

ESTUDIO MONOGRÁFICO DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA IMPLICADOS EN
LA PRODUCCIÓN DE BROCAS PARA PERFORACIÓN DIAMANTINA.

Darwin Heisender Cárdenas Ardila

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Pedro Luis Delvasto Angarita

PhD. Ciencia y tecnología de materiales.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

En este texto quiero recalcar el gran esfuerzo y dedicación de mis padres, Johana Ardila y Darío Cárdenas, por los valores inculcados, el apoyo constante e incondicional que ayudaron a concluir mi proceso de formación. Admiración y amor en esta y todas las vidas para mis padres.

A mis hermanos Dairo y Zory, mi primo Cristian y mi abuela Carmen, quienes estuvieron presentes en todo este proceso; así como a mis tíos y primos, que siempre estuvieron al tanto de mi formación.

En memoria de mi tía Elda, que verá este logro desde el cielo y con su sonrisa iluminará todos mis días

A cada uno de los profesores que me guiaron en estos años de estudio, solo me queda decirles gracias y expresar mi absoluto respeto por cada uno de ellos. En especial a ciertos profesores que me guiaron en momentos de incertidumbre, tales como la profesora Viviana Güiza, que en el proceso me apoyó y me motivó para seguir con esta hermosa profesión; al profesor Pedro Delvasto, por su tiempo, dedicación, todos los consejos y conocimientos brindados, siendo mi guía fundamental para culminar este proceso.

A mis compañeros de estudio, que desde un principio se volvieron más que eso, siendo parte de mi familia. Siempre con su apoyo, alegría y acompañamiento hicieron de la universidad un lugar mejor.

Aunque hoy todos estemos en diferentes lugares, siempre van a estar en mi corazón: Luis, Evis, José, Jaidier, Kevin, Karoll, Johan, Stiven y Alejandro. A mi mejor amigo de toda la vida, Juan José, que desde pequeños soñábamos con ser profesionales.

También agradecer a una mujer que estuvo pendiente los dos últimos años, dándome fuerza y corrigiéndome cuando desviaba el rumbo, apoyándome en cada paso que daba y estando en momentos difíciles, con mucho amor y paciencia: Michelle H.

Finalmente, pero no menos importante, gracias a Dios por cada situación de donde me sacó y por cada momento de fortaleza que me brindó para poder ser quien soy.

Mis padres y Dios son los merecedores de todos mis logros.

(P.D.: ¡Lo logramos, mami!)

Darwin Heisender Cárdenas Ardila.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo General	13
1.2.2. Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1. Exploración de minerales.....	14
2.2. ¿Cómo se manufacturan las brocas de punta diamantina?.....	15
2.2.1. Selección de materiales.....	16
2.2.2. Preparación de la mezcla	16
2.2.3. Compactación y conformado	16
2.2.4. Sinterizado o infiltración.....	17
2.2.5. Ensamblaje de la broca	17
2.2.6. Acabados y control de calidad	17
2.3. Tipos de brocas y equipos de perforación.....	18
2.3.1. Tipos de brocas	18
2.3.2. Equipos de perforación	19
2.4. ¿Por qué se prefiere la exploración con brocas de puntas diamantina?.....	20
3. Metodología	22
3.1. Revisión bibliográfica y recopilación de información técnica	22
3.2. Revisión, clasificación y síntesis de la información disponible.	22
3.3. Elaboración informe final	22

4. Marco conceptual.....	23
4.1. Enfoque conceptual de la manufactura de herramientas diamantadas.....	23
4.2. Importancia del control de calidad de la manufactura	23
4.3. Aplicación conceptual de las brocas diamantinas en la exploración minera	24
4.4. Conceptos claves.....	24
5. Análisis de la investigación monográfica	26
5.1. Proceso de manufactura de brocas diamantinas.....	26
5.2. Selección de materiales y formulación de la matriz	26
5.3. Mezclado y granulación.....	26
5.4. Compactación en moldes	27
5.5. Rutas de consolidación de la matriz.....	27
5.5.1. Sinterizado convencional y prensado en caliente	27
5.5.2. Infiltración.....	27
5.5.3. Brazing o soldadura fuerte	28
5.5.4. Electro-Discharge Sintering (EDS).....	28
5.6. Mecanizado y diseño de la corona	29
5.7. Ensamble al cuerpo de la broca	29
5.8. Apertura, verificación y liberación	29
5.9. Análisis de los materiales en la fabricación de brocas diamantinas	31
5.9.1. El diamante como material de corte.....	31
5.9.2. La matriz metálica como soporte del diamante	32
5.9.3. Influencia en el rendimiento y la durabilidad	33
6. Estudio dimensional y radiográfico de una broca comercial real	35

7. Conclusiones	40
8. Recomendaciones	41
Referencias Bibliográficas	43

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Conceptos técnicos relacionados con la maufactura de brocas diamantinas.</i>	25
Tabla 2. <i>Comparación de principales maeriales empleados en la fabricación de brocas diamantinas.</i>	34

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Proceso de fabricación de brocas diamantadas</i>	30
Figura 2. <i>Métodos de consolidación de segmentos diamantados y sus principales características.</i>	31
Figura 3. <i>Vista frontal broca diamantina</i>	35
Figura 4. <i>Vista lateral broca diamantina, creada en solidwork formato 3D.</i>	36
Figura 5. <i>Vista frontal broca diamantina, creada en solidwork formato 3D.</i>	37
Figura 6. <i>Radiografía Vista frontal broca diamantina.</i>	38
Figura 7. <i>Planos broca con punta diamantina</i>	39

Resumen

Título: Estudio monográfico de los procesos de manufactura implicados en la producción de brocas para perforación diamantina.

Autor: Darwin Heisender Cárdenas Ardila.

Palabras Clave: Broca, Diamantina, Perforación, Metalurgia de polvos, Corte y abrasión con diamante, Herramientas diamantadas.

Descripción: En este documento de investigación se analiza los procesos de manufactura implicados en la producción de brocas para perforación diamantina, busca profundizar en la comprensión de cómo se fabrican estas herramientas esenciales para la minería y la exploración geológica. Las brocas diamantinas son instrumentos de alto rendimiento que permiten acceder a formaciones rocosas complejas, facilitando la extracción de testigos de gran valor para la industria. Su importancia radica en que combinan materiales de extrema dureza, como el diamante sintético, con matrices metálicas cuidadosamente diseñadas para soportar condiciones de desgaste, presión y temperatura elevadas.

La investigación se centra en describir y analizar los principales procesos de manufactura que intervienen en su producción, desde la selección de polvos metálicos y abrasivos, pasando por técnicas como la metalurgia de polvos, el prensado en caliente, el sinterizado o la infiltración, hasta los acabados finales que garantizan la calidad y eficiencia de la herramienta. A través de este estudio monográfico, se busca comparar las ventajas y limitaciones de cada método, así como identificar tendencias actuales y retos técnicos que enfrenta la industria en términos de optimización de costos, durabilidad y sostenibilidad.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita. PhD. Ciencia y tecnología de materiales.

Abstract

Title: Monographic Study of the Manufacturing Processes Involved in the Production of Diamond Drill Bits.

Author(s): Darwin Heisender Cárdenas Ardila.

Key Words: Drill bit, Diamond drilling, Powder metallurgy, Diamond cutting and abrasion, Diamond tools.

Description: This research document analyzes the manufacturing processes involved in the production of diamond drill bits, aiming to deepen the understanding of how these essential tools for mining and geological exploration are produced. Diamond drill bits are high-performance instruments that enable access to complex rock formations, facilitating the recovery of core samples of great value for the industry. Their importance lies in combining extremely hard materials, such as synthetic diamond, with carefully engineered metallic matrices capable of withstanding severe wear, pressure, and elevated temperatures. The study focuses on describing and analyzing the main manufacturing processes involved in their production, from the selection of metallic powders and abrasives, through techniques such as powder metallurgy, hot pressing, sintering, and infiltration, to the final finishing operations that guarantee tool quality and efficiency. Through this monographic study, the research seeks to compare the advantages and limitations of each method, as well as to identify current trends and technical challenges faced by the industry in terms of cost optimization, durability, and sustainability.

* Undergraduate work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Adviser: Pedro Luis Delvasto Angarita. PhD in Materials Science and Technology.

Introducción

La perforación diamantina se ha consolidado como una de las técnicas más relevantes en la exploración geológica y minera, ya que permite obtener testigos de roca continuos y de alta calidad, fundamentales para el análisis de formaciones y la toma de decisiones en proyectos extractivos (Dellinger & Livesay, 1973). Las brocas diamantinas, núcleo de esta tecnología, son herramientas especializadas que combinan materiales de extrema dureza con procesos de manufactura avanzados, lo que les permite resistir condiciones de alta presión, abrasión y temperatura (Yang et al., 2020). Desde sus primeras aplicaciones en la minería de oro y otros minerales a principios del siglo XX (Dellinger & Livesay, 1973), estas brocas han evolucionado hasta convertirse en componentes de gran sofisticación tecnológica.

La perforación con brocas diamantinas revolucionó los métodos de prospección al ofrecer mayor precisión y eficiencia en comparación con las técnicas tradicionales (Glowka et al., 1995). Décadas más tarde, con el surgimiento de nuevas rutas de manufactura, la metalurgia de polvos se posicionó como una alternativa clave para la producción de matrices metálicas que mejoran la retención de partículas de diamante y prolongan la vida útil de las brocas (Konstanty & Tyrala, 2021)

En el desarrollo de los procesos de manufactura, inicialmente la fabricación se limitaba a técnicas tradicionales de fijación de diamantes naturales en cuerpos metálicos. Sin embargo, la introducción de la metalurgia de polvos revolucionó el sector, al permitir diseñar matrices con propiedades mecánicas controladas y mejorar la retención de partículas diamantinas mediante procesos como el prensado en caliente y el sinterizado (Cygan-Bączek & Romański, 2023).

A su vez, investigaciones recientes han destacado la importancia de técnicas emergentes como la sinterización por descarga eléctrica (EDS) y el uso de aleaciones activas para soldadura

fuerte (brazing), que ofrecen mejoras en la densificación y la unión diamante-matriz, ampliando la vida útil de las herramientas Long et al. (2018) Otros estudios han abordado la adhesión metal-diamante y la infiltración protectora, destacando cómo la combinación de recubrimientos y metales de transición mejora la resistencia térmica y mecánica del conjunto (Loginov et al., 2023).

La innovación reciente apunta a la sostenibilidad y autorrenovación de las herramientas, incorporando materiales avanzados que optimizan la eficiencia energética y reducen el desgaste (Tian et al., 2025). En conjunto, estos avances posicionan a las brocas diamantinas como un pilar tecnológico en la exploración mineral moderna, reflejando el progreso continuo en la ciencia de materiales y los procesos de manufactura metalúrgica (Han et al., 2023).

1.1. Justificación

El estudio de los procesos de manufactura implicados en la producción de brocas para perforación diamantina se enfoca en un aspecto crítico de la industria minera y de perforación, donde la calidad y eficiencia de las herramientas son fundamentales para el éxito operativo. Analizar estos procesos permitirá identificar las etapas clave, los materiales más adecuados y las tecnologías que optimizan la producción, lo cual es vital para mejorar la competitividad en el mercado.

La investigación también explorará cómo los avances tecnológicos y la innovación impactan en la calidad y durabilidad de las brocas, proporcionando un marco de referencia actualizado y relevante para la industria. Este estudio contribuirá a la comprensión y mejora de los procesos, impulsando desarrollos que satisfagan las demandas actuales del sector.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Describir los procesos de manufactura implicados en la producción de brocas para perforación diamantina, identificando cada etapa de la fabricación, los materiales empleados y las técnicas de ensamblaje, con el fin de proporcionar una visión detallada y comprensiva de la cadena de producción.

1.2.2. Objetivos Específicos

Identificar y describir las principales etapas del proceso de manufactura de brocas diamantinas, desde la selección de materiales hasta el acabado final del producto.

Analizar las características de los materiales utilizados en la fabricación de brocas para perforación diamantina, detallando sus propiedades y cómo influyen en el rendimiento y durabilidad de las brocas.

2. Marco Teórico

El marco teórico del presente estudio desarrolla los fundamentos técnicos y científicos que sustentan la fabricación y aplicación de las brocas diamantinas utilizadas en la perforación geológica. A través de una revisión exhaustiva de fuentes especializadas ((Konstanty, 2005); (Denny, 1930); (Long et al., 2018)), se analizan los procesos metalúrgicos, los materiales empleados y las innovaciones tecnológicas que han permitido optimizar la eficiencia y durabilidad de estas herramientas.

En los últimos años, los desarrollos en metalurgia de polvos han permitido fabricar brocas diamantinas con matrices más homogéneas y predecibles. (Luno-Bilbao et al., 2021) demostraron que el control de la granulometría y la composición de las aleaciones de base Co-Fe-Cu mejora la densificación y la estabilidad térmica durante el sinterizado, lo que se traduce en una mayor retención del diamante y una reducción del desgaste prematuro de la matriz. Estos resultados consolidan el papel de la metalurgia de polvos como una vía esencial para optimizar el rendimiento de las brocas utilizadas en exploración mineral.

2.1. Exploración de minerales

La exploración de minerales es una de las fases más importantes dentro de la industria minera, pues constituye el punto de partida para conocer la viabilidad de un yacimiento. Esta etapa busca determinar no solo la presencia de minerales, sino también su calidad, volumen y las condiciones en las que se encuentran. Para lograrlo, las técnicas de perforación juegan un papel decisivo, ya que de ellas depende la obtención de muestras que reflejen fielmente la realidad del subsuelo. En este sentido, la perforación diamantina se ha convertido en una de las herramientas más confiables, ya que permite extraer testigos cilíndricos de roca con un alto nivel de precisión, los cuales son fundamentales en la toma de decisiones para proyectos mineros. Desde sus primeros

registros en la minería aurífera, (Denny, 1930) destacó cómo el uso de brocas diamantinas transformó el trabajo de exploración, al ofrecer perforaciones más profundas, rápidas y exactas que las obtenidas con métodos convencionales.

La conexión entre la exploración de minerales y las brocas diamantinas es estrecha: el rendimiento de estas herramientas define en gran medida la calidad de la información geológica obtenida. A medida que la ingeniería metalúrgica ha evolucionado, también lo han hecho los procesos de fabricación de las brocas. En un inicio se utilizaban diamantes naturales fijados en matrices metálicas, pero la introducción de la metalurgia de polvos marcó un cambio fundamental. Según (Konstanty, 2005), este proceso permitió diseñar matrices con propiedades controladas, mejorando la retención de los granos de diamante y extendiendo la vida útil de la herramienta, lo que impacta directamente en la eficiencia de la exploración.

Los avances en la manufactura han ido de la mano con las necesidades de la industria minera. (Filgueira & Garcia Pinatti, 2003) demostraron que técnicas como la compactación en caliente y el forjado rotatorio generan materiales de mayor densidad y resistencia, lo cual se traduce en brocas más duraderas frente a condiciones de alta abrasión. Asimismo, (Egan & Melody, 2009) introdujeron la sinterización por descarga eléctrica (EDS) como un método innovador capaz de densificar segmentos diamantados de forma más rápida y con mejores propiedades. Por otra parte, (Long et al., 2018) revisaron el desarrollo de aleaciones en polvo para procesos de brazing, evidenciando cómo estas uniones avanzadas entre el diamante y la matriz metálica mejoran la confiabilidad y la resistencia de las herramientas en operaciones de perforación exigentes.

2.2. ¿Cómo se manufacturan las brocas de punta diamantina?

Una vez delimitado el tema, se llevó a cabo la búsqueda de literatura especializada en bases de datos académicas de la universidad, priorizando publicaciones recientes (últimos 10 años) y de

alto impacto. Se seleccionaron artículos científicos originales, revisiones bibliográficas, capítulos de libros y tesis de posgrado que trataran sobre tecnologías bioelectroquímicas aplicadas.

2.2.1. Selección de materiales

Para la selección de materiales se tuvieron presentes los siguientes:

- **Diamantes:** Se utilizan generalmente diamantes sintéticos policristalinos (PCD) o granos de diamante de alta calidad.
- **Matriz metálica:** Puede estar compuesta por polvos de cobalto, hierro, cobre, tungsteno o sus aleaciones, que sirven como soporte para mantener los diamantes en su lugar.

2.2.2. Preparación de la mezcla

Los polvos metálicos se mezclan cuidadosamente con los granos de diamante. Esta combinación se formula para equilibrar la resistencia al desgaste de la matriz y la retención del diamante (Konstanty, 2005)

2.2.3. Compactación y conformado

El polvo mezclado se coloca en un molde con la geometría del segmento de la broca y se compacta. Existen varias técnicas:

- **Prensado en frío:** compactación inicial
- **Prensado en caliente (Hot pressing):** simultáneamente aplica calor y presión para densificar la pieza.

- **Forjado rotatorio:** mejora la densidad y la orientación de las partículas (Filgueira & Garcia Pinatti, 2003).

2.2.4. Sinterizado o infiltración

- **Sinterizado:** Se calienta el compacto a temperaturas inferiores al punto de fusión, lo que permite unir las partículas y consolidar la matriz.
- **Infiltración:** Se introduce un metal líquido (ej. cobre o aleaciones) que penetra en la matriz porosa, mejorando su cohesión y propiedades mecánicas.
- **EDS (Electric Discharge Sintering):** técnica más reciente que usa descargas eléctricas para densificar rápidamente los segmentos diamantados (Egan & Melody, 2009)

2.2.5. Ensamblaje de la broca

Los segmentos diamantados sinterizados o infiltrados se sueldan (generalmente mediante brazing) al cuerpo de la broca, que suele estar hecho de acero de alta resistencia. Nuevos desarrollos en metales de aporte en polvo han optimizado esta unión, evitando desprendimientos del diamante (Long et al., 2018)

2.2.6. Acabados y control de calidad

Finalmente, la broca se somete a procesos de rectificado y pulido para asegurar que la geometría sea la adecuada. Se realizan pruebas de desgaste, resistencia mecánica y retención de diamante antes de su uso en campo.

2.3. Tipos de brocas y equipos de perforación

Las brocas diamantinas se clasifican principalmente en tres categorías: brocas impregnadas, brocas PDC (Polycrystalline Diamond Compact) y brocas de diamante natural engastado. Cada una responde a necesidades específicas de perforación y presenta ventajas y limitaciones que deben considerarse al planificar un proyecto.

2.3.1. Tipos de brocas

Las **brocas impregnadas de diamante**, son elaboradas a través de procesos de metalurgia de polvos. En su fabricación, pequeños granos de diamante sintético se distribuyen en una matriz metálica sinterizada, diseñada para desgastarse de manera controlada. Esto permite que, a medida que los diamantes superficiales se deterioran, se expongan nuevos granos, manteniendo constante la capacidad de corte incluso en rocas de alta dureza, como granitos o basaltos. Investigaciones recientes han demostrado que la incorporación de aditivos en la matriz, como el carburo de boro (CrB_2), puede aumentar significativamente la resistencia al desgaste y prolongar la vida útil de este tipo de brocas (Mechnik et al., 2021).

Por otro lado, las **brocas PDC** se basan en el uso de cortadores de diamante policristalino compactado sobre un sustrato de carburo de tungsteno. Estos elementos funcionan como cinceles extremadamente duros que fragmentan la roca por cizallamiento, lo que les permite alcanzar altas tasas de penetración en formaciones blandas y medianamente duras. Experiencias en la perforación de pozos geotérmicos han mostrado que las PDC pueden perforar intervalos considerables de roca consolidada con gran eficiencia, siempre que se controlen adecuadamente parámetros como el peso sobre la broca y la refrigeración mediante fluidos (Imaizumi et al., 2019).

Las **brocas de diamante natural engastado**, aunque menos utilizadas en la actualidad, representan un diseño clásico en el que cristales grandes de diamante se colocan manualmente en

la superficie de la corona. Estas herramientas ofrecen altas velocidades de penetración inicial, pero tienen la desventaja de una vida útil más limitada, ya que los diamantes expuestos no se reemplazan con el desgaste. Su uso ha quedado relegado a aplicaciones específicas y a condiciones geológicas menos exigentes (Denny, 1930)

2.3.2. Equipos de perforación

La perforación diamantina no depende únicamente del tipo de broca que se utilice; su éxito está estrechamente vinculado con la integración de un conjunto de equipos y sistemas que garantizan que la herramienta funcione en condiciones óptimas. Estos equipos complementarios hacen posible que la broca alcance las profundidades deseadas, se mantenga refrigerada y que los testigos extraídos conserven su integridad para los análisis posteriores.

El **taladro diamantado de núcleo** constituye el corazón del sistema. Estos equipos, que pueden instalarse en superficie, subterráneos o en plataformas móviles, están diseñados para girar a altas revoluciones y aplicar un peso controlado sobre la broca. Gracias a ello, se logra obtener testigos cilíndricos de roca que resultan esenciales para la exploración mineral (Denny, 1930)

Conectado al taladro se encuentra el **sistema de varillaje o barras de perforación**, el cual transmite tanto el movimiento rotacional como el flujo de los fluidos de perforación hasta la broca. Estas barras, fabricadas en acero de alta resistencia, son huecas para permitir el paso del agua o lodo. Un aspecto clave en su operación es el cuidado de las roscas, ya que un acoplamiento defectuoso puede provocar pérdidas de energía, desgastes prematuros o incluso la rotura del varillaje (Boyles, n.d.)

Otro componente fundamental es el **core barrel o porta testigo**, encargado de alojar la broca y de almacenar el cilindro de roca extraído. Según la necesidad, puede usarse en versión de simple, doble o triple tubo. Asociado a este sistema se encuentra la reaming shell, un anillo

reforzado con diamantes que se coloca detrás de la broca para estabilizar el pozo y mantener constante el diámetro de perforación (Imaizumi et al., 2019).

El proceso sería inviable sin un **sistema de circulación de fluidos**, mediante bombas de alta presión, se hace circular agua o lodo hasta la broca, lo cual cumple tres funciones esenciales: refrigerar el diamante, evacuar los recortes de roca y reducir la fricción entre la broca y el material perforado. El control del flujo es particularmente importante en brocas PDC e impregnadas, pues garantiza que los cortadores trabajen en condiciones seguras y con menor (Mechnik et al., 2021).

En condiciones de inestabilidad del terreno, es necesario recurrir a las **zapatillas (casing shoes)**, que permiten entubar el pozo y evitar que las paredes colapsen en las primeras fases de la perforación. Estas zapatillas suelen estar reforzadas con diamantes para atravesar capas iniciales de material suelto sin comprometer la alineación del varillaje (Boyles, n.d.)

Por último, la perforación diamantina requiere de una serie de **equipos auxiliares** en superficie, como winches para manejar las barras, plataformas de soporte, sistemas hidráulicos y eléctricos de control, además de cajas de almacenamiento que permiten conservar ordenadamente los testigos recuperados para su análisis posterior (Denny, 1936).

2.4. ¿Por qué se prefiere la exploración con brocas de puntas diamantina?

En los proyectos de exploración mineral, la selección de la herramienta de perforación no es un detalle menor: de ella depende la calidad de la información que se obtiene del subsuelo y, en consecuencia, la toma de decisiones sobre la viabilidad de un yacimiento. Por esta razón, las brocas con punta diamantina se han convertido en la opción más utilizada a nivel industrial, desplazando a otros diseños más convencionales.

Una de las razones principales es su capacidad para enfrentar formaciones extremadamente duras. El diamante, siendo el material natural más duro conocido, permite cortar rocas como

granitos, basaltos o cuarcitas con una eficiencia que otras herramientas no pueden alcanzar. Denny (1936) ya destacaba que estas brocas marcaron un cambio en la exploración aurífera, pues posibilitaron alcanzar profundidades antes impensadas sin comprometer la calidad del pozo.

Además de su resistencia, estas brocas ofrecen una ventaja decisiva: la recuperación de testigos cilíndricos de roca en excelente estado. Gracias a ello, el geólogo no solo obtiene una muestra del material, sino una representación fiel de la estratigrafía, las fracturas y la mineralización del terreno. En (Boyles, n.d.) enfatiza que la confiabilidad de estos testigos es lo que convierte a la perforación diamantina en un método insustituible para estudios de exploración.

La preferencia también se explica por los avances en su manufactura y diseño. La introducción de la metalurgia de polvos permitió fabricar matrices metálicas que controlan el desgaste y liberan progresivamente nuevos diamantes, lo que aumenta la vida útil de la herramienta (Konstanty, 2005) Más recientemente, (Ratov et al., 2024) demostraron que al incorporar aditivos como el carburo de boro en las matrices, las brocas impregnadas mejoran su resistencia al desgaste, incrementando la eficiencia en perforaciones de rocas duras.

En el caso de las brocas PDC (Polycrystalline Diamond Compact), su diseño con cortadores de diamante policristalino ha demostrado ser especialmente eficiente en rocas de dureza media. En estudios geotérmicos, se observó que estas brocas lograban avanzar largos intervalos con altos índices de penetración y menor tiempo de operación, lo que representa un ahorro significativo en costos (Imaizumi et al., 2019).

3. Metodología

3.1. Revisión bibliográfica y recopilación de información técnica

El primer paso en la metodología consiste en realizar una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con los procesos de manufactura de brocas diamantinas. Para ello, se consultarán fuentes clave como las obras de Konstanty (2006), Denny (1911), (Long, He, & Sekulic, 2018) y Wood (2016), las cuales abordan en profundidad los fundamentos de la metalurgia de polvos, la perforación diamantina y la aplicación de materiales policristalinos de diamante en la industria petrolera.

3.2. Revisión, clasificación y síntesis de la información disponible.

Una vez recopilada la bibliografía, se procederá a realizar una revisión crítica y clasificación de la información obtenida, con el propósito de garantizar la coherencia, relevancia y actualidad de los datos en relación con los objetivos del estudio. Esta revisión del estado del arte permitirá situar el proyecto dentro del contexto de los desarrollos más recientes en la fabricación de brocas diamantinas, analizando los avances tecnológicos y científicos más destacados, así como comparando los métodos tradicionales de manufactura con las innovaciones actuales que buscan optimizar la eficiencia, durabilidad y precisión de estas herramientas. Con base en dicha revisión, se establecerán los métodos de análisis y evaluación más adecuados para determinar la calidad de los procesos de manufactura, la selección de materiales y las tecnologías empleadas, de modo que los resultados obtenidos reflejen un enfoque integral, técnico y sustentado en criterios científicos.

3.3. Elaboración informe final

En la última fase de este proyecto, se llevará a cabo la elaboración del informe final que incluirá todos los resultados obtenidos a lo largo de la investigación. El informe se estructurará de

manera que cubra todos los objetivos específicos y generales propuestos, y se enfocará en proporcionar una visión clara y detallada de los procesos de manufactura de brocas diamantinas.

4. Marco conceptual

El presente marco conceptual busca ofrecer una base clara y comprensible sobre los términos y fundamentos que se relacionan con la fabricación de brocas diamantinas. En esta parte del trabajo se reúnen los conceptos más importantes que permiten entender cómo interactúan los materiales, los procesos metalúrgicos y las tecnologías empleadas en la producción de estas herramientas.

4.1. Enfoque conceptual de la manufactura de herramientas diamantadas

El diseño y la producción de brocas diamantinas se sustentan en una combinación de ciencia de materiales, ingeniería metalúrgica y conocimiento aplicado de los procesos de unión. Desde un enfoque conceptual, la manufactura de estas herramientas implica comprender la interacción entre el diamante y la matriz metálica, dos materiales con propiedades contrastantes que, al integrarse correctamente, generan un sistema de corte de alta eficiencia.

La metalurgia de polvos y los procesos de sinterizado han permitido desarrollar matrices con características controladas de dureza, porosidad y resistencia al desgaste (Konstanty, 2006). Estos avances conceptuales redefinen el papel del ingeniero metalúrgico, quien debe integrar conocimientos sobre resistencia mecánica, termodinámica y ciencia de superficies para lograr una herramienta duradera y precisa.

4.2. Importancia del control de calidad de la manufactura

Desde una perspectiva conceptual, el control de calidad representa uno de los pilares fundamentales en la producción de herramientas diamantadas. La verificación dimensional, la

inspección radiográfica y los ensayos de desgaste son procesos que aseguran la integridad estructural y funcional de la broca antes de su uso.

Este enfoque se basa en el principio de que una herramienta es tan confiable como su proceso de fabricación. En consecuencia, la ingeniería aplicada debe contemplar la trazabilidad del material, la homogeneidad microestructural y la eficiencia de la unión diamante-metal, elementos que determinan la vida útil de la herramienta y su comportamiento bajo condiciones de alta carga o temperatura (Long, He & Sekulic, 2018).

4.3. Aplicación conceptual de las brocas diamantinas en la exploración minera

Conceptualmente, la broca diamantina no es solo una herramienta de corte, sino un medio de conocimiento. Su función principal es permitir el acceso al subsuelo para obtener testigos geológicos que aportan información sobre la composición, la estructura y el potencial económico de un yacimiento (Denny, 1936).

En este sentido, su fabricación trasciende el ámbito metalúrgico, ya que está directamente ligada a la confiabilidad de los datos geológicos. Una broca mal diseñada o de baja calidad puede alterar la interpretación del terreno o comprometer la toma de decisiones en la exploración. Por ello, el marco conceptual también considera la broca diamantina como un instrumento de precisión científica, donde la ingeniería de materiales se pone al servicio de la geología y la sostenibilidad minera.

4.4. Conceptos claves

Con el fin de mantener la coherencia terminológica del proyecto y facilitar la comprensión de los términos más técnicos, se presenta a continuación una tabla bilingüe (español-inglés) que recopila las palabras clave empleadas en el desarrollo de esta investigación.

Tabla 1.

Conceptos técnicos relacionados con la maufactura de brocas diamantinas.

Español	Inglés	Definición
Broca diamantina	Diamond drill bit	Herramienta de corte utilizada en perforación geológica y minera, compuesta por diamantes naturales o sintéticos insertados en una matriz metálica (Denny, 1936).
Metalurgia de polvos	Powder metallurgy	Proceso de manufactura que utiliza polvos metálicos para producir componentes mediante compactación y sinterización (Konstanty, 2006).
Sinterizado	Sintering	Tratamiento térmico aplicado a polvos compactados para consolidarlos y aumentar su densidad y resistencia (Konstanty, 2006).
Matriz metálica	Metal matrix	Material que rodea y sostiene las partículas de diamante en la broca, diseñado para desgastarse controladamente y exponer nuevos filos de corte (Konstanty, 2006).
Diamante policristalino (PCD)	Polycrystalline diamond (PCD)	Material sintético formado por partículas microscópicas de diamante sinterizadas bajo alta presión y temperatura, ampliamente usado en herramientas de corte (Filgueira & Pinatti, 2003).
Infiltración	Infiltration	Proceso de manufactura donde un metal líquido penetra en una matriz porosa para consolidar la estructura y mejorar sus propiedades (Konstanty, 2013).
Compactación en caliente	Hot pressing	Técnica de consolidación en la que el polvo y el diamante son comprimidos a alta temperatura y presión para formar segmentos de la broca (Konstanty, 2006).
Abrasión	Abrasion	Desgaste superficial causado por la fricción y el contacto repetido de partículas duras, fenómeno que afecta tanto a la broca como al material perforado (Konstanty, 2006).
Testigo de perforación	Core sample	Cilindro de roca extraído mediante perforación diamantina, usado para estudios geológicos y de caracterización de yacimientos (Denny, 1936).
Retención de diamante	Diamond retention	Capacidad de la matriz metálica para mantener los granos de diamante firmemente sujetos durante el proceso de corte (Konstanty, 2006).

5. Análisis de la investigación monográfica

5.1. Proceso de manufactura de brocas diamantinas

La manufactura de brocas diamantinas constituye un proceso altamente especializado, en el cual confluyen principios de metalurgia, ciencia de materiales y experiencia en perforación. El propósito central es producir una herramienta que resista condiciones extremas de trabajo y, al mismo tiempo, garantice que los granos de diamante se mantengan estables en la matriz metálica, liberándose de forma controlada cuando se embotan para exponer nuevos filos (Konstanty, 2006).

5.2. Selección de materiales y formulación de la matriz

La elección de los materiales es el punto de partida en la fabricación de las brocas diamantinas. Se seleccionan granos de diamante —usualmente sintéticos— atendiendo a variables como tamaño, concentración y resistencia. En formaciones rocosas altamente abrasivas, se prefieren granos finos con mayor concentración, mientras que en rocas menos exigentes se emplean granos de mayor tamaño que permiten un corte más agresivo. La matriz metálica que dará soporte al diamante está conformada por polvos de cobalto, bronce o níquel, con posibles refuerzos de carburos como WC o TiC, que regulan la dureza y la resistencia al desgaste. La correcta formulación de esta matriz resulta decisiva para el comportamiento de la herramienta en campo (Konstanty, 2006).

5.3. Mezclado y granulación

Una vez definidos los materiales, se procede al mezclado. Este debe realizarse de manera suave y homogénea, con equipos como mezcladores V-blender o Turbula®, evitando fracturas en los granos de diamante. En ocasiones se emplean molinos de bolas de baja energía, aunque su uso es limitado debido al riesgo de dañar el abrasivo. La mezcla incorpora además aglutinantes

orgánicos, como estearatos o alcohol polivinílico, que mejoran la compactación y el desmoldeo (Konstanty, 2006).

Si se requiere, el material se somete a un proceso de granulación para optimizar la fluidez de la mezcla y lograr una densidad más uniforme al llenar los moldes.

5.4. Compactación en moldes

La mezcla resultante se compacta en moldes de acero o grafito, generando preformas denominadas “compactos verdes”. El prensado puede ser uniaxial —más económico y rápido— o isostático en frío (CIP), técnica que asegura una densidad uniforme y reduce el riesgo de defectos posteriores. Estos compactos verdes tienen la resistencia suficiente para manipularse antes de su consolidación definitiva (Konstanty, 2006).

5.5. Rutas de consolidación de la matriz

5.5.1. Sinterizado convencional y prensado en caliente

En el sinterizado convencional, los compactos se colocan en hornos de vacío o atmósferas controladas, alcanzando temperaturas de entre 750 °C y 900 °C durante aproximadamente una hora. Se trabaja con vacíos de hasta 10^{-5} mbar, lo que previene la oxidación y protege al diamante. Este proceso permite la difusión de las partículas metálicas y la consolidación de la matriz (Konstanty, 2006).

El prensado en caliente es una variante más eficiente: además de calor, se aplica presión mediante electrodos de grafito. Este método reduce tiempos, mejora la densificación y genera una atmósfera reductora interna que resguarda los diamantes (Egan & Melody, 2009).

5.5.2. Infiltración

La infiltración parte de un compacto poroso al que se introduce cobre o bronce fundido. El proceso se desarrolla a temperaturas cercanas a los 1100 °C, ligeramente superiores al punto de

fusión del cobre (1083 °C). El metal líquido penetra los poros por capilaridad, solidificando la estructura. Este método es más económico y adecuado para piezas grandes, aunque su resistencia mecánica final es inferior a la obtenida mediante sinterizado en caliente (Long, He & Sekulic, 2018).

(Cygan-Bączek & Romański, 2023) propusieron el uso de mezclas autoprotectoras para los procesos de infiltración metálica, capaces de reducir la oxidación del diamante durante el calentamiento. Este enfoque, basado en aleaciones Cu-Sn-Ti con aditivos cerámicos finos, facilita una mejor humectación de las partículas diamantadas y una unión metal-diamante más estable. Tales avances representan un paso decisivo en la producción de segmentos impregnados con mayor integridad estructural y durabilidad en condiciones extremas de perforación.

5.5.3. Brazing o soldadura fuerte

El brazing se utiliza especialmente en brocas de monocapa o de diamante natural engastado. Consiste en fijar los granos de diamante sobre un sustrato metálico empleando aleaciones activas como Ag-Cu-Ti, Cu-Sn-Ti o Ni-Cr. Los rangos de temperatura van de 450 °C a 900 °C, con procesos realizados en hornos de vacío o mediante inducción localizada. El control de la temperatura y el tiempo de exposición es fundamental, ya que por encima de 760 °C el diamante puede grafitizarse, perdiendo sus propiedades (Long, He & Sekulic, 2018).

5.5.4. Electro-Discharge Sintering (EDS)

El EDS constituye una innovación tecnológica que reduce drásticamente los tiempos de producción. Este método emplea descargas eléctricas de alta intensidad combinadas con presión mecánica, consolidando el compacto en minutos. Los equipos utilizados alcanzan voltajes de hasta 3300 V y energías cercanas a 38 kJ. El proceso se inicia con una presión de 10 kN sin corriente,

seguida de pulsos eléctricos con fuerzas entre 27 y 35 kN, lo que densifica el material de manera uniforme (Egan & Melody, 2009).

5.6. Mecanizado y diseño de la corona

Una vez consolidados los segmentos o coronas, se mecanizan para ajustar dimensiones, rectificar superficies y abrir los canales de refrigeración. El perfil final de la broca —plano, turbo o serrado— se adapta a la dureza y abrasividad de la roca objetivo. En esta etapa se realizan controles de calidad como pruebas de densidad, dureza, resistencia a flexión y análisis microestructurales mediante técnicas metalográficas (Konstanty, 2006).

5.7. Ensamble al cuerpo de la broca

Los segmentos se ensamblan al cuerpo de la broca, que puede ser de acero o matricial. Los cuerpos de acero destacan por su ductilidad y costo reducido, mientras que los matriciales son más resistentes a la erosión. El ensamble se efectúa mediante brazing, cuidando la concentricidad y el balance dinámico. En el caso de las brocas PDC, los cortadores policristalinos se fijan con aleaciones de Ni o Ag-Cu sobre un cuerpo diseñado con blades y boquillas de refrigeración (Imaizumi et al., 2019).

5.8. Apertura, verificación y liberación

Finalmente, las brocas se someten a un proceso de apertura o “dress”, que consiste en trabajar la corona sobre materiales abrasivos para exponer los primeros diamantes de manera uniforme. Después, se realizan verificaciones del flujo de refrigeración, la integridad estructural y los parámetros de operación recomendados. Cada lote se identifica con registros de trazabilidad, incluyendo materiales, curvas térmicas y resultados de control de calidad (Boyles, n.d.).

Los siguientes diagramas representan el proceso completo de manufactura de las brocas diamantinas, estructurado como una línea de producción industrial. En él se ilustran de manera

clara las etapas que intervienen desde la selección de los materiales hasta el control final de calidad, destacando la precisión metalúrgica, la integración técnica y el rigor operativo necesarios para asegurar la eficiencia y durabilidad de la herramienta.

Figura 1.

Proceso de fabricación de brocas diamantadas (elaboración propia con base en Konstanty, 2006, 2013; Long et al., 2018; Egan & Melody, 2009; Filgueira & Pinatti, 2003; Imaizumi, 2019; (Boyles, n.d.).)

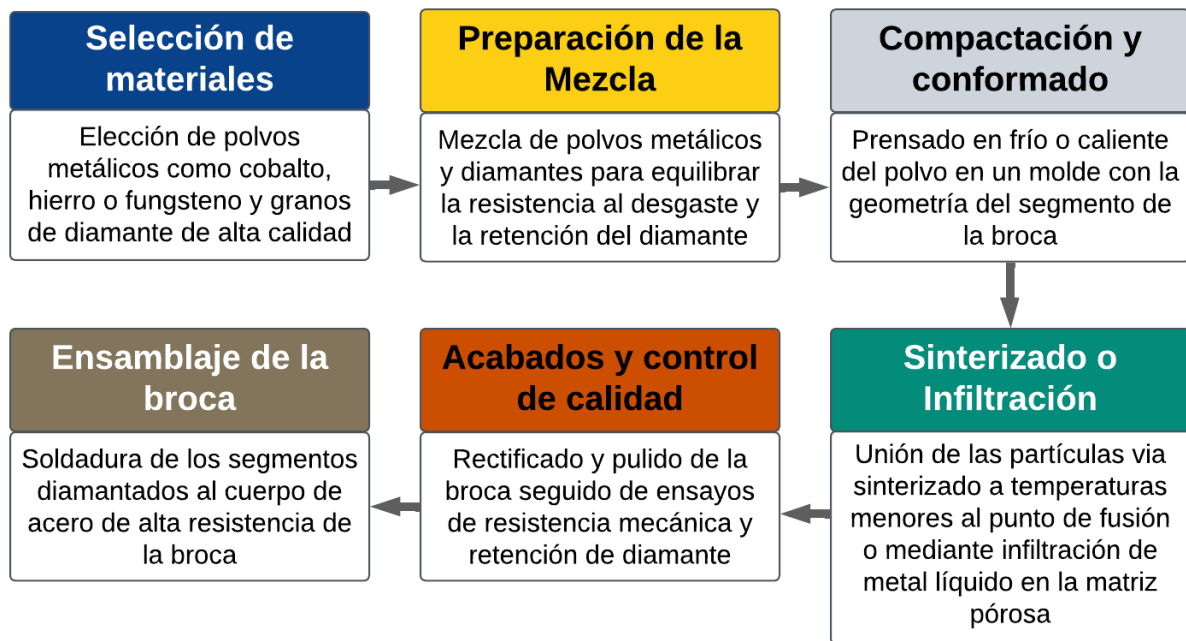
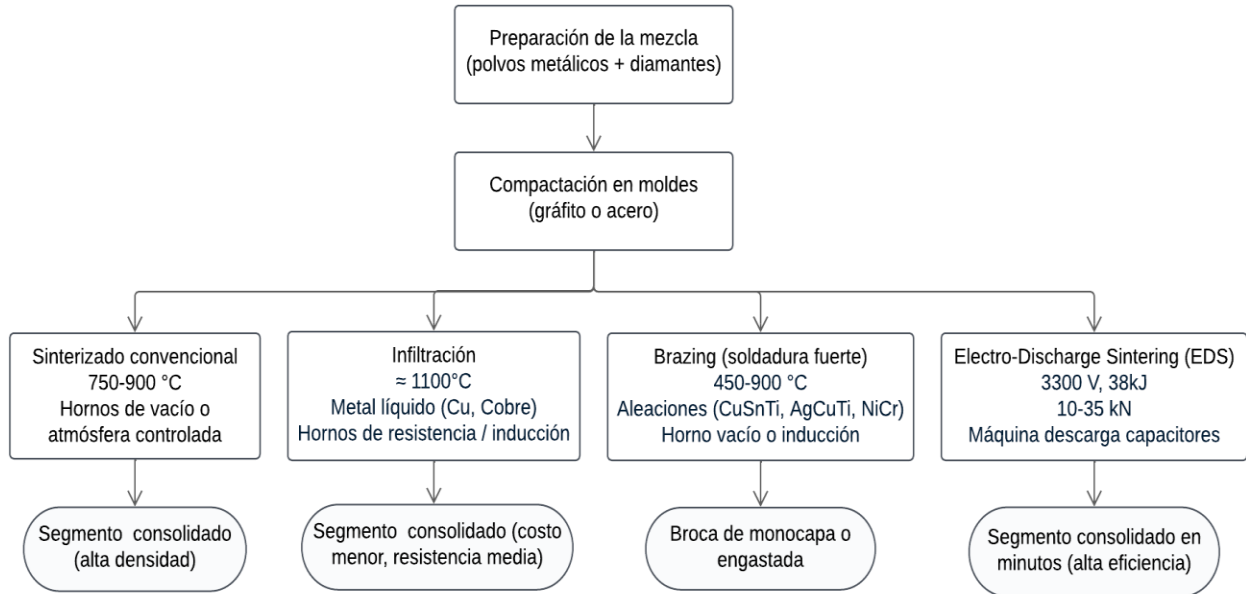


Figura 2.

Métodos de consolidación de segmentos diamantados y sus principales características.



5.9. Análisis de los materiales en la fabricación de brocas diamantinas

La eficiencia y la durabilidad de una broca diamantina no dependen únicamente del diseño de la herramienta, sino principalmente de la calidad y propiedades de los materiales empleados en su fabricación. En esencia, una broca diamantina está conformada por dos elementos fundamentales: el diamante como agente de corte y la matriz metálica como soporte. La correcta selección de ambos es lo que determina el rendimiento de la broca en condiciones reales de perforación.

5.9.1. El diamante como material de corte

El diamante es el mineral natural más duro conocido, con una dureza de 10 en la escala de Mohs. Su resistencia excepcional al rayado y al desgaste lo convierte en el material ideal para la

perforación de rocas duras y abrasivas. Sin embargo, su comportamiento en la broca no solo depende de la dureza, sino también de otras propiedades clave:

- **Tamaño de la partícula:** los granos más finos se emplean en rocas muy duras, ya que permiten una acción de “molienda” continua, mientras que los granos más grandes favorecen cortes más agresivos en rocas blandas (Konstanty, 2006).
- **Concentración:** se mide en carats/cm³ o según normas FEPA, y controla la densidad de diamantes en la matriz. Una concentración alta aumenta la vida útil, pero también encarece la herramienta.
- **Resistencia térmica:** el diamante comienza a degradarse (grafitización) a temperaturas superiores a los 760 °C, lo que obliga a procesos de fabricación en atmósferas controladas (Long, He & Sekulic, 2018).

En el caso de los PDC (Polycrystalline Diamond Compact), se utilizan diamantes sintéticos unidos en condiciones de alta presión y temperatura (HPHT), lo que genera un material policristalino con mayor tenacidad y resistencia al impacto que el diamante natural. Esto permite un mejor desempeño en formaciones intermedias y duras, alargando la vida de la broca y reduciendo el número de cambios de herramienta (Imaizumi et al., 2019).

5.9.2. La matriz metálica como soporte del diamante

La matriz cumple un papel doble: sujeta al diamante y se desgasta de forma controlada para exponer nuevos filos. Entre los materiales más utilizados se encuentran:

- **Cobalto (Co):** es considerado el metal de referencia en matrices por su excelente capacidad de retener el diamante, su alta resistencia mecánica y su buena sinterabilidad. Sin embargo, su costo elevado impulsa la búsqueda de alternativas (Konstanty, 2006).
- **Bronces (Cu-Sn):** son ampliamente usados por su bajo costo, buena fluidez al ser infiltrados y aceptable resistencia al desgaste. Se emplean especialmente en procesos de infiltración (Long, He & Sekulic, 2018).
- **Hierro y aleaciones Fe-Cu-Co:** aportan mayor tenacidad y dureza, siendo útiles en terrenos abrasivos donde se requiere una matriz que no se desgaste rápidamente.
- **Níquel (Ni):** incrementa la resistencia a la corrosión y mejora la cohesión de la matriz, pero su alto costo limita su uso generalizado.
- **Carburos (WC, TiC):** se añaden como refuerzos para elevar la dureza de la matriz y mejorar la resistencia al desgaste abrasivo.

La clave está en encontrar un balance entre dureza de la matriz y velocidad de desgaste: una matriz demasiado dura no libera los diamantes embotados y la broca pierde efectividad (“glazing”), mientras que una demasiado blanda se desgasta rápidamente, reduciendo la vida útil de la herramienta (Boyles, n.d.)

5.9.3. Influencia en el rendimiento y la durabilidad

Las propiedades de los materiales impactan directamente en la velocidad de penetración (ROP), el número de metros perforados por broca y los costos operativos. Un diamante correctamente seleccionado y una matriz bien diseñada aseguran que la broca mantenga un equilibrio entre agresividad de corte y resistencia al desgaste. De hecho, estudios experimentales

han demostrado que la correcta sinergia entre el diamante y la matriz puede duplicar la vida útil de una broca en formaciones difíciles (Konstanty, 2006; Egan & Melody, 2009).

La siguiente tabla presenta una comparación entre los principales materiales empleados en la fabricación de brocas diamantinas. Su propósito es evidenciar cómo las propiedades de cada matriz metálica y del diamante influyen en la resistencia, la durabilidad y el rendimiento general de la herramienta durante la perforación.

Tabla 2.

Comparación de principales materiales empleados en la fabricación de brocas diamantinas.

Elaboración propia a partir de Konstanty (2006), Long et al (2018), Egan y Melody (2009),

Imaizumi et al. 2019 y Boyles (s.f).

Material	Propiedades principales	Influencia en el rendimiento
Diamante sintético	Dureza 10 Mohs, alta resistencia al rayado, sensible a temperaturas >760 °C	Define la capacidad de corte y agresividad de la broca
PDC (Diamante Policristalino)	Alta tenacidad, mayor resistencia al impacto, fabricado en condiciones HPHT	Aumenta la durabilidad y desempeño en formaciones duras
Cobalto (Co)	Excelente retención del diamante, alta resistencia mecánica, buena sinterabilidad	Brocas más duraderas, alta vida útil, costo elevado
Bronce (Cu-Sn)	Bajo costo, buena fluidez en infiltración, resistencia moderada al desgaste	Proceso económico, adecuado para brocas de gran tamaño, vida útil limitada
Hierro y aleaciones Fe-Cu-Co	Mayor tenacidad y dureza, útil en terrenos abrasivos, reduce desgaste prematuro	Brocas con mayor resistencia en rocas abrasivas, evita fallas prematuras

Níquel (Ni)	Resistencia a la corrosión, cohesión mejorada de la matriz, alto costo	Mejora la durabilidad en ambientes hostiles, restringido por costos
Carburo de tungsteno (WC)	Dureza elevada, mejora resistencia al desgaste abrasivo	Incrementa la vida útil, especialmente en aplicaciones abrasivas
Carburo de titanio (TiC)	Alta dureza, refuerza la matriz y controla la tasa de desgaste	Permite un desgaste controlado de la matriz, manteniendo eficiencia de corte

6. Estudio dimensional y radiográfico de una broca comercial real

El análisis de resultados de este estudio se centró en la evaluación integral de la broca diamantina, considerando tanto su diseño geométrico como las características metalúrgicas que determinan su rendimiento en procesos de perforación. Para ello se recurrió al modelado tridimensional realizado en SolidWorks y a la interpretación radiográfica de la zona de unión entre los segmentos diamantados y la matriz metálica.

Figura 3.

Vista frontal broca diamantina.



Los resultados obtenidos a partir del modelo 3D permitieron observar una distribución uniforme de los insertos diamantados, lo que contribuye a un desgaste equilibrado durante la perforación. Esta configuración geométrica, sumada a la inclinación controlada de los canales de evacuación de lodo, garantiza una adecuada refrigeración y remoción de detritos. Dichas condiciones son esenciales para evitar el sobrecalentamiento localizado que puede causar la pérdida prematura de los diamantes o la degradación de la matriz metálica.

Figura 4.

Vista lateral broca diamantina, creada en solidwork formato 3D.

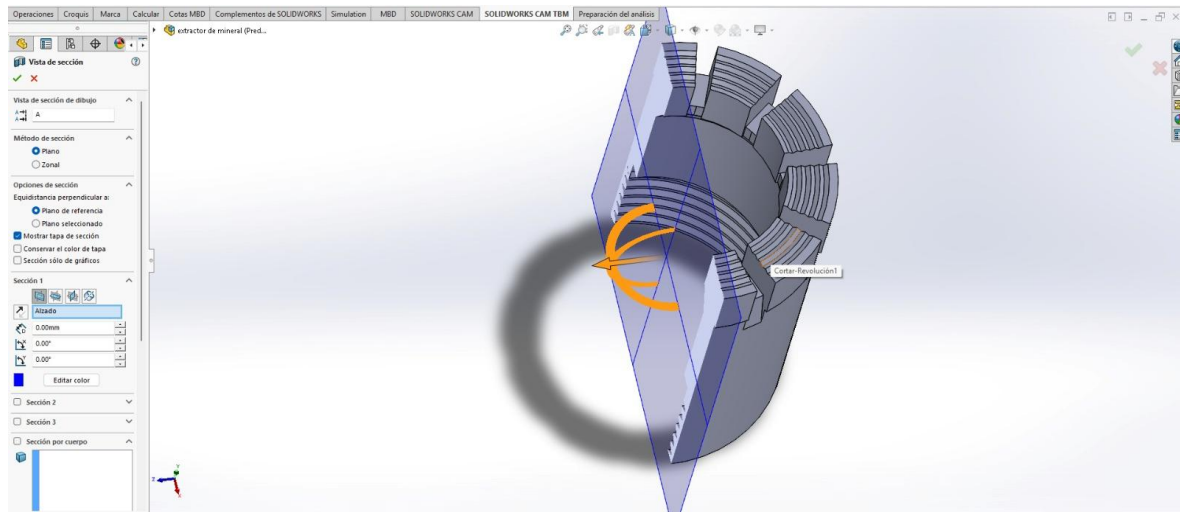
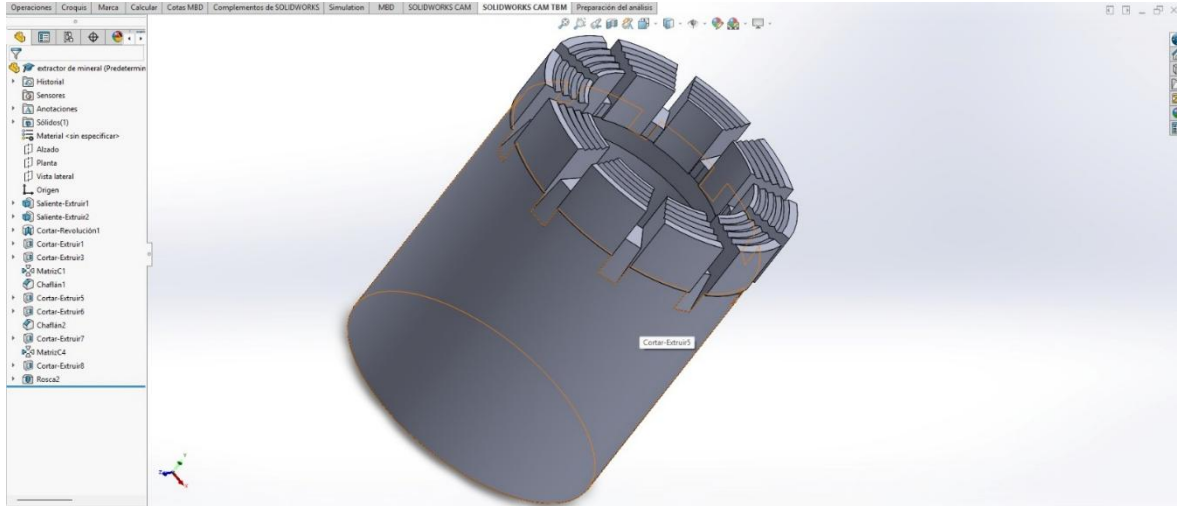


Figura 5.

Vista frontal broca diamantina, creada en solidwork formato 3D.



La radiografía industrial aplicada en el sector superior de la broca reveló una línea de unión brillante y continua entre los dientes diamantados y el cuerpo de la matriz. Esta evidencia es característica de una soldadura fuerte (brazing) correctamente ejecutada, con buena humectación y sin presencia de porosidad significativa. El brillo homogéneo observado sugiere el uso de una aleación activa de Ag–Cu–Ti, material comúnmente empleado en este tipo de uniones debido a su capacidad de formar una interfase metalúrgicamente estable con el diamante y con la matriz de cobre o bronce.

Figura 6.

Radiografía Vista frontal broca diamantina.

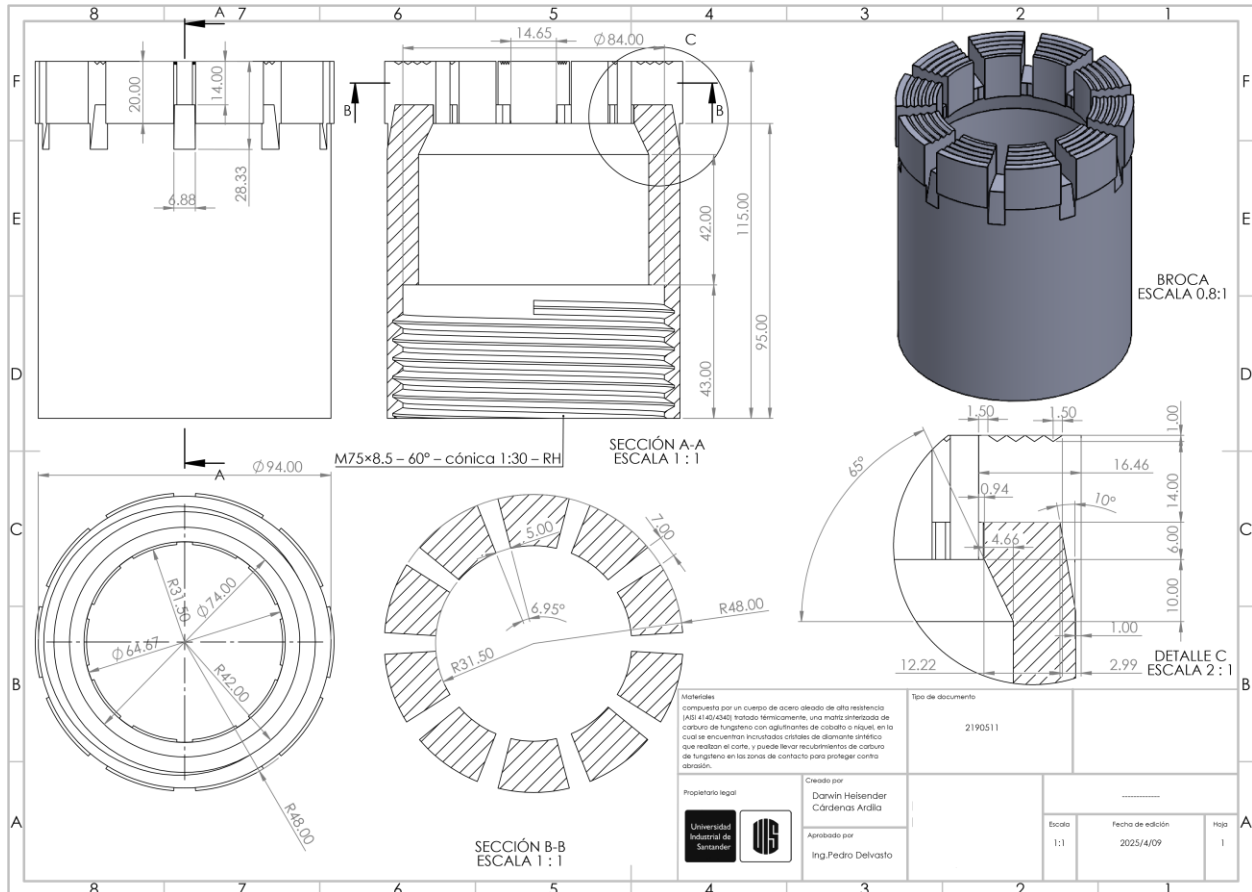


Desde el punto de vista metalúrgico, la microestructura obtenida en la matriz tras los procesos de sinterizado e infiltración es densa y con bajo nivel de vacíos, lo cual mejora la conductividad térmica y la resistencia a la abrasión. Esta homogeneidad asegura que los diamantes permanezcan firmemente anclados, permitiendo un desgaste progresivo y controlado en lugar de fracturas súbitas o desprendimientos.

El análisis comparativo con los parámetros técnicos descritos en la literatura (Konstanty, 2006; Long, He & Sekulic, 2007; (Boyles, n.d.) confirma que dicha broca cumple con las condiciones esperadas para una herramienta de alto rendimiento. Las temperaturas de trabajo durante el sinterizado —en el rango de 850 °C a 950 °C— y las utilizadas para el proceso de brazing —entre 780 °C y 830 °C— coinciden con las prácticas industriales óptimas que garantizan una unión sólida sin comprometer la integridad del diamante.

Figura 7.

Planos broca con punta diamantina.



En términos de desempeño, la configuración observada sugiere que la broca posee alta eficiencia en la transferencia térmica y resistencia a la fatiga, factores decisivos para la exploración en formaciones rocosas duras. Además, la inspección radiográfica confirma la ausencia de discontinuidades internas o segregaciones metálicas, lo que respalda la calidad del proceso de manufactura.

7. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de grado permitió entender a profundidad cómo se fabrican y se comportan las brocas diamantinas utilizadas en la perforación geológica, resaltando la importancia de cada detalle del proceso de manufactura. Desde la selección de los materiales hasta la unión final entre los segmentos diamantados y la matriz, cada etapa influye directamente en el desempeño y en la vida útil de la herramienta.

Durante el estudio de la broca, se analizaron planos técnicos, modelos tridimensionales y una radiografía de la zona de unión entre los dientes y la matriz metálica. A partir de esta evidencia, se determinó que los segmentos se encuentran unidos mediante soldadura fuerte (brazing), empleando una aleación activa compuesta principalmente por plata, cobre y titanio (Ag–Cu–Ti). Este tipo de unión no solo garantiza una buena adherencia metalúrgica, sino también una excelente transferencia de calor y una mayor resistencia a los esfuerzos mecánicos que se generan durante la perforación.

Se comprobó además que la aplicación correcta de los procesos de metalurgia de polvos, junto con el sinterizado y la infiltración, permite obtener matrices metálicas densas, homogéneas y bien compactadas. Estas propiedades aseguran que el diamante se mantenga firmemente embebido en la matriz, evitando su desprendimiento prematuro y asegurando un desgaste controlado y uniforme durante la operación.

La interpretación de los resultados, tanto desde el punto de vista teórico como experimental, permitió observar que una unión limpia y continua —como la detectada en la radiografía— contribuye de forma directa a la estabilidad estructural y a la durabilidad de la herramienta. Además, el diseño geométrico de la broca, junto con un sistema de refrigeración

eficiente, refuerza su capacidad para soportar condiciones extremas de trabajo sin comprometer su integridad.

La optimización de los parámetros de perforación se ha convertido en un componente indispensable del diseño de herramientas diamantadas. (Al-Dujaili et al., 2025) evaluaron el efecto del peso sobre la broca, la velocidad de rotación y la tasa de flujo de fluido, concluyendo que un ajuste coordinado de estos factores puede aumentar significativamente la tasa de penetración sin comprometer la integridad de la herramienta. Sus hallazgos sirven como base práctica para estrategias de operación más sostenibles y rentables en la exploración geológica moderna.

8. Recomendaciones

Durante el desarrollo de este estudio monográfico se identificaron diversas oportunidades de mejora tanto en los procesos de manufactura como en la evaluación de las brocas diamantadas. Por ello, se proponen las siguientes recomendaciones, orientadas a optimizar el desempeño de la herramienta y a fortalecer la comprensión técnica en futuras investigaciones.

En primer lugar, se recomienda implementar controles más precisos durante el proceso de sinterizado e infiltración, especialmente en lo referente a la temperatura y el tiempo de retención. Estos parámetros influyen directamente en la densificación de la matriz metálica y en la calidad de la unión con los granos de diamante. Un monitoreo más riguroso permitiría obtener matrices más homogéneas, con mejor adherencia y mayor resistencia al desgaste.

También se sugiere realizar ensayos comparativos entre diferentes tipos de soldaduras fuertes, evaluando la resistencia mecánica y térmica de las uniones obtenidas con distintas aleaciones (por ejemplo, sistemas Ag–Cu–Ti, Ni–Cr–B o Cu–Sn). Esto ayudaría a determinar cuál combinación de materiales ofrece el mejor equilibrio entre costo, resistencia y durabilidad en condiciones reales de perforación.

Otra recomendación importante es incorporar simulaciones computacionales de esfuerzos térmicos y mecánicos sobre los modelos 3D de la broca, a fin de anticipar posibles fallas en la zona de unión o en el cuerpo metálico. Estas herramientas digitales permitirían validar el diseño antes de la fabricación, reduciendo costos y errores en la producción.

Se recomienda que los futuros proyectos enfocados en la fabricación o uso de brocas diamantadas incorporen metodologías de control de parámetros operativos en tiempo real. Factores como el peso sobre la broca, la velocidad de rotación y el flujo de refrigerante influyen directamente en la eficiencia de perforación y en la vida útil del conjunto. (Al-Dujaili et al., 2025) demostraron que ajustar de manera coordinada estas variables puede aumentar la velocidad de penetración y reducir el desgaste de los segmentos diamantados, promoviendo así un proceso más estable, eficiente y sostenible. En este sentido, se sugiere que los equipos de perforación industrial adopten sistemas de monitoreo digital o modelos predictivos que permitan optimizar las condiciones de trabajo según las características del terreno y del material perforado.

Referencias Bibliográficas

- Al-Dujaili, A. N., Asad, M. S., Saeed, N., & Tileuberdi, N. (2025). Optimizing polycrystalline diamond compact bit selection and drilling parameters for deviated wells in the Majnoon Field, Iraq. *Scientific Reports*, *15*(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/S41598-025-87484-9>;SUBJMETA
- Boyles, C. (n.d.). *Manual del perforista*. Christensen Boyles International.
- Cygan-Bączek, E., & Romański, A. (2023). Strengthening Mechanisms and Retention Properties of Sintered Iron-Based Matrix Material for Metallic-Diamond Tools. *Materials 2023*, *Vol. 16*, Page 5307, *16*(15), 5307. <https://doi.org/10.3390/MA16155307>
- Dellinger, T. B., & Livesay, B. J. (1973). Diamond Bit Drilling Research. *Journal of Engineering for Industry*, *95*(1), 256–262. <https://doi.org/10.1115/1.3438116>
- Denny, G. A. (1930). *Diamond drilling for gold and other minerals: A practical handbook on the use of modern diamond core drills in prospecting and exploiting mineral-bearing properties, including particulars of the cost of apparatus and of working*. Crosby Lockwood and Son.
- Egan, D., & Melody, S. (2009). EDS as a method of manufacturing diamond tools. *Metal Powder Report*, *64*(6). [https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(09\)70168-7](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(09)70168-7)
- Filgueira, M., & Garcia Pinatti, D. (2003). Processing of Diamond Composites for Cutting Tools by Powder Metallurgy and Rotary Forging. *Materials Science Forum*, *416–418*(1), 228–234. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.416-418.228>
- Glowka, D. A., Dennis, T., Le, P., Cohen, J., & Chow, J. (1995). Progress in the Advanced Synthetic-Diamond Drill Bit Program. *19. Annual Energy Sources Technology Conference, Dallas, TX (United States), 28 Jan - 1 Feb 1996*. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc622534/>

- Han, X., Xue, L., & Xu, J. (2023). Influence mechanism of polycrystalline diamond compact bit temperature rise based on thermo-fluid–solid coupling. *Science Progress*, 106(4), 00368504231214704. <https://doi.org/10.1177/00368504231214704>
- Imaizumi, H., Ohno, T., Karasawa, H., Miyazaki, K., Akhmadi, E., Yano, M., Miyashita, Y., Yamada, N., Miyamoto, T., Tsuzuki, M., Kubo, S., & Hishi, Y. (2019). Drilling Performance of PDC bits for Geothermal Well Development in Field Experiments. In *PROCEEDINGS*. Maikai Co., Ltd.
- Konstanty, J. (2005). Powder metallurgy Diamond Tools. *Elsevier Science*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-440-4.X5077-9>
- Konstanty, J., & Tyrala, D. (2021). Easily Sinterable Low-Alloy Steel Powders for P/M Diamond Tools. *Metals 2021, Vol. 11, Page 1204, 11(8)*, 1204. <https://doi.org/10.3390/MET11081204>
- Loginov, P. A., Fedotov, A. D., Mukanov, S. K., Manakova, O. S., Zaitsev, A. A., Akhmetov, A. S., Rupasov, S. I., & Levashov, E. A. (2023). Manufacturing of Metal–Diamond Composites with High-Strength CoCrCuxFeNi High-Entropy Alloy Used as a Binder. *Materials 2023, Vol. 16, Page 1285, 16(3)*, 1285. <https://doi.org/10.3390/MA16031285>
- Long, F., He, P., & Sekulic, D. P. (2018). Research and development of powder brazing filler metals for diamond tools: A review. In *Metals* (Vol. 8, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met8050315>
- Luno-Bilbao, C., Polvorosa, N. G., Peña, G., Fayanas, A., Perez, J., Guruceaga, I., Veiga, A., & Iturriza, I. (2021). Powder metallurgy technology at the service of diamond-impregnated tool production. *Powder Metallurgy*, 64(4), 331–340. <https://doi.org/10.1080/00325899.2021.1894689>

- Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Zakiev, V. I., Zakiev, I. M., Gevorkyan, E. S., Chishkala, V. A., & Kuzin, N. O. (2021). Effect of CrB₂ on the Microstructure, Properties, and Wear Resistance of Sintered Composite and the Diamond Retention in Fe–Cu–Ni–Sn Matrix. *Journal of Superhard Materials*, 43(3), 175–190. <https://doi.org/10.3103/S1063457621030060>
- Ratov, M., Toti, J., & Di, L. (2024). Effect of CrB₂ additive on the wear resistance of diamond impregnated drill bits. *Materials Today Communications*, 38, 107–119.
- Tian, G., Liu, B., Shang, Z., Zhao, K., Ding, Z., & Jiang, X. (2025). Numerical Simulation of Thermo-Hydro-Mechanical Coupling in the Drilling Process of Diamond-Impregnated Bits and Optimization of Waterway Design. *ACS Omega*, 10(12), 12467–12475. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.4C11577>