



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“CONTROL DE LA TRAYECTORIA DE TALADROS
VARIANDO TIPO DE BROCA Y PARÁMETROS DE
PERFORACIÓN CON SISTEMA DIAMANTINA”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Víctor Hugo Mantilla Tafur

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo Alvarez León

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

A mi madre que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mi esposa que siempre ha estado junto a mí brindándome su apoyo incondicional en mi vida, y por la cual estoy dispuesto a enfrentar todo y en todo momento.

Al hombre que me dio la vida, el cual, a pesar de haberlo perdido a muy temprana edad, ha estado siempre cuidándome y guiándome desde el cielo.

A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo en todo momento y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTO

Al creador de todas las cosas, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando estado a punto de caer, por ello con todo el amor que puede emanar de mi corazón le dedico primeramente mi tesis a Dios y a mi amada familia por estar siempre presente.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Realidad problemática.....	8
1.2. Formulación del problema	39
1.3. Objetivos	40
1.4. Hipótesis.....	40
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	42
2.1. Tipo de investigación	42
2.2. Población y muestra	42
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	42
2.4. Procedimiento	43
CAPÍTULO III. RESULTADOS	44
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS.....	61
ANEXOS.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diametros estandar de perforación en minería.....	18
Tabla 2. Tamaños usados en el Sistema Wireline (por cable).....	21
Tabla 3. Tabla de selección de brocas	21
Tabla 4. Parametros operacionales con perforación diamantina	28
Tabla 5. Cuadro resumen del sondaje Yoni 244 con broca tipo 2-4	45
Tabla 6. Cuadro resumen del sondaje Yoni 245 con broca tipo 4-7	46
Tabla 7. Cuadro de Resumen de los parámetros de perforación en la inclinación del sondaje Yoni 244.....	47
Tabla 8. Regresión y correlación de la inclinación del sondaje Yoni 244 variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM) y el pulldown (psi)	48
Tabla 9. Cuadro resumen de los parámetros de perforación en la inclinación del sondaje Yoni 245	49
Tabla 10. Regresión y correlación de la inclinación del sondaje Yoni 245 variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM) y el pulldown (psi)	50
Tabla 11. Cuadro resumen de los parámetros de perforación en el azimut del sondaje Yoni 244	51
Tabla 12. Regresión y correlación del azimut del sondaje Yoni 244 variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM) y el pulldown (psi)	52
Tabla 13. Cuadro resumen de los parámetros de perforación en el azimut del sondaje Yoni 245	53
Tabla 14. Regresión y correlación del azimut del sondaje Yoni 245 variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM) y el pulldown (psi)	54
Tabla 15. Resumen de medidas estadísticas de la inclinación y azimut variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM), caudal de fluido (gal/min) y pulldown (psi).....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) barras de pared doble para circulación reversa. b) esquema de circulación del fluido (aire o agua) en sistemas de circulación normal y reversa (con tricono).....	9
Figura 2. Distintos tipos de broca para martillos de fondo.....	10
Figura 3. Roto-percusión con martillo en fondo	11
Figura 4. Esquema general del conjunto de martillo en fondo con la broca.	12
Figura 5. Broca de martillo de fondo con carga frontal (orificios). Notar los “botones” que constituyen la herramienta que desmenuza la roca por golpe y rotación.	13
Figura 6. Martillos de fondo con toma de muestras lateral y frontal.....	13
Figura 7. Máquina de perforación por circulación reversa montada sobre orugas.....	14
Figura 8. Triconos	15
Figura 9. Coronas de impregnación e inserción	19
Figura 10. Coronas con diamantes en superficie (SS) y con diamantes impregnados (Series) y su utilización más común en distintos tipos de roca.....	20
Figura 11. Coronas de impregnación. a) nueva. b) desgaste normal con pocos metros de uso (frente plano). c) desgastada en forma normal. d) Desgaste incorrecto, cóncavo hacia la parte interna. e) Desgaste incorrecto, cóncavo hacia la parte externa. f) Corona fundi	20
Figura 12. Escariador.....	22
Figura 13. Zapata y escariador	23
Figura 14. Cabezal y tubo interior o saca testigos	24
Figura 15. Parte superior del cabezal al que va enroscado el tubo saca testigos (tubo interior)	24
Figura 16. Esquema (no a escala) del barril armado con escariador y corona (en el fondo del sondeo) y conectado por medio de las barras al sistema de rotación y circulación de la inyección. Se trata sólo de un esquema ya que el barril, según las marcas, consta de.....	25
Figura 17. Deflexión de taladros desviados.....	34
Figura 18. Pozo citado en Oklahoma.	36
Figura 19. Medición que expresa la trayectoria e inclinación de un sondaje	39
Figura 20. Medición que expresa los resultados de carga puntual del macizo rocoso de los proyectos Yoni 244 y Yoni 245.....	44

RESUMEN

La presente investigación específica el Control de la trayectoria de taladros variando tipo de broca y parámetros de perforación con sistema diamantina. La medición de sondajes, tiene por finalidad lograr establecer el inicio y fin de la trayectoria del taladro perforado. Partiendo de la premisa real de que todos los taladros se desvían, es muy importante verificar la desviación e inclinación del taladro, esto nos permite saber un punto de origen (coordenada inicial) hasta llegar al fondo del taladro con un punto final (coordenada final).

Los objetivos específicos de la investigación fueron: evaluar la trayectoria del taladro variando el tipo de broca, determinar la influencia de los parámetros de operación en la inclinación (dip) del taladro, determinar la influencia de los parámetros de operación en el azimut del taladro, y evaluar los resultados de la influencia del tipo de broca y los parámetros de perforación en la trayectoria del taladro. Dentro de estos parámetros operacionales está: profundidad del taladro (m), velocidad de rotación (RPM), caudal del fluido (gal/min) y pulldown. La muestra en estudio fueron dos sondajes diamantinos del proyecto minero Yoni, de una campaña de 2000 m de perforación en una Empresa Minera de Cajamarca.

Las perforaciones diamantinas realizadas en estos dos sondajes mostraron de manera real que la variación de estos parámetros de perforación tiene relación directa con el control de la trayectoria (inclinación y azimut), evidenciadas en los resultados de las mediciones según el reporte de avance diario de perforación, y los datos estadísticos encontrados en el análisis. Se concluye que al evaluar los resultados de la influencia del tipo de broca y los parámetros de perforación en la trayectoria del taladro, se evidencia que existe una contribución significativa conjunta de las variables independientes sobre la dependiente lo que queda en evidencia con el valor de p value menor a $\alpha=0.05$.

Palabras clave: Taladro, sondaje, diamantina, parámetro, inclinación, azimut.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La prospección minera, exige un estudio ajustado y detallado de las características naturales de la superficie y de sus diferencias. El encontrar afloramientos de minerales encajados en rocas, detectar cantos rodados y gravas en depósitos aluviales o buscar oro en las corrientes de los ríos, son ejemplos de estas formas de explorar en las que el éxito dependía antiguamente del azar. Sin embargo, estas técnicas un tanto visuales y con frecuencia netamente locales, rara vez permitían descubrir yacimientos profundos totalmente recubiertos. Para localizar éstos es necesario generalmente, aplicar primero métodos geofísicos y efectuar después, sondeos de exploración e investigación (Lambert A., 2010).

Los sondeos son perforaciones que tienen como objetivo la investigación del subsuelo y la toma de muestras. Estas pueden alcanzar profundidades desde algunas decenas hasta algunas centenas de metros (normalmente entre 50 y 400 m) y ocasionalmente 500 a 1000 metros.

De acuerdo a como circula la inyección (aire, agua o agua con aditivos) en la perforación, existen dos sistemas:

De circulación normal

Sucede cuando la inyección desciende por el interior de la tubería y asciende arrastrando el cutting, entre la tubería y el espacio que queda con la pared del pozo.

De circulación reversa

En la circulación reversa (RC: “reverse circulation”) la tubería (barras) es de doble pared y por lo tanto la inyección desciende por el espacio anular entre esas dos paredes y asciende por el interior de la tubería (Figura 1).

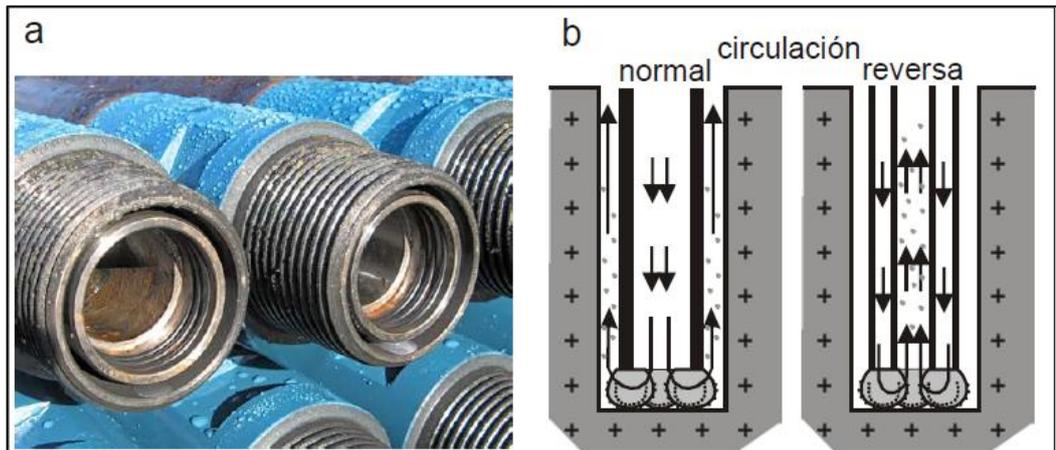


Figura 1. a) barras de pared doble para circulación reversa. b) esquema de circulación del fluido (aire o agua) en sistemas de circulación normal y reversa (con tricono)

Fuente: Fernández R., 2015

Hay un gran número de técnicas de perforación y los métodos más empleados son las perforaciones roto-percusivas y las perforaciones rotativas. En las perforaciones roto-percusivas y de trituración por tricono que se realizan en minería, se utiliza el sistema de circulación reversa para evitar la contaminación de las muestras. La diamantina (DDH: “diamond drill hole”) es por circulación normal, pero el contacto de la inyección con el testigo es mínimo o nulo. La elección del método de perforación requiere siempre llegar a un compromiso entre velocidad, costo y cantidad y calidad de la muestra a recuperar, además de aspectos logísticos y medioambientales. (Fernández R., 2015).

PERFORACIONES ROTO-PERCUSIVAS

Los dos sistemas más importantes de perforaciones roto-percusivas son con “martillo en cabeza” y con “martillo de fondo” (“down the hole”) y se utilizan tanto en sondeos como en barrenos. (Fernández R., 2015).

La herramienta cortante es de una aleación de metal duro con insertos de carburo de tungsteno (widia) de distintas formas y dimensiones denominada broca (Figura 2), que es la encargada de triturar la roca por medio de un doble efecto, el golpeteo sobre la roca y el giro (alrededor de 6° con cada golpe) para que cada inserto no vuelva a golpear sobre el mismo lugar. Debido a que esta abrasión produce polvo y trozos de roca, es necesaria una buena limpieza del fondo del pozo para que esa herramienta no trabaje sobre material ya roto y se desgaste sin producir un avance sobre la roca. (Fernández R., 2015).

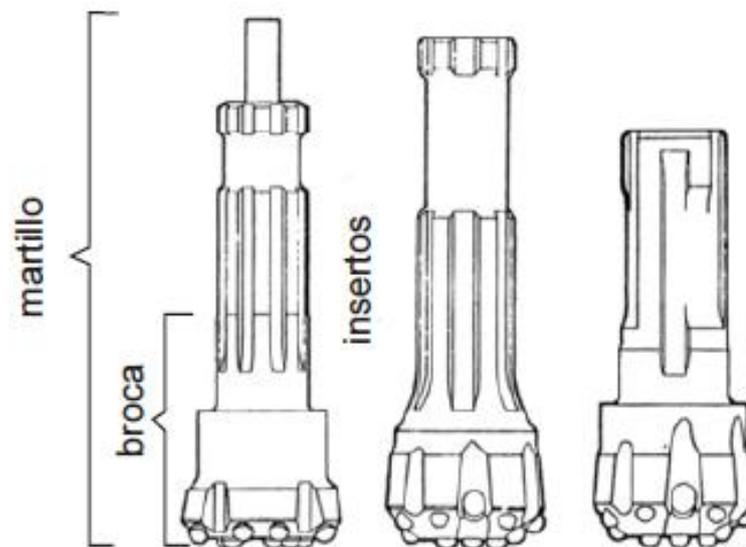


Figura 2. Distintos tipos de broca para martillos de fondo
Fuente: Fernández R., 2015

Martillo en cabeza

Tanto el elemento de percusión (martillo) como el sistema de rotación están en la perforadora, fuera del pozo. El martillo golpea las barras de perforación y esta energía de choque se transmite a la broca (o herramienta perforante) que está en el fondo; el impacto se va amortiguando cada vez más según el aumento de la longitud del tren de barras. En general parte de la energía se disipa a través de las barras de sondeo y muchas veces daña las roscas y cuplas. Este efecto suele producir además, desviaciones de la perforación. Se utiliza mayormente en barrenos. (Fernández R., 2015).

Martillo de fondo

El elemento de percusión se encuentra en el fondo del sondeo o barreno (Figura 3) y el de rotación, como en el caso anterior, fuera de él. El efecto de percusión se produce a través de aire comprimido (a veces agua) que se inyecta a través de las barras de perforación.

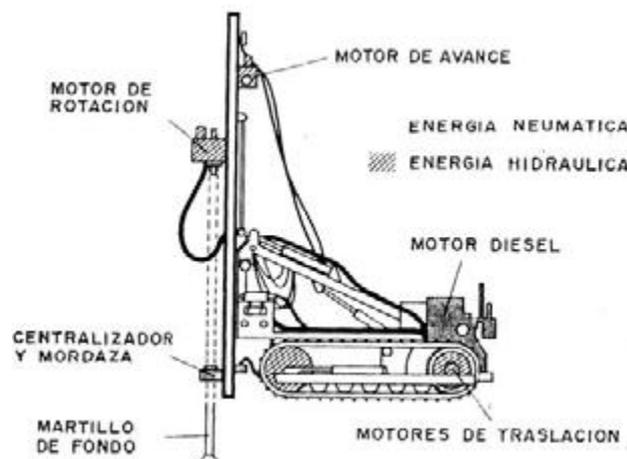


Figura 3. Roto-percusión con martillo en fondo
Fuente: Fernández R., 2015

El aire comprimido llega al martillo que consiste en un pistón sobre el que se produce un movimiento ascendente-descendente de la broca (Figura 4) y además un movimiento de rotación. De esta forma la energía se transmite directamente al martillo y al elemento desmenuzante en un corto trecho, sin disipación. Además del ahorro de energía se tiene la ventaja que no se producen deformaciones en el tren de barras, sólo hay pequeñas desviaciones del pozo y disminuyen los ruidos molestos para los perforistas. Un inconveniente del martillo de fondo, por la relación diámetro/carrera del pistón, es que necesita trabajar en diámetros grandes (mayor de 3 pulgadas). Se utilizan tanto en barrenos como en sondeos; en estos últimos no suelen usarse para profundidades mayores a 400 metros. (Fernández R., 2015).

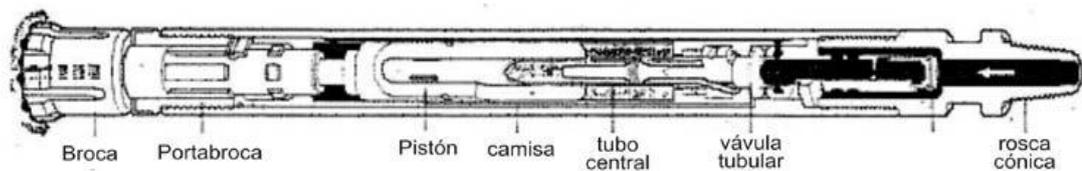


Figura 4. Esquema general del conjunto de martillo en fondo con la broca.
Fuente: Fernández R., 2015

La resistencia de las brocas (bits) al desgaste, es mayor que la de los triconos, aunque sus costos son más elevados (~40 % superiores). De acuerdo a la forma de entrada de los detritos (cutting) en la tubería se distinguen los martillos de fondo con toma de muestra lateral y frontal. En el primero la muestra entra por arriba del martillo, lo cual implica un grado de contaminación, aunque localizado. Los martillos de muestreo frontal tienen dos boquillas frontales donde la muestra se recupera inmediatamente después de romperla, evitando la contaminación y dando un tamaño mayor de fragmentos (Figuras 5 y 6).



Figura 5. Broca de martillo de fondo con carga frontal (orificios). Notar los “botones” que constituyen la herramienta que desmenuza la roca por golpe y rotación

Fuente: Fernández R., 2015

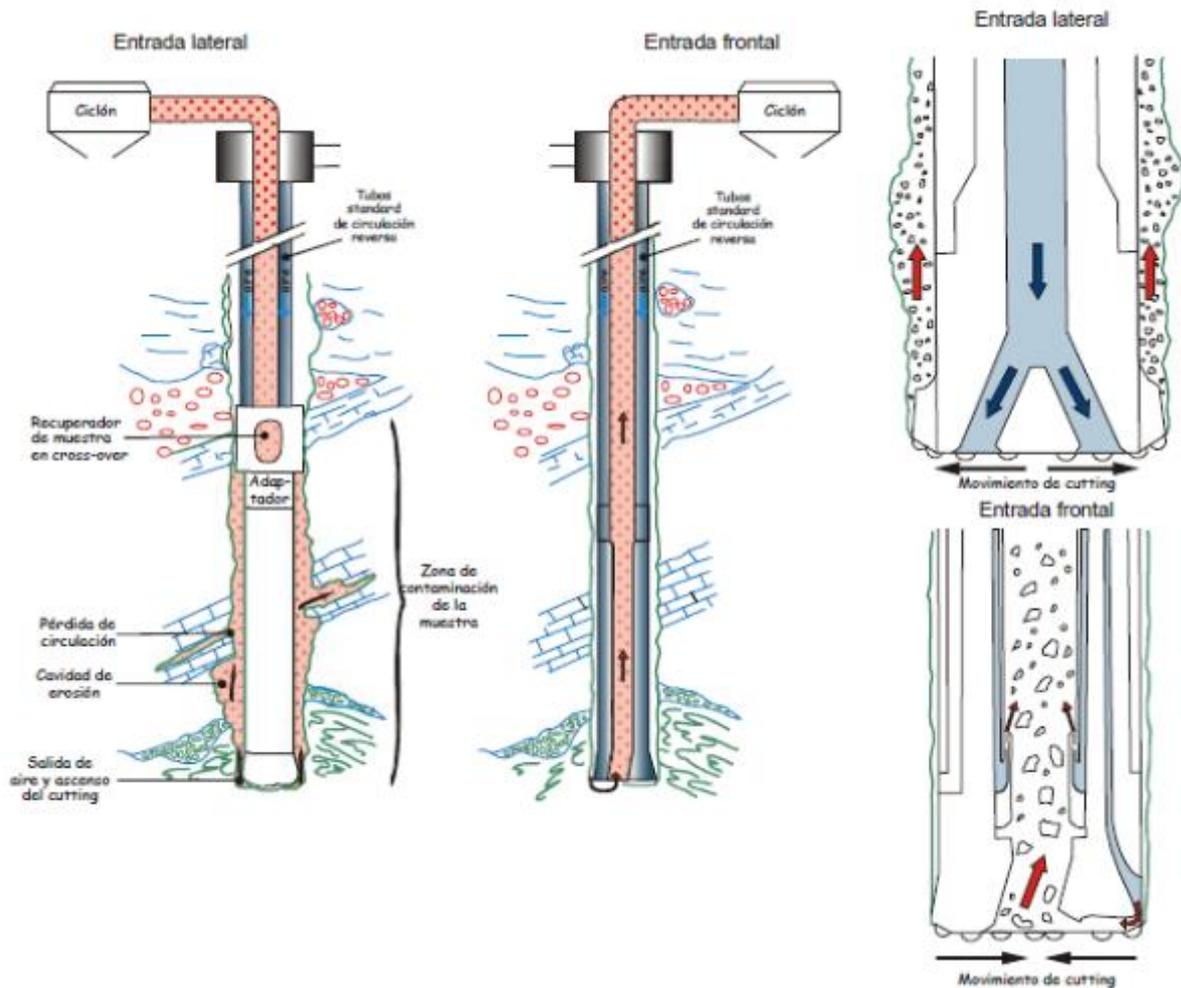


Figura 6. Martillos de fondo con toma de muestras lateral y frontal

Fuente: Fernández R., 2015

PERFORACIONES ROTATIVAS

Trituración con tricono

Es un sistema muy utilizado en la industria del petróleo. Para minería se trata de un sistema de perforación rápido y de bajo costo, donde la muestra se obtiene como partículas pequeñas (“cutting”). En general los fragmentos son de menor tamaño que con martillos de fondo (sobre todo el de muestreo frontal) por lo que la información geológica que se obtiene es limitada, pero la geoquímica es buena.

Las unidades de perforación, en minería, pueden utilizar indistintamente el martillo de fondo o el tricono, dependiendo de las condiciones del terreno a atravesar; es decir son los mismos equipos. Están montadas sobre camiones de gran porte pero de fácil maniobrabilidad y movilidad, en ocasiones sobre orugas.

Ver Figura 7. (Fernández R., 2015).



Figura 7. Máquina de perforación por circulación reversa montada sobre orugas.
Fuente: Fernández R., 2015

La perforadora consta de un compresor cuya potencia dará la capacidad de perforación del equipo por entrega de un caudal y presión suficiente. La capacidad de dicho compresor se puede ver modificada por la altitud de la zona de trabajo, la baja presión (por encima de los 4500 msnm puede perturbar). Un potente motor diesel dará la energía necesaria para que el compresor funcione, como así también las bombas hidráulicas, las cuales darán movimiento a todas las operaciones de la máquina. En general las maniobras son totalmente hidráulicas, tanto su rotación, empuje, mesa de trabajo, llaves auxiliares y guinches para colocar las barras o herramientas pesadas. (Fernández R., 2015).

La herramienta de perforación se ubica en el extremo inferior del tren de barras y consiste en triconos (Figura 8). Existe una gran variedad de herramientas y diferentes diámetros, siendo los de 5 ¼", a 5 ¾" los más usados en exploración minera.



Figura 8. Triconos
Fuente: Fernández R., 2015

Un tricono es una herramienta de trituración formada por tres conos con dientes de aleación dura (carburo de tungsteno). Entre los conos se encuentran las boquillas que inyectan aire; los conos rotan libremente, dando la rotación a toda la herramienta. Trituran la roca y el cutting o detrito ingresa por el tubo interior directamente con muy escasa contaminación pero con un tamaño medio a pequeño de “chip” (3-5 mm), lo cual dificulta su identificación. La duración de un tricono está en relación directa a la dureza de la roca, llegando hasta unos 200-250 metros de performance. Hay veces que se dan situaciones difíciles de resolver como por ejemplo cuando la perforación está llegando a la profundidad deseada, pero dado el desgaste del tricono se observa que la velocidad de penetración disminuyó notablemente. En ese momento hay que decidir si se cambia la herramienta (una maniobra de cambio a unos 200 metros implica una operatoria de aproximadamente tres horas o más) o se continúa con el riesgo de perder un cono, lo cual se traduce en la posibilidad de arruinar el pozo, pues romper la herramienta perdida con un nuevo tricono es muy difícil aunque no imposible. (Fernández R., 2015).

La característica más importante del sistema es que trabaja por circulación reversa de aire o agua para la recuperación del material triturado, lo cual lo diferencia de las perforaciones de circulación normal como las de la industria petrolera que trabajan con inyecciones acuosas (lodos). (Fernández R., 2015).

Perforaciones con corona diamantada (diamantina)

Este es uno de los tipos más comunes de perforación utilizados en la exploración minera, especialmente porque permite la obtención de un trozo de roca cilíndrico

(testigo; “core” en inglés) prácticamente intacto, lo cual asegura la representatividad de los resultados de los análisis químicos practicados y a su vez pueden obtenerse datos geotécnicos (como RQD) permite la medición de estructuras (vetas, fallas, etc) y la selección de muestras para cortes delgados y pulidos. (Fernández R., 2015).

Si bien de los testigos de roca se obtiene gran información geológica, es un sistema de avance lento y de alto costo en comparación con el de circulación reversa.

Como su nombre lo indica la herramienta de corte está dada por una corona que puede llevar diamantes naturales o sintéticos, incrustados o impregnados en una matriz de aleación con tungsteno. Esta corona se apoya y presiona sobre el fondo del pozo y por rotación, produce la pulverización de la roca. En su avance queda en su interior el cilindro de roca “intacto” (no siempre). (Fernández R., 2015).

El primer punto a resolver es el diámetro con el que se quiere perforar; los diámetros estándar en minería se muestran en la tabla 1. Los más utilizados actualmente corresponden a la denominación NQ y HQ. El agregado del número 3 a la denominación, indica que lleva un tubo interior (un tercer tubo) por lo que el diámetro del testigo será algo menor que el correspondiente al de doble tubo. (Fernández R., 2015).

Tabla 1.

Diámetros estándar de perforación en minería

Denominación	Diámetro de testigo (mm)	Diámetro externo pozo (mm)
AQ	27.00	48.00
BQ	36.40	60.00
NQ	47.60	75.70
HQ	63.50	96.00
PQ	84.00	122.60
BQ3	33.50	60.00
NQ3	45.10	75.70
HQ3	61.10	96.00

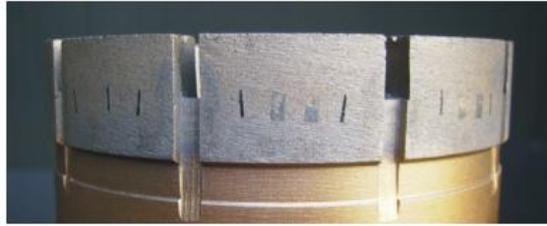
Fuente: Fernández R., 2015

Coronas (“Core bits”)

Existe una amplia gama de coronas, de diversas marcas, adaptables a cada necesidad. Los frentes que desgastan la roca del fondo del pozo pueden ser planos, curvos o escalonados y las salidas de agua también varían. La cantidad de diamantes es muy variable así como su tamaño. (Fernández R., 2015).

Se las puede clasificar en dos grandes tipos: de inserción y de impregnación o concreción (Figura 9). En las coronas de inserción los diamantes están insertados en la superficie y en las de impregnación los diamantes (de menor tamaño que en las anteriores) están distribuidos en toda la aleación dura (carburo de tungsteno) que conforma la matriz. Las primeras, por estar los diamantes sólo en la superficie, terminan su vida útil una vez que se desgastan dichos diamantes, y normalmente se utilizan en rocas blandas a semiduras. En las segundas, a medida que se van desgastando los diamantes y la matriz, reaparecen los diamantes que están en su interior; se las utiliza para perforar rocas blandas hasta muy duras. (Fernández R., 2015).

Impregnación



Inserción

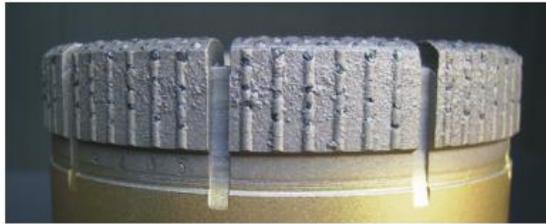


Figura 9. Coronas de impregnación e inserción
Fuente: Fernández R., 2015

En la Figura 10 se muestran las distintas denominaciones de coronas y su elección respecto a la roca a perforar. De fábrica, las coronas vienen con un código que indica el tipo y número de serie, cantidad y ancho de salidas de agua, tipo de matriz, etc. y una numeración a la que se remiten todas las operaciones realizadas con cada una. Una vez finalizada su vida útil pueden ser enviadas al fabricante a fin de recuperar los diamantes que hayan quedado. Las coronas son de alto costo (las más comunes varían entre aproximadamente 1.500 y 2.000 dólares americanos) por lo que se debe llevar un buen control del desgaste que sufre la herramienta a fin de optimizar los rendimientos (ver ejemplos en la Figura 11). Cuando se debe realizar un cambio de corona (por desgaste o porque no es la serie adecuada) debe levantarse todo el tren de barras (y luego volver a bajarse) con la consecuente pérdida de tiempo. (Fernández R., 2015).

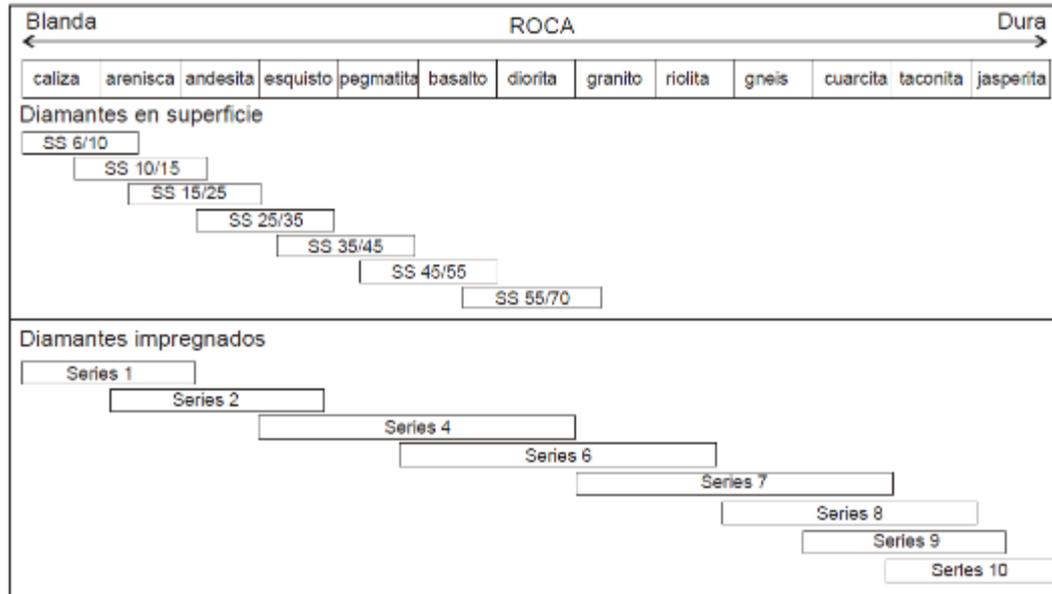


Figura 10. Coronas con diamantes en superficie (SS) y con diamantes impregnados (Series) y su utilización más común en distintos tipos de roca.
Fuente: Fernández R., 2015

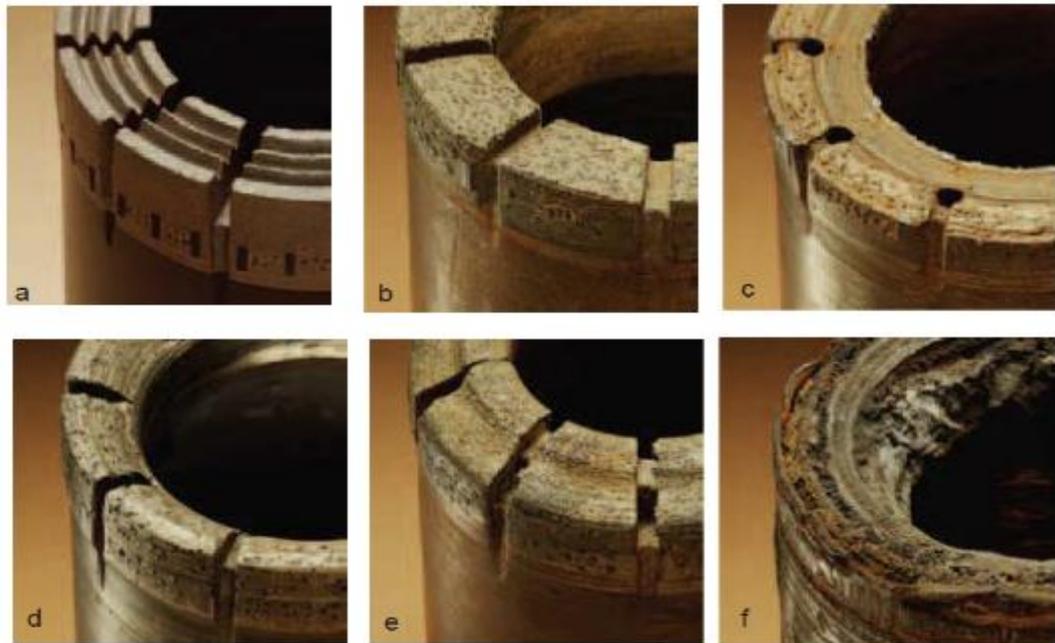


Figura 11. Coronas de impregnación. a) nueva. b) desgaste normal con pocos metros de uso (frente plano). c) desgastada en forma normal. d) Desgaste incorrecto, cóncavo hacia la parte interna. e) Desgaste incorrecto, cóncavo hacia la parte externa. f) Corona fundida (por falta de inyección o empuje excesivo).
Fuente: Fernández R., 2015

Existen muchos y variados diámetros de taladros (coronas) y testigos (muestras recuperadas) siendo los más comerciales los usados en el sistema wireline por cable (López, 2002).

Tabla N° 2.

Tamaños usados en el sistema Wireline (por cable)

NOMBRE	Diámetro del taladro		Diámetro del testigo	
	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros
PQ	4 - 53/64	122.6	3 - 11/32	85.0
HQ	3 - 35/32	96.0	2 - 1/2	63.5
NQ	2 - 63/64	75.8	1 - 7/8	47.6
BQ	2 - 23/64	60.0	1 - 7/16	36.5
AQ	1 - 57/64	48.0	1 - 1/16	27.0

Fuente: López, 2002.

Tabla N° 3.

Tabla de selección de brocas

TENDENCIA DE ROCA	CARACTERÍSTICAS DE LA ROCA	EJEMPLOS	BBDSA	DESCRIPCIÓN
FRACTURADO ↑ ABRASIVO ↑ SUAVE ↓ COMPACTA ↓ NO ABRASIVO ↓ DURA	Extremadamente abrasivo, de grano mediano a grueso; de blanda a muy dura; altamente fracturado, fallas y demumbes.	Caliza; Arenisca; Conglomerado	2A	PARA TERRENOS MAS DUROS Y MAS FRACTURADOS
			2	ESTANDAR
	Dureza de suave a media, abrasiva de grano mediano a grueso, fracturada y quebrada.	Aluvial; Arenisca; Pizarra; Serpentina	3	PARA TERRENOS MUY ABRASIVOS
			4A	ESTANDAR
	Dureza media, abrasiva de grano mediano a grueso y fracturada	Gabro; Pizarra; Andesita; Basalto	6B	ESTANDAR
	Dureza, de media a dura, moderadamente abrasiva, de grano mediano a grueso, de formación sólida a levemente fracturada.	Pegmatita; Gabro; Monzonita; Andesita	7	ESTANDAR
			7B	ALTA PENETRACION
	Dura de grano fino a mediano, de formación sólida, muy poco abrasiva.	Pórfido; Granito; Gneis; Gabro	8	PARA TERRENOS MAS ABRASIVOS/ FRACTURADOS
			8B	ESTANDAR
			8C	VERSATIL DE SERIE 7 HASTA 9
Muy dura y compacta, formaciones de grano fino y no abrasivas	Diorita; Taconita; Gabro; Granito	9C	ESTANDAR	
		9D	ALTA PENETRACION	
Extremadamente dura y compacta de grano fino y no abrasiva.	Chert; Riolita; Cuarzo	10A	ESTANDAR	
		10C	VERSATIL	
		10D	ALTA PENETRACION	
		11	PARA MAQUINAS PEQUEÑAS Y/O ALTA PENETRACION	

Fuente: Bowles Bros Diamantina S.A.

Escariadores (“reamings”)

Por encima de la corona se instala el escariador (Figura 12), que es una herramienta con impregnaciones de diamantes en los laterales y sirve para corregir el diámetro del pozo y permitir el buen desplazamiento de las barras. Se debe utilizar el mismo diámetro que la barra. Si se perfora muy profundo es posible colocar a lo largo del tren de barras varios escariadores. (Fernández R., 2015).



Figura 12. Escariador
Fuente: Fernández R., 2015

Zapatas (“shoes”)

En caso de necesitar poner tubería (“casing”) para evitar desmoronamientos del pozo o pérdida de la inyección, se utilizan las zapatas (Figura 13). Son herramientas semejantes a las coronas con diamantes impregnados y perfiles rectos. Su diámetro interno es ligeramente mayor al externo de la corona correspondiente, por lo que se puede bajar simultáneamente (la corona en su interior). Se las denomina W o sea para NQ la zapata correspondiente es NW. La tubería de casing también es de mayor diámetro y algo más liviana. Cuando se termina el pozo se retira la zapata y el casing. (Fernández R., 2015).



Figura 13. Zapata y escariador
Fuente: Fernández R., 2015

Barras (“rods”)

Son tubos de aceros especiales con roscas en sus extremos y de diámetro externo inferior al de la corona correspondiente, ya que por ese espacio (entre las paredes del pozo y el exterior de las barras) asciende la inyección que lleva la roca molida desde el fondo del pozo. Por ejemplo: cuando se utiliza NQ (diámetro externo= 75.7 mm) las barras tienen un diámetro externo de 69.9 mm y para HQ (diámetro externo= 96.0 mm) las barras son de 88.9 mm de diámetro externo. (Fernández R., 2015).

El largo es de 3.05 metros o 10 pies; las correspondientes a HQ pesan 34.5 kg y las NQ 23.4 kg. Para esos diámetros, en un sondeo de 100 m de profundidad sólo el peso de las barras será del orden de 1140 ó 770 kg, respectivamente. En el extremo superior del tren de barras (conjunto de las barras enroscadas) va la cabeza de inyección conectada por medio de una manguera a la bomba. La inyección desciende a presión por el interior de las barras y saldrá por el espacio que queda entre éstas y la pared del pozo. En la parte inferior, las barras van enroscadas al barril saca testigos. (Fernández R., 2015).

Barril saca testigo (“core barrel”)

Pueden ser de pared doble o triple (que lleva el agregado 3 en la denominación). En los de pared doble el tubo externo gira con la corona y las barras mientras que el tubo interior (que es el tubo saca testigos propiamente dichos) no gira (Figura 14). Entre el tubo interior y el testigo sólo circula una ínfima cantidad de agua (inyección) como lubricante. El tubo interior está enroscado a un cabezal que en su parte superior lleva el enganche (Figura 15) por el cual es izado por el interior de las barras, llevando el testigo. En los de triple tubo, dentro del tubo interior va otro tubo escindido longitudinalmente en dos mitades, en el cual entra el testigo; se usa en formaciones muy fracturadas para mejorar la recuperación ya que se evita cualquier contacto del testigo con la inyección. (Fernández R., 2015).



Figura 14. Cabezal y tubo interior o saca testigos
Fuente: Fernández R., 2015



Figura 15. Parte superior del cabezal al que va enroscado el tubo saca testigos (tubo interior)
Fuente: Fernández R., 2015

En la Figura 16 se muestra un esquema del barril (de pared doble) armado en el fondo del sondeo y la circulación de la inyección. Para levantar el tubo interior saca testigos

una vez que está lleno, se baja una herramienta llamada “pescador” (“overshot”) que se acopla al enganche y el conjunto es izado mediante un cable (“wire line”). (Fernández R., 2015).

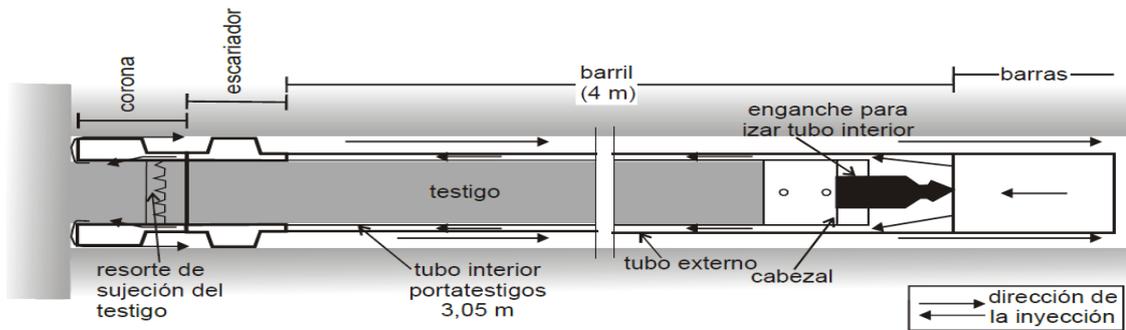


Figura 16. Esquema (no a escala) del barril armado con escariador y corona (en el fondo del sondeo) y conectado por medio de las barras al sistema de rotación y circulación de la inyección. Se trata sólo de un esquema ya que el barril, según las marcas, consta de alrededor de 40 piezas.

Fuente: Fernández R., 2015

Perforadoras

La máquina perforadora puede ir montada sobre camión o patines. En el primero de los casos debe contar con gatos hidráulicos que lo elevan y sobre los cuales se apoya para trabajar. Para el segundo caso deben construirse bases de anclaje o “muertos” a los cuales se sujetará la máquina para evitar desplazamientos. (Fernández R., 2015).

La perforadora en sí está formada por un motor y una bomba hidráulica conectada a ese motor. Las operaciones actualmente son mayormente de tipo hidráulico. Las partes más importantes son la cabeza de rotación, pistones de empuje, la torre con su sistema de poleas y cables y el cabrestante con el cable de acero (“wire line”) que lleva el “pescador” del tubo saca testigos. (Fernández R., 2015).

Los fabricantes o empresas de servicios ofrecen diversos tipos de perforadoras; actualmente son todas con sistema “wire line”, que es el que permite extraer el tubo saca testigo mediante un cable de acero, sin necesidad de levantar todo el tren de barras (como era el sistema antiguo). Lo más importante es conocer la capacidad de la máquina para alcanzar la profundidad deseada con el diámetro de perforación requerido. (Fernández R., 2015).

Desde hace algunos años se fabrican máquinas de perforar denominadas multi-propósito (como las UDR: Universal Drilling Riggs). Éstas pueden utilizar martillo o tricono y luego, cambiando el sistema de rotación y mordazas (“chuck”), pasar a diamantina. Se las suele utilizar con ventajas cuando la mineralización está debajo de un gran espesor de roca estéril. Entonces se inicia con martillo de fondo (“pre-collar”) y al llegar al sector mineralizado se reemplaza por diamantina. (Fernández R., 2015).

Sistema de inyección

Es independiente y cuenta con una bomba y una pileta de preparación de la inyección. La bomba debe tener una capacidad para hacer circular la inyección de modo que levante los detritos que, de acuerdo a la velocidad de avance, produce la corona en el fondo del sondeo, sin permitir floculaciones y hundimientos. Estará influenciada por el diámetro y profundidad de la perforación y el espacio anular entre la pared del sondeo y el tren de barras. (Fernández R., 2015).

La pileta de inyección se dispone al lado de la perforadora. Por razones de costos es preferible usar sólo agua, pero se obtienen mejores rendimientos de la perforación cuando se le adicionan productos especiales como polímeros, lubricantes y,

eventualmente, bentonitas activadas. Actualmente prácticamente todos estos productos cumplen con las normas ambientales.

El consumo de agua es normalmente alto (unos 10,000 a 15,000 litros por turno de 12 horas) por lo que debe preverse muy bien el sistema de abastecimiento de agua. (Fernández R., 2015).

Parámetros de Operación

Los parámetros de operación a considerar para un correcto desempeño de la broca son: Velocidad de rotación de la tubería, Carga aplicada sobre la broca y Flujo de fluido. La consideración de estos parámetros y el tipo de formación a perforar, maximizarán el ratio de penetración y la vida útil de la broca.

- Velocidad de Rotación de la Tubería

La velocidad de rotación depende del tipo de formación que se está perforando, la interrelación entre la capacidad de la máquina de perforación y el estilo de perforar.

Bajas revoluciones para formaciones fracturadas. Altas revoluciones para formaciones compactas

En general, las brocas impregnadas requieren de tan altas revoluciones, como las condiciones lo permitan para desarrollar su máximo performance. Tener en cuenta que las altas revoluciones pueden causar vibración y causar otros problemas.

- Flujo de Fluido

El propósito de este fluido es enfriar y minimizar la acumulación de detritos en la corona. Si los recortes son eliminados muy rápidamente, la matriz no se desgastará lo suficiente para exponer nuevos diamantes y la broca se pulirá.

Carga Aplicada sobre la Broca

La carga debe ser aplicada dependiendo de la velocidad de rotación para mantener a la broca penetrando.

Si la carga aplicada es demasiado alta puede causar desgaste prematuro en la broca o fallas mecánicas en las tuberías de perforación. Si la carga es demasiado baja la broca se puede pulir.

Tabla 3.

Parámetros operacionales con perforación diamantina

PARAMETROS OPERACIONALES									
BIT SIZE	FLUID FLOW		BIT WEIGHT		ROTATIONAL SPEED	PENETRATION RATE INDEX (In/Min)		PENETRATION RATE INDEX (Cm/Min)	
	Gal/Min	Litres/Min	Lb	Kg	RPM	200 RPI	250 RPI	80 RPC	100 RPC
TT-46	2.5 - 3.5	9 - 13	1000 - 3000	450 - 1350	2300	11.5	9.2	29	23
					1400	7	5.6	18	14
					1000	5	4	13	10
					2000	10	8	25	20
AQ	4 - 5	15 - 19	2000 - 5000	900 - 2270	1200	6	4.8	15	12
					850	4.25	3.4	11	9
					1700	8.5	6.8	22	17
BQ	6 - 8	23 - 30	2000 - 5000	900 - 2270	1000	5	4	13	10
					700	3.5	2.8	9	7
					1350	6.75	5.4	17	14
NQ	8 - 10	30 - 38	3000 - 6000	1360 - 2720	800	4	3.2	10	8
					550	2.75	2.2	7	6
					1000	5	4	13	10
HQ	10 - 12	38 - 45	4000 - 8000	1810 - 3630	600	3	2.4	8	6
					400	2	1.6	5	4
					800	4	3.2	10	8
PQ	18 - 23	68 - 87	5000 - 10000	2270 - 4540	500	2.5	2	6	5
					350	1.75	1.4	4	4

Fuente: Fernández R., 2015.

Ejecución de la perforación con diamantina

Una vez instalada y nivelada la perforadora, se introduce el barril armado con corona y escariador en el cabezal de rotación (“chuck”) y en la parte superior se enrosca la cabeza de inyección con la manguera que va a la bomba; eventualmente se coloca una barra y luego la cabeza de inyección. Además de las mordazas que posee el “chuck”, dicho conjunto está sostenido por un cable de acero. (Fernández R., 2015).

Se inicia la rotación y al comienzo del pozo se ejerce una presión hacia abajo o empuje, para lograr el avance. Cuando hay varias barras colocadas esa presión la ejerce el propio peso de las herramientas y debe contraponerse una fuerza de retención (hacia arriba) para que este peso no sea excesivo en el fondo del pozo y dañe la corona.

Si se utiliza un tubo interior o saca testigos de 3 metros, se perfora esa longitud que es cuando se llena con el testigo; se detiene la perforación y se corta el testigo con una pequeña rotación inversa. Hecho esto se saca la cabeza de inyección y se introduce el “pescador” con el cable (“wire line”). Este “pescador” tiene un cerrojo que cuando contacta con el enganche del cabezal del tubo interior (ver Figuras 14 y 15) lo atrapa y de esta forma se levanta con el malacate. Dentro del tubo saca testigos, en su parte inferior, hay un anillo flexible (resorte de bloqueo) que se cierra contra el testigo y no permite que este se deslice cuando se lo está levantando.

Cuando el tubo saca testigos sale a la superficie (por el interior del tren de barras) se desengancha y se lo coloca en un sostén con mediacaña. Inmediatamente se coloca otro saca testigos que ya está preparado al lado de la máquina (se trabaja siempre con 2 tubos saca testigos). Si el pozo está lleno de agua (muy normal) se lo deja caer libremente ya que tendrá un descenso lento en la columna de agua; si no, se lo baja con el cable para evitar que este llegue a gran velocidad al fondo del pozo y se destruya; luego se coloca una nueva barra (con el cabezal de agua) enroscándola a la barra superior. Al llegar el nuevo tubo sacatestigos al barril, provoca una serie de sonidos muy característicos a los que el perforista debe estar atento para escucharlos; de esta forma el tubo está dentro del barril y asegurado para que no se levante al avanzar y allí se reinicia la perforación. (Fernández R., 2015).

Una perforadora diamantina requiere de un perforista y dos ayudantes (recomendado). El perforista tiene los comandos al lado del motor, con instrumental que le indica las condiciones de trabajo. Además debe controlar la presión de agua, ya que de quedarse sin suministro se corre el riesgo de que se funda la corona. Los ayudantes manipulan las herramientas, sacan el testigo del tubo y lo acomodan en la caja y también controlan en nivel de inyección en la pileta y el agregado de aditivos. (Fernández R., 2015).

Del tubo interior extraído, se retira el testigo (muchos perforistas lo denominan “la muestra”) mediante golpes “suaves” y giro, que se dispone en una mediacaña inclinada (de 3 m de largo); cuando se cuenta con personal de control las 24 horas en boca de pozo, este es el mejor momento para medir la recuperación (longitud del testigo obtenido con relación a los metros perforados) y el parámetro geotécnico denominado RQD. Luego el testigo, en orden, se pasa a la caja porta testigo. (Fernández R., 2015).

Las cajas porta testigo son de madera, aunque hay de PVC a un costo mucho mayor, y deben estar previamente rotuladas con la denominación del pozo y el sentido de ubicación del testigo que va de la parte inferior izquierda (menor profundidad) a superior derecha de la caja. Normalmente son de 3 compartimentos de 1 m, pero también hay de 4 y de 5 compartimentos; aunque depende del peso específico de la roca, las primeras pueden alcanzar unos 25 kg y las últimas unos 42 kg, peso que tendrá influencia en su manipulación. El perforista debe colocar al final del testigo un taco de madera en el cual se indica la profundidad alcanzada y el tramo perforado. Cuando se necesita información detallada de geotecnia (para planificación de la explotación) se debe recomendar no romper los testigos para que entren en la caja; si esto es necesario

se deberá marcar con una fibra indeleble donde se hizo el corte, así no se interfiere en dichos estudios. (Fernández R., 2015).

Para los primeros metros, sobre todo si hay relleno, se usa tubería de encamisado (casing) para evitar que el agua a presión socave por debajo de la máquina y ésta se hunda. Si se comienza a perforar una roca muy friable o muy permeable es conveniente cementar la zona para luego re-perforar y pasarla sin problemas. Hay fracturas que tienen mucha fracción arenosa que hace imposible pasarlas con coronas y si se intenta cementarlas no se puede porque llevan mucha agua o se pierde la lechada en el pozo; para estos casos se utilizan triconos de diámetro pequeño. Una vez pasada dicha zona se continúa con diamantina. (Fernández R., 2015).

El geólogo de campo normalmente se encarga de supervisar al contratista (empresa de perforaciones). Para esto se firman partes por turno o diarios, en los cuales se asientan los metros perforados, los insumos consumidos y los movimientos efectuados (por ejemplo cambio de corona). Una vez finalizado el pozo, con ellos se completará un certificado de finalización por el cual el contratista hace la factura para el cobro; por lo tanto debe analizarse con detalle. Cuando se finaliza un pozo, en esos partes, el perforista normalmente asienta que es por decisión del geólogo.

Si durante la perforación (antes de llegar al objetivo) se encuentran problemas para continuar, suele haber 2 opciones: o se firma un acta que se denomina “pozo con riesgo” lo cual implica que todas las herramientas que se pierdan por un posible atrapamiento de barras las debe pagar el cliente (quien contrató el servicio), o bien si no se quiere tomar ese riesgo se firma un acta de paralización del pozo, en la cual se expresa la detención de las tareas de común acuerdo. (Fernández R., 2015).

Medición de sondajes

Cuando se va a perforar un taladro, se tiene una dirección de perforación elegida, donde este dato depende del estudio y de manera general, lo indica el equipo de geólogos o ingenieros a cargo de la prospección, sobre este dato es que se mide la desviación de un taladro (López, 2002).

La medición de sondajes, tiene por finalidad lograr establecer el inicio y fin de la trayectoria del taladro perforado. Partiendo de la premisa real de que todos los taladros se desvían, es muy importante verificar la desviación e inclinación del taladro, esto nos permite saber un punto de origen (coordenada inicial) hasta llegar al fondo del taladro con un punto final (coordenada final) Este último punto también verifica la longitud real del taladro, es decir la profundidad o metros perforados (Silva, 2008).

Las desviaciones importantes y que son materia de estudio, se presentan principalmente en taladros perforados con sistemas de rotación, esto no implica que taladros perforados con otros sistemas no se desvíen, todas las perforaciones son susceptibles de desviarse. La importancia de estudiar y determinar la desviación de un taladro de prospección, depende de la finalidad de la perforación y de la profundidad, en este sentido es muy importante indicar que las desviaciones materia de estudio son de taladros de prospección geológica de profundidades mayores a los 50 metros (López, 2002).

La creciente importancia en la medición de trayectoria en los taladros exploratorios, sean estos por perforación diamantina o por circulación inversa (aire reverso), requieren cada vez más atención de los departamentos de geología. En los últimos años

los principales centros mineros y bolsas mundiales han elaborado estrictas normativas (NI 43-101, JORC, SAMREC, etc.) con el fin de elevar y uniformizar los estándares de estimación de los recursos y reservas minerales. En este sentido, la medición de la trayectoria y en muchos casos, la Orientación de los Testigos, agregan materialidad y consistencia a la información geológica. (Nueva Minería y Energía, 2019).

La medición de pozos de prospección geológica permite conocer la ubicación en coordenadas de las diferentes muestras o testigos de una perforación este dato es importante, porque el impacto que puede ocasionar la presencia de una formación geológica en el sub suelo define la viabilidad de un proyecto, además la medición no utiliza ningún material peligroso ni contaminante, por lo que el proceso de medición de pozos de prospección no impacta negativamente el medio ambiente. Además permite perforar menos pozos, porque los datos obtenidos por la medición tienen una ubicación más precisa y el muestreo es más confiable. (Nueva Minería y Energía, 2019).

(Nueva Minería y Energía, 2019); en un informe técnico sobre la Medición de trayectoria de pozos de sondajes, informan que todos los sondajes se desvían en mayor o menor magnitud. Los motivos de desviaciones pueden ser variados, como por ejemplo:

- Demasiado Empuje (push down), genera desviación positiva hacia arriba.
- Presencia de estructuras (fracturas, fallas, etc.) que guían la perforación a través de los planos de estas estructuras.

Así mismo los factores que afectan la desviación (Deflexión y Pérdida de dirección en roca competente) son: Condiciones Litológicas (rumbo y buzamiento de capas o fracturas), diámetro del pozo, tipo de Corona, tipo de Barra, los escariadores, la velocidad de rotación, la presión o empuje de perforación, la habilidad o experiencia del perforista, la posición inicial, el ángulo del taladro, profundidad del taladro.



Figura 17. Deflexión de taladros desviados.

(Carbajal, 2009), menciona que “Cuando el suelo está constituido por un macizo rocoso de alta dureza, la herramienta de perforación consigue una dirección más estable, es decir la desviación es menor. Por otro lado cuando la estructura del suelo es muy suave, la herramienta de corte es susceptible de tomar una dirección errónea, esto debido a que las fuerzas de resistencia del suelo son prácticamente nulas frente a la presión ejercida por la corona, por lo que la herramienta puede tomar cualquier camino fácilmente. Asimismo, cuando el suelo cambia de duro a blando o viceversa,

o cuando se encuentra un macizo con un buzamiento que corta la trayectoria de la perforación, la herramienta "busca" un camino menos pesado para continuar, produciéndose la desviación. Los taladros no verticales son muy susceptibles de desviarse, si el perforista no tiene la experiencia o técnica adecuada.

Sí el diámetro de la perforación elegida es muy grande, comparado con el diámetro del varillaje (tubería de perforación), se produce una desviación por falta de resistencia de la sarta de perforación al pandeo, además del desgaste prematuro de ésta (Carbajal, 2009).

Por mal alineamiento y emboque, en el momento de instalar los equipos no se le dan la orientación adecuada, es decir se realiza un error de operación o maniobra (emboque), se produce una desviación en la trayectoria de diseño. Este error es muy común (Carbajal, 2009). Demasiado empuje (push down), ocurre cuando el operador del equipo de perforación o perforadora, por falta de experiencia o exceso de confianza, excede en la aplicación de la presión o empuje de la sarta de perforación, generando una desviación positiva hacia arriba (Silva, 2008).

Camberfort (1962), manifiesta que los taladros pueden tener desviaciones extraordinarias, cita el caso de una perforación de 1600 m de profundidad en Oklahoma. El fondo del taladro con respecto a la vertical se había desviado 750 m y la longitud del taladro era la de diseño, pero se encontraba 240 m por encima de la cota de diseño. Parecería poco probable este tipo de desviaciones, teniendo en cuenta que la tubería de perforación es de acero y necesariamente tiene que curvarse para que la desviación ocurra, sin embargo, se ha comprobado que la curvatura ocurre en la

"junta" de la tubería, esto debido a que al unir enroscando la tubería, el hilo de la rosca sufre un desgaste por flexión durante la aplicación de la fuerza al perforar, esto origina que la tubería pueda flexionarse en algún sentido con ángulos menores en un primer momento, pudiendo mantenerse así o curvándose permanentemente durante toda la operación de perforación.

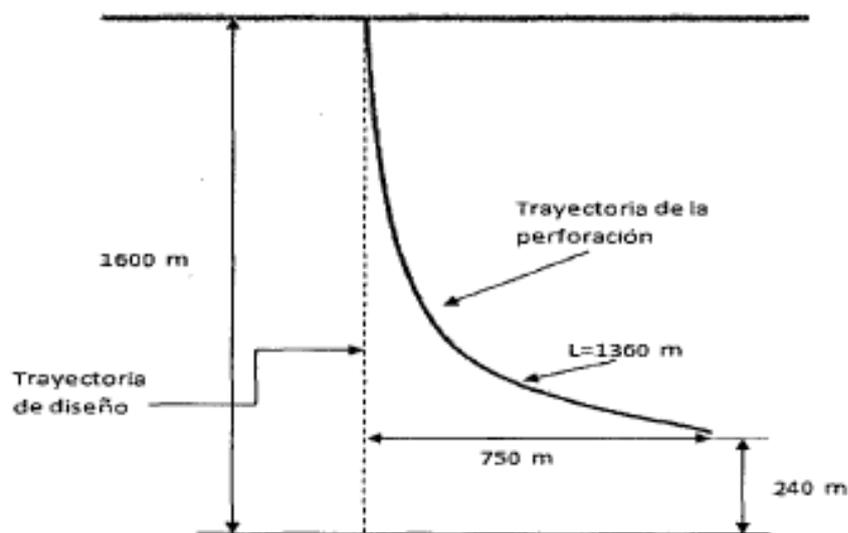


Figura 18. Pozo citado en Oklahoma.
Fuente: Camberfort (1962),

(Arana, 2014) en la Universidad Nacional de Cajamarca se presenta la siguiente tesis: “Medición de la Trayectoria de Pozos de Prospección Geológica”, para obtener el título de Ingeniero Civil. La planificación de las técnicas geofísicas utilizadas depende de factores que producen que un pozo durante su perforación desvíe su trayectoria; como las propiedades estructurales del suelo, el diámetro de perforación, el mal alineamiento y emboque, demasiado empuje push down, así como de factores típicos, por lo que la exploración y muestreo de suelos, distingue cuáles son las técnicas de sondeo, equipos y tipos de perforación, logrando establecer el inicio y fin de la trayectoria de los pozos perforados, cotejando la desviación e inclinación del pozo, desde su coordenada inicial hasta su coordenada final, así como la longitud real del

pozo. El objetivo del presente trabajo de investigación fué elaborar un estudio que desarrolle un método estándar de medición de pozos de prospección geológica. El trabajo se realizó en dos puntos de muestreo: Primer punto de muestreo Minera Yanacocha- distrito de la Encañada, se ejecutaron 16 mediciones en un mismo pozo, se verificó los resultados y calidad de muestreo, obteniendo variaciones en un rango de 0.14 % menor que la tolerancia del equipo en ± 2 % de error. Segundo punto de muestreo Compañía Minera Cerro Corona Gold Fields-La Cima, distrito de Hualgayoc, se midió un pozo de 900 m. En ambos casos se utilizó el Método Estándar de Medición de Pozos de Prospección Geológica basado en las Normas Peruanas. De la medición en estudio, se concluyó que los datos numéricos y gráficos obtenidos nos muestran una desviación de 25.70 m con respecto al punto esperado. La longitud de diseño fue de 900 m, la perforación lograda fue de 838.96 m, es decir se perforaron 61.04 m menos. La inclinación fue de $70\ 44^\circ$ con respecto a la horizontal, para un diseño de 65° , por ende todos los pozos se desvían. Se concluye que el equipo de medición de mejor tecnología es el Gyro Reflex, basado en nanotecnología y dotado de cuatro giróscopos que trabajan en serie. Este mecanismo permite que al girar (los giróscopos) logren un alineamiento paralelo al eje terrestre y se pueda determinar la inclinación y el azimut real del pozo. Su principal fortaleza con respecto a los equipos magnéticos es que no existen alteraciones de los resultados por presencia de metales ferrosos en el pozo.

(Marinovic, 2015) En la ciudad de Cajamarca en la Universidad Privada del Norte se presenta la siguiente tesis: “Estudio comparativo de Giroscopios y su Aplicación para el Registro de la Trayectoria de Taladros en Exploraciones Geológicas, Yanacocha, Perú” para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas. En la presente

investigación se realizó la evaluación de los sondajes diamantinos de los cuales se plantea que, variando el tipo de broca y los parámetros de perforación, se optimiza el control del registro del ángulo de inclinación y la trayectoria de taladros de prospección geológica, incrementando la precisión de la perforación, obteniendo la ubicación correcta del pozo en coordenadas, así como su inclinación y dirección, permitiendo saber la desviación que ha tenido con respecto a su diseño original y definir la estrategia de exploración más rentable en cada una de las áreas de investigación, en una mina a tajo abierto en Cajamarca.

Existen empresas especializadas en medición de pozos de perforación, donde los planes de exploración contemplan la medición del ángulo de inclinación y dirección de los pozos. La medición de pozos de sondeo o sondaje tiene por objetivo determinar el inicio y fin de la trayectoria del sondaje y partiendo de la hipótesis real de que todos los sondajes se desvían, es muy importante verificar la trayectoria e inclinación del pozo, esto nos permite saber un punto de origen (coordenada inicial) hasta llegar al fondo del pozo con un punto final (coordenada final); este último punto también verifica la longitud real del pozo (profundidad o metros perforados).

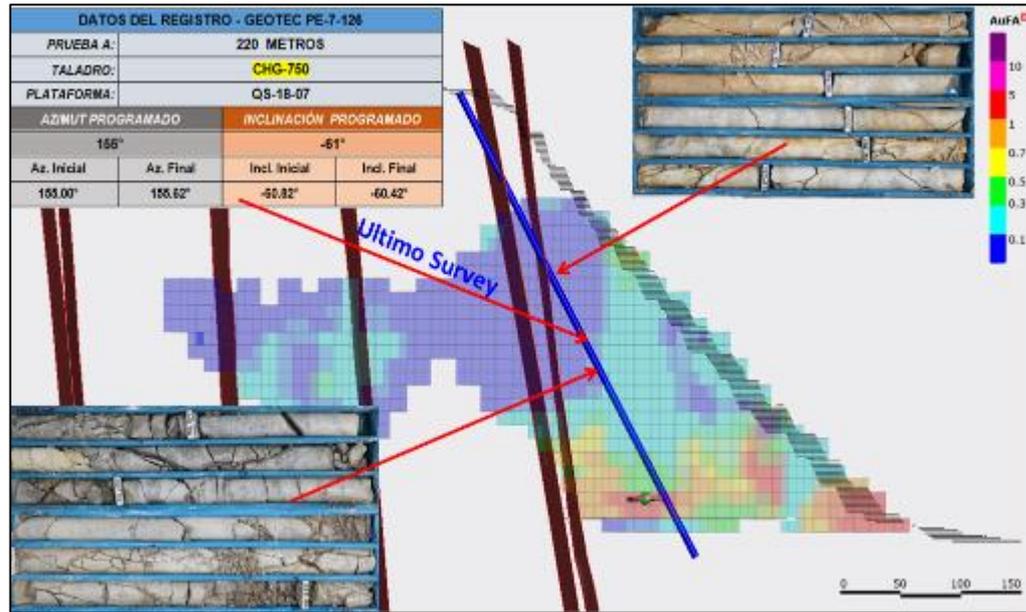


Figura 19. Medición que expresa la trayectoria e inclinación de un sondaje
Fuente: Geotec.

En la figura 19 se observa la desviación del rumbo del pozo con respecto a lo programado, esta vista muestra que el sondaje se desvía con respecto a la dirección proyectada.

La ubicación de los puntos perforados forma una malla de perforación, por lo que la desviación de cada sondaje es muy importante al momento de realizar la correlación y análisis de los testigos y formar un volumen de mantos importantes a considerar. En la prospección para dimensionar depósitos minerales, estos volúmenes pueden ser extremadamente diferentes si los datos de medición no son los correctos; por lo que generaría un problema grave, pues las decisiones que se tomen en base a esa información, pueden determinar la viabilidad del proyecto.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo se puede controlar la trayectoria de taladros en perforación diamantina?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la trayectoria de taladros variando tipo de broca y parámetros de perforación con sistema diamantina.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la trayectoria del taladro variando el tipo de broca.
- Determinar la influencia de los parámetros de operación en la inclinación (dip) del taladro y cuál es la contribución individual de cada uno de ellos.
- Determinar la influencia de los parámetros de operación en el azimut del taladro y cuál es la contribución individual de cada uno de ellos.
- Demostrar la influencia del tipo de broca y los parámetros de perforación en la trayectoria del taladro.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Utilizando la broca correspondiente al tipo de roca y controlando la velocidad de rotación (RPM), avance de penetración (pull down) y caudal del fluido (gpm); se puede controlar la trayectoria de taladros en perforación diamantina.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Utilizando brocas tipo 2-4 para rocas fracturadas, abrasivas y suaves; y brocas tipo 4-7 para rocas de dureza suave a media, fracturada y quebrada, se minimiza la desviación del ángulo de inclinación y la trayectoria del taladro.
- Variando los parámetros operacionales se puede controlar la desviación del ángulo de inclinación y la trayectoria del taladro.

- Analizar los resultados del tipo de broca y los parámetros de perforación en la desviación de la trayectoria.
- La consideración del tipo de broca a utilizar, de estos parámetros perforación y el tipo de formación a perforar, maximizarán la penetración y la vida útil de la broca

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación es Aplicada. Por el tipo de investigación es Experimental, con diseño pre experimental, del tipo un solo grupo con una sola medición; dado que el experimento consiste en que a un grupo se le administra un estímulo o tratamiento y después se realiza una medición de una o más variables para observar cuál es el nivel de acción del grupo en estas variables. (Hernández, 2014)

2.2. Población y muestra

2.3.1 Población.

Todos los sondajes diamantinos del proyecto minero Yoni, de una campaña de 2000 m de perforación en una Empresa Minera de Cajamarca.

2.3.2 Muestra.

Dos sondajes diamantinos del proyecto minero Yoni, de una campaña de 2000 m de perforación en una Empresa Minera de Cajamarca.

Sondaje Yoni – 244 (profundidad 200 m hasta 530 m).

Sondaje Yoni – 244 (profundidad 185 m hasta 330 m).

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

- La técnica de recolección de datos se realizó adquiriendo los reportes de avance de perforación de cada taladro, luego se realizó el levantamiento de información de las características del terreno, observando el tipo de roca y condiciones existentes; se recoge las lecturas de los parámetros aplicados del sondaje de perforación como: profundidad del taladro (m), velocidad de rotación (RPM), caudal del fluido (gal/min), pulldown, inclinación (dip) y azimut medida. Para

registrar estos datos, se realizó un formato Instrumento N° 1: Tabla de perforación.

Ver Anexo 1.

- Para el análisis de datos se empleó la prueba de t-student. Esta prueba permitió comparar las medias de dos grupos de datos y determinar si entre estos parámetros las diferencias son estadísticamente significativas. En la prueba t, se procedió a determinar el valor t de student calculado, obtenido de la experiencia analítica, y este valor posteriormente se comparó con el llamado valor crítico, este valor crítico se obtuvo de la tabla de t-Student para un determinado porcentaje de confiabilidad (normalmente se utiliza el 95% de confianza, es decir, un valor α de 0,05). Si no existen diferencias significativas entre los 2 grupos, la t calculada debería ser inferior al t crítico (o conocido también como t de tabla).

2.4. Procedimiento

Se recolectó la información de cada sondaje, la misma que nos fue entregada por los perforistas. En estos reportes de avance diario de perforación viene detallado todo el desarrollo de las actividades realizadas en el turno de doce horas. Luego viene el trabajo de gabinete en donde se revisó minuciosamente el historial del reporte, para poder cruzar información, con la cual continuar el análisis.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Figura 20. Medición que expresa los resultados de carga puntual del macizo rocoso de los proyectos Yoni 244 y Yoni 245

TALADRO	PRODUNDIDAD (m)	DIAMETRO (cm)	LONGITUD (cm)	FUERZA (kn)	DIAMETRO EQ (cm)	C.PUNTUAL LS (Mpa)	C.PUNTUAL LS (50)Mpa	UCS (Mpa)	ISRM
Yoni 245	267.15	6.3	10	22.72	6.0	6.31	6.85	164.4	R5
Yoni 245	278.75	6.3	10	21.57	6.1	5.80	6.34	152.16	R5
Yoni 245	300.25	6.3	10	10.64	6.0	2.96	3.21	77.04	R4
Yoni 244	261.85	6.3	15	2.31	6.3	0.58	0.64	15.36	R2
Yoni 244	269.75	6.3	15	2.48	6.3	0.62	0.69	16.56	R2
Yoni 244	284.65	6.3	13	7.57	6.3	1.91	2.10	50.88	R4
Yoni 244	294.45	6.3	15	13.11	6.3	3.30	3.66	87.84	R4
Yoni 244	300.95	6.3	15	14.27	6.3	3.60	3.99	95.76	R4
Yoni 244	310.95	6.3	14	12.43	6.3	3.13	3.47	83.28	R4
Yoni 244	332.25	6.3	15	10.51	6.3	2.65	2.94	70.56	R4
Yoni 244	343.05	6.3	15	11.12	6.3	2.80	3.11	74.64	R4
Yoni 244	356.25	6.3	15	3.26	6.3	0.82	0.91	21.84	R2
Yoni 244	364.65	6.3	15	4.35	6.3	1.10	1.22	29.28	R3
Yoni 244	407.45	6.3	15	2.78	6.3	0.70	0.78	18.72	R2
Yoni 244	417.05	6.3	15	3.10	6.3	0.78	0.87	20.88	R2
Yoni 244	425.85	6.3	15	3.40	6.3	0.86	0.95	22.8	R2
Yoni 244	434.05	6.3	15	3.85	6.3	0.97	1.08	25.92	R3

Fuente: Geodata

3.1 Evaluación de la desviación de trayectoria teniendo en cuenta el tipo de broca.

Tabla 4.

Cuadro resumen del sondaje Yoni 244 con broca tipo 2-4

FECHA	SONDAJE	BROCA	INCLIN. PROG	INCLIN. MEDIDA	AZIMUT PROG.	Azimut medida
09/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.885	273	272.831
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.574	273	272.938
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.951	273	273.468
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.124	273	273.625
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.075	273	273.786
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.088	273	273.622
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.233	273	273.635
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.223	273	273.804
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.183	273	273.899
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.234	273	274.111
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.094	273	274.401
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.14	273	274.591
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.173	273	274.694
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.298	273	274.837
10/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.951	273	274.922
11/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.284	273	275.031
11/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.079	273	275.084
11/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.939	273	275.149
11/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.997	273	275.154
11/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.232	273	275.212
12/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.094	273	275.274
12/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.17	273	275.085
12/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-52.004	273	275.223
13/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.314	273	275.414
13/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.03	273	275.462
13/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.285	273	275.424
13/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-51.118	273	275.375
13/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.998	273	275.341
13/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.874	273	275.422
13/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.798	273	275.517
13/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.84	273	275.641
14/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.681	273	275.616
14/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.492	273	275.704
14/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.722	273	275.776
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.765	273	275.946
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.8	273	275.795
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.446	273	275.817
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.516	273	275.842
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.56	273	275.856
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.62	273	276.051
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.592	273	276.278
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.206	273	276.241
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-50.049	273	276.023
15/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-49.968	273	275.958
19/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-49.938	273	276.137
19/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-49.925	273	276.033
19/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-49.921	273	275.993
19/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-49.991	273	276.068
19/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-49.771	273	276.152
19/09/2018	YONI-244	2 - 4	-50	-49.601	273	276.233
Mínimo:				-52.885		272.831
Máximo:				-49.601		276.278
Promedio:				-51.26		275.15
Desv estand:				0.91		0.93
Coef Variac:				-1.77		0.34

Fuente: Data de perforación

Tabla 5.

Cuadro resumen del sondaje Yoni 245 con broca tipo 4-7

FECHA	SONDAJE	BROCA	INCLIN. PROG	INCLIN. MEDIDA	AZIMUT PROG.	Azimut medida
26/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.491	338	339.088
26/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.285	338	338.054
26/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.406	338	338.205
26/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.382	338	338.649
27/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.151	338	338.768
27/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.069	338	338.829
27/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.189	338	338.618
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.78	338	338.909
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.913	338	339.066
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.076	338	339.126
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.036	338	339.191
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.661	338	339.383
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.387	338	339.335
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.745	338	339.402
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.814	338	339.724
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.55	338	339.957
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.568	338	340.152
28/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.699	338	339.985
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.676	338	339.966
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.827	338	340.054
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.971	338	340.041
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.796	338	340.173
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.975	338	340.086
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.977	338	339.975
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-59.885	338	339.788
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.063	338	339.178
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.195	338	338.903
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.322	338	339.232
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.379	338	339.307
29/09/2018	YONI-245	4-7	-60°	-60.404	338	339.227
Mínimo:				-60.491		338.054
Máximo:				-59.387		340.173
Promedio:				-60		339
Desv estand:				0.29		0.59
Coef Variac:				-0.49		0.17

Fuente: Data de perforación

3.2 Influencia de los parámetros de operación en la inclinación (dip) del taladro.

Tabla 5.

Cuadro resumen de los parámetros de perforación en la inclinación del sondaje Yoni

244

SONDAJE	PROFUND. (m)	RPM	FLUÍDO	PSI PULLDOWN	INCLINACION MEDIDA
YONI-244	250.00	480.00	14.00	700.00	-52.885
YONI-244	255.00	480.00	13.00	700.00	-52.574
YONI-244	275.00	510.00	13.00	850.00	-51.951
YONI-244	300.00	500.00	13.00	800.00	-52.124
YONI-244	305.00	500.00	13.00	800.00	-52.075
YONI-244	310.00	500.00	13.00	800.00	-52.088
YONI-244	315.00	450.00	13.00	800.00	-52.233
YONI-244	320.00	510.00	13.00	800.00	-52.223
YONI-244	325.00	510.00	12.00	800.00	-52.183
YONI-244	330.00	510.00	12.00	800.00	-52.234
YONI-244	335.00	510.00	12.00	800.00	-52.094
YONI-244	340.00	510.00	12.00	800.00	-52.140
YONI-244	345.00	510.00	15.00	800.00	-52.173
YONI-244	350.00	510.00	16.00	800.00	-52.298
YONI-244	355.00	510.00	15.00	750.00	-51.951
YONI-244	360.00	480.00	13.00	700.00	-51.284
YONI-244	365.00	500.00	13.00	500.00	-52.079
YONI-244	370.00	510.00	12.00	500.00	-51.939
YONI-244	375.00	480.00	13.00	500.00	-51.997
YONI-244	380.00	450.00	14.00	400.00	-52.232
YONI-244	385.00	800.00	15.00	400.00	-52.094
YONI-244	390.00	400.00	14.00	550.00	-52.170
YONI-244	395.00	400.00	14.00	550.00	-52.004
YONI-244	400.00	500.00	14.00	400.00	-51.314
YONI-244	405.00	700.00	14.00	400.00	-51.030
YONI-244	410.00	700.00	13.00	400.00	-51.285
YONI-244	415.00	550.00	14.00	400.00	-51.118
YONI-244	420.00	500.00	14.00	500.00	-50.998
YONI-244	425.00	500.00	14.00	500.00	-50.874
YONI-244	430.00	550.00	15.00	550.00	-50.798
YONI-244	435.00	550.00	14.00	500.00	-50.840
YONI-244	440.00	580.00	13.00	300.00	-50.681
YONI-244	445.00	580.00	13.00	500.00	-50.492
YONI-244	450.00	260.00	14.00	500.00	-50.722
YONI-244	455.00	260.00	14.00	500.00	-50.765
YONI-244	460.00	500.00	13.00	400.00	-50.800
YONI-244	465.00	285.00	14.00	500.00	-50.446
YONI-244	470.00	285.00	15.00	500.00	-50.516
YONI-244	475.00	285.00	15.00	500.00	-50.560
YONI-244	480.00	285.00	15.00	500.00	-50.620
YONI-244	485.00	300.00	15.00	500.00	-50.592
YONI-244	490.00	300.00	15.00	500.00	-50.206
YONI-244	495.00	300.00	15.00	500.00	-50.049
YONI-244	500.00	290.00	14.00	550.00	-49.968
YONI-244	505.00	280.00	13.00	500.00	-49.938
YONI-244	510.00	480.00	13.00	500.00	-49.925
YONI-244	515.00	480.00	13.00	500.00	-49.921
YONI-244	520.00	480.00	13.00	500.00	-49.991
YONI-244	525.00	510.00	13.00	500.00	-49.771
YONI-244	530.00	510.00	13.00	500.00	-49.601
Mínimo:	250.00	260.00			-52.89
Máximo:	530.00	800.00			-49.60
Promedio:	405.70	466.40			-51.26
Desv estand:	76.17	117.41			0.91
Coef Variac:	18.78	25.17			-1.77

Fuente: Data de perforación

Tabla 6.

Regresión y Correlación de la inclinación del sondaje Yoni 244 variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM), caudal de fluido (gal/min) y el pulldown (psi)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.951860157
Coefficiente de determinación R ²	0.906037758
R ² ajustado	0.897685559
Error típico	0.289859076
Observaciones	50

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	36.4568589	9.114214728	108.4789444	1.66563E-22
Residuos	45	3.78082277	0.084018284		
Total	49	40.2376817			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%
Intercepción	-55.97151485	0.97544772	-57.38033304	9.90919E-44	-57.9361674
PROFUND. (m)	0.012654242	0.00088509	14.29711909	2.40397E-18	0.010871579
RPM	0.000124127	0.00042036	0.295288	0.769132083	-0.00072252
FLUÍDO	-0.068606882	0.04514724	-1.519625231	0.135600791	-0.159538087
PSI PULLDOWN	0.000796309	0.0004187	1.901874101	0.063600652	-4.69901E-05

Fuente: Data de perforación

Al revisar las contribuciones individuales, se puede observar que solo la Profundidad influye significativamente en inclinación del sondaje Yoni 244, presentando un p value= 2.40397E-18, que resulta ser menor a $\alpha=0.05$.

Tabla 7.

Cuadro resumen de los parámetros de perforación en la inclinación del sondaje Yoni

245

SONDAJE	PROFUND. (m)	RPM	FLUÍDO	PSI PULLDOWN	INCLINACION MEDIDA
YONI-245	185.00	510.00	13.00	700.00	-60.491
YONI-245	190.00	510.00	13.00	700.00	-60.285
YONI-245	195.00	510.00	13.00	700.00	-60.406
YONI-245	200.00	510.00	13.00	700.00	-60.382
YONI-245	205.00	510.00	13.00	700.00	-60.151
YONI-245	210.00	510.00	13.00	700.00	-60.069
YONI-245	215.00	580.00	14.00	800.00	-60.189
YONI-245	220.00	660.00	14.00	800.00	-59.780
YONI-245	225.00	700.00	14.00	750.00	-59.913
YONI-245	230.00	600.00	14.00	750.00	-60.076
YONI-245	235.00	700.00	13.00	700.00	-60.036
YONI-245	240.00	700.00	13.00	700.00	-59.661
YONI-245	245.00	700.00	13.00	700.00	-59.387
YONI-245	250.00	700.00	13.00	700.00	-59.745
YONI-245	255.00	750.00	13.00	700.00	-59.814
YONI-245	260.00	750.00	13.00	700.00	-59.550
YONI-245	265.00	750.00	13.00	700.00	-59.568
YONI-245	270.00	500.00	14.00	600.00	-59.699
YONI-245	275.00	450.00	14.00	600.00	-59.676
YONI-245	280.00	450.00	14.00	600.00	-59.827
YONI-245	285.00	450.00	14.00	600.00	-59.971
YONI-245	290.00	460.00	15.00	600.00	-59.796
YONI-245	295.00	450.00	13.00	600.00	-59.975
YONI-245	300.00	510.00	13.00	500.00	-59.977
YONI-245	305.00	450.00	14.00	500.00	-59.885
YONI-245	310.00	450.00	13.00	500.00	-60.063
YONI-245	315.00	450.00	13.00	500.00	-60.195
YONI-245	320.00	450.00	13.00	500.00	-60.322
YONI-245	325.00	510.00	13.00	500.00	-60.379
YONI-245	330.00	510.00	13.00	500.00	-60.404
Mínimo:	185.00	450.00			-60.49
Máximo:	330.00	750.00			-59.39
Promedio:	257.50	558.00			-59.99
Desv estand:	44.02	110.03			0.29
Coef Variac:	17.09	19.72			-0.49

Fuente: Data de perforación

Tabla 8.

Regresión y Correlación de la inclinación del sondaje Yoni 245 variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM), caudal de fluido (gal/min) y el pulldown (psi)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.706956625
Coefficiente de determinación R ²	0.49978767
R ² ajustado	0.419753697
Error típico	0.222313509
Observaciones	30

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	4	1.234533454	0.30863336	6.24469401	0.001257792
Residuos	25	1.235582412	0.0494233		
Total	29	2.470115867			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%
Intercepción	-64.30024269	1.249091701	-51.4775998	6.81292E-27	-66.8727952
PROFUND. (m)	0.001841265	0.002811009	0.65501922	0.518437454	-0.003948117
RPM	0.001930033	0.000741668	2.60228823	0.015344972	0.00040254
FLUÍDO	0.214780055	0.099341741	2.16203232	0.040385839	0.010181909
PSI PULLDOWN	-0.00017223	0.001634676	-0.10536064	0.916930462	-0.003538908

Fuente: Data de perforación

Al revisar las contribuciones individuales se puede observar que el RPM y el fluido, influyen significativamente en la inclinación del sondaje Yoni 245, presentando un p value= 0.015344972 y 0.040385839 respectivamente, que resulta ser menor a $\alpha=0.05$.

3.3 Influencia de los parámetros de operación en el azimut del taladro.

Tabla 9.

Cuadro resumen de los parámetros de perforación en el azimut del sondaje Yoni 244

SONDAJE	PROFUND. (m)	RPM	FLUÍDO	PSI PULLDOWN	AZIMUT MEDIDA
YONI-244	250.00	480.00	14.00	700.00	272.83
YONI-244	255.00	480.00	13.00	700.00	272.94
YONI-244	275.00	510.00	13.00	850.00	273.47
YONI-244	300.00	500.00	13.00	800.00	273.63
YONI-244	305.00	500.00	13.00	800.00	273.79
YONI-244	310.00	500.00	13.00	800.00	273.62
YONI-244	315.00	450.00	13.00	800.00	273.64
YONI-244	320.00	510.00	13.00	800.00	273.80
YONI-244	325.00	510.00	12.00	800.00	273.90
YONI-244	330.00	510.00	12.00	800.00	274.11
YONI-244	335.00	510.00	12.00	800.00	274.40
YONI-244	340.00	510.00	12.00	800.00	274.59
YONI-244	345.00	510.00	15.00	800.00	274.69
YONI-244	350.00	510.00	16.00	800.00	274.84
YONI-244	355.00	510.00	15.00	750.00	274.92
YONI-244	360.00	480.00	13.00	700.00	275.03
YONI-244	365.00	500.00	13.00	500.00	275.08
YONI-244	370.00	510.00	12.00	500.00	275.15
YONI-244	375.00	480.00	13.00	500.00	275.15
YONI-244	380.00	450.00	14.00	400.00	275.21
YONI-244	385.00	800.00	15.00	400.00	275.27
YONI-244	390.00	400.00	14.00	550.00	275.09
YONI-244	395.00	400.00	14.00	550.00	275.22
YONI-244	400.00	500.00	14.00	400.00	275.41
YONI-244	405.00	700.00	14.00	400.00	275.46
YONI-244	410.00	700.00	13.00	400.00	275.42
YONI-244	415.00	550.00	14.00	400.00	275.38
YONI-244	420.00	500.00	14.00	500.00	275.34
YONI-244	425.00	500.00	14.00	500.00	275.42
YONI-244	430.00	550.00	15.00	550.00	275.52
YONI-244	435.00	550.00	14.00	500.00	275.64
YONI-244	440.00	580.00	13.00	300.00	275.62
YONI-244	445.00	580.00	13.00	500.00	275.70
YONI-244	450.00	260.00	14.00	500.00	275.78
YONI-244	455.00	260.00	14.00	500.00	275.95
YONI-244	460.00	500.00	13.00	400.00	275.80
YONI-244	465.00	285.00	14.00	500.00	275.82
YONI-244	470.00	285.00	15.00	500.00	275.84
YONI-244	475.00	285.00	15.00	500.00	275.86
YONI-244	480.00	285.00	15.00	500.00	276.05
YONI-244	485.00	300.00	15.00	500.00	276.28
YONI-244	490.00	300.00	15.00	500.00	276.24
YONI-244	495.00	300.00	15.00	500.00	276.02
YONI-244	500.00	290.00	14.00	550.00	275.96
YONI-244	505.00	280.00	13.00	500.00	276.14
YONI-244	510.00	480.00	13.00	500.00	276.03
YONI-244	515.00	480.00	13.00	500.00	275.99
YONI-244	520.00	480.00	13.00	500.00	276.07
YONI-244	525.00	510.00	13.00	500.00	276.15
YONI-244	530.00	510.00	13.00	500.00	276.23
Mínimo:	250.00	260.00			272.83
Máximo:	530.00	800.00			276.28
Promedio:	405.70	466.40			275.15
Desv estand:	76.17	117.41			0.93
Coef Variac:	18.78	25.17			0.34

Fuente: Data de perforación

Tabla 10.

Regresión y Correlación del azimut en el sondaje Yoni 244 variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM), caudal de fluido (gal/min) y pulldown (psi)

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.966755804
Coefficiente de determinación R ²	0.934616785
R ² ajustado	0.928804944
Error típico	0.247005191
Observaciones	50

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	39.24569097	9.811422744	160.8125085	4.90889E-26
Residuos	45	2.745520406	0.061011565		
Total	49	41.99121138			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%
Intercepción	270.3725284	0.831233762	325.2665384	1.64196E-77	268.6983377
PROFUND. (m)	0.009939923	0.000754235	13.17881091	4.70021E-17	0.008420815
RPM	0.00023164	0.000358212	0.646656842	0.521138871	-0.000489835
FLUÍDO	0.090620829	0.038472496	2.355470487	0.022917978	0.013133244
PSI PULLDOWN	-0.001040695	0.000356795	-2.916785029	0.005499376	-0.001759317

Fuente: Data de perforación

Al revisar las contribuciones individuales se puede observar que la profundidad, el fluido y el pulldown, influyen significativamente en el azimut del sondaje Yoni 244, presentando un p value= 4.70021E-17, 0.022917978 y 0.005499376, que resultan ser menor a $\alpha=0.05$.

Tabla 11.

Cuadro resumen de los parámetros de perforación en el azimut del sondaje Yoni 245

SONDAJE	PROFUND. (m)	RPM	FLUÍDO	PSI PULLDOWN	AZIMUT MEDIDA
YONI-245	185.00	510.00	13.00	700.00	339.09
YONI-245	190.00	510.00	13.00	700.00	338.05
YONI-245	195.00	510.00	13.00	700.00	338.21
YONI-245	200.00	510.00	13.00	700.00	338.65
YONI-245	205.00	510.00	13.00	700.00	338.77
YONI-245	210.00	510.00	13.00	700.00	338.83
YONI-245	215.00	580.00	14.00	800.00	338.62
YONI-245	220.00	660.00	14.00	800.00	338.91
YONI-245	225.00	700.00	14.00	750.00	339.07
YONI-245	230.00	600.00	14.00	750.00	339.13
YONI-245	235.00	700.00	13.00	700.00	339.19
YONI-245	240.00	700.00	13.00	700.00	339.38
YONI-245	245.00	700.00	13.00	700.00	339.34
YONI-245	250.00	700.00	13.00	700.00	339.40
YONI-245	255.00	750.00	13.00	700.00	339.72
YONI-245	260.00	750.00	13.00	700.00	339.96
YONI-245	265.00	750.00	13.00	700.00	340.15
YONI-245	270.00	500.00	14.00	600.00	339.99
YONI-245	275.00	450.00	14.00	600.00	339.97
YONI-245	280.00	450.00	14.00	600.00	340.05
YONI-245	285.00	450.00	14.00	600.00	340.04
YONI-245	290.00	460.00	15.00	600.00	340.17
YONI-245	295.00	450.00	13.00	600.00	340.09
YONI-245	300.00	510.00	13.00	500.00	339.98
YONI-245	305.00	450.00	14.00	500.00	339.79
YONI-245	310.00	450.00	13.00	500.00	339.18
YONI-245	315.00	450.00	13.00	500.00	338.90
YONI-245	320.00	450.00	13.00	500.00	339.23
YONI-245	325.00	510.00	13.00	500.00	339.31
YONI-245	330.00	510.00	13.00	500.00	339.23
Mínimo:	185.00	450.00			338.05
Máximo:	330.00	750.00			340.17
Promedio:	257.50	558.00			339.35
Desv estand:	44.02	110.03			0.59
Coef Variac:	17.09	19.72			0.17

Fuente: Data de perforación

Tabla 12.

Regresión y Correlación del azimut en el sondaje Yoni 245 variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM), caudal de fluido (gal/min) y pulldown (psi)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.725306002
Coefficiente de determinación R ²	0.526068796
R ² ajustado	0.450239804
Error típico	0.435830668
Observaciones	30

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	5.271119014	1.317779754	6.937568055	0.000669689
Residuos	25	4.748709286	0.189948371		
Total	29	10.0198283			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
Intercepción	331.4440865	2.448760185	135.351795	2.39414E-37	326.4007705
PROFUND. (m)	0.007682902	0.005510795	1.394154913	0.175539173	-0.003666793
RPM	0.002063879	0.00145399	1.419459407	0.168114634	-0.000930668
FLUÍDO	0.39947988	0.194752795	2.05121513	0.050863768	-0.001621010
PSI PULLDOWN	-0.000883046	0.003204672	-0.275549476	0.785158909	-0.007483190

Fuente: Data de perforación

3.4 Demostrar la influencia del tipo de broca y los parámetros de perforación en la trayectoria del taladro.

Tabla 13.

Resumen de medidas estadísticas de la inclinación y azimut variando los parámetros de perforación: profundidad, velocidad de rotación (RPM), caudal de fluido (gal/min) y pulldown (psi)

Proyecto	Yoni 244		Yoni 245	
	Inclinación	Azimut	Inclinación	Azimut
Medidas estadísticas				
Valor Mínimo	-52.89	272.83	-60.49	338.05
Valor Máximo	-49.60	276.28	-59.39	340.17
Media	-51.26	275.15	-59.99	339.35
Desv. Estándar	0.91	0.93	0.29	0.59
Coef. Variación	1.77	0.34	0.49	0.17
Coef. de correlación múltiple	0.9519	0.9667	0.7069	0.7253
p value	1.66×10^{-22}	4.91×10^{-26}	0.00126	0.00067

Fuente: Data de perforación

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Luego de observar el comportamiento de las variables estudiadas (tipo de broca y parámetros de perforación) en el control de la trayectoria (inclinación y azimut), en los taladros ejecutados del proyecto Tony 244 y Tony 245 de una empresa Minera de Cajamarca y después de haber analizado el control de la trayectoria de los 80 datos del proyecto Tony 244 y los 30 datos del proyecto Tony 245, se debate los resultados obtenidos de la siguiente manera:

En primer lugar tenemos las características del macizo rocoso proporcionado por el Área de Geotecnia de la Empresa Geotec (Ver figura 20), que en el proyecto Yoni 244 el ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas o International Society for Rock Mechanics en inglés), varía desde R2 hasta R4, es decir un macizo rocoso clasificado como débil a duro. Luego en el proyecto Yoni 245 varía desde R4 hasta R5 es decir un macizo rocoso clasificado como duro a muy duro. Con estas características del macizo rocoso, en la perforación diamantina se empleó la broca 2 -4 para el proyecto Yoni 244 y la broca 4 - 7 para el proyecto Yoni 245. Esta selección del tipo de broca coincide con la tabla N° 3 de la Empresa Bros Diamantina S.A

La broca 2 - 4 utilizada en la perforación del proyecto Yoni 244, realiza variaciones no significativas en la inclinación y el azimut, que van desde -52.885 hasta -49.601, en promedio -51.26, tomando como inclinación programada -50 (Ver tabla 4). Para el azimut las mediciones van desde 272.831 hasta 276.278, en promedio 275.15, tomando como azimut programada 273. El coeficiente de variación en las medidas de la inclinación es de 1.77, por lo que las medidas de la inclinación en la perforación

de este proyecto son homogéneas (la variación es mínima). Por otro lado el coeficiente de variación en las medidas del azimut es de 0.34, por lo que las medidas de la inclinación en la perforación de este proyecto son homogéneas (la variación es mínima).

La broca 4 - 7 utilizada en la perforación del proyecto Yoni 245, realiza variaciones no significativas en la inclinación y el azimut, que van desde -60.491 hasta -59.387, en promedio -60.00, tomando como inclinación programada -60 (Ver tabla 5). Para el azimut las mediciones van desde 338.054 hasta 340.173, en promedio 339.00, tomando como azimut programada 338. El coeficiente de variación en las medidas de la inclinación es de 0.49, por lo que las medidas de la inclinación en la perforación de este proyecto son homogéneas (la variación es mínima). Por otro lado el coeficiente de variación en las medidas del azimut es de 0.17, por lo que las medidas de la inclinación en la perforación de este proyecto son homogéneas (la variación es mínima).

Después de procesar los datos, estos se ajustaron a un modelo de Regresión y Correlación Múltiple, donde la variable respuesta Y: Inclinación del sondaje se modeló en función de las variables independientes X1: Profundidad del taladro (m), el parámetro operacional X2: Velocidad de rotación de la corona (RPM), el parámetro operacional X3: Caudal del fluido (gal/min), y el parámetro operacional X4: Pulldown (PSI); encontrándose que para el sondaje Yoni 244, existe una alta correlación entre las variables ($R= 0.951860157$), ver Tabla 6. También se puede verificar que existe una contribución significativa conjunta de las variables

independientes sobre la dependiente, registrándose el valor de p value (1.66563×10^{-22}), que resulta ser significativo al ser comparado con $\alpha = 0.05$.

Para el sondaje Yoni 245, existe una moderada correlación entre las variables ($R = 0.706956625$), ver Tabla 8. También se puede verificar que existe una contribución significativa conjunta de las variables independientes sobre la dependiente, registrándose el valor de p value (0.001257792), que resulta ser significativo al ser comparado con $\alpha = 0.05$.

El modelo de Regresión y Correlación Múltiple, para la variable respuesta Y: Azimut del sondaje se modeló en función de las variables independientes X1: Profundidad del taladro (m), el parámetro operacional X2: Velocidad de rotación de la corona (RPM), el parámetro operacional X3: Caudal del fluido (gal/min), y el parámetro operacional X4: Pulldown (PSI); encontrándose que para el sondaje Yoni 244, existe una alta correlación entre las variables ($R = 0.966755804$), ver Tabla 10. También se puede verificar que existe una contribución significativa conjunta de las variables independientes sobre la dependiente, registrándose el valor de p value (4.90889×10^{-26}), que resulta ser significativo al ser comparado con $\alpha = 0.05$.

Para el sondaje Yoni 245, existe una moderada correlación entre las variables ($R = 0.725306002$), ver Tabla 12. También se puede verificar que existe una contribución significativa conjunta de las variables independientes sobre la dependiente, registrándose el valor de p value (0.000669689), que resulta ser significativo al ser comparado con $\alpha = 0.05$.

Las perforaciones diamantinas realizadas en estos dos sondajes mostraron de manera real que la variación de estos parámetros de perforación tiene relación directa con el

control de la trayectoria (inclinación y azimut), evidenciadas en los resultados de las mediciones según el reporte de avance diario de perforación, y los datos estadísticos encontrados en el análisis. (Ver tabla 13).

4.2 Conclusiones

Se determinó la trayectoria de taladros variando el tipo de broca (2 -4 y 4 -7), variando los parámetros de perforación con sistema diamantina: X1: Profundidad del taladro (m), el parámetro operacional X2: Velocidad de rotación de la corona (RPM), el parámetro operacional X3: Caudal del fluido (gal/min), y el parámetro operacional X4: Pulldown (PSI).

Se concluye que los parámetros de perforación influyen de forma significativa en la inclinación (dip) del taladro. Es decir al variar los parámetros de perforación, también varía la inclinación del taladro. Al revisar las contribuciones individuales, se puede observar que solo la Profundidad influye significativamente en inclinación del sondaje Yoni 244, presentando un $p \text{ value} = 2.40397E-18$, que resulta ser menor a $\alpha = 0.05$. De igual manera se puede observar que el RPM y el fluido, influyen significativamente en la inclinación del sondaje Yoni 245, presentando un $p \text{ value} = 0.015344972$ y 0.040385839 respectivamente, que resulta ser menor a $\alpha = 0.05$.

Se concluye que los parámetros de perforación influyen de forma significativa en azimut del taladro. Es decir al variar los parámetros de perforación, también varía el azimut del taladro. Al revisar las contribuciones individuales se puede observar que la profundidad, el fluido y el pulldown, influyen significativamente en el azimut del

sondaje Yoni 244, presentando un p value= 4.70021E-17, 0.022917978 y 0.005499376, que resultan ser menor a $\alpha=0.05$.

Se concluye que al evaluar los resultados de la influencia del tipo de broca y los parámetros de perforación en la trayectoria del taladro, se evidencia que existe una contribución significativa conjunta de las variables independientes sobre la dependiente lo que queda en evidencia con el valor de p value menor a $\alpha=0.05$.

REFERENCIAS

- Arana, J. (2014) “Medición de la Trayectoria de Pozos de Prospección Geológica”. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Bowles Bros Diamantina. Manual técnico del perforista.
- Camberfort, H. (1962). Perforaciones y sondeos. 2 ed. Editorial Omega. Madrid. España. 149 p.
- Carbajal, A 2009. Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Instituto Tecnológico Geominero de España. 250 p.
- Fernández R, et al. (2015). Apuntes didácticos de Geología de Minas: Perforaciones en la exploración minera. Universidad nacional de La Plata. Argentina.
- Hernández, et al. (2014). Metodología de la Investigación. Instituto Politécnico Nacional. Tercera Edición. México.
- Lambert Barrientos A. (2010). Manual de Sondeos sistema de Perforación de Pozos con Corona Diamante.
- López, MJ. (2002). Geología Aplicada a la Ingeniería Civil. 2 ed. Editorial Dossat. Madrid. España.
- Marinovic A. (2015). Estudio comparativo de giroscopios y su aplicación para el registro de la trayectoria de taladros en exploraciones geológicas, Yanacocha, Perú. Tesis para título de Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte. Cajamarca, Perú.
- Nueva Minería y Energía (2019). Medición de trayectoria de pozos de sondaje. Edición N° 10 del 10 de Marzo de 2019. Informe preparado por Luis Silva Arrieta, Ingetrol. Chile.
- Silva, AL. (2008). Informe sobre la tarea de medir variaciones en la dimensión de pozos. Ingetrol Chile.

ANEXOS

Anexo 1

Instrumento N° 1: Tabla de perforación.

SONDAJE ANTONIO - 244												
FECHA	SONDAJE	LÍNEA	PROFUND. (m)	BROCA	RPM	FLUÍDO	PSI PULLDOWN	INCLIN. PROG	INCLIN. MEDIDA	AZIMUT PROG.	Azimet medida	OBSERVACIONES (Tipo de Roca)
08/09/2018	ANT-244	HWT	200	Tricono								
09/09/2018	ANT-244	HQ	250	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	255	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	275	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	300	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	305	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	310	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	315	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	320	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	325	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	330	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	335	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	340	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	345	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	350	2-4								
10/09/2018	ANT-244	HQ	355	2-4								
11/09/2018	ANT-244	HQ	360	2-4								
11/09/2018	ANT-244	HQ	365	2-4								
11/09/2018	ANT-244	HQ	370	2-4								
11/09/2018	ANT-244	HQ	375	2-4								
11/09/2018	ANT-244	HQ	380	2-4								
12/09/2018	ANT-244	HQ	385	2-4								
12/09/2018	ANT-244	HQ	390	2-4								
12/09/2018	ANT-244	HQ	395	2-4								
13/09/2018	ANT-244	HQ	400	2-4								
13/09/2018	ANT-244	HQ	405	2-4								
13/09/2018	ANT-244	HQ	410	2-4								
13/09/2018	ANT-244	HQ	415	2-4								
13/09/2018	ANT-244	HQ	420	2-4								
13/09/2018	ANT-244	HQ	425	2-4								
13/09/2018	ANT-244	HQ	430	2-4								
13/09/2018	ANT-244	HQ	435	2-4								
14/09/2018	ANT-244	HQ	440	2-4								
14/09/2018	ANT-244	HQ	445	2-4								
14/09/2018	ANT-244	HQ	450	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	455	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	460	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	465	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	470	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	475	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	480	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	485	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	490	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	495	2-4								
15/09/2018	ANT-244	HQ	500	2-4								
19/09/2018	ANT-244	HQ	505	2-4								
19/09/2018	ANT-244	HQ	510	2-4								
19/09/2018	ANT-244	HQ	515	2-4								
19/09/2018	ANT-244	HQ	520	2-4								
19/09/2018	ANT-244	HQ	525	2-4								
19/09/2018	ANT-244	HQ	530	2-4								

Anexo 2

Fotos de la perforación diamantina

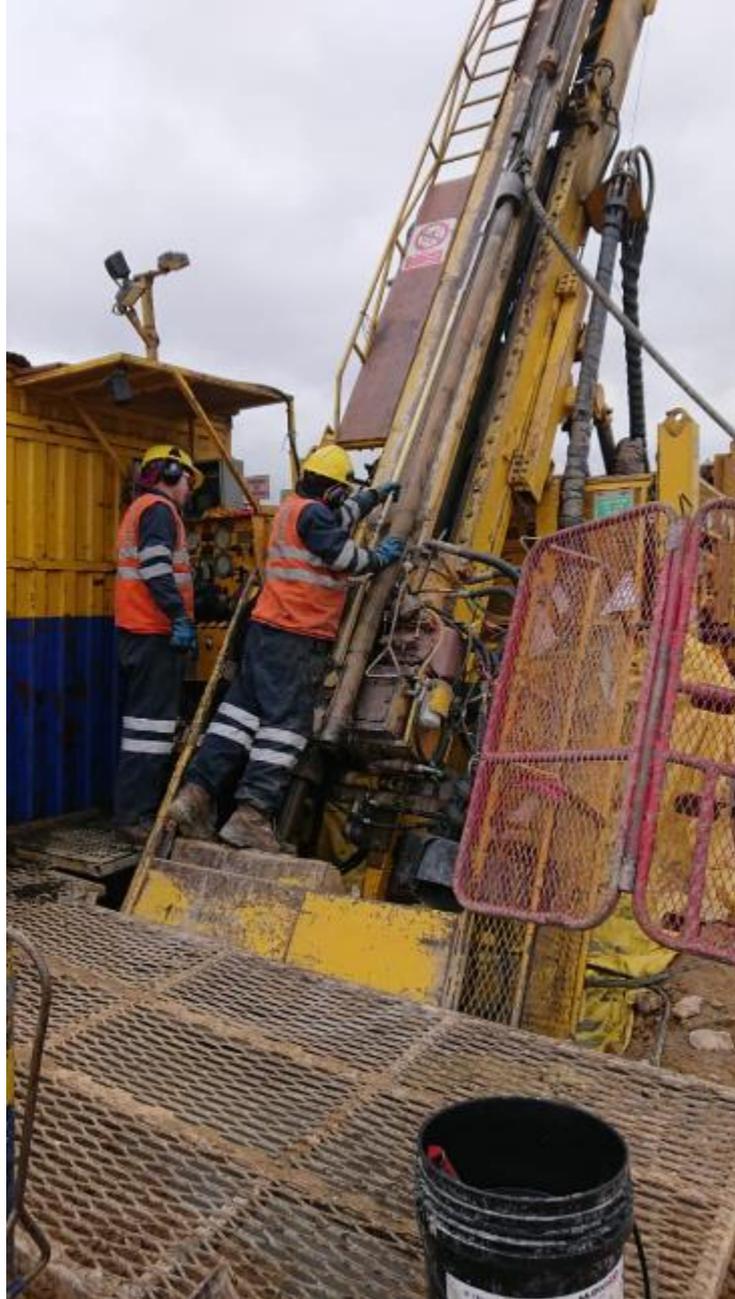


Foto 1: Ingreso del equipo de medición (Giroscopio)



Foto 2. Armado del equipo de medición



Foto 4. Contador para llegar a la profundidad indicada del equipo de medición



Foto 5. Muestra con canastilla cuando el terreno es muy suave



Foto 6. Operador realizando la prueba de medición