



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**Análisis de la resistencia a la abrasión de cermets Fe-SiC para aplicaciones mineras.**

POR

**Joaquín Ezequiel Salinas Tapia**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
Dr. Carlos Andrés Medina Muñoz  
Dr. Nicolás Araya Rivera

Marzo 2025  
Concepción (Chile)

© 2025 Joaquín Ezequiel Salinas Tapia

© 2025 Joaquín Ezequiel Salinas Tapia

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

## Resumen

El presente trabajo analiza la resistencia al desgaste por abrasión del cermet Fe-SiC, material compuesto por hierro (Fe) y carburo de silicio (SiC), con potencial aplicación en la industria minera. Para evaluar su comportamiento tribológico, se realizaron ensayos normalizados según las normas ASTM G65 (abrasión de bajo esfuerzo) y ASTM B611 (abrasión de alto esfuerzo), comparando los resultados con materiales convencionales como el acero SAE 1020 y el acero SAE 4140 templado.

Bajo la norma ASTM G65, el cermet Fe-SiC presentó una pérdida de volumen promedio de 142,95 mm<sup>3</sup>, mientras que el acero 1020 alcanzó 156,11 mm<sup>3</sup>, lo que equivale a una reducción del 9,2% en favor del Fe-SiC. Sin embargo, esta mejora es marginal considerando la complejidad y costo de fabricación del cermet.

En contraste, los ensayos ASTM B611 demostraron una notable superioridad del cermet Fe-SiC. Este material registró una pérdida de volumen de solo 2,51 mm<sup>3</sup> frente a un promedio de 105,42 mm<sup>3</sup> para el acero 4140 templado, lo que representa una disminución del 97,6% en la pérdida de volumen.

Los resultados permiten concluir que el cermet Fe-SiC es una alternativa viable para aplicaciones industriales donde predominen condiciones de alta carga y abrasión intensa, como en entornos mineros. No obstante, en escenarios de bajo esfuerzo, su desempeño no justifica plenamente los mayores costos de producción.

Finalmente, se propone como línea futura de investigación evaluar el efecto de variables adicionales, tales como la temperatura de operación y la naturaleza del abrasivo, para determinar cómo estas influyen en la resistencia al desgaste del material.

**Palabras clave: Cermet Fe-SiC, abrasión, ASTM G65, ASTM B611, tribología.**

## Abstract

This study analyzes the abrasion wear resistance of Fe-SiC cermet, a composite material composed of iron (Fe) and silicon carbide (SiC), with potential applications in the mining industry. To assess its tribological behavior, standardized tests were conducted according to ASTM G65 (low-stress abrasion) and ASTM B611 (high-stress abrasion), comparing the results with conventional materials such as SAE 1020 steel and quenched SAE 4140 steel.

Under ASTM G65 conditions, the Fe-SiC cermet exhibited an average volume loss of 142.95 mm<sup>3</sup>, whereas SAE 1020 steel reached 156.11 mm<sup>3</sup>, representing a 9.2% reduction in favor of the cermet. However, this improvement is considered marginal given the complexity and manufacturing costs associated with Fe-SiC.

In contrast, the ASTM B611 tests demonstrated a remarkable superiority of the Fe-SiC cermet, which recorded a volume loss of only 2.51 mm<sup>3</sup> compared to an average of 105.42 mm<sup>3</sup> for quenched SAE 4140 steel equivalent to a 97.6% reduction in wear.

These results indicate that Fe-SiC is a viable alternative for industrial applications involving high loads and intense abrasion, such as those commonly found in mining environments. However, under low-stress conditions, its performance does not fully justify the higher production costs.

Finally, future research should address the influence of additional variables such as operating temperature and abrasive type on the wear resistance of the material.

**Keywords: Keywords: Fe-SiC cermet, abrasion, ASTM G65, ASTM B611, tribology.**

## Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos .....	iii
Lista de Tablas .....	iv
Lista de Figuras .....	v
Glosario.....	vii
1 CAPÍTULO 1: Introducción .....	1
1.1 Contexto. ....	1
1.2 Materiales cermets .....	2
1.3 Objetivos generales y específicos. ....	4
2 Capítulo 2: Marco teórico .....	5
2.1 Norma ASTM G65.....	5
2.2 Norma ASTM B611.....	7
3 Capítulo 3: Materiales y métodos.....	9
3.1 Metalurgia de polvos.....	9
3.2 Material compuesto Fe-SiC.....	9
3.3 Máquina de desgaste abrasivo según norma ASTM G65. ....	10
3.4 Condiciones de los ensayos. ....	15
4 Capítulo 4: Adaptación de equipos y normas. ....	18
4.1 Modificaciones para la norma G65.....	18
4.2 Modificaciones para la norma B611. ....	19
5 Capítulo 5: Ensayos y análisis de resultados. ....	30
5.1 Ensayos Norma ASTM G65.....	30
5.2 Ensayos norma ASTM B611 .....	38
6 Capítulo 6: Conclusiones. ....	44
Referencias.....	45
7 Anexos .....	47
Anexo 1 .....	47
Anexo 2 : .....	48

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Propiedades material simulacion FEM. ....	22
<b>Tabla 2</b> Fuerzas simulacion.....	25
<b>Tabla 3</b> Valores fuerza normal sobre la muestra.....	33
<b>Tabla 4</b> Datos recopilados durante el ensayo ASTM G65.....	36
<b>Tabla 5</b> Datos recopilados durante el ensayo ASTM B611. ....	40

## Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama esquemático del aparato de prueba G65. ....	6
Figura 2: Diagrama esquemático del sistema de prueba de abrasión ASTM B611. ....	8
Figura 3: Diagrama esquemático del proceso de preparación de muestras de cermet.[14].....	9
Figura 4: Máquina de desgaste abrasivo según norma ASTM G65.....	10
Figura 5: motor eléctrico siemens 1LE0102-0EB02-2AA4. ....	10
Figura 6: reductor de velocidades Keb FCNDK63. ....	11
Figura 7: transmisión por correas.....	11
Figura 8: Rueda revestida de goma. ....	12
Figura 9: Eje de transmisión de la rueda de goma. ....	12
Figura 10: rodamiento FSB-P207.....	13
Figura 11: Rueda de Goma sin goma. ....	13
Figura 12: Porta probeta. ....	14
Figura 13. Brazo de palanca.....	14
Figura 14: modelo sistema. ....	15
Figura 15: Grafico de la composición de la goma. ....	16
Figura 16: Estado rueda ensayo ASTM G65. ....	18
Figura 17: Plano Porta muestra. ....	19
Figura18: Plano rueda ensayo ASTM B611. ....	20
Figura 19: Plano Estanque. ....	21
Figura 20: Ensamble completo del estanque y la estructura de soporte. ....	22
Figura 21: Condiciones de borde. ....	23
Figura 22: Condición de fijación.....	23
Figura 23: Condiciones de contacto del sistema. ....	24
Figura 24: Mallado del Sistema. ....	24
Figura 25: Gráficos Esfuerzos de Von mises.....	26
Figura 26: Expresión ilustrativa esfuerzos Von mises. ....	26
Figura 27: Fuerzas máximas de von mises por pernos.....	27
Figura 28: Perno inferior izquierdo. ....	27
Figura 29: Perno inferior derecho. ....	27
Figura 30: Perno intermedio izquierdo.....	28
Figura 31: Perno intermedio derecho .....	28
Figura 32: Perno inferior izquierdo.....	28
Figura 33: perno inferior derecho.....	28
Figura 34: Factor de seguridad del sistema.....	29
Figura 35: diagrama cuerpo libre. ....	31
Figura 36: Características físicas del conjunto brazo más porta muestra. ....	31
Figura 37: Microestructura de la Arena de Cuarzo Caracterizada por SEM. ....	34
Figura 38: panel de control velocidad de la rueda. ....	35
Figura 39: Gráfico comparativo de la pérdida de volumen individual.....	36

Figura 40: Comparación entre los materiales Acero 1020 y FE-SIC.....	37
Figura 41: Grafico comparativo resultados ensayos ASTM G65. ....	38
Figura 42: perdida de volumen por muestra- Ensayo B611. ....	41
Figura 43: Promedio y varianza de volumen perdido - Ensayo B611.....	41
Figura 44: Resultados perdidas de volumen. ....	43

## Glosario

ASTM	:	American Society for Testing and Materials
SAE	:	Society of Automotive Engineers
UdeC	:	Universidad de Concepción
CTI	:	Institución de Tribología China
SIC	:	Cerámica de carburo de silicio

## Símbolos

### Letras griegas

$\alpha$ :	Ángulo de inclinación de la rueda en el ensayo ASTM G65.
$\rho$ :	Densidad del material ( $\text{g/mm}^3$ ).
$\sigma$ :	Esfuerzo aplicado (MPa).
$\mu$ :	Coefficiente de fricción

## CAPÍTULO 1: Introducción

### 1.1 Contexto.

El desgaste abrasivo es uno de los principales desafíos que enfrentan las industrias, especialmente aquellas que operan en entornos de alta fricción, como la minería, la metalurgia y el transporte. Este fenómeno ocurre cuando partículas duras y abrasivas interactúan con las superficies de componentes mecánicos, generando una pérdida gradual de material. Esta fricción constante entre las superficies provoca no solo daños en los equipos, sino también un consumo energético adicional y costos económicos significativos.

Desde una perspectiva económica, el desgaste de los equipos mecánicos requiere reparaciones y reemplazos frecuentes. Estas actividades, si bien son necesarias para mantener las operaciones, no crean nuevo valor porque simplemente renuevan equipos que fallan por la existencia de la fricción y el desgaste. En 2006, la Institución de Tribología China (CTI) estimó posibles ahorros por desgaste para ocho industrias donde se incluían la metalurgia, la energía y el transporte dentro de otras, se estima que podrían haber ahorrado aproximadamente 41.400 millones de dólares estadounidenses, lo que representaba el 1,55% del PIB de China en ese año.[1] Además, a nivel mundial en el sector minero, el desgaste genera pérdidas económicas anuales estimadas en 210.000 millones de euros, siendo el 40% de estas pérdidas destinadas a superar la fricción, mientras que el 27% corresponde a la producción de piezas de repuesto y equipos, el 26% al mantenimiento, y un 7% a pérdidas de producción. [2]

El desgaste no solo afecta los costos de mantenimiento, sino que también tiene un impacto significativo en el consumo de energía. Los sistemas mecánicos en los que hay movimiento entre superficies generan fricción, lo que resulta en pérdida de energía. Este es un fenómeno que afecta prácticamente a todos los equipos en funcionamiento. Cada año, los contactos tribológicos (fricción y desgaste) representan aproximadamente el 23 % del consumo total de energía en todo el mundo.[3] Este 23 % equivale a 119 exajulios (EJ), de los cuales un 20% se emplea únicamente para superar la fricción y el resto de 3 % se utiliza en la remanufactura de componentes desgastados y el reemplazo de equipos que han fallado debido al desgaste.[4]

Las emisiones de CO<sub>2</sub> de 0,0682 toneladas métricas (Mt) resultan de 1 PJ petajulio (PJ) de consumo de energía a nivel global promedio. Por lo tanto, la reducción de la fricción y el desgaste ayudará a la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Existe un creciente interés en el diseño y desarrollo de nuevos e innovadores materiales duros y resistentes al desgaste, que puedan reducir el consumo de energía originado por la fricción y el desgaste en un 40 % durante los próximos 10 a 15 años.[4] Materiales como el Cermets Fe-SiC llegarían a cubrir esta necesidad imperante en la industria.

## 1.2 Materiales cermets

### 1.2.1 Definiciones cermet

Según German (2005), un cermet es un material compuesto particulado que consiste en partículas cerámicas unidas mediante una matriz metálica. El término original fue acuñado al unir las palabras cerámica y metal para describir este tipo de compuestos.[5]

Los cermets han sido definidos como "materiales compuestos que consisten en dos componentes, uno de los cuales es un óxido, carburo, boruro u otro compuesto inorgánico similar, y el otro un aglutinante metálico" (Reinhart, 1987).[6]

### 1.2.2 Historia y desarrollo tecnológico de los cermets.

El término “cermet” fue introducido después de la Segunda Guerra Mundial. Proviene de la combinación de las sílabas “cer” de cerámica y “met” de metal.

Durante la década de 1930, más de una docena de productores de metales duros adoptaron estos materiales para el mecanizado de acero, motivados por sus superiores propiedades de resistencia al desgaste, aunque su resistencia a la flexión era solo del 70% respecto a los WC–Co. Un inconveniente adicional de los metales duros basados en TiC era su poca soldabilidad sobre sustratos de acero, en comparación con los carburos estándar.

En los años 1950, Ford Motor Company introdujo un nuevo tipo de cermet que contenía partículas de TiC no aleado en una matriz de Ni–Mo. El contenido de molibdeno reaccionaba con el TiC durante la sinterización, formando una franja superficial de (TiMo)C alrededor del núcleo de TiC. Esta franja mejoraba significativamente la mojabilidad del TiC, sin comprometer la dureza ni la resistencia al desgaste del núcleo cerámico. No obstante, estos cermets presentaban tendencia a la fractura del filo al mecanizar aceros.

Durante los años 1968 a 1970, Richard Kieffer y sus colaboradores demostraron que el nitruro de titanio (TiN) y los carbonitruros de titanio podían utilizarse como materiales base para nuevos metales duros. No obstante, su uso requería mejorar la mala mojabilidad de estas fases cerámicas por el metal líquido aglutinante durante la sinterización. Se descubrió que la adición de molibdeno o carburo de molibdeno al aglutinante (generalmente níquel) ayudaba a eliminar el oxígeno superficial presente en forma de óxidos, permitiendo así una mejor unión interfacial.

A pesar de sus propiedades prometedoras, estos cermets no tuvieron gran aceptación en Europa ni en EE.UU. Sin embargo, en Japón, la investigación y desarrollo en cermets con contenido de nitruros fue alentada. La escasez de tungsteno, acentuada por la crisis del petróleo de 1975, probablemente impulsó

el interés en materiales de corte sin tungsteno, ya que el titanio es un elemento abundantemente disponible en la corteza terrestre.

Otro factor que contribuyó al éxito de los cermets en Japón fue el desarrollo de máquinas de corte metalmeccánico electrónicamente controladas, junto con la automatización de los procesos de mecanizado, que permitieron reemplazar materiales más tenaces como el WC-Co por cermets más resistentes al desgaste. Esta evolución también conllevó al incremento de la velocidad de corte y la reducción de las vibraciones, favoreciendo el uso de cermets.

El desarrollo adicional de tecnologías como el moldeo a presión, la tecnología de cercano a la forma final (near-net shape) en procesos pulvimetalúrgicos y la forja en caliente, condujo a la necesidad de realizar operaciones de corte con mayores velocidades y menores profundidades de pasada. En este contexto, la superior nitidez del filo de los cermets, en comparación con los carburos recubiertos, resultó ser una ventaja decisiva.[5]

### **1.2.3 Procesos de fabricación.**

En los cermets, la fase cerámica actúa principalmente como refuerzo, mientras que la fase metálica funciona como aglutinante.

Se utilizan comúnmente óxidos, carburos, nitruros y carbonitruros de tungsteno, titanio, tántalo, entre otros, mientras que metales como el molibdeno y aleaciones de níquel, entre otros, se emplean habitualmente como aglutinantes metálicos.

Su fabricación puede llevarse a cabo mediante varios métodos convencionales, tales como: pulvimetalurgia, aleado mecánico, Sinterización por plasma de chispa (SPS), Prensado en caliente, Colada, proyección por plasma, técnicas láser, etc.

Recientemente, la fabricación aditiva (AM) ha sido considerada como un proceso atractivo para la fabricación de cermets. Algunas de las principales técnicas de AM utilizadas para este fin son: Sinterizado o fusión selectiva por láser (SLS/SLM), LENS (Laser Engineered Net Shaping), inyección de aglutinante (Binder jetting), deposición directa por láser, entre otras.

Además, métodos más recientes como la escritura directa por tinta (direct ink writing) y la impresión 3D mediante gel (3D gel printing), también se han empleado recientemente para la fabricación de cermets.[7]

### **1.2.4 Aplicaciones industriales.**

Los cermets son compuestos avanzados formados por fases cerámicas (TiN, TiC, WC, entre otras) dispersas en una matriz metálica de níquel y cobalto, que ofrecen una combinación sinérgica de

dureza, resistencia al desgaste y tenacidad. Su estructura tipo núcleo–borde, especialmente en sistemas como TiWCN–Co, permite controlar la microestructura mediante sinterización en fase líquida, promoviendo una adhesión eficaz entre fases y mejorando el rendimiento mecánico.

Desde la década de 1990, la incorporación de cermets con adiciones de TiC y TiN en escala nanométrica, utilizando la técnica de sinterización por plasma de chispa (SPS) y el desarrollo de recubrimientos multicapa por técnicas como PVD y PACVD han elevado el rendimiento de los cermets, permitiendo su uso en mecanizado de alta velocidad.

Actualmente, los cermets se utilizan industrialmente en herramientas de corte para materiales exigentes como aceros aleados e inoxidables, consolidándose como materiales clave entre los carburos cementados convencionales y las cerámicas técnicas.[8]

El cermet WC–Co, formado por carburo de tungsteno y cobalto, es el más ampliamente utilizado en la industria, debido a su excelente resistencia al desgaste y a la corrosión, junto con una tenacidad considerable atribuida al Co.

Gracias a estas propiedades, los cermets son aplicados en herramientas de corte, componentes mecánicos sometidos a fricción, moldes farmacéuticos, entre otros, siendo común su implementación como revestimientos adheridos a piezas metálicas.[6]

### **1.3 Objetivos generales y específicos.**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Analizar el comportamiento tribológico frente a la abrasión de alto y bajo esfuerzo de cermets Fe-SiC a través de las normas ASTM G-65 y ASTM B611.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

1. Adaptar el banco de pruebas G-65 para que sea compatible con el ensayo de abrasión de alto esfuerzo B-611.
2. Caracterizar el comportamiento tribológico de acero 1020, acero 4140 templado y cermets Fe-SiC.
3. Analizar las pérdidas de volumen de los materiales en condiciones de abrasión de bajo y alto esfuerzo.

## Capítulo 2: Marco teórico

En el contexto de los sistemas mecánicos, especialmente en entornos industriales, las superficies en interacción constante están sometidas a fenómenos de fricción y desgaste que afectan directamente la eficiencia y durabilidad de los equipos. Para entender y mitigar estos efectos, la tribología se presenta como una ciencia fundamental. Estudia las interacciones entre superficies en movimiento relativo y abarca aspectos clave como la fricción, el desgaste y la lubricación. Un control adecuado de estas propiedades tribológicas es esencial para optimizar el rendimiento de los equipos, reducir el deterioro de los materiales y mejorar la confiabilidad de los sistemas mecánicos.

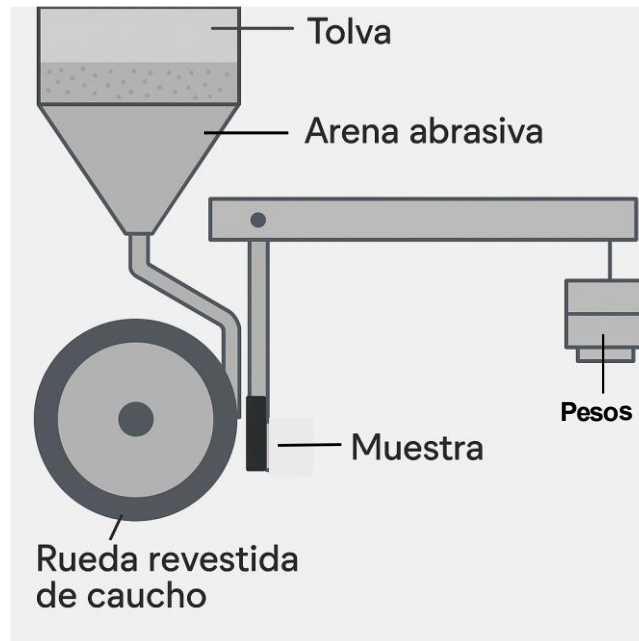
Dentro de los diversos tipos de desgaste, el desgaste abrasivo es especialmente relevante en sectores como la minería, donde las partículas duras interactúan con las superficies de los equipos, provocando su deterioro. Otros tipos de desgaste, como el adhesivo, por fatiga superficial o por erosión, también afectan el rendimiento de los materiales, cada uno con sus mecanismos específicos de acción.

A continuación, se presentarán los ensayos ASTM G65 y B611, los cuales permitirán evaluar la resistencia de los materiales frente al desgaste bajo diferentes condiciones.

### 2.1 Norma ASTM G65.

La norma ASTM G65 estableció el método de laboratorio para determinar la resistencia a la abrasión relativa de varios materiales. La prueba implica desgastar una muestra rectangular (25 mm × 76 mm con un espesor entre 3,2 mm y 12,7 mm) con un abrasivo de arena de sílice estandarizado (AFS 50/70). La arena se introduce entre una rueda de goma orientada verticalmente que gira a una velocidad específica (200 rpm) y la muestra, que se mantiene contra la rueda con una carga normal especificada (130 N).

La rueda de goma giratoria empuja la arena hacia el área de contacto, desgastando la superficie de la muestra. Las tasas de desgaste se informan como pérdida de volumen, p. ej., milímetros cúbicos. En este estudio las variables controladas para el procedimiento A de ASTM G65-04 fueron: muestra de desgaste estándar de acero AISI 1090, carga de 30 libras, 200 rpm, rueda de goma, flujo de arena y 6000 revoluciones. La máquina de prueba fue fabricada por Dieter Detroit. A continuación, se muestra un esquema del equipo de prueba en la figura 1.[9]



**Figura 1: Diagrama esquemático del aparato de prueba G65.**

Tipos de procedimientos se mencionaron a continuación:

Procedimiento A:

Descripción: Es la prueba más severa y se utiliza para clasificar materiales con una amplia gama de resistencia a la abrasión, desde baja hasta extremadamente alta. Es especialmente útil para materiales de resistencia media a extrema.

Condiciones:

Tiempo de prueba: Aproximadamente 30 minutos.

Fuerza aplicada: Variable, dependiendo del material.

Velocidad de la rueda de caucho:  $200 \pm 10$  rpm.

Flujo de arena: 300 a 400 g/min (0.66 a 0.88 lb/min).[10]

Procedimiento B:

Descripción: Es una variación de corta duración del procedimiento A, útil para materiales con resistencia media a baja a la abrasión. Se utiliza cuando los valores de pérdida de volumen del procedimiento A superan los  $100 \text{ mm}^3$ .

Diferencias con el Procedimiento A:

Tiempo de prueba: Aproximadamente 10 minutos.

Otras condiciones: Se mantienen las mismas del procedimiento A.[10]

#### Procedimiento C:

Descripción: Es una variación de corta duración del procedimiento A, diseñada para pruebas en recubrimientos delgados.

Diferencias con el Procedimiento A:

Tiempo de prueba: Aproximadamente 5 minutos.

Sensibilidad de la balanza: Se requiere una balanza analítica con sensibilidad de 0.0001 g.

Otras condiciones: Se mantienen las mismas del procedimiento A.[10]

#### Procedimiento D:

Descripción: Es una variación de carga más ligera del procedimiento A, útil para materiales con baja resistencia a la abrasión.

Diferencias con el Procedimiento A:

Fuerza aplicada: Se reduce la fuerza aplicada a la muestra.

Otras condiciones: Se mantienen las mismas del procedimiento A.[10]

#### Procedimiento E:

Descripción: Es una variación de corta duración del procedimiento B, útil para materiales con resistencia media o baja a la abrasión.

Diferencias con el Procedimiento B:

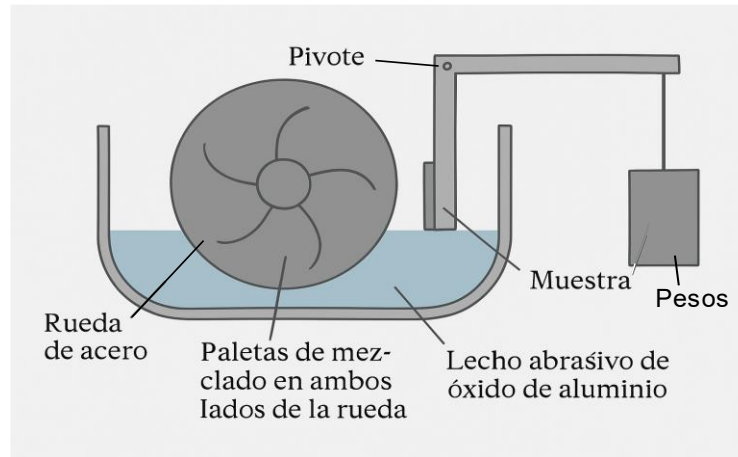
Tiempo de prueba: Aproximadamente 5 minutos.

Otras condiciones: Se mantienen las mismas del procedimiento B.[10]

## **2.2 Norma ASTM B611.**

Este ensayo, ASTM B611-21, describe un método de prueba estándar para determinar la resistencia a la abrasión de alta tensión de materiales duros. Se enfoca principalmente en materiales como carburos cementados, cerámicas, cermets y revestimientos duros de matriz metálica con una dureza superior a 55 HRC. [11]

Es una prueba de abrasión de alta carga. El ensayo utiliza una rueda de acero giratoria que presiona un abrasivo de óxido de aluminio contra la superficie de la muestra. La fuerza aplicada es lo suficientemente alta para fracturar las partículas abrasivas, lo que distingue esta prueba de otras que emplean ruedas de caucho, como el método de prueba G65. Una rueda de caucho produce abrasión de baja tensión, mientras que una rueda de acero produce abrasión de alta tensión. En la figura 2 se muestra un diagrama de un ensayo tipo ASTM B611.[11]



**Figura 2: Diagrama esquemático del sistema de prueba de abrasión ASTM B611.**

En este ensayo se mide la pérdida de volumen de la muestra debido a la abrasión, utilizando la densidad del material para convertir la pérdida de masa a pérdida de volumen.[11]

## Capítulo 3: Materiales y métodos

### 3.1 Metalurgia de polvos.

El método de metalurgia de polvos (PM) tiene varias ventajas sobre otras técnicas de producción de Compuestos de matriz metálica (MMCs), como la baja temperatura de proceso, el bajo consumo de energía y el uso de diversos materiales. En la metalurgia de polvos, los materiales de refuerzo se mezclan con el material matriz y se compactan a una presión suficiente para formar el compacto verde. Los compactos verdes se calientan a alta temperatura (generalmente por debajo del punto de fusión del material matriz) mediante el proceso de sinterización. Como resultado de este proceso, se produce la formación de enlaces de difusión. Este proceso se produce al calentar y mantener el compacto verde a una temperatura y un tiempo determinados. La metalurgia de polvos está muy influenciada por la presión de compactación, la temperatura de mantenimiento y el tiempo de mantenimiento, que son parámetros básicos que determinan las propiedades de los productos de metalurgia de polvos.[12]

### 3.2 Material compuesto Fe-SiC.

A continuación, se presenta el material de estudio de este proyecto con su proceso de fabricación.

Materias primas: Polvo de Fe (1 - 100  $\mu\text{m}$ ) y SiC (50 - 150  $\mu\text{m}$ ), ácido esteárico como lubricante de polvos, h-BN como lubricante para la matriz. Matriz de grafito con diámetro interior 2,54 cm.

Etapa 1 - Mezcla de polvos: La mezcla de polvos se realiza en un molino planetario Retsch PM400 con una velocidad de 200 r.p.m. durante 20 minutos. Se utilizó una proporción de bolas: polvo de 5:1 y 1% p.p de ácido esteárico como agente controlador del proceso (PCA).

Etapa 2 - Sinterización: La mezcla de polvos fue introducida en una matriz de grafito con diámetro interior de 2,54 cm. La sinterización se realiza en un horno de prensado en caliente aplicando 30-50 MPa de presión y en atmósfera de argón. Las temperaturas de sinterización pueden ir de 900 a 1100  $^{\circ}\text{C}$ , durante un tiempo de 30 o 60 minutos.

En la figura 3 se muestra un diagrama con un proceso similar al mencionado anteriormente.

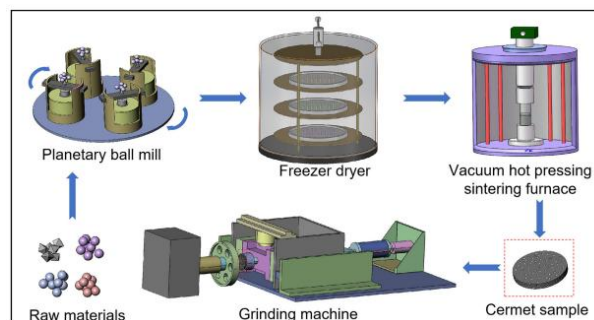


Figura 3: Diagrama esquemático del proceso de preparación de muestras de cermet.[13]

La muestra analizar tiene una mezcla de polvos es 50% en peso Fe y 50% en peso SiC con las siguientes dimensiones, probetas de 1 pulgada de diámetro y 10 mm de alto aproximadamente.

### 3.3 Máquina de desgaste abrasivo según norma ASTM G65.

En el laboratorio se cuenta con la siguiente máquina para realizar ensayos según norma ASTM G65, que se muestra en la figura 4, a continuación, se presentaran sus características más relevantes.



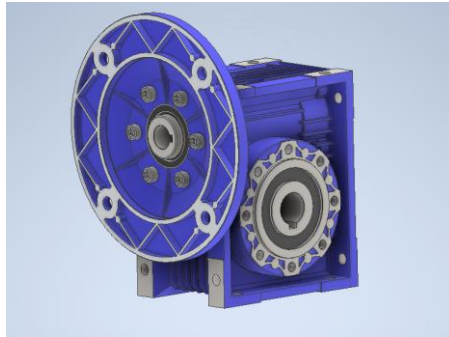
**Figura 4: Máquina de desgaste abrasivo según norma ASTM G65.**

Esta cuenta con un motor eléctrico marca siemens modelo 1LE0102-0EB02-2AA4 mostrado en la figura 5, con una potencia de 1.1 kW, una velocidad nominal de 1420 r/min, un peso de 23 kg y una eficiencia del 75%. Este cuenta con su variador de frecuencia respectivo.



**Figura 5: motor eléctrico siemens 1LE0102-0EB02-2AA4.**

También cuenta con un reductor de velocidades de engranajes helicoidales marca Keb modelo FCNDK63 con una relación 1:7.5. En la figura 6 se muestra una imagen del reductor.



**Figura 6: reductor de velocidades Keb FCNDK63.**

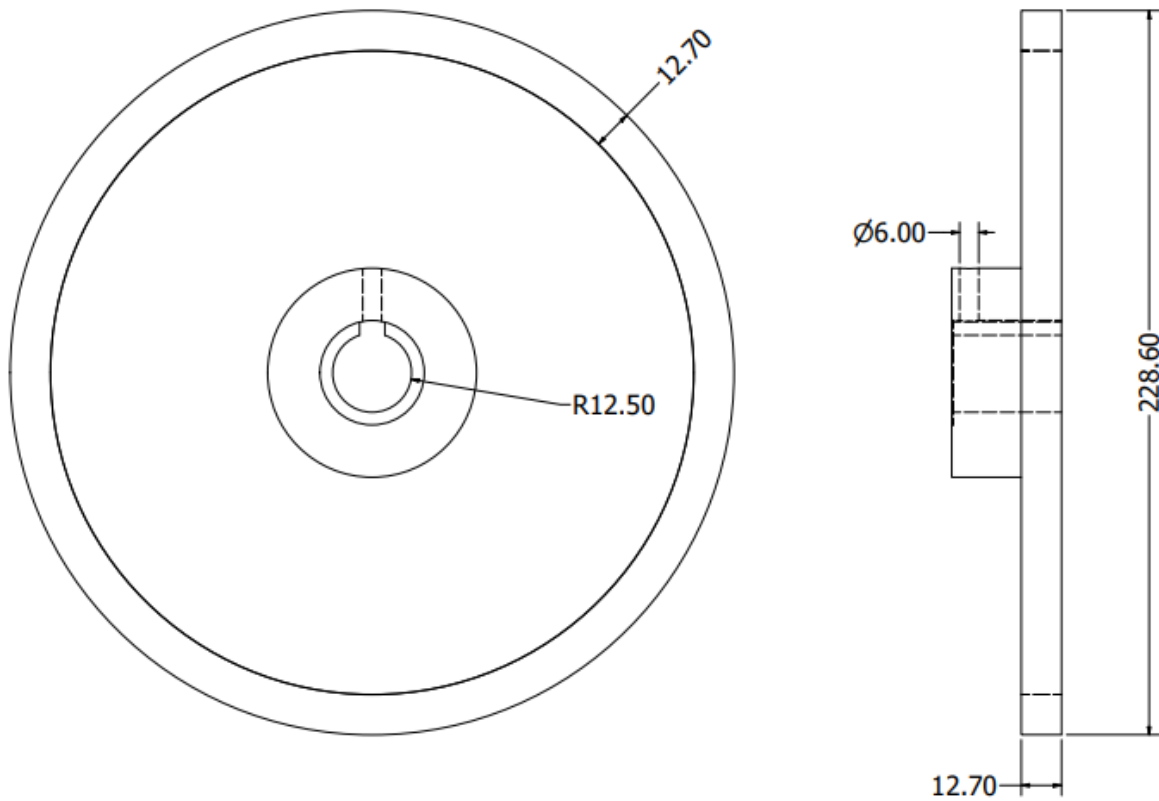
Y para terminar la transmisión de potencia se cuenta con un sistema de transmisión por correas, se muestra una imagen de esta en la figura 7.



**Figura 7: transmisión por correas.**

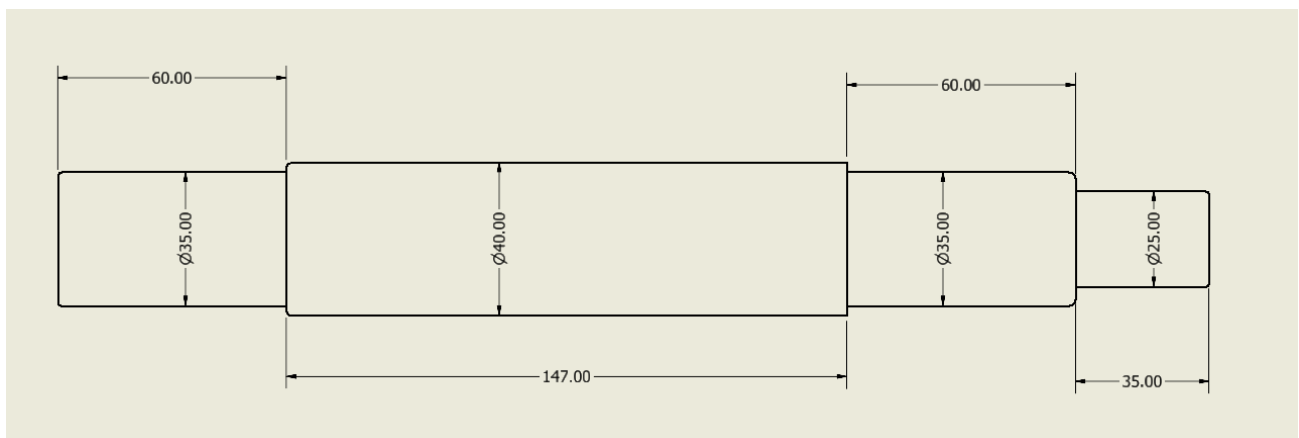
A continuación, se expondrá una breve descripción de las rudas de caucho, su eje y los rodamientos que sustentan a este.

La máquina cuenta con un juego de 3 ruedas de acero recubiertas en goma, en la figura 8 se muestra una imagen con las dimensiones en mm.

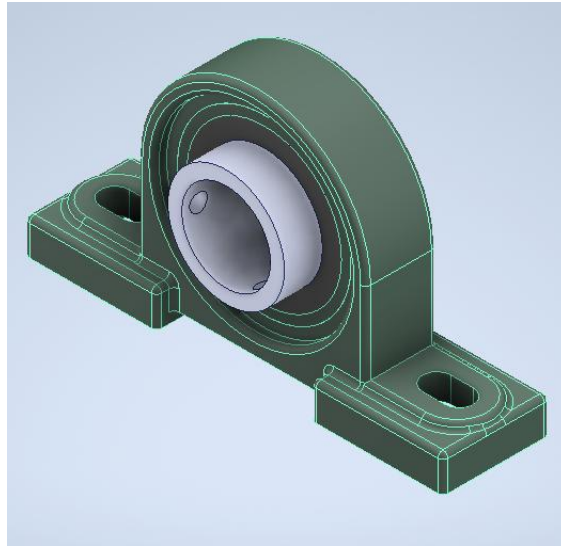


**Figura 8: Rueda revestida de goma.**

La rueda está sujeta a un eje que se muestran sus dimensiones en la figura número 9, este está situado sobre dos rodamientos FSB-P207, se muestra una imagen de los rodamientos en la figura 10.

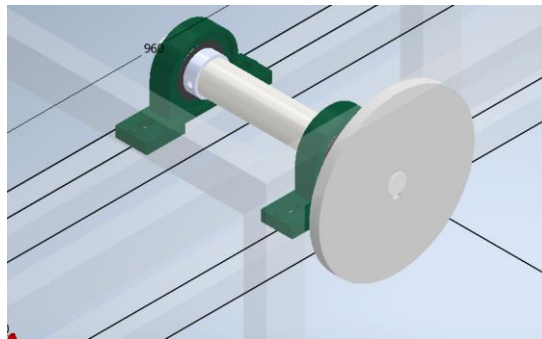


**Figura 9: Eje de transmisión de la rueda de goma.**



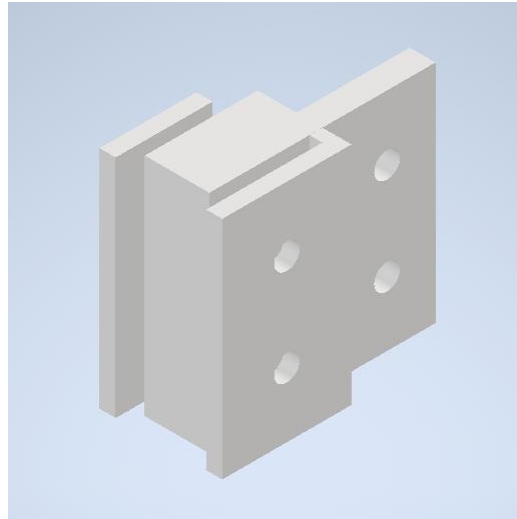
**Figura 10: rodamiento FSB-P207.**

A continuación, en la imagen numero 11 se muestra el conjunto de los elementos previamente mencionados.



**Figura 11: Rueda de Goma sin goma.**

Por último, se describe la porta probetas y el brazo necesario para ejercer fuerza sobre la rueda. La porta probeta se muestra en la imagen número 12.



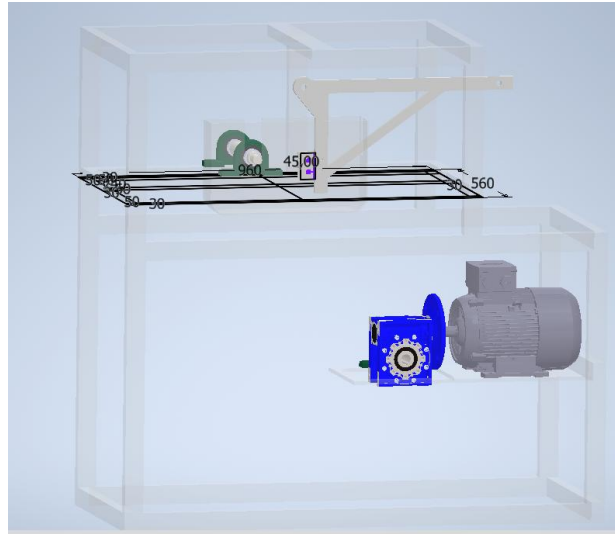
**Figura 12: Porta probeta.**

El brazo de palanca donde está sujeto la porta probeta cuenta con una sección para colgar los pesos que ejercerán la fuerza necesaria para los distintos ensayos. En la figura numero 13 se muestra una imagen del brazo de palanca.



**Figura 13. Brazo de palanca.**

A continuación, se muestra en la figura 14 una vista del sistema con sus distintos elementos en un modelo CAD 3D realizado en el software Autodesk Inventor.



**Figura 14: modelo sistema.**

### **3.4 Condiciones de los ensayos.**

#### **3.4.1 Condiciones Ensayo ASTM G65.**

En este ensayo se llevará a cabo el tipo más exigente ya que el material de prueba tiene una alta resistencia a la abrasión. El procedimiento A tiene las siguientes condiciones:

Tiempo de prueba: Aproximadamente 30 minutos.

Fuerza aplicada: Variable, dependiendo del material (200 N aproximado).

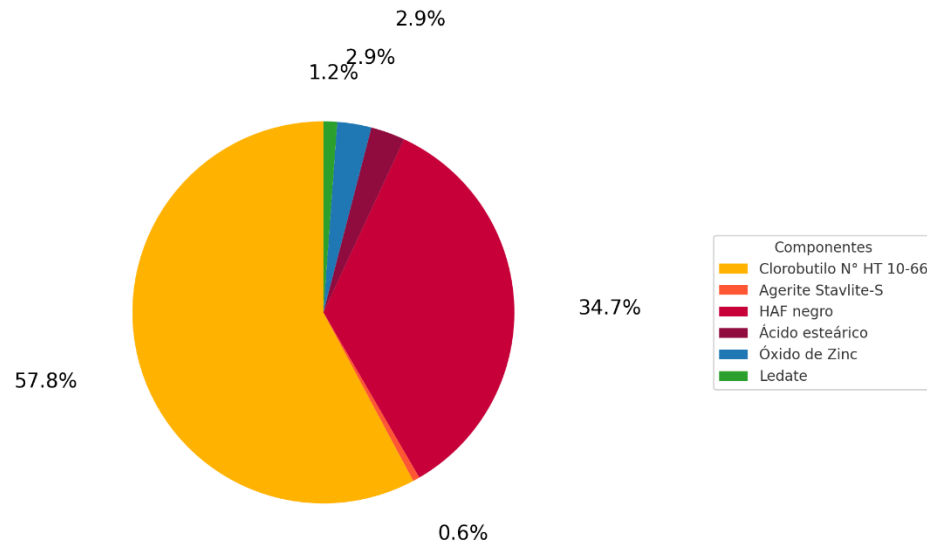
Velocidad de la rueda de caucho:  $200 \pm 10$  rpm.

Flujo de arena: 300 a 400 g/min (0.66 a 0.88 lb/min).[10]

La arena para ocupar en este ensayo es sílice que deberá ser caracterizado previo a su uso, ya que, la sílice estandarizada (AFS 50/70) no es posible conseguirla en Chile.

La Composición de la goma se muestra en la figura número 15, esta composición pueda variar dependiendo del fabricante de esta.

Proporciones relativas en la fórmula del caucho

**Figura 15: Gráfico de la composición de la goma.**

Se llevarán a cabo dos Pruebas, una con el material Cermet Fe-SiC y otra con un acero SAE 1020. Ambas probetas con las mismas dimensiones 1 pulgada de diámetro y 10 cm de alto aproximadamente. La prueba con el acero SAE 1020 es para validar la máquina de abrasión.

Para estos ensayos es necesario pesar las probetas antes del ensayo debido a que se mide la pérdida de volumen de la muestra debido a la abrasión, utilizando la densidad del material para convertir la pérdida de masa a pérdida de volumen.

### 3.4.2 Condiciones Ensayo ASTM B611.

Las condiciones de los ensayos se realizará un procedimiento basado en la norma ASTM B611, adaptado para evaluar la resistencia al desgaste abrasivo en condiciones de alto estrés. Este método se distingue por las siguientes especificaciones técnicas:

#### 1. Rueda de acero:

- Se empleará una rueda fabricada en acero AISI 1020 en reemplazo de la rueda de caucho convencional.
- El diámetro inicial de la rueda será de 169 mm, y se desechará cuando este se reduzca por debajo de 165 mm debido al desgaste.
- La rugosidad superficial estará en el rango de 0.5  $\mu\text{m}$  a 0.8  $\mu\text{m}$  (Ra).
- La velocidad de rotación estará definida en dos configuraciones: 100 rpm bajo carga para el procedimiento A y 50 rpm para el procedimiento B.

## 2. Material abrasivo:

- Se utilizará una suspensión de óxido de aluminio (alúmina) de grano 30 (600  $\mu\text{m}$ ).
- La proporción de abrasivo/agua será de 4 g de alúmina por cada mililitro de agua.
- El volumen total de la suspensión será de 1.5 litros, garantizando una cobertura uniforme durante el ensayo.

## 3. Carga aplicada:

- Una fuerza normal de 200 N presionará la muestra contra la rueda de acero para generar condiciones representativas de desgaste severo.

## 4. Duración del ensayo:

- Procedimiento A: 1000 revoluciones a 100 rpm, con una duración aproximada de 10 minutos.
- Procedimiento B: 1000 revoluciones a 50 rpm, con una duración aproximada de 20 minutos.

## 5. Configuración del sistema:

- La rueda de acero estará equipada con paletas agitadoras fabricadas en acero, aluminio o latón, destinadas a optimizar el transporte de la suspensión hacia la zona de contacto.
- Las paletas tendrán una longitud de entre 3 y 13 mm, con una separación mínima de 3 mm respecto a la muestra.
- El nivel de la suspensión deberá mantenerse entre 25 y 30 mm por debajo del eje central de la rueda para garantizar su distribución homogénea.

## 6. Preparación de las muestras:

- Las superficies de las muestras deberán ser planas y libres de irregularidades mayores a 2.0  $\mu\text{m}$ .
- Las muestras serán limpiadas con solventes libres de residuos y desmagnetizadas antes del inicio del ensayo.

## 7. Control de la suspensión:

- Durante el ensayo, se verificará que las partículas abrasivas sean transportadas de manera continua hacia la zona de contacto.
- En caso de observarse deficiencias en el transporte, se ajustará el nivel de la suspensión o se agregará más abrasivo.

Este protocolo busca simular condiciones reales de desgaste abrasivo, frecuentemente presentes en aplicaciones industriales. La interacción entre la muestra y la rueda de acero, en conjunto con la suspensión abrasiva, permite cuantificar la resistencia al desgaste mediante la pérdida de volumen de material. Los resultados obtenidos contribuirán a la selección y desarrollo de materiales más eficientes para entornos de alta exigencia mecánica.

## Capítulo 4: Adaptación de equipos y normas.

### 4.1 Modificaciones para la norma G65.

#### 4.1.1 Rectificación de rueda para ensayos ASTM G65

Como primer paso en la adaptación del equipo para la realización de los ensayos, se llevará a cabo una modificación específica en las ruedas utilizadas para el ensayo ASTM G65. En este caso, la rueda existente, que ha sufrido desgaste por el uso continuado, será sometida a un proceso de desbaste para eliminar las irregularidades en su superficie. Posteriormente, se procederá a rectificar la goma de la rueda, asegurando que se mantenga el diámetro mínimo permitido de funcionamiento, establecido en 223.8 mm según la norma ASTM G65. Este procedimiento permitirá restaurar la funcionalidad de la rueda y garantizar resultados precisos en el ensayo de abrasión de bajo estrés. En la Figura número 16 se muestra el desgaste existente en la rueda.



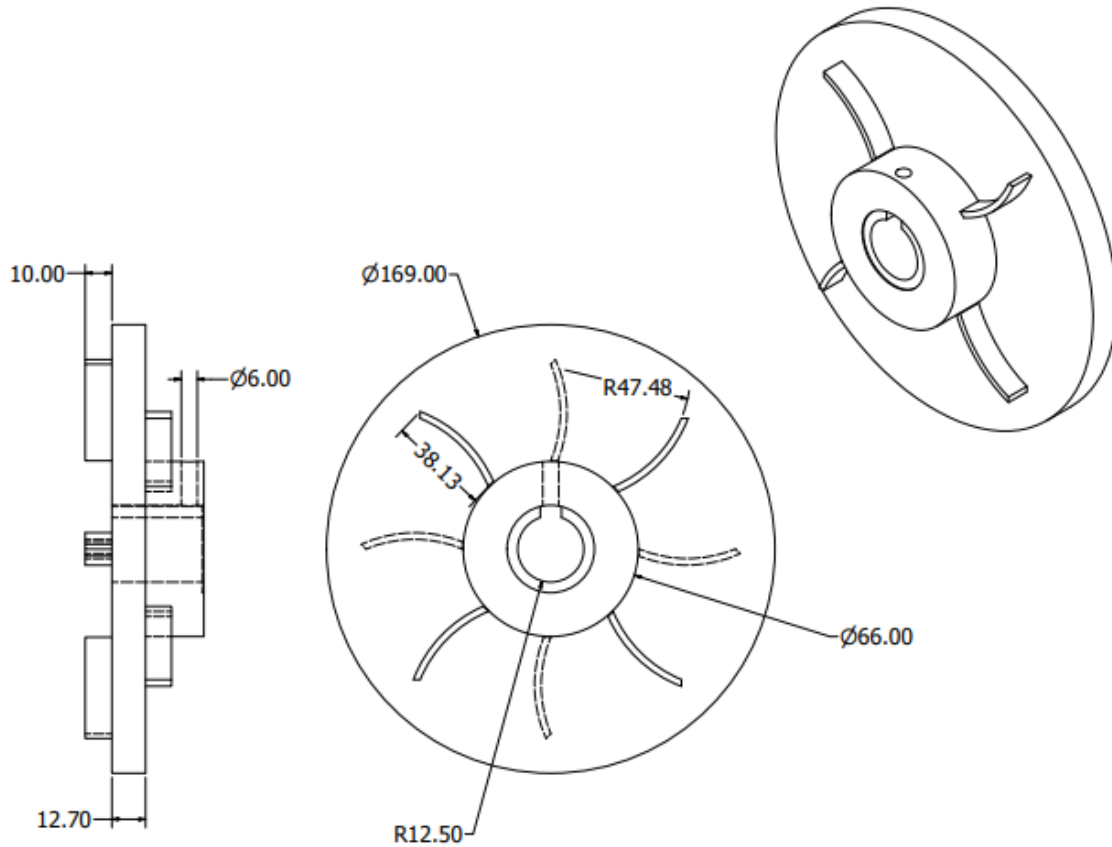
Figura 16: Estado rueda ensayo ASTM G65.

#### 4.1.2 Adaptación del porta muestras para especificaciones geométricas del proyecto.

Para continuar con las adaptaciones requeridas en el equipo de ensayo, se llevará a cabo la modificación del porta muestras. Esto se debe a que, en este proyecto, las características geométricas de las probetas están determinadas por el método de fabricación del cermet. En este caso, la forma del horno de sinterización por prensado en caliente al vacío genera probetas de geometría cilíndrica con un diámetro de 25,4 mm y una altura aproximada de 10 mm.



las aletas de un lado y las del lado opuesto, optimizando así la agitación de la suspensión abrasiva durante el contacto con la rueda.



**Figura18: Plano rueda ensayo ASTM B611.**

Este procedimiento de ajuste es necesario para cumplir con los requisitos específicos de ambas pruebas, garantizar que el dispositivo funcione correctamente en diferentes escenarios de prueba y proporcionar resultados confiables y comparables de ambos métodos.

#### **4.2.2 Modificación y adaptación del estanque para Ensayos ASTM B611**

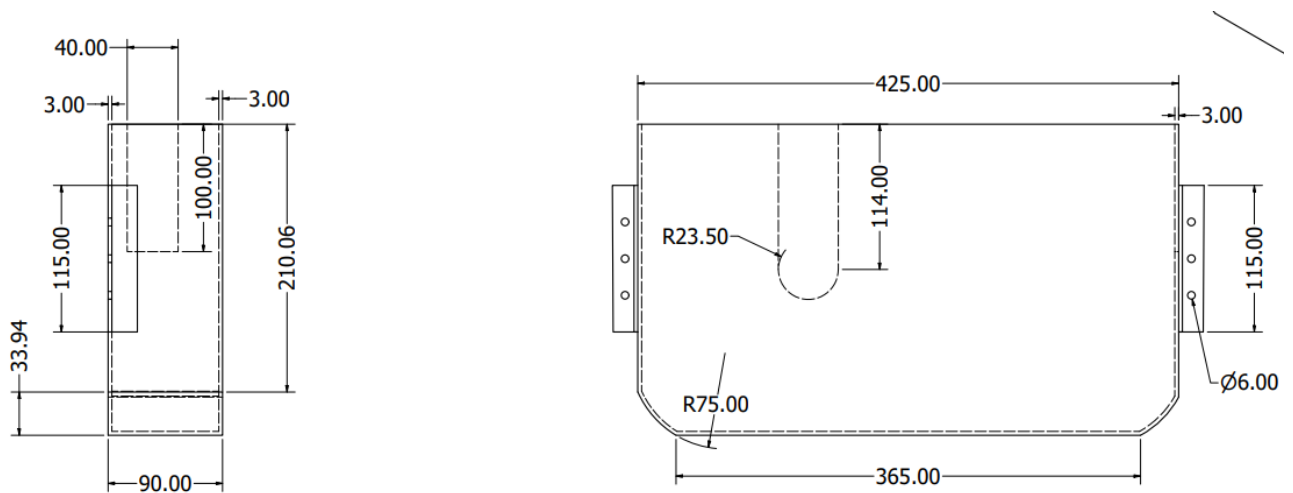
Para adaptar el sistema de ensayos al cumplimiento de la norma ASTM B611, se realizaron modificaciones significativas en el diseño del estanque y su estructura de soporte. Estas adaptaciones fueron necesarias para garantizar un montaje estable y un funcionamiento eficiente bajo las condiciones de alta carga y abrasión requeridas por la norma.

Parte de la geometría del estanque fue diseñada considerando la forma del brazo que soporta el porta muestras, permitiendo una conexión precisa y alineada con el sistema de ensayo.

Se ajustó la geometría del estanque para facilitar el montaje y desmontaje rápido, optimizando el acceso y reduciendo los tiempos de configuración entre ensayos.

Se soldaron dos pestañas en cada costado del estanque, cada una perforada con orificios de 6 mm de diámetro, permitiendo la instalación de un total de 6 tornillos (tres por lado) para lograr una unión apernada con la estructura de soporte. Los orificios están alineados para garantizar una instalación precisa y robusta, asegurando la estabilidad del estanque durante el ensayo.

Las medidas principales del estanque, incluyendo las dimensiones internas y externas, se especifican en los planos presentados en la Figura 19.



**Figura 19: Plano Estanque.**

A la estructura de la máquina se soldaron dos pestañas con las mismas características geométricas y perforaciones que las del estanque, facilitando el montaje mediante una conexión apernada.

La configuración final asegura que el estanque se mantenga en posición bajo las condiciones dinámicas del ensayo. Como se muestra en la figura 20.

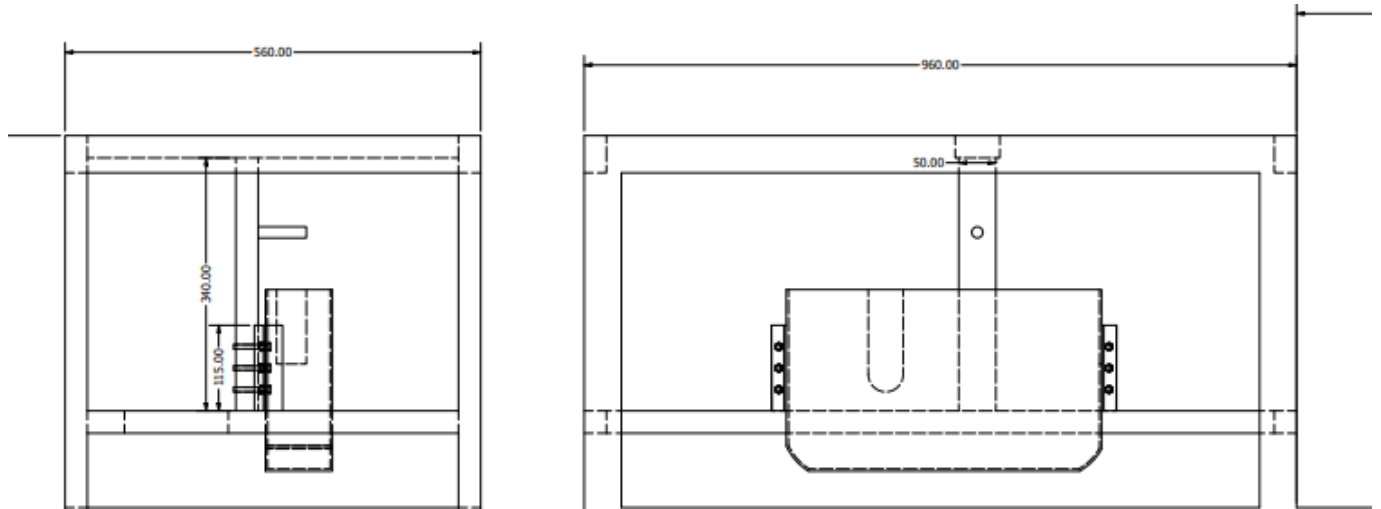


Figura 20: Ensamble completo del estanque y la estructura de soporte.

#### 4.2.3 Simulación por elementos finitos de unión apernada estanque.

En este apartado se analizará el comportamiento de la unión apernada entre el estanque y la estructura del banco de pruebas mediante un modelo de elementos finitos desarrollado en el software ANSYS. A través de la simulación numérica, se evaluará el efecto de distintos parámetros estructurales y operacionales en la respuesta mecánica de la unión. Se pondrá especial énfasis en la fuerza generada por el peso del estanque, dado que este contendrá una lechada de agua con óxido de aluminio, lo que representa una carga significativa para el sistema. El análisis permitirá determinar la distribución de esfuerzos, deformaciones y posibles modos de falla, contribuyendo a la optimización del diseño y la seguridad estructural del conjunto.

Características del material usadas en la simulación para todos los cuerpos se utilizó el acero estructural de la librería del software ANSYS, características más relevantes mencionadas en la tabla 1.

**Tabla 1**

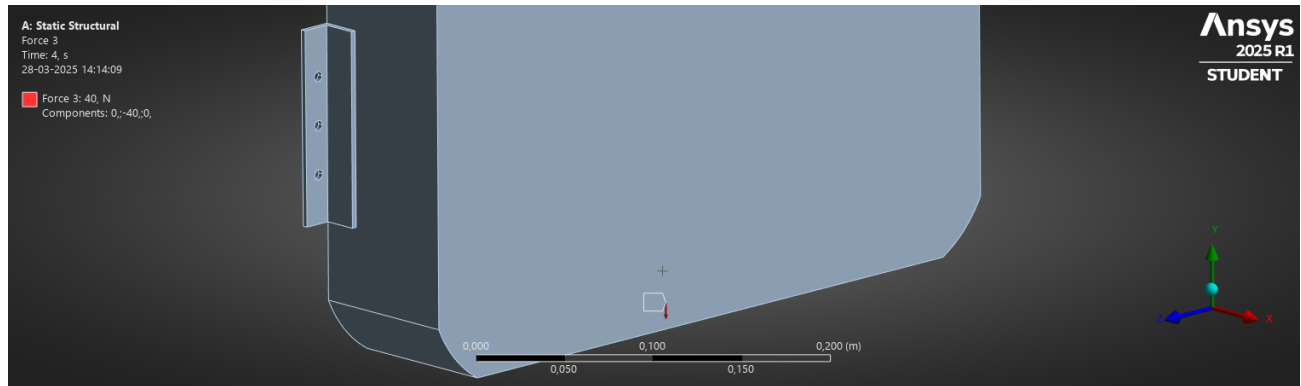
Propiedades material simulación FEM.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia a la fluencia por tracción (Mpa)	Resistencia máxima a la tracción (MPa)
7850	200000	0,3	250	460

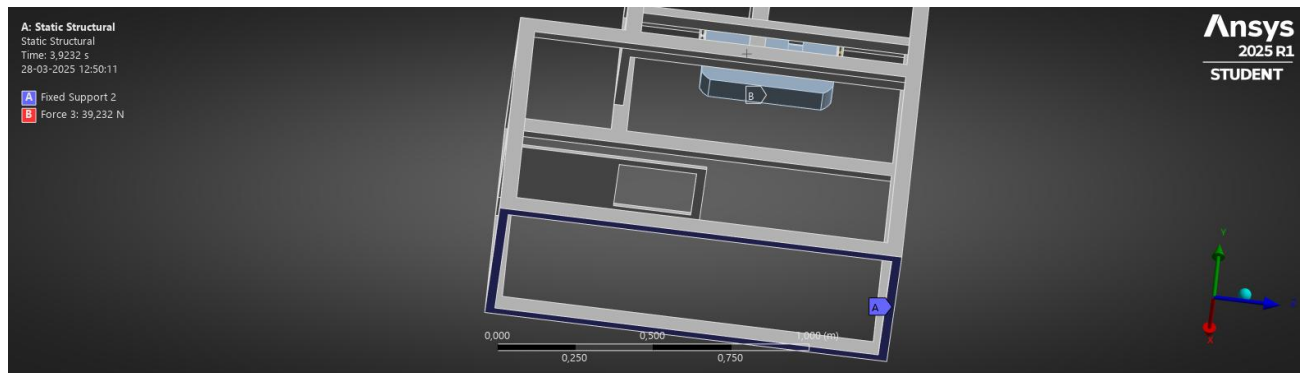
A continuación, se describe las condiciones de borde del sistema.

Se consideraron dos condiciones fundamentales en el módulo de “Static Structural”, las cuales son una condición de fijación (“fixed support”) empleada en la base de la estructura y una fuerza aplicada

en el interior del estanque simulando la carga que podría soportar el estanque. En las figuras 21 y 22 se muestran la configuración de manera más clara.



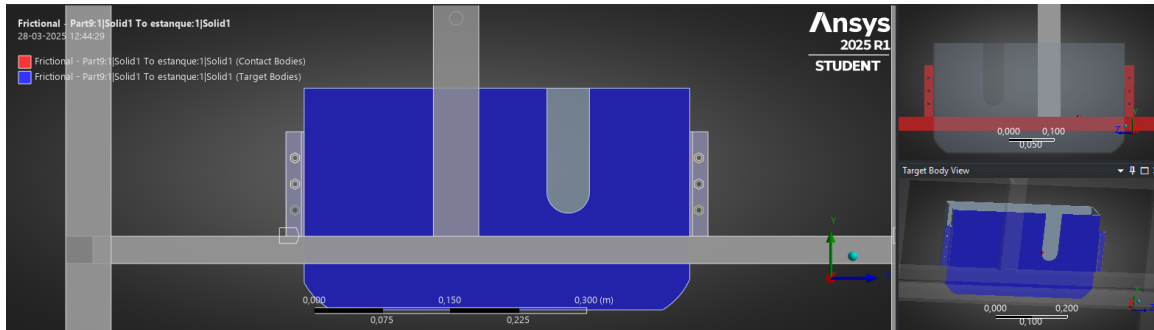
**Figura 21: Condiciones de borde.**



**Figura 22: Condición de fijación.**

Se utilizo una cantidad de 20 pasos para analizar el comportamiento del sistema con una variación de 20 cargas diferentes. Los subpasos utilizados fueron variables de 1 a 20 dependiendo de lo que necesitaba el programa, el máximo de subpasos utilizado fue 10. El tiempo de convergencia de la simulación fue de 13 minutos aproximadamente.

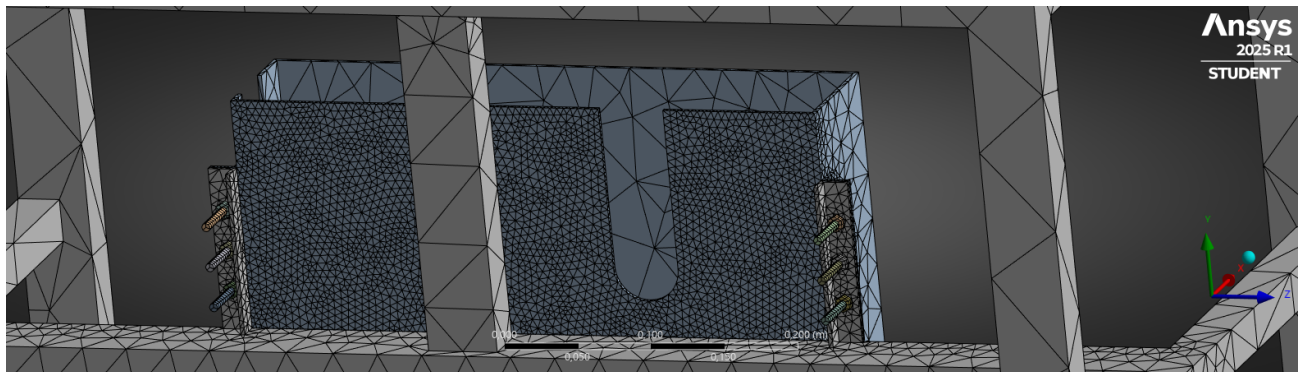
El modelo de contacto seleccionado es el método de Lagrange normal con un coeficiente de roce estático de 0,15, esto debido que en la simulación todas las piezas son de acero estructural. [14]. En la figura 23 se muestra la configuración de contacto friccional que existe entre la estructura y el estanque. Las demas condiciones de conctato se utiliza la categoria unido es una configuración de contacto que no permite que los componentes interconectados se separen o deslicen, esto para simular solo deslizamiento entre el estanque y la estructura.



**Figura 23: Condiciones de contacto del sistema.**

A continuación, se presentan las cualidades del mallado. El tipo de elemento predominante en el mallado es el Tet 10 (Elemento cuadrático tetraédrico de 10 nodos) que se encuentra en toda la estructura y en el estanque, en el caso de los pernos predominan los elemento Hex 20 (Elemento cuadrático hexagonal de 20 nodos).[15]

En la figura 24 se muestra la geometría y distribución de la mallado, la calidad del mallado tiene un promedio de 0,71 estando en un rango de muy buena calidad, es una muy buena calidad entre un 0.7-0.95.[16]



**Figura 24: Mallado del Sistema.**

A continuación, se presentarán la configuración de la simulación, partiendo por la fuerza que se ejerce sobre el estanque representadas en la tabla 2. Esto ya que se aproxima que el conjunto del estanque más la lechada tendrá un peso de 20 kg en funcionamiento.

**Tabla 2**

Fuerzas simulación.

<b>Pasos</b>	<b>Fuerza</b>		
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>1</b>	0	-10	0
<b>2</b>	0	-20	0
<b>3</b>	0	-30	0
<b>4</b>	0	-40	0
<b>5</b>	0	-50	0
<b>6</b>	0	-60	0
<b>7</b>	0	-70	0
<b>8</b>	0	-80	0
<b>9</b>	0	-90	0
<b>10</b>	0	-100	0
<b>11</b>	0	-110	0
<b>12</b>	0	-120	0
<b>13</b>	0	-130	0
<b>14</b>	0	-140	0
<b>15</b>	0	-150	0
<b>16</b>	0	-160	0
<b>17</b>	0	-170	0
<b>18</b>	0	-180	0
<b>19</b>	0	-190	0
<b>20</b>	0	-200	0

Figura 25 muestra la evolución de los esfuerzos máximos de von Mises obtenidos a partir del análisis por elementos finitos en las placas soldadas del sistema. Estos resultados permiten observar la relación directa entre el incremento de la carga aplicada en el eje Y y la respuesta tensional del componente, evidenciando una tendencia creciente del esfuerzo con respecto al aumento de la fuerza externa.

En complemento, Figura 26 presenta una representación visual detallada de la distribución de esfuerzos, en la que se destacan tanto los valores máximos como mínimos de von Mises. Esta visualización permite identificar las zonas críticas dentro del conjunto estructural de las placas soldadas. Hay que destacar que esta es la zona donde ocurren los mayores esfuerzos del sistema.

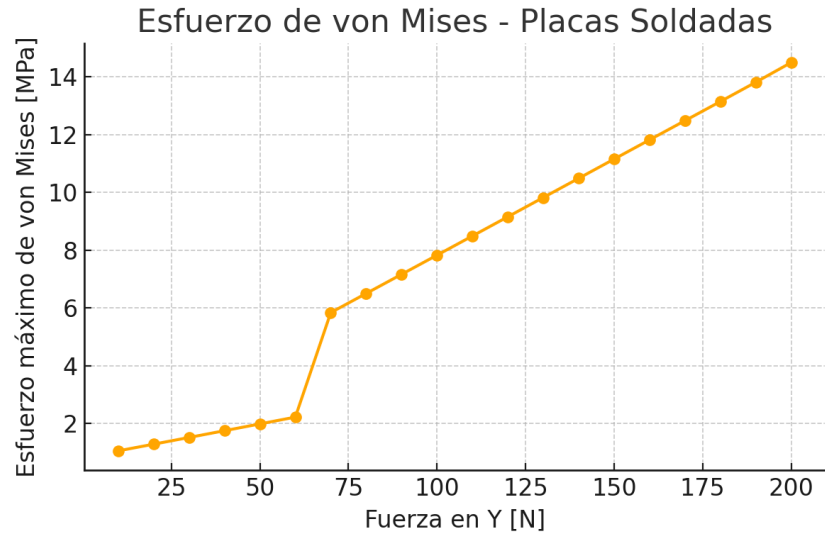


Figura 25: Gráficos Esfuerzos de Von mises.

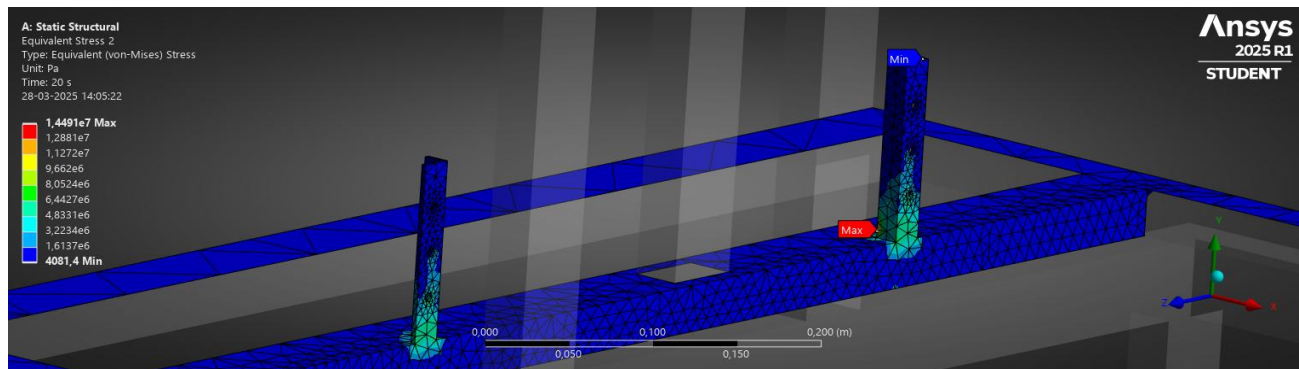


Figura 26: Expresión ilustrativa esfuerzos Von mises.

A continuación, se presenta un análisis conjunto de los esfuerzos máximos de von Mises obtenidos para los distintos pernos que conforman el sistema de unión estructural. Cada uno de estos elementos, con un diámetro nominal de 6 mm, fue evaluado mediante una simulación estática basada en el método de elementos finitos (FEM), bajo condiciones de carga progresiva aplicada en el eje vertical (Y).

Los resultados obtenidos revelan una distribución tensional diferenciada en función de la altura de los pernos dentro del conjunto. En particular, los pernos inferiores son los que concentran los niveles más altos de esfuerzo de von Mises, seguidos por los pernos intermedios, mientras que los pernos superiores muestran los valores más reducidos. Este comportamiento evidencia una correlación inversa entre la ubicación vertical del perno y la magnitud de carga transmitida, lo cual es coherente con los mecanismos clásicos de transferencia de carga en uniones múltiples sometidas a tracción o solicitaciones verticales, donde la rigidez del conjunto y la trayectoria de carga favorecen la concentración de esfuerzos en los elementos más cercanos a la aplicación de la fuerza.

En la Figura 27 se presenta un gráfico comparativo que muestra la evolución de los esfuerzos máximos de von Mises en función de la carga aplicada en el eje Y para cada perno. Esta visualización permite comparar claramente la respuesta tensional relativa de cada elemento de fijación. A continuación, en

las Figuras 28 a 33, se presentan de forma visual los resultados de la simulación para cada perno, destacando las zonas críticas de esfuerzo mediante escalas de color, señalando explícitamente las ubicaciones de los valores máximos y mínimos alcanzados en cada caso.

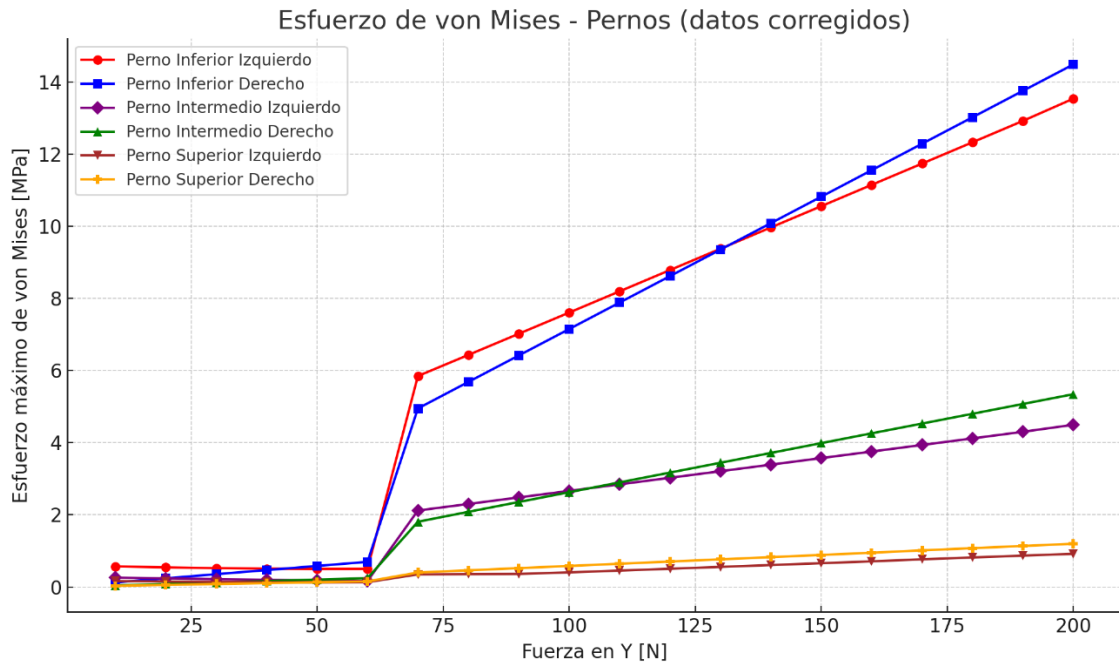


Figura 27: Fuerzas máximas de von mises por pernos.

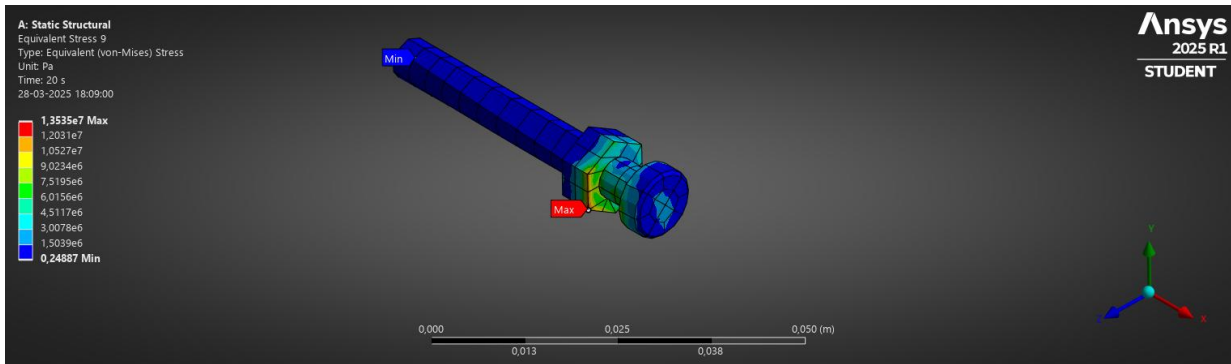


Figura 28: Perno inferior izquierdo.

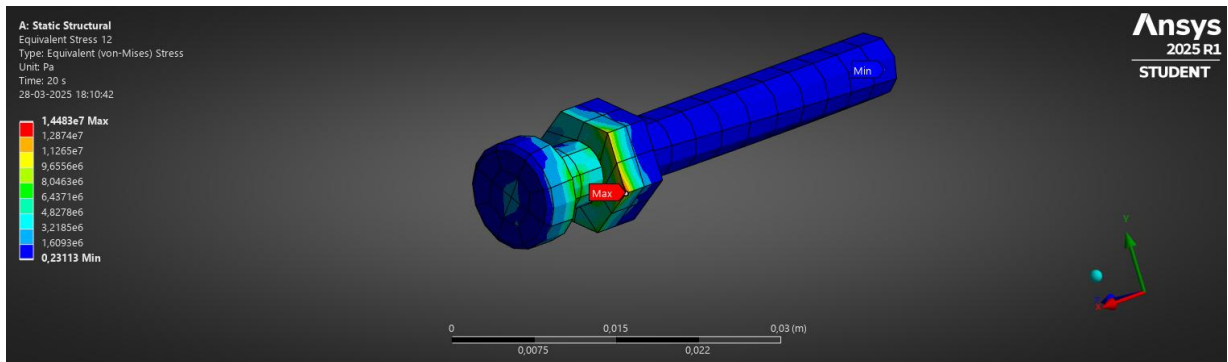


Figura 29: Perno inferior derecho.

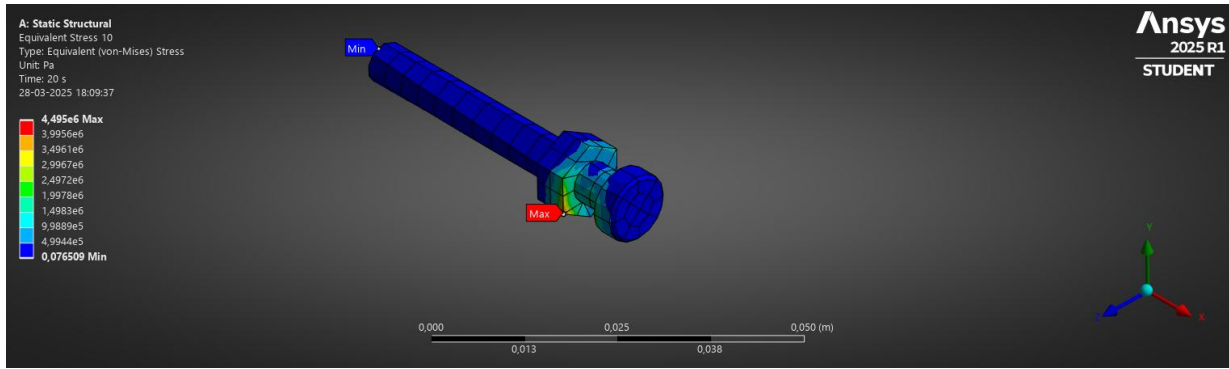


Figura 30: Perno intermedio izquierdo

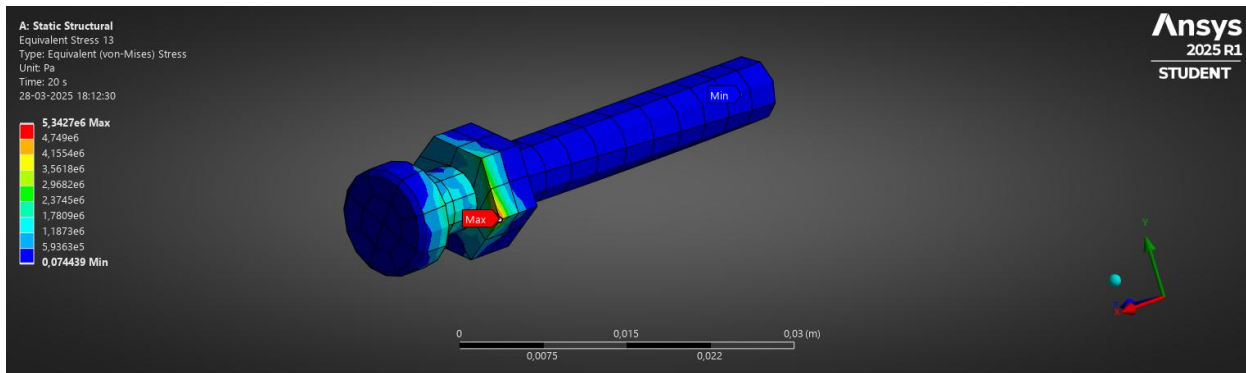


Figura 31: Perno intermedio derecho

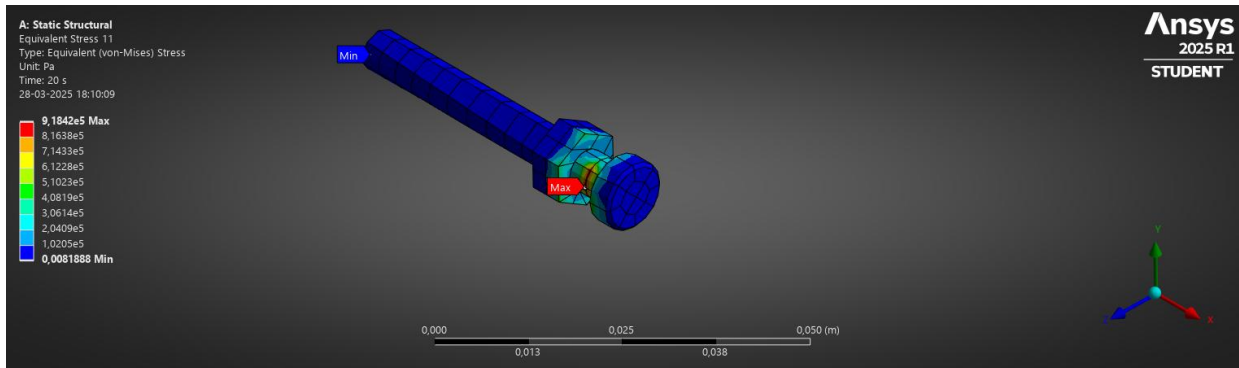


Figura 32: Perno inferior izquierdo

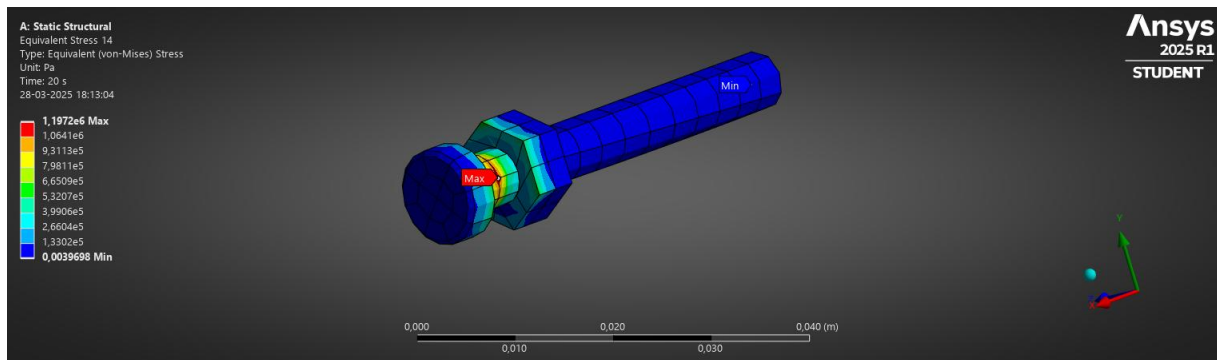
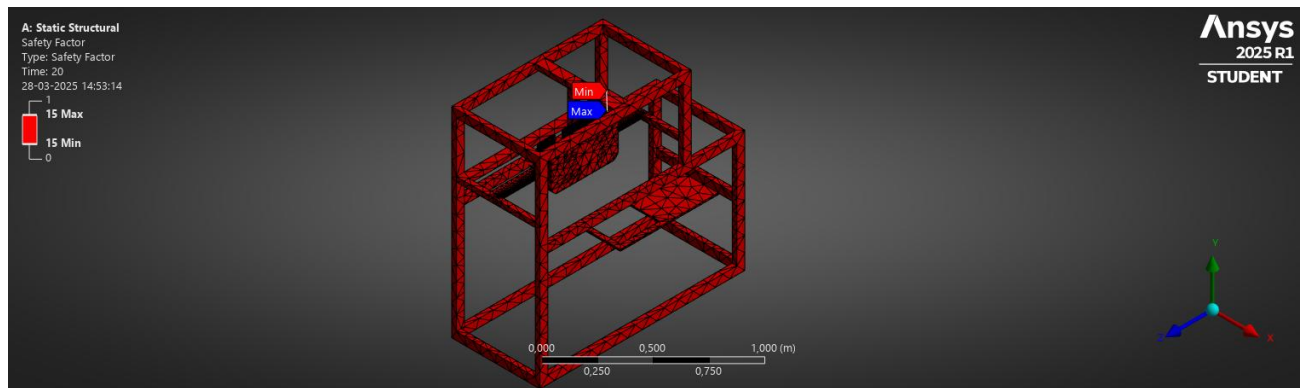


Figura 33: perno inferior derecho.

El análisis del factor de seguridad, obtenido a través del software ANSYS, arrojó un valor máximo de 15, que corresponde al límite superior que el programa permite visualizar. Este valor se alcanza debido a que los esfuerzos presentes en el sistema se encuentran considerablemente por debajo del límite de fluencia del material utilizado. En consecuencia, el conjunto estructural completo presenta un factor de seguridad igual a 15, lo cual indica que el diseño posee un amplio margen de resistencia, garantizando su comportamiento seguro ante las condiciones de carga evaluadas.

La Figura 34 ilustra gráficamente esta condición, evidenciando que la totalidad del sistema se encuentra dentro de un rango de operación altamente seguro, lo que respalda la viabilidad estructural del diseño propuesto.



**Figura 34: Factor de seguridad del sistema.**

## **Capítulo 5: Ensayos y análisis de resultados.**

En este capítulo se presentan los ensayos realizados y el análisis de los resultados obtenidos para evaluar el comportamiento a la abrasión del material compuesto Fe-SiC, un cermet de interés para aplicaciones en la industria minera. Los ensayos fueron ejecutados siguiendo dos normas reconocidas internacionalmente: la norma ASTM G65, que evalúa la resistencia a la abrasión bajo condiciones de baja tensión, y la norma ASTM B611, que permite analizar el desgaste en condiciones de alta tensión.

Cada sección abordará de manera independiente los resultados obtenidos bajo cada norma, destacando los parámetros de ensayo, la metodología utilizada y los principales hallazgos en términos de pérdida de material y mecanismos de desgaste observados. Posteriormente, se realizará una comparación crítica entre ambos ensayos para comprender el desempeño del cermet en distintos escenarios operativos.

### **5.1 Ensayos Norma ASTM G65**

En la ejecución de los ensayos bajo la norma ASTM G65, se controlaron tres variables principales para garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados, la fuerza normal aplicada a la muestra, el flujo de arena abrasiva y la velocidad de giro de la rueda de caucho en rpm.

El control riguroso de estas variables permite asegurar que la comparación entre distintos materiales sea válida y que los datos obtenidos reflejen con precisión el comportamiento del material compuesto Fe-SiC frente al desgaste abrasivo. A continuación, se presenta un análisis detallado de cada variable y su impacto en los ensayos.

#### **5.1.1 Fuerza aplicada a la probeta**

La fuerza aplicada a la probeta se calcula a partir de un diagrama de cuerpo libre contemplando el conjunto del brazo con el porta muestras más carga externa variable. Esto se ejemplifica en la figura 35.

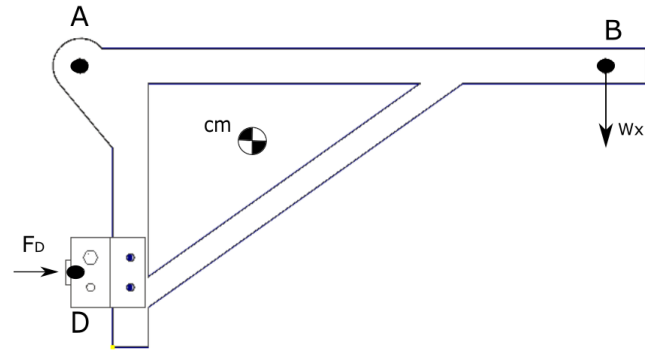


Figura 35: diagrama cuerpo libre.

La configuración geométrica es la siguiente:

- A como punto de pivote.
- B como punto de la aplicación de la carga.
- Cm el centro de masa del conjunto.
- D es el punto donde se aplica la fuerza a la muestra.

El peso del conjunto se calculó a partir de una herramienta del software autodesk inventor, como se muestra en la siguiente figura 36. También, desde acá se extrae las coordenadas del centro de masa.

Material		
<input type="text"/>	<input type="button" value="Update"/>	
Density	Requested Accuracy	
7,839 g/cm <sup>3</sup>	Low	
<input type="button" value="Clipboard"/>		
General Properties		
<input type="checkbox"/> Include Cosmetic Welds	<input type="checkbox"/> Include QTY Overrides	
Center of Gravity		
Mass	7,291 kg (Relative)	
X	-138,295 mm (Relative)	
Area	177791,237 mm <sup>2</sup>	
Y	118,814 mm (Relative)	
Volume	930101,260 mm <sup>3</sup>	
Z	35,343 mm (Relative)	
Inertial Properties		
<input checked="" type="button" value="Principal"/>	<input type="button" value="Global"/>	<input type="button" value="Center of Gravity"/>
Principal Moments		
I1	38548,893 kg m <sup>2</sup>	I2 210804,704 kg m <sup>2</sup>
I3	248525,368 kg m <sup>2</sup>	
Rotation to Principal		
Rx	-0,81 deg (Relative)	Ry -0,10 deg (Relative)
Rz	21,13 deg (Relative)	

Figura 36: Características físicas del conjunto brazo más porta muestra.

Datos Necesarios para la determinación de la fuerza normal:

$\overline{AD}$  Distancia del punto A al punto D.

$\overline{AB}$  Distancia del punto A al punto B.

$\overline{Acm_x}$  Distancia del punto A al centro de masa Cm en el eje x.

$w_x$  Fuerza que ejerce la carga externa.

$F_{cm}$  Fuerza que ejerce la masa del conjunto.

Valores de los datos necesarios para los cálculos:

$\overline{AD} = 208 \text{ mm}$

$\overline{AB} = 528 \text{ mm}$

$\overline{Acm_x} = 173 \text{ mm}$

$W_x = 0,5 - 5,5 \text{ kg}$

$F_{cm} = 7,291 \text{ kg}$

Con esto se procede a realizar una sumatoria de momentos en el punto A para determinar la cantidad de contra pesos necesarios para realizar los distintos ensayos, cada contra peso es de 0,5 kg y donde van sujetos esta pesa 0,33 kg que lo llamaremos  $W_{real}$ .

$$\sum M_A = 0 \quad (1)$$

$$F_D \cdot \overline{AD} - w_x \cdot g \cdot \overline{AB} - F_{cm} \cdot g \cdot \overline{Acm_x} = 0 \quad (2)$$

$$F_D = \frac{w_x \cdot g \cdot \overline{AB} + F_{cm} \cdot g \cdot \overline{Acm_x}}{\overline{AD}} \quad (3)$$

Los distintos valores de la fuerza D respecto a las distintas configuraciones de carga se muestran en la siguiente tabla 3:

**Tabla 3**

Valores fuerza normal sobre la muestra.

$W_x$ [kg]	$W_{real}$ [kg]	$F_D$ [N]
0,5	0,83	80
1	1,33	93
1,5	1,83	105
2	2,33	117
2,5	2,83	130
3	3,33	142
3,5	3,83	155
4	4,33	167
4,5	4,83	180
5	5,33	192
5,5	5,83	204

En este ensayo se trabajará con la configuración de 2,5 kg ya que la fuerza normal requerida sobre la muestra según la norma ASTM G65 es de 130 Newtons.

### 5.1.2 Flujo de arena abrasiva

La caracterización de la arena de cuarzo (sílice) es un paso fundamental para garantizar la reproducibilidad y precisión de los ensayos ASTM G65, que evalúan la resistencia al desgaste abrasivo bajo condiciones de bajo estrés. A continuación, se describen los parámetros principales obtenidos en las mediciones realizadas, utilizando el equipo PSA 990 LD en modo seco (dry jet) y calibración conforme a estándares ISO, Resultados que se encuentran en el Anexo 1.

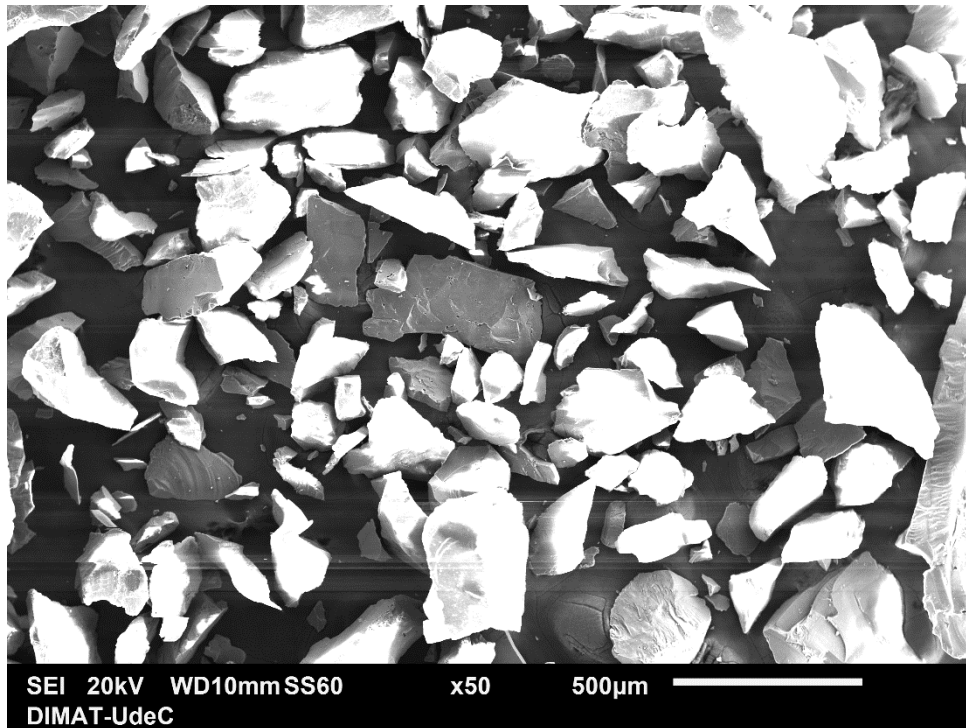
Los valores característicos de la distribución de tamaño de partícula (en micrómetros,  $\mu\text{m}$ ) son los siguientes:

- D10: 11,658  $\mu\text{m}$
- D50 (mediana): 64,629  $\mu\text{m}$
- D90: 223,952  $\mu\text{m}$
- Tamaño medio: 99,560  $\mu\text{m}$
- Índice de dispersión (Span): 3,285

En el Anexo 1, se presenta el gráfico de distribución de densidad y la distribución acumulativa en función del diámetro de partícula. Este gráfico ilustra cómo se distribuyen las partículas de cuarzo (sílice) según su tamaño, destacando los valores característicos de D10, D50 y D90, que son fundamentales para garantizar la uniformidad y consistencia del material abrasivo en los ensayos ASTM G65.

Para garantizar la calidad y consistencia de las partículas abrasivas utilizadas en los ensayos ASTM G65, se realizó una caracterización detallada de la arena de cuarzo (sílice) mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). La imagen que se presenta a continuación fue capturada utilizando el equipo InTouchScope.

En la Figura 37, se presenta la imagen obtenida, que resalta las propiedades morfológicas clave de la arena utilizada. Estos datos complementan la distribución granulométrica previamente analizada.



**Figura 37: Microestructura de la Arena de Cuarzo Caracterizada por SEM.**

Estos resultados permiten la reproductibilidad de los ensayos ASTM G65. La caracterización del material abrasivo es necesaria para su utilización o comparación en futuros ensayos.

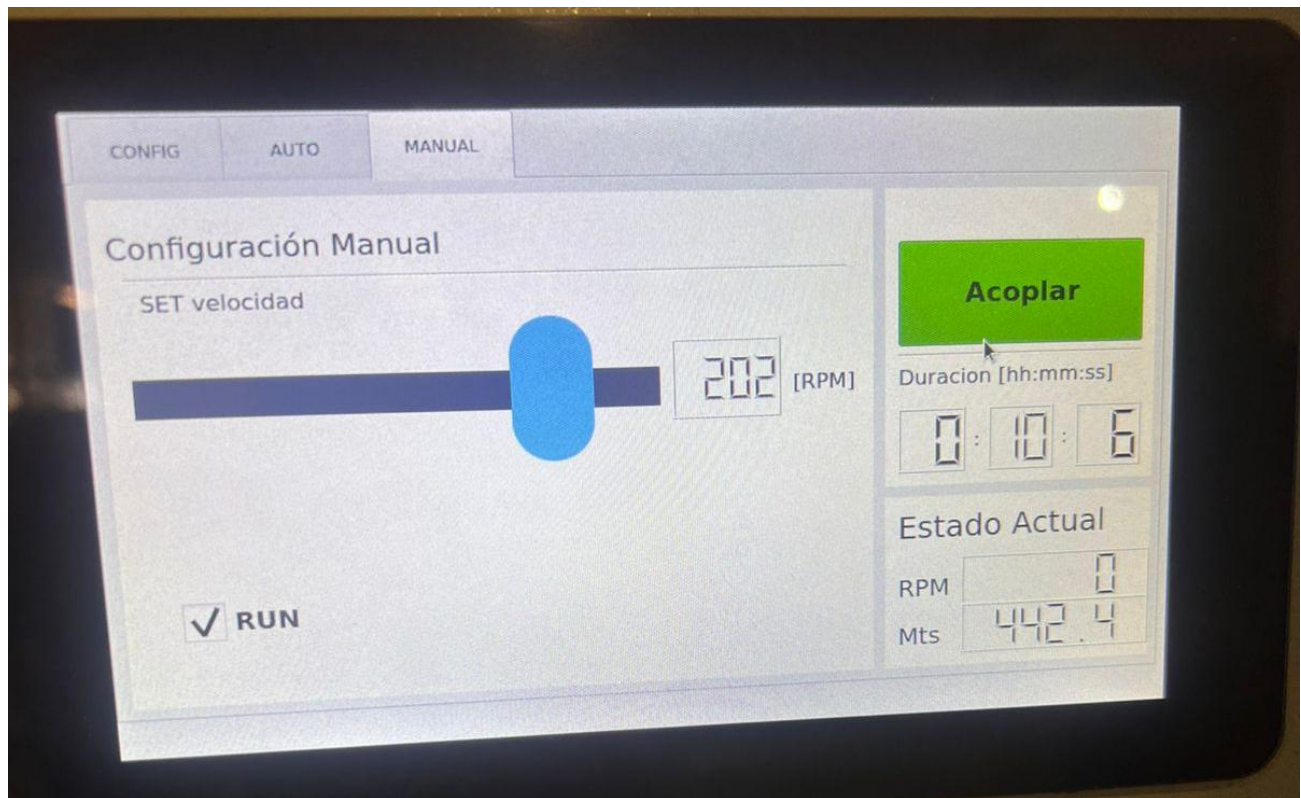
Con las características ya mencionadas y la configuración geométrica del tubo y la boquilla por donde circula la arena se midió una velocidad aproximada de 300 gr/min.

### **5.1.3 Velocidad de giro de la rueda de caucho.**

La velocidad de giro de la rueda de caucho es un parámetro crítico en la ejecución del ensayo ASTM G65, ya que influye directamente en la tasa de desgaste del material evaluado. En este estudio, se adoptó el Procedimiento B de la norma, el cual establece una velocidad de 200 rpm durante un tiempo de 10 minutos.

Para verificar y asegurar la precisión de la velocidad de rotación, se empleó un tacómetro combinado láser/contacto PCE DT-65, que permitió medir de manera precisa la velocidad angular de la rueda de

caucho. Además, el sistema de accionamiento del motor eléctrico cuenta con un panel de control que se muestra en la figura 38. Mediante el cual se configuró y ajustó la velocidad de giro de la rueda de acuerdo con los requerimientos del ensayo.



**Figura 38: panel de control velocidad de la rueda.**

El tacómetro PCE DT-65 permite la medición de la velocidad a partir de la utilización de un láser esto sin estar en contacto con la rueda de caucho. Se coloca una cinta reflectante sobre la rueda de caucho, y el tacómetro emite un haz láser que detecta los reflejos generados por la cinta a medida que la rueda gira.

#### **5.1.4 Resultados ensayos norma ASTM G65**

El ensayo ASTM G65 evalúa la resistencia al desgaste de materiales sometidos a abrasión en seco mediante el uso de una rueda de caucho y arena como medio abrasivo. Este método es ampliamente utilizado para evaluar materiales utilizados en aplicaciones industriales como minería, transporte de materiales y procesamiento de minerales.

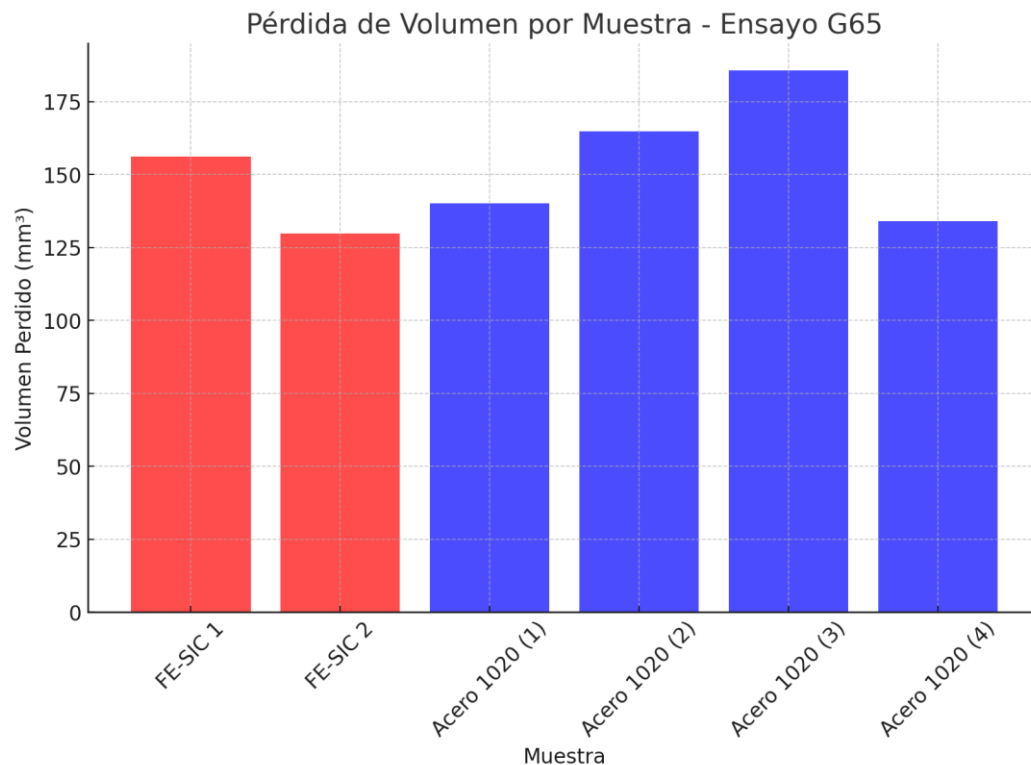
A continuación, se presentan los datos recopilados durante el ensayo ASTM G65 en la tabla 4.

**Tabla 4**

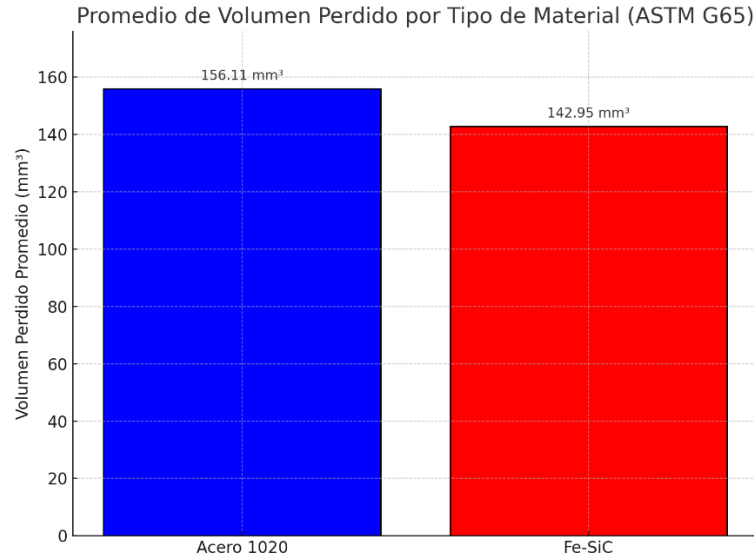
Datos recopilados durante el ensayo ASTM G65.

Muestra	Volumen Total (mm <sup>3</sup> )	Densidad (g/mm <sup>3</sup> )	Peso Antes (g)	Peso Después (g)	Pérdida de Peso (g)	Volumen Perdido (mm <sup>3</sup> )
<b>Fe-sic 1</b>	4261.409	0.0041	17.3758	16.4152	0.9607	156.206
<b>Fe-sic 2</b>	5305.2262	0.0042	22.0365	21.5047	0.5318	129.6992
<b>Acero 1020 (1)</b>	4529.9639	0.0077	34.8214	33.7431	1.0783	140.0346
<b>Acero 1020 (2)</b>	4535.031	0.0077	34.8217	33.5531	1.2686	164.7576
<b>Acero 1020 (3)</b>	4519.8298	0.0076	34.5357	33.1062	1.4295	185.6494
<b>Acero 1020 (4)</b>	4433.6895	0.0077	34.307	33.2752	1.0317	133.9913

Se presentan los gráficos que representan la pérdida de volumen para cada muestra y el análisis del promedio de pérdida de volumen en las figuras 39 y figura 40 respectivamente.



**Figura 39:** Gráfico comparativo de la pérdida de volumen individual.



**Figura 40: Comparación entre los materiales Acero 1020 y FE-SiC.**

Los resultados obtenidos muestran que el Acero 1020 tiene una mayor pérdida de volumen en comparación con el Cermet Fe-SiC. El Acero 1020 pierde un 9,20% más de volumen en comparación con el Cermet.

Según estos criterios se denota que el material tiene un mejor rendimiento, pero no es significativo ya que, su dificultad y costes de producción son mucho más altos en comparación con el acero 1020. Estos resultados dan en cuenta que el Cermet Fe-SiC no muestra grandes propiedades para resistir la abrasión de bajo esfuerzo en seco presentada en el escenario del ensayo según norma ASTM G65.

### 5.1.5 Comparación resultados ASTM G65 Con la literatura.

A continuación, se realiza una breve cita de un Ensayo realizado según las Norma ASTM G65 para realizar una posterior comparación con los ensayos de este informe.

El gráfico extraído del documento [17]. Presenta datos de pérdida de volumen bajo condiciones de abrasión de baja tensión según el ASTM G65, Procedimiento B. En este ensayo, se evalúa la resistencia al desgaste de diferentes materiales metálicos, incluyendo el Acero 1020, comparándolo con aceros herramientas, aceros inoxidable y aleaciones base cobalto y níquel.

Condiciones del ensayo:

-Carga aplicada: 13.6 kg

-Número de revoluciones: 2000

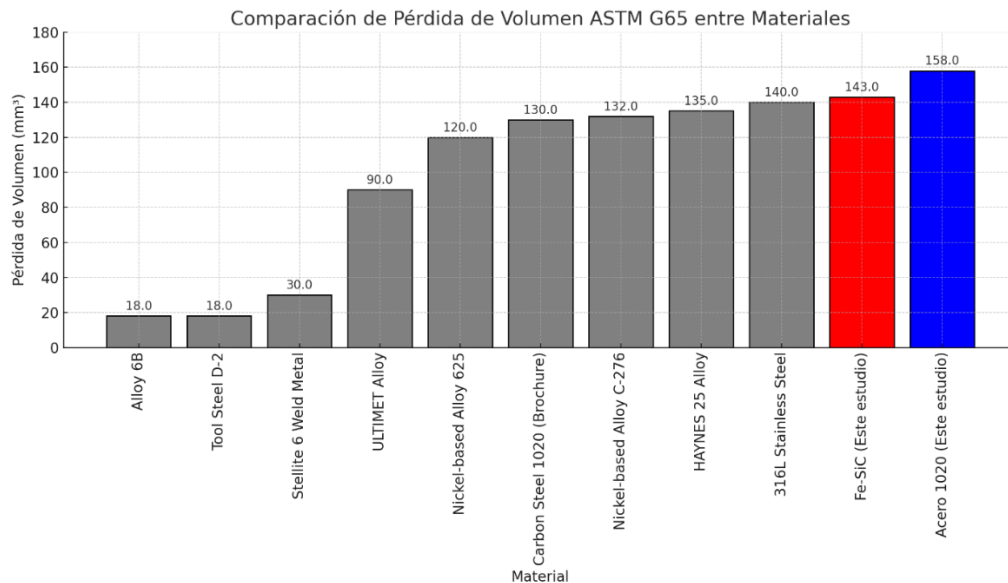
-Abrasivo: Arena de cuarzo

-Materiales evaluados: Acero 1020, Acero D-2, Aleaciones base níquel (ULTIMET, 625, C-276), Aceros inoxidable (316L) y aleaciones base cobalto (6B, Stellite 6).[17]

En el presente análisis, se observa que el Acero 1020 evaluado en nuestro estudio presentó un 20% más de pérdida de volumen respecto al valor de referencia reportado en la literatura, como se ve en la figura 41, donde se estimó una pérdida de 130 mm<sup>3</sup>, frente a los 156 mm<sup>3</sup> obtenidos en nuestro ensayo.

Este resultado sugiere que el material probado en el presente estudio exhibió una menor resistencia a la abrasión en comparación con el Acero 1020 reportado previamente. Las diferencias en la ejecución del ensayo, tales como la preparación superficial de las probetas, el tipo y distribución de las partículas abrasivas, o posibles variaciones en las propiedades del material base, podrían explicar esta discrepancia. Sin embargo, la consistencia general de los resultados demuestra una reproducibilidad aceptable, validando la metodología aplicada.

Asimismo, es importante destacar que el Cermet Fe-SiC evaluado bajo las mismas condiciones mostró un comportamiento significativamente inferior en términos de resistencia a la abrasión. Tal como se ha discutido previamente, los resultados obtenidos indican que este material presenta una baja tolerancia al desgaste abrasivo en condiciones ASTM G65.



**Figura 41: Grafico comparativo resultados ensayos ASTM G65.**

## 5.2 Ensayos norma ASTM B611

Como se indicó en el apartado anterior sobre los ensayos según la norma ASTM G65, en la ejecución de los ensayos bajo la norma ASTM B611 se mantendrán las mismas medidas de control para garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados. No obstante, las principales diferencias radican en las condiciones del ensayo, las cuales se detallan a continuación.

En este procedimiento, la carga aplicada en dirección normal es de 200 N. Se emplea el Procedimiento A, el cual establece que el ensayo debe realizarse a 1000 revoluciones con una velocidad de 100 rpm, lo que implica una duración aproximada de 10 minutos.

### 5.2.1 Fuerza aplicada a la probeta

En este apartado se mantienen las mismas condiciones geométricas presentadas en el subcapítulo 5.1.1. se extrae de este más específicamente de la tabla 1 la cantidad de contra pesos a utilizar según lo requerido en la norma B611. Es la cantidad de diez contrapesos que con esto se genera una fuerza normal sobre la muestra de 204 newton aproximadamente, cumpliendo los 200 Newton requeridos con un más menos 3% de variabilidad permitida.

### 5.2.2 Composición de la lechada.

Para la ejecución del ensayo ASTM B611, que requiere condiciones de abrasión de alto estrés, la preparación de la lechada abrasiva constituye un aspecto crítico que debe ser controlado con precisión. La lechada utilizada se compone de abrasivo de óxido de aluminio de grano 30 (600  $\mu\text{m}$ ) y agua destilada, en una proporción definida que asegura la homogeneidad de la mezcla y la correcta interacción con la probeta durante el ensayo.

El procedimiento de preparación inicia con la adición del abrasivo al estanque de la lechada. Este abrasivo es vertido cuidadosamente hasta alcanzar un nivel comprendido entre 25 mm y 30 mm por debajo de la línea central de la rueda de acero, tal como lo estipula la norma ASTM B611. La cuantificación exacta del abrasivo es determinada mediante un método de pesaje diferencial. Para ello, se registra la masa del recipiente vacío y posteriormente se vuelve a pesar después de haber incorporado el abrasivo, obteniéndose la diferencia entre ambas mediciones como la masa neta de abrasivo añadido.

Es fundamental mantener la relación estequiométrica recomendada de 4 gramos de abrasivo por cada mililitro de agua destilada, garantizando así una adecuada viscosidad y dispersión del abrasivo en la suspensión. En el presente ensayo, el pesaje diferencial arrojó un valor de 6,3 kg de abrasivo de óxido de aluminio, lo que condujo al cálculo de un volumen de agua destilada de 1,575 litros, siguiendo la fórmula establecida (11).

$$\text{Volumen de agua destilada (ml)} = \frac{\text{Masa de abrasivo(g)}}{4} \quad (4)$$

De este modo, la correcta preparación de la lechada no solo asegura la reproducibilidad del ensayo, sino que también es clave para obtener resultados confiables y comparables en la evaluación del comportamiento tribológico de los materiales ensayados.

### 5.2.3 Resultados ensayo ASTM B611

El ensayo ASTM B611 está diseñado para evaluar la resistencia al desgaste de materiales bajo condiciones de abrasión severa mediante el uso de una rueda de acero y un abrasivo en suspensión líquida. Este método es particularmente relevante en aplicaciones industriales como la minería y metalurgia, donde la resistencia al desgaste es un factor determinante en la selección de materiales.

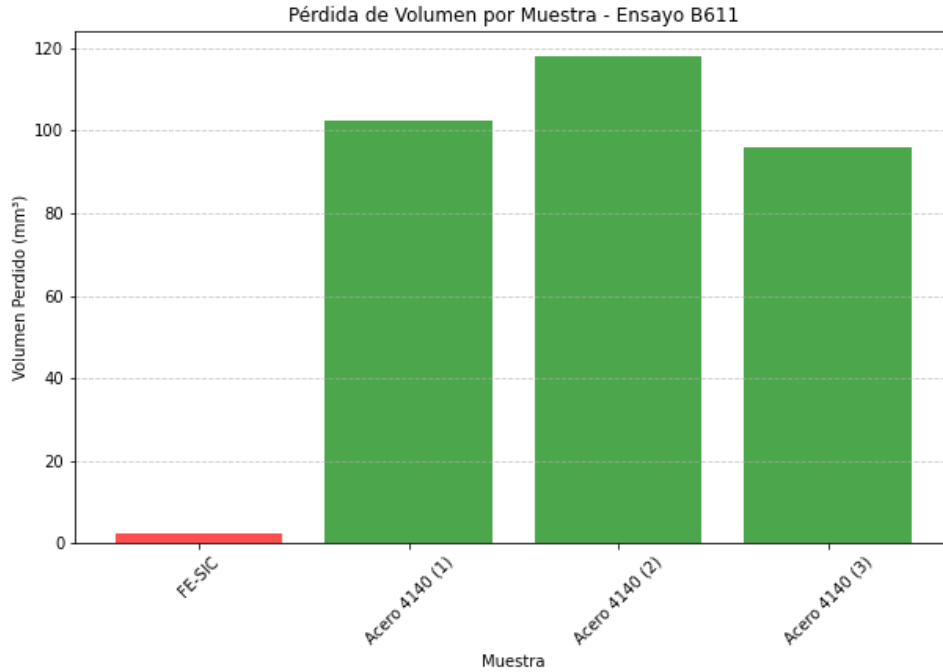
A continuación, se presenta la tabla 5 con los resultados obtenidos en los ensayos ASTM B611.

**Tabla 5**

Datos recopilados durante el ensayo ASTM B611.

<b>Muestra</b>	<b>Volumen Total (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (g/mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso Antes (g)</b>	<b>Peso Después (g)</b>	<b>Pérdida de Peso (g)</b>	<b>Volumen Perdido (mm<sup>3</sup>)</b>
<b>FE-SIC</b>	4697.87	0.0041	19.147	19.131	0.015	2.5149
<b>Acero 4140 (1)</b>	5411.53	0.0078	42.278	41.479	0.799	102.3129
<b>Acero 4140 (2)</b>	5414.55	0.0078	42.302	41.379	0.922	118.1216
<b>Acero 4140 (3)</b>	5269.53	0.0078	41.169	40.421	0.748	95.8357

En la figura 42 presenta la pérdida de volumen individual de cada una de las muestras ensayadas, permitiendo comparar el desempeño de los materiales evaluados. Se observa que la muestra FE-SIC (Cermet) ha presentado una menor pérdida de volumen en comparación con las muestras de Acero 4140, lo que sugiere una mejor resistencia al desgaste abrasivo.



**Figura 42: pérdida de volumen por muestra- Ensayo B611.**

En la figura 43 se presenta el promedio de volumen perdido para cada material.



**Figura 43: Promedio y varianza de volumen perdido - Ensayo B611.**

El promedio de las pérdidas de volumen para las tres probetas de Acero 4140 fue de 105,42 mm<sup>3</sup>. Comparativamente, el material Fe-SiC presentó una pérdida de volumen de 2,51 mm<sup>3</sup>, lo que corresponde a un 97,6% menos de pérdida de volumen respecto al promedio del Acero 4140, evidenciando así una resistencia al desgaste significativamente superior bajo las condiciones establecidas por el ensayo ASTM G65.

En conclusión, los resultados confirman que materiales con una composición cerámica, como el Fe-SiC, ofrecen una resistencia al desgaste notablemente mayor en comparación con aceros convencionales como el Acero 4140, posicionándose como una alternativa viable para aplicaciones donde predominan condiciones abrasivas severas.

#### **5.2.4 Comparación ensayos ASTM B611 Con la literatura.**

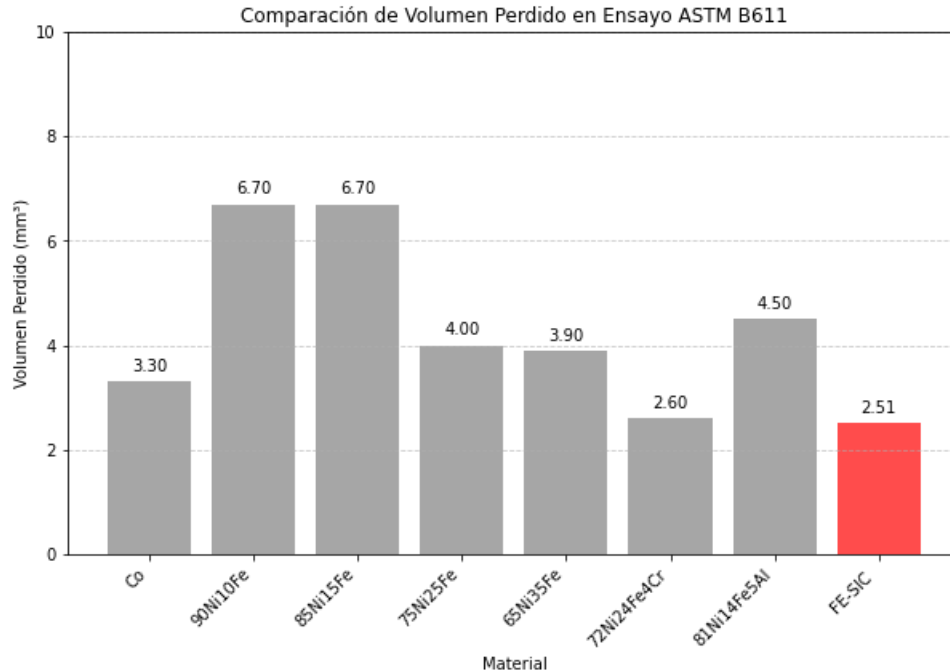
En el presente trabajo se ha considerado como referencia el estudio desarrollado por Markus Fürst et al. (2024),[18] en el cual se evaluó el comportamiento al desgaste abrasivo de diversos grados de metales duros mediante la norma ASTM B611–21. La metodología experimental de estos ensayos consiste en aplicar una fuerza normal de 200 N sobre las probetas, presionándolas contra una rueda de acero rotatoria que alcanza 1000 revoluciones totales. No obstante, el documento no especifica la velocidad angular exacta del sistema, la cual podría corresponder a 100 rpm durante 10 minutos o 50 rpm durante 20 minutos, en concordancia con lo establecido por la norma. Asimismo, no se detallan las propiedades del medio abrasivo empleado, aunque se presume el uso de una suspensión de alúmina, como lo estipula el procedimiento estándar ASTM B611, orientado a la caracterización del desgaste por abrasión en condiciones de alta severidad.

Los materiales ensayados incluyeron tanto grados industriales como desarrollos experimentales libres de cobalto, destacando composiciones con matrices a base de níquel reforzadas con elementos como hierro (Fe), cromo (Cr) y aluminio (Al). En particular, las siguientes composiciones fueron analizadas:

- WC-Co.
- 90Ni10Fe.
- 85Ni15Fe.
- 75Ni25Fe.
- 65Ni35Fe.
- 72Ni24Fe4Cr.
- 81Ni14Fe5Al.
- 97Ni3Al.

Las probetas fueron sometidas a sinterización controlada y posterior evaluación mediante el ensayo B611–21, cuantificándose la pérdida de volumen como medida directa de la resistencia al desgaste. Los resultados obtenidos sirven como base para establecer comparaciones con los materiales ensayados en el presente proyecto.

A continuación, en la figura 44 se presenta un gráfico comparativo que integra los valores de pérdida de volumen obtenidos en el estudio mencionado junto con los resultados experimentales del proyecto.



**Figura 44: Resultados perdidas de volumen.**

En comparación, el material Fe-SiC analizado en el presente estudio mostró una notable menor pérdida de volumen (2.5149 mm<sup>3</sup>), posicionándose como un material de alta resistencia al desgaste, comparable e incluso superior a los mejores sistemas Ni-Fe-Cr reportados en el estudio citado.

Este resultado destaca el gran desempeño del Fe-SiC bajo las condiciones exigentes del ensayo ASTM B611, evidenciando sus excelentes características frente a la abrasión. Se plantea, por tanto, como una alternativa viable para aplicaciones donde se requiere una elevada tenacidad y resistencia al desgaste, superando en comportamiento a materiales tradicionalmente utilizados en este tipo de ambientes.

## Capítulo 6: Conclusiones.

El análisis comparativo de la resistencia al desgaste del cermet Fe-SiC bajo condiciones normalizadas de baja y alta tensión ha revelado resultados contrastantes, que permiten delinear con claridad el potencial de este material compuesto en aplicaciones industriales específicas.

En el ensayo ASTM G65, caracterizado por condiciones de abrasión de baja tensión con rueda de caucho y arena de sílice, el Fe-SiC presentó una pérdida de volumen promedio de 142,95 mm<sup>3</sup>, en comparación con los 156,11 mm<sup>3</sup> obtenidos para el acero 1020. Esto representa una reducción del 9,2% en la pérdida de volumen respecto al acero convencional. Sin embargo, este margen favorable, aunque estadísticamente consistente no es suficiente para justificar el mayor costo y complejidad del proceso de manufactura del cermet en este escenario operativo.

Por el contrario, bajo la norma ASTM B611, que somete a los materiales a abrasión de alta tensión utilizando rueda de acero y suspensión abrasiva de óxido de aluminio, el comportamiento del Fe-SiC fue notablemente superior. La pérdida de volumen registrada para este material fue de apenas 2,51 mm<sup>3</sup>, frente a un promedio de 105,42 mm<sup>3</sup> en las probetas de acero 4140 templado. Esto implica una disminución del 97,6% en la pérdida de volumen, evidenciando una resistencia al desgaste significativamente mayor.

Estas diferencias de comportamiento sugieren que la efectividad del Fe-SiC está intrínsecamente ligada a la tensión aplicada y al tipo de abrasivo utilizado, destacando la relevancia de su fase cerámica (SiC) en condiciones de carga severa.

A partir de estos hallazgos, surge una interrogante relevante para investigaciones futuras: ¿Cómo influiría la variación de parámetros como la temperatura, la presión de contacto o la composición química del abrasivo en el desempeño tribológico del Fe-SiC?, incorporar estas variables permitiría entender con mayor profundidad los mecanismos subyacentes al desgaste y optimizar la selección de materiales para ambientes industriales específicos.

En consecuencia, se recomienda como línea futura evaluar el comportamiento del cermet Fe-SiC bajo condiciones controladas de temperatura elevada y distintos tipos de abrasivos, con el fin de establecer correlaciones más precisas entre las características de los ensayos y la respuesta tribológica del material.

## Referencias

- [1] M. Woydt, “The importance of tribology for reducing CO2 emissions and for sustainability,” *Wear*, vol. 474–475, p. 203768, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.WEAR.2021.203768.
- [2] K. Holmberg, P. Kivikytö-Reponen, P. Härkisaari, K. Valtonen, and A. Erdemir, “Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry,” *Tribol Int*, vol. 115, pp. 116–139, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2017.05.010.
- [3] A. Sethurajaperumal, S. Srivastava, G. Ganesh, R. Sundara, and E. Varrla, “Natural Surfactant Stabilized Aqueous MoS2 Nano-Lubricants for Reducing Friction and Wear,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 496, p. 154080, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.CEJ.2024.154080.
- [4] A. K. Bisht, R. O. Vaishya, R. S. Walia, and G. Singh, “Nitrides ceramic coatings for tribological applications: A journey from binary to high-entropy compositions,” *Ceram Int*, vol. 50, no. 6, pp. 8553–8585, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2023.12.245.
- [5] P. Ettmayer, H. Kolaska, and H. M. Ortner, “History of Hardmetals,” *Comprehensive Hard Materials*, vol. 1, pp. 3–27, 2014, doi: 10.1016/B978-0-08-096527-7.00001-5.
- [6] D. W. Richerson, “Industrial Applications of Ceramic Matrix Composites,” *Comprehensive Composite Materials*, pp. 549–570, 2000, doi: 10.1016/B0-08-042993-9/00133-9.
- [7] M. Srivastava, S. Rathee, V. Patel, A. Kumar, and P. G. Koppad, “A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 21, pp. 2612–2641, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.015.
- [8] J. Zhao, “The use of ceramic matrix composites for metal cutting applications,” *Advances in Ceramic Matrix Composites, Second Edition*, pp. 623–654, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-102166-8.00025-6.
- [9] A. Doering, D. Danks, S. Mahmoud, and J. Scott, “Evaluation of ASTM G65 abrasive — Spanning 13 years of sand,” *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 1252–1257, Jul. 2011, doi: 10.1016/J.WEAR.2011.01.051.
- [10] “Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus 1”, Accessed: Aug. 25, 2024. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/60427cc7-1add-4bd5-b812-7b8027c250bd/astm-g65-00>
- [11] “Standard Test Method for Determining the High Stress Abrasion Resistance of Hard Materials 1”, doi: 10.1520/B0611-21.
- [12] D. Akgümüş Gök, C. Bayraktar, and M. Hoşkun, “A review on processing, mechanical and wear properties of Al matrix composites reinforced with Al2O3, SiC, B4C and MgO by powder

- metallurgy method,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 31, pp. 1132–1150, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.JMRT.2024.06.110.
- [13] Q. Gao *et al.*, “Microstructure and mechanical properties of Cu–Fe-ZTA cermets prepared by vacuum hot pressing sintering,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 1814–1827, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.JMRT.2022.07.151.
- [14] “Inventor 2023 Ayuda | Coeficiente de fricción para conexiones por perno | Autodesk.” Accessed: Mar. 05, 2025. [Online]. Available: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2023/ESP/?guid=GUID-42FECEEA-1F24-4470-AA60-5C358AA88A86>
- [15] “Element Types in Ansys – FEA Tips.” Accessed: Mar. 05, 2025. [Online]. Available: <https://featips.com/2024/04/05/element-types-in-ansys/>
- [16] “How to Verify Mesh Quality in ANSYS Workbench – FEA Tips.” Accessed: Mar. 05, 2025. [Online]. Available: <https://featips.com/2021/05/07/how-to-verify-mesh-quality-in-ansys-workbench/>
- [17] “Abrasión - Haynes International.” Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: [https://haynesintl-com.translate.google.com/en/alloys/corrosion-guide/abrasion/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://haynesintl-com.translate.google.com/en/alloys/corrosion-guide/abrasion/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
- [18] M. Fürst, W. Lengauer, R. Wartbichler, J. M. Tarragó, C. Beltz de Arancibia, and S. Moseley, “Microstructural analysis and ASTM B611-21 wear testing of novel binder hardmetals for future percussive drilling applications,” *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 118, p. 106440, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IJRMHM.2023.106440.

# Anexos

## Anexo 1

Standard Report - Particle Size (Dry)



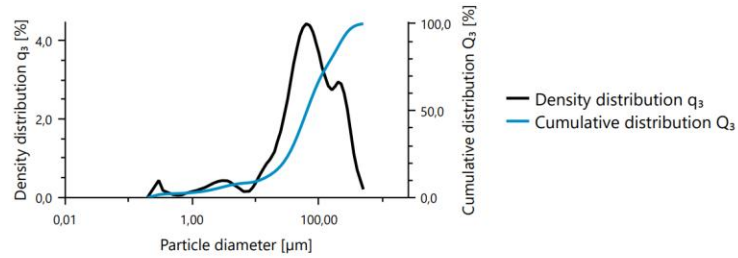
**Measurement information**

Measurement name	Arena	User	usuario
Method	-	Time	20-11-2024 11:51:31
Status	Succeeded	Instrument type	PSA 990 LD
Measurement mode	Dry PSA (dry jet)	Batch number	-
Sample ID	-		
Calibration mode	ISO Anton Paar		
Comment	-		

**Dispersion parameters**

Vibrator duty cycle	100 %	Vibrator frequency	50 Hz
Air pressure	2300 mBar		

**Distribution (volume) - Undersize**



**D-values - Undersize**

	Volume	Number	Surface	Rosin-Rammler
D <sub>10</sub> [µm]	11,658	0,2099	0,2176	7,485
D <sub>50</sub> [µm]	64,629	0,2544	0,3151	65,628
D <sub>90</sub> [µm]	223,952	0,3350	22,932	261,990
D <sub>95</sub> [µm]	156,428	0,2939	2,843	173,277
Mean size [µm]	99,560	0,3312	8,545	103,952
Span	3,285	0,492	72,081	3,878
D[5,3]	135,728 µm			

Anexo 2 :

