

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**Carrera de Ingeniería Mecánica**



**OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA EN LA  
SOLDADURA DE BLINDAJE PARA  
ESTABILIZADORES DE PERFORACIÓN POR  
MEDIO DE SIMULACIÓN DEM-FEM**

**OPTIMIZATION OF HARDFACING'S  
GEOMETRY APPLIED IN DRILL  
STABILIZER USING DEM-FEM  
SIMULATION**

Trabajo de Investigación para obtener el grado de Bachiller en Ingeniería Mecánica

**Juan Leonardo Molina Vilchez**

**Código 201510153**

**Asesor**

Samuel Charca

Lima – Perú

Febrero 2020

El trabajo de investigación

**OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA EN LA SOLDADURA DE BLINDAJE  
PARA ESTABILIZADORES DE PERFORACIÓN POR MEDIO DE  
SIMULACIÓN DEM-FEM**

Ha sido aprobada

-----

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

-----

[Nombres y apellidos del Asesor del trabajo de investigación]

-----

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

*Dedicatoria:*

*El presente trabajo de investigación se lo dedico a mis  
padres por brindarme la educación, los valores y las ganas de  
nunca rendirme.*

*Agradecimientos:*

*Agradezco a todas las personas que me apoyaron lo largo de este proceso, sobre todo a Angie quien nunca dejó de confiar en mí y me alentó siempre para conseguir el objetivo.*

*A mi asesor Samuel por tener la paciencia de guiarme por este largo camino.*

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>ix</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>1</b>
1.1    Desgaste durante la perforación Raise Boring .....	1
1.2    Soldadura de blindaje .....	2
1.3    Modelos de optimización de la soldadura de blindaje .....	3
1.3.1    Optimización por composición .....	3
1.3.2    Optimización por técnica de soldadura .....	5
1.3.3    Optimización por distribución geométrica .....	8
1.4    Desgaste en la soldadura de blindaje.....	10
1.4.1    Modelamiento del desgaste abrasivo .....	11
1.5    Método de elementos discretos (DEM).....	16
1.5.1    Algoritmo del método DEM.....	17
1.5.2    Breakage Models .....	19
1.6    Método de elementos finitos (FEM) .....	22
1.6.1    Algoritmo del método de elementos finitos .....	22
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>1</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>2</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 2.1</b> Composición de los electros de aleación para hardfacing .....	4
<b>Tabla 2.2</b> Resultados test de desgaste.....	5
<b>Tabla 2.3</b> Comparación cualitativa de los principales breakage models .....	21

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura I</b> Soldadura de blindaje doble hélice.....	iii
<b>Figura II</b> Capas hardfacing.....	iv
<b>Figura III</b> Deformaciones en uñas – Cargador frontal.....	iv
<b>Figura IV</b> Coupling DEM-FEM.....	v
<b>Figura V</b> Wear simulation with DEM – FEM.....	v
<b>Figura 2.1</b> Método Raise Borer .....	1
<b>Figura 2.2</b> Dureza de roca vs ratio de desgaste .....	2
<b>Figura 2.3</b> Mapa de recubrimientos según %C y aleación (Cr, Mn, Mo, Ni, W, Ti, Al).....	3
<b>Figura 2.4</b> Esquema de capas de soldadura em hardfacing – 5 mm de espesor por capa .....	4
<b>Figura 2.5</b> Parámetros físicos en cordones de soldadura .....	6
<b>Figura 2.6</b> Niveles de dilución .....	6
<b>Figura 2.7</b> Geometrías de los cordones de soldadura para cada método .....	7
<b>Figura 2.8</b> Relación de porcentaje de dilución y método de soldadura .....	7
<b>Figura 2.9</b> Principales configuraciones geométricas de la soldadura de blindaje.....	9
<b>Figura 2.10</b> Representación de fuerzas durante perforación.....	10
<b>Figura 2.11</b> Distribución de fuerzas sobre tubería de perforación con hardfacing. ....	11
<b>Figura 2.12</b> Ranura provocada por partícula abrasiva cónica ideal .....	13
<b>Figura 2.13</b> Ranura en superficie reforzada con partículas (a) pequeñas, (b) baja dureza .....	14
<b>Figura 2.14</b> Ranura superficie con partículas de reforzamiento con dureza mayor a la matriz .....	15
<b>Figura 2.15</b> Sección transversal de la ranura – vista del plano central .....	15
<b>Figura 2.16</b> Parámetros que influyen en el ratio de desgaste.....	16
<b>Figura 2.17</b> Contactos entre partículas. ....	17
<b>Figura 2.18</b> Representación gráfica de las fuerzas normales y tangenciales .....	18
<b>Figura 2.19</b> Modelado del sólido a partir de los principales breakage models .....	20
<b>Figura 2.20</b> Fragmentación de una partícula (roca) para cada breakage model .....	21

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centró en el diseño y selección de la geometría óptima para la soldadura de blindaje sobre los estabilizadores utilizados en perforación en la industria minera y construcción para la perforación de túneles. Para ello se realizó un análisis por elementos discretos acoplado al análisis de elementos finitos considerando condiciones fijas como velocidad de rotación, fuerza de empuje, torque de perforación y características físico mecánicas de las roca a perforar por el método Raise borer.

La caracterización de la roca se realizó en laboratorio por medio del ensayo de compresión triaxial y el ensayo de compresión no confinada. Se obtuvo como resultados valores que cuentan con un error menor al 5% con respecto a los resultados que se obtuvieron otros estudios similares de rocas.

La simulación por elementos discretos se realizó por medio de Rocky-DEM y se consideró como variable principal la orientación y ángulos de inclinación del cordón de soldadura. El método por elementos discretos brindó las coordenadas locales, orientación y la magnitud de las fuerzas generadas al impacto entre la roca y la superficie de la soldadura de blindaje. Posteriormente, por medio del método de elementos finitos se analizó los esfuerzos resultantes sobre el estabilizador.

Con el análisis realizado se logró seleccionar la geometría con forma cascada por su distribución de esfuerzo homogéneo sobre los cordones de soldadura, lo que refleja un desgaste uniforme sobre la superficie y la anulación de zonas críticas en dónde ocurriría desgaste prematuro.

***Palabras clave:***

*Raise Bore, Soldadura de blindaje, Simulación DEM-FEM, Desgaste*

## **ABSTRACT**

This research work focused on the design and selection of the optimal geometry for armor welding on stabilizers used in drilling in the mining and construction industry for tunnel drilling. For this, a discrete element analysis was carried out coupled with the analysis of finite elements considering fixed conditions such as rotation speed, thrust force, drilling torque and physical characteristics of the rock to be drilled by the Raise borer method.

The characterization of the rock was carried out in the laboratory by means of the triaxial compression test and the unconfined compression test. Values that have an error of less than 5% with respect to the results obtained by other similar rock studies were obtained.

Simulation by discrete elements was carried out by means of Rocky-DEM and the orientation and inclination angles of the weld bead was considered as the main variable. The discrete element method provided the local coordinates, orientation and the magnitude of the forces generated to the impact between the rock and the surface of the armor weld. Subsequently, the resulting stresses on the stabilizer were analyzed using the finite element method.

With the analysis performed, it was possible to select the geometry with a cascading shape due to its homogeneous stress distribution on the weld seams, which reflects a uniform wear on the surface and the cancellation of critical areas where premature wear would occur.

***Key words:***

Raise Bore, Hardfacing, DEM-FEM Simulation, Wear

# INTRODUCCIÓN

En la minería, sector que aporta el 13.2% al PBI del Perú [1], la perforación de chimeneas y piques son actividades indispensables para la actividad productiva. Por medio de estas construcciones se pueden transportar personas, materiales, minerales y, lo más importante, se realiza la ventilación en las minas subterráneas.

Una de las principales metodologías de excavación existentes para chimeneas y piques es el raise borer, ya que brinda una velocidad de avance superior a las demás [2]. El raise borer se realiza tanto en superficie, como de manera subterránea. El procedimiento se divide en 2 pasos: Primero, se perfora un agujero piloto de aproximadamente 12” de diámetro, que conecta dos niveles de mina; luego, se ensambla una cabeza escariadora con la cual se realiza una perforación ascendente ampliando el agujero hasta uno de 8 m de diámetro.

Si bien el raise bore es un método práctico e intuitivo, aún presenta retos de ingeniería importantes. Uno de ellos es el problema del desgaste por abrasión en sus tuberías de perforación. Actualmente para combatir este fenómeno físico se refuerza la superficie con un material de mayor dureza, usualmente carburo de tungsteno, en forma de insertos o por medio de la soldadura de blindaje [3], [4].

La soldadura de blindaje es la aplicación de un revestimiento por medio de cordones de soldadura que contiene una matriz de acero con diferentes tipos de partículas como el carburo de tungsteno, el cual brinda protección ante el desgaste. Sin embargo, el desgaste que sufren estas superficies no es uniforme, lo que provoca en muchas ocasiones un desgaste prematuro y, en consecuencia, mantenimientos no programados.

Visto ello, la presente investigación analizó los esfuerzos sometidos en los estabilizadores durante el proceso de perforación piloto, a fin de homogenizar su distribución y eliminar de esta manera zonas críticas que promueven un desgaste acelerado y no uniforme. La importancia de este trabajo de investigación radica en la optimización de la vida útil de dichos componentes, así como también en elevar condiciones de seguridad dentro de las operaciones mineras.

Para el análisis se utilizaron herramientas computacionales como el software ROCKY-DEM, el cual utiliza el método de elementos discretos para obtener los puntos de contacto y las fuerzas aplicadas en la interface roca – estructura, para posteriormente analizar esfuerzos y deformaciones con el uso de la simulación por elementos finitos por medio del software ANSYS [5]. Con los resultados del análisis se estableció la mejor disposición de la soldadura de blindaje para obtener un desgaste uniforme en la tubería.

## **Alcance**

El presente trabajo se enfoca en el diseño y optimización de la soldadura de blindaje por medio de su distribución geométrica. La orientación de los cordones de soldadura influye en el comportamiento de la misma frente a la abrasión, además de generar distintas zonas de concentraciones de carga y, en consecuencia, distintas distribuciones de esfuerzos. La literatura sugiere que, a una distribución de esfuerzos homogéneo, el desgaste que presenta la estructura será uniforme a lo largo de su superficie. Sin embargo, la investigación no considera como variable el material de revestimiento, ya que se ha demostrado que para trabajos de perforación en minería el material idóneo es el carburo de tungsteno [6]. Asimismo, los parámetros físicos del cordón como altura, ancho y penetración, serán constantes de acuerdo al método de soldadura Plasma Transfer Arc Welding (PTAW).

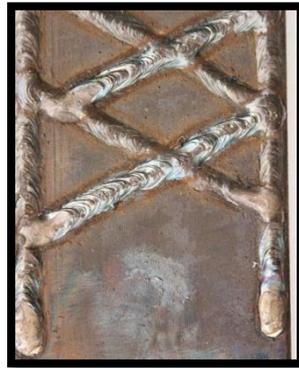
Por otra lado, el raise borer presenta 2 tipos de tuberías a las que se le aplican la soldadura de blindaje: Estabilizadores y stem. El presente trabajo considera como objeto de estudio solo a los estabilizadores. Cabe mencionar que la metodología de análisis se puede expandir a componentes sujetos al contacto roca-estructura en procesos de perforación.

Por último, el estudio contempla la evaluación de las distribuciones de la soldadura de blindaje por medio de análisis dinámico estructural en dos etapas, primero por el método de elementos discretos y posteriormente por elementos finitos. Los resultados de la simulación fueron validados por medio de un contraste con el desgaste obtenido en los estabilizadores con la soldadura de blindaje en forma de doble hélice,

para luego evaluar computacionalmente distintas geometrías a fin de obtener la más óptima para las condiciones dadas.

## Antecedentes

Actualmente una de las principales empresas que brinda el servicio de raise borer en Latinoamérica es Tumi Raise Boring. Dicha empresa cuenta con veinte años en el rubro y aplican la soldadura de blindaje para los estabilizadores que se utilizan en el servicio de perforación. La configuración geométrica de la soldadura de blindaje utilizadas por la empresa es de doble hélice con líneas verticales a los lados como se muestra en la **Figura I**. Este formato lo establecieron hace 7 años y se ha trabajado con ello desde entonces.



**Figura I.** Soldadura de blindaje doble hélice

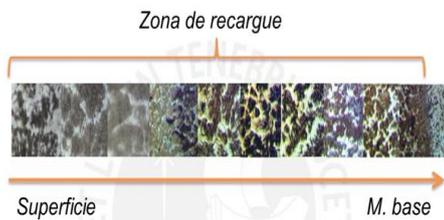
Fuente: Monsalvaje, H. et al. Efecto del amperaje en propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura [7]

Al día de hoy se han realizado estudios sobre la composición química de la soldadura de blindaje que analizan el comportamiento de esta dependiendo de la concentración de, por ejemplo, partículas de Hierro-Vanadio (FeV) [8]. De esta manera se encuentran curvas en donde se relacionan la resistencia a la abrasión vs la concentración de FeV.

Por otra parte, estudios sobre la distribución esfuerzos y deformaciones para analizar el desgaste han sido realizados en cargadores frontales, específicamente en los dientes de los baldes que se encuentran sujetos constantemente a desgaste. En este caso

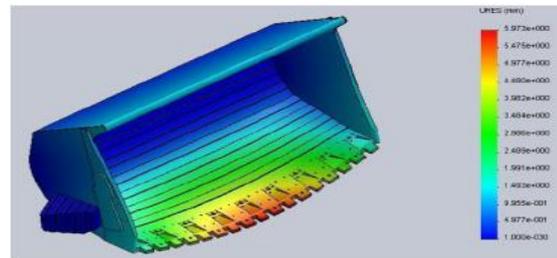
se obtiene como resultado zonas críticas, al contrastar la distribución de esfuerzos y deformaciones en dos estados (componentes nuevos vs componentes desgastados).

Sin embargo, una de las limitantes del análisis que se realizó en los estudios anteriores es la orientación de las fuerzas aplicadas en los componentes a probar. Para una correcta simulación, las condiciones deben representar significativamente el fenómeno físico que ocurre realmente, ello implica que las orientaciones de las fuerzas a aplicar se acerquen a lo que realmente sucede; sin embargo, ello es elevadamente complicado, pues la geometría y número de rocas impiden un cálculo analítico para los ángulos y direcciones de los choques entre las uñas del cargador frontal y la roca.



**Figura II.** Capas hardfacing

Fuente: Noriega, A. et al. Resistencia al desgaste abrasivo de recargues duros fabricados con electrodos con 5% de FeTi y contenido variable de FeV [8]



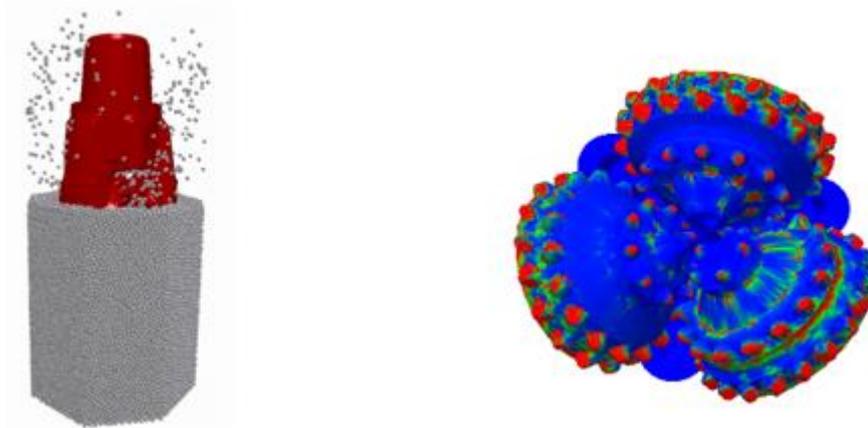
**Figura III.** Deformaciones en uñas – Cargador frontal

Fuente: Análisis de desgaste en componentes de cargadores frontales, mediante modelos basados en elementos finitos [6]

Asimismo, estudios más analíticos como “*FEM analysis of erosive wear*” de Shimizu, o “*Prediction of casing wear in extended-reach drilling*” de Deli, coinciden en que el análisis de desgaste requiere modelos específicos para cada condición, por lo que un modelo no necesariamente representará diferentes casos de aplicación [9], [10] debido a que la complejidad de los materiales en contacto, lubricación utilizada y composición química del ambiente en el cual se desarrolla el fenómeno de desgaste, limita un modelo de estimación. A pesar de ello, estudios con el objetivo de unificar un modelo que represente al desgaste están siendo desarrollados en distintas universidades del mundo, por lo que se espera un gran avance científico en esta rama en poco tiempo.

Por otra parte, en cuanto a simulación con elementos discretos, se tiene el estudio “*Predicting drill wear using the Discrete Element Method*” de Sousani, el cual menciona una metodología de simulación DEM con el software EDEM. Sin embargo, no se muestran las condiciones de simulación, como la caracterización de roca, material de la

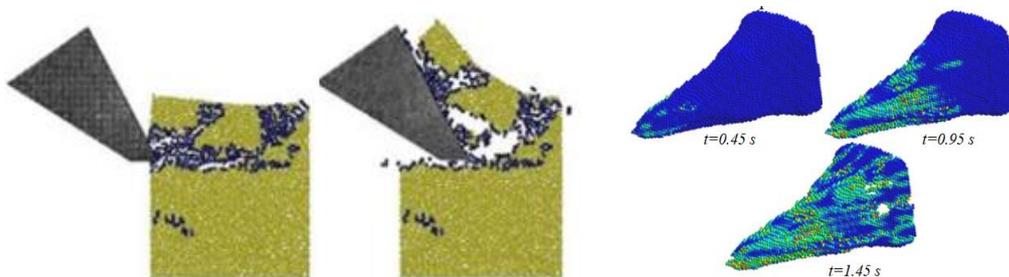
broca, entre otras. No obstante, valida el acople DEM-FEM para trasladar los contactos (fuerzas) de los elementos discontinuos (roca) frente a la estructura. Ello nos da información sobre el comportamiento del acople de software EDEM con ANSYS para un estudio que requiere unificar los modelos de elementos discretos y finitos [11].



**Figura IV** Coupling DEM-FEM

Fuente: Sousani, M. Predicting Drill Wear using the Discrete Element Method [11]

De la misma manera, la investigación de Oñate titulada “*Avances en el desarrollo de los métodos de elementos discretos y elementos finitos para el análisis de problemas de fractura*”, brinda un consolidado de los modelos de desgaste, modelos de acople del método DEM – FEM, establece ecuaciones constitutivas para una estimación de desgaste, además de una explicación técnica matemática en donde explica cómo el método de elementos discretos permite reproducir el desgaste discretizando el sólido en pequeñas esferas (partículas) y eliminando las que son afectados por fuerzas mayores a las permisibles [12].



**Figura V.** Wear simulation with DEM – FEM

Fuente: Avances en el desarrollo de los métodos de elementos discretos y elementos finitos para el análisis de problemas de fractura [12]

A diferencia de las investigaciones presentadas, el presente trabajo utilizará el acople entre el método de elementos discretos (DEM) y el método de elementos finitos (FEM) a fin de optimizar la soldadura de blindaje en los estabilizadores de perforación. De esta manera se resuelve la limitación del ángulo y orientación del choque entre la roca y la estructura metálica, ya que por medio del DEM se analiza las rocas como partículas y de manera computacional se resuelven sus ecuaciones de movimiento y energía que, posteriormente, servirán como input dentro del análisis por medio de FEM.

Este trabajo servirá para determinar las zonas críticas al desgaste y así modificar la geometría de la soldadura de blindaje a una que homogenice el desgaste sobre el estabilizador. Asimismo, establecerá un punto de partida para el análisis y determinación de los ciclos de vida de los componentes sometidos a abrasión.

## **Justificación y motivación**

Según los indicadores de la empresa Tumi Raise Boring, cerca al 45% de los costos operativos se dan en el mantenimiento de tuberías de perforación, cortadores y cabezas rimadoras. Ello, debido al alto grado de desgaste que estos componentes sufren en su ciclo de vida. Dado su costo, un objetivo de la operación es aprovechar al máximo dichos componentes; sin embargo, las condiciones de trabajo a las que están sometidos como la abrasión, obligan a realizar mantenimientos no programados, por lo que el rendimiento de las tuberías (medido en metros perforados por intervención de mantenimiento), se reduce aproximadamente al 60 – 70% [13].

Durante su operación, la fricción con la roca provoca un desgaste que puede ocasionar una fractura. Por ello, cuando el desgaste en diámetro supera los  $\frac{3}{4}$ ", se procede a realizar su respectivo mantenimiento. No obstante, el desgaste se da de manera irregular en el componente, lo que provoca que, a pesar de contar con zonas de diámetros admisibles, se deba realizar el mantenimiento por la presencia de zonas críticas. En consecuencia, la frecuencia de mantenimiento no es regular y los costos de los mismos se elevan entre 20 al 30%<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Valor obtenido por medio de cálculo de costos en base a las OT de la empresa

Asimismo, las consecuencias de una fractura de tubería durante la perforación podrían reflejarse en pérdidas humanas y significativas pérdidas económicas como también en una caída en cuanto a la imagen de la empresa. Por ello el monitoreo de las tuberías de perforación se vuelve una actividad crítica, así como también el establecer el periodo de vida de estos componentes.

En ese sentido, el presente trabajo se realizó con la motivación de aportar conocimiento relevante al área de ingeniería Mecánica, para homogenizar el desgaste en los estabilizadores de perforación, eliminar zonas críticas y optimizar la soldadura de blindaje por medio de herramientas computacionales. Dichos conocimientos aportan en ámbitos de costos, planeamiento y seguridad.

## **Objetivo general**

Optimizar de la geometría en la soldadura de blindaje para estabilizadores de perforación por medio de simulación DEM-FEM

## **Objetivos específicos**

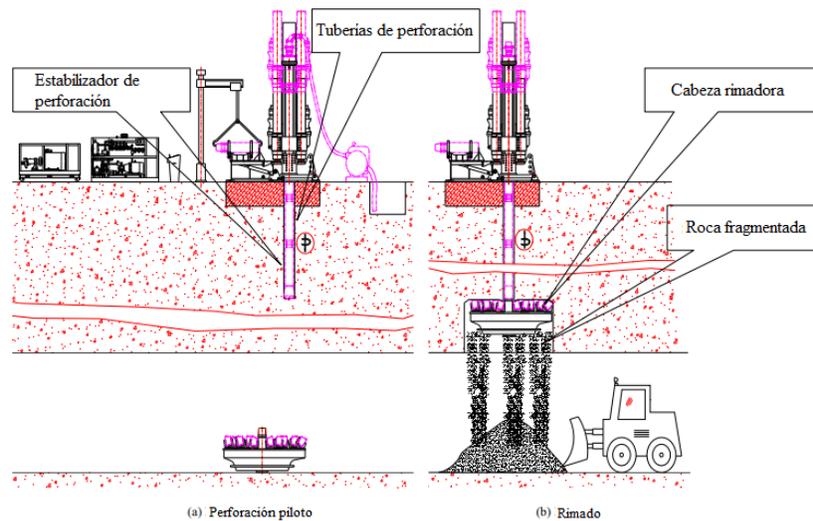
- Determinar las propiedades mecánicas de la geología de la zona de perforación.
- Determinar el efecto de las interacciones roca - estructura en programa DEM – FEM.
- Analizar el comportamiento de la distribución de esfuerzos según la distribución geométrica de la soldadura de blindaje.
- Establecer la configuración geométrica más adecuada de acuerdo a las condiciones establecidas.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Desgaste durante la perforación Raise Boring

El raise boring es un método de excavación mecánica de manera ascendente. Consta de dos etapas principales: Una perforación piloto de 12” de diámetro y posteriormente la etapa de rimado, la cual consiste en una perforación ascendente por medio de una cabeza rimadora con la que se aumenta el diámetro de perforación hasta unos 12 pies [13].

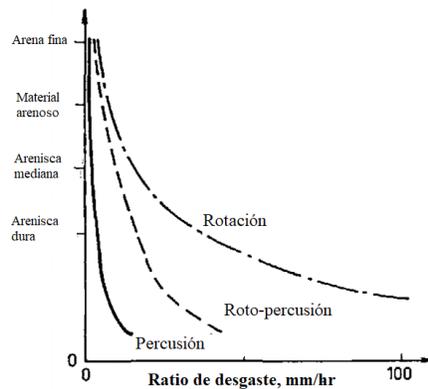


**Figura 2.1** Método Raise Borer

Fuente: Zhiqiang, L. Key technologies of drilling process with raise boring method [14]

En las dos etapas de perforación se utilizan tuberías de acero, las cuales se conectan mediante rosca (pin-box) y brindan la longitud necesaria para conectar los niveles de mina deseados. Las tres tuberías iniciales son los estabilizadores, que son tuberías especiales que tienen el objetivo de evitar desviaciones durante la perforación. Los estabilizadores están sometidos a un alto grado de desgaste, ya que son las primeras tuberías en tener contacto con la roca [15].

De acuerdo al trabajo de Larsen-Basser, los métodos de perforación rotativos son los que sufren mayor desgaste en la operación, dado el contacto directo y constante entre las superficies [16]. Por ello, la aplicación de la soldadura de blindaje (hardfacing) en las superficies de estas tuberías es importante para optimizar el rendimiento de estos componentes y asegurar la integridad de la operación minera, dado que un desgaste severo causa fractura por fatiga, lo que trae como consecuencia el desprendimiento de toda la columna de perforación.



**Figura 2.2** Dureza de roca vs ratio de desgaste

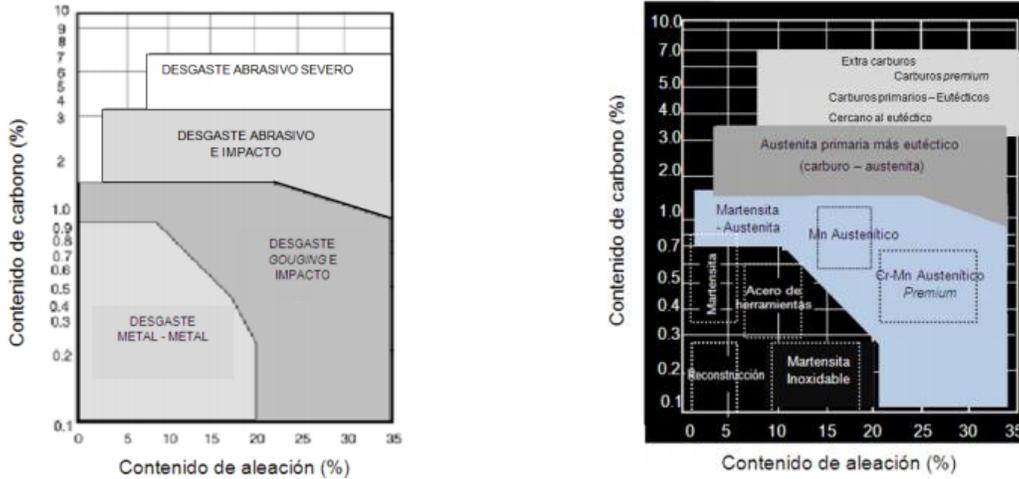
Fuente: Larsen-Basse. Wear of hard-metals in rock drilling: a survey of the literature [16]

## 1.2 Soldadura de blindaje

La soldadura de blindaje o también conocida como hardfacing, es la aplicación de material resistente al desgaste en superficies por medio de procesos de soldadura o aspersion térmica [17]. La distinción entre los dos principales métodos de aplicación es el espesor de material aplicado, para aspersion térmica varía entre 10  $\mu\text{m}$  a 1 mm; mientras que para los procesos de soldadura son mayor a 1 mm. Al finalizar el proceso de soldadura se tendrá grandes cantidades de partículas de material duro como carburos dentro de un matriz de acero [18].

Dependiendo el tipo de desgaste al cuál será sometido el componente, se aplicará composiciones diferentes en porcentaje de carbono, así como en el contenido de aleación. Kotechi y Ogborn [19] establecieron un mapa de recubrimientos según las características del

desgaste, en el cual se aprecia consideraciones estándar para la composición del hardfacing a aplicar.



**Figura 2.3** Mapa de recubrimientos según %C y aleación (Cr, Mn, Mo, Ni, W, Ti, Al)  
 Fuente: Kayaba, et al. Abrasive wear in stick-slip motion [20]

Como se puede observar en la **Figura 2.3**, el porcentaje de carbón irá aumentando a medida que la agresividad del desgaste se incremente; así para un desgaste abrasivo severo se utiliza entre 3 y 7% de carbono con aleaciones con carburos primarios o premium. El recubrimiento más utilizado para la industria minera es el carburo de tungsteno, al comprobarse que este posee una mejor resistencia a la abrasión frente a otros 10 grupos de recubrimientos como aceros austeníticos y fundiciones mediante la técnica de aplicación GTAW [21].

### 1.3 Modelos de optimización de la soldadura de blindaje

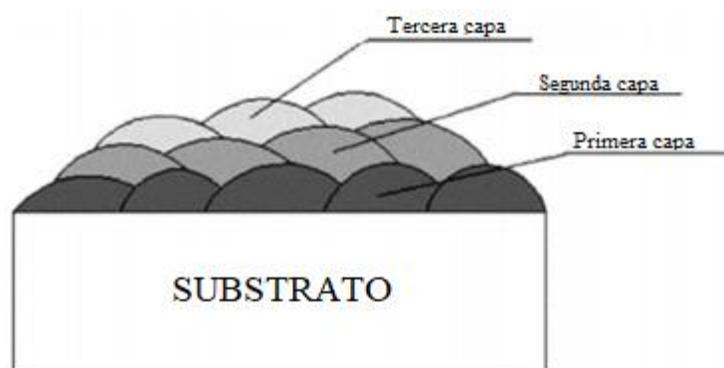
El uso de la soldadura de blindaje dependerá estrictamente a las condiciones a las que será sometida. Los modelos de optimización de la soldadura de blindaje se dividen en tres grupos, los mismos que se explican a continuación.

#### 1.3.1 Optimización por composición

Uno de los parámetros más importantes en el harfacing son los materiales a utilizar como matriz y aleación anti desgaste. Las aleaciones usualmente están compuestas de

carburos de: Ti, V, Cr, Mn, Ze, Nb, Mo, Hf, Ta y W. Por ello, la resistencia a la abrasión variará de acuerdo al electrodo utilizado, además de la cantidad de capas empleadas para el reforzamiento [22].

Los tres electrodos de aleación de hardfacing más comerciales son los electrodos de partículas de tungsteno, partículas de cromo y partículas de carburos complejos ( $M_tC_n$ ). Un estudio comparativo del rendimiento de estos electrodos frente al desgaste fue realizado por MF. Buchely [22] en donde se evaluaron las microestructuras de las aleaciones antes mencionadas.



**Figura 2.4** Esquema de capas de soldadura em hardfacing – 5 mm de espesor por capa  
Fuente: Buchely, M. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys [22]

En dicho estudio, el hardfacing se deposita en un material base que usualmente es acero ASTM-A36 y se generan hasta tres capas de revestimiento como se observa en la **Figura 2.4**. Sin embargo, en el caso de los electrodos de partículas de tungsteno, solo se genera una capa con el fin de evitar las fisuras debido a las excesivas tensiones internas. Por otra parte, las composiciones de los electrodos se muestran en la siguiente tabla.

	Composición química nominal (%)								
	C	Cr	W	Mn	Nb	Mb	Si	V	Fe
Partículas de cromo	4.3	35	-	1.1	-	-	-	-	Balance
Partículas de tungsteno	4.5	-	26	2.1	-	-	-	-	Balance
Carburos complejos	4.2	23	3.5	-	5.4	4.1	1.5	0.8	Balance

**Tabla 2.1** Composición de los electros de aleación para hardfacing  
Fuente: Balasubramain, V. et al. Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors [22]

La evaluación de los electrodos se realizó por medio de una prueba de desgaste normada por la ASTM G65. Asimismo, MF. Buchely calculó la dureza de los cordones de soldadura realizados y concluyó que la mayor resistencia a la abrasión entre los tres electrodos analizados la posee el electrodo con partículas de carburos complejos, como se aprecia en la **Tabla 2.2**.

Resultados generales en el test de abrasión						
Hardfacing	Partículas			Carburos complejos 1° capa	Carburos complejos 2° capa	Carburos complejos 3° capa
	Partículas de cromo 1° capa	Partículas de cromo 2° capa	Partículas de tungsteno 1° capa			
Pérdida de masa (mg)	2392.38	151.9	177.9	385.4	278.5	147.1
Pérdida de volumen ( $mm^3$ )	37.5	19.5	22.8	49.4	35.7	18.8
Resistencia al desgaste por abrasión ( $mg^{-3}m^{-1}$ ) <sup>-1</sup>	14.7	28.4	24.2	11.2	15.5	32.3

**Tabla 2.2** Resultados test de desgaste

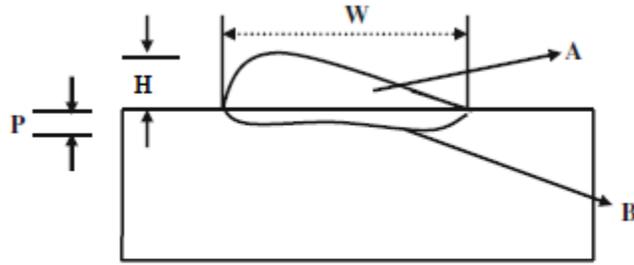
Fuente: Balasubramain, V. et al. Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors [22]

Sin embargo, este análisis solo toma en cuenta las propiedades químicas y mecánicas de las tres muestras frente a un elemento de desgaste rotativo, con velocidad y puntos de contacto constante. En el caso de los estabilizadores, la rotación es constante más no lo puntos de contacto entre la roca y la tubería. Los contactos brindan la dirección de las fuerzas y, en consecuencia, condicionan el grado de desgaste que el componente podría sufrir.

### 1.3.2 Optimización por técnica de soldadura

Ya que el hardfacing se realiza por medio de soldadura, un parámetro importante para evaluar el performance del mismo es la técnica de soldadura seleccionada. Los métodos de soldaduras se pueden evaluar por medio de factores cuantitativos (dilución), como también por factores cualitativos (jerarquía analítica) [23].

Las distintas técnicas cuentan con seis parámetros primarios, los cuales son la penetración, ancho, reforzamiento, área de penetración y el área de reforzamiento.



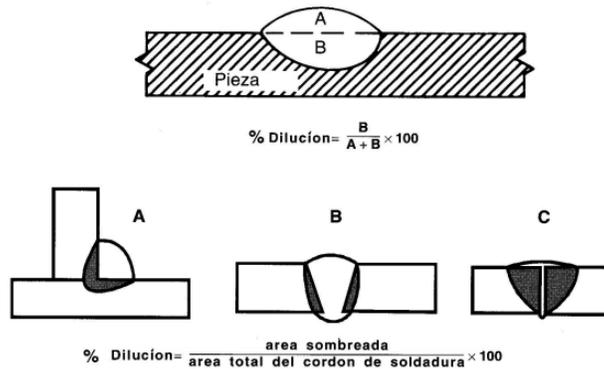
Where

P = Profundidad      H = Altura      A = Área superficial  
 W = Anchura      B = Área penetrada

**Figura 2.5** Parámetros físicos en cordones de soldadura

Fuente: Balasubramanian, et al. Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors [23].

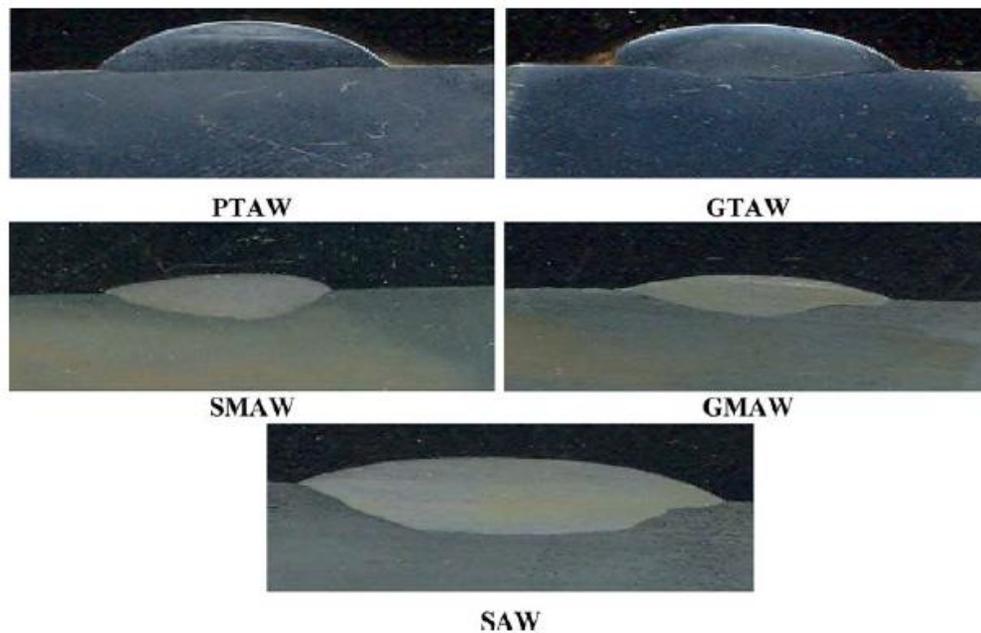
La dilución es definida como el porcentaje del material base en la composición química del cordón de soldadura [24]. Un elevado valor de dilución provoca que las propiedades mecánicas, como la dureza, se vean afectados por la presencia excesiva del material base. Por ello, un cordón de soldadura de blindaje presentará un mejor rendimiento a un menor porcentaje de dilución, ya que caso contrario se disminuye la resistencia a la abrasión deseada.



**Figura 2.6** Niveles de dilución

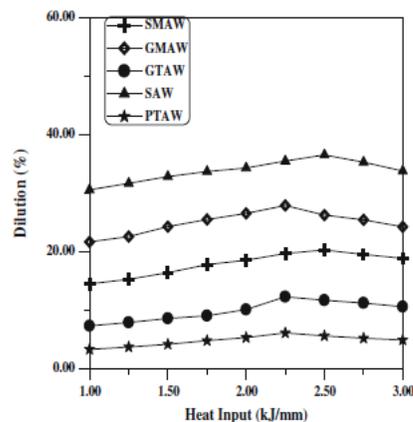
Fuente: TECSUP. Metalurgia de la soldadura [24]

La soldadura de blindaje se realiza principalmente por medio de cinco procesos de soldadura: PTAW, GTAW, SMAW, GMAW y SAW. Gráficamente se puede evidenciar las diferencias en los parámetros físicos presentados anteriormente en la **Figura 2.7**.



**Figura 2.7** Geometrías de los cordones de soldadura para cada método  
 Fuente: Prassama, R. Friction and wear behaviour of cenosphere dispersed aluminium matrix composite fabricated by powder metallurgy route [25]

La comparativa cuantitativa de las técnicas de soldadura fue realizada por Balasubramanian en su estudio Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors. A través de un estudio comparativo concluye que la soldadura de blindaje con mayor rendimiento es la realizada por medio PTAW, con un porcentaje de dilución entre 3–6% [7].



**Figura 2.8** Relación de porcentaje de dilución y método de soldadura  
 Fuente: Monsalvaje, H, et al. Efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura [7]

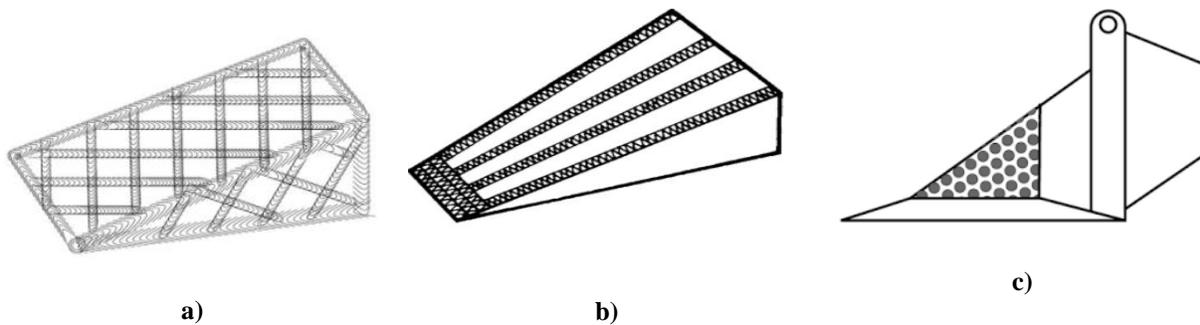
### 1.3.3 Optimización por distribución geométrica

Dado que la soldadura de blindaje trabaja en contacto directo con elementos abrasivos, la orientación y disposición geométrica que el cordón de soldadura tenga brindará un comportamiento frente al desgaste [4]. Dentro de los patrones geométricos más utilizados se encuentran el waffle patterns, stringer patterns y el dot patterns. La elección de estas geometrías o alguna variación de las mismas dependerá en el tipo de desgaste, ubicación del desgaste y el material de contacto [25].

De acuerdo a la investigación realizada por Kayaba, Kato y Nagasawa [20], el volumen de penetración en desgaste abrasivo se encuentra en función del ángulo de ataque y el esfuerzo cortante presente en la interfaz de contacto entre los materiales. Así, dependiendo de cómo se da la interacción entre superficies, el desgaste será en mayor o menor grado. Ello también confirma que las zonas con mayor concentración de esfuerzos sufrirán un mayor porcentaje de desgaste en comparación con la totalidad del componente.

Por ejemplo, la geometría waffle trabaja bien con arena o con suelos que contienen arcillas, además que este tipo de material contiene pequeñas partículas agregadas que tenderán a acumularse entre los cordones de soldadura formando una capa que ofrece una protección extra al material base. Se caracteriza por poseer gruesos cordones de soldadura cruzadas **Figura 2.9 (a)** [18]

Por otra parte, la configuración Stringer cuenta con cordones de soldadura en paralelo, los cuales pueden generar dos tipos de contacto con el flujo de material abrasivo: Un contacto perpendicular o un contacto alineado con el movimiento. La orientación de estos cordones dependerá del tamaño de la roca en contacto, para grandes dimensiones de roca se recomienda utilizar cordones alineados con el flujo de roca **Figura 2.9(b)**. En cambio, para superficies en donde la abrasión no es excesiva, se recomienda utilizar dot pattern, ya que ofrece un contacto suave entre superficies y una distribución de esfuerzos uniforme **Figura 2.9 (c)**.



**Figura 2.9** Principales configuraciones geométricas de la soldadura de blindaje  
Fuente: Postle Industri. Aplicaciones de hardfacing [18]

Si bien las distribuciones presentadas son básicas, en la industria se utilizan combinaciones entre las tres e incluso geometrías personalizadas, dado el material y las condiciones de desgaste a las cuales el componente será sometido.

Actualmente no se han encontrado patrones fijos en la elección de tipo de soldadura de blindaje en sus tres dimensiones: Composición, técnica y geometría, por lo complejo que resulta el análisis y modelamiento del desgaste. No obstante, se pueden obtener aproximaciones sobre el comportamiento de la soldadura de blindaje centrándose en uno de los tres aspectos mencionados anteriormente.

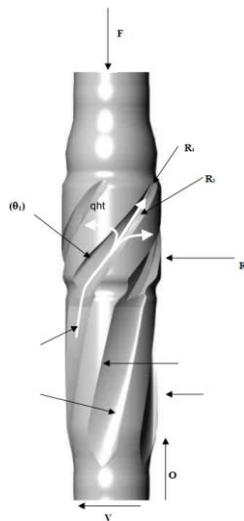
Una forma de realizar un estudio sobre ello es de manera experimental, con pruebas de desgaste en laboratorio y censando el porcentaje de desgaste por medio de scanner 3D; sin embargo, el procedimiento requiere de ensayos destructivos y un alto costo de experimentación, además del tiempo implicado para ello.

Por otro lado, dada la relación entre la distribución de esfuerzos y el grado de desgaste, se puede realizar simulaciones variando la geometría de la soldadura de desgaste y brindando como resultado la distribución de esfuerzos presente en el componente. Por ello, esta investigación optará por la optimización de la soldadura de blindaje por distribución geométrica utilizando simulación computacional.

#### 1.4 Desgaste en la soldadura de blindaje

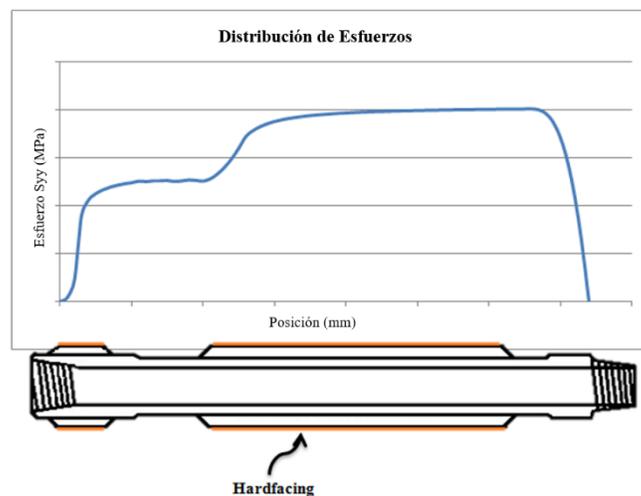
El desgaste es el proceso de desprendimiento progresivo de material sólido de una superficie cuando ésta es sometida a un movimiento relativo con otro cuerpo (sólido, líquido o gas) [8]. En la soldadura de blindaje predomina el desgaste tipo abrasivo, el cual puede presentarse por dos mecanismos: Abrasión de dos cuerpos y abrasión de tres cuerpos. En ambos casos, el grado de desgaste dependerá de la distribución de fuerza en la superficie, coeficiente de fricción, ángulo de ataque y de las propiedades de los materiales. Por ello, las zonas con mayor concentración de carga serán las zonas con mayor índice de desgaste y posibles fracturas por fatiga [26].

La soldadura de blindaje cumple la función de proteger el componente frente al desgaste; por ello, uno de los parámetros a controlar en su aplicación es la uniformidad de desgaste que este brinda. Sin embargo, esta uniformidad puede verse afectada por factores como una mala fabricación en el electrodo, errónea aplicación o mala elección del patrón geométrico. Cabe resaltar que la soldadura de blindaje soportará las cargas durante la perforación **Figura 2.10**, por ello la orientación y forma que posee cumplirá un rol importante en cuanto a protección se refiere.



**Figura 2.10** Representación de fuerzas durante perforación  
Fuente: Kruschov, M. Wear [27]

Una manera de evaluar el rendimiento de la soldadura de blindaje es por medio de la uniformidad que presenta luego de ser sometida a desgaste. Sin embargo, ello implica realizar ensayos prueba y error hasta obtener un desgaste admisible en toda la superficie. Es por ello que actualmente se está investigando sobre patrones de desgaste y modelamiento del mismo, a fin optimizar recursos en la implementación de hardfacing. De acuerdo a la empresa rusa ROTEG [27], en las tuberías de perforación, el perfil de fuerzas deberá ser mayor en las secciones reforzadas con la soldadura de blindaje y a la vez mantener homogeneidad sobre estas a fin de evitar desgaste excesivo y disminuir las fallas por fatiga.



**Figura 2.11** Distribución de fuerzas sobre tubería de perforación con hardfacing.  
Fuente: Elaboración propia en base a ROTEG [27].

#### 1.4.1 Modelamiento del desgaste abrasivo

Si bien el desgaste abrasivo es un fenómeno que depende de muchas variables, existen modelos matemáticos que aproximan el ratio de desgaste contemplando procedimientos experimentales. Es por ello que cada modelo será aplicable a ciertos materiales y en determinadas condiciones dada la naturaleza del fenómeno.

El primer modelo matemático fue planteado por Kruschov [28]. Él sugiere que el ratio de desgaste puede describirse como la inversa de la resistencia de desgaste, la cual está definida en una función lineal considerando la resistencia al desgaste del material de refuerzo, su número de partículas y la resistencia al desgaste de la matriz (**Ecuación 2.1**). Sin embargo,

dicho modelo fue descartado, dado que sugiere que a mayor proporción de material de refuerzo se obtendrá un menor ratio de desgaste, afirmación que fue refutada en 1999, en donde se comprobó que existe un límite en la cantidad de material de refuerzo debido a que ello aumenta la fragilidad del compuesto, haciéndolo más propenso a desgaste por impacto y fracturas por fatiga.

$$R_c = Q^{-1} = xR_r + (1 - x)R_M \quad (2.1)$$

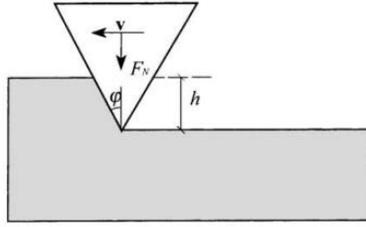
Posteriormente se concluyó que el ratio de desgaste no solo depende de las propiedades mecánicas de los materiales en contacto, sino que también de las formas de las superficies, tamaño de partículas y el desgaste independiente en la soldadura de blindaje y en el material base. De acuerdo a Hutchings y Zum-Gahr, “la pérdida de material durante el desgaste abrasivo de los materiales reforzados con matriz metálica es el resultado de tres factores distintos: el desgaste de la matriz, el desgaste de las partículas de refuerzo (ya sea por microcorte o microgrietas) y la extracción de partículas de refuerzo de la matriz” [29].

Rabinowicz [29] propuso un modelo matemático para la estimación de desgaste con partículas abrasivas cónicas. De acuerdo a su modelo, las partículas abrasivas producen unas ranuras con un volumen dado por:

$$V_g = Lh^2 \tan \varphi \quad (2.2)$$

Donde  $L$  es la longitud de la ranura,  $h$  representa la profundidad y el ángulo  $\varphi$  se visualiza en la **Figura 2.12**. La profundidad de la ranura  $h$  depende de la dureza del material  $H$ , la fuerza normal aplicada  $F_N$  y el ángulo  $\varphi$  mencionado anteriormente, como se aprecia en la **Ecuación 2.3**.

$$h = \left( \frac{2}{\pi \tan \varphi} \cdot \frac{F_N}{H} \right)^2 \quad (2.3)$$



**Figura 2.12** Ranura provocada por partícula abrasiva cónica ideal  
Fuente: Colaço, R. A model for the abrasive wear of metallic matrix particle-reinforced materials [29]

Reemplazando la **Ecuación 2.3** en la **Ecuación 2.2**, el volumen de la ranura generada  $V_g$  por unidad de longitud es:

$$\frac{V_g}{L} = \frac{2}{\pi \tan \varphi} \frac{F_N}{H} \quad (2.4)$$

La **Ecuación 2.4** es válida para solo una partícula abrasiva, para condiciones normales de abrasión se cuenta con un número de partículas abrasivas no cuantificadas; por ello, el volumen total de la ranura generada  $V_{Tg}$  por varias partículas abrasivas está definido por:

$$\frac{V_{Tg}}{L} = \frac{\sum V_{gi}}{L} = \frac{2}{\pi \tan \varphi} \frac{\sum F_{Ni}}{H} = \frac{2}{\pi \tan \varphi} \frac{F_{TN}}{H} \quad (2.5)$$

Donde  $F_{TN}$  es la fuerza normal total (resultante); es decir, para  $n$  partículas abrasivas, el volumen que desplazarán por medido de ranuras será independiente al número de partículas, pero sí proporcional a la fuerza aplicada. Adicionalmente, esta relación es válida si se cumple que todo el volumen de la ranura es efectivamente separado de la superficie y no acumuladas en otras zonas. Por ello se adiciona un factor que representa la efectividad de remoción abrasivo.

$$Q = \eta \frac{V_g}{L} \quad (2.6)$$

Reemplazando la ecuación 2.5 en la ecuación 2.6:

$$Q = K \frac{F_N}{H} \quad (2.7)$$

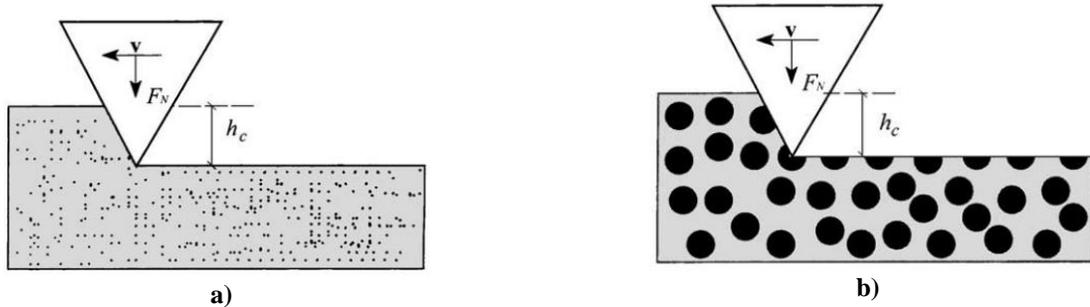
Donde  $K$  representa el coeficiente de desgaste, y está definido por:

$$K = \frac{2\eta}{\pi \tan \varphi} \quad (2.8)$$

Las **Ecuaciones 2.7 y 2.8** son las relaciones conocidas como *Rabinowicz equations*. Estas ecuaciones predicen adecuadamente el desgaste para materiales homogéneos como el mostrado en la **Figura 2.12** Ranura provocada por partícula abrasiva cónica ideal

; sin embargo, la soldadura de blindaje posee una composición con partículas de carburo de tungsteno embebidas en una matriz de acero. Dependiendo del diámetro de dichas partículas y su dureza, la ecuación de Rabinowicz variará para cada caso.

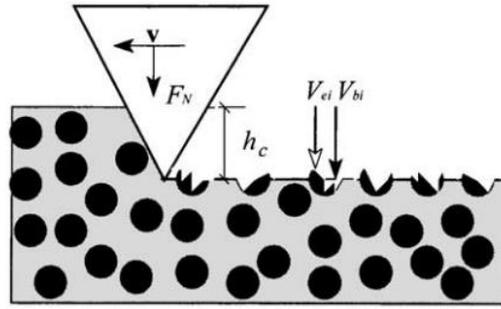
Para partículas de reforzamiento con un diámetro mucho menor a la profundidad de la ranura o con durezas similar a la matriz, se mantendrá la relación de Rabinowicz con la diferencia de que se utilizará la dureza promedio del compuesto (**Ecuación 2.9**).



**Figura 2.13** Ranura en superficie reforzada con partículas (a) pequeñas, (b) baja dureza  
Fuente: Colaço, R. A model for the abrasive wear of metallic matrix particle-reinforced materials [29]

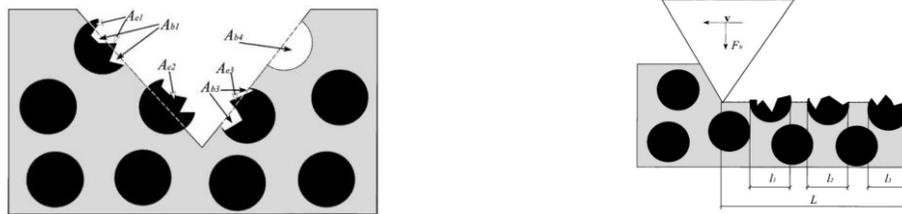
$$Q = K \frac{F_N}{H_C} \quad (2.9)$$

No obstante, generalmente las partículas de reforzamiento poseen durezas mayores a la matriz en la que se encuentran, debido a que su objetivo justamente es aumentar su resistencia a la abrasión por medio del aumento de la dureza promedio del material compuesto. Para esta condición, el volumen efectivo removido por las partículas abrasivas es representado en la **Figura 2.14**.



**Figura 2.14** Ranura superficie con partículas de reforzamiento con dureza mayor a la matriz  
Fuente: Colaço, R. A model for the abrasive wear of metallic matrix particle-reinforced materials [29]

El modelo numérico en ese caso fue presentado por Colaço [30] en donde, basado en la ecuación de Rabinowicz, expresa el volumen efectivo removido como el volumen de la ranura pura menos los volúmenes de las partículas de reforzamiento quebradas.



**Figura 2.15** Sección transversal de la ranura – vista del plano central  
Fuente: Colaço, R. A model for the abrasive wear of metallic matrix particle-reinforced materials [29]

$$V_{eff} = \eta V_g + \sum V_{ei} \quad (2.10)$$

$$V_{eff} = \eta V_g + (V_p - V_e) \quad (2.11)$$

$$V_{eff} = \eta V_g + \Delta V_p \quad (2.12)$$

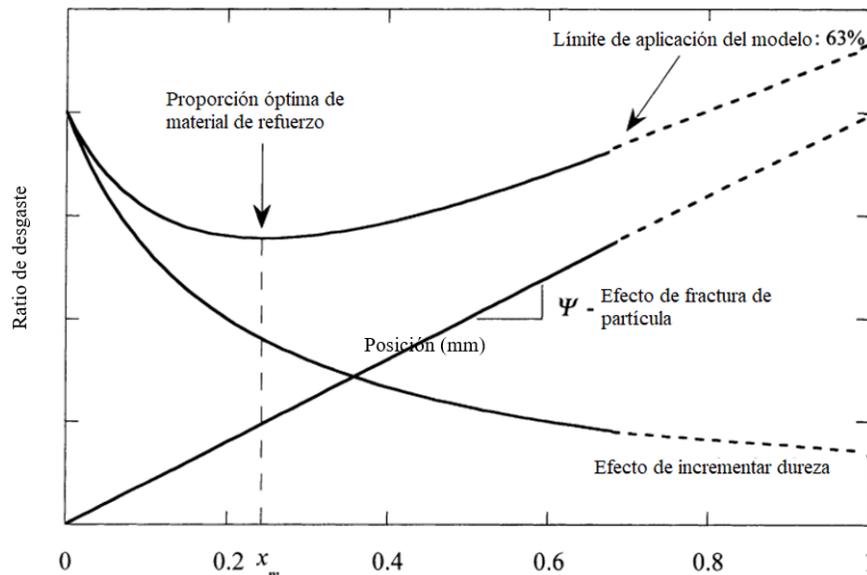
Donde  $\Delta V_p$  representa la contribución de volumen de parte de las partículas de reforzamiento en la matriz, este volumen dependerá las áreas salientes y los vacíos presente en la ranura (**Figura 2.15 a**).

$$\Delta V_p = \omega \overline{\Delta A_p} l_p \quad (2.13)$$

$$Q = \frac{V_{eff}}{L} = \eta \frac{V_g}{L} + \frac{\Delta V_p}{L} \quad (2.14)$$

$$Q = K \frac{F_N}{H_C} + \omega \overline{\Delta A_p} \frac{l_p}{L} \quad (2.15)$$

El modelo presentado en la **Ecuación 2.15** estima el ratio de desgaste en función de la fuerza normal aplicada, además que se pueden definir factores como  $\gamma = \omega \overline{\Delta A_p}$  para establecer el límite de proporción de las partículas de reforzamiento dentro de la matriz.



**Figura 2.16** Parámetros que influyen en el ratio de desgaste

Fuente: Colaço, R. A model for the abrasive wear of metallic matrix particle-reinforced materials [29]

## 1.5 Método de elementos discretos (DEM)

El método de elementos discretos es un método numérico con el cual es posible modelar el comportamiento de sistemas de partículas ante colisiones entre si y/o estructuras que limitan el entorno de simulación [31]. Ese método contribuye en la simulación de movimiento de materiales granulares aplicado en la industria farmacéutica, minería, construcción, entre otros.

El método DEM resuelve ecuaciones de movimiento de la segunda Ley de Newton, con la finalidad de estimar la dinámica de las partículas en interacción. Asimismo, utiliza la ley Fuerza-Desplazamiento para calcular las fuerzas de interacción que al integrarlas en el tiempo pueden predecir la posición y aceleración de los cuerpos en el tiempo “t” [32].

Para el caso de perforación raise borer, la interacción entre las tuberías de perforación y la roca del yacimiento puede ser simulada por medio de este método, ya que la roca representa un material granular compactado el cual puede caracterizarse como un sistema de partículas con fuerzas cohesivas entre sí. La simulación DEM brindará las posiciones de contacto entre roca – tubería, orientación de la roca y fuerzas normales y tangenciales sobre el material granulado.

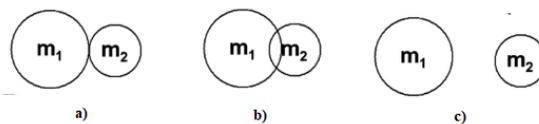
### 1.5.1 Algoritmo del método DEM

Para calcular la dinámica de las partículas por medio del método de elementos discretos se requiere 3 pasos fundamentales [33]:

- a) Definir las partículas en términos de masa, radio, posición, velocidad y aceleración en el tiempo  $t=0$ .
- b) Encontrar todos los contactos entre las partículas. El método registra los contactos existentes entre las partículas utilizando la distancia entre el centro de partículas y los radios de cada una. Existen 3 tipos de contactos: Contacto tangencial, contacto superpuesto, contacto inexistente.

$$\delta = R_1 + R_2 - O_1O_2 \quad (2.16)$$

Donde R es el radio de las partículas y  $O_1O_2$  es la distancia entre centros. Un  $\delta = 0$  representa contacto tangencial entre las partículas,  $\delta < 0$  superposición de partículas y  $\delta > 0$  contacto inexistente entre ellas



**Figura 2.17** Contactos entre partículas.

Fuente: Elaboración propia

- c) Las fuerzas de contacto normal y tangencial son funciones dependientes al  $\delta$  y al componente normal o tangencial de la velocidad relativa entre las partículas.

$$\vec{F}_n = \vec{F}_r + \vec{F}_d \quad (2.17)$$

$$\vec{F}_r = -K \cdot \delta \cdot \vec{n} \quad (2.18)$$

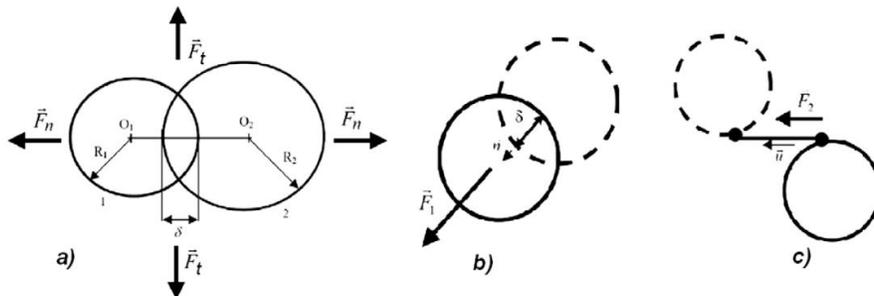
$$\vec{F}_d = -2 \cdot \alpha \sqrt{K \cdot M_{eq}} \cdot \dot{\delta} \cdot \vec{n} \quad (2.19)$$

Donde  $\vec{F}_r$  representa la fuerza de repulsión,  $K$  es la rigidez de contacto,  $\vec{n}$  es el vector unitario normal,  $\vec{F}_d$  Representa la fuerza de disipación viscosa,  $\dot{\delta}$  equivale a la velocidad de impacto y  $M_{eq}$  es la masa equivalente para las dos partículas en contacto. Por otro lado, la fuerza tangencial se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_t = K \cdot l \cdot \vec{u} \quad (2.20)$$

Donde  $l$  es la elongación del contacto y  $\vec{u}$  representa el vector unitario tangente al plano de contacto. Cabe resaltar que la combinación de las fuerzas no debe superar la fuerza crítica de ruptura; en caso la supere, el contacto entre las partículas se perderá.

$$\sqrt{F_n^2 + 3 \cdot F_t^2} \geq F_{rupt} \quad (2.21)$$



**Figura 2.18** Representación gráfica de las fuerzas normales y tangenciales  
Fuente: Vogel, L. From single particle impact behavior to modelling of impact mills [33]

El método de elementos discretos puede ser evaluado tanto a nivel 2D como a nivel 3D, siendo su principal inconveniente la representación de las partículas. Para la realización de la simulación por medio de software se recomienda utilizar elementos esféricos y por medio de enlaces de estas esferas generar la forma de los sólidos deseados. No obstante, la separación de estos elementos puede modificarse por medio de los *breakage models*, con la finalidad de conseguir la mejor representación al fenómeno físico en estudio.

### 1.5.2 Breakage Models

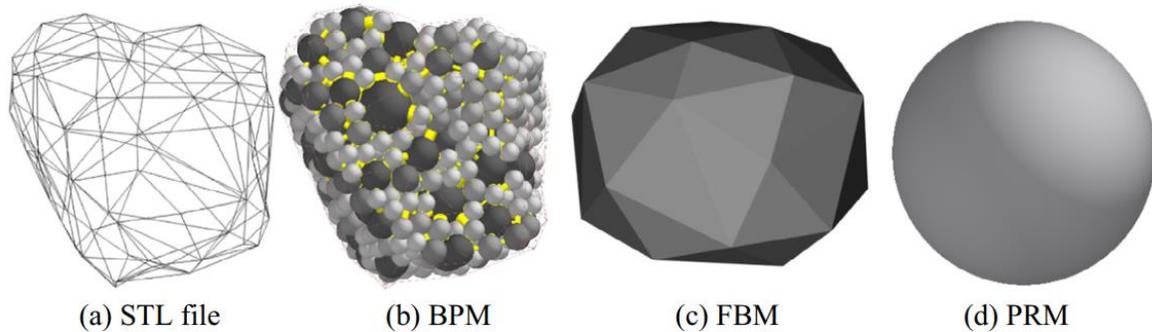
Los breakage models son modelos de acoplamiento y desacoplamiento de partículas utilizadas en las simulaciones por medio del método de elementos discretos. Estos modelos contribuyen a la generación de geometrías complejas por medio de la unión de elementos, los cuales pueden desprenderse por la aplicación de una fuerza que supera la fuerza crítica de ruptura (**Ecuación 1.17**) [34]

Actualmente, las herramientas de simulación brindan breakage models o modelos de contacto basados en tres modelos principales: Bonded Particle model (BPM), Fast Breakage Model (FBM) y Particle Replacement Model (PRM). Cada uno de estos poseen particularidades que pueden ser aprovechadas dependiendo la naturaleza de la simulación a realizar.

Se muestran gráficamente los 3 modelos en la **Figura 2.19**, el modelo BPM adhiere elementos esféricos por medio de enlaces (bonded) cuyas propiedades se establecen al iniciar la simulación. Este modelo es el más utilizado por los software de simulación DEM, dada su simplicidad en la creación de geometrías. Su principal desventaja es la calibración del estado inicial y representar adecuadamente un cuerpo irregular.

Por otra parte, el modelo FBM es utilizado para fenómenos de rotura presentes en materiales rígidos como las rocas. El modelo se basa en generar un sólido por medio de poliedros unidos por las aristas y que cuenta con una energía requerida para fracturarse. La dirección de la fractura dependerá de la orientación de la fuerza y de una función de probabilidades propuesta por Vogel y Peukert [35] .

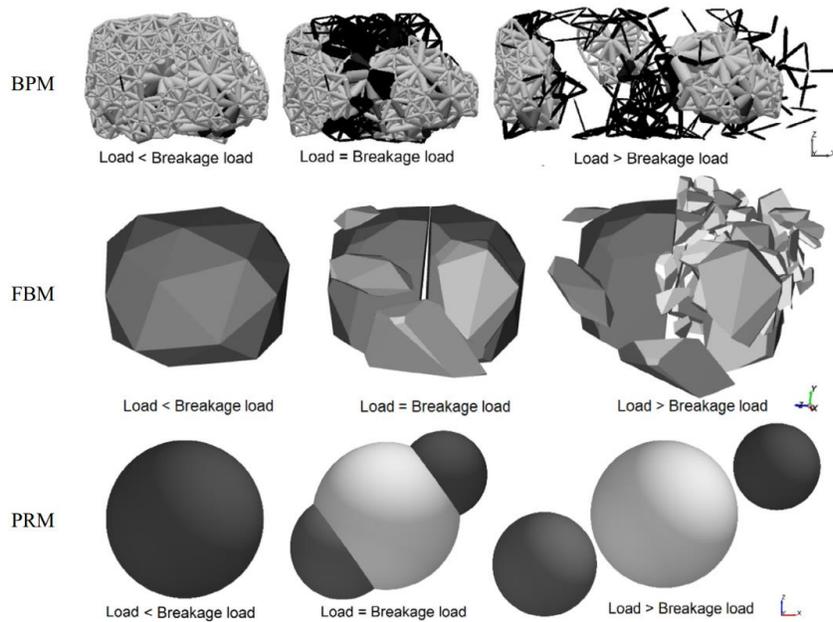
Por último, el modelo PRM consiste en el reemplazo instantáneo de una partícula de mayor diámetro por partículas más pequeñas cuando están sometidas a cargas mayores a la fuerza de ruptura. Este modelo se caracteriza por requerir un menor esfuerzo computacional; sin embargo, su estimación de la fragmentación del sólido muchas veces se ve limitada por la geometría, dado que solo se pueden representar por elementos esféricos [36].



**Figura 2.19** Modelado del sólido a partir de los principales breakage models  
 Fuente: Jimenez-Herrera, N. et al. Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds [36]

Como se puede visualizar, en cuanto al modelado del sólido, el modelo PRM es el que más alejado se encuentra en la representación. Ello repercute en las interacciones con las demás partículas y estructuras ya que se darán ángulos de contacto que no representan adecuadamente sólidos con geometrías no esféricas. Asimismo, el proceso de fragmentación,

$\sqrt{F_n^2 + 3 \cdot F_t^2} \geq F_{rupt}$ , de los tres modelos presentado se visualiza en la **Figura 2.20**.



**Figura 2.20** Fragmentación de una partícula (roca) para cada breakage model

Fuente: Jimenez-Herrera, N. et al. Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds [36]

Jiménez-Herrera, et al [36] analizó los tres modelos y su performance ante distintas simulaciones, comparándolos con el proceso experimental a fin de validar los modelos y establecer ventajas y desventajas de cada uno en distintos aspectos. El cuadro resumen se presenta en la **Tabla 2.3**.

Criterion		Breakage model/simulator		
		BPM/EDEM	FBM/ROCKY	PRM/EDEM
1	Connection of model parameters to material mechanical properties	↑	↔	↔
2	Ease in modeling and calibration stage	↓↓	↑	↑
3	Fidelity in describing breakage probability	↑	↑↑	↓
4	Ease in estimation of size distribution of the progeny	↓↓	↑↑	↑↑
5	Fidelity in describing ball-bed interaction in impact	↑↑	↑	↑
6	Fidelity in describing ball-bed fragment distribution	↔	↔	↑↑
7	Mass and volume conservation	↓	↑↑	↓
8	Description of surface breakage by chipping	↑	↑	↓↓
9	Ease in carrying out the simulations (i.r.t. computational effort)	↓↓	↑	↑↑

Key: ↑↑: significant; ↑: reasonable; ↔: limited; ↓: fairly limited; ↓↓: extremely limited.

**Tabla 2.3** Comparación cualitativa de los principales breakage models

Fuente: Jiménez-Herrera, N. et al. Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds [36].

Para la simulación se utilizó el modelo FBM, dada su afinidad hacia el modelado de rocas rígidas, además de representar de mejor manera la geometría de los sólidos para obtener puntos de contactos más cercanos a lo que realmente acontece.

## 1.6 Método de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos es un método numérico que contribuye en la resolución de ecuaciones diferenciales por medio de aproximaciones. Se basa en la discretización de un dominio continuo en un número finito de elementos, cada uno de los cuales se unen mediante nodos. Así la resolución para un elemento puede extrapolarse para los elementos adyacentes hasta cubrir todo el dominio. Frente al método de elementos discretos, el FEM analiza sistemas continuos a partir de aproximaciones en un sistema discreto, mientras que el DEM analiza sistemas discretos por medio de interacciones entre partículas que no representan un sistema continuo propiamente dicho, sino más bien, cada partícula representa un sistema independiente [37].

### 1.6.1 Algoritmo del método de elementos finitos

Existen distintas formas de formulación para el método de elementos finitos, una de ellas es la formulación por medio del trabajo virtual. Esta se define como un campo real de cargas multiplicado por un campo virtual de deformaciones, lo que sugiere una formulación basada en desplazamientos y no en las fuerzas [37].

Su formulación se basa en el principio de conservación de energía utilizando desplazamientos y deformaciones virtuales,  $\bar{u}$  y  $\bar{\epsilon}$  respectivamente. Se toma en cuenta el trabajo realizado fuerzas de tracción, de cuerpo y las de reacción. La suma de todas ellas dará como resultado el trabajo virtual realizado

$$\int_V \epsilon^{-T} \sigma dV = \int_V u^{-T} f^b dV + \int_S u^{-T} f^s dS + \sum_i u^{-i T} R^i \quad (2.22)$$

En donde:

$\int_V \epsilon^{-T} \sigma dV$ : Trabajo virtual realizado por fuerzas internas

$\int_V u^{-T} f^b dV$ : Trabajo virtual realizado por fuerzas de cuerpos (volumen)

$\int_S u^{-T} f^s dS$ : Trabajo virtual realizado por fuerzas de tracción (superficie)

$\sum_i u^{-i T} R^i$ : Trabajo virtual total realizado por las  $i$ 's fuerzas exteriores

Adicionalmente,  $\bar{u}$  y  $\bar{\epsilon}$  se relacionan mediante las ecuaciones de compatibilidad por medio del vector de desplazamiento nodal real conocido para cada elemento  $k$ .

$$\mathbf{u}^K = \mathbf{N}_k \bar{\mathbf{U}} \quad (2.23)$$

$$\boldsymbol{\epsilon}^K = \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{U}} \quad (2.24)$$

Donde la matriz  $N$  representa las funciones de forma para cada elemento,  $\bar{\mathbf{U}}$  es el campo de desplazamiento virtual y  $B$  contiene operadores que derivan las funciones de forma  $N$ . Reemplazando las **Ecuaciones 2.23** y **2.24** en la **Ecuación 2.22**, el trabajo virtual realizado por las fuerzas internas queda expresada en:

$$\int_V \boldsymbol{\epsilon}^{-T} \boldsymbol{\sigma} dV = \sum_k \int_V (\mathbf{B}^k \bar{\mathbf{U}}^k)^T \mathbf{C}^k \boldsymbol{\epsilon}^k dV \dots \dots \dots (2.25)$$

En la **Ecuación 2.25**, la matriz  $C$  representa la relación esfuerzo – deformación del material para cada elemento. Adicionalmente, dado que, en la integral de trabajo virtual por las fuerzas internas, el esfuerzo es real y no virtual, en la multiplicación  $\mathbf{C}^k \boldsymbol{\epsilon}^k$  debe entenderse el término  $\boldsymbol{\epsilon}^k$  como deformaciones reales. Así, se puede expresar la **Ecuación 2.20** de manera matricial como sigue:

$$\sum_k \int_V (\mathbf{B}^k \bar{\mathbf{U}}^k)^T \mathbf{C}^k \boldsymbol{\epsilon}^k dV = \sum_k \int_V (\mathbf{B}^k \bar{\mathbf{U}}^k)^T \mathbf{C} \mathbf{B} \bar{\mathbf{U}} = \bar{\mathbf{U}}^k \left[ \sum_k \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} \right] \bar{\mathbf{U}} \quad (2.26)$$

Asimismo, la parte izquierda la **Ecuación 2.22** quedará expresada de la siguiente manera:

$$\sum_k \int_V \bar{\mathbf{U}}^k N^T \mathbf{f}^b dV + \sum_k \int_S \bar{\mathbf{U}}^k N^T \mathbf{f}^s dS + \sum_k N^T \bar{\mathbf{U}}^k \mathbf{R}^k \quad (2.27)$$

$$\bar{\mathbf{U}}^k \left[ \left\{ \sum_k \int_V N^T \mathbf{f}^b dV \right\} + \left\{ \sum_k \int_S N^T \mathbf{f}^s dS \right\} + \sum_k N^T \mathbf{R}^k \right] \quad (2.28)$$

Simplificando los términos matriciales diferenciales se definen las siguientes matrices.

$$\left[ \sum_k \int_V B^T C B \right] = K \text{ (Matriz de rigidez)} \quad (2.29)$$

$$\left\{ \sum_k \int_V N^T f^b dV \right\} = R_b \quad (2.30)$$

$$\left\{ \sum_K \int_S N^T f^s dS \right\} = R_s \quad (2.31)$$

$$\sum_k N^T R^k = R_c \quad (2.32)$$

De esta manera, la **Ecuación 2.22** pasa de una ecuación diferencial compleja a una ecuación lineal, **Ecuación 2.34**, de manera matricial, cuya resolución da como resultado los desplazamientos de los nodos de un elemento y con ayuda de técnicas de extrapolación se calculará dichos valores para todo el dominio.

$$\overline{\dot{U}}^T K \dot{U} = \overline{\dot{U}}^k [R_b + R_s + R_c] \quad (2.33)$$

$$K \dot{U} = R \quad (2.34)$$

La **Ecuación 2.34** representa la lógica de resolución del método de elementos finitos utilizada por los distintos software comerciales y de código abierto.

## CONCLUSIONES

La presente investigación busca mostrar una nueva metodología de optimización para las soldaduras de blindaje con la cual se podrá ahorrar tiempo y dinero en el desarrollo y elección de la distribución geométrica de los cordones de soldadura a utilizar en los estabilizadores de perforación raise borer. Para ello se definirán variables de diseño y eficiencia que dependerán de la distribución de la soldadura de blindaje y la distribución de esfuerzos que resulte para cada una.

Asimismo, la metodología de simulación y análisis de datos servirá como base para futuros estudios aplicados a elementos de desgaste en distintas condiciones. Cabe resaltar, que la soldadura de blindaje estudiada en la presente investigación es aplicada en estabilizadores; no obstante, la perforación raise bore posee otros componentes que también están sujetos a desgaste abrasivo y en consecuencia se podría realizar un estudio sobre viabilidad de implementación de soldadura de blindaje para diversos componentes.

Adicionalmente, elección de la soldadura de blindaje óptima para cada condición de trabajo beneficiará en el ámbito de seguridad ya que apaciguará la fractura por fatiga y en consecuencia garantizará la integridad de la operación minera en cuestión.

Por otro lado, para la parte experimental y computacional de la investigación se tiene planeado, primero, caracterizar la roca y el cordón de la soldadura de blindaje a base de partículas de tungsteno, ello brindará los datos de entrada para el análisis del caso base y para las simulaciones computacionales. Se requerirán parámetros como coeficiente de fricción y coeficiente de restitución entre la roca y la estructura del estabilizador como también ángulos de reposo y dureza del material geológico a utilizar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BCRP, «Perú in figures,» LIMA - PERÚ, 2018.
- [2] H. Hartman, SME Mining Engineering, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1992.
- [3] J. H. Bulloch y J. L. Henderson, «Some consideration of wear and hardfacing materials,» *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. vol 46, pp. pp. 251-267, 1990.
- [4] G. R. Pradeep, A. Ramesh y B. Durga Prasad, «A review paper on harfacing procesess and materials,» *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. Vol 2(11), pp. pp. 6507 - 6510, 2010.
- [5] M. Reis, «ROCKY AND ANSYS MECHANICAL COUPLING (DEM-FEM),» En línea. [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/about-ansys/partner-ecosystem/software-partners/esss-rocky>. [Último acceso: 7 Mayo 2019].
- [6] P. Fuentes, «Análisis del desgaste en componentes de cargadores frontales, mediante modelos basados en elementos finitos,» *Revista chilena de ingeniería*, pp. pp. 612-621, 2018.
- [7] H. Monsalvaje, D. Mena y J. Giraldo, «Efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura,» *Dyna*, vol. 71, n° 144, pp. 151-163, 2004.
- [8] A. Noriega, Resistencia al desgaste abrasivo de recargues duros fabricados con electrodos con 5% de FeTi y contenido variable de FeV, Lima: PUCP, 2013.
- [9] k. Shimizu, T. Noguchi y H. Seitoh, «FEM analysis of erosive wear,» *WEAR*, pp. pp. 779-784, 2001.
- [10] G. Deli, S. Lianzhong y L. Jihong, «Prediction of casing wear in extended-reach drilling,» *China University of Petroleum*, pp. pp. 494 - 501, 2010.

- [11] M. Sousani, «Predicting Drill Wear using the Discrete Element Method,» 13 Junio 2017. [En línea]. Available: <https://www.edemsimulation.com/blog/predicting-drill-wear-using-discrete-element-method/>. [Último acceso: 15 de Abril del 2019].
- [12] E. Oñate y C. Labra, «Avances en el desarrollo de los métodos de elementos discretos y elementos finitos para el análisis de problemas de fractur,» *Anales de mecanica de la fractura*, pp. pp. 27-34, 2005.
- [13] I. Fabian, Interviewee, *Costos operativos del Raise Boring*. [Entrevista]. 25 Abril 2019.
- [14] L. Zhiqiang, «Key technologies of drilling process with raise boring method,» *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, vol. 7, pp. 385-394, 2015.
- [15] Herrenknecht, «Raise Boring Rig (RBR),» 16 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/raise-boring-rig-rbr/>. [Último acceso: 2019 Abril 20].
- [16] J. Larsen-Basse, «Wear of hard-metals in rock drilling: a survey of the literature,» *Powder Metallurgy*, vol. 16, n° 3, pp. 1-32, 1973.
- [17] P. Agudelo, Estudio de desgaste de recubrimientos duros en una herramienta de arado tipo cincel, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [18] Postle Industries, «Cuarepoti,» Diciembre 2018. [En línea]. Available: <http://www.cuarepoti.com.ar/web-es/aplicaciones-10.html>. [Último acceso: 16 Junio 2019].
- [19] D. Kotecki y J. Ogborn, «Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys,» de *Welding Research Supplement*, *Welding Journal*, 1995, pp. pp. 269-278.
- [20] T. Kayaba, K. Kato y Y. Nagasawa, «Abrasive wear in stick-slip motion,» *Wear of Material*, pp. 439-446, 1981.
- [21] M. Moore, «The abrasive wear resistance of surface coatings,» *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 20, n° 02, pp. 167-179, 1975.
- [22] M. F. Buchely, J. C. Gutierrez, L. M. Leon y A. Toro, «The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys,» *Wear*, vol. 259, n° 6, pp. 52-61, 2005.

- [23] V. Balasubramanian, R. Varahamoorthy, C. S. Ramachandran y C. Muralidharan, «Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, n° 9, pp. 9-10, 2008.
- [24] TECSUP, «Metalurgia de la soldadura,» TECSUP, Lima, 2015.
- [25] C. Okechukwu, O. A. Dahunsi, P. K. Oke, I. O. Oladele y M. Dauda, «Review on hardfacing as method of improving the service life of critical components subjected to wear service,» *Nigerian Journal of Technology*, vol. 36, n° 4, pp. 1095-1103, 2017.
- [26] R. Prassama, Friction and wear behaviour of cenosphere dispersed aluminium matrix composite fabricated by powder metallurgy route, Rourkela-India: National Institute Technology, 2015.
- [27] ROGTEC - Russian Oil and Gas Technologies, «Predicting and Preventing Drill String Fatigue Failure,» 24 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://rogtecmagazine.com/ssc-predicting-and-preventing-drill-string-fatigue-failure/>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [28] M. M. Kruschov, «Wear,» *Wear*, vol. 28, pp. 69-88, 1974.
- [29] E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, New York: Wiley, 1965.
- [30] R. Colaço, «A model for the abrasive wear of metallic matrix particle-reinforced materials,» *Wear*, vol. 254, n° 8, pp. 625-634, 2003.
- [31] EDEM Simulation, «What is DEM – An Introduction to the Discrete Element Method,» 6 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.edemsimulation.com/webinar/dem-introduction-discrete-element-method/>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [32] N. S. Weerasekara, M. S. Powell, P. W. Cleary, L. M. Tavares, M. Evertsson y R. D. Morrison, «The Contribution of DEM to the Science of,» *Powder Technology*, vol. 248, pp. 3-24, 2013.
- [33] D. Iliescu, D. Gehin, I. Iordanoff, F. Girot y M. E. Gutiérrez, «A discrete element method for the simulation of CFRP cutting,» *Composites Science and Technology*, vol. 70, pp. 73-80, 2010.

- [34] P. Rizkalla y R. Bharadwaj, «BREAKAGE MODELLING IN ROCKY DEM,» 2015.
- [35] L. Vogel y W. Vogel, «From single particle impact behavior to modelling of,» *Chem. Eng. Sci.*, vol. 60, n° 18, pp. 5164-5176, 2005.
- [36] N. Jiménez-Herrera, G. Barrios y L. M. Tavares, «Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds,» *Advanced Powder Technology*, vol. 29, n° 3, pp. 692-706, 2018.
- [37] F. Enciso, *Procedimiento para el análisis dinámico de estructuras usando el método de elementos finitos*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014.