



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Ingeniería Comercial

“Caso Tassaroli Chile
Aceros de perforación para la minería”

Memoria presentada por

Jacob Edgardo Santos Caullan
Como requisito para optar al Título de
INGENIERO COMERCIAL

Director de Memoria: **Dr. Pablo Isla M.**

21 de Enero, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Caso Tassaroli Chile Aceros de perforación para la minería

Nombre del candidato(a): Jacob Edgardo Santos Caullan

Carrera / Grado: Ingeniería Comercial Licenciatura

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** Departamento de Ingeniería Comercial

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pablo Isla M , en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28-07-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28-07-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

I. PROBLEMÁTICA	4
I.1 Perforación a nivel global.....	5
I.2 Países con mayor volumen de actividad y participación	8
I.3 Inversión, costos y drivers económicos	10
I.4 Importancia de los aceros de perforación y brecha de monitoreo	14
II. MARCO TEÓRICO	17
II.1 Fundamentos mecánicos de la perforación de rocas	17
II.2 Sistemas de perforación: Top Hammer y DTH.....	20
II.3 Herramientas de perforación: componentes y funciones	22
II.4 Aceros de perforación: metalurgia y tratamientos	24
II.5 Mecanismos de desgaste y modos de falla.....	26
II.6 Indicadores de desempeño (KPI) para herramientas.....	28
II.7 Tendencias: automatización, sensorización y analítica.....	31
III. OBJETIVO GENERAL.....	33
IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
V. DESARROLLO DEL CASO TASSAROLI CHILE	35
V.1 Consumo de aceros de perforación en la minería en Chile.....	35
V.2 Principales consumidores y proveedores de aceros de perforación en la minería en Chile.....	36
V.3 Contexto y posicionamiento.....	37
V.4 Diagnóstico: situación actual y brechas	39
V.5 Diseño del sistema de seguimiento de rendimiento	41
V.6 Indicadores y tableros de control	45
V.7 Propuesta de implementación por etapas	48
V.8 Evaluación económica y propuesta de valor.....	50
V.9 Gestión del cambio y riesgos	52
VI. CONCLUSIONES	54
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	61

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figure 1 Fuente: Sandvik Mining.2024	8
Figure 2 : creación propia .2025	13
Figure 3 Epiroc.2024	19
Figure 4 creación propia. 2025	24
Figure 5 Energía en Minería .2024	30
Figure 6 creación propia. 2026	45

I. PROBLEMÁTICA

La perforación constituye una de las operaciones fundamentales en la cadena de valor de la minería moderna y, en general, de las industrias extractivas y energéticas. En minería, la perforación habilita la tronadura y, por tanto, condiciona la productividad del carguío, el transporte y el procesamiento. En petróleo y gas, la perforación permite la construcción de pozos que conectan el reservorio con la superficie, determinando la factibilidad técnica y económica del proyecto. En exploración geológica, la perforación es el medio para obtener información geológica confiable mediante testigos y registros, reduciendo incertidumbre en etapas tempranas del ciclo minero.

En un escenario global caracterizado por el aumento de la demanda de minerales críticos (cobre, litio, níquel, hierro) y por una transición energética que exige mayor disponibilidad de metales para electrificación, redes y almacenamiento, el rol de la perforación se vuelve aún más central. A esto se suma la tendencia al agotamiento de yacimientos superficiales y al aumento de la complejidad geológica: mayor dureza de roca, mayores profundidades, variabilidad litológica y condiciones operacionales más exigentes (altitud, temperaturas extremas, operación continua 24/7).

Bajo estas condiciones, las herramientas de perforación —y en particular los aceros de perforación— se convierten en un determinante de desempeño. La vida útil de barras, adaptadores, brocas y componentes asociados impacta costos directos (consumo de repuestos) e indirectos (detenciones, pérdida de tasa de penetración, desviaciones, sobreconsumo energético). Por ello, surge una problemática esencial: cómo mejorar el rendimiento técnico y económico de las herramientas mediante gestión basada en datos, trazabilidad y monitoreo de desempeño en terreno.

I.1 Perforación a nivel global

A escala global, la perforación presenta ciclos de expansión y contracción asociados a la inversión en minería y energía, al precio de los commodities y a la disponibilidad de capital. Sin embargo, la tendencia de fondo muestra un aumento de intensidad tecnológica: más automatización, mayor integración de sensores y sistemas de control, y mayor exigencia de desempeño por metro perforado. En minería, el aumento de tamaño de los rajes abiertos y la profundización de minas subterráneas incrementan los requerimientos de precisión y disponibilidad de equipos de perforación.

El mercado global de herramientas y consumibles de perforación comprende barras, brocas, adaptadores, martillos (Top Hammer y DTH), tuberías, y componentes asociados. La competencia se basa tanto en ingeniería de materiales (aleaciones, tratamientos térmicos, geometrías) como en capacidad logística y servicio posventa. En paralelo, la digitalización de la perforación incorpora plataformas de registro de parámetros y trazabilidad de consumibles, habilitando modelos de optimización y mantenimiento predictivo.

La perforación es particularmente sensible al entorno geomecánico. Cambios en la abrasividad, presencia de discontinuidades o cambios litológicos alteran la tasa de penetración y el patrón de desgaste. Por ello, la gestión moderna exige integrar variables de roca con variables de operación (presión de empuje, energía de impacto, rotación, caudal de aire/agua) y con variables de herramienta (lote, geometría, recubrimiento, historial de uso).

A escala global, la perforación presenta ciclos de expansión y contracción asociados a la inversión en minería y energía, al precio de los commodities y a la disponibilidad de capital. Sin embargo, la tendencia de fondo muestra un aumento de intensidad tecnológica: más

automatización, mayor integración de sensores y sistemas de control, y mayor exigencia de desempeño por metro perforado. En minería, el aumento de tamaño de los rajes abiertos y la profundización de minas subterráneas incrementan los requerimientos de precisión y disponibilidad de equipos de perforación.

El mercado global de herramientas y consumibles de perforación comprende barras, brocas, adaptadores, martillos (Top Hammer y DTH), tuberías, y componentes asociados. La competencia se basa tanto en ingeniería de materiales (aleaciones, tratamientos térmicos, geometrías) como en capacidad logística y servicio posventa. En paralelo, la digitalización de la perforación incorpora plataformas de registro de parámetros y trazabilidad de consumibles, habilitando modelos de optimización y mantenimiento predictivo.

La perforación es particularmente sensible al entorno geomecánico. Cambios en la abrasividad, presencia de discontinuidades o cambios litológicos alteran la tasa de penetración y el patrón de desgaste. Por ello, la gestión moderna exige integrar variables de roca con variables de operación (presión de empuje, energía de impacto, rotación, caudal de aire/agua) y con variables de herramienta (lote, geometría, recubrimiento, historial de uso).

A escala global, la perforación presenta ciclos de expansión y contracción asociados a la inversión en minería y energía, al precio de los commodities y a la disponibilidad de capital. Sin embargo, la tendencia de fondo muestra un aumento de intensidad tecnológica: más automatización, mayor integración de sensores y sistemas de control, y mayor exigencia de desempeño por metro perforado. En minería, el aumento de tamaño de los rajes abiertos y la profundización de minas subterráneas incrementan los requerimientos de precisión y disponibilidad de equipos de perforación.

El mercado global de herramientas y consumibles de perforación comprende barras, brocas, adaptadores, martillos (Top Hammer y DTH), tuberías, y componentes asociados. La competencia se basa tanto en ingeniería de materiales (aleaciones, tratamientos térmicos, geometrías) como en capacidad logística y servicio posventa. En paralelo, la digitalización de la perforación incorpora plataformas de registro de parámetros y

trazabilidad de consumibles, habilitando modelos de optimización y mantenimiento predictivo.

La perforación es particularmente sensible al entorno geomecánico. Cambios en la abrasividad, presencia de discontinuidades o cambios litológicos alteran la tasa de penetración y el patrón de desgaste. Por ello, la gestión moderna exige integrar variables de roca con variables de operación (presión de empuje, energía de impacto, rotación, caudal de aire/agua) y con variables de herramienta (lote, geometría, recubrimiento, historial de uso).

A escala global, la perforación presenta ciclos de expansión y contracción asociados a la inversión en minería y energía, al precio de los commodities y a la disponibilidad de capital. Sin embargo, la tendencia de fondo muestra un aumento de intensidad tecnológica: más automatización, mayor integración de sensores y sistemas de control, y mayor exigencia de desempeño por metro perforado. En minería, el aumento de tamaño de los rajos abiertos y la profundización de minas subterráneas incrementan los requerimientos de precisión y disponibilidad de equipos de perforación.

El mercado global de herramientas y consumibles de perforación comprende barras, brocas, adaptadores, martillos (Top Hammer y DTH), tuberías, y componentes asociados. La competencia se basa tanto en ingeniería de materiales (aleaciones, tratamientos térmicos, geometrías) como en capacidad logística y servicio posventa. En paralelo, la digitalización de la perforación incorpora plataformas de registro de parámetros y trazabilidad de consumibles, habilitando modelos de optimización y mantenimiento predictivo.

La perforación es particularmente sensible al entorno geo mecánico. Cambios en la abrasividad, presencia de discontinuidades o cambios litológicos alteran la tasa de penetración y el patrón de desgaste. Por ello, la gestión moderna exige integrar variables de roca con variables de operación (presión de empuje, energía de impacto, rotación, caudal de aire/agua) y con variables de herramienta (lote, geometría, recubrimiento, historial de uso).



Figure 1 Fuente: Sandvik Mining.2024

I.2 Países con mayor volumen de actividad y participación

La actividad mundial de perforación se concentra en países con alta producción minera o energética. En minería metálica, China, Australia, Chile, Canadá y Sudáfrica destacan por volumen y diversidad de operaciones. China lidera en carbón y tierras raras; Australia domina en hierro y litio; Chile es referente por el cobre; Canadá mantiene alta exploración; Sudáfrica opera minería profunda con exigencias extremas sobre herramientas.

En petróleo y gas, Estados Unidos concentra un volumen significativo de perforación por su desarrollo no convencional, mientras que Medio Oriente (Arabia Saudita y vecinos) concentra producción convencional de gran escala. Rusia y Canadá mantienen participación importante y Noruega destaca en offshore. Estos patrones de actividad afectan la demanda de herramientas, la estandarización de sistemas (DTH vs Top Hammer) y la presión por innovación material.

La participación relativa por país puede variar año a año; sin embargo, la noción relevante para este estudio es que las regiones de mayor actividad tienden a exigir proveedores

capaces de garantizar suministro, trazabilidad, soporte técnico y mejoras continuas en desempeño. Para un proveedor que opera en Chile, el aprendizaje desde prácticas internacionales (automatización, gestión de consumibles por KPI, contratos por desempeño) constituye una fuente de ventaja competitiva.

La actividad mundial de perforación se concentra en países con alta producción minera o energética. En minería metálica, China, Australia, Chile, Canadá y Sudáfrica destacan por volumen y diversidad de operaciones. China lidera en carbón y tierras raras; Australia domina en hierro y litio; Chile es referente por el cobre; Canadá mantiene alta exploración; Sudáfrica opera minería profunda con exigencias extremas sobre herramientas.

En petróleo y gas, Estados Unidos concentra un volumen significativo de perforación por su desarrollo no convencional, mientras que Medio Oriente (Arabia Saudita y vecinos) concentra producción convencional de gran escala. Rusia y Canadá mantienen participación importante y Noruega destaca en offshore. Estos patrones de actividad afectan la demanda de herramientas, la estandarización de sistemas (DTH vs Top Hammer) y la presión por innovación material.

La participación relativa por país puede variar año a año; sin embargo, la noción relevante para este estudio es que las regiones de mayor actividad tienden a exigir proveedores capaces de garantizar suministro, trazabilidad, soporte técnico y mejoras continuas en desempeño. Para un proveedor que opera en Chile, el aprendizaje desde prácticas internacionales (automatización, gestión de consumibles por KPI, contratos por desempeño) constituye una fuente de ventaja competitiva.

La actividad mundial de perforación se concentra en países con alta producción minera o energética. En minería metálica, China, Australia, Chile, Canadá y Sudáfrica destacan por volumen y diversidad de operaciones. China lidera en carbón y tierras raras; Australia domina en hierro y litio; Chile es referente por el cobre; Canadá mantiene alta exploración; Sudáfrica opera minería profunda con exigencias extremas sobre herramientas.

En petróleo y gas, Estados Unidos concentra un volumen significativo de perforación por su desarrollo no convencional, mientras que Medio Oriente (Arabia Saudita y vecinos) concentra producción convencional de gran escala. Rusia y Canadá mantienen

participación importante y Noruega destaca en offshore. Estos patrones de actividad afectan la demanda de herramientas, la estandarización de sistemas (DTH vs Top Hammer) y la presión por innovación material.

La participación relativa por país puede variar año a año; sin embargo, la noción relevante para este estudio es que las regiones de mayor actividad tienden a exigir proveedores capaces de garantizar suministro, trazabilidad, soporte técnico y mejoras continuas en desempeño. Para un proveedor que opera en Chile, el aprendizaje desde prácticas internacionales (automatización, gestión de consumibles por KPI, contratos por desempeño) constituye una fuente de ventaja competitiva.

La actividad mundial de perforación se concentra en países con alta producción minera o energética. En minería metálica, China, Australia, Chile, Canadá y Sudáfrica destacan por volumen y diversidad de operaciones. China lidera en carbón y tierras raras; Australia domina en hierro y litio; Chile es referente por el cobre; Canadá mantiene alta exploración; Sudáfrica opera minería profunda con exigencias extremas sobre herramientas.

En petróleo y gas, Estados Unidos concentra un volumen significativo de perforación por su desarrollo no convencional, mientras que Medio Oriente (Arabia Saudita y vecinos) concentra producción convencional de gran escala. Rusia y Canadá mantienen participación importante y Noruega destaca en offshore. Estos patrones de actividad afectan la demanda de herramientas, la estandarización de sistemas (DTH vs Top Hammer) y la presión por innovación material.

La participación relativa por país puede variar año a año; sin embargo, la noción relevante para este estudio es que las regiones de mayor actividad tienden a exigir proveedores capaces de garantizar suministro, trazabilidad, soporte técnico y mejoras continuas en desempeño. Para un proveedor que opera en Chile, el aprendizaje desde prácticas internacionales (automatización, gestión de consumibles por KPI, contratos por desempeño) constituye una fuente de ventaja competitiva.

I.3 Inversión, costos y drivers económicos

La inversión en perforación se expresa en dos dimensiones: (i) CAPEX de equipos y sistemas (perforadoras, automatización, instrumentación), y (ii) OPEX en consumibles y

mantenimiento (barras, brocas, adaptadores, martillos, lubricación, servicio). En proyectos de gran escala, pequeñas variaciones en costo por metro perforado pueden traducirse en ahorros relevantes, debido al alto volumen de metros anuales perforados.

Los drivers económicos principales son: precio del commodity, estabilidad regulatoria, costos energéticos, disponibilidad de agua/aire comprimido, y productividad por turno. La presión por reducir emisiones y mejorar eficiencia energética agrega un driver adicional: aumentar metros perforados por unidad de energía consumida y minimizar detenciones. En este marco, extender la vida útil de herramientas tiene efecto directo en productividad y huella operacional.

El concepto de costo total de ciclo de vida (TCO) se vuelve clave. Una herramienta de menor precio unitario puede resultar más costosa si su vida útil es menor o si genera detenciones frecuentes. Por ello, la evaluación moderna busca medir: metros perforados por herramienta, variabilidad (dispersión), tasa de fallas prematuras y su correlación con condiciones de roca y parámetros operacionales.

La inversión en perforación se expresa en dos dimensiones: (i) CAPEX de equipos y sistemas (perforadoras, automatización, instrumentación), y (ii) OPEX en consumibles y mantenimiento (barras, brocas, adaptadores, martillos, lubricación, servicio). En proyectos de gran escala, pequeñas variaciones en costo por metro perforado pueden traducirse en ahorros relevantes, debido al alto volumen de metros anuales perforados.

Los drivers económicos principales son: precio del commodity, estabilidad regulatoria, costos energéticos, disponibilidad de agua/aire comprimido, y productividad por turno. La presión por reducir emisiones y mejorar eficiencia energética agrega un driver adicional: aumentar metros perforados por unidad de energía consumida y minimizar detenciones. En este marco, extender la vida útil de herramientas tiene efecto directo en productividad y huella operacional.

El concepto de costo total de ciclo de vida (TCO) se vuelve clave. Una herramienta de menor precio unitario puede resultar más costosa si su vida útil es menor o si genera detenciones frecuentes. Por ello, la evaluación moderna busca medir: metros perforados

por herramienta, variabilidad (dispersión), tasa de fallas prematuras y su correlación con condiciones de roca y parámetros operacionales.

La inversión en perforación se expresa en dos dimensiones: (i) CAPEX de equipos y sistemas (perforadoras, automatización, instrumentación), y (ii) OPEX en consumibles y mantenimiento (barras, brocas, adaptadores, martillos, lubricación, servicio). En proyectos de gran escala, pequeñas variaciones en costo por metro perforado pueden traducirse en ahorros relevantes, debido al alto volumen de metros anuales perforados.

Los drivers económicos principales son: precio del commodity, estabilidad regulatoria, costos energéticos, disponibilidad de agua/aire comprimido, y productividad por turno. La presión por reducir emisiones y mejorar eficiencia energética agrega un driver adicional: aumentar metros perforados por unidad de energía consumida y minimizar detenciones. En este marco, extender la vida útil de herramientas tiene efecto directo en productividad y huella operacional.

El concepto de costo total de ciclo de vida (TCO) se vuelve clave. Una herramienta de menor precio unitario puede resultar más costosa si su vida útil es menor o si genera detenciones frecuentes. Por ello, la evaluación moderna busca medir: metros perforados por herramienta, variabilidad (dispersión), tasa de fallas prematuras y su correlación con condiciones de roca y parámetros operacionales.

La inversión en perforación se expresa en dos dimensiones: (i) CAPEX de equipos y sistemas (perforadoras, automatización, instrumentación), y (ii) OPEX en consumibles y mantenimiento (barras, brocas, adaptadores, martillos, lubricación, servicio). En proyectos de gran escala, pequeñas variaciones en costo por metro perforado pueden traducirse en ahorros relevantes, debido al alto volumen de metros anuales perforados.

Los drivers económicos principales son: precio del commodity, estabilidad regulatoria, costos energéticos, disponibilidad de agua/aire comprimido, y productividad por turno. La presión por reducir emisiones y mejorar eficiencia energética agrega un driver adicional: aumentar metros perforados por unidad de energía consumida y minimizar detenciones. En este marco, extender la vida útil de herramientas tiene efecto directo en productividad y huella operacional.

El concepto de costo total de ciclo de vida (TCO) se vuelve clave. Una herramienta de menor precio unitario puede resultar más costosa si su vida útil es menor o si genera detenciones frecuentes. Por ello, la evaluación moderna busca medir: metros perforados por herramienta, variabilidad (dispersión), tasa de fallas prematuras y su correlación con condiciones de roca y parámetros operacionales.

Inversión energética: de acuerdo con la International Energy Agency (IEA), la inversión energética mundial alcanzará cerca de USD 3,3 billones en 2025. De este total, aproximadamente USD 1,1 billones corresponden a petróleo y gas (upstream), los cuales incluyen exploración, perforación de nuevos pozos y mantenimiento de la producción existente. La perforación representa una parte esencial de esta inversión, ya que los pozos presentan declinación natural y requieren reinversión constante.

Inversión en perforación Minería: En minería, la inversión en perforación se refleja principalmente en los presupuestos de exploración minera. Según S&P Global Market Intelligence, la exploración minera global moviliza cientos de miles de millones de dólares anualmente, siendo la perforación el principal componente del gasto exploratorio. Regiones como China, Australia, Canadá y América Latina concentran gran parte de estas inversiones.

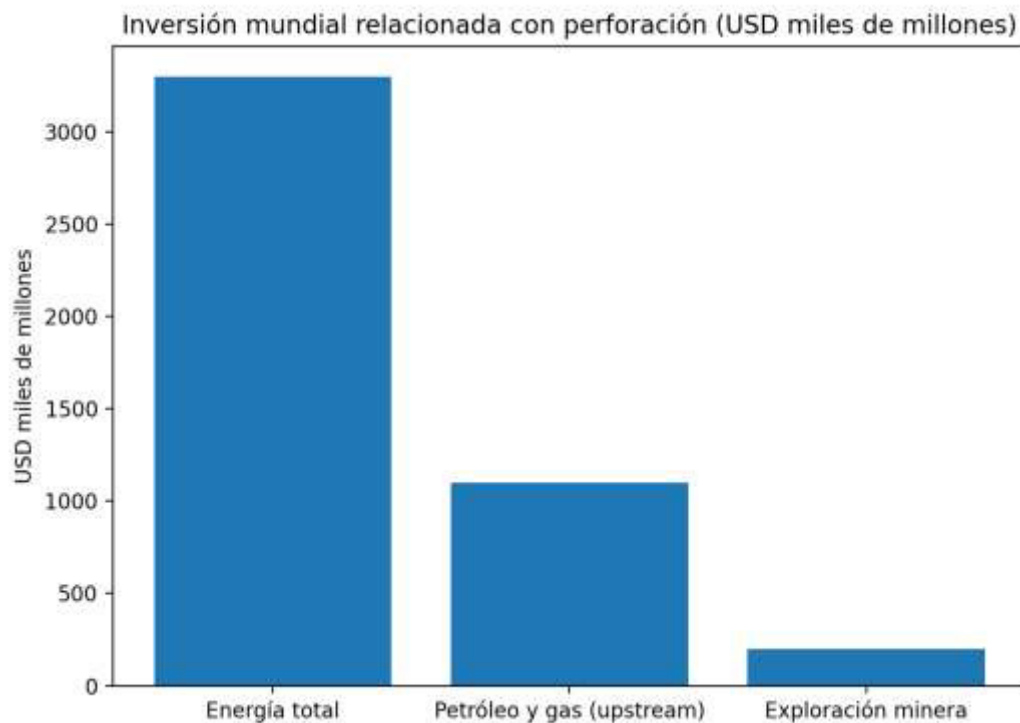


Figure 2 : creación propia .2025

I.4 Importancia de los aceros de perforación y brecha de monitoreo

Las herramientas de acero de perforación operan bajo impactos repetitivos, torsión, flexión y abrasión. Los modos de falla típicos incluyen fatiga en roscas, deformación plástica, micro fisuración, desgaste acelerado por abrasión y fractura frágil en condiciones de baja tenacidad. El diseño metalúrgico apunta a equilibrar dureza superficial (resistencia al desgaste) y tenacidad del núcleo (resistencia al impacto).

En múltiples faenas, el seguimiento del rendimiento se realiza de manera manual o reactiva: se registra el reemplazo cuando la herramienta falla o cuando la tasa de penetración cae significativamente. Esta práctica limita la trazabilidad, dificulta la comparación entre proveedores o lotes y reduce la capacidad de aprender del desempeño real. La brecha se manifiesta en decisiones de compra basadas en precio y no en desempeño medible.

La problemática de este trabajo se focaliza en cómo transformar esta brecha en una oportunidad: implementar seguimiento de rendimiento basado en datos, con registro sistemático de metros perforados, condiciones de operación y trazabilidad por herramienta. Esto habilita optimización de inventarios, mejoras metalúrgicas, reducción de fallas prematuras y, en general, un enfoque de mejora continua aplicable a proveedores como Tassaroli Chile.

Las herramientas de acero de perforación operan bajo impactos repetitivos, torsión, flexión y abrasión. Los modos de falla típicos incluyen fatiga en roscas, deformación plástica, micro fisuración, desgaste acelerado por abrasión y fractura frágil en condiciones de baja tenacidad. El diseño metalúrgico apunta a equilibrar dureza superficial (resistencia al desgaste) y tenacidad del núcleo (resistencia al impacto).

En múltiples faenas, el seguimiento del rendimiento se realiza de manera manual o reactiva: se registra el reemplazo cuando la herramienta falla o cuando la tasa de penetración cae significativamente. Esta práctica limita la trazabilidad, dificulta la comparación entre proveedores o lotes y reduce la capacidad de aprender del desempeño real. La brecha se manifiesta en decisiones de compra basadas en precio y no en desempeño medible.

La problemática de este trabajo se focaliza en cómo transformar esta brecha en una oportunidad: implementar seguimiento de rendimiento basado en datos, con registro sistemático de metros perforados, condiciones de operación y trazabilidad por herramienta. Esto habilita optimización de inventarios, mejoras metalúrgicas, reducción de fallas prematuras y, en general, un enfoque de mejora continua aplicable a proveedores como Tassaroli Chile.

Las herramientas de acero de perforación operan bajo impactos repetitivos, torsión, flexión y abrasión. Los modos de falla típicos incluyen fatiga en roscas, deformación plástica, micro fisuración, desgaste acelerado por abrasión y fractura frágil en condiciones de baja tenacidad. El diseño metalúrgico apunta a equilibrar dureza superficial (resistencia al desgaste) y tenacidad del núcleo (resistencia al impacto).

En múltiples faenas, el seguimiento del rendimiento se realiza de manera manual o reactiva: se registra el reemplazo cuando la herramienta falla o cuando la tasa de penetración cae significativamente. Esta práctica limita la trazabilidad, dificulta la comparación entre proveedores o lotes y reduce la capacidad de aprender del desempeño real. La brecha se manifiesta en decisiones de compra basadas en precio y no en desempeño medible.

La problemática de este trabajo se focaliza en cómo transformar esta brecha en una oportunidad: implementar seguimiento de rendimiento basado en datos, con registro sistemático de metros perforados, condiciones de operación y trazabilidad por herramienta. Esto habilita optimización de inventarios, mejoras metalúrgicas, reducción de fallas prematuras y, en general, un enfoque de mejora continua aplicable a proveedores como Tassaroli Chile.

Las herramientas de acero de perforación operan bajo impactos repetitivos, torsión, flexión y abrasión. Los modos de falla típicos incluyen fatiga en roscas, deformación plástica, micro fisuración, desgaste acelerado por abrasión y fractura frágil en condiciones de baja tenacidad. El diseño metalúrgico apunta a equilibrar dureza superficial (resistencia al desgaste) y tenacidad del núcleo (resistencia al impacto).

En múltiples faenas, el seguimiento del rendimiento se realiza de manera manual o reactiva: se registra el reemplazo cuando la herramienta falla o cuando la tasa de penetración cae significativamente. Esta práctica limita la trazabilidad, dificulta la comparación entre proveedores o lotes y reduce la capacidad de aprender del desempeño real. La brecha se manifiesta en decisiones de compra basadas en precio y no en desempeño medible.

La problemática de este trabajo se focaliza en cómo transformar esta brecha en una oportunidad: implementar seguimiento de rendimiento basado en datos, con registro sistemático de metros perforados, condiciones de operación y trazabilidad por herramienta. Esto habilita optimización de inventarios, mejoras metalúrgicas, reducción de fallas prematuras y, en general, un enfoque de mejora continua aplicable a proveedores como Tassaroli Chile.

II. MARCO TEÓRICO

El marco teórico presenta los fundamentos de la perforación de rocas y describe las herramientas involucradas en operaciones mineras y energéticas, con énfasis en aceros de perforación. Se revisan sistemas de perforación, componentes, materiales, modos de desgaste, métricas de desempeño y tendencias tecnológicas. Esta base permite sustentar el análisis del caso Tassaroli Chile y la propuesta de seguimiento de rendimiento.

II.1 Fundamentos mecánicos de la perforación de rocas

La perforación de rocas es un proceso de fragmentación localizada en el frente de perforación. En sistemas roto-percusivos, la energía se entrega en forma de impactos de alta frecuencia combinados con rotación para evacuar detritos y renovar el contacto. La eficiencia del proceso depende de la transferencia de energía a la roca, de la capacidad de evacuar detritos y de la estabilidad del barreno (desviación y rugosidad interna).

Los parámetros operacionales más relevantes incluyen energía de impacto, frecuencia de impacto, velocidad de rotación, presión de empuje (feed force), caudal y presión de aire/agua para limpieza, y estrategia de perforación (patrón, profundidad, secuencia). La interacción con propiedades de la roca —resistencia a compresión, abrasividad, tenacidad, grado de fractura miento— determina la tasa de penetración y el desgaste de la herramienta.

En perforación rotativa (petróleo/gas y grandes diámetros), el peso sobre la broca, el torque, el régimen de rotación y el fluido de perforación son determinantes. En perforación DTH, la energía se genera en el fondo y la transferencia es más eficiente a mayores profundidades, reduciendo pérdidas por transmisión en varillaje.

La perforación de rocas es un proceso de fragmentación localizada en el frente de perforación. En sistemas roto-percusivos, la energía se entrega en forma de impactos de alta frecuencia combinados con rotación para evacuar detritos y renovar el contacto. La eficiencia del proceso depende de la transferencia de energía a la roca, de la capacidad de evacuar detritos y de la estabilidad del barreno (desviación y rugosidad interna).

Los parámetros operacionales más relevantes incluyen energía de impacto, frecuencia de impacto, velocidad de rotación, presión de empuje (feed force), caudal y presión de aire/agua para limpieza, y estrategia de perforación (patrón, profundidad, secuencia). La

interacción con propiedades de la roca —resistencia a compresión, abrasividad, tenacidad, grado de fractura miento— determina la tasa de penetración y el desgaste de la herramienta.

En perforación rotativa (petróleo/gas y grandes diámetros), el peso sobre la broca, el torque, el régimen de rotación y el fluido de perforación son determinantes. En perforación DTH, la energía se genera en el fondo y la transferencia es más eficiente a mayores profundidades, reduciendo pérdidas por transmisión en varillaje.

La perforación de rocas es un proceso de fragmentación localizada en el frente de perforación. En sistemas roto-percursivos, la energía se entrega en forma de impactos de alta frecuencia combinados con rotación para evacuar detritos y renovar el contacto. La eficiencia del proceso depende de la transferencia de energía a la roca, de la capacidad de evacuar detritos y de la estabilidad del barreno (desviación y rugosidad interna).

Los parámetros operacionales más relevantes incluyen energía de impacto, frecuencia de impacto, velocidad de rotación, presión de empuje (feed force), caudal y presión de aire/agua para limpieza, y estrategia de perforación (patrón, profundidad, secuencia). La interacción con propiedades de la roca resistencia a compresión, abrasividad, tenacidad, grado de fractura miento determina la tasa de penetración y el desgaste de la herramienta.

En perforación rotativa (petróleo/gas y grandes diámetros), el peso sobre la broca, el torque, el régimen de rotación y el fluido de perforación son determinantes. En perforación DTH, la energía se genera en el fondo y la transferencia es más eficiente a mayores profundidades, reduciendo pérdidas por transmisión en varillaje.

La perforación de rocas es un proceso de fragmentación localizada en el frente de perforación. En sistemas roto-percursivos, la energía se entrega en forma de impactos de alta frecuencia combinados con rotación para evacuar detritos y renovar el contacto. La eficiencia del proceso depende de la transferencia de energía a la roca, de la capacidad de evacuar detritos y de la estabilidad del barreno (desviación y rugosidad interna).

Los parámetros operacionales más relevantes incluyen energía de impacto, frecuencia de impacto, velocidad de rotación, presión de empuje (feed force), caudal y presión de aire/agua para limpieza, y estrategia de perforación (patrón, profundidad, secuencia). La

interacción con propiedades de la roca resistencia a compresión, abrasividad, tenacidad, grado de fracturamiento determina la tasa de penetración y el desgaste de la herramienta.

En perforación rotativa (petróleo/gas y grandes diámetros), el peso sobre la broca, el torque, el régimen de rotación y el fluido de perforación son determinantes. En perforación DTH, la energía se genera en el fondo y la transferencia es más eficiente a mayores profundidades, reduciendo pérdidas por transmisión en varillaje.



Figure 3 Epiroc.2024

II.2 Sistemas de perforación: Top Hammer y DTH

En Top Hammer, el martillo se ubica en la cabeza de la perforadora. La energía se transmite por las barras hasta la broca. Es adecuado para longitudes moderadas y permite alta productividad en patrones de tronadura. Sin embargo, a mayores profundidades puede aumentar la pérdida de energía y el desgaste por transmisión, además de elevar la desviación del barreno.

En DTH (Down-The-Hole), el martillo se ubica en el fondo del pozo, junto a la broca. La energía se aplica directamente en el frente, con mayor eficiencia en perforaciones profundas y diámetros mayores. El sistema requiere gestión de aire comprimido y componentes específicos; su desempeño puede ser superior en rocas duras y perforaciones largas.

La selección entre Top Hammer y DTH depende del diseño de la faena, del diámetro y profundidad, de la dureza de roca y de restricciones logísticas (aire, agua, disponibilidad de consumibles). En ambos casos, el acero del varillaje y adaptadores influye en fatiga y vida útil.

En Top Hammer, el martillo se ubica en la cabeza de la perforadora. La energía se transmite por las barras hasta la broca. Es adecuado para longitudes moderadas y permite alta productividad en patrones de tronadura. Sin embargo, a mayores profundidades puede aumentar la pérdida de energía y el desgaste por transmisión, además de elevar la desviación del barreno.

En DTH (Down-The-Hole), el martillo se ubica en el fondo del pozo, junto a la broca. La energía se aplica directamente en el frente, con mayor eficiencia en perforaciones profundas y diámetros mayores. El sistema requiere gestión de aire comprimido y componentes específicos; su desempeño puede ser superior en rocas duras y perforaciones largas.

La selección entre Top Hammer y DTH depende del diseño de la faena, del diámetro y profundidad, de la dureza de roca y de restricciones logísticas (aire, agua, disponibilidad

de consumibles). En ambos casos, el acero del varillaje y adaptadores influye en fatiga y vida útil.

En Top Hammer, el martillo se ubica en la cabeza de la perforadora. La energía se transmite por las barras hasta la broca. Es adecuado para longitudes moderadas y permite alta productividad en patrones de tronadura. Sin embargo, a mayores profundidades puede aumentar la pérdida de energía y el desgaste por transmisión, además de elevar la desviación del barreno.

En DTH (Down-The-Hole), el martillo se ubica en el fondo del pozo, junto a la broca. La energía se aplica directamente en el frente, con mayor eficiencia en perforaciones profundas y diámetros mayores. El sistema requiere gestión de aire comprimido y componentes específicos; su desempeño puede ser superior en rocas duras y perforaciones largas.

La selección entre Top Hammer y DTH depende del diseño de la faena, del diámetro y profundidad, de la dureza de roca y de restricciones logísticas (aire, agua, disponibilidad de consumibles). En ambos casos, el acero del varillaje y adaptadores influye en fatiga y vida útil.

En Top Hammer, el martillo se ubica en la cabeza de la perforadora. La energía se transmite por las barras hasta la broca. Es adecuado para longitudes moderadas y permite alta productividad en patrones de tronadura. Sin embargo, a mayores profundidades puede aumentar la pérdida de energía y el desgaste por transmisión, además de elevar la desviación del barreno.

En DTH (Down-The-Hole), el martillo se ubica en el fondo del pozo, junto a la broca. La energía se aplica directamente en el frente, con mayor eficiencia en perforaciones profundas y diámetros mayores. El sistema requiere gestión de aire comprimido y componentes específicos; su desempeño puede ser superior en rocas duras y perforaciones largas.

La selección entre Top Hammer y DTH depende del diseño de la faena, del diámetro y profundidad, de la dureza de roca y de restricciones logísticas (aire, agua, disponibilidad

de consumibles). En ambos casos, el acero del varillaje y adaptadores influye en fatiga y vida útil.

II.3 Herramientas de perforación: componentes y funciones

Las herramientas de perforación se componen de barras (varillaje), brocas, adaptadores (shank adapters), coplas (couplings), amortiguadores, estabilizadores y, según sistema, martillos DTH y tuberías. Su función central es transmitir energía y rotación al frente de roca de manera eficiente, manteniendo integridad estructural y facilitando la evacuación de detritos.

Las barras se diseñan para soportar cargas cíclicas. La geometría y calidad de rosca es crítica, ya que en esa zona se concentra tensión y se originan fallas por fatiga. Los adaptadores y coplas también presentan modos de falla por desgaste de rosca, deformación y micro fisuras. La broca, por su parte, soporta abrasión directa y pérdida de insertos (carburo/diamante), afectando la tasa de penetración.

En un enfoque de gestión, se recomienda describir cada componente por: material, tratamiento térmico, geometría, lote, fecha de entrada a operación, historial de metros perforados y causa de retiro. Esto habilita trazabilidad y análisis comparativo.

Las herramientas de perforación se componen de barras (varillaje), brocas, adaptadores (shank adapters), coplas (couplings), amortiguadores, estabilizadores y, según sistema, martillos DTH y tuberías. Su función central es transmitir energía y rotación al frente de roca de manera eficiente, manteniendo integridad estructural y facilitando la evacuación de detritos.

Las barras se diseñan para soportar cargas cíclicas. La geometría y calidad de rosca es crítica, ya que en esa zona se concentra tensión y se originan fallas por fatiga. Los adaptadores y coplas también presentan modos de falla por desgaste de rosca, deformación y micro fisuras. La broca, por su parte, soporta abrasión directa y pérdida de insertos (carburo/diamante), afectando la tasa de penetración.

En un enfoque de gestión, se recomienda describir cada componente por: material, tratamiento térmico, geometría, lote, fecha de entrada a operación, historial de metros perforados y causa de retiro. Esto habilita trazabilidad y análisis comparativo.

Las herramientas de perforación se componen de barras (varillaje), brocas, adaptadores (shank adapters), coplas (couplings), amortiguadores, estabilizadores y, según sistema, martillos DTH y tuberías. Su función central es transmitir energía y rotación al frente de roca de manera eficiente, manteniendo integridad estructural y facilitando la evacuación de detritos.

Las barras se diseñan para soportar cargas cíclicas. La geometría y calidad de rosca es crítica, ya que en esa zona se concentra tensión y se originan fallas por fatiga. Los adaptadores y coplas también presentan modos de falla por desgaste de rosca, deformación y micro fisuras. La broca, por su parte, soporta abrasión directa y pérdida de insertos (carburo/diamante), afectando la tasa de penetración.

En un enfoque de gestión, se recomienda describir cada componente por: material, tratamiento térmico, geometría, lote, fecha de entrada a operación, historial de metros perforados y causa de retiro. Esto habilita trazabilidad y análisis comparativo.

Las herramientas de perforación se componen de barras (varillaje), brocas, adaptadores (shank adapters), coplas (couplings), amortiguadores, estabilizadores y, según sistema, martillos DTH y tuberías. Su función central es transmitir energía y rotación al frente de roca de manera eficiente, manteniendo integridad estructural y facilitando la evacuación de detritos.

Las barras se diseñan para soportar cargas cíclicas. La geometría y calidad de rosca es crítica, ya que en esa zona se concentra tensión y se originan fallas por fatiga. Los adaptadores y coplas también presentan modos de falla por desgaste de rosca, deformación y micro fisuras. La broca, por su parte, soporta abrasión directa y pérdida de insertos (carburo/diamante), afectando la tasa de penetración.

En un enfoque de gestión, se recomienda describir cada componente por: material, tratamiento térmico, geometría, lote, fecha de entrada a operación, historial de metros perforados y causa de retiro. Esto habilita trazabilidad y análisis comparativo.



Figure 4 creación propia. 2025

II.4 Aceros de perforación: metalurgia y tratamientos

Los aceros de perforación son aceros aleados de alta resistencia, con composiciones que suelen incluir Cr, Ni, Mo y, en algunos casos, V. Estos elementos permiten mejorar resistencia a desgaste, tenacidad y comportamiento a fatiga. La metalurgia busca un equilibrio: una superficie suficientemente dura para resistir abrasión y un núcleo tenaz para absorber impactos sin fractura frágil.

Los tratamientos térmicos típicos incluyen temple y revenido, y en ciertos componentes se utiliza endurecimiento superficial por inducción. El control de microestructura (martensita revenida, bainita controlada) es clave para asegurar desempeño consistente. La calidad del proceso (homogeneidad, control de temperatura, tiempos) reduce dispersión de propiedades y, por ende, dispersión en vida útil.

En operación, el acero está sometido a fatiga de alto ciclo. La presencia de discontinuidades (inclusiones, defectos de rosca, marcas superficiales) actúa como concentrador de tensiones. Por ello, la calidad de manufactura, el acabado superficial y la inspección de roscas son tan relevantes como la composición química.

Los aceros de perforación son aceros aleados de alta resistencia, con composiciones que suelen incluir Cr, Ni, Mo y, en algunos casos, V. Estos elementos permiten mejorar resistencia a desgaste, tenacidad y comportamiento a fatiga. La metalurgia busca un equilibrio: una superficie suficientemente dura para resistir abrasión y un núcleo tenaz para absorber impactos sin fractura frágil.

Los tratamientos térmicos típicos incluyen temple y revenido, y en ciertos componentes se utiliza endurecimiento superficial por inducción. El control de microestructura (martensita revenida, bainita controlada) es clave para asegurar desempeño consistente. La calidad del proceso (homogeneidad, control de temperatura, tiempos) reduce dispersión de propiedades y, por ende, dispersión en vida útil.

En operación, el acero está sometido a fatiga de alto ciclo. La presencia de discontinuidades (inclusiones, defectos de rosca, marcas superficiales) actúa como concentrador de tensiones. Por ello, la calidad de manufactura, el acabado superficial y la inspección de roscas son tan relevantes como la composición química.

Los aceros de perforación son aceros aleados de alta resistencia, con composiciones que suelen incluir Cr, Ni, Mo y, en algunos casos, V. Estos elementos permiten mejorar resistencia a desgaste, tenacidad y comportamiento a fatiga. La metalurgia busca un equilibrio: una superficie suficientemente dura para resistir abrasión y un núcleo tenaz para absorber impactos sin fractura frágil.

Los tratamientos térmicos típicos incluyen temple y revenido, y en ciertos componentes se utiliza endurecimiento superficial por inducción. El control de microestructura (martensita revenida, bainita controlada) es clave para asegurar desempeño consistente. La calidad del proceso (homogeneidad, control de temperatura, tiempos) reduce dispersión de propiedades y, por ende, dispersión en vida útil.

En operación, el acero está sometido a fatiga de alto ciclo. La presencia de discontinuidades (inclusiones, defectos de rosca, marcas superficiales) actúa como concentrador de tensiones. Por ello, la calidad de manufactura, el acabado superficial y la inspección de roscas son tan relevantes como la composición química.

Los aceros de perforación son aceros aleados de alta resistencia, con composiciones que suelen incluir Cr, Ni, Mo y, en algunos casos, V. Estos elementos permiten mejorar resistencia a desgaste, tenacidad y comportamiento a fatiga. La metalurgia busca un equilibrio: una superficie suficientemente dura para resistir abrasión y un núcleo tenaz para absorber impactos sin fractura frágil.

Los tratamientos térmicos típicos incluyen temple y revenido, y en ciertos componentes se utiliza endurecimiento superficial por inducción. El control de microestructura (martensita revenida, bainita controlada) es clave para asegurar desempeño consistente. La calidad del proceso (homogeneidad, control de temperatura, tiempos) reduce dispersión de propiedades y, por ende, dispersión en vida útil.

En operación, el acero está sometido a fatiga de alto ciclo. La presencia de discontinuidades (inclusiones, defectos de rosca, marcas superficiales) actúa como concentrador de tensiones. Por ello, la calidad de manufactura, el acabado superficial y la inspección de roscas son tan relevantes como la composición química.

II.5 Mecanismos de desgaste y modos de falla

El desgaste abrasivo es dominante en brocas y zonas expuestas del varillaje. La abrasividad de la roca y la presencia de partículas duras aceleran la pérdida de material. El desgaste por impacto y la fatiga aparecen en componentes sometidos a golpes repetitivos y vibración, especialmente en roscas y adaptadores.

Los modos de falla típicos incluyen: fractura por fatiga (iniciada en rosca), pérdida de rosca (galling/strip), deformación por sobrecarga, fisuración por impacto, y corrosión bajo tensión en ambientes agresivos. La identificación de causa raíz exige registro de condiciones operacionales y análisis post-mortem (inspección visual, metalografía básica, registro de parámetros).

Una gestión madura incorpora criterios de retiro preventivo: se retira la herramienta antes de falla catastrófica, cuando indicadores sugieren que el riesgo aumenta (pérdida sostenida de tasa de penetración, vibración, defectos de rosca observados, acumulación de metros). Esto reduce detenciones y costos de fallas imprevistas.

El desgaste abrasivo es dominante en brocas y zonas expuestas del varillaje. La abrasividad de la roca y la presencia de partículas duras aceleran la pérdida de material. El desgaste por impacto y la fatiga aparecen en componentes sometidos a golpes repetitivos y vibración, especialmente en roscas y adaptadores.

Los modos de falla típicos incluyen: fractura por fatiga (iniciada en rosca), pérdida de rosca (galling/strip), deformación por sobrecarga, fisuración por impacto, y corrosión bajo tensión en ambientes agresivos. La identificación de causa raíz exige registro de condiciones operacionales y análisis post-mortem (inspección visual, metalografía básica, registro de parámetros).

Una gestión madura incorpora criterios de retiro preventivo: se retira la herramienta antes de falla catastrófica, cuando indicadores sugieren que el riesgo aumenta (pérdida sostenida de tasa de penetración, vibración, defectos de rosca observados, acumulación de metros). Esto reduce detenciones y costos de fallas imprevistas.

El desgaste abrasivo es dominante en brocas y zonas expuestas del varillaje. La abrasividad de la roca y la presencia de partículas duras aceleran la pérdida de material. El desgaste por impacto y la fatiga aparecen en componentes sometidos a golpes repetitivos y vibración, especialmente en roscas y adaptadores.

Los modos de falla típicos incluyen: fractura por fatiga (iniciada en rosca), pérdida de rosca (galling/strip), deformación por sobrecarga, fisuración por impacto, y corrosión bajo tensión en ambientes agresivos. La identificación de causa raíz exige registro de condiciones operacionales y análisis post-mortem (inspección visual, metalografía básica, registro de parámetros).

Una gestión madura incorpora criterios de retiro preventivo: se retira la herramienta antes de falla catastrófica, cuando indicadores sugieren que el riesgo aumenta (pérdida sostenida de tasa de penetración, vibración, defectos de rosca observados, acumulación de metros). Esto reduce detenciones y costos de fallas imprevistas.

El desgaste abrasivo es dominante en brocas y zonas expuestas del varillaje. La abrasividad de la roca y la presencia de partículas duras aceleran la pérdida de material. El desgaste por

impacto y la fatiga aparecen en componentes sometidos a golpes repetitivos y vibración, especialmente en roscas y adaptadores.

Los modos de falla típicos incluyen: fractura por fatiga (iniciada en rosca), pérdida de rosca (galling/strip), deformación por sobrecarga, fisuración por impacto, y corrosión bajo tensión en ambientes agresivos. La identificación de causa raíz exige registro de condiciones operacionales y análisis post-mortem (inspección visual, metalografía básica, registro de parámetros).

Una gestión madura incorpora criterios de retiro preventivo: se retira la herramienta antes de falla catastrófica, cuando indicadores sugieren que el riesgo aumenta (pérdida sostenida de tasa de penetración, vibración, defectos de rosca observados, acumulación de metros). Esto reduce detenciones y costos de fallas imprevistas.

II.6 Indicadores de desempeño (KPI) para herramientas

Los KPI más utilizados para evaluar herramientas son: metros perforados por herramienta, costo por metro, tasa de penetración (ROP), tiempo medio entre fallas (MTBF), porcentaje de fallas prematuras, dispersión del rendimiento por lote y cumplimiento del plan de reemplazo. Para que sean comparables, deben normalizarse por condiciones de roca y parámetros operacionales.

El KPI “costo por metro perforado” integra precio unitario y vida útil efectiva. Sin embargo, para capturar costo total, se recomienda incluir costos de detención y mantenimiento. Un enfoque práctico es calcular un “costo operativo equivalente” que agregue costo de herramienta + costo de tiempo perdido por cambio + costo de reprocesos asociados (desviación, barrenos incompleto).

La construcción de una base histórica permite aplicar análisis estadístico básico: medias, percentiles, variabilidad, detección de outliers, y comparaciones A/B entre lotes. Esto sustenta decisiones de compra y recomendaciones de uso.

Los KPI más utilizados para evaluar herramientas son: metros perforados por herramienta, costo por metro, tasa de penetración (ROP), tiempo medio entre fallas (MTBF), porcentaje de fallas prematuras, dispersión del rendimiento por lote y cumplimiento del plan de

reemplazo. Para que sean comparables, deben normalizarse por condiciones de roca y parámetros operacionales.

El KPI “costo por metro perforado” integra precio unitario y vida útil efectiva. Sin embargo, para capturar costo total, se recomienda incluir costos de detención y mantenimiento. Un enfoque práctico es calcular un “costo operativo equivalente” que agregue costo de herramienta + costo de tiempo perdido por cambio + costo de reprocesos asociados (desviación, barrenos incompletos).

La construcción de una base histórica permite aplicar análisis estadístico básico: medias, percentiles, variabilidad, detección de outliers, y comparaciones A/B entre lotes. Esto sustenta decisiones de compra y recomendaciones de uso.

Los KPI más utilizados para evaluar herramientas son: metros perforados por herramienta, costo por metro, tasa de penetración (ROP), tiempo medio entre fallas (MTBF), porcentaje de fallas prematuras, dispersión del rendimiento por lote y cumplimiento del plan de reemplazo. Para que sean comparables, deben normalizarse por condiciones de roca y parámetros operacionales.

El KPI “costo por metro perforado” integra precio unitario y vida útil efectiva. Sin embargo, para capturar costo total, se recomienda incluir costos de detención y mantenimiento. Un enfoque práctico es calcular un “costo operativo equivalente” que agregue costo de herramienta + costo de tiempo perdido por cambio + costo de reprocesos asociados (desviación, barrenos incompletos).

La construcción de una base histórica permite aplicar análisis estadístico básico: medias, percentiles, variabilidad, detección de outliers, y comparaciones A/B entre lotes. Esto sustenta decisiones de compra y recomendaciones de uso.

Los KPI más utilizados para evaluar herramientas son: metros perforados por herramienta, costo por metro, tasa de penetración (ROP), tiempo medio entre fallas (MTBF), porcentaje de fallas prematuras, dispersión del rendimiento por lote y cumplimiento del plan de reemplazo. Para que sean comparables, deben normalizarse por condiciones de roca y parámetros operacionales.

El KPI “costo por metro perforado” integra precio unitario y vida útil efectiva. Sin embargo, para capturar costo total, se recomienda incluir costos de detención y mantenimiento. Un enfoque práctico es calcular un “costo operativo equivalente” que agregue costo de herramienta + costo de tiempo perdido por cambio + costo de reprocesos asociados (desviación, barrenos incompleto).

La construcción de una base histórica permite aplicar análisis estadístico básico: medias, percentiles, variabilidad, detección de outliers, y comparaciones A/B entre lotes. Esto sustenta decisiones de compra y recomendaciones de uso.



Figure 5 Energía en Minería .2024

Figura 4. Equipo de perforación en superficie (aplicación de gran escala). Fuente: Imagen proporcionada por el autor (archivo adjunto en este trabajo).

II.7 Tendencias: automatización, sensorización y analítica

La industria se dirige hacia perforación inteligente: automatización de ciclos, asistencia al operador, control de desviación, y registro continuo de parámetros. Estas capacidades permiten relacionar condiciones operacionales con desgaste de herramientas y ajustar la estrategia de perforación para maximizar vida útil.

La sensorización y los sistemas digitales habilitan trazabilidad: se registra cada herramienta y se asocia su historial con parámetros de perforación. Esto permite construir modelos predictivos simples (por ejemplo, estimación de vida remanente) y mejorar la planificación de inventario y mantenimiento.

Para proveedores, estas tendencias abren modelos de negocio basados en desempeño: contratos de suministro con KPI, acuerdos por metro perforado y servicios de optimización. Para faenas mineras, reducen costos y mejoran control de proceso.

La industria se dirige hacia perforación inteligente: automatización de ciclos, asistencia al operador, control de desviación, y registro continuo de parámetros. Estas capacidades permiten relacionar condiciones operacionales con desgaste de herramientas y ajustar la estrategia de perforación para maximizar vida útil.

La sensorización y los sistemas digitales habilitan trazabilidad: se registra cada herramienta y se asocia su historial con parámetros de perforación. Esto permite construir modelos predictivos simples (por ejemplo, estimación de vida remanente) y mejorar la planificación de inventario y mantenimiento.

Para proveedores, estas tendencias abren modelos de negocio basados en desempeño: contratos de suministro con KPI, acuerdos por metro perforado y servicios de optimización. Para faenas mineras, reducen costos y mejoran control de proceso.

La industria se dirige hacia perforación inteligente: automatización de ciclos, asistencia al operador, control de desviación, y registro continuo de parámetros. Estas capacidades permiten relacionar condiciones operacionales con desgaste de herramientas y ajustar la estrategia de perforación para maximizar vida útil.

La sensorización y los sistemas digitales habilitan trazabilidad: se registra cada herramienta y se asocia su historial con parámetros de perforación. Esto permite construir modelos predictivos simples (por ejemplo, estimación de vida remanente) y mejorar la planificación de inventario y mantenimiento.

Para proveedores, estas tendencias abren modelos de negocio basados en desempeño: contratos de suministro con KPI, acuerdos por metro perforado y servicios de optimización. Para faenas mineras, reducen costos y mejoran control de proceso.

La industria se dirige hacia perforación inteligente: automatización de ciclos, asistencia al operador, control de desviación, y registro continuo de parámetros. Estas capacidades permiten relacionar condiciones operacionales con desgaste de herramientas y ajustar la estrategia de perforación para maximizar vida útil.

La sensorización y los sistemas digitales habilitan trazabilidad: se registra cada herramienta y se asocia su historial con parámetros de perforación. Esto permite construir modelos predictivos simples (por ejemplo, estimación de vida remanente) y mejorar la planificación de inventario y mantenimiento.

Para proveedores, estas tendencias abren modelos de negocio basados en desempeño: contratos de suministro con KPI, acuerdos por metro perforado y servicios de optimización. Para faenas mineras, reducen costos y mejoran control de proceso.

III. OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo pretende profundizar nuestro conocimiento del mercado de perforación minería, petróleo y otras aplicaciones a nivel global, desde el punto de vista de las herramientas de acero que son determinantes de la operación, analizando su desempeño, sus factores de variación y las oportunidades de mejora mediante monitoreo y seguimiento sistemático.

IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. El primer objetivo específico busca desarrollar una comprensión integral de las operaciones de perforación en los principales sectores industriales donde esta actividad resulta esencial, tales como la minería metálica y no metálica, la industria del petróleo y gas, la geotermia y la exploración geológica. Para ello, se estudian los distintos sistemas de perforación utilizados a nivel global, sus principios de funcionamiento, las tecnologías predominantes en cada sector y las tendencias actuales en automatización y digitalización de equipos. Asimismo, se analiza cómo las condiciones geológicas, la dureza de la roca, la profundidad de operación y los requerimientos productivos influyen en la selección de métodos de perforación. Este análisis global permite establecer un marco comparativo que facilita comprender las exigencias técnicas que enfrentan las herramientas de perforación en distintos entornos operacionales.
2. El segundo objetivo se orienta a examinar en detalle el comportamiento de las herramientas de acero utilizadas en perforación, tales como barras, brocas, adaptadores y martillos. Se busca comprender los factores metalúrgicos, mecánicos y operacionales que determinan su vida útil y rendimiento, incluyendo composición química de los aceros, tratamientos térmicos aplicados, resistencia a impacto, fatiga y abrasión. Adicionalmente, se estudian los mecanismos de desgaste más frecuentes y las fallas típicas que afectan a estos componentes durante su operación en terreno. Este objetivo permite establecer criterios técnicos para evaluar el desempeño real de las herramientas y fundamentar la necesidad de implementar sistemas de monitoreo que faciliten la optimización de su uso.

3. El tercer objetivo específico busca reconocer y caracterizar los principales elementos que intervienen en el caso de estudio Tassaroli Chile, considerando tanto variables técnicas como económicas y comerciales. En particular, se identifican los rangos de precios de mercado de las herramientas de perforación, los esquemas actuales de compra y reposición utilizados por las empresas mineras, y los métodos de monitoreo de herramientas actualmente disponibles o utilizados en la industria. Asimismo, se examinan las oportunidades de inversión en tecnología y digitalización que podrían ser incorporadas por Tassaroli Chile para mejorar su oferta de valor. Este análisis permite establecer una base concreta para evaluar la situación actual y detectar brechas respecto a las mejores prácticas internacionales.

4. El cuarto objetivo se centra en analizar los elementos previamente identificados, evaluando sus interrelaciones y su impacto en el desempeño global de las operaciones de perforación. Se examina cómo las decisiones de compra basadas únicamente en precio pueden afectar el costo total de operación cuando no se considera la vida útil real de las herramientas. Asimismo, se analiza el impacto de la ausencia de sistemas de seguimiento del rendimiento en la capacidad de las empresas para tomar decisiones informadas sobre selección de proveedores, planificación de inventarios y estrategias de mantenimiento. Este análisis permite comprender las oportunidades de mejora disponibles y fundamentar la propuesta técnica que se desarrolla posteriormente.

5. Finalmente, el quinto objetivo específico busca formular una propuesta concreta de acción o mejora aplicable al caso Tassaroli Chile, orientada a la implementación de un sistema de seguimiento y monitoreo del rendimiento de herramientas de perforación. Esta propuesta considera aspectos técnicos, operacionales y organizacionales, tales como métodos de identificación individual de herramientas, registro sistemático de metros perforados, generación de indicadores clave de desempeño y construcción de bases de datos históricas. La finalidad es ofrecer una solución práctica que permita optimizar el uso de los aceros de perforación, reducir costos operacionales y fortalecer la posición competitiva de la empresa en el mercado minero chileno.

V. DESARROLLO DEL CASO TASSAROLI CHILE

V.1 Consumo de aceros de perforación en la minería en Chile

La minería es el principal motor del consumo de aceros de perforación en Chile, debido a la magnitud y continuidad de sus operaciones, especialmente en la minería del cobre. Los aceros de perforación corresponden a insumos críticos utilizados en procesos de perforación y tronadura, tales como barras de perforación, tubos o drill rods, martillos DTH, brocas, adaptadores y acoples, los cuales están fabricados con aceros de alta resistencia y aleaciones especiales diseñadas para soportar condiciones extremas de abrasión, impacto y fatiga.

Chile es el mayor productor mundial de cobre, lo que implica una actividad permanente de perforación tanto en minería a rajo abierto como subterránea. Cada fase del ciclo minero —exploración, desarrollo, producción y ampliaciones— requiere perforación continua, lo que genera una demanda constante de aceros de perforación. En grandes operaciones, se perforan millones de metros lineales por año, haciendo que el consumo de estos aceros sea significativo dentro de los costos operacionales.

No existen estadísticas públicas oficiales que desagreguen específicamente el consumo nacional de aceros de perforación. Sin embargo, el consumo aparente de acero en Chile ha superado históricamente los 1,8 a 2 millones de toneladas anuales, y una fracción relevante de este volumen corresponde a insumos industriales y mineros. Dentro de este grupo se incluyen los aceros largos y aleados utilizados en perforación minera.

El consumo de aceros de perforación está directamente relacionado con variables operacionales como la dureza de la roca, el diámetro y profundidad de los taladros, el tipo de método de explotación y la tecnología utilizada. En rocas más duras o abrasivas, la vida útil de barras y brocas se reduce, aumentando el consumo. Asimismo, operaciones subterráneas suelen presentar un mayor desgaste por metro perforado en comparación con rajos abiertos.

A nivel operativo, las empresas mineras gestionan el consumo de aceros de perforación mediante indicadores como el costo por metro perforado, la vida útil de las herramientas y los tiempos de recambio. Compañías como Codelco, Antofagasta Minerals y BHP utilizan sistemas internos de control y mantenimiento para optimizar el uso de estos consumibles, aunque dichos datos no son de acceso público.

En los últimos años, se ha observado una tendencia hacia la optimización del consumo mediante mejoras tecnológicas, automatización de equipos de perforación y programas de reutilización y reciclaje de aceros desgastados. Estas prácticas buscan reducir costos, mejorar la eficiencia operacional y disminuir el impacto ambiental asociado al uso intensivo de acero.

V.2 Principales consumidores y proveedores de aceros de perforación en la minería en Chile

La demanda de aceros de perforación en Chile está directamente asociada al nivel de actividad minera, especialmente en la minería del cobre. Estos aceros, que incluyen barras de perforación, brocas, acoples, martillos DTH y otros consumibles metálicos, son utilizados de manera intensiva en procesos de perforación y tronadura, tanto en minería a rajo abierto como subterránea. Los principales consumidores de aceros de perforación en Chile son, en primer lugar, las grandes compañías mineras. Entre ellas destaca Codelco, la mayor productora de cobre del mundo, que utiliza grandes volúmenes de herramientas y aceros de perforación en todas sus divisiones operativas. Codelco publica regularmente procesos de licitación y contratos marco asociados a la adquisición de aceros de perforación y herramientas de perforación, lo que constituye un respaldo directo de su rol como principal consumidor nacional.

Junto a Codelco, otras compañías mineras de gran escala como BHP (Minera Escondida y Spence), Antofagasta Minerals, Anglo American, Teck, Collahuasi y Sierra Gorda también presentan un consumo significativo de aceros de perforación. Estas empresas operan yacimientos de gran tamaño que requieren perforación continua para desarrollo de frentes, tronadura y control de leyes, lo que se traduce en un alto consumo de consumibles de acero.

Un segundo grupo relevante de consumidores lo constituyen los contratistas de perforación y sondajes mineros. Empresas como Foraco Chile, Geotec Boyles y otras firmas internacionales especializadas en perforación de exploración y producción ejecutan servicios para las grandes mineras y, para ello, adquieren directamente aceros de perforación y herramientas asociadas. En este caso, el consumo es indirecto, pero igualmente relevante, ya que depende del número de metros perforados comprometidos en los contratos.

PRINCIPALES PROVEEDORES DE ACEROS DE PERFORACIÓN

En el mercado chileno operan proveedores internacionales y locales de aceros de perforación. Entre los principales proveedores globales con presencia directa en Chile se encuentran Sandvik Rock Tools y Epiroc, ambas compañías reconocidas a nivel mundial por la fabricación y suministro de herramientas y aceros de perforación para minería de superficie y subterránea. Estas empresas abastecen tanto a mineras como a contratistas, mediante contratos directos y distribuidores locales.

Otro proveedor relevante es Mincon Chile, empresa especializada en herramientas de perforación, particularmente en soluciones DTH y consumibles asociados. Mincon figura

como proveedor adjudicado en procesos de compra de aceros de perforación por parte de compañías mineras chilenas, lo que respalda su participación en el mercado nacional.

A nivel local, destaca RD Tools, empresa chilena dedicada a la fabricación de herramientas y aceros de perforación tipo Top Hammer, que abastece a operaciones mineras y contratistas dentro del país. Además, existen empresas comercializadoras y distribuidoras como SIMMA, que actúan como intermediarios entre fabricantes internacionales y clientes finales.

RELACIÓN PROVEEDOR – CLIENTE

La relación entre proveedores y consumidores de aceros de perforación en Chile se estructura principalmente a través de licitaciones públicas y privadas, contratos marco y acuerdos de suministro de largo plazo. En el caso de Codelco, es posible identificar adjudicaciones formales de contratos de “aceros de perforación” a proveedores como Sandvik Chile y Mincon Chile, lo que constituye evidencia directa del vínculo proveedor–cliente.

De forma complementaria, los contratistas de perforación adquieren aceros de perforación para cumplir los servicios contratados por las mineras, trasladando el consumo al costo por metro perforado. Este modelo explica por qué el consumo de aceros de perforación está estrechamente vinculado a la intensidad de la actividad minera y al volumen de perforación ejecutado en el país.

V.3 Contexto y posicionamiento

Tassaroli Chile opera como proveedor de soluciones metalmecánicas y componentes para industrias intensivas en activos, entre ellas minería. En un mercado donde compiten grandes fabricantes internacionales, la diferenciación se logra mediante calidad, capacidad de suministro, soporte técnico y evidencia objetiva de desempeño. En particular, para herramientas de perforación, la evidencia de rendimiento en terreno se vuelve un argumento comercial y técnico de alto impacto.

La minería chilena, por su escala y exigencia, constituye un laboratorio natural para validar herramientas. Las condiciones de roca y continuidad operativa hacen que cualquier mejora

en vida útil o estabilidad de desempeño se traduzca en ahorros relevantes. Por ello, una propuesta de seguimiento de rendimiento no solo beneficia al cliente (optimización), sino también al proveedor (aprendizaje y mejora metalúrgica).

Tassaroli Chile opera como proveedor de soluciones metalmecánicas y componentes para industrias intensivas en activos, entre ellas minería. En un mercado donde compiten grandes fabricantes internacionales, la diferenciación se logra mediante calidad, capacidad de suministro, soporte técnico y evidencia objetiva de desempeño. En particular, para herramientas de perforación, la evidencia de rendimiento en terreno se vuelve un argumento comercial y técnico de alto impacto.

La minería chilena, por su escala y exigencia, constituye un laboratorio natural para validar herramientas. Las condiciones de roca y continuidad operativa hacen que cualquier mejora en vida útil o estabilidad de desempeño se traduzca en ahorros relevantes. Por ello, una propuesta de seguimiento de rendimiento no solo beneficia al cliente (optimización), sino también al proveedor (aprendizaje y mejora metalúrgica).

Tassaroli Chile opera como proveedor de soluciones metalmecánicas y componentes para industrias intensivas en activos, entre ellas minería. En un mercado donde compiten grandes fabricantes internacionales, la diferenciación se logra mediante calidad, capacidad de suministro, soporte técnico y evidencia objetiva de desempeño. En particular, para herramientas de perforación, la evidencia de rendimiento en terreno se vuelve un argumento comercial y técnico de alto impacto.

La minería chilena, por su escala y exigencia, constituye un laboratorio natural para validar herramientas. Las condiciones de roca y continuidad operativa hacen que cualquier mejora en vida útil o estabilidad de desempeño se traduzca en ahorros relevantes. Por ello, una propuesta de seguimiento de rendimiento no solo beneficia al cliente (optimización), sino también al proveedor (aprendizaje y mejora metalúrgica).

Tassaroli Chile opera como proveedor de soluciones metalmecánicas y componentes para industrias intensivas en activos, entre ellas minería. En un mercado donde compiten grandes fabricantes internacionales, la diferenciación se logra mediante calidad, capacidad de suministro, soporte técnico y evidencia objetiva de desempeño. En particular, para

herramientas de perforación, la evidencia de rendimiento en terreno se vuelve un argumento comercial y técnico de alto impacto.

La minería chilena, por su escala y exigencia, constituye un laboratorio natural para validar herramientas. Las condiciones de roca y continuidad operativa hacen que cualquier mejora en vida útil o estabilidad de desempeño se traduzca en ahorros relevantes. Por ello, una propuesta de seguimiento de rendimiento no solo beneficia al cliente (optimización), sino también al proveedor (aprendizaje y mejora metalúrgica).

Tassaroli Chile opera como proveedor de soluciones metalmecánicas y componentes para industrias intensivas en activos, entre ellas minería. En un mercado donde compiten grandes fabricantes internacionales, la diferenciación se logra mediante calidad, capacidad de suministro, soporte técnico y evidencia objetiva de desempeño. En particular, para herramientas de perforación, la evidencia de rendimiento en terreno se vuelve un argumento comercial y técnico de alto impacto.

La minería chilena, por su escala y exigencia, constituye un laboratorio natural para validar herramientas. Las condiciones de roca y continuidad operativa hacen que cualquier mejora en vida útil o estabilidad de desempeño se traduzca en ahorros relevantes. Por ello, una propuesta de seguimiento de rendimiento no solo beneficia al cliente (optimización), sino también al proveedor (aprendizaje y mejora metalúrgica).

V.4 Diagnóstico: situación actual y brechas

El diagnóstico típico en la gestión de herramientas muestra falta de trazabilidad individual, registros dispersos y poca integración con datos de operación. Cuando una herramienta falla, la información que queda disponible suele ser limitada: fecha de retiro y, en algunos casos, motivo general. Esto impide responder preguntas clave: ¿cuántos metros reales perforó?, ¿en qué roca?, ¿con qué parámetros?, ¿fue falla prematura o desgaste normal?

Esta brecha genera decisiones basadas en experiencia subjetiva y no en análisis. Además, dificulta comparar lotes de acero o evaluar cambios de proveedor. En un entorno de presión por eficiencia, la ausencia de datos limita la mejora continua. Por ello, la oportunidad central consiste en construir un sistema mínimo viable de seguimiento, escalable y aceptable operacionalmente.

El diagnóstico típico en la gestión de herramientas muestra falta de trazabilidad individual, registros dispersos y poca integración con datos de operación. Cuando una herramienta falla, la información que queda disponible suele ser limitada: fecha de retiro y, en algunos casos, motivo general. Esto impide responder preguntas clave: ¿cuántos metros reales perforó?, ¿en qué roca?, ¿con qué parámetros?, ¿fue falla prematura o desgaste normal?

Esta brecha genera decisiones basadas en experiencia subjetiva y no en análisis. Además, dificulta comparar lotes de acero o evaluar cambios de proveedor. En un entorno de presión por eficiencia, la ausencia de datos limita la mejora continua. Por ello, la oportunidad central consiste en construir un sistema mínimo viable de seguimiento, escalable y aceptable operacionalmente.

El diagnóstico típico en la gestión de herramientas muestra falta de trazabilidad individual, registros dispersos y poca integración con datos de operación. Cuando una herramienta falla, la información que queda disponible suele ser limitada: fecha de retiro y, en algunos casos, motivo general. Esto impide responder preguntas clave: ¿cuántos metros reales perforó?, ¿en qué roca?, ¿con qué parámetros?, ¿fue falla prematura o desgaste normal?

Esta brecha genera decisiones basadas en experiencia subjetiva y no en análisis. Además, dificulta comparar lotes de acero o evaluar cambios de proveedor. En un entorno de presión por eficiencia, la ausencia de datos limita la mejora continua. Por ello, la oportunidad central consiste en construir un sistema mínimo viable de seguimiento, escalable y aceptable operacionalmente.

El diagnóstico típico en la gestión de herramientas muestra falta de trazabilidad individual, registros dispersos y poca integración con datos de operación. Cuando una herramienta falla, la información que queda disponible suele ser limitada: fecha de retiro y, en algunos casos, motivo general. Esto impide responder preguntas clave: ¿cuántos metros reales perforó?, ¿en qué roca?, ¿con qué parámetros?, ¿fue falla prematura o desgaste normal?

Esta brecha genera decisiones basadas en experiencia subjetiva y no en análisis. Además, dificulta comparar lotes de acero o evaluar cambios de proveedor. En un entorno de presión por eficiencia, la ausencia de datos limita la mejora continua. Por ello, la oportunidad

central consiste en construir un sistema mínimo viable de seguimiento, escalable y aceptable operacionalmente.

El diagnóstico típico en la gestión de herramientas muestra falta de trazabilidad individual, registros dispersos y poca integración con datos de operación. Cuando una herramienta falla, la información que queda disponible suele ser limitada: fecha de retiro y, en algunos casos, motivo general. Esto impide responder preguntas clave: ¿cuántos metros reales perforó?, ¿en qué roca?, ¿con qué parámetros?, ¿fue falla prematura o desgaste normal?

Esta brecha genera decisiones basadas en experiencia subjetiva y no en análisis. Además, dificulta comparar lotes de acero o evaluar cambios de proveedor. En un entorno de presión por eficiencia, la ausencia de datos limita la mejora continua. Por ello, la oportunidad central consiste en construir un sistema mínimo viable de seguimiento, escalable y aceptable operacionalmente.

V.5 Diseño del sistema de seguimiento de rendimiento

Se propone implementar un Sistema de Seguimiento del Rendimiento (SSR) para aceros de perforación, con foco inicial en barras y componentes críticos (adaptadores y coplas). El SSR debe capturar el ciclo de vida de cada pieza: ingreso, asignación a equipo, uso por turno, metros acumulados, eventos relevantes (cambio de broca, daño de rosca, vibración), y retiro. La identificación puede realizarse con código QR grabado y lectura móvil, o con RFID si se justifica por volumen.

El registro operacional debe ser simple: (i) identificar herramienta, (ii) identificar equipo y frente, (iii) registrar metros del turno, (iv) registrar condición general. Idealmente, se integra con datos del equipo (si existe plataforma digital), pero en una primera etapa puede operarse con formularios estandarizados. La clave es consistencia y disciplina de captura.

La base de datos centralizada permite generar KPI por herramienta, por lote, por faena y por condición de roca. Con ello, se construyen reportes mensuales y trimestrales, y se habilita retroalimentación a manufactura: ajustar tratamiento térmico, geometría de rosca, o especificación de material según resultados reales.

Se propone implementar un Sistema de Seguimiento del Rendimiento (SSR) para aceros de perforación, con foco inicial en barras y componentes críticos (adaptadores y coplas). El SSR debe capturar el ciclo de vida de cada pieza: ingreso, asignación a equipo, uso por turno, metros acumulados, eventos relevantes (cambio de broca, daño de rosca, vibración), y retiro. La identificación puede realizarse con código QR grabado y lectura móvil, o con RFID si se justifica por volumen.

El registro operacional debe ser simple: (i) identificar herramienta, (ii) identificar equipo y frente, (iii) registrar metros del turno, (iv) registrar condición general. Idealmente, se integra con datos del equipo (si existe plataforma digital), pero en una primera etapa puede operarse con formularios estandarizados. La clave es consistencia y disciplina de captura.

La base de datos centralizada permite generar KPI por herramienta, por lote, por faena y por condición de roca. Con ello, se construyen reportes mensuales y trimestrales, y se habilita retroalimentación a manufactura: ajustar tratamiento térmico, geometría de rosca, o especificación de material según resultados reales.

Se propone implementar un Sistema de Seguimiento del Rendimiento (SSR) para aceros de perforación, con foco inicial en barras y componentes críticos (adaptadores y coplas). El SSR debe capturar el ciclo de vida de cada pieza: ingreso, asignación a equipo, uso por turno, metros acumulados, eventos relevantes (cambio de broca, daño de rosca, vibración), y retiro. La identificación puede realizarse con código QR grabado y lectura móvil, o con RFID si se justifica por volumen.

El registro operacional debe ser simple: (i) identificar herramienta, (ii) identificar equipo y frente, (iii) registrar metros del turno, (iv) registrar condición general. Idealmente, se integra con datos del equipo (si existe plataforma digital), pero en una primera etapa puede operarse con formularios estandarizados. La clave es consistencia y disciplina de captura.

La base de datos centralizada permite generar KPI por herramienta, por lote, por faena y por condición de roca. Con ello, se construyen reportes mensuales y trimestrales, y se habilita retroalimentación a manufactura: ajustar tratamiento térmico, geometría de rosca, o especificación de material según resultados reales.

Se propone implementar un Sistema de Seguimiento del Rendimiento (SSR) para aceros de perforación, con foco inicial en barras y componentes críticos (adaptadores y coplas). El SSR debe capturar el ciclo de vida de cada pieza: ingreso, asignación a equipo, uso por turno, metros acumulados, eventos relevantes (cambio de broca, daño de rosca, vibración), y retiro. La identificación puede realizarse con código QR grabado y lectura móvil, o con RFID si se justifica por volumen.

El registro operacional debe ser simple: (i) identificar herramienta, (ii) identificar equipo y frente, (iii) registrar metros del turno, (iv) registrar condición general. Idealmente, se integra con datos del equipo (si existe plataforma digital), pero en una primera etapa puede operarse con formularios estandarizados. La clave es consistencia y disciplina de captura.

La base de datos centralizada permite generar KPI por herramienta, por lote, por faena y por condición de roca. Con ello, se construyen reportes mensuales y trimestrales, y se habilita retroalimentación a manufactura: ajustar tratamiento térmico, geometría de rosca, o especificación de material según resultados reales.

Se propone implementar un Sistema de Seguimiento del Rendimiento (SSR) para aceros de perforación, con foco inicial en barras y componentes críticos (adaptadores y coplas). El SSR debe capturar el ciclo de vida de cada pieza: ingreso, asignación a equipo, uso por turno, metros acumulados, eventos relevantes (cambio de broca, daño de rosca, vibración), y retiro. La identificación puede realizarse con código QR grabado y lectura móvil, o con RFID si se justifica por volumen.

El registro operacional debe ser simple: (i) identificar herramienta, (ii) identificar equipo y frente, (iii) registrar metros del turno, (iv) registrar condición general. Idealmente, se integra con datos del equipo (si existe plataforma digital), pero en una primera etapa puede operarse con formularios estandarizados. La clave es consistencia y disciplina de captura.

La base de datos centralizada permite generar KPI por herramienta, por lote, por faena y por condición de roca. Con ello, se construyen reportes mensuales y trimestrales, y se habilita retroalimentación a manufactura: ajustar tratamiento térmico, geometría de rosca, o especificación de material según resultados reales.

Se propone implementar un Sistema de Seguimiento del Rendimiento (SSR) para aceros de perforación, con foco inicial en barras y componentes críticos (adaptadores y coplas). El SSR debe capturar el ciclo de vida de cada pieza: ingreso, asignación a equipo, uso por turno, metros acumulados, eventos relevantes (cambio de broca, daño de rosca, vibración), y retiro. La identificación puede realizarse con código QR grabado y lectura móvil, o con RFID si se justifica por volumen.

El registro operacional debe ser simple: (i) identificar herramienta, (ii) identificar equipo y frente, (iii) registrar metros del turno, (iv) registrar condición general. Idealmente, se integra con datos del equipo (si existe plataforma digital), pero en una primera etapa puede operarse con formularios estandarizados. La clave es consistencia y disciplina de captura.

La base de datos centralizada permite generar KPI por herramienta, por lote, por faena y por condición de roca. Con ello, se construyen reportes mensuales y trimestrales, y se habilita retroalimentación a manufactura: ajustar tratamiento térmico, geometría de rosca, o especificación de material según resultados reales.



Figure 6 creación propia. 2026

V.6 Indicadores y tableros de control

El SSR debe operar con indicadores claros: metros por barra (promedio y percentiles), tasa de fallas prematuras, costo por metro, y causas de retiro. Para asegurar comparabilidad, se

recomienda segmentar por tipo de roca o por unidad geotécnica. Además, se deben registrar eventos de mantenimiento (re-roscado si aplica) y condiciones de operación (presión, energía, rotación) si están disponibles.

Un tablero de control (dashboard) puede construirse inicialmente en Excel, con actualizaciones periódicas, y luego migrarse a una plataforma más robusta. El tablero debe responder preguntas operacionales: ¿qué lote está rindiendo mejor?, ¿qué frentes generan desgaste acelerado?, ¿cuál es la dispersión de desempeño?, ¿se observan outliers que sugieran problemas de calidad o de operación?

El SSR debe operar con indicadores claros: metros por barra (promedio y percentiles), tasa de fallas prematuras, costo por metro, y causas de retiro. Para asegurar comparabilidad, se recomienda segmentar por tipo de roca o por unidad geotécnica. Además, se deben registrar eventos de mantenimiento (re-roscado si aplica) y condiciones de operación (presión, energía, rotación) si están disponibles.

Un tablero de control (dashboard) puede construirse inicialmente en Excel, con actualizaciones periódicas, y luego migrarse a una plataforma más robusta. El tablero debe responder preguntas operacionales: ¿qué lote está rindiendo mejor?, ¿qué frentes generan desgaste acelerado?, ¿cuál es la dispersión de desempeño?, ¿se observan outliers que sugieran problemas de calidad o de operación?

El SSR debe operar con indicadores claros: metros por barra (promedio y percentiles), tasa de fallas prematuras, costo por metro, y causas de retiro. Para asegurar comparabilidad, se recomienda segmentar por tipo de roca o por unidad geotécnica. Además, se deben registrar eventos de mantenimiento (re-roscado si aplica) y condiciones de operación (presión, energía, rotación) si están disponibles.

Un tablero de control (dashboard) puede construirse inicialmente en Excel, con actualizaciones periódicas, y luego migrarse a una plataforma más robusta. El tablero debe responder preguntas operacionales: ¿qué lote está rindiendo mejor?, ¿qué frentes generan desgaste acelerado?, ¿cuál es la dispersión de desempeño?, ¿se observan outliers que sugieran problemas de calidad o de operación?

El SSR debe operar con indicadores claros: metros por barra (promedio y percentiles), tasa de fallas prematuras, costo por metro, y causas de retiro. Para asegurar comparabilidad, se recomienda segmentar por tipo de roca o por unidad geotécnica. Además, se deben registrar

eventos de mantenimiento (re-roscado si aplica) y condiciones de operación (presión, energía, rotación) si están disponibles.

Un tablero de control (dashboard) puede construirse inicialmente en Excel, con actualizaciones periódicas, y luego migrarse a una plataforma más robusta. El tablero debe responder preguntas operacionales: ¿qué lote está rindiendo mejor?, ¿qué frentes generan desgaste acelerado?, ¿cuál es la dispersión de desempeño?, ¿se observan outliers que sugieran problemas de calidad o de operación?

El SSR debe operar con indicadores claros: metros por barra (promedio y percentiles), tasa de fallas prematuras, costo por metro, y causas de retiro. Para asegurar comparabilidad, se recomienda segmentar por tipo de roca o por unidad geotécnica. Además, se deben registrar eventos de mantenimiento (re-roscado si aplica) y condiciones de operación (presión, energía, rotación) si están disponibles.

Un tablero de control (dashboard) puede construirse inicialmente en Excel, con actualizaciones periódicas, y luego migrarse a una plataforma más robusta. El tablero debe responder preguntas operacionales: ¿qué lote está rindiendo mejor?, ¿qué frentes generan desgaste acelerado?, ¿cuál es la dispersión de desempeño?, ¿se observan outliers que sugieran problemas de calidad o de operación?

El SSR debe operar con indicadores claros: metros por barra (promedio y percentiles), tasa de fallas prematuras, costo por metro, y causas de retiro. Para asegurar comparabilidad, se recomienda segmentar por tipo de roca o por unidad geotécnica. Además, se deben registrar eventos de mantenimiento (re-roscado si aplica) y condiciones de operación (presión, energía, rotación) si están disponibles.

Un tablero de control (dashboard) puede construirse inicialmente en Excel, con actualizaciones periódicas, y luego migrarse a una plataforma más robusta. El tablero debe responder preguntas operacionales: ¿qué lote está rindiendo mejor?, ¿qué frentes generan desgaste acelerado?, ¿cuál es la dispersión de desempeño?, ¿se observan outliers que sugieran problemas de calidad o de operación?

V.7 Propuesta de implementación por etapas

La implementación se recomienda en tres etapas. Etapa 1 (piloto): seleccionar una faena o área, definir componentes a trazar, capacitar usuarios y levantar datos por 4 a 8 semanas. Etapa 2 (escalamiento): corregir fricciones operacionales, estandarizar formatos, mejorar calidad de datos y ampliar cobertura. Etapa 3 (analítica): incorporar análisis estadístico, segmentación por condiciones y recomendaciones automáticas de reemplazo preventivo.

Cada etapa debe incluir objetivos medibles: porcentaje de herramientas trazadas, porcentaje de turnos con registro completo, reducción de fallas no planificadas, mejora del costo por metro, y evidencia de aprendizaje (por ejemplo, ajuste de especificación de material).

La implementación se recomienda en tres etapas. Etapa 1 (piloto): seleccionar una faena o área, definir componentes a trazar, capacitar usuarios y levantar datos por 4 a 8 semanas. Etapa 2 (escalamiento): corregir fricciones operacionales, estandarizar formatos, mejorar calidad de datos y ampliar cobertura. Etapa 3 (analítica): incorporar análisis estadístico, segmentación por condiciones y recomendaciones automáticas de reemplazo preventivo.

Cada etapa debe incluir objetivos medibles: porcentaje de herramientas trazadas, porcentaje de turnos con registro completo, reducción de fallas no planificadas, mejora del costo por metro, y evidencia de aprendizaje (por ejemplo, ajuste de especificación de material).

La implementación se recomienda en tres etapas. Etapa 1 (piloto): seleccionar una faena o área, definir componentes a trazar, capacitar usuarios y levantar datos por 4 a 8 semanas. Etapa 2 (escalamiento): corregir fricciones operacionales, estandarizar formatos, mejorar calidad de datos y ampliar cobertura. Etapa 3 (analítica): incorporar análisis estadístico, segmentación por condiciones y recomendaciones automáticas de reemplazo preventivo.

Cada etapa debe incluir objetivos medibles: porcentaje de herramientas trazadas, porcentaje de turnos con registro completo, reducción de fallas no planificadas, mejora del

costo por metro, y evidencia de aprendizaje (por ejemplo, ajuste de especificación de material).

La implementación se recomienda en tres etapas. Etapa 1 (piloto): seleccionar una faena o área, definir componentes a trazar, capacitar usuarios y levantar datos por 4 a 8 semanas. Etapa 2 (escalamiento): corregir fricciones operacionales, estandarizar formatos, mejorar calidad de datos y ampliar cobertura. Etapa 3 (analítica): incorporar análisis estadístico, segmentación por condiciones y recomendaciones automáticas de reemplazo preventivo.

Cada etapa debe incluir objetivos medibles: porcentaje de herramientas trazadas, porcentaje de turnos con registro completo, reducción de fallas no planificadas, mejora del costo por metro, y evidencia de aprendizaje (por ejemplo, ajuste de especificación de material).

La implementación se recomienda en tres etapas. Etapa 1 (piloto): seleccionar una faena o área, definir componentes a trazar, capacitar usuarios y levantar datos por 4 a 8 semanas. Etapa 2 (escalamiento): corregir fricciones operacionales, estandarizar formatos, mejorar calidad de datos y ampliar cobertura. Etapa 3 (analítica): incorporar análisis estadístico, segmentación por condiciones y recomendaciones automáticas de reemplazo preventivo.

Cada etapa debe incluir objetivos medibles: porcentaje de herramientas trazadas, porcentaje de turnos con registro completo, reducción de fallas no planificadas, mejora del costo por metro, y evidencia de aprendizaje (por ejemplo, ajuste de especificación de material).

La implementación se recomienda en tres etapas. Etapa 1 (piloto): seleccionar una faena o área, definir componentes a trazar, capacitar usuarios y levantar datos por 4 a 8 semanas. Etapa 2 (escalamiento): corregir fricciones operacionales, estandarizar formatos, mejorar calidad de datos y ampliar cobertura. Etapa 3 (analítica): incorporar análisis estadístico, segmentación por condiciones y recomendaciones automáticas de reemplazo preventivo.

Cada etapa debe incluir objetivos medibles: porcentaje de herramientas trazadas, porcentaje de turnos con registro completo, reducción de fallas no planificadas, mejora del

costo por metro, y evidencia de aprendizaje (por ejemplo, ajuste de especificación de material).

V.8 Evaluación económica y propuesta de valor

La propuesta de valor del SSR se expresa en reducción de costos por tres vías: (i) mayor vida útil promedio (más metros por herramienta), (ii) reducción de variabilidad (menos fallas prematuras), y (iii) reducción de tiempo perdido por detenciones y cambios no planificados. Incluso mejoras conservadoras (5–10%) pueden justificar el esfuerzo de implementación si el volumen anual de metros perforados es elevado.

Desde el punto de vista comercial, Tassaroli Chile puede ofrecer reportes de desempeño como servicio, posicionándose como socio técnico. Esto permite competir por valor total y no solo por precio unitario. Además, la evidencia recopilada habilita ofertas segmentadas: recomendar cierto acero/rosca para ciertas rocas, optimizando la selección para el cliente.

La propuesta de valor del SSR se expresa en reducción de costos por tres vías: (i) mayor vida útil promedio (más metros por herramienta), (ii) reducción de variabilidad (menos fallas prematuras), y (iii) reducción de tiempo perdido por detenciones y cambios no planificados. Incluso mejoras conservadoras (5–10%) pueden justificar el esfuerzo de implementación si el volumen anual de metros perforados es elevado.

Desde el punto de vista comercial, Tassaroli Chile puede ofrecer reportes de desempeño como servicio, posicionándose como socio técnico. Esto permite competir por valor total y no solo por precio unitario. Además, la evidencia recopilada habilita ofertas segmentadas: recomendar cierto acero/rosca para ciertas rocas, optimizando la selección para el cliente.

La propuesta de valor del SSR se expresa en reducción de costos por tres vías: (i) mayor vida útil promedio (más metros por herramienta), (ii) reducción de variabilidad (menos fallas prematuras), y (iii) reducción de tiempo perdido por detenciones y cambios no planificados. Incluso mejoras conservadoras (5–10%) pueden justificar el esfuerzo de implementación si el volumen anual de metros perforados es elevado.

Desde el punto de vista comercial, Tassaroli Chile puede ofrecer reportes de desempeño como servicio, posicionándose como socio técnico. Esto permite competir por valor total

y no solo por precio unitario. Además, la evidencia recopilada habilita ofertas segmentadas: recomendar cierto acero/rosca para ciertas rocas, optimizando la selección para el cliente.

La propuesta de valor del SSR se expresa en reducción de costos por tres vías: (i) mayor vida útil promedio (más metros por herramienta), (ii) reducción de variabilidad (menos fallas prematuras), y (iii) reducción de tiempo perdido por detenciones y cambios no planificados. Incluso mejoras conservadoras (5–10%) pueden justificar el esfuerzo de implementación si el volumen anual de metros perforados es elevado.

Desde el punto de vista comercial, Tassaroli Chile puede ofrecer reportes de desempeño como servicio, posicionándose como socio técnico. Esto permite competir por valor total y no solo por precio unitario. Además, la evidencia recopilada habilita ofertas segmentadas: recomendar cierto acero/rosca para ciertas rocas, optimizando la selección para el cliente.

La propuesta de valor del SSR se expresa en reducción de costos por tres vías: (i) mayor vida útil promedio (más metros por herramienta), (ii) reducción de variabilidad (menos fallas prematuras), y (iii) reducción de tiempo perdido por detenciones y cambios no planificados. Incluso mejoras conservadoras (5–10%) pueden justificar el esfuerzo de implementación si el volumen anual de metros perforados es elevado.

Desde el punto de vista comercial, Tassaroli Chile puede ofrecer reportes de desempeño como servicio, posicionándose como socio técnico. Esto permite competir por valor total y no solo por precio unitario. Además, la evidencia recopilada habilita ofertas segmentadas: recomendar cierto acero/rosca para ciertas rocas, optimizando la selección para el cliente.

La propuesta de valor del SSR se expresa en reducción de costos por tres vías: (i) mayor vida útil promedio (más metros por herramienta), (ii) reducción de variabilidad (menos fallas prematuras), y (iii) reducción de tiempo perdido por detenciones y cambios no planificados. Incluso mejoras conservadoras (5–10%) pueden justificar el esfuerzo de implementación si el volumen anual de metros perforados es elevado.

Desde el punto de vista comercial, Tassaroli Chile puede ofrecer reportes de desempeño como servicio, posicionándose como socio técnico. Esto permite competir por valor total

y no solo por precio unitario. Además, la evidencia recopilada habilita ofertas segmentadas: recomendar cierto acero/rosca para ciertas rocas, optimizando la selección para el cliente.

V.9 Gestión del cambio y riesgos

El principal riesgo del SSR es la baja calidad de datos por resistencia operacional o carga administrativa. Para mitigarlo, se debe simplificar el registro, automatizar donde sea posible y retroalimentar con resultados visibles (por ejemplo, reportes que muestren mejoras). Otro riesgo es la falta de alineación entre proveedor y cliente: se recomienda acordar KPI y confidencialidad desde el inicio.

La gestión del cambio debe incluir capacitación, responsables por turno, auditorías simples de consistencia y una gobernanza clara del dato. Un enfoque práctico es comenzar con pocos campos obligatorios y, a medida que el sistema madure, aumentar granularidad.

El principal riesgo del SSR es la baja calidad de datos por resistencia operacional o carga administrativa. Para mitigarlo, se debe simplificar el registro, automatizar donde sea posible y retroalimentar con resultados visibles (por ejemplo, reportes que muestren mejoras). Otro riesgo es la falta de alineación entre proveedor y cliente: se recomienda acordar KPI y confidencialidad desde el inicio.

La gestión del cambio debe incluir capacitación, responsables por turno, auditorías simples de consistencia y una gobernanza clara del dato. Un enfoque práctico es comenzar con pocos campos obligatorios y, a medida que el sistema madure, aumentar granularidad.

El principal riesgo del SSR es la baja calidad de datos por resistencia operacional o carga administrativa. Para mitigarlo, se debe simplificar el registro, automatizar donde sea posible y retroalimentar con resultados visibles (por ejemplo, reportes que muestren mejoras). Otro riesgo es la falta de alineación entre proveedor y cliente: se recomienda acordar KPI y confidencialidad desde el inicio.

La gestión del cambio debe incluir capacitación, responsables por turno, auditorías simples de consistencia y una gobernanza clara del dato. Un enfoque práctico es comenzar con pocos campos obligatorios y, a medida que el sistema madure, aumentar granularidad.

El principal riesgo del SSR es la baja calidad de datos por resistencia operacional o carga administrativa. Para mitigarlo, se debe simplificar el registro, automatizar donde sea posible y retroalimentar con resultados visibles (por ejemplo, reportes que muestren mejoras). Otro riesgo es la falta de alineación entre proveedor y cliente: se recomienda acordar KPI y confidencialidad desde el inicio.

La gestión del cambio debe incluir capacitación, responsables por turno, auditorías simples de consistencia y una gobernanza clara del dato. Un enfoque práctico es comenzar con pocos campos obligatorios y, a medida que el sistema madure, aumentar granularidad.

El principal riesgo del SSR es la baja calidad de datos por resistencia operacional o carga administrativa. Para mitigarlo, se debe simplificar el registro, automatizar donde sea posible y retroalimentar con resultados visibles (por ejemplo, reportes que muestren mejoras). Otro riesgo es la falta de alineación entre proveedor y cliente: se recomienda acordar KPI y confidencialidad desde el inicio.

La gestión del cambio debe incluir capacitación, responsables por turno, auditorías simples de consistencia y una gobernanza clara del dato. Un enfoque práctico es comenzar con pocos campos obligatorios y, a medida que el sistema madure, aumentar granularidad.

El principal riesgo del SSR es la baja calidad de datos por resistencia operacional o carga administrativa. Para mitigarlo, se debe simplificar el registro, automatizar donde sea posible y retroalimentar con resultados visibles (por ejemplo, reportes que muestren mejoras). Otro riesgo es la falta de alineación entre proveedor y cliente: se recomienda acordar KPI y confidencialidad desde el inicio.

La gestión del cambio debe incluir capacitación, responsables por turno, auditorías simples de consistencia y una gobernanza clara del dato. Un enfoque práctico es comenzar con pocos campos obligatorios y, a medida que el sistema madure, aumentar granularidad.

VI. CONCLUSIONES

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

El trabajo permitió comprender la relevancia estratégica de la perforación a nivel global y su impacto en productividad y costos en minería y energía. La tendencia hacia yacimientos más complejos y operaciones más intensivas eleva la importancia de gestionar herramientas de perforación con foco en desempeño y costo total de ciclo de vida.

El marco teórico evidenció que la eficiencia de perforación depende de la interacción entre condiciones de roca, parámetros operacionales y propiedades de herramientas. Los aceros de perforación requieren equilibrio entre dureza y tenacidad, y su desempeño se expresa en indicadores medibles como metros por herramienta, costo por metro, variabilidad y tasa de fallas prematuras.

El análisis del caso Tassaroli Chile mostró una oportunidad concreta: implementar un sistema de seguimiento de rendimiento que genere trazabilidad y aprendizaje. La propuesta SSR permite transformar registros dispersos en información útil para decisiones de compra, mejoras metalúrgicas, planificación de inventarios y reducción de detenciones. Asimismo, constituye una estrategia de diferenciación comercial basada en valor y evidencia.

En síntesis, la implementación gradual del SSR comenzando con un piloto, escalando y luego incorporando analítica es factible y alineada con tendencias de digitalización minera. La disponibilidad de datos confiables habilita mejoras sostenidas, aumenta competitividad y contribuye a una operación más eficiente y predecible.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Internacional de Energía – IEA. (2024). World Energy Investment Report. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment>

ASM International. (2024). ASM Handbook: Heat Treatment of Steel. <https://www.asminternational.org/handbook>

Boart Longyear. (2025). Drilling Tools and Rods. <https://www.boartlongyear.com/products/drilling-tools/>

CR Mining. (2024). Types of Drilling in Mining. <https://crmining.com/mining-drill/>

Energía en Minería. (2024). Proceso de perforación en minería. <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/perforacion/>

Epiroc. (2025). Smart drilling and automation solutions. <https://www.epiroc.com/en/products/smart-drilling>

Grand View Research. (2024). Mining Drilling Tools Market Report. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/mining-drilling-tools-market>

Sandvik Mining. (2025). Surface drill rigs. <https://www.mining.sandvik/en/products/equipment/surface-drill-rigs/>

Sandvik Rock Technology. (2025). Digital solutions for drilling. <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/digital-solutions/>

Sernageomin Chile. (2024). Estadísticas y anuarios sectoriales. <https://www.sernageomin.cl/estadisticas/>

Tipos de perforadoras mineras: características y usos – Mansil.cl (explica equipos de perforación en minería de superficie y subterránea). <https://mansil.cl/tipos-de-perforadoras-mineras-tipos-usos-y-funciones/>

Types of Drilling in Mining – CRMining (describe diferentes tipos de perforadoras, incluidos rigs de superficie y subterráneos). <https://crmining.com/mining-drill/>

Surface drill rigs – Sandvik Mining (catálogo y descripción de perforadoras de superficie con imágenes de máquinas reales).

<https://www.mining.sandvik/en/products/equipment/surface-drill-rigs/>

Equipos de perforación frontal (jumbos) – Epiroc (información sobre perforadoras subterráneas tipo jumbo con fotos de equipos). <https://www.epiroc.com/es-cl/products/drill-rigs/face-drill-rigs>

Exploration diamond drilling – Wikipedia (explicación técnica de perforación diamantina y equipamiento). https://en.wikipedia.org/wiki/Exploration_diamond_drilling

Proceso de Perforación en minería a rajo abierto y subterránea – Energía en Minería (describe métodos de perforación y funciones del proceso).

<https://www.energiaenmineria.cl/procesos/perforacion/>