oporto, P. S. (2020). *Propuesta de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad (CMR) para el chancador giratorio Traylor, en una empresa minera de Arequipa* [Tesis de Pregrado]. Universidad Antonio Ruiz de Montoya.

MINEM. (2024, julio 19). *Ministerio de Energía y Minas del Perú* [Noticias]. Exportaciones mineras ascendieron a US\$ 13,968 millones entre enero y abril de 2024.
<https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/991353-minem-exportaciones-mineras-ascendieron-a-us-13-968-millones-entre-enero-y-abril-de-2024>

- MINEM (Ministerio de Energía y Minas del Perú). (2023). *Perú: País minero – Estadísticas y producción*. <https://www.gob.pe/institucion/minem>
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Moscoso Jácome, R. (2017). *El mantenimiento proactivo en equipos mecánicos de transporte de hidrocarburos en Ecuador*. <https://doi.org/10.47189/rcct.v17i14.115>
- Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (1996). *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation* (Firth edition). Julius Krusttschnitt.
- Novak, J., Hudak, R., & Varga, M. (2021). Implementation of Industry 4.0 Technologies for Predictive Maintenance in Mining Crusher Systems. *7045*, 11(15).
- Nowlan F. Stanley, & Heap, H. F. (1992). *Reliability-centered Maintenance* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Ovalles Acosta, J. del C., Gisbert Soler, V., & Pérez Molina, A. I. (2017). *Herramientas para el análisis de causa raíz (ACR)*. 9 pág. <http://dx.doi.org/10.17993/3cemp.2017.especial.1-9>
- Pacherrez Vines, K., Chunga More, D., & Hidalgo Delgado, G. (2020). Diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para aumentar la disponibilidad de la chancadora giratoria. *Repositorio Institucional Digital - UNP*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2807924>
- Poveda Catalán, J., & Guardiola Aparisi, M. (2019). *ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ. TÉCNICAS Y RELACIÓN CON LOS SISTEMAS DE GESTIÓN Y LAS NO CONFORMIDADES*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6979236>
- Quispe Yupanqui, W. J. de D., & Lapiz Chuquimbalqui, J. (2021). *Gestión del mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad de la chancadora Traylor*

60"x113" en una minera del sur del país [Tesis Maestría]. Universidad Nacional del Callao.

Rodríguez Machado, A. (2012). *MANUAL DE GESTION DE MANTENIMIENTO*.
https://www.researchgate.net/publication/382794064_Rodriguez_Machado_MANUAL_DE_MANTENIMIENTO

Rojas Mendoza, C. P. (2020). *Implementación de un modelo de mantenimiento basado en la condición para equipos críticos de una planta concentradora* [Tesis Maestría]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Serrat, O. (s. f.). *Knowledge Solutions—The Five Whys Technique*.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-0983-9_32

Smith, T., Brown, K., & Lee, S. (2022). A Review of Condition Monitoring Techniques for Cone Crushers in Mining. 69, 5(4).

Stamatis, D. H. (2015). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution* (ilustrada ed.). ASQ Quality Press.
https://books.google.com.pe/books/about/Failure_Mode_and_Effect_Analysis.html?id=TTxI8jbTkVwC&redir_esc=y

Taiichi, O. (2019). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production* (Firth edition). Productivity Press.
https://books.google.com.pe/books/about/Toyota_Production_System.html?id=QebEDwAAQBAJ&redir_esc=y

Torres Farinha, J. M. (2018). *Asset Maintenance Engineering Methodologies*.

Vargas Loayza, J. C., & Mendoza Bellido, L. A. (2021). *Análisis de la influencia del mantenimiento proactivo en la disponibilidad de la flota de equipos mineros*. 24(1), 77-86.

Vilar Burguete, José Luis. (2011). *Manual práctico del mantenimiento industrial*. McGraw-Hill.

Wills, B. A., & Napier-Munn, T. J. (2011). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.

World Bank. (2023). *Mineral rents (% of GDP)*.
<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MINR.RT.ZS>





Anexo N° 1

AMEF

Sistema	Subsistema		Función		Falla funcional		Modo de falla	Efecto de falla
Chancador giratorio primario 60"x113"	Cóncaos	1	Suministrar una superficie de trituración continua y resistente, capaz de reducir el mineral hasta el CSS requerido bajo condiciones de presión >220 MPa e impactos repetitivos.	A	Incapacidad de mantener la reducción granulométrica según parámetros de diseño (CSS/OSS).	1	Fractura frágil de cóncaos intermedios o superiores	Pérdida súbita de sección útil de la cámara, sobrecarga en cóncaos restantes y riesgo de colapso parcial.
						2	Desplazamiento vertical de cóncaos	Pérdida de alineamiento, ingreso de contaminantes al backing, incremento de desgaste irregular.
						3	Desgaste acelerado por magnetita, pórfidos e inchancables	Reducción del espesor útil antes del ciclo esperado, necesidad de cambio prematuro, incremento de costos y paradas.
						4	Fisuración en bordes y esquinas de cóncaos	Desprendimiento parcial, ingreso de finos, aumento de vibraciones y riesgo de propagación de grietas.
						5	Superficie de trituración irregular por montaje incorrecto	Pérdida de eficiencia de reducción, mayor consumo energético y posible daño al main shaft.
		2	Proporcionar soporte estructural estable junto al backing, transmitiendo uniformemente cargas de compresión e impacto hacia el casco de la chancadora.	A	Incapacidad de sostener cargas de compresión de manera uniforme sin generar deflexiones o grietas.	1	Backing contaminado o mal curado	Formación de cavidades internas, fractura prematura del cóncaos, deflexión excesiva y pérdida de soporte estructural.
						2	Variabilidad en calidad del material del backing	Resistencia desigual, zonas débiles que concentran esfuerzos, propagación acelerada de grietas.
						3	Cóncaos con dureza martensítica alta y baja tenacidad	Fractura frágil bajo cargas dinámicas, sin aviso previo, pérdida crítica de operatividad.
						4	Cóncaos con dureza heterogénea (295–311 HB)	Áreas blandas se desgastan rápido, áreas duras se agrietan → comportamiento disperejo, desgaste prematuro.
						5	Montaje inadecuado de cuñas, pernos y orejas	Ajuste insuficiente, holguras estructurales, desprendimiento parcial de cóncaos.

						6	Deflexión excesiva de cóncavos intermedios en zonas críticas	Concentración de esfuerzos → inicio de microgrietas y propagación acelerada.
						7	Condiciones ambientales adversas (baja T°, polvo, humedad) durante el curado del backing	Curado incompleto o contaminado → pérdida de resistencia mecánica, fallas tempranas del soporte estructural.
						8	Ingreso de partículas metálicas en la zona de asentamiento	Inclusiones en backing → puntos de fractura y pérdida de rigidez.
Cámara de chancado	Araña y tapa superior	3	Sostener el manto y transmitir cargas hacia la carcasa.	A	Incapacidad de soportar cargas de compresión e impacto.	1	Fisuración en brazos de araña	Vibraciones, riesgo de colapso estructural.
						2	Desgaste en muñón de araña	Fugas de lubricante, calentamiento y pérdida de soporte.
	Manto y eje principal	4	Triturar mineral por compresión contra los cóncavos.	A	Incapacidad de ejercer fuerza de chancado uniforme.	1	Fisura en manto	Reducción de capacidad de trituración.
						2	Desgaste irregular del manto	Pérdida de granulometría de producto, incremento de energía específica.
	Casco superior e inferior	5	Alojar revestimientos y resistir cargas transmitidas.	A	Pérdida de integridad estructural.	1	Grietas en casco superior/inferior	Parada mayor para reparación o reemplazo.
Mecanismo excéntrico	Excéntrica y transmisión	6	Generar movimiento oscilante del eje principal.	A	Incapacidad de transmitir movimiento oscilante.	1	Desgaste de bujes de excéntrica	Vibraciones, holguras, reducción de eficiencia.
						2	Falla de engranaje corona-piñón	Parada inmediata del chancador.
Mecanismo excéntrico	Ajuste hidráulico	7	Regular el OSS/CSS según operación.	A	Incapacidad de variar la abertura de descarga.	1	Fuga en cilindros hidráulicos	Imposibilidad de ajustar granulometría, aumento de inchancables.
Sistemas auxiliares	Lubricación	8		A		1	Obstrucción en filtros	Aumento de temperatura, desgaste prematuro.

			Suministrar flujo de aceite limpio y refrigerado.		Incapacidad de lubricar o refrigerar bujes y engranajes.	2	Falla de bomba de lubricación	Parada automática por protección de equipos.
Sistemas auxiliares	Eléctrico e instrumentación	9	Suministrar energía y controlar operación.	A	Incapacidad de accionar motor principal y controles.	1	Falla de motor eléctrico	Parada inmediata del chancador.
						2	Sensor CSS/OSS fuera de calibración	Error en ajustes, producto fuera de especificación.
Sistemas auxiliares	Sellado y juntas	10	Impedir ingreso de polvo y contaminantes al interior.	A	Incapacidad de mantener hermeticidad.	1	Desgaste de sellos taconite	Ingreso de polvo, desgaste acelerado de bujes y engranajes.

