

**DISEÑO Y PERFORACIÓN DE UNA MÁQUINA BOX HOLE PARA EXPLOTACIÓN DE VETAS ANGOSTAS  
A UNA INCLINACIÓN DE 45° - 135°**

CATEGORÍA: Investigación y tecnología Minera

**Carlos Dellepiane Perata**

TUMI Contratistas Mineros S.A.C.

Gerente General

Unidad Inmobiliaria N°1 con frente Av. Paul Poblet S/N – Ex Fundo santa Rosa, Lurín – Lima - Perú

Cel.: 995083184

[cdellepiane@tumirb.com](mailto:cdellepiane@tumirb.com)

Magister en Administración de Empresas, colegiado en Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales, con más de 20 años de amplia experiencia a nivel global (EE.UU, Brasil, México, Chile) liderando diversas unidades de negocio en empresas multinacionales del sector de servicios mineros, interactuando con clientes exigentes, creando valor a largo plazo a través de una asociación estratégica.

**Jorge Ronald Arizaca Paca**

TUMI Contratistas Mineros S.A.C.

Jefe de Producto

Unidad Inmobiliaria N°1 con frente Av. Paul Poblet S/N – Ex Fundo santa Rosa, Lurín – Lima - Perú

Cel.: 964283931

[jarizaca@lurin.tumirb.com](mailto:jarizaca@lurin.tumirb.com)

Profesional con más de 5 años de experiencia en el diseño de maquinaria para minería y naval. Egresado de Ingeniería Naval de la Universidad Nacional de Ingeniería, con un Posgrado en Análisis Estructural utilizando el método de elementos finitos, cursando una Maestría en Ingeniería Mecatrónica en la Pontificia Universidad Católica del Perú. Estudios en gestión de proyectos, análisis de falla de componentes mecánicos, componentes hidráulicos y mantenimiento de equipos industriales.

## RESUMEN

La máquina Box Hole, está diseñada para realizar perforaciones ciegas, positivas y con inclinaciones exigentes, las cuales no son posibles con productos similares en el mercado. Los sistemas de propulsión autónoma y operación están integrados en la misma unidad, lo cual permite un fácil desplazamiento hacia las galerías, también un posicionamiento rápido. Otra de las ventajas importantes es que, no necesita una losa de concreto para el anclaje de la máquina al terreno. El avance teórico de perforación de la máquina Box Hole es de 1 m/h, el avance de perforación obtenido en campo ha sido de hasta de 1.2 m/h, superando en 20% las expectativas de diseño. La máquina Box Hole perforó en la mina NEXA – Vazante, en Brasil, donde el régimen de trabajo es de 4 turnos al día, siete días a la semana. Una operación constante bajo el régimen de la mina en Vazante, puede lograr un total de 200 m perforados en un mes.

El diseño y la fabricación de la máquina Box Hole se han desarrollado íntegramente en Perú. El desarrollo de este proyecto, significó aplicar una ingeniería compleja para el desarrollo de componentes que puedan soportar altas cargas dinámicas y ambientes agresivos. En la fabricación se tuvo que recurrir a procesos por control numérico para garantizar las medidas de diseño.

Un brazo accionado por actuadores hidráulicos permite colocar y retirar las tuberías del cabezal de perforación. Para realizar el acople y desacople de las tuberías, la torre de perforación cuenta con 2 llaves de accionamiento electro-hidráulico. El torque de ajuste de las conexiones roscadas y el torque de operación son generados por un motor hidráulico, el cual permite ajustar la velocidad de rotación de la columna de perforación de acuerdo a las condiciones del terreno. Asimismo, dos cilindros telescópicos proporcionan la fuerza necesaria para realizar el corte de la roca y permiten el desplazamiento del cabezal de perforación.

Sobre la torre de perforación se encuentra instalado un chute (tolva deflectora), el cual protege la máquina del material que se desprende como resultado del corte de la roca, y además permite el paso de los componentes de la columna de perforación. Dos cilindros hidráulicos pueden aproximar el chute a la superficie superior de la galería.

La máquina se opera a través de controles a distancia y cuenta con un sistema de interfaz de usuario HMI (Human – Machine Interface), el cual permite al operador una interacción con el equipo para el control y monitoreo de los parámetros de operación durante el proceso de perforación. De esta forma se obtiene como resultado un proceso preciso y controlado, disminuyendo los problemas de desviación y los riesgos de atrapamiento de la columna de perforación. De igual manera permite un seguimiento del avance de la perforación, adicionalmente, es una herramienta de ayuda al personal de mantenimiento para ejecutar un monitoreo del equipo y, en base a la lectura de ciertos parámetros operativos poder realizar las intervenciones necesarias y oportunas para evitar paradas no programadas.

La máquina Box Hole, hasta la redacción de este trabajo de investigación, ha perforado dos proyectos en la mina Vazante, abriéndose camino a través de una roca que tiene una abundante concentración de hierro, llegando a una compactación de roca de hasta 200 mega Pascales (MPa).

Finalmente, las conclusiones muestran el comparativo entre las expectativas de desempeño en la etapa de diseño y los resultados luego de perforar en una de las minas más exigentes de Brasil cuando de terreno se trata.

**Palabras clave:** Box Hole, avance, detrito, tricono, compactación.

### 1. Introducción

La actividad minera alberga un abanico de procesos para la exploración y explotación de mineral. En dichos procesos participan diferentes tipos de maquinaria especializada para hacer frente a una necesidad específica dentro de la mina. Posiblemente los procesos más conocidos sean el de molienda y el de voladura, sin embargo, previa o posteriormente se requiere de una perforación rotativa para por ejemplo; conectar internamente las galerías de la mina, extraer mineral de vetas angostas o ejecutar un estudio geomecánico del terreno en donde se desea explotar algún mineral.

Los métodos de perforación de terreno mediante rotación por presión o percusión son diversos, dependiendo del proyecto se utilizará maquinaria con capacidad de perforación positiva, negativa o ambas. Los métodos de perforación tradicionales como Raise Boring y Blindhole Boring datan de hace más de 40

años y siguen vigentes hasta la actualidad, gracias a su confiabilidad y simpleza en lo que refiere a sistemas electro-hidráulicos. Si bien la forma de perforar agujeros ciegos no ha cambiado drásticamente, si se vienen realizando grandes esfuerzos por hacer más eficiente y seguro el uso de las máquinas perforadoras Box Hole.

Como respuesta a una necesidad latente en el mercado mundial por la explotación de tajos de producción y vetas angostas, utilizando maquinas compactas y versátiles, es que se desarrollo el diseño de la máquina en mención; una maquina perforadora Box Hole con capacidades de fracturar roca de hasta 200 MPa de compactación, diámetros de 0.76 m, longitudes de hasta 40 m e inclinaciones máximas de 45° hacia izquierda y derecha.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo principal

Diseñar y fabricar una máquina perforadora de slots en sentido positivo, debe ser autopropulsada y autónoma, cuya finalidad es acelerar y mejorar el proceso de producción minera; mitigando y/o eliminando la mayor cantidad de peligros y riesgos a los cuales están expuestos el personal involucrado en la perforación subterránea.

### 2.2. Objetivos específicos

- Recopilar información necesaria sobre perforación positiva, para el desarrollo de nuevas máquinas mediante la mejora continua.
- Comparar los resultados obtenidos en campo con las hipótesis en la etapa de diseño, para validar cálculos, estudios y análisis teóricos.

## 3. Aspectos generales

### 3.1. Perforación Box Hole

La perforación Box Hole consiste en la mecanización de pozos o chimeneas ciegos o entre dos niveles dentro de una mina. Esta técnica de perforación es similar al método Raise Bore, pero la máquina está ubicada debajo de la mineralización y se realiza la perforación hacia arriba. El proceso de perforación Box Hole es una solución mecanizada para la excavación de chimeneas de cara libre, conductos de ventilación y pozos de

comunicación entre niveles y túneles para la extracción del mineral.

### 3.2. Voladuras empleando la perforación Box Hole

Las voladuras subterráneas generalmente tienen un frente de cara libre, ya sea en horizontal para frentes de desarrollo (túnel), o en el techo o piso para la generación de chimeneas slots positivos o negativos. Para ayudar al mecanismo de fracturación de la roca, se busca generar cara libre y esto se consigue perforando taladros de alivio, los cuales son de mayor diámetro que los taladros donde va la carga explosiva, esto se realiza según un diseño determinado de perforación y sincronización de retardos. Sin embargo, la comunicación de taladros, fallas y abras ocasionan la fuga de la energía detonante evitando la efectividad y eficiencia de la voladura, por ello un agujero central grande puede evitar que esto suceda, debido a que habrá dos caras libres contra las que se dispararían, la secuencia del tajo a minar, más si son positivos y en ciego.

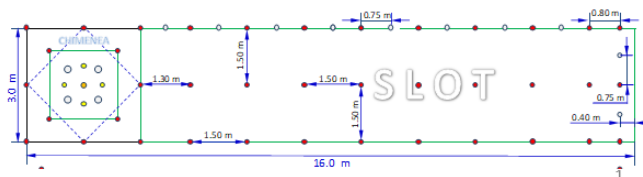


Fig. 01. Vista en planta del diseño de chimenea y slot con voladura

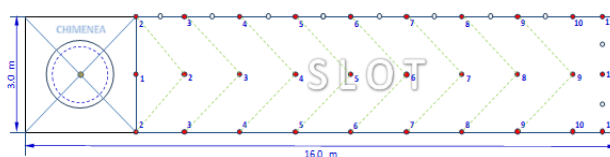


Fig. 02. Vista en planta del diseño de chimenea con box hole y posterior explotación de slot y tajeo con voladura

Si se considera un agujero central de 30" (762mm) de diámetro, realizado mediante la perforación Box-Hole, éste equivaldría alrededor de 16 taladros de 2.5" (65mm) de taladro de alivio, lo que significaría una reducción de taladros entre un 50 - 60% para ejecutar la voladura. Asimismo, al usarse menos explosivos, se afectaría menos la roca circundante, lo que tiene un impacto positivo en el auto soporte y amplitud del radio hidráulico a minar.

#### 4. Diseño

La etapa de diseño inicia con el análisis de los elementos de entrada, requerimientos del cliente y viabilidad del proyecto. Se empieza a gestionar el proyecto y se le asigna recursos para el cumplimiento de hitos y entregables relevantes para lograr la meta final de fabricar la máquina Box Hole y entregarla al cliente para que pueda iniciar su operación.

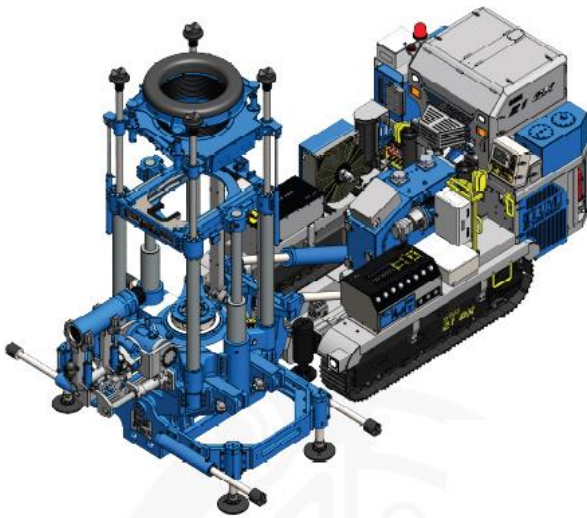


Fig. 03. Máquina Box Hole.

La máquina perforadora comprende dos partes principales, la parte móvil o DRIVE SYSTEM y la torre de perforación o BOX HOLE. El Drive System alberga todos los sistemas que van a alimentar a la Box Hole tanto hidráulica como eléctricamente. Presenta un diseño compacto, ya que es una maquina autopropulsada y el integro de los sistemas necesarios para transporte y perforación forman parte del mismo conjunto.

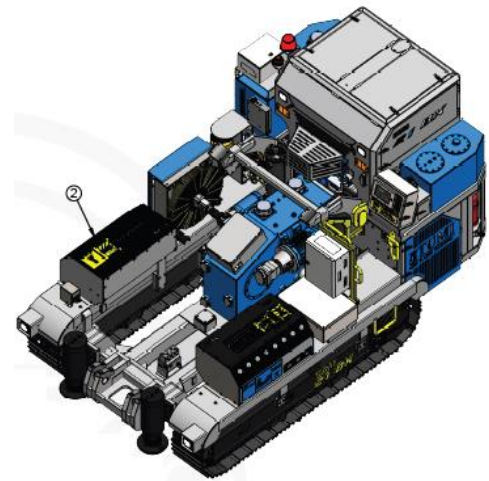


Fig. 04. Drive System

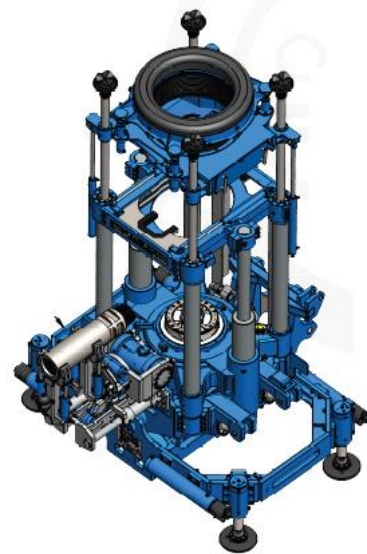


Fig. 05. Box Hole.

La metodología aplicada por nuestra área de Ingeniería ha sido la de la espiral del diseño, en la cual constantemente se debía verificar cada micro etapa. Se sabe que todo tipo de proyecto va mudando de características en el tiempo, obligando a replantear soluciones acordes a los cambios de los datos de entrada.

El punto de inicio para el diseño de la máquina Box Hole, fue las características técnicas con las que debe cumplir para todas las etapas de transporte y operación. Los datos de entrada mas importantes para poder iniciar la etapa de diseño fueron las dimensiones principales, compactación de la roca de los proyectos a perforar y de esta manera se inicio con los primeros cálculos para el dimensionamiento, selección de motores y bombas para cada sistema.

*Tabla 01. Especificaciones técnicas.*

CAPACIDADES		NOMINAL
Range of Capacities	Length	65 ft / 20 m
	Diameter	30 in / 0.76 m

Total Installed Horsepower	100 hp / 75 kW
Reaming Thrust (*)	134,900 lbf / 600 kN
Max. Torque	11,000 lbf-ft / 15 kN-m
Side Dip Angle Adjustment	45° - 135°

WEIGHT AND DIMENSIONS	
Machine Width	118.0 in / 3,000 mm
Machine Height (Transport)	137.0 in / 3,480 mm
Workstation Height	177.0 in / 4,500 mm
Machine Length	272.0 in / 6,900 mm
Weight (**)	61,600 lb / 28,000 kg
Drill Pipe	10 in x 3 ft 254 mm x 0.91 m

CRAWLER SPECIFICATIONS		
Max. Speed	2.0 ft/s / 0.6 m/s	1.4 mph / 2.3 km/h
Diesel Engine Power @ 2500 rpm	138 hp / 103 kW	
Max. Gradient	15°	

El diseño de los sistemas hidráulicos, eléctricos y de control representaron un gran desafío en tiempos de pandemia por el virus de COVID-19, ya que se debía seleccionar componentes con alto grado de eficiencia y que puedan trabajar sin problemas en ambientes agresivos de agua, polvo, grasa y aceites. Además, se debía garantizar que los repuestos no tengan tiempos de entrega muy dilatados para poder dar un servicio de post venta adecuado a nuestro cliente.

Cada sistema debía ser analizado y calculado con minuciosidad, ya que los motores deben entregar la potencia que requieren los actuadores y bombas, incluyendo las pérdidas por calor, fricción. Los sistemas de refrigeración se han diseñado de tal manera que los aceites hidráulicos para transporte y operación se mantienen en una temperatura de operación (menor a los 70°C) todo el tiempo, aunque la máquina opere en climas cálidos o fríos.

El control de los sistemas se realiza mediante dos PLC's (Controlador Lógico Programable), el cual reemplaza a algunos relés y contactores utilizados en máquinas pasadas. El salto tecnológico de la máquina Box Hole fue necesario ya que se debía implementar sistemas de control complejos y sensores, los cuales no existen en máquinas Raise Boring antes fabricadas.

Al incluir un nivel de automatización mas complejo y con una cantidad mayor de variables, se puede brindar más información al operador, como, por ejemplo; presión de rotación, presión de empuje, voltaje y corriente consumidas, revoluciones por minuto del motor hidráulico principal, etc.

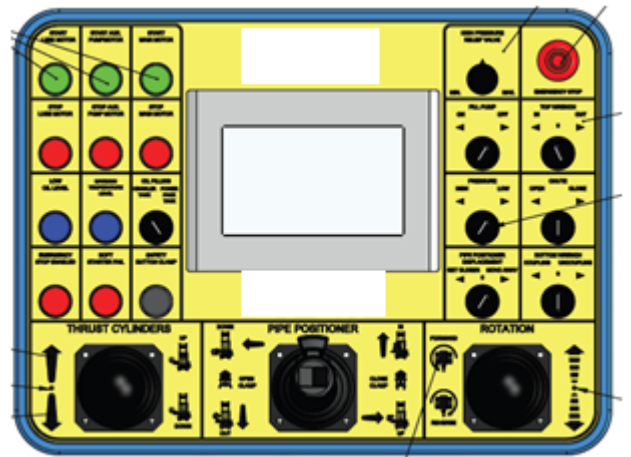


Fig. 06. Consola de control.

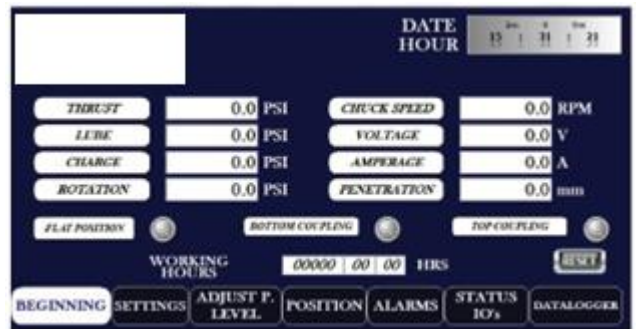


Fig. 07. Pantalla principal de HMI.

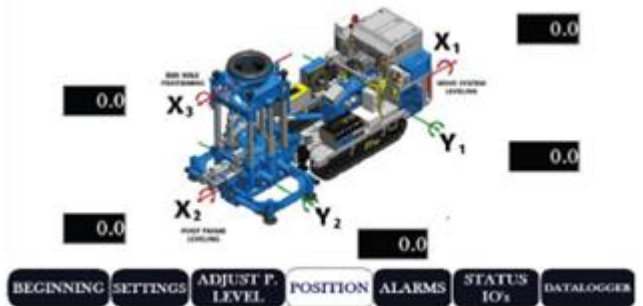


Fig. 08. Pantalla para verificar ángulos de posicionamiento.



El siguiente cálculo, muestra el procedimiento que se realiza para poder dimensionar un cilindro hidráulico, específicamente uno de los cilindros que dan la inclinación a la máquina para que pueda perforar en un rango de 45°-135°. Así como se desarrolla el cálculo para un cilindro hidráulico, se realizan cálculos analíticos y/o mediante software para verificar el diseño teórico y asegurar el buen desempeño de cada uno y todos los componentes que van a ser parte de la máquina Box Hole.

<b>MEMORIA DE CÁLCULO</b>	Versión.01
FORMAT Nº _____	
Project Name: <b>ROTARY CYLINDER</b>	
Formats: .....	
Name: .....	
<b>Data Input.</b>	
(1.0) Material. (A519) (GR-1050)	
$\sigma_F := 344.5 \frac{N}{mm^2} = (4.997 \cdot 10^4) \text{ psi}$	
$\sigma_B := 551.5 \frac{N}{mm^2} = (5.515 \cdot 10^8) \text{ Pa}$	
$\sigma_F$ :	Yields Stress
$\sigma_B$ :	Tensile stress
$L := 14.375 \cdot \text{in}$	; Stroke
$D_i := 6 \cdot \text{in}$	; Internal diameter
$D_e := 7.25 \cdot \text{in}$	; External diameter
$S := \frac{D_e - D_i}{2} = 0.625 \text{ in}$	; Thick
$P_o := 5000 \cdot \text{psi}$	; Working pressure
$P_1 := 15 \cdot \text{psi}$	; External pressure
$k := 1$	
$E := 30 \cdot 10^6 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$	Rod: AISI 1045 $S_y := 45000 \text{ psi}$
$d := 3 \cdot \text{in}$	
$a := 0.375 \text{ in}$	; Thick Welded
$v := 1$	; Static Load Factor
$v_2 := 1$	; Quality Factor of Weld Joint
$FS := 1.25$	; Safety Factor

**Considerations.**

Se usa el metodo de analisis para esfuerzos planos

**Calculations.**

**Allowable stress calculation for the cylinder** ( $\sigma_{ad}$ )

- $\sigma_t$  ; Tangential stress
- $\sigma_r$  ; Radial stress
- $\sigma_z$  ; Longitudinal stress
- $ww$  ; Combined stresses

$$\sigma_t := P_o \cdot \left[ \frac{\left(\frac{D_e}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_i}{2}\right)^2}{\left(\frac{D_e}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_i}{2}\right)^2} - 2 \cdot \left(\frac{D_e}{2}\right) \cdot \frac{P_1}{P_o} \right] = [1.837 \cdot 10^8] \text{ Pa}$$

$$\sigma_r := -P_o = -5 \cdot 10^3 \text{ psi} \quad \sigma_z := P_o \cdot \left( \frac{D_i^2}{D_e^2 - D_i^2} \right) = (1.087 \cdot 10^4) \text{ psi}$$

$$ww := \frac{\sqrt{((\sigma_z - \sigma_t)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_z + \sigma_r)^2)}}{\sqrt{2}} = [2.74 \cdot 10^4] \text{ psi}$$

**Analysis of stress in the plane**

$S_T$  ;  $S_{VM}$  Safety factor

Tresca

Von Mises

$$\sigma_{adt} := |\sigma_t| + |\sigma_r| = (3.164 \cdot 10^4) \text{ psi}$$

$$\sigma_{adv} := \sqrt{\sigma_t^2 - \sigma_t \cdot \sigma_r + \sigma_r^2} = [2.946 \cdot 10^4] \text{ psi}$$

$$S_T := \frac{\sigma_F}{\sigma_{adt}} = 1.579$$

$$S_{VM} := \frac{\sigma_F}{\sigma_{adv}} = [1.696]$$

**Rod buckling analysis**

$$I := \pi \cdot \frac{d^4}{64} \quad I = 3.976 \text{ in}^4 \quad ; \quad A := \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad A = 7.069 \text{ in}^2$$

$$r := \sqrt{\frac{I}{A}} \quad r = 0.75 \text{ in}$$

**Buckling Length**

$$L_p := L \cdot k \quad L_p = 14.375 \text{ in}$$

$$\frac{L_p}{r} = 19.167$$

$$C_c := \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{S_y}} = 114.715$$

if  $\left(\frac{L_p}{r} \leq C_c, \text{"Short Column"}, \text{"Large Column"}\right) = \text{"Short Column"}$

Buckling Force

If  $\frac{L_p}{r} \leq C_c$  Short Column

$$F_{Ps} := A \cdot S_y - \frac{A \cdot (S_y)^2 \cdot \left(\frac{L_p}{r}\right)^2}{4 \pi^2 \cdot E} = (3.136 \cdot 10^5) \text{ lbf}$$

If  $\frac{L_p}{r} \geq C_c$  Large Column

$$F_{Pl} := \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I}{L_p^2} = (5.697 \cdot 10^6) \text{ lbf}$$

Force in rod

$$F_v := P_o \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} = (3.534 \cdot 10^4) \text{ lbf}$$

**Results.**

$$S_{bs} := \frac{F_{Ps}}{F_v} = 8.874 \quad (\text{Buckling safety factor}) \quad \text{Short Column}$$

$$S_{bl} := \frac{F_{Pl}}{F_v} = 161.197 \quad (\text{Buckling safety factor}) \quad \text{Large Column}$$

**Calculation of stress in welded joint.**

**Static equivalent efforts.**

$$A_e := \pi \cdot \frac{D_i^2}{4}$$

$$A_n := \pi \cdot \frac{D_o^2 - (D_c - a)^2}{4} = 4.16 \text{ in}^2$$

$$F_n := P_o \cdot A_e = (6.289 \cdot 10^5) \text{ N}$$

$$n := \frac{F_n}{A_n} = (2.343 \cdot 10^8) \text{ Pa}$$

(1.)  $\sigma_{eq} := \sqrt{n^2}$  HCVE  
 $\sigma_{eq} = (2.343 \cdot 10^8) \text{ Pa}$

(2.)  $\sigma_{eq1} := 0.5 n + 0.5 \sqrt{n^2}$  TMEN  
 $\sigma_{eq1} = (2.343 \cdot 10^8) \text{ Pa}$

$$\sigma_{adm} := \frac{(v \cdot v_2 \cdot \sigma_F)}{FS} = (2.756 \cdot 10^8) \text{ Pa}$$

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$$

**Results.**

$S_T$	;	$S_{VM}$	$P_i$	Pipe Safety factor
<i>Tresca</i>				<i>Von_Mises</i>
$S_T := \frac{\sigma_F}{\sigma_{adm}} = 1.579$		$S_{VM} := \frac{\sigma_F}{\sigma_{adv}} = [1.696]$		(Pipe Stress Safety Factor)
if ( $\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$ , "ok", "inspected") = "ok"				(Welded Joint)

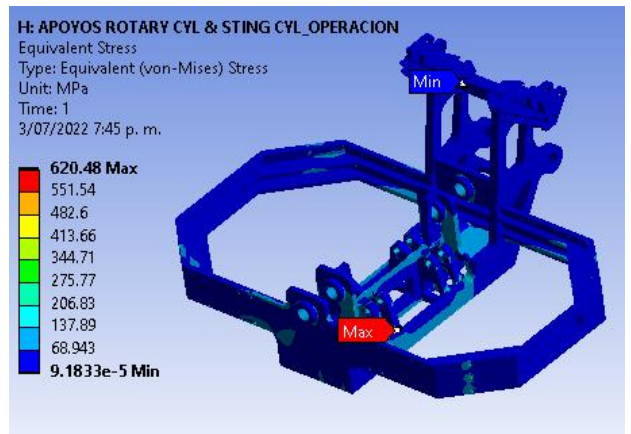


Fig. 09. Mapa de esfuerzos en el bastidor.

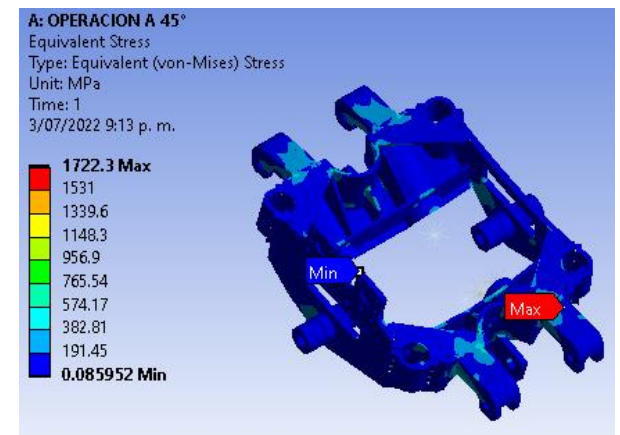


Fig. 10. Mapa de esfuerzos en estructura pivotante.

El diseño mecánico de la máquina Box Hole es único, versátil, simple y funcional. No existe una máquina de otro fabricante en el mundo que pueda asegurar una perforación inclinada en el rango de 45° - 135°. Se diseñaron piezas nada comunes en el ámbito de la perforación ascendente, cada pieza debía ser lo mas pequeña y ligera posible, al mismo tiempo que tenía que poseer una resistencia mecánica por encima de componentes convencionales. Una herramienta muy usada en esta etapa fue la de optimización topología, también se han realizado análisis modales para hallar las frecuencias naturales de las piezas y que estas no fallen por resonancia.

Los softwares de simulación mediante el método de elementos finitos han sido necesarios para aquellas piezas complejas cuyo análisis por métodos analíticos no alcanzan para obtener resultados aceptables. Mediante este método es que se realizaron análisis estáticos y dinámicos que representen la física y las condiciones reales a las cuales los componentes estarán expuestos. También los análisis de fatiga fueron necesarios para evaluar el fallo prematuro por cargas fluctuantes tanto en transporte como en operación.

La máquina Box Hole tiene un brazo posicionador de tuberías, el cual esta fijado a la máquina. La máquina Box Hole no necesita de una logistica adicional para insertar las tuberías de perforación. El accionamiento de los cilindros y actuadores se realiza mediante electroválvulas.

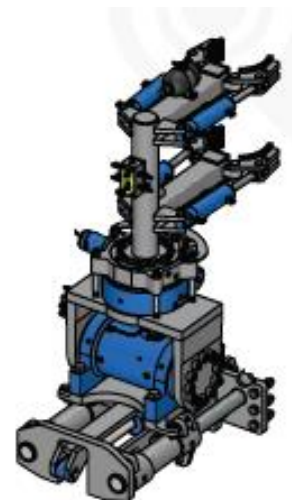


Fig. 11. Brazo posicionador.

La rotación de las tuberías para la perforación se logra mediante un sistema de piezas dentadas que

transmiten el torque del motor hidráulico hacia la conexión roscada de las tuberías. Esta caja fluctuante es el corazón de la máquina Box Hole.

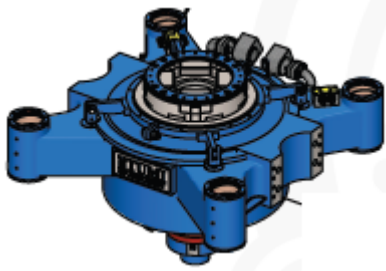


Fig. 12. Caja Fluctuante.

La evacuación del detrito se encamina a través de un chute que tiene la posibilidad de apertura y cierre mediante cilindros hidráulicos según se necesite, su función también es la de proteger la caída de contaminación sobre la caja fluctuante.



Fig. 13. Chute.

El diseño de la maquina Box Hole cumple con dimensiones compactas para poder acceder fácilmente a galerías reducidas. El perfil de transporte y de operación ayudan a realizar maniobras en espacios limitados al interior de la mina.

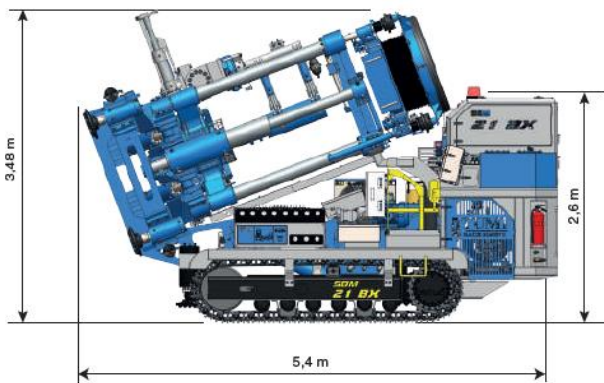


Fig. 14. Vista lateral en modo transporte.

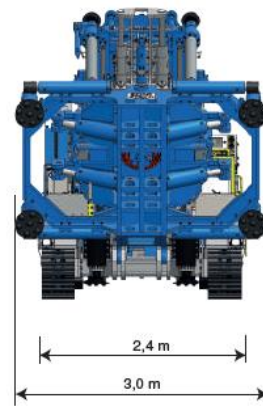


Fig. 15. Vista frontal en modo transporte.

En posición de operación, la máquina Box Hole puede perforar en el rango de 45° - 135° y solo necesita un ancho de galería de 4.5 m.

Las dimensiones compactas de la máquina Box Hole representan una reducción de recursos en apertura de galería, es decir, se necesita remover y/o desquincar menos cantidad de terreno para que la máquina en mención pueda posicionarse.

Dependiendo del ángulo de perforación, las dimensiones de la galería pueden variar un poco, el caso mas extremo es para cuando el ángulo es de 45°.

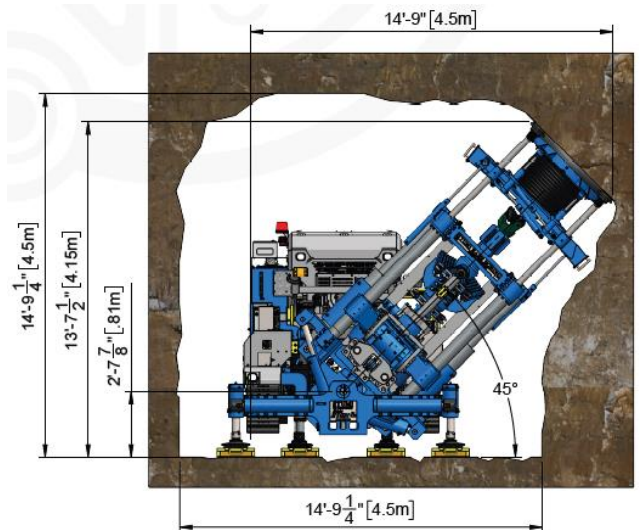


Fig. 16. Vista frontal en modo de operación.

La máquina Box Hole se puede transportar debido a que tiene un motor de combustión Diesel que impulsa un circuito oleo hidráulico para entregar torque y potencia a las orugas transportadoras. Debido al diseño en transporte utilizando orugas es que no se necesita que la máquina sea articulada y el radio de giro para maniobras es equivalente a su longitud.



Las maniobras para transporte se realizan mediante un control remoto a distancia. El operario puede controlar el desplazamiento a una distancia nominal de 10 m sin que se pierda la conexión. También hay un sistema redundante para el transporte, instalado en la propia máquina para casos de emergencia.

La misma lógica de control a distancia para el transporte se ha replicado para la etapa de posicionamiento en la galería de trabajo. Si bien existen sistemas redundantes manuales instalados en la propia máquina para todas las acciones que se requiera ejecutar, los controles a distancia resultan de gran ayuda para que el operador no este expuesto a peligros y riesgos propios del transporte o del posicionamiento.



Fig. 17. Control para transporte y operación.

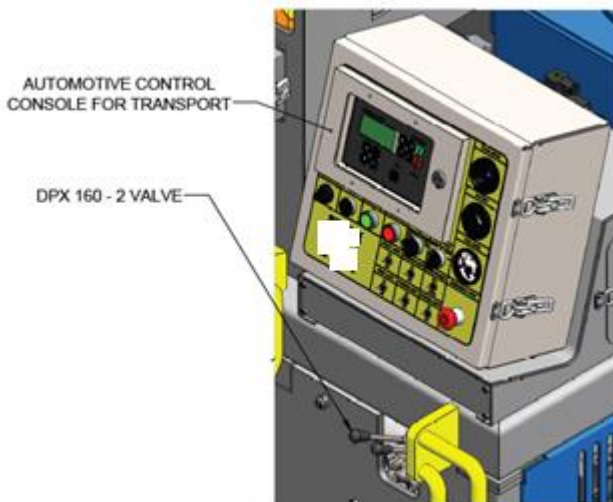


Fig. 18. Sistema de accionamiento mecánico para transporte.



Fig. 19. Control para posicionamiento.



Fig. 20. Sistema de accionamiento mecánico para posicionamiento.

## 5. Seguridad operacional

La implementación de diferentes sistemas de control, sensores, consolas de control, hacen que la máquina Box Hole cumpla con la finalidad de mantener alejado al operador de las zonas de peligro inminente, ya sean en transporte como en operación, el operador puede manipular los controles con poco entrenamiento gracias a la simpleza y minimalismo de los controles. También están instalados luces y cámaras que ayudan a una mejor visibilidad sobre todo al momento de perforar.

El operador no interactúa directamente con la máquina en los procesos de; carga y descarga de tuberías, roscado de tuberías, acople de llaves inferior y

superior para torque o destorque de tuberías, posicionamiento, etc.

En transporte, el operario debe mantenerse fuera de un rango de 2m de distancia al perímetro de la máquina.

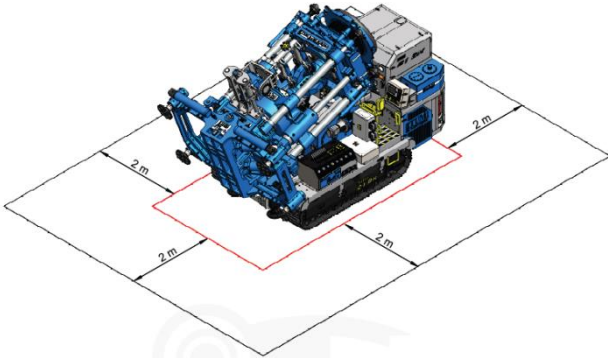


Fig. 21. Zonas de riesgo en transporte.

Durante la perforación, el operario puede realizar todas sus tareas desde una zona alejada de la máquina.

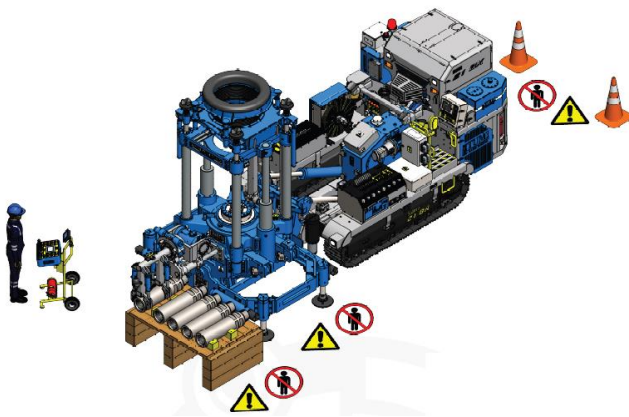


Fig. 22. Zonas de riesgo en operación.

El posicionamiento fue de forma mecánica, sin embargo, no tomó mucho tiempo, luego se procedió a la instalación de la línea de agua para perforación y para refrigeración del sistema hidráulico, también se realizaron las conexiones con el tablero eléctrico de la mina en poco tiempo.

Tabla 02. Características del primero proyecto.

PROYECTO 1	
Longitud de perforación	12 m
Angulo de inclinación	84°
Distancia de traslado	6 km
Dureza de roca	200 MPa



Fig. 23. Máquina Box Hole en primer proyecto.

## 6. Puesta en marcha y perforación

En el mes de marzo del presente año, la máquina Box Hole se internó en la mina Vazante del grupo NEXA en Brasil, para iniciar perforaciones de slots o chimeneas ciegas ascendentes.

El primer proyecto fue a muy poca inclinación, sin embargo, en estas condiciones en donde existe mayor riesgo de contaminación de la caja fluctuante, además de posibles daños en los vástagos de los cilindros hidráulicos.

Luego de insertada la broca Tricónica y el Hole Opener en el terreno, se procedió a insertar un estabilizador y tuberías para la perforación hasta el término del proyecto, con una media de RPM de 25.



Fig. 24. Perforación del primer proyecto.

Finalizada la perforación del primero proyecto, se procedió con la descarga de tuberías, sin encontrar tuberías que se hayan sobre torqueado entre sí. Debido a la contaminación excesiva de detrito, se halló algunas roscas deterioradas, y la conexión roscada de la caja fluctuante también sufrió pequeños desprendimientos de material, sin comprometer el buen funcionamiento del equipo.

La falta de experiencia del personal operativo en la limpieza adecuada de las roscas y el engrase adecuado en las mismas contribuyeron a daños menores en las roscas.

También se procedió a inspeccionar los cortadores de la broca Tricónica y del Hole Opener, encontrando a todos los componentes en muy buen estado.



Fig. 25. Estado de los cortadores del Hole Opener luego del primer proyecto.



Fig. 26. Estado de los cortadores del tricono luego del primer proyecto.

Luego de la inspección de las roscas, se procedió a trasladar la maquina hacia su segundo proyecto, también dentro de la mina Vazante, a un nivel inferior respecto al primer proyecto, en donde el tiempo para el posicionamiento fue mucho mayor que el primer proyecto.

El segundo proyecto fue la prueba mas dura para la maquina Box Hole, ya que es la condición mas critica de diseño en donde se deben utilizar mas cilindros para el anclaje y las fuerzas radiales sobre la estructura y cilindros son más agresivas.

El control del inicio de perforación fue mas complicado, ya que la inclinación de 46° junto con la gravedad empujan hacia abajo la columna de perforación, por esta razón se tuvo que iniciar con muy bajas RPM, en el rango de 6 – 10.

Tabla 03. Características del segundo proyecto.

PROYECTO 2	
Longitud de perforación	24 m
Angulo de inclinación	46°
Distancia de traslado	2 km
Dureza de roca	200 MPa





*Fig. 27. Máquina Box hole en el segundo proyecto.*

El descargo de tuberías significó un reto adicional, ya que se deben calibrar muy bien todos los topes del brazo posicionador y las llaves hidráulicas para destorquetar deben estar muy bien alineadas a las tuberías.

Debido a que el terreno no estaba perfilado para que los cuatro cilindros superiores anclen correctamente, hubo vibraciones en niveles por encima de lo esperado, lo cual por momentos causó el desalineamiento del eje de perforación, lo cual fue corregido en la medida que se avanzaba con la perforación.

El posicionamiento inicial de la máquina tampoco fue tan acertado, lo cual también contribuyó a que la perforación no siga la trayectoria planeada.



*Fig. 28. Perforación del segundo proyecto.*

## 7. Resultados

El tiempo de perforación por tubería, ha variado desde 45 minutos en el primer proyecto hasta 80 minutos en el segundo proyecto, debido a fracturas y dureza variable del terreno. Sin embargo, se ha logrado superar el avance teórico esperado de 1 m/h.

La máquina Box Hole tuvo el rendimiento esperado en las etapas de transporte, pudiendo sobrepasar obstáculos de terreno irregular dentro de la mina sin inconvenientes.



*Fig. 29. Máquina Box Hole en camino a interior mina.*

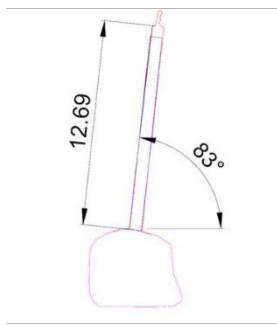
La forma del detrito resultante del corte de la roca, tanto en el primer como en el segundo proyecto fue de geometría correcta, es decir, la roca cortada por la máquina Box Hole tenía la forma de palleares pequeños y aplanados.



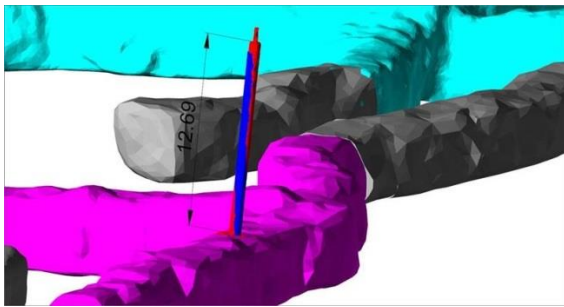
*Fig. 30. Detrito resultante de la perforación.*



El escaneo que realizo NEXA del primero proyecto, muestra una desviación de 0%.

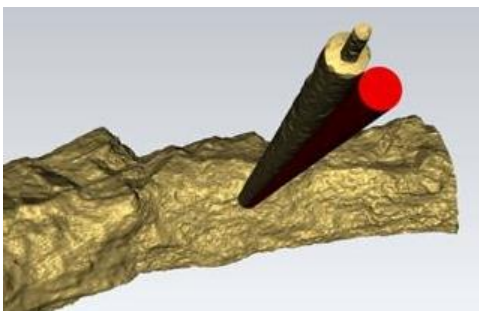


*Fig. 31. Vista frontal del escaneo del primero proyecto.*



*Fig. 32. Vista 3D del escaneo del primer proyecto.*

El escaneo que realizo NEXA del segundo proyecto muestra una desviación producto del deficiente posicionamiento inicial, sin embargo y para fines de voladura, el agujero perforado es totalmente aceptable por la mina. En las imágenes 32 y 33, el cilindro de color rojo representa el agujero planeado y el de color azul o marrón el agujero ejecutado respectivamente.



*Fig. 33. Vista 3D del escaneo del segundo proyecto.*



*Fig. 34. Perfil de agujeros perforados.*

## 8. Conclusiones

- La máquina Box Hole cumple con el avance teórico de 1 m/h. Con lo cual, se concluye que, el diseño y arreglo de tricono – Hole Opener son los correctos.
- El posicionamiento de la máquina ha resultado ser mas complicado de lo esperado, es por esta razón que actualmente se están instalando lasers que ayudaran al posicionamiento rápido para cualquier ángulo de perforación.
- El perfil resultante de los agujeros perforados, junto con la geometría correcta del detrito, indican que se ha aplicado de forma correcta las presiones de empuje y rotación, además de las RPM en todas las etapas de la perforación en ambos proyectos.
- El entrenamiento operacional es de vital importancia antes de iniciar la perforación, ya que la omisión de procedimientos correctos desemboca en la falla prematura de algunos componentes críticos.
- La máquina Box Hole cumple con los requerimientos de perforación, siendo una alternativa altamente productiva respecto a otros métodos de perforación ascendente.

## **Agradecimientos**

Agradecemos a todo el personal que participó en el diseño y fabricación de la máquina Box Hole, porque con el trabajo en equipo se pudo cumplir con un reto gigantesco al diseñar y fabricar en el periodo de un año una máquina única y que ha demostrado un buen rendimiento.

Agradecemos a la unidad minera Vazante, del grupo NEXA en Brasil, por todo el apoyo constante durante todas las etapas de operación de la máquina Box Hole, en especial a los equipos de Operaciones y Mantenimiento, quienes en conjunto nos han facilitado todos los recursos para poder trabajar en armonía.

## **Referencias Bibliográficas**

- W. J. WAN DEN BERG, J. G. TAYLOR, "Trials on blindhole boring in South African gold mines", feb. 1978.
- LÓPEZ, C., LÓPEZ, E. & AYALA, F. J. (1995). Drilling and blasting of rocks. Taylor & Francis.
- MARJORIBANKS, R. (2010). Geological Methods in Mineral Exploration and Mining 2sd edition, Springer.
- SANDVIK TAMROCK CORP. (1999) Rock excavation handbook.
- UNIVERSITY OF ARIZONA. Mining and Geological Engineering (2003). Rock excavation.