

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA  
MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO – CHILE



“DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA MATRIZ  
CON EL FIN DE REALIZAR ANILLOS DE ALTA  
DENSIDAD SINTETIZADOS MEDIANTE  
FAST/SPS”

FELIPE ANDRÉS DONOSO PARRA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MECÁNICO

PROFESOR GUIA: DR. ING. SHEILA LASCANO FARAK  
PROFESOR CO-REFERENTE: M.SC.ING.SERGIO SAUCEDA MARTINEZ  
PROFESOR CO-REFERENTE: ING. RICARDO CHÁVEZ VÁSCONEZ

ENERO-2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: "Diseño y desarrollo de una matriz con el fin de realizar anillos de alta densidad sintetizados mediante FAST/SPS"

Nombre del candidato(a): Felipe Andrés Donoso Parra

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Santiago San Joaquín ; Departamento: Ingeniería Mecánica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sheila Lascano Farak, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Sheila Katherine Lascano Farak  
Firmado digitalmente por Sheila Katherine Lascano Farak  
Fecha: 2025.09.16 10:18:06 -03'00'

Fecha: 14/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 14/02/2025

; Firma:

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

BIB-FO2385 01

# Agradecimientos

El trabajo a continuación es la finalización de una de las etapas más importante de mi vida, es por esto por lo que quiero agradecer a todas las personas, profesores e instituciones que me permitieron llegar a este momento, con su apoyo y consejos que me ayudaron a seguir adelante.

Expreso mi sincero agradecimiento a mis profesores de tesis, Sheila Lascano F. y Ricardo Chávez V., por compartir su experiencia, compromiso, motivación, valiosos consejos, enseñanzas y por la confianza que me brindaron al permitirme colaborar con ellos y con el equipo de GRIM3A en especial al profesor Mauricio Reyes.

Quiero agradecer también a mis padres, hermanos, abuelos y tías que siempre me apoyaron y estuvieron dispuestos a prestarme una ayuda cuando más lo necesitaba y que me acompañaron a lo largo de este viaje.

Agradezco a mis amigos, quienes me acompañaron durante toda esta etapa y vivimos juntos todas las experiencias que nos da la vida universitaria, en especial a Nicolas Acevedo que con su apoyo este trabajo hubiera sido más largo.

# Dedicatoria

*“A mi madre y mi padre que me apoyaron a seguir mis sueños y ayudarme a lo largo de mi vida, los amo.”*

# Resumen

La presente investigación se centra en el diseño y desarrollo de una matriz destinada a la fabricación de anillos de alta densidad utilizando la tecnología FAST/SPS (Field-Assisted Sintering Technique/Spark Plasma Sintering). Este método permite la sinterización rápida mediante la aplicación de presión uniaxial y corriente eléctrica pulsada, optimizando tiempos de procesamiento y asegurando una densificación homogénea.

El objetivo general es diseñar y validar una matriz capaz de soportar las altas temperaturas y presiones necesarias para lograr anillos con propiedades mecánicas superiores y baja porosidad. Para ello, se definieron requerimientos técnicos como resistencia térmica, compatibilidad de materiales y precisión dimensional. El grafito de alta densidad fue seleccionado como material principal debido a su estabilidad térmica y conductividad.

El desarrollo siguió una metodología estructurada: análisis de necesidades del cliente, evaluación de diseños conceptuales y detallados, y simulaciones de resistencia mecánica, transferencia de calor y comportamiento eléctrico. Los resultados demostraron que la matriz diseñada cumple con los requisitos establecidos, garantizando una distribución uniforme de temperatura y presión, y evitando defectos estructurales en los anillos.

Las conclusiones destacan que el diseño es viable para la sinterización de anillos en condiciones industriales, mejorando la eficiencia energética y reduciendo costos. Asimismo, la investigación sienta las bases para optimizar procesos de fabricación mediante FAST/SPS, abriendo oportunidades para aplicaciones avanzadas en la industria de materiales.

# Abstract

This research focuses on the design and development of a matrix for manufacturing high-density rings using the FAST/SPS (Field-Assisted Sintering Technique/Spark Plasma Sintering) technology. This method enables rapid sintering through the application of uniaxial pressure and pulsed electric current, optimizing processing times and ensuring homogeneous densification.

The primary goal is to design and validate a matrix capable of withstanding the high temperatures and pressures required to produce rings with superior mechanical properties and low porosity. Technical requirements such as thermal resistance, material compatibility, and dimensional precision were established. High-density graphite was chosen as the main material due to its thermal stability and conductivity.

The development followed a structured methodology: analysis of customer needs, evaluation of conceptual and detailed designs, and simulations of mechanical resistance, heat transfer, and electrical behavior. The results demonstrated that the designed matrix meets the established requirements, ensuring uniform temperature and pressure distribution while preventing structural defects in the rings.

The conclusions highlight that the design is feasible for ring sintering under industrial conditions, improving energy efficiency and reducing costs. Additionally, this research lays the foundation for optimizing manufacturing processes using FAST/SPS, opening opportunities for advanced applications in the materials industry.

# Glosario

- *FAST/SPS: Técnica de sinterización rápida que utiliza presión uniaxial y corriente eléctrica pulsada para consolidar materiales. Por sus siglas Field-Assisted Sintering Technique/Spark Plasma Sintering*
- *HP: Prensado en caliente, un método tradicional de sinterización. Por sus siglas Hot Pressing*
- *ERS: Sinterización por resistencia eléctrica, método donde el calor se genera directamente por conducción eléctrica, por sus siglas Electrical Resistance Sintering*
- *Sinterización: Proceso de calentamiento de materiales en polvo hasta una temperatura en la que las partículas se adhieren entre sí sin fundirse completamente.*
- *Grafito de alta densidad: Material con excelentes propiedades térmicas y eléctricas, ideal para la fabricación de matrices utilizadas en procesos de alta temperatura.*
- *Compactación: Etapa del proceso de pulvimetalurgia en la que los polvos metálicos son comprimidos para obtener una forma sólida preliminar*
- *Metalurgia de polvos: Tecnología de fabricación de componentes a partir de polvos metálicos o cerámicos mediante prensado y sinterización.*
- *Densificación homogénea: Logro de una distribución uniforme de la densidad en un material tras su compactación y sinterización.*
- *Conductividad térmica: Propiedad del material que mide su capacidad para transferir calor.*
- *Efecto Joule: Fenómeno donde la energía eléctrica se transforma en calor al pasar corriente por un material conductor.*
- *Matriz: Componente mecánico utilizado para contener y moldear materiales durante el proceso de fabricación, como en la sinterización.*
- *Presión uniaxial: Aplicación de fuerza en una sola dirección durante procesos como la compactación y la sinterización.*
- *Transferencia de calor: Movimiento de energía térmica desde áreas de mayor a menor temperatura mediante conducción, convección o radiación.*
- *SiC: Material cerámico utilizado por su dureza, conductividad térmica y estabilidad química.*
- *WC: Material conocido por su dureza extrema y resistencia al desgaste, utilizado en aplicaciones de alta exigencia.*
- *Porosidad: Espacios vacíos en un material que afectan negativamente sus propiedades mecánicas y resistencia.*
- *Microestructura: Disposición interna de las partículas o cristales en un material, que afecta sus propiedades mecánicas y físicas.*

# Contenido|

Introducción .....	xi
1.1 Motivación .....	xi
1.2 Objetivo general.....	xii
1.3 Objetivos específicos.....	xii
Capítulo 2 Marco teórico .....	1
2.1 Introducción .....	1
2.2 Metalurgia de polvos .....	1
2.3 Producción de polvos .....	2
2.4 Compactación.....	3
2.5 Sinterización.....	3
2.5.1 Sinterización por prensado uniaxial en caliente.....	3
2.5.2 Calentamiento indirecto .....	4
2.5.3 Calentamiento directo .....	4
2.5.4 Sinterización por prensado isostático en caliente.....	5
2.5.5 Sinterización por resistencia eléctrica ERS .....	5
2.5.6 Sinterización por FAST/SPS. ....	6
2.5.7 Efectos mecánicos. ....	8
2.5.8 Resistencia mecánica.....	9
2.5.9 Efectos térmicos. ....	10
2.5.10 Mecanismo de transferencia de calor.....	11
2.5.11 Efectos eléctricos.....	11
2.5.12 Resistencia eléctrica.....	12
2.6 Materiales utilizados para las matrices.....	14
2.6.1 Grafito.....	14
2.6.2 Alúmina.....	15
2.6.3 Carburo de silicio. ....	15
2.6.4 Carburo de tungsteno.....	16
Capítulo 3 Metodología. ....	18
3.1 Introducción .....	18
3.2 Antecedentes .....	18
3.3 Necesidades del cliente.....	18
3.3.1 Lista categorizada.....	18
3.3.2 Tabla de pesos.....	19
3.3.3 Lista jerárquica.....	19

3.4	Análisis funcional .....	20
3.4.1	Árbol de funciones .....	20
3.4.2	Caja negra.....	20
3.4.3	Caja transparente.....	20
3.5	Casa de la calidad (QFD).....	21
3.6	Requerimientos del diseño.....	21
3.7	Elaboración de soluciones conceptuales.....	22
3.7.1	Búsqueda externa.....	22
3.7.2	Carta morfológica.....	22
3.7.3	Generación de conceptos.....	22
3.8	Selección de concepto .....	22
3.9	Diseño básico .....	22
3.10	Análisis estructural.....	23
3.10.1	Análisis mecánico.....	23
3.10.2	Análisis resistencia eléctrica.....	23
3.10.3	Transferencia de calor.....	23
3.11	Diseño al detalle.....	24
3.12	Prototipo.....	24
Capítulo 4	Resultados y análisis.....	25
4.1	Introducción.....	25
4.2	Necesidades del cliente.....	25
4.2.1	Lista de atributos .....	25
4.2.2	Funciones .....	26
4.2.3	Restricciones.....	26
4.2.4	Objetivos .....	27
4.2.5	Lista categorizada.....	27
4.2.6	Tabla de pesos.....	29
4.3	Análisis de funciones.....	30
4.3.1	Árbol de funciones.....	30
4.3.2	Caja negra.....	31
4.3.3	Caja transparente.....	31
4.4	Casa de la calidad (QFD).....	32
4.5	Requerimientos de diseño.....	32
4.6	Elaboración de soluciones conceptuales.....	33
4.6.1	Búsqueda externa .....	34
4.6.2	Carta morfológica.....	36

4.6.3 Generación de conceptos.....	36
4.6.4 Concepto 1.....	37
4.6.5 Concepto 2.....	38
4.6.6 Concepto 3.....	39
4.7 Selección de concepto .....	40
4.8 Diseño básico.....	41
4.8.1 Arquitectura del diseño. ....	41
4.8.2 Lista de partes. ....	42
4.8.3 Funcionamiento.....	43
4.9 Análisis estructural.....	44
4.9.1 Resistencia mecánica.....	44
4.9.2 Resistencia eléctrica.....	46
4.9.3 Transferencia de calor.....	47
4.10 Diseño al detalle.....	48
4.10.1 Selección de materiales .....	48
4.10.2 Planos.....	49
4.10.3 Análisis de los procesos de manufactura.....	49
4.10.4 Proceso de manufactura de adaptador inferior.....	49
4.10.5 Proceso de manufactura de adaptador superior.....	49
4.10.6 Proceso de manufactura de punzón inferior.....	50
4.10.7 Proceso de manufactura de punzón superior.....	50
4.10.8 Proceso de manufactura de guía.....	50
4.10.9 Proceso de manufactura de camisa intermedia.....	50
4.10.10 Proceso de manufactura de camisa exterior.....	51
4.10.11 Proceso de ensamble.....	51
4.10.12 Equipo de sinterización a través de FAST/SPS.....	52
4.11 Prototipo.....	52
Capítulo 5 Conclusiones .....	57
Bibliografía .....	58

# Índice de figuras

Figura 2.1 Diagrama de proceso de metalurgia de polvos convencional [37].....	1
Figura 2.2 Esquema de molino de bolas attritor vertical [30] .....	2
Figura 2.3 Diagrama de proceso de sinterización por prensado uniaxial en caliente.....	4
Figura 2.4 Ruta de transferencia de material durante la sinterización [1].....	6
Figura 2.5 Representación esquemática de (a) HP y (b) SPS [1].....	6
Figura 2.6 Configuración del sistema SPS y cámara de vacío. [1] .....	7
Figura 2.7 Esquema demostrativo del esfuerzo sobre un cuerpo.....	9
Figura 2.8 a) varilla sin deformación sin carga axial b) deformación de la varilla por una carga axial. ....	9
Figura 2.9 Esquema del calentamiento por efecto Joule. [2].....	12
Figura 2.10 Esquema del efecto Peltier [39] .....	12
Figura 2.11 Geometría de un cono truncado [25] .....	13
Figura 2.12 Estructura del grafito: a) hexagonal tipo Bernal (ABA) y b) romboédrico (ABC) [17] .....	14
Figura 2.13 a) modelo de estructura de $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , b) modelo de estructura de $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [43] .	15
Figura 2.14 Estructura cristalográfica del SiC. [21].....	16
Figura 3.1 Diagrama de proceso de la metodología a seguir.....	18
Figura 4.1 Árbol de funciones de la matriz de anillos de alta densidad mediante FAST/SPS. ..	30
Figura 4.2 Esquema caja negra de la matriz de anillos de alta densidad mediante FAST/SPS. ..	31
Figura 4.3 Esquema caja transparente de la matriz de anillos de alta densidad mediante FAST/SPS. ....	32
Figura 4.4 Vista frontal del concepto 1.....	37
Figura 4.5 Vista lateral del concepto 1. ....	37
Figura 4.6 Vista interna del concepto 1. ....	37
Figura 4.7 Vista frontal del concepto 2.....	38
Figura 4.8 Vista lateral del concepto 2. ....	38
Figura 4.9 Vista interna del concepto 2. ....	38
Figura 4.10 Vista frontal del concepto 3.....	39
Figura 4.11 Vista lateral del concepto 3. ....	39
Figura 4.12 Vista interna del concepto 3. ....	39
Figura 4.13 Esquema de la arquitectura del diseño.....	41
Figura 4.14 Vista lateral de la guía.....	42
Figura 4.15 Vista superior de la camisa intermedia. ....	42
Figura 4.16 Vista lateral de la camisa exterior .....	43
Figura 4.17 a) matriz en posición de no sinterización b) matriz en posición de sinterización. ..	44
Figura 4.18 Prototipo de matriz en posición .....	53
Figura 4.19 Prototipo de adaptador superior. ....	53
Figura 4.20 Prototipo de punzón superior. ....	53
Figura 4.21 Prototipo de camisa intermedia.....	54
Figura 4.22 Prototipo de camisa exterior. ....	54
Figura 4.23 Prototipo de guía. ....	54
Figura 4.24 Prototipo de punzón inferior.....	55
Figura 4.25 Prototipo de adaptador inferior .....	55
Figura 4.26 Prototipo de conjunto adaptador inferior, punzón inferior y guía.....	55
Figura 4.27 Prototipo de conjunto camisa intermedia y camisa exterior.....	56

# Índice de tablas

Tabla 4.1 Tabla de categorización en familias de funciones, restricciones y objetivos. ....	28
Tabla 4.2 Valores de pesos absolutos para jerarquizar los objetivos. ....	29
Tabla 4.3 Requerimientos de diseño por categorías para la matriz de anillos de alta densidad mediante FAST/SPS. ....	33
Tabla 4.4 Esquemas de catálogos y estudios de matrices usadas para sintetizar en FAST/SPS. ....	34
Tabla 4.5 Opciones de diseño para múltiples elementos de la matriz. ....	36
Tabla 4.6 Tabla de pesos ponderados de los prototipos para su selección. ....	40
Tabla 4.7 Valor de los elementos alineados de forma axial a la muestra. ....	45
Tabla 4.8 Valor de la tensión radial de los elementos que recubre la muestra. ....	45
Tabla 4.9 Valor de las resistencias para cada componente. ....	46
Tabla 4.10 Valor de la corriente y potencia del sistema. ....	46
Tabla 4.11 Transferencia de calor de los elementos más cercanos al punto de calor. ....	47
Tabla 4.12 Propiedades mecánicas de los materiales posibles para la matriz. ....	48
Tabla 4.13 Datos técnicos equipo HP D 10-SD. Fuente [15]. ....	52

# Introducción

## 1.1 Motivación

La producción de anillos de alta densidad mediante la técnica FAST/SPS (Field-Assisted Sintering Technique/Spark Plasma Sintering) está motivada por la necesidad de desarrollar componentes con propiedades mecánicas superiores, alta resistencia al desgaste y baja porosidad. Estas características son esenciales en aplicaciones avanzadas, como herramientas de corte, componentes de alta precisión y materiales funcionales, donde la microestructura homogénea y la densificación completa son críticas para el desempeño del material.

Además, FAST/SPS ofrece ventajas significativas sobre métodos convencionales de sinterización, como tiempos de procesamiento más cortos, mejor eficiencia energética y menor crecimiento de grano, lo que garantiza un mejor control de la microestructura final [34]. La técnica permite también trabajar con una amplia variedad de materiales, incluidos metales, cerámicos y compuestos, maximizando su potencial en diferentes industrias, como la aeroespacial, automotriz y biomédica [35].

En términos de manufactura, la implementación de FAST/SPS no solo optimiza los recursos energéticos y de tiempo, sino que también reduce defectos en el producto final gracias a la aplicación simultánea de presión uniaxial y corriente eléctrica pulsada, lo que asegura una transferencia de calor uniforme en todo el componente [36].

## 1.2 Objetivo general

- Diseñar una matriz para la elaboración de anillos de alta densidad mediante la técnica de sinterización FAST/SPS.

## 1.3 Objetivos específicos

- Establecer los requisitos técnicos necesarios para una matriz que se utilizará en el proceso de sinterización de anillos mediante la tecnología de FAST/SPS.
- Diseñar matrices de grafito diseñadas específicamente para la sinterización de anillos mediante la tecnología FAST/SPS.
- Seleccionar la matriz que mejor se adapte a los requisitos técnicos establecidos previamente y comparta características similares con las matrices utilizadas en el equipo.
- Fabricar un prototipo de la matriz para evaluar la funcionalidad de la matriz

# Capítulo 2 Marco teórico

## 2.1 Introducción

En este capítulo se expone el marco teórico necesario para comprender los fundamentos del proyecto. Se aborda inicialmente la metalurgia de polvos, explicando los principios básicos y su relevancia en los procesos de manufactura avanzada. Luego, se describen los materiales empleados en la fabricación de matrices, con especial énfasis en sus propiedades y aplicaciones específicas.

Además, se analiza el proceso de sinterización, incluyendo su variante avanzada mediante la técnica FAST/SPS (Field-Assisted Sintering Technique/Spark Plasma Sintering). Por último, se presentan los equipos y matrices fabricados con grafito, diseñados específicamente para optimizar el proceso de sinterización mediante FAST/SPS, destacando sus características y ventajas en esta tecnología.

## 2.2 Metalurgia de polvos

La metalurgia de polvo se trata de una técnica de procesamiento que implica la creación de partes o componentes a partir de polvos, ya sean metálicos, no metálicos o una combinación de ambos. En el proceso estándar de producción que se observa en la figura 2.1, los polvos se comprimen para darles la forma deseada y luego se calientan para que las partículas se unan formando una estructura sólida (sinterización). La metalurgia de polvos se caracteriza por su capacidad para producir piezas con alta precisión y eficiencia, lo que la convierte en una opción ideal para la fabricación de componentes en diversas industrias, incluyendo la automotriz, aeroespacial, electrónica y herramientas de corte [30].

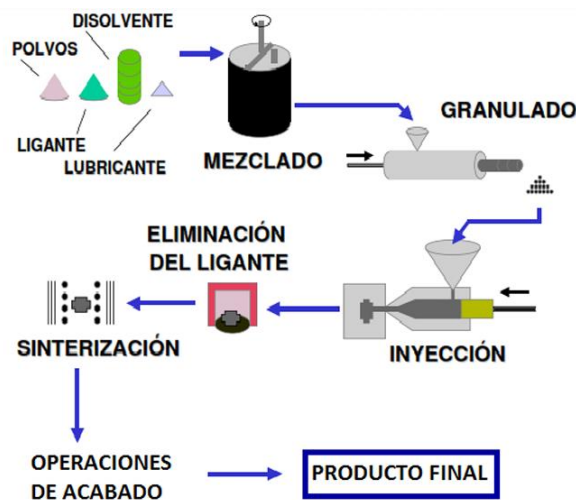


Figura 2.1 Diagrama de proceso de metalurgia de polvos convencional [37]

## 2.3 Producción de polvos

Para emplear esta tecnología en la fabricación de herramientas especiales, es necesario preparar mezclas de polvo metalúrgico, conocidas como grados. De los métodos más conocidos para producir polvos metálicos son por método de atomización, electrolíticos, mecánicos y químicos [30,31].

El método de atomización convierte un metal fundido en gotas que solidifican como polvo, siendo el más versátil y ampliamente utilizado para producir polvos metálicos. Es aplicable a la mayoría de los metales y aleaciones. Esencialmente, consiste en transformar el metal líquido en partículas pequeñas que, al solidificarse, forman el polvo. Este proceso es fundamental en la metalurgia de polvo y se destaca como el método dominante en la industria actual. Para estos métodos tenemos diferentes técnicas para realizar la atomización que son atomización con gas, con agua y centrífuga [30].

El método electrolítico que consiste en una celda electrolítica, el metal a pulverizar se utiliza como ánodo (negativo). Bajo la acción del voltaje aplicado, este ánodo se disuelve lentamente en el electrolito y sus partículas se trasladan hacia el cátodo (positivo), donde se depositan. Posteriormente, el depósito se retira, se lava y se seca, obteniendo así polvo metálico. Esta técnica se emplea para producir polvos de diversos metales como berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio [30].

Existen técnicas de fabricación menos comunes que implican operaciones mecánicas para producir polvos metálicos. Estos polvos se pueden obtener mediante acciones como el impacto, el rozamiento, el corte y la compresión de las aleaciones metálicas. La formación del polvo es el resultado de la combinación de estas cuatro operaciones mecánicas. Como se ve en la figura 2.2 [30].

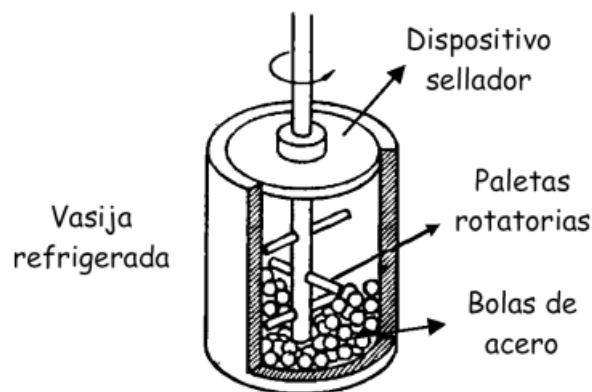


Figura 2.2 Esquema de molino de bolas attritor vertical [30]

La reducción química es un método utilizado para transformar aleaciones metálicas en polvo, mediante la aplicación de compuestos, principalmente óxidos, aunque también haluros o sales de metal. Este proceso puede llevarse a cabo de diversas maneras: desde el estado sólido, como la reducción del óxido de hierro con carbono o del óxido de wolframio con hidrógeno; desde el estado gaseoso, como en el proceso Kroll donde se reduce el tetracloruro de titanio gaseoso con magnesio fundido; y desde una solución acuosa, como la precipitación del cobre a partir de sulfato de cobre con hierro o la reducción de una solución salina de níquel amoniacal con hidrógeno bajo presión [30].

## 2.4 Compactación

La compactación es una de las etapas clave en el proceso de pulvimetalurgia. Consiste en la consolidación de los polvos metálicos en una forma sólida mediante la aplicación de presión. El objetivo principal de la compactación es obtener una pieza "verde" que tenga la forma deseada y una densidad suficiente para soportar el posterior proceso de sinterización [38].

Un método de compactación común es la compactación unidireccional. Este proceso implica la compresión de un polvo granular, confinado en una matriz rígida, de manera simultánea con el conformado. Su amplia aplicación se debe a que permite la obtención rápida y fácilmente automatizable de compactos con tolerancias precisas y propiedades controladas. Los pasos en la compactación uniaxial incluyen el llenado de la matriz, el posicionamiento de los punzones, la entrada del punzón superior, la aplicación de presión para la compactación, el cese de la presión y finalmente, la extracción del compacto en verde [38].

Otro método de compactación tradicional es La compactación isostática esta se basa en el teorema de Pascal, que establece que cualquier presión aplicada a un fluido se distribuye de manera uniforme en todas las direcciones. Este proceso reduce significativamente los problemas de uniformidad que se presentan en la compactación unidireccional, los cuales surgen debido al roce entre el polvo, las paredes de la matriz y los punzones. Al eliminar estos inconvenientes, la compactación isostática permite trabajar con grandes volúmenes de polvo, incluso con altas relaciones entre altura y diámetro. Además, posibilita la fabricación de piezas con formas complejas, siempre que el diseño del molde lo permita, ya que la forma que el polvo toma al llenarse el molde se mantiene durante el proceso. Asimismo, la compactación isostática resulta más eficiente que la unidireccional, ya que produce compactos con mayores densidades bajo la misma presión aplicada [38].

## 2.5 Sinterización.

La sinterización moderna comenzó con Coodlidge, quien utilizó polvo de wolframio para fabricar un filamento duradero para la lámpara de Edison. A partir de la década de 1930, se utilizaron polvos para crear bujías, carburos cementados, cojinetes de bronce poroso, aislantes eléctricos y contactores de grafito-cobre. En los años 40, se usó para aleaciones de wolframio, combustible nuclear y otros productos. A finales del siglo XX, la sinterización creció enormemente, especialmente en cerámicas técnicas y materiales con alta resistencia mecánica y térmica, además de nuevas propiedades electrónicas. Hoy en día, se emplea en una amplia gama de productos, como implantes dentales, toberas de cohetes, y componentes de aeronaves, con un enfoque en la mejora de propiedades, la economía de fabricación y nuevas composiciones [33]. A continuación, se profundizará en los diferentes métodos actuales de sinterización.

### 2.5.1 Sinterización por prensado uniaxial en caliente

El prensado uniaxial en caliente es uno de los métodos más antiguos de compactación en caliente dentro de la pulvimetalurgia. Consiste en colocar el polvo o un compacto preformado dentro de una matriz rígida, donde es comprimido mediante punzones de simple o doble efecto, como se observa en la figura 2.3. La elección del material para los troqueles depende de su resistencia y compatibilidad química con el polvo bajo las condiciones de prensado. El grafito es el material más utilizado, ya que permite temperaturas de hasta 2500 [°C], aunque para soportar presiones muy elevadas también se emplean materiales como carbono reforzado con fibra de carbono, wolframio, aleaciones de cobalto, aceros refractarios y cerámicos [22,23].

Las presiones típicas alcanzan hasta 100 [MPa] en matrices de acero y son algo menores en matrices de grafito. En procesos con presencia de una fase líquida, se prefieren presiones más bajas para evitar la migración del líquido hacia la superficie del compacto. Los tiempos de procesamiento varían desde segundos en técnicas rápidas hasta varias horas en las más lentas. Este método es especialmente importante en la fabricación de cerámicas y compuestos metálicos, aunque ha ido perdiendo protagonismo frente al prensado isostático en caliente, que ofrece una mejor distribución de presión, mayores ritmos de producción y mejores resultados en piezas más complejas [22,23].

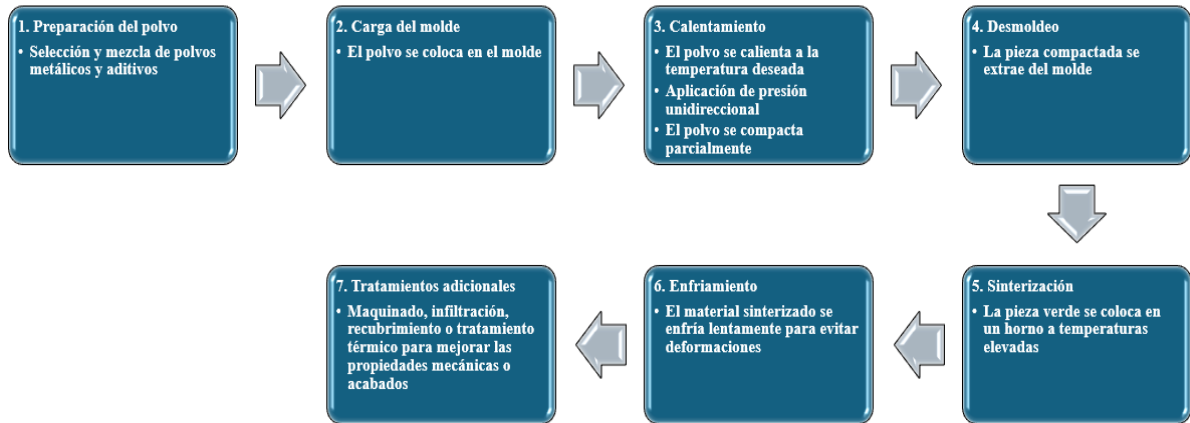


Figura 2.3 Diagrama de proceso de sinterización por prensado uniaxial en caliente.

## 2.5.2 Calentamiento indirecto

El prensado en caliente más básico consiste en calentar una matriz resistente al calor cargada con polvo metálico y luego trasladarla a una prensa para comprimir el material mientras retiene el calor. Este método, aunque simple, presenta desventajas como matrices costosas, pesadas y difíciles de manipular, además de requerir sistemas de transporte y hornos potentes. Una alternativa más eficiente es combinar el calentamiento y el prensado en un solo sistema, usando matrices con hornos incorporados. Esto permite alcanzar temperaturas más altas, usar presiones más bajas y emplear troqueles más ligeros y económicos. Los hornos más comunes incluyen los de gas, por su rapidez y economía, y métodos eléctricos como el calentamiento directo de la matriz mediante corriente o inducción de alta frecuencia. Sin embargo, estos sistemas pueden ser costosos y presentan desafíos técnicos, como el control preciso de la temperatura [22, 23].

## 2.5.3 Calentamiento directo

Uno de los principales desafíos del prensado en caliente es encontrar materiales adecuados para los troqueles que mantengan sus propiedades mecánicas a altas temperaturas. Este problema puede mitigarse calentando solo el material a prensar, no la matriz. Una opción viable es utilizar el propio compacto como fuente de calor, mediante conducción (efecto Joule) o inducción, lo que reduce el consumo energético al no calentar la matriz y permite usar matrices aislantes térmicamente. Para que el calentamiento por inducción sea efectivo, los polvos deben ser conductores, con alta densificación, y las matrices y punzones deben ser cerámicos. Este método es rápido, pero puede ser difícil de controlar debido a problemas con la medición precisa de la temperatura, y los equipos de alta frecuencia son costosos. Otra opción es el calentamiento por resistencia eléctrica, donde una corriente pasa a través del polvo mientras se aplica presión. Sin embargo, los tiempos de procesamiento son tan rápidos que los métodos convencionales para medir temperatura no son aplicables, por lo que las propiedades del material resultante solo se determinan mediante ensayo y error [22,23].

Aunque esta técnica puede parecer una solución atractiva, enfrenta varios desafíos. Primero, la resistencia eléctrica del polvo y el compacto varía significativamente con la densidad y la temperatura, lo que requiere equipos electrónicos sofisticados para controlar la temperatura, aunque esta tecnología ya está bien desarrollada en el campo de la soldadura. Segundo, la distribución de temperatura dentro del compacto puede ser irregular, especialmente debido al enfriamiento provocado por la pared de la matriz. Además, la distribución de la corriente en el compacto es extremadamente compleja, a menos que el compacto tenga una forma muy sencilla. Finalmente, a nivel teórico, no existen modelos que describan adecuadamente la evolución de las variables del proceso, lo que impide conocer la distribución precisa de temperaturas dentro del compacto durante el proceso [22,23].

#### 2.5.4 Sinterización por prensado isostático en caliente

El prensado isostático en caliente (HIP) es un proceso de compactación a altas temperaturas bajo presión isostática. Se puede aproximar a este tipo de presión mediante un prensado axial en caliente usando un medio adecuado, como polvo cerámico. Sin embargo, para una presión verdaderamente isostática, se necesita un fluido que transmita la presión en todas las direcciones. En algunos casos, los gases son utilizados para este fin. Para evitar que la presión se escape a través de los poros abiertos del material, se debe sellar los poros, generalmente con una bolsa flexible. A temperaturas altas, se puede usar sinterización sin presión y aplicar gran presión para reducir la porosidad residual [22].

#### 2.5.5 Sinterización por resistencia eléctrica ERS

El proceso ERS se ha utilizado principalmente en el laboratorio para consolidar materiales altamente conductores, como metales puros, en piezas pequeñas. Sin embargo, el desarrollo de máquinas de voltaje medio 40 [V] ha posibilitado la fabricación de piezas más grandes, incluso con materiales de menor conductividad eléctrica, como compuestos y cermets. En el sinterizado por resistencia bajo presión, un tipo de prensado en caliente, se aplican corrientes elevadas a través de un compacto de polvo a bajo voltaje. A diferencia del Hot Pressing convencional, donde la matriz se calienta mediante calentadores externos, en la sinterización por resistencia, el calor se genera directamente a través de los polvos, mientras que la matriz solo actúa como disipador de calor. Por ello, es esencial que los polvos sean conductores tanto térmica como eléctricamente [24,23].

El sinterizado por resistencia se logra cuando una corriente continua o alterna de baja frecuencia atraviesa la mezcla de polvos mientras se aplica presión mecánica. La clave para este proceso es mantener una baja resistencia, que depende de la resistividad del material y de la resistencia de contacto entre las partículas, la cual está influenciada por factores como el tamaño de las partículas, la presión aplicada y la presencia de óxidos en la superficie. Además, para un sinterizado exitoso, la relación entre la longitud y el diámetro del compacto no debe superar la unidad, ya que relaciones mayores dificultan el sinterizado en el centro del material. Debido a que el proceso es ultrarrápido, tanto el tiempo de sinterización como el de enfriamiento son muy breves, en el orden de fracciones de segundo y pocos segundos, respectivamente [24,23].

## 2.5.6 Sinterización por FAST/SPS.

La técnica de sinterización por chispa de plasma (SPS) es una metodología innovadora que utiliza fuerza uniaxial y corriente eléctrica pulsada en condiciones de baja presión atmosférica para lograr una consolidación rápida del polvo. Este método de calentamiento directo permite un rápido calentamiento y enfriamiento, lo que mejora la densificación en comparación con los procesos de difusión que promueven el crecimiento de los granos. Además, conserva las propiedades intrínsecas de los nano polvos en los productos finales densos [1].

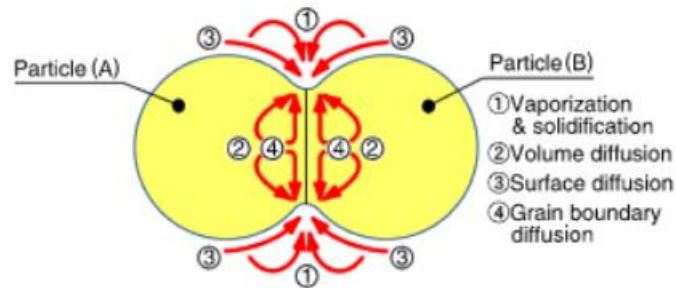


Figura 2.4 Ruta de transferencia de material durante la sinterización [1].

Esta estrategia rápida de sinterización no solo distribuye de manera uniforme la potencia de calentamiento a una escala macroscópica sobre el volumen del compacto de polvo, sino que también lo hace de manera precisa a una escala microscópica, especialmente en los puntos de contacto entre las partículas de polvo como se ve en la figura 2.4. Este enfoque resulta en un comportamiento de sinterización favorable, con reducción del crecimiento de granos y supresión de la descomposición del polvo. Además, algunos autores señalan efectos beneficiosos adicionales en los puntos de contacto según el tipo de polvo [1].

En contraste con los métodos convencionales como la sinterización en caliente (HP), el prensado isostático en caliente (HIP) o los hornos atmosféricos, los sistemas SPS presentan ventajas sustanciales, como facilidad de operación, control preciso de la energía de sinterización, alta velocidad, reproducibilidad, seguridad y confiabilidad. A diferencia de la sinterización en caliente, el proceso SPS se caracteriza por la aplicación directa de corriente eléctrica a través de una fuente de alimentación, generando un calentamiento rápido y eficiente. La velocidad de calentamiento en el proceso SPS depende de factores como la geometría del conjunto contenedor/muestra, propiedades térmicas y eléctricas, así como la fuente de alimentación, permitiendo tasas de hasta 1000 [°C/min]. Esto se traduce en tiempos de procesamiento cortos, típicamente en minutos, dependiendo de factores como el material, las dimensiones y la configuración [1,11].

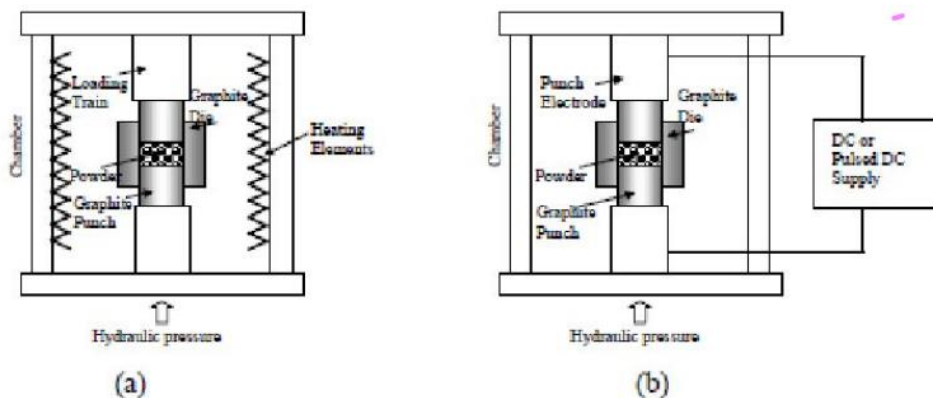


Figura 2.5 Representación esquemática de (a) HP y (b) SPS [1]

En comparación, los métodos convencionales como HP calientan principalmente el contenedor de polvo mediante radiación y convección de gases inertes, lo que resulta en tasas de calentamiento más lentas y procesos prolongados. Además, los procesos SPS se distinguen por el uso eficiente de la entrada de calor, especialmente al emplear polvos eléctricamente aislantes y corriente eléctrica pulsada [2,4,11].

Es fundamental señalar que, en los procesos SPS, los principales retos incluyen asegurar una conductividad eléctrica adecuada de los polvos y lograr una distribución de temperatura uniforme. La intensidad y forma de onda de la corriente eléctrica aplicada varían según las características de la fuente de alimentación. Para obtener una sinterización homogénea, es esencial minimizar los gradientes de temperatura dentro de la muestra, siendo factores clave la conductividad eléctrica del material, el grosor de la pared del dado y la presencia de papeles de grafito [1,4].

La configuración básica de un sistema SPS, como se observa en la figura 2.6, incluye una máquina de sinterización con prensado vertical uniaxial y un mecanismo de energización enfriado por agua. Además, cuenta con una cámara de vacío refrigerada, controles de atmósfera, un generador de pulsos de corriente continua para sinterización y un controlador SPS. Durante la sinterización, los polvos se colocan entre el dado y el punzón en la cámara, sujetos por electrodos. La aplicación de presión y pulsos de energía provoca un rápido aumento de temperatura, logrando la formación de un compacto sinterizado en minutos [1,14].

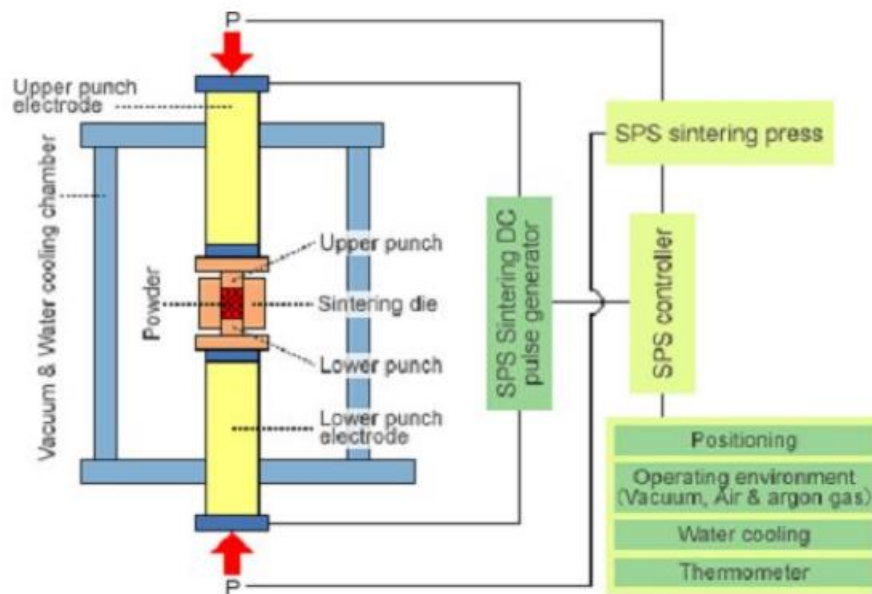


Figura 2.6 Configuración del sistema SPS y cámara de vacío. [1]

La corriente continua pulsante, como su nombre indica, es una corriente que no cambia su dirección, pero sí su magnitud en función del tiempo. Se trata de una corriente del tipo encendido-apagado. Al aplicar esta corriente, se producen tres efectos significativos para la sinterización: la presión por impacto de chispa, el efecto Joule y el efecto de difusión del campo eléctrico. El primero elimina las impurezas en la fase inicial absorbidas por el material y genera calor en la superficie, lo que permite la formación de gradientes de temperatura desde la superficie hacia el centro de las partículas. Este aumento repentino de la temperatura en la superficie facilita la formación de cuellos entre las partículas. Por otro lado, la matriz y la muestra se calientan por el efecto Joule a temperaturas muy elevadas, lo que posibilita una fusión localizada. Dependiendo de las propiedades del material, como el punto de fusión y la conductividad, la corriente recorre principalmente la superficie del material, y mediante este fenómeno, se favorece la formación de cuellos, mejorando la transferencia de masa. Este efecto permite una transferencia de calor más

rápida que otros métodos, como la convección y la difusión. Finalmente, el campo eléctrico provoca la difusión mediante la migración de iones. Es importante señalar que pueden generarse fuertes efectos direccionales debido a los gradientes térmicos generados en la muestra y la dirección de la corriente eléctrica [3].

### 2.5.7 Efectos mecánicos.

La aplicación de tensiones compresivas en procesos FAST/SPS tiene un impacto significativo en la interacción entre partículas, ya que modifica tanto la cantidad como la morfología de los contactos entre ellas. Este proceso no solo refuerza los mecanismos de densificación preexistentes en la sinterización libre, como la difusión en estado sólido, sino que también introduce nuevos mecanismos, como la deformación plástica y el deslizamiento en los límites de grano. Estos mecanismos adicionales son esenciales para lograr una densificación más rápida y uniforme en comparación con los métodos tradicionales de sinterización [2].

Para describir y predecir el comportamiento de los materiales durante estos procesos, se utilizan las ecuaciones de fluencia adaptadas por Coble, mostradas en la ecuación 2.1. Estas ecuaciones modelan la deformación de materiales densos a altas temperaturas, considerando también la naturaleza porosa del cuerpo de sinterización. Aunque este enfoque mecánico continuo simplifica algunos aspectos del comportamiento del material, resulta eficaz para identificar los principales mecanismos operativos en FAST/SPS. Según estas ecuaciones  $\dot{\epsilon}$  es la tasa de fluencia (deformación por unidad de tiempo),  $A$  la constante adimensional dependiente del material,  $\sigma$  el esfuerzo aplicado,  $D_b$  el coeficiente de difusión a lo largo de las fronteras de grano,  $k$  la constante de Boltzmann,  $T$  la temperatura absoluta y  $d$  el tamaño medio de los granos [2,13].

$$\dot{\epsilon} = \frac{A * \sigma * D_b}{k * T * d^3} \quad (2.1)$$

La fluencia de Coble, uno de los mecanismos clave, describe cómo los átomos se redistribuyen a lo largo de las fronteras de grano en respuesta a gradientes de esfuerzo. Este mecanismo es especialmente relevante en materiales con granos pequeños, ya que el mayor porcentaje de fronteras de grano en comparación con el volumen total facilita la densificación. Este fenómeno permite explicar cómo los materiales densifican, predecir su comportamiento mecánico y optimizar la microestructura para aplicaciones específicas [2,13].

A pesar de estos beneficios, la presión mecánica aplicada en FAST/SPS, aunque ayuda a retardar y reducir el crecimiento del grano, no lo elimina completamente. En muchos casos, el tamaño final del grano es varias veces mayor que el tamaño inicial de las partículas, particularmente en nanopartículas aglomeradas. Curiosamente, un tamaño inicial más fino puede conducir a un tamaño de grano final más grande en comparación con partículas más gruesas al alcanzar densidades completas. Por esta razón, es crucial garantizar una uniformidad en la composición del cuerpo verde, incluso cuando se utilizan presiones moderadas [2,11,12].

Aumentar la presión aplicada en el proceso, presenta ventajas significativas. Estas presiones elevadas rompen los aglomerados de polvo, reorganizan las partículas a baja temperatura, mejorando el empaquetamiento y reduciendo el tamaño de los poros. Estas condiciones promueven una densificación más homogénea y limitan el crecimiento de grano. Además, a temperaturas más altas, se activan mecanismos adicionales de densificación, como la fluencia de ley de potencia, ya que la resistencia al crecimiento disminuye con el aumento de la temperatura. Esto permite alcanzar una densificación completa a temperaturas más bajas, minimizando el crecimiento de grano y mejorando las propiedades del material final [2,12].

## 2.5.8 Resistencia mecánica

La fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada, se llama esfuerzo sobre esa sección y se representa con la letra griega  $\sigma$  (sigma). El esfuerzo en un elemento con área transversal  $A$  sometido a una carga axial  $P$  se obtiene, por lo tanto, al dividir la magnitud  $P$  de la carga entre el área  $A$ , mostrado en la ecuación 2.2 [26].

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.2)$$

Se empleará un signo positivo para indicar un esfuerzo de tensión (el elemento a tensión) y un signo negativo para indicar un esfuerzo compresivo (el elemento a compresión) como se ve en la figura 2.7 [26].

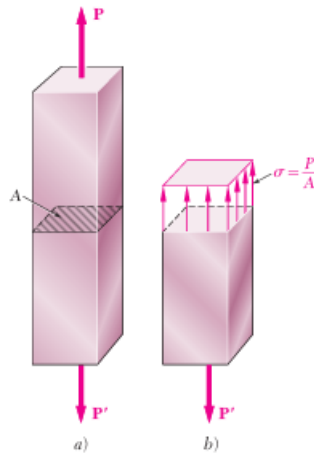


Figura 2.7 Esquema demostrativo del esfuerzo sobre un cuerpo.

Considerando una varilla de longitud  $L$  y sección transversal uniforme y denotando con  $\delta$  deformación bajo una carga axial  $P$ , expresado en la figura 2.8, se definió  $\epsilon$  la deformación unitaria normal en la varilla como la deformación por unidad de longitud, expresado por la ecuación 2.3 [26].

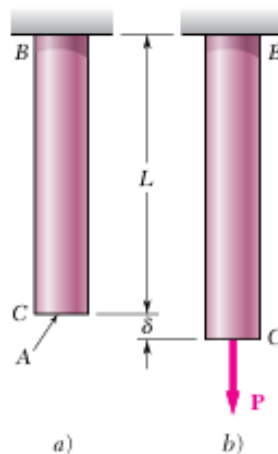


Figura 2.8 a) varilla sin deformación sin carga axial b) deformación de la varilla por una carga axial.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.3)$$

Por otro lado cabe destacar que la matriz de sinterización es sometida principalmente a cargas de compresión axial por lo cual se tiene que verificar si este puede sufrir efectos de pandeo, la carga crítica  $P_{cr}$  vendrá dada por la ecuación, donde  $E$  corresponde al módulo de elasticidad,  $I_{min}$  corresponde al menor momento de inercia de la sección con respecto a un eje centroidal y  $l_e$  corresponde a la longitud efectiva de la columna que para el caso de la matriz se adapta al modelo de ambos extremos fijos o empotrados y que tiene un valor de 0,5 veces el largo de la matriz (distancia entre punzones) [26].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{l_e}{r_{min}}\right)^2} \quad (2.4)$$

### 2.5.9 Efectos térmicos.

Una ventaja clara de FAST/SPS es la capacidad de alcanzar tasas de calentamiento elevadas. Cuando el mecanismo principal de densificación, como la difusión en los límites de grano, tiene una energía de activación superior al mecanismo de envejecimiento, como la difusión superficial, calentar rápidamente a altas temperaturas de sinterización puede resultar beneficioso para mejorar la velocidad de densificación al tiempo que ralentiza el envejecimiento de la microestructura [2,6].

Independientemente del método de sinterización, muestras calentadas rápidamente y que alcanzan casi completa densidad muestran un tamaño de grano final reducido en comparación con aquellas calentadas lentamente, ya que el crecimiento del grano requiere tiempo a altas temperaturas, durante el cual la movilidad de los límites de grano aumenta. Cuanto menos tiempo permanezca el cuerpo de sinterización a la temperatura máxima, más se debería suprimir el envejecimiento. Aunque una tasa de calentamiento más alta no implica necesariamente una modificación del mecanismo de densificación, se demuestra mediante la aplicabilidad del concepto unificador de la Curva Maestra de Sinterización [2,6,10].

La rápida densificación alcanzada por FAST/SPS también puede disminuir la interacción entre el material de sinterización y la herramienta de grafito. Además, en FAST/SPS, los efectos térmicos adicionales se relacionan con gradientes de temperatura locales elevados o distribución no uniforme de la temperatura, así como campos de temperatura macroscópicos que generan tensiones térmicas. Los gradientes de temperatura en la muestra se pueden evaluar mediante modelado de elementos finitos. Estos gradientes térmicos microscópicos proporcionan una fuerza adicional para la difusión, conocida como difusión térmica Ludwig–Soret, o incluso pueden inducir la fusión local. No obstante, la acumulación de tales gradientes térmicos locales depende en gran medida de las propiedades físicas y del tamaño de las partículas y los límites de grano [2,8,9].

## 2.5.10 Mecanismo de transferencia de calor.

La transferencia de calor ocurre cuando se presenta un gradiente de temperatura, la energía térmica fluye del lugar con mayor temperatura a la de menor, existen tres mecanismos de transferencia de calor; la conducción, la convección y la radiación. La primera corresponde a la transferencia de energía de una partícula adyacente a otra, el cual corresponde a un efecto difusivo y se presente en solidos líquidos y gases en contacto. La segunda corresponde a una transferencia de calor de solido a un fluido, el cual presenta un movimiento relativo de uno respecto al otro. Por último, está la radiación que corresponde a la energía emitida por ondas electromagnéticas, todo cuerpo con temperatura sobre el cero absoluto, cero kelvin, emite radiación, cabe destacar que este mecanismo no requiere de un medio para interactuar entre dos materiales distantes, la transferencia de calor por consiguiente puede ser un efecto combinado de los tres mecanismos anteriores, los cuales se describen mediante las siguientes ecuaciones [29,28]:

$$\dot{Q}_{conducción} = kA_s \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

$$\dot{Q}_{convección} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

$$\dot{Q}_{radiación} = \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.7)$$

Donde  $k$  corresponde a la conductividad térmica del material,  $A_s$ ; al área superficial del material,  $x$ ; a la distancia entre las superficies a comparar,  $h$ ; coeficiente de transferencia de calor por convección,  $T_s$ ; temperatura de la superficie sólida,  $T_\infty$ ; temperatura presente en el fluido de forma global o alejada de la zona de contacto con la superficie,  $\sigma$ ; la constante de Stefan-Boltzmann y  $\varepsilon$ ; emisividad de la superficie [29,28].

## 2.5.11 Efectos eléctricos

Si se procesa un polvo metálico, con buena conductividad eléctrica mediante FAST/SPS, las corrientes eléctricas elevadas circulan directamente a través del cuerpo verde en lugar de hacerlo a través de las herramientas circundantes. En esta situación, las posibles interacciones entre la corriente eléctrica y la formación de microestructuras durante la sinterización son pertinentes. Estas interacciones incluyen: los efectos de percolación de la corriente en el lecho de polvo inicialmente poroso, el efecto Peltier en la interfaz entre el cuerpo verde y los punzones, reacciones electroquímicas en las interfaces y la electromigración [2,5,6].

El calentamiento Joule, fundamental para el proceso FAST/SPS, tiene lugar a lo largo de las trayectorias de corriente de percolación. Se generan puntos calientes fluctuantes dentro de la red de percolación debido a que la materia ofrece cierta resistencia al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor, como se observa en la figura 2.9. La temperatura en estos puntos calientes puede superar considerablemente la temperatura promedio del proceso, dando lugar a mecanismos de formación de microestructuras que difieren de los escenarios estándar de sinterización, como la fusión parcial y la recristalización [2,7].

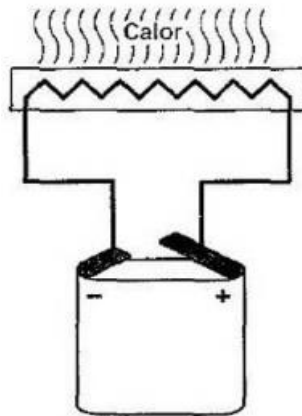


Figura 2.9 Esquema del calentamiento por efecto Joule. [2]

Otro efecto directo de la corriente eléctrica que atraviesa la muestra es el efecto Peltier. El calentamiento o enfriamiento de Peltier ocurre cuando una corriente eléctrica ( $I$ ) fluye a través de la interfaz de un material debido a la discontinuidad de los coeficientes de Peltier ( $P$ ) de los dos materiales en contacto, como se observa en la figura 2.10. Este fenómeno se produce porque los electrones transportan diferentes cantidades de calor dentro de los dos materiales, según los coeficientes de Peltier específicos. La cantidad de calor entregada ( $Q$ ) a la interfaz es directamente proporcional a la corriente. En FAST/SPS, se suelen utilizar densidades de corriente elevadas, del orden de varios  $\text{kA}/\text{cm}^2$ . Si se procesa un polvo metálico, la diferencia de coeficientes de Peltier entre el cuerpo verde y los electrodos es pequeña y generalmente se puede pasar por alto [2,6].

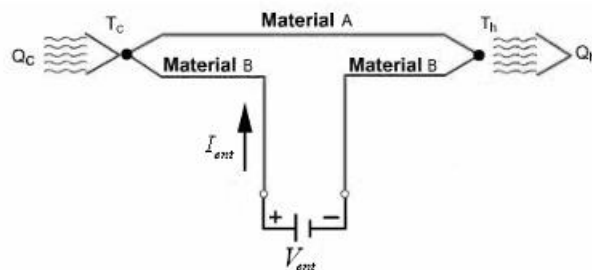


Figura 2.10 Esquema del efecto Peltier [39]

A diferencia del calentamiento Joule, el efecto Peltier depende de la dirección de la corriente. Por ejemplo, el ánodo se calentará adicionalmente si los electrones son los portadores mayoritarios de carga en el semiconductor. El ánodo se enfriará si los electrones defectuosos (huecos) son los portadores mayoritarios de carga. Especialmente cuando el control de la temperatura se realiza mediante un pirómetro cerca del ánodo, el efecto Peltier descrito sesga significativamente la medición de temperatura y el control del proceso. Esta distribución anisotrópica del calor podría evitarse aplicando una corriente alterna (CA) en lugar de una corriente continua (CC) o mediante una coincidencia precisa de los coeficientes de Peltier de los electrodos y los materiales de la muestra [2,4,5].

### 2.5.12 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica  $R$ , para el caso de los materiales óhmicos como el grafito, corresponde al cociente entre la variación de un potencial eléctrico y la corriente que lo atraviesa, si consideramos la resistividad eléctrica  $\rho_e$ , del material la cual corresponde al recíproco de la conductividad, siendo esta una propiedad del material y que cuantifica la permeabilidad de flujo de corriente a través de este, para una figura de área transversal constante  $A_t$ , como el caso de un cilindro sólido, hueco o cualquier prisma rectangular de largo  $L$  [25].

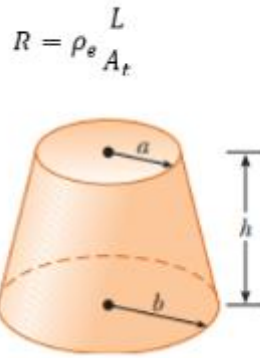


Figura 2.11 Geometría de un cono truncado [25]

Para una pieza cónica como se observa en la 2.11, tal como lo es la parte superior del adaptador y siguiendo los parámetros geométricos de la figura, su resistencia eléctrica viene dada por la ecuación 2.8 [25].

$$R = \frac{\rho_e h}{\pi ab} \quad (2.8)$$

La resistencia eléctrica de una matriz de sinterización, resulta de la descomposición en distintas geometrías, la combinación y superposición de las relaciones mostradas anteriormente, para encontrar la resistencia total es necesario además encontrar la relación entre estas resistencias, si la corriente que atraviesa a las piezas es constante se puede establecer una resistencia equivalente, mediante las resistencia conectadas en serie, para el caso en que el potencial eléctrico sea idéntico entre los puntos de contacto, la disposición entre las resistencia es en paralelo, la ecuación para cada caso se describe a continuación [25]:

$$R_{equivalente,serie} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{R_{equivalente,paralelo}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (2.10)$$

La potencia eléctrica consumida de forma interna por el material se conoce como calentamiento joule y viene dada por la ecuación, donde  $I$  corresponde a la corriente eléctrica que atraviesa por el material [25].

$$P_{intera} = I^2 R \quad (2.11)$$

## 2.6 Materiales utilizados para las matrices.

Las matrices utilizadas en el proceso FAST/SPS deben soportar altas temperaturas, presiones intensas y rápidas tasas de transferencia de calor. El grafito de alta densidad es el material más utilizado debido a su excelente conductividad térmica, estabilidad dimensional, y resistencia a altas temperaturas. Otros materiales, como aceros y aleaciones refractarias, se emplean en casos específicos, dependiendo de las condiciones operativas y las características del material a sinterizar [32].

### 2.6.1 Grafito

El grafito está compuesto por átomos de carbono que se disponen en capas paralelas apiladas unas sobre otras. Cada átomo de carbono se enlaza con otros tres. Esta disposición provoca una interacción débil entre las capas, lo que resulta en una menor dureza en comparación con otros. El grafito es un material blando, de color grisáceo y con capacidad para conducir electricidad. Sus propiedades estructurales pueden analizarse experimentalmente mediante difracción de rayos X o mediante métodos teóricos como la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) [16].

El grafito se puede entender como un conjunto de láminas de grafeno apiladas de manera paralela y unidas por fuerzas de Van der Waals. Tal como se observa en la figura 2.12, existen dos formas principales de apilamiento en el grafito: el hexagonal tipo Bernal y el romboédrico, siendo el primero el más común y estable desde el punto de vista termodinámico [17].

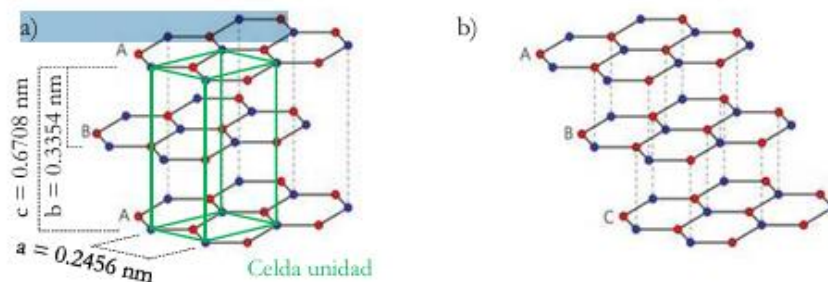


Figura 2.12 Estructura del grafito: a) hexagonal tipo Bernal (ABA) y b) romboédrico (ABC) [17]

El grafito se utiliza principalmente en las matrices del sistema FAST/SPS debido a su estabilidad a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y su capacidad para soportar las altas cargas eléctricas generadas durante el proceso. Además, el grafito minimiza el desgaste de las matrices, permitiendo un ciclo de vida más largo en aplicaciones de producción repetida. También se usa en combinación con otros materiales para evitar la formación de reacciones químicas no deseadas durante la sinterización. Esto lo convierte en un material ideal para la fabricación de componentes en aplicaciones de alta temperatura y precisión, como en la producción de cerámicas avanzadas, compuestos y aleaciones especiales [40].

## 2.6.2 Alúmina

La alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) es un óxido cerámico compuesto principalmente de aluminio y oxígeno. Su composición química es simple, consistiendo en 52.9% de aluminio y 47.1% de oxígeno. Sin embargo, las propiedades de la alúmina pueden variar significativamente dependiendo de la pureza del material y de la presencia de impurezas o aditivos durante su fabricación. Existen varios tipos de alúmina, que incluyen la alúmina alfa ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) y la alúmina gamma ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), mostrado en la figura 2.13, la primera es la forma más estable y de mayor dureza, y la segunda es más reactiva y se utiliza en aplicaciones como catalizadores [44,45].

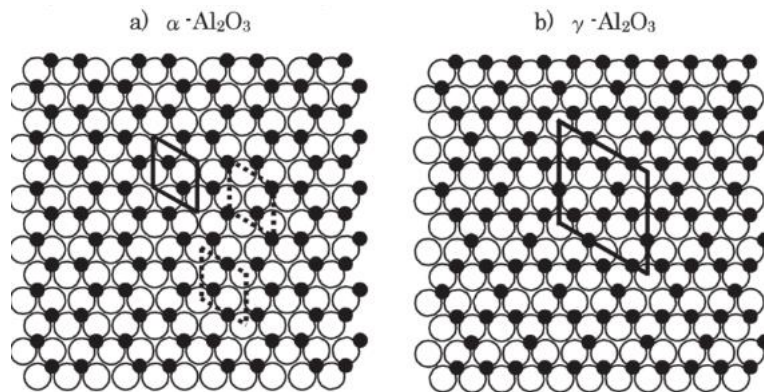


Figura 2.13 a) modelo de estructura de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , b) modelo de estructura de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  [43]

La alúmina es insoluble en agua y resiste la mayoría de los ácidos, lo que le otorga una notable resistencia a la corrosión. A medida que se aumenta su pureza, la alúmina adquiere propiedades superiores de dureza, resistencia al desgaste y resistencia térmica [44,45].

Las características de las matrices de alúmina, es que estas son más resistentes a temperaturas extremadamente altas y tienen buena resistencia a la compresión. Cuando se utilizan matrices cerámicas en el material compuesto, se debe tener en cuenta las diferencias que existen entre el coeficiente de contracción del refuerzo y la matriz, que puede originar rotura de la matriz o mala adhesión entre el refuerzo y la matriz [44,45].

## 2.6.3 Carburo de silicio.

El carburo de silicio ( $\text{SiC}$ ) se presenta en diversas formas cristalinas polimórficas, comúnmente clasificadas como  $\beta\text{-SiC}$  para la estructura cúbica y  $\alpha\text{-SiC}$  para las variedades hexagonales y romboédricas. La forma alfa es la más estable a temperaturas superiores a 2000  $^{\circ}\text{C}$ , mientras que el  $\beta\text{-SiC}$  cúbico es el tipo más comúnmente producido a temperaturas más bajas. Su estructura es similar a la del diamante; si en su red cristalina cúbica se sustituye uno de cada dos átomos por silicio, se obtiene la estructura de esfalerita del  $\text{SiC}$ . Este material, al igual que el diamante, es uno de los más duros conocidos, lo que refleja su semejanza estructural. La figura 2.14 ilustra la disposición cristalina del  $\text{SiC}$  [21].

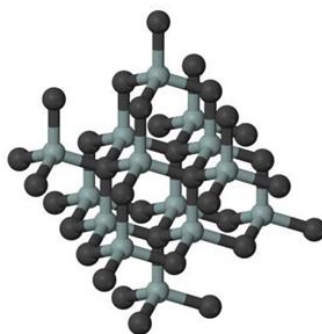


Figura 2.14 Estructura cristalográfica del SiC. [21]

Gracias a su alta dureza, bajo coeficiente de expansión térmica, rigidez, conductividad térmica y resistencia a la oxidación, el carburo de silicio (SiC) tiene una amplia gama de aplicaciones [21].

El carburo de silicio (SiC) es un material cerámico ideal para sistemas de sinterización por plasma de chispa (FAST/SPS) debido a su alta dureza, resistencia al desgaste, excelente conductividad térmica y estabilidad química. Estas propiedades lo hacen adecuado para aplicaciones en condiciones extremas, como herramientas de corte, componentes de maquinaria y piezas aeroespaciales, donde se requieren materiales con alta resistencia y durabilidad [42].

En FAST/SPS, el SiC permite la fabricación de piezas con una microestructura homogénea, resistiendo temperaturas elevadas sin perder propiedades mecánicas. Su baja expansión térmica también asegura la precisión dimensional de las piezas durante el proceso de sinterización. Además, su resistencia a la corrosión lo hace ideal para ambientes industriales agresivos y sistemas que operan a altas temperaturas, como en la industria automotriz, aeroespacial y nuclear [42].

#### 2.6.4 Carburo de tungsteno

El carburo de tungsteno (WC) destaca por su notable dureza, alcanzando aproximadamente 2200 [HV], y por su elevada temperatura de fusión, cercana a los 2800 [°C]. Además, posee un módulo de elasticidad excepcionalmente alto, alrededor de 700 [GPa], lo que lo sitúa como uno de los materiales más rígidos, solo superado por el diamante. En términos de conductividad térmica, exhibe un valor de 1.2 [J/cm·s·K], lo que lo convierte en un material con excelentes propiedades térmicas y mecánicas [18].

El carburo de tungsteno es un material utilizado principalmente en herramientas de corte debido a su estabilidad termodinámica, alta dureza, resistencia al desgaste y excelente conductividad térmica. Se produce mediante la reducción del óxido de tungsteno y su carbonización a altas temperaturas (1400-1500 [°C]). Sus propiedades dependen de factores como la composición química, el tamaño y distribución de los granos, el contenido de carbono y los métodos de fabricación (compactación y sinterización). Para un rendimiento óptimo, es crucial mantener baja porosidad, uniformidad en el tamaño de grano y un equilibrio estequiométrico de carbono en su estructura [19].

El carburo de tungsteno es ampliamente utilizado en matrices de FAST/SPS debido a sus propiedades excepcionales, que incluyen alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad térmica. Estos atributos hacen que el WC sea una opción ideal para aplicaciones industriales que requieren materiales con características mecánicas superiores. En el contexto de la sinterización por plasma de chispa (SPS), el carburo de tungsteno permite la fabricación de piezas con una microestructura fina y homogénea, lo que a su vez mejora la resistencia al desgaste y la durabilidad de los

componentes fabricados. Este proceso también permite obtener materiales con propiedades optimizadas a temperaturas relativamente bajas y tiempos de procesamiento cortos, lo que resulta en una mayor eficiencia y menor costo de producción en comparación con los métodos convencionales [27].

Una de las aplicaciones más destacadas del WC en matrices de FAST/SPS es la mejora de la resistencia al desgaste en componentes que operan en condiciones extremas, como herramientas de corte, piezas de maquinaria industrial y componentes de la industria aeroespacial. La alta dureza del WC le otorga una ventaja significativa en estos entornos, donde los materiales deben soportar abrasión, fricción y desgaste prolongado. Además, el carburo de tungsteno se utiliza en la fabricación de componentes que requieren una alta dureza, como herramientas de perforación y piezas de contacto que enfrentan presiones y temperaturas elevadas. Al incorporar WC en matrices de FAST/SPS, se logra un aumento significativo de la vida útil de las piezas sin sacrificar otras propiedades mecánicas [27].

# Capítulo 3 Metodología.

## 3.1 Introducción

En este capítulo se detalla el desarrollo metodológico llevado a cabo para abordar el diseño propuesto. El proceso para llegar al diseño final sigue una secuencia estructurada que comienza con la identificación del problema, donde se define claramente la necesidad o desafío a resolver. Luego, se pasa a la definición de requisitos, estableciendo los criterios técnicos y funcionales que guiarán el diseño. Posteriormente, se realiza un análisis e investigación para profundizar en el contexto, explorar soluciones existentes y entender a los usuarios objetivo. Con esta base, se inicia la generación de ideas, buscando propuestas creativas y viables. Estas ideas se concretan en un diseño conceptual, representado mediante bocetos, diagramas o modelos iniciales. Finalmente, se desarrolla el prototipado, materializando el concepto en un modelo que permita pruebas y validaciones antes de llegar al diseño final. Mostrado en la figura 3.1



Figura 3.1 Diagrama de proceso de la metodología a seguir

## 3.2 Antecedentes

La fabricación de anillos de alta densidad es fundamental en la industria mecánica debido a su capacidad para soportar altas cargas y resistir condiciones extremas. Estos componentes son esenciales en aplicaciones como maquinaria de precisión, motores de alta eficiencia y sistemas que requieren una transferencia uniforme de fuerzas o momentos. Su alta densidad no solo mejora la resistencia estructural, sino que también incrementa la estabilidad térmica, crucial para entornos con variaciones de temperatura significativas o altas temperaturas operativas. Además, los anillos de alta densidad permiten diseñar elementos más compactos y duraderos, lo que resulta clave en la creación de componentes avanzados y complejos que optimicen el rendimiento y la vida útil de los equipos mecánicos.

## 3.3 Necesidades del cliente

Para garantizar que las necesidades del cliente fueran plenamente comprendidas y atendidas, se llevó a cabo un análisis detallado que permitió identificar los requerimientos esenciales. A partir de este análisis, se diseñó una lista de atributos clave que la matriz debe presentar. Esta lista sirve como guía para asegurar que cada aspecto relevante sea considerado y que se cumplan los estándares de calidad, funcionalidad y desempeño esperados. Este enfoque estructurado permite no solo satisfacer las expectativas del cliente, sino también alinear las características de la matriz con los objetivos específicos, optimizando la experiencia final y fomentando una relación de confianza a largo plazo.

### 3.3.1 Lista categorizada.

Para elaborar la lista categorizada, es necesario identificar todos los atributos provenientes de la lista inicial y clasificarlos en objetivos, restricciones y funciones que debe cumplir la matriz a diseñar. Esta identificación permite organizar los elementos de manera lógica y enfocada, estableciendo prioridades claras para el diseño y la fabricación.

Además, una vez definidos los objetivos, restricciones y funciones, se agrupan en familias clave que abordan distintos aspectos fundamentales del diseño y fabricación del anillo. Estas familias incluyen:

1. Materiales y propiedades mecánicas: Para garantizar la resistencia, durabilidad y compatibilidad del diseño.
2. Procesos y parámetros de sinterización: Para optimizar las condiciones de fabricación y asegurar la calidad del producto final.
3. Geometría y precisión dimensional: Para cumplir con las especificaciones técnicas requeridas y garantizar un ajuste adecuado.
4. Costos y eficiencia operacional: Para lograr un balance entre viabilidad económica y eficiencia en el proceso de producción.

Este enfoque estructurado facilita la toma de decisiones durante el diseño y asegura que se consideren todos los aspectos relevantes para el éxito del proyecto.

### 3.3.2 Tabla de pesos

Obteniendo la definición de los objetivos provenientes de la lista de atributos y de categorización de estos en grupos familiares, se elaboran las tablas de peso para los objetivos. Estas tablas son fundamentales, ya que permiten asignar una jerarquía de importancia a cada objetivo, destacando aquellos que resultan más relevantes para el diseño de la matriz destinada a la fabricación de anillos.

Realizar una tabla de pesos es importante porque facilita la priorización de los objetivos de acuerdo con su impacto en el desempeño y la calidad del producto final. Este enfoque permite identificar claramente los aspectos clave que deben optimizarse en el diseño, como la uniformidad en la distribución de presión y temperatura, la resistencia estructural de los materiales, y la precisión dimensional.

Al ponderar los objetivos, se logra un análisis más estructurado y efectivo, que guía la toma de decisiones hacia un diseño que cumpla de manera integral con las necesidades del proceso de sinterización, maximizando la eficiencia y la confiabilidad del sistema.

Al asignar los valores de peso a cada objetivo, se estableció una escala que va de 0.1 a 5, donde un peso de 5 indica el nivel más alto de importancia y un valor de 0.1 representa el nivel más bajo. Esta ponderación permite diferenciar claramente la relevancia de cada criterio dentro del proceso de selección y optimización del material para el diseño propuesto.

### 3.3.3 Lista jerárquica

La lista jerárquica se desarrolló a partir de un proceso de agrupación estructurada, en el cual se organizaron todos los objetivos, restricciones y funciones de la matriz en sus respectivas familias clave. Este método permitió una clasificación ordenada y lógica, asegurando que cada elemento se alineara con un aspecto fundamental del diseño y la fabricación.

Adicionalmente, los objetivos fueron evaluados individualmente para determinar su nivel de relevancia en relación con el cumplimiento de los requisitos generales del proyecto. A partir de esta evaluación, se asignó un valor relativo a cada objetivo, como se mencionó en el inciso 3.3.2, lo que facilitó su organización jerárquica según su grado de importancia. De este modo, la lista no solo integra todos los aspectos esenciales, sino que también prioriza aquellos que tienen un mayor impacto en el desempeño y la funcionalidad de la matriz.

### 3.4 Análisis funcional

En el contexto de esta tesis, se realizará un análisis funcional detallado para el diseño de una matriz destinada a la fabricación de un anillo mediante el proceso de sinterización por chispa de plasma (SPS). Este análisis es clave para garantizar que la matriz cumpla con todos los requerimientos técnicos, desde la precisión geométrica hasta el control de la microestructura del material sinterizado.

El objetivo del análisis funcional es identificar las relaciones entre las funciones primarias, que definen el propósito del sistema, y las funciones secundarias, que aseguran que el proceso sea eficiente, seguro y económico. A través de este enfoque, es posible desarrollar un diseño que optimice no solo la calidad del producto final, sino también la eficiencia operativa del proceso de fabricación. Para llevar a cabo este análisis funcional, se emplean tres métodos de identificación de funciones: el árbol de funciones, la caja transparente y la caja negra. Estos enfoques son esenciales para desglosar y analizar de manera detallada las funciones del diseño, los cuales son el árbol de funciones, la caja negra y caja transparente, esto con la finalidad de facilitar la identificación de posibles mejoras en el diseño, minimiza el riesgo de defectos y asegura que todos los factores, como la geometría del anillo, los materiales utilizados, la energía eléctrica, la presión aplicada, y la extracción de la pieza.

#### 3.4.1 Árbol de funciones

El diseño y fabricación de componentes sinterizados, como los anillos de alta densidad, requieren una comprensión detallada de las variables que intervienen en el proceso. Un enfoque integral para analizar estas variables es el desarrollo de un árbol de funciones, que descompone el proceso en áreas clave, conectando los elementos esenciales con sus funciones específicas. Este enfoque asegura un control preciso de cada etapa, optimizando la calidad y el desempeño del producto final.

#### 3.4.2 Caja negra

Se aplica el análisis de caja negra al proceso de sinterización por chispa de plasma (SPS) utilizado para la fabricación de un anillo. Este enfoque permite evaluar el sistema de manera global, destacando las transformaciones que ocurren sin necesidad de detallar las operaciones internas. Mostrando todas las entradas y salidas (energía, materiales y señales) conectadas con la función principal del sistema.

#### 3.4.3 Caja transparente

La caja transparente continua con lo realizado en la caja negra ubicando las funciones para entender el funcionamiento de la máquina. Este enfoque es fundamental para optimizar el diseño de la matriz y el proceso de fabricación, ya que permite identificar posibles fuentes de ineficiencia o defectos, como una distribución desigual de la temperatura o presión, que podrían afectar la calidad del producto final. Además, el análisis de caja transparente facilita el control de la microestructura del material sinterizado, garantizando que el anillo resultante tenga las propiedades mecánicas, dimensionales y estructurales esperadas.

### 3.5 Casa de la calidad (QFD).

La Casa de la Calidad (Quality Function Deployment - QFD) es clave en el desarrollo de productos que busca traducir las necesidades y expectativas del cliente en requisitos técnicos específicos. Este proceso asegura que las características del producto estén alineadas con las demandas del mercado y se integren eficazmente en el proceso de diseño y fabricación.

Después de la identificación de las necesidades del cliente mencionadas anteriormente, el siguiente paso es definir las características técnicas que el producto debe tener para cumplir con esas necesidades. Estas características se listan en la columna "¿Cómo?" de la Casa de la Calidad. Luego, se establece una relación entre cada necesidad del cliente y cada característica técnica, identificando cómo cada característica contribuye a satisfacer cada necesidad.

A continuación, se construye la matriz de relación, que es el corazón de la Casa de la Calidad. Esta matriz tiene las necesidades del cliente en las filas y las características técnicas en las columnas. En cada intersección, se indica cómo cada característica técnica contribuye a satisfacer cada necesidad. Las relaciones se representan mediante símbolos, como círculos o triángulos, que indican la fuerza de la relación entre las necesidades y las características. Este paso permite visualizar de manera clara cómo se deben priorizar las características técnicas en función de su impacto en las necesidades del cliente.

Otro paso importante es evaluar la competencia, lo que implica analizar cómo los productos de la competencia cumplen con las mismas características técnicas. En la parte derecha de la matriz, se agrega una sección de comparación con los productos competidores. Esto ayuda a identificar las áreas donde el producto a desarrollar puede mejorar frente a las ofertas existentes en el mercado.

Posteriormente, se determinan las prioridades de las características técnicas. Esto se hace asignando un peso a cada característica técnica según su importancia para satisfacer las necesidades del cliente. Donde se utilizan escalas de 1 a 5, donde 5 representa la máxima prioridad. Este paso permite identificar cuáles son las características técnicas que tienen un mayor impacto en el éxito del producto y deben recibir más atención durante el proceso de diseño.

Por último, es crucial analizar las correlaciones entre características técnicas. Esta parte de la matriz permite identificar si hay características que afectan de manera contraproducente entre sí. Las correlaciones se representan en una sección adicional de la matriz, utilizando símbolos que indican la relación entre las características (por ejemplo, "+" para sinergias y "-" para conflictos).

Los requerimientos del diseño se establecieron a partir de un análisis detallado de las cualidades más importantes que debe cumplir el diseño. Dentro de esta categoría se identificaron los siguientes aspectos clave: geometría, diseño, materiales, consumo de energía eléctrica, presión, microestructura y costo. Cada uno de estos elementos fue cuidadosamente evaluado para garantizar que el diseño final cumpla con los estándares de funcionalidad, eficiencia y viabilidad esperados.

### 3.6 Requerimientos del diseño.

Los requerimientos del diseño se establecieron a partir de un análisis detallado de las cualidades más importantes que debe cumplir el diseño. Dentro de esta categoría se identificaron los siguientes aspectos clave: geometría, diseño, materiales, consumo de energía eléctrica, presión, microestructura y costo. Cada uno de estos elementos fue cuidadosamente evaluado para garantizar que el diseño final cumpla con los estándares de funcionalidad, eficiencia y viabilidad esperados.

### 3.7 Elaboración de soluciones conceptuales.

En este apartado se analizan las ideas de productos similares ya existentes en el mercado, abordando cómo funcionan y cómo pueden servir como base para generar posibles ideas para el diseño. Además, en esta sección se elabora una carta morfológica de soluciones potenciales, que contribuyan a la formación del concepto para el diseño a desarrollar.

#### 3.7.1 Búsqueda externa.

En esta sección se realiza una búsqueda de patentes, diseños y productos similares a la idea inicial del producto, para posteriori realizar un análisis detallado de estos, evaluando cómo funcionan y qué características presentan. Este análisis tiene como objetivo identificar elementos clave que puedan inspirar posibles ideas para el diseño del nuevo producto. Se estudian las soluciones actuales para entender sus ventajas y limitaciones, lo que permite generar propuestas innovadoras que mejoren o complementen las opciones existentes.

#### 3.7.2 Carta morfológica.

Se desarrolla una carta morfológica, una herramienta estructurada que recopila y organiza diversas soluciones potenciales a los diferentes aspectos del diseño. Esta carta ayuda a visualizar las posibles combinaciones de características y funciones, proporcionando un marco para armar y afinar el concepto del diseño que se va a desarrollar. De esta manera, se facilita la generación de ideas y se optimiza el proceso de toma de decisiones para llegar a una solución final adecuada.

#### 3.7.3 Generación de conceptos

Para la generación del concepto, se tomaron como referencia las ideas presentadas en la carta morfológica, las cuales fueron previamente analizadas y organizadas. A partir de estas ideas, se diseñaron tres conceptos diferentes, cada uno con características únicas, pero basados en las soluciones identificadas en la carta. El objetivo de esta etapa fue combinar de manera innovadora las ideas previas, asegurando que cada uno de los conceptos desarrollados cumpliera con los objetivos y funciones previamente establecidos. De esta forma, se buscaron opciones que no solo fueran funcionales y viables, sino que también respondieran a los requisitos del proyecto, considerando todos los aspectos técnicos, operacionales y económicos relevantes.

### 3.8 Selección de concepto

Para llevar a cabo la selección del concepto a utilizar, se consideró el peso asignado a cada objetivo descrito en el inciso 3.3.2. A cada concepto se le asignó un rango de importancia, donde el valor 1 representa el nivel más bajo de relevancia y el valor 5 indica el nivel más alto. Eso multiplicado por el peso asignado nos da un peso ponderado que al ser sumado nos un total específico a cada concepto planteado, y para elegir el concepto que se desarrollara más adelante es analizar cuál de los totales específicos es mayor, viéndolo que al tener mayor valor en el resultado tendrá más influencia en el desarrollo de los objetivos a cumplir para el diseño.

### 3.9 Diseño básico

Para desarrollar el diseño básico, en primer lugar, se elaboró una arquitectura del producto, la cual consiste en agrupar en módulos las subfunciones de los elementos del sistema representado en la caja transparente. Los criterios específicos utilizados para realizar esta agrupación incluyen la integración geométrica, la función compartida, la similitud tecnológica, la localización del cambio, entre otros. A partir de esta estructura, se procedió a analizar el

funcionamiento de la matriz, para comprender cómo interactúan las partes del sistema para cumplir los objetivos y facilitar la identificación de problemas. A partir de este análisis del funcionamiento, se procedió a identificar las partes necesarias, asegurando que cada componente esté alineado con el planteamiento de la matriz.

### 3.10 Análisis estructural.

Para realizar el análisis estructural del sistema, se llevaron a cabo tres enfoques principales: análisis mecánico, análisis de resistencia eléctrica y análisis de transferencia de calor. Cada uno de estos enfoques permitió evaluar diferentes aspectos del comportamiento del sistema bajo las condiciones de operación.

#### 3.10.1 Análisis mecánico.

En el análisis mecánico, el objetivo principal fue identificar los elementos críticos del sistema. En este caso, se analizaron la muestra a compactar y la camisa intermedia, ya que son los componentes más sensibles a las condiciones de trabajo. Para realizar los cálculos necesarios, fue importante asumir ciertas condiciones relacionadas con presiones, materiales y otros parámetros, que se describen a continuación.

En primer lugar, se evaluó la presión aplicada sobre la muestra, que fue asumida en 50 [MPa]. Con base en este valor, se calculó la fuerza necesaria para alcanzar dicha presión en la muestra. Posteriormente, se analizó cómo la presión radial generada por la muestra afecta a los componentes circundantes, incluyendo la camisa intermedia, la camisa exterior y la guía. Además, se estudió el efecto de la presión axial sobre los punzones (superior e inferior) y los adaptadores (superior e inferior), considerando su impacto en la estabilidad del sistema. Los resultados detallados de este análisis se encuentran en la sección 7.3 del anexo.

#### 3.10.2 Análisis resistencia eléctrica.

Para el análisis de resistencia eléctrica, también fue necesario asumir ciertas propiedades de los materiales. Los componentes de la matriz se consideraron fabricados de grafito, mientras que la muestra fue asumida de renio. En este análisis, se calculó inicialmente la resistencia eléctrica de las piezas que conforman la matriz, considerando sus masas y volúmenes, y luego se realizó un cálculo similar para la muestra.

Con los valores de resistencia eléctrica obtenidos, se determinó la corriente eléctrica necesaria para el sistema. Este cálculo se basó en la resistencia total de las piezas, la potencia del sistema y las condiciones de trabajo asumidas: un tiempo de sinterización de diez minutos y una temperatura de 2400 [°C]. Los resultados completos de este análisis se presentan en la sección 7.3 del anexo.

#### 3.10.3 Transferencia de calor

En el análisis de transferencia de calor, se estudió cómo el calor irradiado por la muestra afecta a los componentes más cercanos del sistema. Se calculó la transferencia de calor por conductividad hacia la camisa intermedia, la guía y los punzones (superior e inferior), que son los elementos más expuestos a las altas temperaturas debido a su proximidad con la muestra. Este análisis permitió identificar los componentes más afectados térmicamente y evaluar su comportamiento bajo las condiciones de trabajo establecidas. Los detalles de este análisis se encuentran en la sección 7.3 del anexo.

### 3.11 Diseño al detalle

Para el diseño en detalle, en primera instancia se analizaron los posibles materiales de los que podría estar compuesta la matriz. Entre los materiales considerados como candidatos principales se encuentran el grafito de alta densidad, el carburo de tungsteno (WC), la alúmina ( $Al_2O_3$ ) y el carburo de silicio (SiC). Estos materiales fueron seleccionados debido a su capacidad para operar en las exigentes condiciones del proceso FAST/SPS, cada uno ofreciendo ventajas particulares en términos de resistencia mecánica, conductividad térmica y comportamiento frente a la oxidación.

Una vez definido el material a utilizar, se procedió con la elaboración de los planos. Este proceso incluyó la definición detallada de las geometrías, priorizando la exactitud en las dimensiones y la tolerancia de las piezas, mediante la aplicación Autodesk Inventor Professional 2025, en la cual se modelaron todas las partes para a posteriori ser exportadas a plano. La tolerancia es crucial para asegurar que los componentes encajen correctamente y funcionen de manera eficiente dentro del sistema, evitando posibles fallos durante el ensamblaje o el uso.

Con los planos de cada pieza establecidos, se realizó el análisis de los procesos de manufactura necesarios para fabricar la matriz de sinterización destinada a anillos de alta densidad, con un diámetro exterior de 20 [mm] y diámetro interior de 10 [mm]. Se llevó a cabo una planificación detallada basada en una hoja de procesos, considerando los pasos más importantes para obtener la forma deseada y cumplir con las tolerancias dimensionales y de calidad exigidas. Este análisis permitió definir las etapas críticas del proceso:

- Torneado: Se priorizó como proceso inicial debido a la naturaleza cilíndrica de las piezas, garantizando diámetros precisos y preparando las bases para etapas posteriores. Para componentes especiales, como los adaptadores cónicos, se integró un torneado adicional para lograr las geometrías requeridas.
- Frentado: Se aplicó en las caras superiores e inferiores para garantizar superficies planas y lisas, esenciales para la calidad y el ensamblaje adecuado del conjunto.
- Taladrado: Se utilizó para crear agujeros de diferentes tamaños según las especificaciones funcionales de cada componente, utilizando herramientas de alta precisión para asegurar ajustes correctos.

En el caso de la carcasa intermedia, se integraron los tres procesos, añadiendo un corte final preciso para obtener partes iguales que faciliten la extracción de los anillos sin comprometer la integridad estructural.

### 3.12 Prototipo

El modelado digital del prototipo se realizó utilizando el software Autodesk Inventor Professional 2025, donde se desarrollaron modelos tridimensionales de cada componente de la matriz. El uso de este software permitió analizar detalladamente las dimensiones, ajustes y ensamblajes necesarios para garantizar la correcta integración y funcionamiento del sistema en el proceso FAST/SPS. Una vez completado el modelado 3D, se procedió a la creación de un prototipo físico. Para esta etapa, se utilizó el software SolidWorks como conector entre la máquina de impresión Ender 3 Creality y el modelado 3D realizado en Inventor.

# Capítulo 4 Resultados y análisis.

## 4.1 Introducción.

En este análisis se abordan los diversos aspectos involucrados en el diseño y desarrollo de la matriz para la fabricación de un anillo utilizando el sistema FAST/SPS. Se incluyen los cálculos para la tabla de peso de los objetivos, el análisis funcional de la matriz, la selección de conceptos y la evaluación estructural, que garantizan la viabilidad del diseño. Además, se considera la elección de materiales adecuados basados en sus propiedades mecánicas y térmicas, así como el análisis de los procesos de manufactura para asegurar la factibilidad del diseño. Finalmente, el análisis y presentación del prototipo, validado mediante impresión 3D.

## 4.2 Necesidades del cliente

Para saber cuáles son las necesidades del cliente y especificaciones que debe tener el diseño a elaborar, se realizó un listado de atributos que debe presentar el diseño para cumplir los requerimientos y objetivos más importantes para este.

### 4.2.1 Lista de atributos

- El material utilizado debe ofrecer alta resistencia mecánica a la compresión, alta densidad.
- La matriz debe soportar hasta 1000 ciclos de trabajo.
- Fabricar anillos sinterizados a partir de polvos.
- La porosidad interna del anillo debe ser mínima, ya que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la resistencia del componente final.
- Asegurar una mezcla y distribución homogénea de las partículas de polvo durante el proceso de conformación, para evitar zonas débiles en el anillo.
- El tiempo de procesamiento durante la sinterización deben ser de un mínimo de 10 [min].
- El anillo sinterizado debe tener un diámetro exterior de 20 [mm] y un diámetro interior de 10 [mm].
- Se debe obtener una precisión dimensional adecuada para los diámetros exteriores e interiores
- El material debe soportar temperaturas de hasta 2400 [°C], compatible con el proceso de sinterización por chispa de plasma, y tener propiedades mecánicas avanzadas
- La presión mínima que debe soportar la matriz es de 50 [MPa] para consolidar el material.
- Los materiales y el proceso deben ser rentables, limitando el uso de materiales y técnicas extremadamente costosas.
- Los materiales de la matriz y el polvo sinterizado deben ser compatibles para evitar reacciones indeseadas o adherencias durante el proceso.
- El diseño debe permitir una fácil remoción del anillo sin dañar su estructura una vez completado el proceso de sinterización.
- Permitir la sinterización del polvo de material a alta densidad y resistencia bajo la acción de calor, presión y paso de la corriente eléctrica.
- Dar la forma precisa y final del anillo, manteniendo la integridad de los diámetros interior y exterior durante el proceso de sinterización.
- Garantizar una distribución uniforme de la temperatura y la presión aplicada a través del material en todo el ciclo de sinterización, evitando gradientes térmicos que puedan causar defectos.

- Facilitar la eliminación de espacios vacíos y defectos internos durante el proceso de compactación y sinterización.
- Se debe evitar sobrecargas eléctricas o puntos calientes que puedan comprometer la integridad del material y las dimensiones del anillo.
- La electricidad debe fluir de manera eficiente y controlada a través del material durante el proceso de sinterización por chispa de plasma (SPS).
- El costo máximo de fabricación de la matriz debe ser de \$1.000.000, considerando los costos de los materiales y de energía utilizada

#### 4.2.2 Funciones

A continuación, se exponen los atributos fundamentales que deben identificarse para comprender las funciones principales que guiarán tanto la construcción como el diseño de la matriz de sinterización de anillos. La identificación precisa de estos atributos resulta esencial para garantizar que el diseño de la matriz cumpla con los requisitos específicos del proceso de sinterización. Este enfoque permite evaluar y optimizar las características que deberá presentar la matriz para cumplir con las necesidades establecidas

- Fabricar anillos sinterizados a partir de polvos.
- Asegurar una mezcla y distribución homogénea de las partículas de polvo durante el proceso de conformación, para evitar zonas débiles en el anillo.
- Permitir la sinterización del polvo de material a alta densidad y resistencia bajo la acción de calor, presión y paso de la corriente eléctrica.
- Dar la forma precisa y final del anillo, manteniendo la integridad de los diámetros interior y exterior durante el proceso de sinterización.
- Garantizar una distribución uniforme de la temperatura y la presión aplicada a través del material en todo el ciclo de sinterización, evitando gradientes térmicos que puedan causar defectos.
- Ayudar a desarrollar la microestructura final deseada en el anillo, evitando segregaciones y favoreciendo la formación de una estructura fina y homogénea.
- Facilitar la eliminación de espacios vacíos y defectos internos durante el proceso de compactación y sinterización.

#### 4.2.3 Restricciones

Seguidamente, se presenta una lista de las restricciones que la matriz debe cumplir con el objetivo de alcanzar el producto final deseado. La identificación de estas restricciones no solo permite asegurar que la matriz sea capaz de cumplir con los requerimientos técnicos del proceso, sino que también optimiza el diseño para minimizar defectos en el producto final, mejorar la eficiencia del sistema y garantizar la reproducibilidad de los resultados. Estas consideraciones son esenciales para garantizar que el producto final cumpla con las especificaciones mecánicas y geométricas establecidas, maximizando la calidad y la confiabilidad del anillo sinterizado.

- La matriz debe soportar hasta 1000 ciclos de trabajo.
- El tiempo de procesamiento durante la sinterización deben ser de un mínimo de 10 [min].
- El anillo sinterizado debe tener un diámetro exterior de 20 [mm] y un diámetro interior de 10 [mm].
- El material debe soportar temperaturas de hasta 2400 [°C], compatible con el proceso de sinterización por chispa de plasma, y tener propiedades mecánicas avanzadas
- La presión mínima que debe soportar la matriz es de 50 [MPa] para consolidar el material.

- El costo máximo de fabricación de la matriz debe ser de \$1.000.000, considerando los costos de los materiales y de energía utilizada.

#### 4.2.4 Objetivos

Para finalizar, se destacan las necesidades del cliente mediante la definición de los objetivos que debe cumplir el diseño de la matriz para satisfacer integralmente todos los requerimientos planteados. Estos objetivos están orientados a garantizar un desempeño óptimo en el proceso de sinterización y a lograr un producto final que cumpla con las especificaciones técnicas y funcionales establecidas.

- El material utilizado debe ofrecer alta resistencia mecánica a la compresión, alta densidad.
- La porosidad interna del anillo debe ser mínima, ya que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la resistencia del componente final.
- Se debe obtener una precisión dimensional adecuada para los diámetros exteriores e interiores
- Los materiales y el proceso deben ser rentables, limitando el uso de materiales y técnicas extremadamente costosas.
- Los materiales de la matriz y el polvo sinterizado deben ser compatibles para evitar reacciones indeseadas o adherencias durante el proceso.
- El diseño debe permitir una fácil remoción del anillo sin dañar su estructura una vez completado el proceso de sinterización.
- Se debe evitar sobrecargas eléctricas o puntos calientes que puedan comprometer la integridad del material y las dimensiones del anillo.
- La electricidad debe fluir de manera eficiente y controlada a través del material durante el proceso de sinterización por chispa de plasma (SPS).

#### 4.2.5 Lista categorizada.

Para organizar los objetivos, restricciones y funciones mencionados, se pueden agrupar en cuatro familias clave que aborden distintos aspectos del diseño y fabricación del anillo mediante sinterización por chispa de plasma (SPS). Los cuales son materiales y propiedades mecánicas, procesos y parámetros de sinterización, geometría y precisión dimensional y por último costos y eficiencia operacional.

De estas familias es crucial entender cuál tiene mayor prioridad en la jerarquización de los factores a considerar, es por esto que se elige a materiales y propiedades mecánicas como el factor más importante en la selección de familias debido a que este, debe ser usado en la industria en la que sus propiedades mecánicas son fundamentales para su correcto funcionamiento.

La familia de geometría y precisión dimensional es segunda en el orden de jerarquización de las familias, esto sucede porque en el diseño de la matriz, la cual se refiere a la forma final y las dimensiones exactas del anillo que se desea producir. La precisión en los diámetros exterior e interior es esencial para cumplir con las especificaciones del cliente y para que el anillo funcione correctamente en su aplicación final.

El proceso y parámetros de sinterización son cruciales porque el proceso de sinterización por chispa de plasma (SPS) tiene un impacto directo en la calidad y las propiedades finales del material. Los parámetros de sinterización, como la temperatura, el tiempo, la presión aplicada y la distribución de la corriente eléctrica determinan el grado de consolidación del material en polvo, afectando la densificación y la microestructura

Y por último los costos y eficiencia operacional son crucial para garantizar la viabilidad económica del proceso de fabricación y el producto final. Aunque el rendimiento técnico es esencial, los costos y la eficiencia son igualmente importantes para hacer que la producción sea rentable y competitiva en el mercado.

Ahora se presenta en la tabla 4.1, la categorización de las funciones, restricciones y objetivos dentro de las familias previamente mencionadas. Esta organización tiene como finalidad facilitar la comprensión y análisis de los atributos descritos, permitiendo valorar su impacto dentro de cada familia correspondiente.

Tabla 4.1 Tabla de categorización en familias de funciones, restricciones y objetivos.

<b>Materiales y propiedades mecánicas</b>	<b>Geometría y precisión dimensional</b>	<b>Procesos y parámetros de sinterización</b>	<b>Costos y eficiencia operacional</b>
<b>Funciones</b>			
Permitir la sinterización del polvo de material a alta densidad y resistencia bajo la acción de calor, presión y paso de la corriente eléctrica.	Dar la forma precisa y final del anillo, manteniendo la integridad de los diámetros interior y exterior durante el proceso de sinterización.	Garantizar una distribución uniforme de la temperatura y la presión aplicada a través del material en todo el ciclo de sinterización, evitando gradientes térmicos que puedan causar defectos.	Asegurar una mezcla y distribución homogénea de las partículas de polvo durante el proceso de conformación, para evitar zonas débiles en el anillo
.	Facilitar la eliminación de espacios vacíos y defectos internos durante el proceso de compactación y sinterización.	Fabricar anillos sinterizados a partir de polvos.	
<b>Restricciones</b>			
La matriz debe soportar hasta 1000 ciclos de trabajo.	El anillo sinterizado debe tener un diámetro exterior de 20 [mm] y un diámetro interior de 10 [mm].	El tiempo de procesamiento durante la sinterización deben ser de un mínimo de 10 [min].	El costo máximo de fabricación de la matriz debe ser de \$1.000.000, considerando los costos de los materiales y energías.
El material debe soportar temperaturas de hasta 2400 [°C], compatible con el proceso de sinterización por chispa de plasma, y tener propiedades mecánicas avanzadas			
La presión mínima que debe soportar la matriz es de 50 [MPa] para consolidar el material.			
<b>Objetivos</b>			
El material utilizado debe ofrecer alta resistencia mecánica a la compresión, alta densidad.	Se debe obtener una precisión dimensional adecuada para los diámetros exteriores e interiores.	La electricidad debe fluir de manera eficiente y controlada a través del material durante el proceso de sinterización por chispa de plasma.	Los materiales y el proceso deben ser rentables, limitando el uso de materiales y técnicas extremadamente costosas.
Los materiales de la matriz y el polvo sinterizado deben ser compatibles para evitar reacciones indeseadas o adherencias durante el proceso	El diseño debe permitir una fácil remoción del anillo sin dañar su estructura una vez completado el proceso de sinterización.	La porosidad interna del anillo debe ser mínima, ya que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la resistencia del componente final.	
	Se debe evitar sobrecargas eléctricas o puntos calientes que puedan comprometer la integridad del material y las dimensiones del anillo.		

Esta categorización no solo ayuda a establecer un marco claro para evaluar la relación entre las características del diseño y las necesidades específicas del sistema, sino que también permite priorizar los aspectos clave que deben ser considerados para garantizar el cumplimiento de los requisitos funcionales, estructurales y operativos. De esta manera, se busca integrar de forma efectiva los atributos definidos con las familias asociadas, optimizando el desarrollo y desempeño de la matriz de sinterización.

#### 4.2.6 Tabla de pesos.

Los objetivos definidos en la sección 4.2.4 son fundamentales para establecer el enfoque principal del diseño y cumplir con los requisitos iniciales. Como se muestra en la tabla 4.2, los aspectos más relevantes incluyen garantizar una precisión dimensional adecuada en los diámetros exteriores e interiores con un valor de 2,38, este objetivo asegura el correcto ensamblaje y funcionalidad del anillo sin necesidad de ajustes posteriores. Además, otro objetivo a considerar es que el material utilizado posea alta resistencia mecánica a la compresión y alta densidad, con un valor de 1,52, características esenciales para soportar cargas elevadas y garantizar la durabilidad del componente. Por último, el objetivo de la porosidad interna del anillo debe ser mínima, ya que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la resistencia del componente final, con un valor de 1,50, se debe cumplir este objetivo para que no afecte negativamente las propiedades mecánicas y comprometa la resistencia y desempeño del anillo. Estos objetivos son los más importantes porque influyen directamente en la calidad, fiabilidad y funcionalidad del producto final.

*Tabla 4.2 Valores de pesos absolutos para jerarquizar los objetivos.*

<b>1. Materiales y propiedades mecánicas</b>	<b>Peso absoluto</b>
1.1 El material utilizado debe ofrecer alta resistencia mecánica a la compresión, alta densidad.	1,52
1.2 Los materiales de la matriz y el polvo sinterizado deben ser compatibles para evitar reacciones indeseadas o adherencias durante el proceso	0,37
<b>2. Geometría y precisión dimensional</b>	<b>Peso absoluto</b>
2.1 Se debe obtener una precisión dimensional adecuada para los diámetros exteriores e interiores.	2,38
2.2 El diseño debe permitir una fácil remoción del anillo sin dañar su estructura una vez completado el proceso de sinterización.	0,74
2.3 Se debe evitar sobrecargas eléctricas o puntos calientes que puedan comprometer la integridad del material y las dimensiones del anillo.	0,20
<b>3. Procesos y parámetros de sinterización</b>	<b>Peso absoluto</b>
3.1 La porosidad interna del anillo debe ser mínima, ya que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la resistencia del componente final.	1,50
3.2 La electricidad debe fluir de manera eficiente y controlada a través del material durante el proceso de sinterización por chispa de plasma (SPS).	0,75
<b>4. Costos y eficiencia operacional</b>	<b>Peso absoluto</b>
4.1 Los materiales y el proceso deben ser rentables, limitando el uso de materiales y técnicas extremadamente costosas.	1

Cabe señalar que el Grupo 2, correspondiente a geometría y precisión dimensional, presenta el objetivo más relevante a considerar durante el desarrollo del diseño final.

### 4.3 Análisis de funciones.

En este análisis se examinan los principales aspectos del proceso de sinterización enfocado en la fabricación de anillos de alta densidad, considerando cuatro divisiones clave: Materiales y propiedades mecánicas, Geometría y precisión dimensional, Procesos y parámetros de sinterización, y Costos y eficiencia operacional. Cada uno de estos componentes juega un papel esencial para alcanzar un producto final con características óptimas, como alta densidad, precisión geométrica y una microestructura homogénea. A través de herramientas conceptuales como el árbol de funciones y los enfoques de caja negra y caja transparente, se detallan las interacciones críticas entre entradas y salidas del sistema, así como las etapas internas del proceso. Este enfoque integral permite optimizar la eficiencia operativa y la calidad del producto, minimizando defectos y asegurando un diseño robusto del proceso de fabricación.

#### 4.3.1 Árbol de funciones.

En este análisis, se abordan cuatro divisiones fundamentales: Materiales y propiedades mecánicas, Geometría y precisión dimensional, Procesos y parámetros de sinterización, y Costos y eficiencia operacional. Cada una de estas divisiones desempeña un rol crítico en el éxito del proceso de sinterización y contribuye al logro de un anillo con características mecánicas superiores, alta precisión geométrica y una microestructura homogénea.

Este árbol de funciones que se presenta en la figura 4.1 no solo destaca las interrelaciones entre las diferentes etapas del proceso, sino que también proporciona una guía estratégica para maximizar la calidad del producto, minimizar defectos y garantizar la eficiencia operativa.

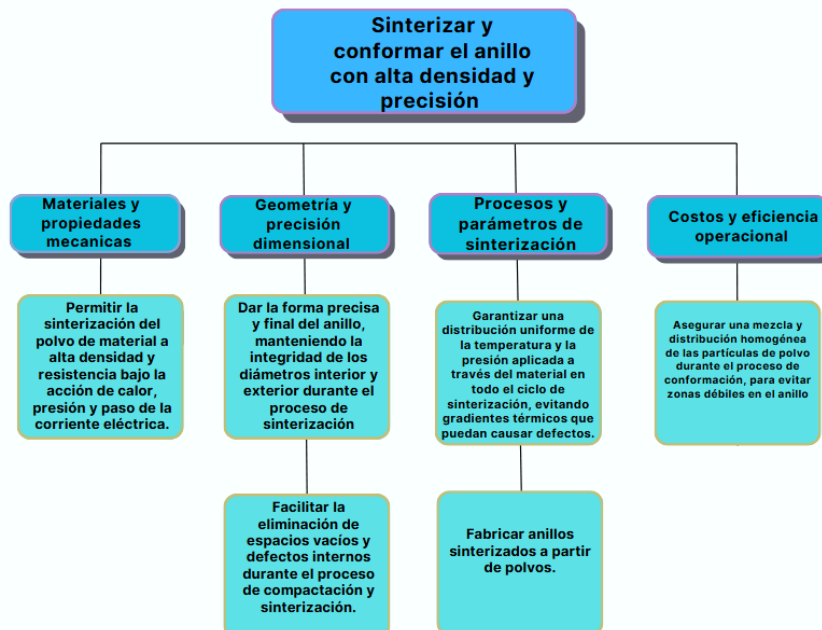


Figura 4.1 Árbol de funciones de la matriz de anillos de alta densidad mediante FAST/SPS.

### 4.3.2 Caja negra

El sistema analizado tiene como entradas clave el material en polvo, que será compactado y sinterizado para formar el anillo, la corriente eléctrica, que genera el calor necesario para el proceso a través de descargas de plasma, la presión mecánica, que compacta el material en polvo, y los parámetros de sinterización (como la temperatura, el tiempo y la velocidad de enfriamiento), que controlan el proceso. Estas entradas interactúan dentro del sistema de sinterización para transformar el material en polvo en un producto sólido, denso y con características mecánicas específicas.

Como salidas del sistema, se obtiene un anillo sinterizado, con alta densidad y las dimensiones precisas requeridas. Además, se genera energía térmica residual, que se libera como parte del proceso de sinterización. Como se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.2 Esquema caja negra de la matriz de anillos de alta densidad mediante FAST/SPS.

### 4.3.3 Caja transparente.

Las funciones que se presentan en la caja transparente son claves para entender el funcionamiento básico del sistema es por eso por lo que se debe entender las funciones internas que ocurren dentro de este. Las funciones clave del proceso incluyen: compactar el polvo, lo que implica aplicar presión uniforme para cohesionar y densificar las partículas en el molde, garantizando la integridad dimensional del material. Además, la conducción eléctrica y generación de calor se encarga de administrar la corriente eléctrica para generar calor por efecto Joule, alcanzando las temperaturas óptimas para la compactación o sinterización. Una vez concluido el proceso, la extracción del anillo asegura su remoción del molde sin comprometer su estructura ni provocar deformaciones. Paralelamente, el control de la microestructura supervisa y ajusta los parámetros del proceso, optimizando las propiedades mecánicas y físicas del material final. Finalmente, el enfriamiento controlado regula la disminución uniforme de la temperatura, evitando tensiones térmicas que podrían comprometer la calidad estructural del producto. Estas etapas integradas garantizan la eficiencia y la calidad del proceso completo. Todo este proceso se ve resumido en la figura 4.3.

Este enfoque es fundamental para optimizar el diseño de la matriz y el proceso de fabricación, ya que permite identificar posibles fuentes de ineficiencia o defectos, como una distribución desigual de la temperatura o presión, que podrían afectar la calidad del producto final. Además, el análisis de caja transparente facilita el control de la microestructura del material sinterizado, garantizando que el anillo resultante tenga las propiedades mecánicas, dimensionales y estructurales esperadas.

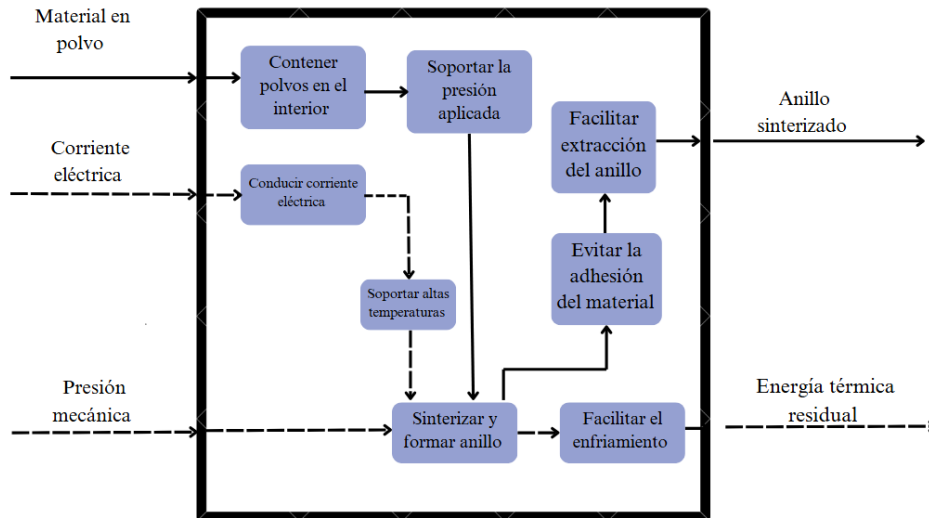


Figura 4.3 Esquema caja transparente de la matriz de anillos de alta densidad mediante FAST/SPS.

#### 4.4 Casa de la calidad (QFD).

Para vincular las características de ingeniería con los requisitos del cliente, se ha elaborado la siguiente matriz QFD, mostrada en el anexo en la figura 7.1. En la parte superior izquierda se incluyen las leyendas que ayudan a interpretar la matriz. En la sección superior central, dentro de un triángulo, se ilustra cómo interactúan las distintas características de ingeniería entre sí. Justo debajo de este triángulo, sobre las características de ingeniería, se especifica la dirección en la que deben realizarse las mejoras. En la zona central, se puede observar la correlación entre las demandas del cliente y los requisitos técnicos. A la derecha, en la sección central, se presenta la calificación de satisfacción de referencia, mientras que en la parte inferior se indica el rendimiento de referencia.

Mediante el QFD, conformado por una tabla de objetivos del diseño y los requerimientos técnicos del producto, se compararon ambos aspectos, para analizar y obtener el grado de relación que presentan, esto ubicado al centro del QFD, además se comparan tanto los objetivos como los requerimientos técnicos con la competencia directa que pueda tener el producto, para encontrar fortalezas presentes en el artefacto. Y finalmente en el techo del QFD se analiza la compatibilidad y viabilidad de realizar mejoras técnicas en el producto. De estos aspectos analizados en el QFD podemos destacar, con respecto a la competencia, la matriz de grafito SPS de alta densidad fabricado por Hebei Hang Carbon Technology Co. [46], el cumplimiento de una precisión dimensional adecuada para los diámetros exteriores e interiores y El diseño debe permitir una fácil remoción del anillo sin dañar su estructura. Estas fortalezas son tanto funciones como requerimientos técnicos que se complementan mutuamente. Entre los aspectos a mejorar del producto podemos destacar que se debe asegurar una mezcla y distribución homogénea de las partículas de polvo durante el proceso de conformación, para evitar zonas débiles en el anillo y minimizar el tiempo de procesamiento y el consumo de energía durante la sinterización.

#### 4.5 Requerimientos de diseño.

El diseño de la matriz para la fabricación de un anillo mediante sinterización por chispa de plasma (SPS) debe abordar varios aspectos clave para asegurar la calidad del producto final. En cuanto a la geometría, la matriz debe garantizar dimensiones precisas del anillo. Los materiales seleccionados deben resistir altas temperaturas y presiones, mientras que el costo debe optimizarse considerando la durabilidad y eficiencia del proceso, además, se debe garantizar una repetitividad del proceso, un flujo de corriente y una distribución homogénea del calor

La energía eléctrica debe conducirse de manera uniforme para evitar defectos, y la presión aplicada debe compactar el polvo de forma homogénea para asegurar una alta densidad. Además, es crucial controlar la microestructura del anillo para lograr las propiedades mecánicas requeridas. Finalmente, el diseño debe permitir la extracción fácil del anillo sin dañarlo ni deformarlo, garantizando la integridad del producto final.

A continuación, se muestra la tabla 4.3 que muestra de manera más descriptiva los requerimientos del diseño.

Tabla 4.3 Requerimientos de diseño por categorías para la matriz de anillos de alta densidad mediante FAST/SPS.

Categoría de especificación	Descripción
Geometría	La matriz debe garantizar la conformación exacta del anillo, manteniendo un diámetro exterior de 20 mm y un diámetro interior de 10 mm, con tolerancias mínimas (inferiores a $\pm 0.05$ mm) para evitar variaciones que afecten el funcionamiento del anillo en su aplicación final.
Diseño	El diseño de la cavidad de la matriz debe ser simétrico para asegurar una distribución uniforme de la presión y la corriente eléctrica, evitando deformaciones o distorsiones durante la sinterización. La matriz debe permitir la extracción del anillo de forma eficiente, evitando demoras en la producción. Un mecanismo simple de desmoldeo, como un sistema de expulsión o secciones desarmables, podría ser necesario para facilitar este paso.
Materiales	El material de la matriz debe resistir las altas temperaturas generadas durante el proceso de sinterización (hasta 2000°C, dependiendo del material sinterizado), sin deformarse o degradarse. El material de la matriz debe tener una baja conductividad térmica para evitar la disipación excesiva del calor, permitiendo que el material en polvo alcance la temperatura de sinterización adecuada.
Energía eléctrica	La matriz debe evitar la fuga de corriente hacia otras partes del sistema, permitiendo que la electricidad se concentre en la zona de sinterización. Y debe minimizar las pérdidas eléctricas y asegura que no haya puntos calientes que puedan afectar la calidad del sinterizado.
Presión	La matriz debe ser lo suficientemente resistente para soportar las altas presiones (50 MPa) necesarias para compactar el polvo durante la sinterización sin sufrir deformaciones ni desgastes. La estructura de la matriz debe ser capaz de mantener su forma bajo presión, permitiendo que las fuerzas se distribuyan sin causar cambios en la geometría del anillo.
Microestructura	La matriz debe permitir un control preciso del proceso para obtener una microestructura homogénea y sin porosidades, logrando un anillo con alta densidad. El diseño debe garantizar un proceso de enfriamiento controlado que minimice las tensiones internas, las cuales podrían generar micro fisuras o defectos en la microestructura del anillo.
Costo	El diseño debe optimizar el uso de energía y tiempo, buscando la máxima eficiencia del proceso para reducir los costos operativos.

## 4.6 Elaboración de soluciones conceptuales.

En este análisis se lleva a cabo una búsqueda exhaustiva tanto interna como externa con el objetivo de desarrollar una carta morfológica que facilite la generación de conceptos innovadores para el diseño de una matriz. La búsqueda externa se enfoca en identificar las mejores prácticas, tecnologías emergentes y soluciones adoptadas en el mercado, mientras que la búsqueda interna examina los recursos, capacidades y limitaciones propias de la organización. A través de este proceso, se busca obtener una amplia variedad de alternativas y enfoques que puedan ser utilizados para crear una matriz eficiente y funcional, garantizando que el diseño final esté alineado con las necesidades operativas, técnicas y económicas del proyecto. La carta morfológica resultante será una herramienta estratégica para organizar y evaluar las diversas opciones de diseño, favoreciendo la generación de soluciones creativas y viables.

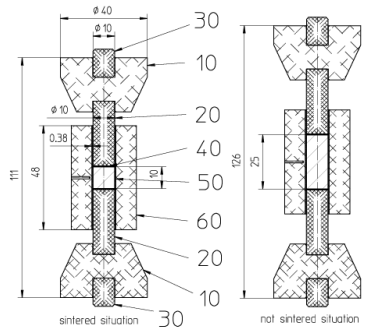
### 4.6.1 Búsqueda externa

A continuación, se presentan las matrices que ya existen para el uso en procesos de FAST/SPS, las cuales se detallan en la tabla 4.4. Estas matrices han sido desarrolladas y utilizadas para optimizar la consolidación de materiales, adaptándose a diversas necesidades de geometría, presión y temperatura durante el proceso de sinterización. La información recopilada permite evaluar las opciones disponibles y proporciona una base para comprender las características y aplicaciones de cada tipo de matriz en este campo.

Tabla 4.4 Esquemas de catálogos y estudios de matrices usadas para sintetizar en FAST/SPS.

Nombre	Imagen descriptiva	Descripción
<p>HS0 19.0 C4100-22729</p>		<p>El esquema muestra una matriz típica para procesos FAST/SPS, compuesta por un punzón superior (1) y uno inferior (6) que aplican presión sobre el material en la cavidad central (4), rodeados de aislamiento térmico (2 y 5) para minimizar pérdidas de calor y asegurar una distribución uniforme de la temperatura. El cuerpo principal de la matriz está soportado por un anillo externo (3) y una base robusta (7) que garantizan estabilidad y transmisión de corriente eléctrica. Una cualidad destacada de este diseño es su capacidad para soportar altas temperaturas y presiones mientras mantiene un control preciso del gradiente térmico, lo que resulta en piezas densas y uniformes.</p>
<p>Matriz escalonada de control de distribución</p>		<p>Los tres diseños diferentes de una herramienta de sinterización con variaciones en la cantidad de discos utilizados para las transiciones entre las secciones superior e inferior. En el diseño (a), la transición se realiza mediante dos discos, en el diseño (b) mediante tres discos, y en el diseño (c) mediante cuatro discos. Estas transiciones escalonadas permiten modificar la distribución de presión y temperatura en la cavidad de la matriz durante el proceso de sinterización. A medida que se incrementa el número de discos, se mejora la uniformidad en la transferencia de calor y presión, lo que es ideal para optimizar la calidad y densidad.</p>

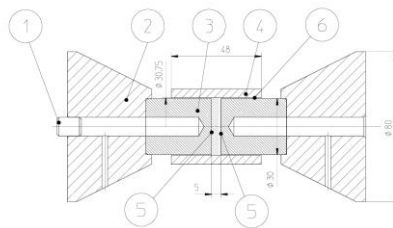
Molde de herramienta de prensado B-0097132V1



70	1	C-0075353	Folienrad 10	foil rad
60	1	C-0097131	Matrize	die
50	1	Z-0097184	Maniefolie	rectangular foil
40	2	Z-0097189	runde Folie	foil disc
30	2	C-0097188	Zentrierbolzen	centering bolt
20	2	C-0097187	Stempel	punch
10	2	C-0097183	Adapter	adapter

El esquema técnico representa un sistema utilizado en procesos de compactación y sinterización de materiales, común en la fabricación de componentes metálicos o cerámicos. En la situación "no sinterizada", las piezas, como la matriz, el punzón y las láminas de material, se alinean para compactar el polvo o material base. En la situación "sinterizada", se muestra cómo el material comprimido adopta su forma final después del proceso térmico de sinterización, consolidándose en un componente sólido y resistente. Este sistema es esencial en la producción de piezas de alta precisión para aplicaciones industriales o tecnológicas.

Herramienta de prensado C4100-25944-4

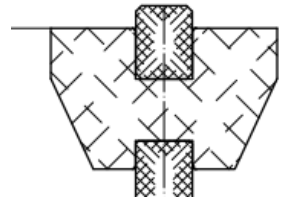

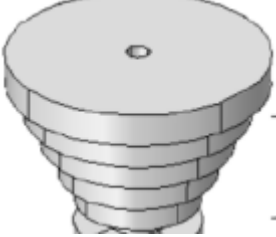
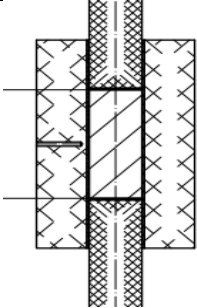


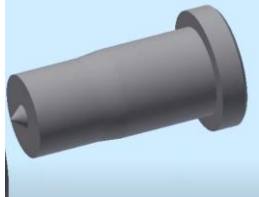
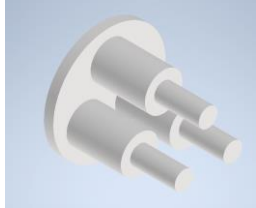
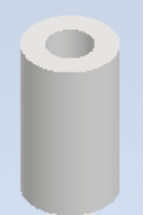


El esquema técnico representa en vista seccional de un conjunto mecánico compuesto por seis piezas principales numeradas del 1 al 6. El diseño incluye dos componentes cónicos enfrentados (2 y 6), un núcleo central (3) con cavidades cilíndricas, y elementos de soporte y ajuste (1, 4, y 5). Las medidas clave están especificadas, como un diámetro de  $\phi 80$  y una longitud de 48 mm en el núcleo central. Este sistema parece diseñado para alinear, sujetar o transferir fuerza entre componentes, posiblemente en un proceso de prensado, ensamblaje o sinterización. Es útil en aplicaciones industriales donde se requiere precisión en la unión o moldeado de piezas.

#### 4.6.2 Carta morfológica.

En este estudio, se han considerado tres funciones principales: soportar la presión aplicada, contener polvos y sinterizar y formar el anillo. En esta carta morfológica, mostrada en la tabla 4.5, se presentan distintos tipos de geometrías o formas para darle más variedad al diseño final que se busca realizar, explorado distintas ideas para poder contar con la más acertada y que cumpla de la mejor manera con los requerimientos del diseño deseado.

Tabla 4.5 Opciones de diseño para múltiples elementos de la matriz.

Funciones	A	B	C
Soportar presión aplicada			
Contener polvos			
Sintetizar y formar el anillo			

#### 4.6.3 Generación de conceptos

Para el proceso de diseño, se generarán tres conceptos basados en las combinaciones seleccionadas de la tabla 4.5 de la carta morfológica. Estas opciones han sido cuidadosamente elegidas para garantizar el cumplimiento integral de los objetivos, funciones y restricciones definidos en las necesidades del proyecto. Cada concepto buscará abordar las especificaciones técnicas establecidas, como la maximización de la densidad, la resistencia mecánica, la precisión dimensional y la eficiencia del proceso, asegurando una solución viable y optimizada.

#### 4.6.4 Concepto 1.

El concepto 1 desarrollado está compuesto por la función soportar presión aplicada tipo A, la función contener polvos tipo A y sinterizar y formar el anillo tipo C, como se detalla en la tabla 4.5 de la carta morfológica. Esta combinación fue seleccionada estratégicamente para simplificar el diseño del conjunto, enfocándose en la funcionalidad y la eficiencia operativa. A diferencia de enfoques que priorizan la producción masiva de piezas, este concepto busca centrarse en la optimización de la geometría para una sola pieza, como se observa en la figura 4.6, con el fin de maximizar el control sobre las dimensiones y características específicas del producto final. Con este diseño se espera una conexión precisa y estable; además de una guía robusta para el punzón, que minimiza el desgaste y mejora la alineación.



Figura 4.4 Vista frontal del concepto 1.

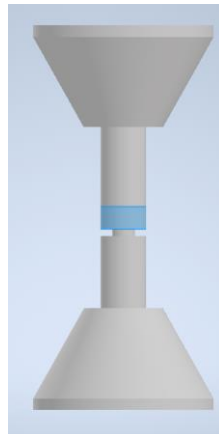


Figura 4.5 Vista lateral del concepto 1.



Figura 4.6 Vista interna del concepto 1.

#### 4.6.5 Concepto 2.

El concepto 2 desarrollado está compuesto por la función soportar presión aplicada tipo C, la función contener polvos tipo B y sinterizar y formar el anillo tipo B, como se muestra en la tabla 4.5 de la carta morfológica. Este diseño se enfoca en maximizar la eficiencia del proceso mediante la creación de una camisa con múltiples anillos, como se observa en la figura 4.9, dispuestos de forma paralela, lo que permite aumentar la producción al obtener varios anillos en una sola sinterización. Esta configuración está orientada a reducir el tiempo de fabricación y aumentar la productividad del proceso. Sin embargo, al incrementar la cantidad de anillos en simultáneo, también se eleva la complejidad en la distribución de presión y temperatura durante la sinterización, lo que puede afectar la uniformidad y calidad final de las piezas obtenidas.

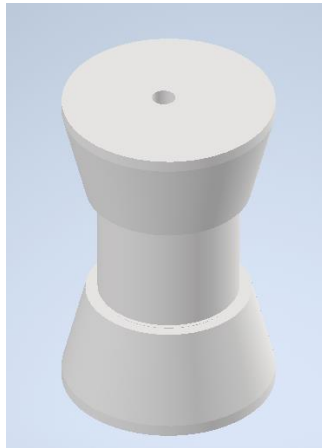


Figura 4.7 Vista frontal del concepto 2.



Figura 4.8 Vista lateral del concepto 2.

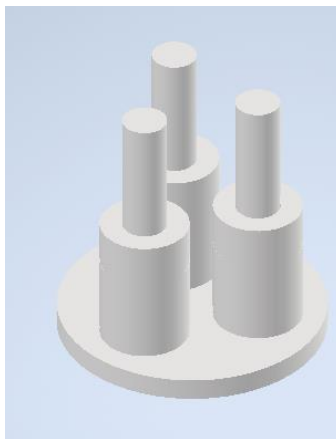


Figura 4.9 Vista interna del concepto 2.

### 4.6.6 Concepto 3

El concepto 3 desarrollado está compuesto por la función soportar presión aplicada tipo B, la función contener polvos tipo C y sinterizar y formar el anillo tipo A, tal como se presenta en la tabla 4.5 de la carta morfológica. Este diseño se centra en incrementar la producción de piezas al utilizar una camisa que permite una disposición en serie de las muestras, es decir, colocándolas una encima de otra, como se observa en la figura 4.11. Esta configuración busca optimizar el uso del espacio dentro del molde, permitiendo sinterizar múltiples muestras de forma simultánea. Con esta disposición vertical, como se observa en la figura 4.10, se logra una mayor eficiencia en el proceso, reduciendo los tiempos de producción y aprovechando al máximo las capacidades de la sinterización. No obstante, se debe considerar que esta técnica puede introducir desafíos adicionales en cuanto al control de la presión y la temperatura, los cuales deben manejarse cuidadosamente para garantizar la calidad y uniformidad de todas las piezas sintetizadas.

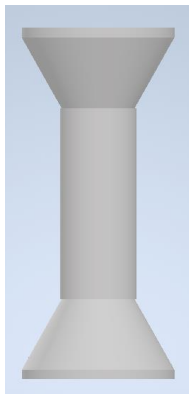


Figura 4.10 Vista frontal del concepto 3.



Figura 4.11 Vista lateral del concepto 3.

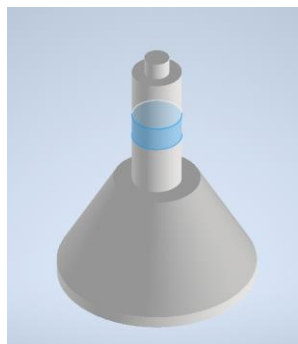


Figura 4.12 Vista interna del concepto 3.

## 4.7 Selección de concepto

Para llevar a cabo la selección del concepto a utilizar, se consideró el peso asignado a cada objetivo descrito en el apartado 4.2.6. A cada concepto se le asignó un rango de importancia, donde el valor 1 representa el nivel más bajo de relevancia y el valor 5 indica el nivel más alto.

Por esta razón, se presenta la tabla 4.6, que contiene el cálculo detallado de las puntuaciones obtenidas para cada opción. Esta tabla permite identificar cuál de los conceptos evaluados cumple mejor con los objetivos propuestos para el desarrollo del diseño final, facilitando así la toma de decisiones fundamentadas en el análisis comparativo.

Tabla 4.6 Tabla de pesos ponderados de los prototipos para su selección

Criterio	Peso	Concepto					
		Prototipo A		Prototipo B		Prototipo C	
		Rango	Peso ponderado	Rango	Peso ponderado	Rango	Peso ponderado
1.1 El material utilizado debe ofrecer alta resistencia mecánica a la compresión, alta densidad.	1,52	4	6,08	3	4,56	2	3,04
1.2 Los materiales de la matriz y el polvo sinterizado deben ser compatibles para evitar reacciones indeseadas o adherencias durante el proceso	0,37	1	0,37	1	0,37	1	0,37
2.1 Se debe obtener una precisión dimensional adecuada para los diámetros exteriores e interiores.	2,38	1	2,38	1	2,38	1	2,38
2.2 El diseño debe permitir una fácil remoción del anillo sin dañar su estructura una vez completado el proceso de sinterización.	0,74	4	2,96	3	2,22	2	1,48
2.3 Se debe evitar sobrecargas eléctricas o puntos calientes que puedan comprometer la integridad del material y las dimensiones del anillo.	0,2	2	0,40	2	0,40	1	0,20
3.1 La porosidad interna del anillo debe ser mínima, ya que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la resistencia del componente final.	1,50	1	1,50	2	3	3	4,50
3.2 La electricidad debe fluir de manera eficiente y controlada a través del material durante el proceso de sinterización por chispa de plasma (SPS).	0,75	2	1,50	3	2,25	2	1,50
4.1 Los materiales y el proceso deben ser rentables, limitando el uso de materiales y técnicas extremadamente costosas.	1	3	3	1	1	2	2
<b>Total</b>	<b>8,46</b>		<b>18,19</b>		<b>16,18</b>		<b>15,47</b>
<b>Opción</b>			<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>

Según lo presentado en la tabla 4.6, la opción que mejor cumple con los objetivos establecidos es la Opción 1, esta opción está compuesta por la función soportar presión aplicada tipo A, la función contener polvos tipo A y sinterizar y formar el anillo tipo C, como se detalla en la carta morfológica. Esta combinación fue elegida para simplificar el diseño del conjunto, centrándose en maximizar la funcionalidad y eficiencia operativa. Este concepto se enfoca en optimizar la geometría de una sola pieza para asegurar un control preciso de sus dimensiones y características.

## 4.8 Diseño básico.

En esta etapa, se estructuran y organizan los componentes principales de la matriz, así como las relaciones y funciones que cada parte desempeñará dentro del sistema. La creación de una lista detallada de partes es crucial para asegurar que todos los elementos necesarios estén contemplados, permitiendo así una correcta integración y operatividad del conjunto. Además, se define el funcionamiento de la matriz, describiendo cómo cada componente interactúa para cumplir con los objetivos específicos del proceso, garantizando su eficacia y desempeño. Este enfoque sistemático asegura que el diseño sea coherente, eficiente y capaz de cumplir con los requisitos técnicos, operativos y de calidad del producto final.

### 4.8.1 Arquitectura del diseño.

A continuación, en la figura 4.13 se presenta la arquitectura del diseño de la matriz de sinterización de anillos.

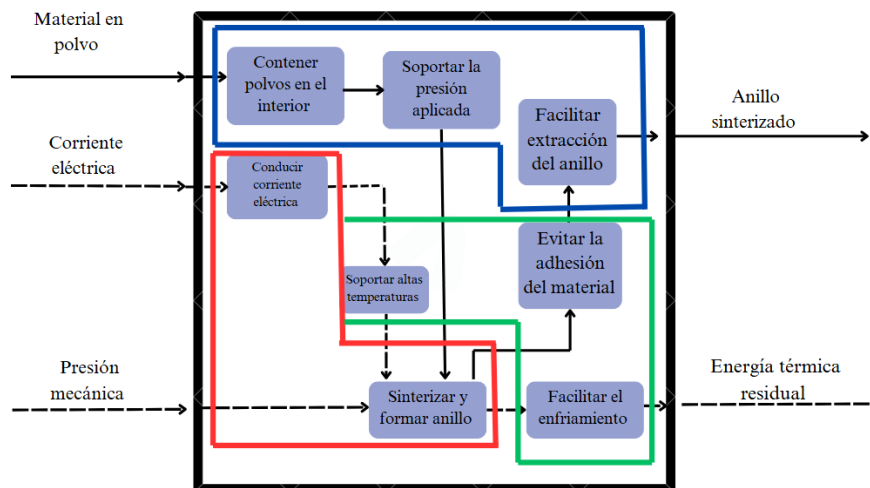


Figura 4.13 Esquema de la arquitectura del diseño.

Como se observa en la figura 4.13, las funciones de contener polvo, soportar la presión aplicada y facilitar la extracción del anillo se encuentran en el mismo módulo. Esto se debe a que han sido agrupadas con base en el criterio de integración geométrica y precisión, ya que estas funciones dependen directamente de la configuración o forma de la matriz.

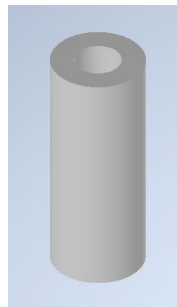
Por otra parte, las funciones de conducir corriente eléctrica y sinterizar y formar el anillo están agrupadas en el mismo módulo, siguiendo el criterio de función compartida. Esto significa que ambas funciones trabajan en conjunto para alcanzar un objetivo común: sinterizar el anillo.

Finalmente, se observa que las funciones de facilitar el enfriamiento, evitar la adhesión del material y soportar altas temperaturas están agrupadas en un mismo módulo debido a su similitud en tecnología de diseño.

#### 4.8.2 Lista de partes.

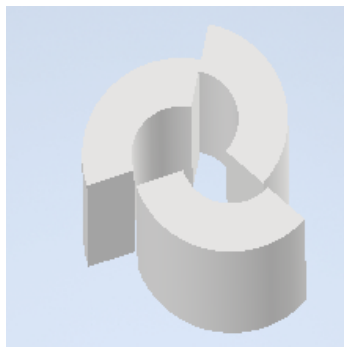
Con la elección del concepto, se inicia el modelado del diseño seleccionado. Como primer paso, se revisan planos, patentes utilizadas en sistemas FAST/SPS y productos similares empleados en procesos de compactación. Basándose en estas referencias, se adopta un modelo similar a la herramienta de prensado B-0097132V, descrito en el inciso 4.6.1 de la búsqueda externa. Este modelo es utilizado para la sinterización de cilindros de 10 [mm] de diámetro y 10 [mm] de altura, y permite identificar los componentes básicos necesarios para una matriz adaptada al sistema FAST/SPS: los adaptadores superior e inferior, los punzones superior e inferior, y finalmente, la camisa que recubre la pieza.

Tras identificar estos elementos, se exploraron ideas para que la pieza resultante tuviera forma de anillo y pudiera ser extraída de manera sencilla. Para lograr la forma de anillo, se consideró incluir una guía interior que definiera el diámetro interno de la pieza mostrado en la figura 34.14. Esta guía estaría ajustada al punzón inferior para evitar desplazamientos y contaría con un orificio interno que permitiría al pirómetro medir la temperatura en el punto medio de la pieza.



*Figura 4.14 Vista lateral de la guía.*

Para facilitar la extracción de la pieza sin riesgo de dañarla, se diseñó un sistema de doble camisa. La primera, denominada "camisa intermedia," mostrada en la figura 4.15, esta recubre la pieza y está seccionada en tres partes iguales. Estas partes pueden separarse durante la extracción, eliminando la necesidad de empujar la pieza y reduciendo el riesgo de daño. Para mantener la camisa intermedia en su lugar durante todo el proceso, se recubre con una segunda camisa, denominada "camisa exterior", mostrada en la figura 4.16. Esta última protege todo el sistema interior y asegura que los componentes permanezcan en posición durante la sinterización.



*Figura 4.15 Vista superior de la camisa intermedia.*

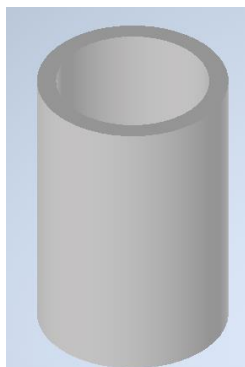


Figura 4.16 Vista lateral de la camisa exterior

Para comprender mejor el diseño básico y la idea principal de la matriz el layout o despiece mostrado en la sección 7.4 del anexo, este layout ofrece una representación clara de cómo se distribuyen las partes del sistema, mostrando su ubicación y el rol específico que desempeñan dentro de este. Y en la misma sección 7.4 del anexo se nos muestra las dimensiones generales del sistema para mayor comprensión de las medidas que debe tener la matriz y que cumpla con los requisitos de tamaño para que se pueda usar en la máquina HP D 10-SD.

Para llevar a cabo el diseño de las partes que componen la matriz, es fundamental comprender su funcionamiento y el rol que desempeñan dentro del sistema. Este conocimiento permite garantizar que cada componente cumpla su propósito de manera eficiente y se integre adecuadamente en el proceso de compactación y sinterización.

- Adaptador superior: Actúa como el enlace entre el punzón superior y el sistema de prensado, asegurando la transferencia uniforme de presión al sistema. Además, garantiza la alineación precisa del punzón superior durante el proceso.
- Adaptador inferior: Sirve como soporte y conexión con la máquina de FAST/SPS, gracias a su pequeño orificio diseñado para anclarlo de forma segura y evitar desplazamientos durante la compresión.
- Punzón superior: Su función principal es aplicar presión sobre la pieza a compactar, transmitiendo la fuerza desde el adaptador superior hacia la muestra de manera uniforme.
- Punzón inferior: Además de aplicar presión desde la base, cumple un rol crítico al mantener la guía interior en posición, asegurando que la forma interna de la pieza se conserve durante todo el proceso de compactación.
- Guía: Tiene la función de definir la forma interior de anillo de la pieza a compactar. Su diseño garantiza un ajuste preciso con el punzón inferior, evitando desplazamientos y proporcionando estabilidad durante el proceso.
- Camisa intermedia: Esta pieza recubre la muestra a compactar y está dividida en tres secciones iguales. Su diseño facilita la extracción de la pieza sin dañarla, ya que permite separar las secciones al finalizar el proceso de sinterización.
- Camisa externa: Actúa como una cubierta que mantiene la camisa intermedia en su posición durante todo el proceso de compactación y sinterización. Además, protege y estabiliza todo el sistema interno, asegurando que las partes se mantengan alineadas y en su lugar.

### 4.8.3 Funcionamiento.

El funcionamiento de la matriz se basa en un proceso de sinterización y compactación del material en polvo, mostrado en la figura 4.17, utilizando un sistema de presión, calor y corriente eléctrica para transformar el polvo metálico en un anillo sinterizado de alta densidad y resistencia. El proceso se desarrolla en varias etapas clave.

En primer lugar, se realiza la carga del material en polvo, este material se introduce en la matriz, asegurándose de que la distribución sea homogénea. Esto es crucial para evitar la formación de zonas débiles en el anillo final, garantizando que las partículas estén bien distribuidas antes de la compactación.

Luego, se lleva a cabo la aplicación de presión mecánica. Mediante punzones y adaptadores, se aplica presión al polvo, lo que provoca su compactación. Este paso es esencial para darle la forma preliminar al anillo y eliminar cualquier espacio vacío en el material, creando una estructura más densa y uniforme.

La siguiente etapa es la sinterización, durante este proceso, se pasa una corriente eléctrica a través del material, generando calor a medida que la corriente fluye. Este calor, combinado con la presión, permite que las partículas de polvo se fusionen, creando una estructura sólida y homogénea sin que el material llegue a fundirse completamente. La temperatura y la presión se controlan cuidadosamente para evitar gradientes térmicos que puedan causar defectos en el material. Una vez completada la sinterización, la matriz se encarga de mantener la forma y precisión del anillo.

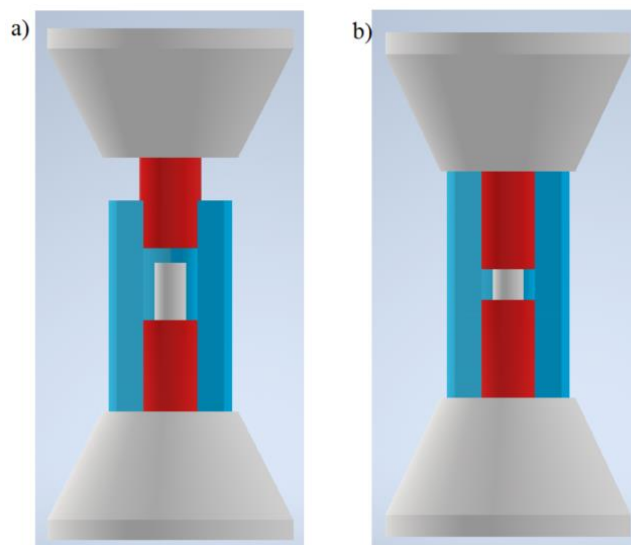


Figura 4.17 a) matriz en posición de no sinterización b) matriz en posición de sinterización.

## 4.9 Análisis estructural

A continuación, se realizará el análisis estructural de la matriz, que incluirá un estudio mecánico para evaluar la distribución de tensiones, garantizando la integridad de la estructura; un análisis eléctrico para revisar la resistencia del sistema, considerando la conductividad de los materiales y el diseño geométrico, y finalmente, un análisis de transferencia de calor enfocado en las partes más cercanas a la muestra, con el objetivo de evaluar los gradientes térmicos y asegurar un calentamiento uniforme durante la operación.

### 4.9.1 Resistencia mecánica

En la tabla 4.7 se presentan los resultados de las fuerzas axiales y la presión aplicada para los elementos axiales de la matriz. Estos elementos incluyen la muestra, el punzón superior, el punzón inferior, el adaptador superior y el adaptador inferior. La información recopilada permite analizar la distribución de esfuerzos en cada componente, asegurando su desempeño bajo las condiciones de operación establecidas.

Tabla 4.7 Valor de los elementos alineados de forma axial a la muestra.

	Fuerza axial aplicada	Presión aplicada
Muestra	11750 [N]	50 [MPa]
Punzón Superior	11750 [N]	50 [MPa]
Punzón inferior	11750 [N]	50 [MPa]
Adaptador superior	11750 [N]	2 [MPa]
Adaptador inferior	11750 [N]	2 [MPa]

Tabla 4.8 Valor de la tensión radial de los elementos que recubre la muestra

	Tensión radial	Tensión circunferencial
Camisa intermedia	18 [MPa]	30 [MPa]
Guía	9 [MPa]	18 [MPa]
Camisa exterior	0 [MPa]	6 [MPa]

En el diseño de la matriz para la sinterización de anillos con un diámetro exterior de 20 [mm] y un diámetro interior de 10 [mm], se han considerado diversos aspectos clave relacionados con las fuerzas y presiones aplicadas sobre los distintos componentes de la estructura. Estos elementos incluyen la muestra, los punzones superior e inferior, los adaptadores superior e inferior, así como las camisas intermedia y exterior y la guía. A continuación, se presenta un análisis detallado de la viabilidad de los valores calculados para las fuerzas axiales, las presiones aplicadas y las tensiones radiales y circunferenciales, teniendo en cuenta que la matriz está fabricada en grafito y que el sistema opera bajo el entorno FAST/SPS.

La fuerza axial aplicada a los componentes de la matriz es de 11,750 [N], y la presión aplicada varía dependiendo del componente. En el caso de la muestra, punzón superior e inferior, la presión aplicada es de 50 [MPa]. Este valor es adecuado, considerando que el grafito es un material con una excelente capacidad para soportar presiones de compresión, aunque es frágil en tracción. La presión aplicada en estos componentes asegura que la muestra se mantenga estable durante el proceso de sinterización, evitando desplazamientos o deformaciones indeseadas. Esta presión también es necesaria para garantizar la eficacia del sistema FAST/SPS en la consolidación de la muestra.

Por otro lado, los adaptadores superior e inferior están sometidos a una presión significativamente menor de 2 [MPa]. Este valor es razonable, ya que los adaptadores tienen la función principal de mantener la estabilidad y el alineamiento de la matriz, pero no están sujetos a la misma carga compresiva que la muestra o los punzones. La presión aplicada en los adaptadores es baja, lo que refleja que estos elementos no tienen la misma demanda de resistencia estructural que los componentes principales. Dado que el grafito tiene una buena resistencia a compresión, es capaz de soportar esta presión sin comprometer su integridad.

Los elementos que experimentan tensiones radiales y circunferenciales debido a la expansión de los polvos metálicos durante el proceso de sinterización son las camisas intermedia y exterior, y la guía. En el caso de la camisa intermedia, las tensiones radiales de 18 [MPa] y circunferenciales de 30 [MPa] son moderadas, lo que es adecuado para este componente. La camisa intermedia se encuentra en contacto directo con los polvos metálicos, por lo que debe ser capaz de manejar la expansión sin sufrir deformaciones excesivas. Estas tensiones están dentro

de los límites de resistencia del grafito de alta densidad, que tiene una capacidad adecuada para soportarlas sin comprometer la integridad estructural.

La guía, otro componente crítico, experimenta tensiones radiales de 9 [MPa] y circunferenciales de 18 [MPa]. Estos valores también son razonables y están bien dentro de los límites que el grafito puede manejar sin problemas. Estas tensiones no son excesivas, y el grafito puede soportarlas sin comprometer el rendimiento o la estabilidad del sistema.

Por último, la camisa exterior experimenta tensiones radiales de 0 [MPa] y circunferenciales de 6 [MPa]. Estas tensiones son extremadamente bajas, lo que es esperado para un componente que tiene un rol secundario en cuanto a la transferencia de carga y la contención de la muestra. Las tensiones circunferenciales de 6 [MPa] están muy por debajo de los límites de resistencia del grafito, lo que asegura que la camisa exterior no experimentará ningún tipo de fallo estructural bajo las condiciones de operación planteadas.

Los valores de fuerzas y presiones aplicadas en los diferentes componentes de la matriz, así como las tensiones radiales y circunferenciales generadas por la expansión de los polvos metálicos, son totalmente aceptables para una matriz de grafito diseñada para un sistema FAST/SPS. La selección del grafito como material para la matriz es adecuada, ya que ofrece una buena resistencia a la compresión y es capaz de soportar las presiones y tensiones esperadas sin comprometer la integridad estructural de los componentes.

#### 4.9.2 Resistencia eléctrica

En la tabla 4.9 se muestran los valores de la resistencia eléctrica de todos los componentes de la matriz. Y en la tabla 4.10 se muestran los resultados de potencia y corriente eléctrica que debe alcanzar el sistema para llegar a la temperatura de trabajo. Es importante mencionar que, para obtener estos valores, se asumió que el material de la muestra es renio y el material de la matriz es grafito de alta densidad. Estas suposiciones permitieron calcular con mayor precisión las propiedades eléctricas específicas de cada elemento del sistema.

Tabla 4.9 Valor de las resistencias para cada componente.

	Resistencia
Muestra	$4,67 \cdot 10^{-3}$ [ $\Omega$ ]
Punzón Superior	$1,4 \cdot 10^{-3}$ [ $\Omega$ ]
Punzón inferior	$1,4 \cdot 10^{-3}$ [ $\Omega$ ]
Adaptador superior	$1,39 \cdot 10^{-4}$ [ $\Omega$ ]
Adaptador inferior	$1,39 \cdot 10^{-4}$ [ $\Omega$ ]
Camisa exterior	$8,4 \cdot 10^{-4}$ [ $\Omega$ ]
Guía	$2 \cdot 10^{-3}$ [ $\Omega$ ]
Camisa intermedia	$6,5 \cdot 10^{-4}$ [ $\Omega$ ]

Tabla 4.10 Valor de la corriente y potencia del sistema.

Potencia	2526 [W]
Corriente eléctrica	1790 [A]

Para el proceso de sinterización, la potencia total que se aplica al sistema es de 2526 [W] y la corriente eléctrica es de 1790 [A]. La potencia eléctrica es un factor clave en la generación

de calor en el sistema. En un entorno de sinterización como el que se propone, la potencia aplicada debe ser suficiente para calentar la muestra, los punzones y otros componentes de la matriz hasta alcanzar la temperatura de trabajo de 2000 [°C].

El hecho de que se aplique una corriente de 1790 [A] sugiere que el sistema está diseñado para soportar cargas altas sin sobrecalentarse, ya que el grafito tiene la capacidad de disipar el calor de manera eficiente. La corriente y la potencia proporcionan el flujo de energía necesario para alcanzar los 2000 [°C], considerando que la resistividad eléctrica del grafito no genera pérdidas significativas de energía.

### 4.9.3 Transferencia de calor

En la tabla 4.11 se muestran los resultados de la transferencia de calor de los elementos más cercanos a la muestra. Estos valores reflejan los gradientes térmicos y las propiedades de conductividad de los materiales, permitiendo analizar la eficiencia del sistema en la distribución de temperatura durante la operación.

*Tabla 4.11 Transferencia de calor de los elementos más cercanos al punto de calor*

	Transferencia de calor
Punzón Superior	2117 [W]
Punzón inferior	2117 [W]
Camisa exterior	344388 [W]
Guía	44460 [W]
Camisa intermedia	11115 [W]

Dado que la potencia aplicada 2526 [W] y la corriente 1790 [A] son proporcionales a la cantidad de calor que se genera, estos valores son adecuados para alcanzar la temperatura de 2000 [°C] aproximadamente en un tiempo razonable, considerando también la capacidad térmica del grafito. La matriz de grafito, al ser un buen conductor térmico, facilita la distribución eficiente del calor a través de los componentes, permitiendo que la temperatura de 2000 [°C] aproximadamente sea alcanzada de manera efectiva sin causar sobrecalentamiento o fallos en el sistema.

A continuación, se analiza la transferencia de calor para los elementos más cercanos al punto más caliente, considerando las potencias de calor asociadas a cada uno de ellos. Los punzones superior e inferior experimentan una transferencia de calor de 2117 [W] cada uno, lo que es razonable dado su papel central en el proceso de sinterización. Estos punzones están en contacto directo con la muestra y son los principales conductores de calor hacia el interior de la pieza. La cantidad de calor transferido es adecuada para asegurar que la muestra alcance la temperatura de trabajo de 2000 [°C] sin que los punzones mismos sufran un sobrecalentamiento. Dado que estos punzones están hechos de grafito, que tiene una buena conductividad térmica, los valores de transferencia de calor son aceptables para mantener una temperatura uniforme en la muestra durante el proceso de sinterización.

La camisa exterior experimenta una transferencia de calor significativamente mayor con un valor de 344388 [W]. Este valor es mucho más alto en comparación con los punzones y otros componentes, lo que es lógico, ya que la camisa exterior actúa como una barrera para contener la temperatura generada en el interior y asegurar que la matriz se mantenga dentro de los límites térmicos deseados. La alta transferencia de calor en la camisa exterior indica que está diseñada para disipar una gran cantidad de energía térmica hacia el entorno. Si bien la potencia transferida es considerable, el grafito tiene una buena capacidad para manejar estas cantidades de calor sin sufrir daños estructurales, por lo que este valor también es aceptable dentro del diseño.

La guía tiene una transferencia de calor de 44460 [W], lo que es adecuado dado su papel en el sistema. La guía está ubicada en una posición más periférica y su función principal es asegurar el correcto alineamiento de los punzones. Este valor de transferencia de calor refleja que la guía puede manejar una cantidad significativa de calor sin sufrir deformaciones o fallas, lo que es esperado, dado que el grafito tiene una alta resistencia térmica. En términos generales, este valor es aceptable, considerando que la guía no está sometida a las mismas condiciones extremas de temperatura que los punzones o la muestra.

La camisa intermedia tiene una transferencia de calor de 11115 [W], que es considerablemente menor que la de la camisa exterior. Esto es apropiado, ya que la camisa intermedia se encuentra más cerca de la muestra y tiene la función de mantener la temperatura en un rango controlado, evitando que la transferencia térmica hacia el exterior sea excesiva. Dado que la camisa intermedia también está hecha de grafito, material que tiene una buena capacidad para distribuir y disipar el calor, esta cantidad de calor transferido es aceptable para su función de aislamiento térmico.

#### 4.10 Diseño al detalle.

El diseño al detalle de la matriz implica una serie de pasos meticulosos que incluyen la selección precisa de materiales, la elaboración de los planos detallados de cada parte de la matriz y el análisis de los procesos de manufactura. La selección de materiales es una etapa crucial, ya que garantiza que los componentes de la matriz sean lo suficientemente resistentes, duraderos y funcionales para soportar las condiciones operativas previstas. Posteriormente, se desarrollan los planos de cada parte de la matriz, especificando dimensiones, tolerancias y características técnicas para asegurar la correcta fabricación e instalación. Finalmente, el análisis de los procesos de manufactura permite evaluar y optimizar las técnicas de producción, considerando factores como costos, tiempos de fabricación, calidad y viabilidad operativa. Este enfoque integral garantiza que el diseño de la matriz sea eficiente, preciso y adecuado a los requerimientos técnicos y económicos del proyecto.

##### 4.10.1 Selección de materiales

A continuación, en la tabla 4.12, se resumen las propiedades mecánicas y térmicas más relevantes de estos materiales, proporcionando una base objetiva para la comparación y selección del más adecuado según los requerimientos específicos del proceso.

*Tabla 4.12 Propiedades mecánicas de los materiales posibles para la matriz.*

Propiedad	Grafito	Carburo de tungsteno	Alúmina	Carburo de silicio
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.7 - 2.3	15-15.8	3.95-4.1	3.1-3.2
Conductividad térmica (W/mK)	100-150	85-100	25-30	120-200
Resistencia a compresión (MPa)	50-150	2500-4500	2000-4000	3000-4000
Módulo elástico (GPa)	8-15	550-700	300-400	400-450
Resistencia a la oxidación	Baja	Moderada	Muy alta	Alta
Fragilidad	Alta	Baja	Alta	Alta
Costo relativo	Bajo	Alto	Moderado	Alto

Analizando lo presentado en la tabla 4.12 de las propiedades térmicas, mecánicas y químicas de los materiales evaluados, se concluye que el grafito de alta densidad es el material más adecuado para su uso como matriz en sistemas FAST/SPS.

El grafito destaca por su excelente conductividad térmica, que asegura una distribución uniforme del calor durante el proceso de sinterización, y por su baja densidad, lo que facilita su manejo y reduce el peso del sistema. Además, su resistencia a altas temperaturas lo hace particularmente adecuado para operar en condiciones extremas, típicas de FAST/SPS.

Aunque presenta ciertas limitaciones, como su susceptibilidad a la oxidación en atmósferas ricas en oxígeno, estas pueden ser mitigadas mediante el uso de atmósferas inertes o recubrimientos protectores. Su costo relativamente bajo y la facilidad de mecanizado en comparación con materiales como el carburo de tungsteno o el carburo de silicio también refuerzan su selección como la opción más factible.

#### 4.10.2 Planos.

En el inciso 7.4 del anexo se muestran los planos detallados de todas las piezas que componen la matriz. Estos planos incluyen las especificaciones completas de cada componente, tales como dimensiones, tolerancias y características técnicas necesarias para su correcta fabricación e integración. De esta manera, se proporciona una visión clara y precisa de cada parte, facilitando el proceso de producción y asegurando que se cumplan los requisitos técnicos y operativos del diseño.

#### 4.10.3 Análisis de los procesos de manufactura.

El análisis de procesos de manufactura es esencial para optimizar y controlar las operaciones que transforman materiales en productos finales. Este estudio permite evaluar parámetros clave, como la transferencia de calor, la aplicación de presión y la densificación, asegurando eficiencia y calidad en el proceso.

#### 4.10.4 Proceso de manufactura de adaptador inferior

El proceso comienza con el cilindrado del material bruto de grafito hasta obtener un cilindro uniforme de 80 [mm] de diámetro. Este paso asegura una base adecuada para las operaciones posteriores y elimina irregularidades superficiales. Después se mecaniza la sección troncocónica del adaptador para ajustarse a la geometría requerida. El frentado se realiza para obtener una superficie plana y perpendicular al eje del adaptador en la cara superior, para a posteriori rotarlo dejando la cara inferior para refrentarlo y reducir el largo de una sección del adaptador a 45 [mm], dejando una superficie plana en dicha zona. Después se realiza un taladrado inicial desde la cara inferior para crear un agujero central con un diámetro de 20 [mm] y desde la cara superior, se realiza un taladrado adicional para reducir el agujero central a un diámetro de 5 [mm]. Finalmente, se pule la superficie externa del adaptador para mejorar su acabado superficial y reducir irregularidades que puedan afectar el ensamblaje o la estética. Proceso que se muestra en la figura 7.2 del anexo.

#### 4.10.5 Proceso de manufactura de adaptador superior

El proceso inicia con el torneado del material bruto para obtener un cilindro uniforme de 80 [mm] de diámetro. Luego, se mecaniza la forma cónica requerida para la funcionalidad del adaptador. Una vez completados los torneados, se procede al frentado para asegurar una superficie plana y perpendicular al eje, seguido por el refrentado, que reduce el largo de una sección a 45 [mm] y genera una superficie plana adicional. Posteriormente, se realiza un taladrado

inicial de 10 [mm] de diámetro en la cara superior y, desde la cara inferior, un taladrado adicional para crear un agujero de 20 [mm] de diámetro. Finalmente, se lleva a cabo el pulido de la superficie externa del adaptador para mejorar su acabado y eliminar irregularidades. Proceso que se muestra en la figura 7.3 del anexo.

#### 4.10.6 Proceso de manufactura de punzón inferior.

El proceso de manufactura del punzón inferior comienza con el torneado del material bruto para obtener un cilindro uniforme de 20 [mm] de diámetro. A continuación, se realiza el frentado para garantizar una superficie plana y perpendicular al eje del componente. Posteriormente, se efectúa el refrentado para ajustar la longitud a 35 [mm], asegurando superficies planas y paralelas. Luego, se lleva a cabo un taladrado pasante con un diámetro de 10 [mm] en el eje del punzón, que permite su integración con otros elementos del sistema. Finalmente, se realiza el pulido de la superficie externa para mejorar el acabado superficial y eliminar cualquier irregularidad, garantizando así un componente funcional y con las dimensiones requeridas. Proceso que se muestra en la figura 7.4 del anexo.

#### 4.10.7 Proceso de manufactura de punzón superior.

Se comienza con el cilindrado del material base, obtener el diámetro exterior de 20 [mm], estableciendo la forma básica cilíndrica del punzón. Después, se realiza el frentado de la cara superior del punzón. A continuación, se lleva a cabo el refrentado de la cara inferior, para establecer la altura de 35 [mm] y garantizar una alineación perfecta con el adaptador inferior y la pieza a compactar. En la siguiente fase, se realiza el taladrado del agujero central de 10 [mm] de diámetro mediante una máquina de taladro, que atraviesa todo el punzón para permitir la inserción de una guía. Finalmente, se ejecuta el pulido exterior para eliminar cualquier irregularidad superficial y asegurar una superficie lisa. Proceso que se muestra en la figura 7.5 del anexo.

#### 4.10.8 Proceso de manufactura de guía.

El primer paso es el cilindrado, en el cual se obtiene el diámetro exterior de 10 [mm] a partir de un material base. A continuación, se realiza el frentado de la cara superior de la guía. Posteriormente, se procede al refrentado de la cara inferior de la guía, ajustando la altura a 25 [mm]. La siguiente fase es el taladrado de un agujero de 5 [mm] de diámetro en la cara superior de la guía. Finalmente, se lleva a cabo el pulido exterior, que tiene como objetivo mejorar la calidad superficial de la guía. Proceso que se muestra en la figura 7.6 del anexo.

#### 4.10.9 Proceso de manufactura de camisa intermedia.

En primer lugar, se realiza el cilindrado, mediante el cual se obtiene el diámetro exterior de 40 [mm] a partir de un material base. Después, se procede al frentado de la cara superior de la camisa, y el refrentado de la cara inferior, a una altura de la camisa a 74 [mm]. A continuación, es el taladrado de un agujero de 20.06 [mm] de diámetro en el eje de la camisa. Posteriormente, se realiza el corte lineal, un proceso que ajusta las dimensiones de la camisa a las especificaciones exactas, y permite darles forma a las características de diseño requeridas para su correcta integración. Finalmente, se lleva a cabo el pulido exterior. Proceso que se muestra en la figura 7.7 del anexo.

#### 4.10.10 Proceso de manufactura de camisa exterior

El proceso inicia con el cilindrado, en el cual se obtiene el diámetro exterior de 50 [mm]. A continuación, se realiza el frentado de la cara superior de la camisa. Posteriormente, se lleva a cabo el refrentado de la cara inferior de la camisa a una altura de 74 [mm], después, se procede al taladrado de un agujero de 40 [mm] de diámetro a lo largo del eje de la camisa. Finalmente, se realiza el pulido exterior. Proceso que se muestra en la figura 7.8 del anexo

#### 4.10.11 Proceso de ensamble.

A continuación, se explica el paso a paso del ensamble del prototipo, como se observa en la figura 4.18.

1. Preparación de Componentes: El primer paso es verificar que todos los componentes estén limpios y libres de residuos o partículas que puedan interferir en el ensamblaje. Se inspeccionan visualmente los elementos, como el punzón inferior, la guía, las camisas intermedia y exterior, el punzón superior y los adaptadores, para detectar posibles daños o deformaciones. Esta etapa garantiza que cada pieza se encuentre en condiciones óptimas para el ensamblaje y el funcionamiento del sistema.
2. Colocación del Punzón Inferior y la Guía: Una vez preparados los componentes, se coloca el punzón inferior dentro del adaptador inferior, asegurando que quede perfectamente alineado y ajustado para evitar movimientos laterales. Luego, se inserta la guía cilíndrica en el orificio central del punzón inferior. Es fundamental que la guía se asiente completamente en el orificio y quede fija, ya que proporciona estabilidad al polvo metálico y alineación a los componentes superiores.
3. Instalación de las Camisas: A continuación, se colocan las camisas intermedia y exterior. La camisa intermedia, dividida en tres partes, se ubica alrededor del punzón inferior y la guía, formando un cilindro uniforme. Es crucial asegurar que las tres secciones de la camisa intermedia estén bien ensambladas y sin espacios visibles. Posteriormente, se coloca la camisa exterior, cubriendo completamente la camisa intermedia. Ambas camisas deben estar concéntricas y correctamente alineadas con el punzón y el adaptador inferiores para garantizar una distribución uniforme de la presión.
4. Carga del Polvo Metálico: El siguiente paso es introducir el polvo metálico dentro de la camisa intermedia. Se mide con precisión la cantidad de polvo necesaria para cumplir con las especificaciones del anillo, asegurándose de que el volumen y la densidad sean los adecuados. El polvo se distribuye uniformemente y, si es necesario, se utilizan herramientas vibratorias o de compactación ligera para nivelarlo y evitar irregularidades.
5. Colocación del Punzón Superior: Después de cargar el polvo, se inserta el punzón superior en la abertura superior de la camisa intermedia. Este debe hacer contacto directo con el polvo metálico y alinearse perfectamente con la guía y el punzón inferior. Una correcta alineación asegura que el proceso de compresión sea uniforme, evitando deformaciones o inclinaciones en la pieza durante la sinterización.
6. Colocación del Adaptador Superior: Finalmente, se monta el adaptador superior sobre el punzón superior, conectándolo al sistema de prensado del equipo FAST/SPS. Es importante que el adaptador esté bien asegurado y alineado con el resto del ensamblaje para garantizar una transferencia de presión uniforme. Se realiza una inspección visual del conjunto ensamblado para confirmar que todas las piezas estén correctamente colocadas y ajustadas.

#### 4.10.12 Equipo de sinterización a través de FAST/SPS.

La matriz a diseñar es compatible con el equipo de sinterización de FAST/SPS, el cual está presente en el laboratorio de manufactura avanzada de la Universidad Técnica Federico Santa María del campus San Joaquín, el modelo presente en la universidad es el modelo HP D 10-SD de la marca FCT Systeme GmbH, esta máquina utiliza un prensado uniaxial y calentamiento por corriente continua la cual puede ser configurada de dos maneras, de forma constante o pulsante, además esta máquina se puede usar en condiciones de vacío o con atmosfera inerte de hidrogeno, helio o argón, a continuación se presentan los datos técnicos del equipo en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Datos técnicos equipo HP D 10-SD. Fuente [15]

Variable	Valores
Fuerza de presión [kN]	3-100
Carrera de pistón [MM]	0-100
Dimensión máxima de diámetro de la matriz [mm]	240
Dimensión máxima del alto de la matriz [mm]	200
Temperatura de trabajo [°C]	2200
Temperatura máxima [°C]	2400
Rampa de calentamiento [K/min]	5-1000
Voltaje máximo [v]	7,2
Corriente continua máxima [A]	5500
Potencia máxima continua [kW]	37
Duración de pulso de CC [ms]	1-999
Duración de pausa entre pulsos de CC [ms]	0-999
Presión de trabajo atmosférica relativa [mbar]	20-60
Condición de vacío en horno frio y limpio [mbar]	$5 \times 10^{-2}$

Los datos presentados anteriormente en la tabla 4.3 pueden ser configurados dependiendo de las necesidades del trabajo a realizar, ya sea para los sistemas de calefacción, prensado, presión de trabajo atmosférica relativa, pulso de corriente, etc. [15].

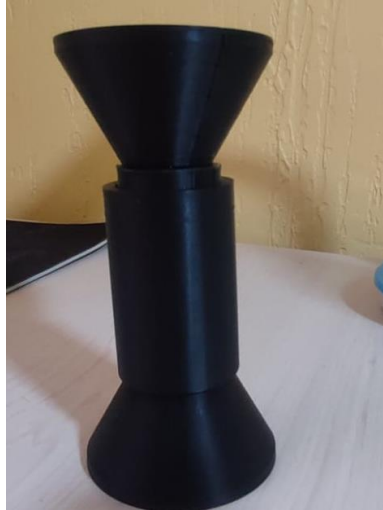
#### 4.11 Prototipo.

El prototipo desarrollado mediante el software SolidWorks e impreso en 3D demuestra que la incorporación de la camisa intermedia para facilitar la extracción del anillo, junto con la camisa exterior que la recubre, es funcional. Como se observa en la figura 4.27, esta configuración evita la expansión y desalineación durante la compresión, cumpliendo así uno de los objetivos más importantes del diseño.

Además, elementos como la guía anclada al punzón inferior, mostrados en la figura 4.26, también han probado ser funcionales. Sin embargo, es fundamental realizar pruebas físicas para garantizar que no se produzca un movimiento perjudicial para el anillo durante su fabricación.

Por último, este prototipo permite visualizar de manera integral la estructura de la matriz, como se muestra en la figura 4.18. Aquí se evidencia que la matriz mantiene una correcta posición al ejercer presión, evitando desviaciones que puedan comprometer las medidas finales del anillo.

Es importante mencionar que todas las medidas y planos para poder visualizar con exactitud cada elemento de la matriz se encuentran en la sección 7.4 del anexo.



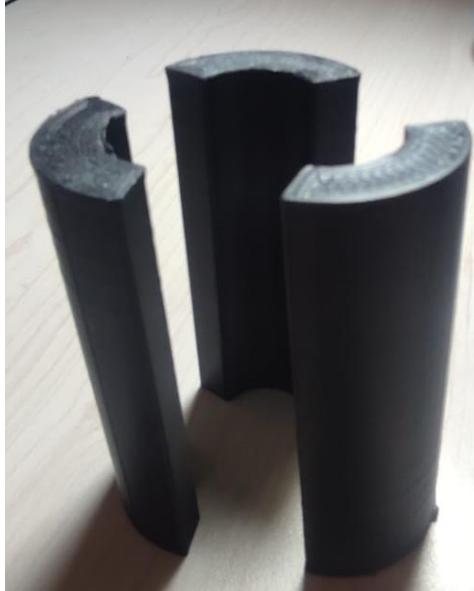
*Figura 4.18 Prototipo de matriz en posición*



*Figura 4.19 Prototipo de adaptador superior.*



*Figura 4.20 Prototipo de punzón superior.*



*Figura 4.21 Prototipo de camisa intermedia.*



*Figura 4.22 Prototipo de camisa exterior.*



*Figura 4.23 Prototipo de guía.*



*Figura 4.24 Prototipo de punzón inferior.*



*Figura 4.25 Prototipo de adaptador inferior*



*Figura 4.26 Prototipo de conjunto adaptador inferior, punzón inferior y guía.*



*Figura 4.27 Prototipo de conjunto camisa intermedia y camisa exterior.*

## Capítulo 5 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló el diseño de una matriz con el fin de realizar anillos de alta densidad sintetizados por el proceso FAST/SPS. Se establecieron las funciones más importantes que la matriz debe cumplir para garantizar el éxito del proceso, entre las cuales destacan: permitir la sinterización del polvo de material a alta densidad, dar la forma precisa y final del anillo y garantizar una distribución uniforme de la temperatura y la presión durante el proceso de sinterización.

Se establecieron requisitos técnicos clave para la matriz que garantizarán la conformación precisa del anillo. La matriz mantiene un diámetro exterior de 20 [mm] y un diámetro interior de 10 [mm], con tolerancias menores a  $\pm 0.05$  [mm], asegurando una alta precisión dimensional. Su diseño simétrico distribuye uniformemente la presión y la corriente eléctrica durante el proceso de sinterización, y con la camisa intermedia diseñada para la extracción fácil del anillo. Además, el material de la matriz el cual es el grafito soporta temperaturas de hasta 2400 [°C] sin deformarse, teniendo baja conductividad térmica para evitar la disipación de calor. El diseño de la matriz resiste las altas presiones de 50 [MPa] durante el proceso de compactación del polvo, sin sufrir deformaciones, permitiendo mantener la geometría del anillo.

Se desarrollaron tres conceptos de matrices que podrían cumplir con los requisitos técnicos establecidos: El concepto 1 está compuesto por un adaptador simple sin adición, separado del punzón, y una camisa diseñada para realizar un solo anillo a la vez. Este diseño se enfoca en la optimización de la geometría para una sola pieza, lo que permite un mayor control sobre las dimensiones y características específicas del producto final, garantizando la precisión en el proceso de sinterización. El concepto 2 utiliza un adaptador escalonado para aumentar la eficiencia, una camisa adaptada para sinterizar varias piezas a la vez, y un punzón que permite colocar múltiples muestras de manera simultánea. El enfoque de este concepto está en maximizar la eficiencia del proceso al crear una cavidad que pueda albergar varios anillos dispuestos de forma paralela, lo que incrementa la producción sin comprometer la calidad del sinterizado. Y el concepto 3 incluye un adaptador unido al punzón, una camisa que se secciona en múltiples partes y un punzón tipo eje, que está integrado con el punzón. El objetivo de este concepto es incrementar la producción de piezas al utilizar una camisa que permite disponer las muestras en serie, es decir, colocándolas una encima de otra. Esta configuración optimiza el uso del espacio dentro del molde y permite sinterizar varias muestras simultáneamente, lo que aumenta la eficiencia del proceso.

Con un puntaje de 18,19, el Concepto 1 fue seleccionado como la opción viable para el desarrollo del diseño de la matriz, superando al Concepto 2, que obtuvo un puntaje de 16,18, y al Concepto 3, que obtuvo un puntaje de 15,47. Los criterios más importantes evaluados fueron la capacidad de maximizar las propiedades mecánicas y la resistencia al desgaste, así como asegurar una precisión dimensional adecuada para los diámetros exteriores e interiores. En estos aspectos, el Concepto 1 demostró ser claramente el ganador, ya que ofrece un control más preciso sobre las dimensiones y características del producto final, garantizando una mayor confiabilidad en el proceso de sinterización.

Y, por último, el prototipo generado mediante el software SolidWorks e impreso en 3D valida la funcionalidad del diseño propuesto para la matriz. La integración de la camisa intermedia y la camisa exterior demuestra ser efectiva para garantizar la extracción adecuada del anillo y prevenir su expansión o desalineación durante la compresión. Asimismo, la incorporación de la guía anclada al punzón inferior aporta estabilidad al sistema, aunque será esencial confirmar su desempeño mediante pruebas físicas para evitar movimientos que puedan comprometer la calidad del anillo. En general, el prototipo permite visualizar la estructura completa de la matriz.

# Bibliografía

- [1] Suárez, M., Fernández, A., Menéndez, J. L., Torrecillas, R., Kessel, H. U., Hennicke, J., ... & Kessel, T. (2013). Challenges and opportunities for spark plasma sintering: a key technology for a new generation of materials. *Sintering applications*, 13, 319-342.
- [2] Guillon, O., Gonzalez-Julian, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schiering, G., Räthel, J., & Herrmann, M. (2014). Field-assisted sintering technology/spark plasma sintering: mechanisms, materials, and technology developments. *Advanced Engineering Materials*, 16(7), 830-849.
- [3] Sharma, N., Alam, S. M., & Ray, B. C. (2019). Fundamentals of Spark Plasma Sintering (SPS): An Ideal Processing Technique for Fabrication of Metal Matrix Nanocomposites. En Springer eBooks (pp. 21-59). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05327-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05327-7_2)
- [4] Ferrando Cerdá, M. (2013). Estudio sobre la sinterización mediante microondas de materiales de circonia nanométrica obtenida a través de conformado coloidal (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [5] Lara Marro, G. D. P. (2009). Estudio de factibilidad de sintetizar carburo de silicio biomórfico mediante efecto Joule.
- [6] Mamedov, V. (2002). Spark plasma sintering as advanced PM sintering method. *Powder Metallurgy*, 45(4), 322-328.
- [7] Mantilla Quijano, G. (1985). La ley de Joule.
- [8] Draghi, C. E. N. (2004). *Transport and Structural Properties of Aqueous Solutions of Organic Solvents* (Doctoral dissertation, Universitat Rovira i Virgili).
- [9] Nieto Draghi, C. E. (2003). Transport and Structural Properties of Aqueous Solutions of Organic Solvents.
- [10] ARIAS-MAYA, L. S. FREE AND CONSTRAINED SINTERING OF 3-MOL% YTTRIA STABILISED ZIRCONIA SINTERIZADO LIBRE Y CON RESTRICCIÓN DE ZIRCONIA PARCIALMENTE ESTABILIZADA CON ITRIA 3-MOL%. *Microwave heating and separation of water-in-oil emulsion from mexican crude oil\_16*, 158.
- [11] Zubillaga, I. I. (1992). *Densificación y microestructura de materiales ceramicos de nitruro de silicio obtenidos mediante sinterización y compactación isostática en caliente* (Doctoral dissertation, Universidad de Navarra).
- [12] Haro Rodríguez, M. V. (2015). Desarrollo de intermetálicos TiAl mediante técnicas pulvimetalúrgicas convencionales y de alta densificación (Spark Plasma Sintering).
- [13] Martínez, A. T., Luz, A. P., & Pandolfelli, V. C. (2013). Fluencia en materiales refractarios. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidro*, 52, 207-224.
- [14] Suárez, M., Fernández-González, D., Díaz, L. A., Piñuela-Noval, J., Borrell, A., Moya, J. S., ... & Fernández, A. (2023). Effect of Mo content on the properties of graphite–MoC composites sintered by spark plasma sintering. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- [15] FCT Systeme GmbH. (2018). OFFER Spark Plasma Sintering equipment type KCE®-FCT HP D 10 prepared for GloveBox. [info@fct-systeme.de](mailto:info@fct-systeme.de)

- [16] Grupo de estudio de materiales & Grupo de Física de nuevos materiales. (2007). DETERMINACION ESTRUCTURAL DEL GRAFITO MEDIANTE EL METODO RIETVELD y LA TEORIA DEL FUNCIONAL DENSIDAD. *REVISTA COLOMBIANA DE FISICA*, 39(No.1).
- [17] Torres Gamarra, D. (2016). *NANOFILAMENTO DE CARBONO OBTENIDOS MEDIANTE DESCOMPOSICION CATALITICA DE CORRIENTES RICAS EN METANO COMO PRECURSORES DE MATERIALES GRAFENICOS*. Universidad de Zaragoza.
- [18] Carvajal, A., Zambrano, G., Rincón, C., & Galindo, H. (2000). PROPIEDADES ELECTRICAS DE MULTICAPAS DE CARBURO DE TUNGSTENO/CARBONO TIPO DIAMANTE. *REVISTA COLOMBIANA DE FISICA*, VOL. 32(No. 2).
- [19] ROJAS, D., & SUAREZ, L. (2003). *ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE y PROPIEDADES MECANICAS DE PIEZAS SINTERIZADAS*. UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA.
- [20] Valle Corona, G. (2010). *EFEECTO DEL MOLIBDENO y PARÁMETROS DE PROCESO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA ALEACIÓN BASE HIERRO*". CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.
- [21] Campbell-Smith, P. (2014). *Sinterización por spark plasma Sintering (SPS) de materiales compuestos para herramientas de corte*. UNIVERSIDAD DE OVIEDO.
- [22] Gimeno Garcia, J. (2018). *Revisión de diversas técnicas de sinterización eléctrica*. Dpto. Ciencia e Ingeniería de los Materiales y del Transporte Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- [23] Universidad de Sevilla. (s. f.). *Bases teóricas de sinterización*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5405/fichero/2-Bases+teoricas.pdf>.
- [24] Dolz Ripollés, A. (2019). *Estudio de la tecnología de sinterizado por resistencia eléctrica (ERS) y caracterización metalúrgica de las piezas obtenidas*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
- [25] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2012). *Principles of Physics: A Calculus-Based Text, Volume 2* (Vol. 2). Cengage Learning.
- [26] Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2010). *Mecánica de materiales* (No. TA405. B43 1994.). Mc Graw Hill.
- [27] VoXELMATTERS. (2021). *A closer look at FAST/SPS spark plasma sintering technology*. Voxelmatters. <https://www.voxelmatters.com/a-closer-look-at-fast-sps-spark-plasma-sintering-technology>
- [28] Valores de Emisividad para Superficies Comunes. (s/f). [Flukeprocessinstruments.com](https://www.flukeprocessinstruments.com). Recuperado el 15 de junio de 2023, de <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/emissivity-non-metals>
- [29] Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana.
- [30] HERNANDEZ, L. L. (2022). *Desarrollo y manufactura de un inserto como herramienta de corte por el método de metalurgia de polvos*.

- [31] Ozols, A. (1998). Producción y caracterización de polvos metálicos obtenidos por atomización y enfriado rápido. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- [32] Guillon, O., Gonzalez-Julian, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schierning, G., Räthel, J., & Rädels, T. (2014). Field-Assisted Sintering Technology/Spark Plasma Sintering: Mechanisms, Materials, and Technology Developments. *Advanced Engineering Materials*.
- [33] German, R. M. (2014). *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles*. Elsevier.
- [34] Guillon, O., Gonzalez-Julian, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schierning, G., Räthel, J., & Templeman, C. (2014). Field-assisted sintering technology/Spark plasma sintering: Mechanisms, materials, and technology developments. *Advanced Engineering Materials*.
- [35] Munir, Z. A., Anselmi-Tamburini, U., & Ohyanagi, M. (2011). The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method. *Journal of Materials Science*
- [36] Zhang, H., Zhao, Y., & Zhang, X. (2020). Recent developments in high-performance Spark Plasma Sintering of advanced materials: A review. *Journal of the European Ceramic Society*
- [37] Rodríguez, Á. S. M., Shimomoto, E. K., Silverio, R., del Pino, G. G., Méndez, C. A. C., & Rodríguez, J. L. M. (2017). *SINTERIZACIÓN, UN PROCESO DE CONFORMACIÓN DE METALES COMO ALTERNATIVA ECONÓMICA CON UN BAJO IMPACTO AMBIENTAL*.
- [38] *PULVIMETALURGIA*. (s. f.).  
<https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgia/files/documentos/capitulo22.pdf>
- [39] Patterson, G., & Sobral, M. (2007). Efecto Peltier. *Departamento de Física FCEyN, Universidad de Buenos Aires. Dic.*
- [40] FCT Systeme. (s.f.). *Spark Plasma / Field Assisted Sintering (SPS/FAST)*. Recuperado de <https://www.calnanocorp.com/sintering-cryogenic-milling-and-machining-services/sintering-bonding-hip/spark-plasma-field-assisted-sintering-spsfast>
- [41] VoXELMATTERS. (2021). *A closer look at FAST/SPS spark plasma sintering technology*. Voxelmatters. <https://www.voxelmatters.com/a-closer-look-at-fast-sps-spark-plasma-sintering-technology>
- [42] Zhang, H., & Li, X. (2020). Fabrication of SiC ceramics by spark plasma sintering (SPS) and its applications in high-performance components. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(1), 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.09.013>
- [43] *Differences between Alpha and Gamma Alumina nanoparticles*. (2024). NANOGRAFI EXPLAINS. <https://nanografi.com/blog/differences-between-alpha-and-gamma-alumina-nanoparticles/>
- [44] Rao, C. N. R., & Mahadevan, S. (2015). *Alumina: Properties, applications, and processing*. *Materials Science and Engineering Reports*, 64(1), 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2015.06.001>
- [45] Sharma, R. S., & Jindal, K. (2020). *Characterization of alumina ceramics for advanced applications*. *Journal of Advanced Materials Science and Technology*, 35(8), 1123-1135. <https://doi.org/10.1016/j.jamst.2020.04.003>

[46] *Matriz de grafito de alta densidad Sps.* (s. f.). [Vídeo]. Made-in-China.com. [https://es.made-in-china.com/co\\_hangcarbon/product\\_High-Density-Sps-Graphite-Die-Mold\\_yuunuyhnug.html](https://es.made-in-china.com/co_hangcarbon/product_High-Density-Sps-Graphite-Die-Mold_yuunuyhnug.html)

[47] *MERSEN / Presión / plasma de chispa / sinterización / grafito iso / molde / golpe / troquel.* (s. f.). <https://www.mersen.es/es/productos/especialidades-en-grafito/grafito-isostatico-y-grafito-extruido/sinterizado>

# 7 Anexos

## 7.1 Casa de la calidad.

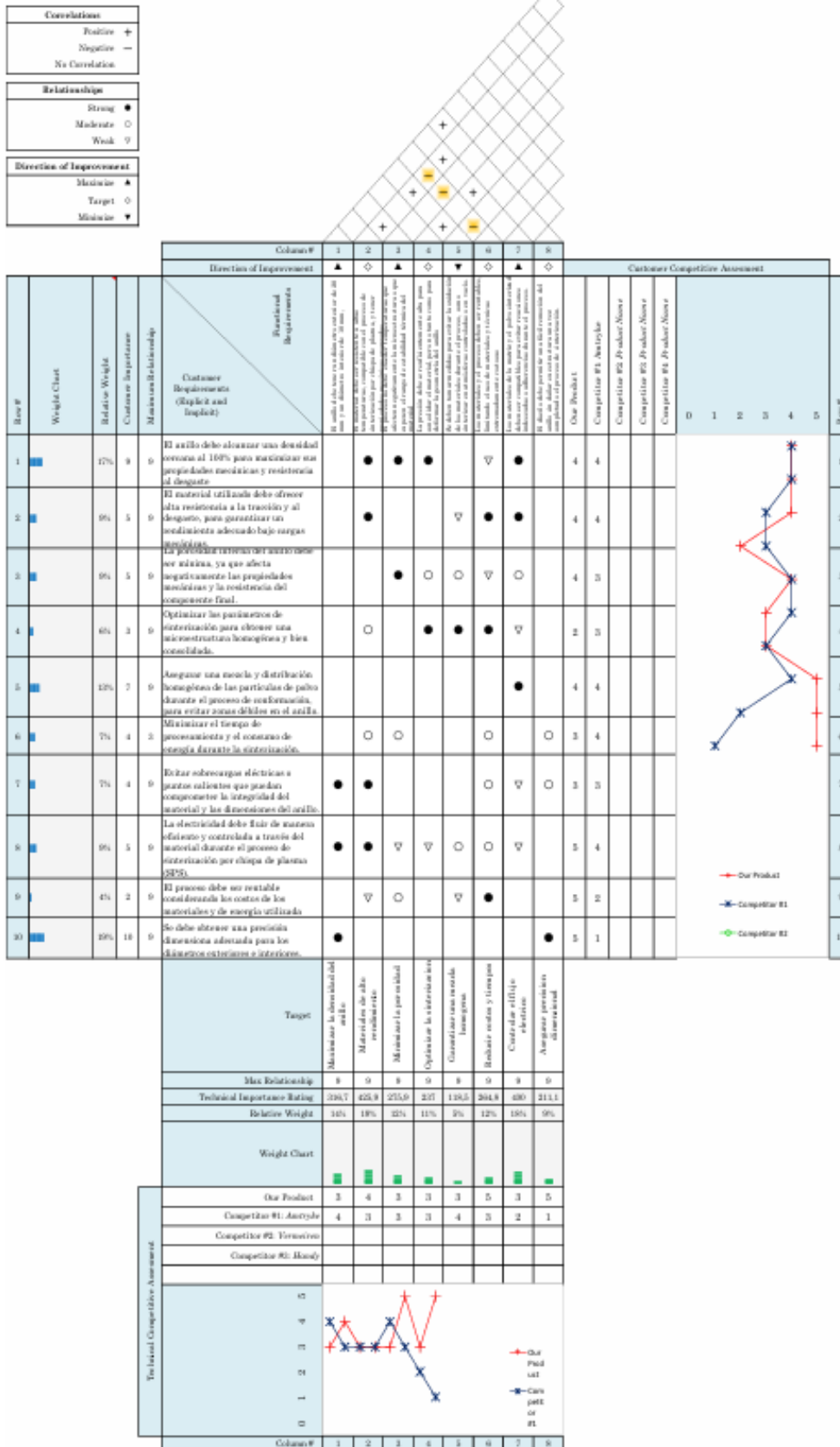


Figura 7.1 Matriz QFD de la matriz de sinterización de anillos

## 7.2 Tabla de pesos

*Tabla 7.1 Tabla peso del grupo 1*

G1	1.1	1.2	Suma	Relativo	Absoluto
1.1 El material utilizado debe ofrecer alta resistencia mecánica a la compresión, alta densidad.	1	0,90	1,90	80%	1,52
1.2 Los materiales de la matriz y el polvo sinterizado deben ser compatibles para evitar reacciones indeseadas o adherencias durante el proceso	0,83	1	1,83	20%	0,37
Subtotal			3,73	100%	1,89

*Tabla 7.2 Tabla peso del grupo 2*

G2	2.1	2.2	2.3	Suma	Relativo	Absoluto
2.1 Se debe obtener una precisión dimensional adecuada para los diámetros exteriores e interiores.	1	2	0,4	3,4	70%	2,38
2.2 El diseño debe permitir una fácil remoción del anillo sin dañar su estructura una vez completado el proceso de sinterización.	0,20	1	2,5	3,7	20%	0,74
2.3 Se debe evitar sobrecargas eléctricas o puntos calientes que puedan comprometer la integridad del material y las dimensiones del anillo.	0,25	0,7	1	1,95	10%	0,20
Subtotal				9,05	100%	3,32

*Tabla 7.3 Tabla peso del grupo 3*

G3	3.1	3.2	Suma	Relativo	Absoluto
3.1 La porosidad interna del anillo debe ser mínima, ya que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la resistencia del componente final.	1	2	3	50%	1,50
3.2 La electricidad debe fluir de manera eficiente y controlada a través del material durante el proceso de sinterización por chispa de plasma (SPS).	0,50	1	1,50	50%	0,75
Subtotal			4,50	100%	2,25

*Tabla 7.4 Tabla peso del grupo 4*

G4	4.1	Suma	Relativo	Absoluto
4.1 Los materiales y el proceso deben ser rentables, limitando el uso de materiales y técnicas extremadamente costosas.	1	1	1	1
Subtotal		1	100%	1

## 7.3 Memoria de calculo

### 7.3.1 Análisis mecánico

Para poder analizar la resistencia mecánica del sistema se debe analizar los elementos críticos presentes en este, para este caso se analiza de comienzo la muestra y la carcasa intermedia que son los dos elementos más críticos para evaluar

#### Muestra

Datos

Para poder realizar los cálculos se asumen ciertos valores que están señalados en (\*)

Dext: 0.02 [m]

Dint: 0.01 [m]

Presión: 50 [MPa] (\*)

Entonces se calcula la fuerza que interactúa con la muestra con los datos dados, iniciando con el cálculo del área de contacto

$$A_{muestra} = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$

$$A_{muestra} = \pi * (0.01^2 - 0.005^2)$$

$$A_{muestra} = 0.0002 [m^2]$$

Con la fórmula de presión se obtiene la fuerza que se aplica

$$F = P * A_{muestra}$$

$$F = 50000000 [Pa] * 0.0002 [m^2]$$

$$F = 11750 [N]$$

#### Camisa intermedia

Es de suma importancia entender las interacciones que presentan a camisa por la presión ejercida por los polvos metálicos sobre la camisa intermedia, por lo tanto, se calculan estas interacciones

Datos

h\_muestra=0.01 [m]

Dext=0.04 [m]

D\_int=0.02 [m]

F=11750 [N]

$$A_{camisa-muestra} = \pi * D_{ext} * h_{muestra}$$

$$A_{camisa-muestra} = \pi * 0.02 * 0.01$$

$$A_{camisa-muestra} = 0.0006 [m^2]$$

$$P_{radial} = \frac{F}{A_{camisa-muestra}}$$

$$P_{radial} = \frac{11750 [N]}{0.0006 [m^2]}$$

$$P_{radial} = 18 [MPa]$$

Con la presión ejercida por la muestra se debe considerar dos tipos de tensiones la tensión radial y circunferencial

$$\partial_r = \frac{P_{int} * R_{int}^2 - P_{ext} * R_{ext}^2 + (P_{ext} - P_{int}) * \frac{R_{int}^2 * R_{ext}^2}{R_{int}^2}}{R_{ext}^2 - R_{int}^2}$$

Para en este caso en específico la presión radial sobre la carcasa intermedia es igual a la presión

radial que general a la muestra sobre la camisa de 18 [MPa]

Ahora analizamos la tensión circunferencial en  $R=R_{int}$

$$\partial_{\theta} = \frac{P_{int} * R_{int}^2 * (1 + \frac{R_{ext}^2}{R_{int}^2})}{R_{ext}^2 - R_{int}^2}$$
$$\partial_{\theta} = \frac{18000000 [Pa] * 0.01^2 [m^2] * (1 + \frac{0.02^2 [m^2]}{0.01^2 [m^2]})}{0.02^2 [m^2] - 0.01^2 [m^2]}$$
$$\partial_{\theta} = 30 [MPa]$$

### Guía

Calculando bajo presión interna del cilindro

Datos

$D_{guia}=0.01 [m]$

$$\partial_r = \frac{P_{radial} * D_{guia}}{2 * h_{muestra}}$$
$$\partial_r = \frac{18000000 [Pa] * 0.01 [m]}{2 * 0.01 [m]}$$
$$\partial_r = 9 [MPa]$$

$$\partial_{\theta} = \frac{P_{radial} * D_{guia}}{h_{muestra}}$$
$$\partial_{\theta} = \frac{18000000 [Pa] * 0.01 [m]}{0.01 [m]}$$
$$\partial_{\theta} = 18 [MPa]$$

### Camisa exterior

Para el análisis de la camisa exterior buscamos en el punto de la camisa intermedia mas alejado y que está en contacto con la camisa exterior para saber cuánta tensión recibe, el cual es  $R=R_{ext}$  entonces la tensión radias es igual a 0 ...

Analizando la tensión circunferencial en  $R=R_{ext}$

Datos

$D_{int}= 0.02 [m]$

$D_{ext}= 0.04[m]$

$$\partial_{\theta} = \frac{P_{int} * R_{int}^2}{R_{ext}^2 - R_{int}^2}$$
$$\partial_{\theta} = \frac{18000000 [Pa] * 0.01^2 [m^2]}{0.02^2 [m^2] - 0.01^2 [m^2]}$$
$$\partial_{\theta} = 6 [MPa]$$

### **Punzón superior y punzón inferior**

Para el punzón se mantiene la fuerza axial presentada en el calculo de fuerza de la muestra debido a que no hay otra acción que afecte al punzón superior y punzón inferior, además que se tiene la misma área de contacto de fuerza por lo cual es el mismo valor tanto para fuerza como de presión.

### **Adaptador superior y adaptador inferior**

Al igual que los punzones no hay fuerzas externas que afecten a la fuerza axial que se presenta es por lo que se mantiene la fuerza presentada en la sección de la muestra, solo se hace el análisis de la presión que debe soportar el diámetro más grande del adaptador

Datos

$$D=0.08[m]$$

$$F=11750[N]$$

Se calcula el área de la superficie mayor para obtener la presión que debe soportar

$$\begin{aligned} A &= \pi * R^2 \\ A &= \pi * 0.04^2 \\ A &= 0.005 [m^2] \end{aligned}$$

Entonces la presión sería

$$\begin{aligned} P &= \frac{F}{A} \\ P &= \frac{11750 [N]}{0.005 [m^2]} \\ P &= 2 [MPa] \end{aligned}$$

### **7.3.2 Resistencia eléctrica**

Para poder analizar la resistencia eléctrica del sistema se debe analizar los elementos críticos presentes en este, para este caso se analiza de comienzo la muestra y la carcasa intermedia que son los dos elementos más críticos para evaluar

Es de importancia conocer la corriente eléctrica que debe pasar por el sistema es por eso que busca este valor, por lo tanto, se ocupa la ecuación a continuación para encontrar la corriente eléctrica

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

Donde I es corriente eléctrica y R es resistencia eléctrica, pero como es un sistema acoplado en distintas partes de crucial saber cómo se comporta las resistencias eléctricas del sistema como se muestra en la figura..., por lo tanto, se analiza cada componente para obtener su resistencia eléctrica.

### **Muestra**

Para este caso se asume un material que presenta las cualidades promedias para poder sinterizarlo con FAST/SPS y mantenga las propiedades mecánicas deseados el renio (\*).

Datos

Densidad del renio ( $\rho$ ) = 21020 [kg/m<sup>3</sup>]

Resistividad del renio ( $p$ ) =  $1.1 \cdot 10^{-7}$  [ $\Omega \cdot m$ ]

Largo de la muestra (L) = 0.01 [m]

Altura (h) = 0.01 [m]

R\_ext = 0.01 [m]

R\_int = 0.005 [m]

La fórmula de la resistencia es

$$R = p * \frac{L}{A}$$

Se busca el área de la muestra

$$A_{muestra} = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$

$$A_{muestra} = \pi * (0.01^2 - 0.005^2)$$

$$A_{muestra} = 0.0002 [m^2]$$

Se calcula la resistencia

$$R = 1.1 * 10^{-7} * \frac{0.01}{0.0002}$$

$$R = 4.67 * 10^{-3} [\Omega]$$

También se calcula la masa del material estimado para usarlos mas adelante

$$m = V * \rho$$

El volumen es

$$V = A * h$$

$$V = 0.0002 * 0.01$$

$$V = 0.000002 [m^3]$$

Entonces la masa

$$m = 0.000002 [m^3] * 21020 [kg/m^3]$$

$$m = 0.042 [kg]$$

### **Punzón superior**

Para este caso se asume un material que presenta las cualidades promedias para poder sinterizarlo con FAST/SPS y mantenga las propiedades mecánicas deseados el grafito (\*).

Datos

Densidad del grafito ( $\rho$ ) = 1500 [kg/m<sup>3</sup>]

Resistividad del grafito ( $p$ ) =  $8 \cdot 10^{-6}$  [ $\Omega \cdot m$ ]

Largo del punzón (L) = 0.01 [m]

Altura (h) = 0.035 [m]

R\_ext = 0.01 [m]

R\_int = 0.005 [m]

La fórmula de la resistencia es

$$R = p * \frac{L}{A}$$

Se busca el área de la muestra

$$A_{muestra} = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$
$$A_{muestra} = \pi * (0.01^2 - 0.005^2)$$
$$A_{muestra} = 0.0002 [m^2]$$

Se calcula la resistencia

$$R = 8 * 10^{-6} * \frac{0.035}{0.0002}$$
$$R = 1.4 * 10^{-3} [\Omega]$$

También se calcula la masa del material estimado para usarlos más adelante

$$m = V * \rho$$

El volumen es

$$V = A * h$$
$$V = 0.0002 * 0.035$$
$$V = 0.00007 [m^3]$$

Entonces la masa

$$m = 0.00007 [m^3] * 1500 [kg/m^3]$$

$$m = 0.105 [kg]$$

### **Punzón inferior**

Para el punzón inferior se mantiene la geometría del punzón superior por lo tanto los valores de resistencia y masa son iguales

$$R = 1.4 * 10^{-3} [\Omega]$$
$$m = 0.105 [kg]$$

### **Guía**

Largo del punzón (L)=0.025[m]

Altura (h)= 0.025[m]

R=0.005 [m]

La fórmula de la resistencia es

$$R = p * \frac{L}{A}$$

Se busca el área de la muestra

$$A_{muestra} = \pi * R^2$$
$$A_{muestra} = \pi * 0.005^2$$
$$A_{muestra} = 0.00007 [m^2]$$

Se calcula la resistencia

$$R = 8 * 10^{-6} * \frac{0.025}{0.00007}$$
$$R = 2 * 10^{-3} [\Omega]$$

También se calcula la masa del material estimado para usarlos más adelante

$$m = V * \rho$$

El volumen es

$$V = A * h$$

$$V = 0.025 * 0.00007$$

$$V = 0.000001 [m^3]$$

Entonces la masa

$$m = 0.000001 [m^3] * 1500 [kg/m^3]$$

$$m = 0.002 [kg]$$

### Adaptador superior

Largo del punzón (L)=0.045[m]

Altura (h)= 0.045[m]

R<sub>sup</sub>=0.04 [m]

R<sub>inf</sub>=0.022 [m]

La fórmula de la resistencia para formas cónicas como le adaptador

$$R = \frac{p * h}{\pi * R_{sup} * R_{inf}}$$

Se calcula la resistencia

$$R = \frac{8 * 10^{-6} * 0.045}{\pi * 0.04 * 0.022}$$

$$R = 1.39 * 10^{-4} [\Omega]$$

También se calcula la masa del material estimado para usarlos más adelante

$$m = V * \rho$$

El volumen es

$$V = \frac{1}{3} * \pi * h * (R_{sup}^2 + R_{sup} * R_{inf} + R_{inf}^2)$$

$$V = \frac{1}{3} * \pi * 0.045 * (0.04^2 + 0.04 * 0.022 + 0.022^2)$$

$$V = 0.0001 [m^3]$$

Entonces la masa

$$m = 0.0001 [m^3] * 1500 [kg/m^3]$$

$$m = 0.2 [kg]$$

### Adaptador inferior

Para el adaptador inferior se mantiene la geometría del adaptador superior por lo tanto los valores de resistencia y masa son iguales

$$R = 1.39 * 10^{-4} [\Omega]$$

$$m = 0.2 [kg]$$

### Camisa intermedia

Largo del punzón (L)=0.074[m]

Altura (h)= 0.074[m]

R\_ext=0.02 [m]  
R\_int=0.01 [m]

La fórmula de la resistencia es

$$R = \rho * \frac{L}{A}$$

Se busca el área de la muestra

$$A_{muestra} = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$
$$A_{muestra} = \pi * (0.02^2 - 0.01^2)$$
$$A_{muestra} = 0.0009 [m^2]$$

Se calcula la resistencia

$$R = 8 * 10^{-6} * \frac{0.074}{0.0009}$$
$$R = 6.5 * 10^{-4} [\Omega]$$

También se calcula la masa del material estimado para usarlos más adelante

$$m = V * \rho$$

El volumen es

$$V = A * h$$
$$V = 0.0009 * 0.074$$
$$V = 0.00006 [m^3]$$

Entonces la masa

$$m = 0.00006 [m^3] * 1500 [kg/m^3]$$
$$m = 0.1 [kg]$$

### **Camisa exterior**

Largo del punzón (L)=0.074[m]  
Altura (h)= 0.074[m]  
R\_ext=0.025 [m]  
R\_int=0.02 [m]

La fórmula de la resistencia es

$$R = \rho * \frac{L}{A}$$

Se busca el área de la muestra

$$A_{muestra} = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$
$$A_{muestra} = \pi * (0.025^2 - 0.02^2)$$
$$A_{muestra} = 0.0007 [m^2]$$

Se calcula la resistencia

$$R = 8 * 10^{-6} * \frac{0.074}{0.0007}$$
$$R = 8.4 * 10^{-4} [\Omega]$$

También se calcula la masa del material estimado para usarlos más adelante

$$m = V * \rho$$

El volumen es

$$\begin{aligned}V &= A * h \\V &= 0.0007 * 0.074 \\V &= 0.00005 [m^3]\end{aligned}$$

Entonces la masa

$$\begin{aligned}m &= 0.00005 [m^3] * 1500 [kg/m^3] \\m &= 0.07 [kg]\end{aligned}$$

Sumando todas las resistencias

$$R_{total} = 0.0008 [\Omega]$$

Antes de saber el valor de la intensidad de corriente se busca el valor de la potencia necesarias para calentar la muestra a temperatura de trabajo

Datos

Temperatura de trabajo (T) = 2473 [K] (\*)  
Tiempo de sinterización (t) = 600 [s] (\*) (10 minutos)  
Capacidad calorífica grafito (c) = 710 [J/kg\*K]  
Capacidad calorífica renio (c) = 137 [J/kg\*K]

$$P = \frac{m * c * T}{t}$$

Esta potencia se debe calcular tanto para la suma total de los elementos de grafito como para los elementos de renio

Para el renio

$$\begin{aligned}P &= \frac{0.042 [kg] * 137 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] * 2473 [K]}{600 [s]} \\P &= 19 [W]\end{aligned}$$

Para el grafito

$$P = \frac{0.782 [kg] * 710 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] * 2473 [K]}{600 [s]}$$

$$P = 2526 [W]$$

Entonces el valor de la corriente eléctrica es

$$I = \sqrt{\frac{2545 [W]}{0.0008 [\Omega]}}$$

$$I = 1790 [A]$$

### 7.3.3 Transferencia de calor

Para la transferencia de calor de los elementos de la matriz, es considerar la temperatura de trabajo que se espera para la compactación de la pieza, como ya se mencionó anteriormente se asumió un material que se usara para muestra que es el renio y que va a tener una temperatura de trabajo de 2200 [°C], entonces se parte analizando el elemento crítico en relación con la transferencia de calor.

### Camisa intermedia

Datos

Conductividad térmica grafito (k) =150 [W/m\*K]

Grosor de la camisa intermedia (L)=0.02 [m]

Temperatura de trabajo (T)=2473 [K] (\*)

Para el cálculo del área se considera el área de contacto de la muestra con la camisa intermedia entonces

D=0.02 [m]

h=0.01 [m]

L=0.02 [m]

$$\begin{aligned}A_{contacto} &= \pi * D * h \\A_{contacto} &= \pi * 0.02 * 0.01 \\A_{contacto} &= 0.0006 [m^2]\end{aligned}$$

Entonces la transferencia de calor

$$Q = k * A * \frac{T}{L}$$

$$\begin{aligned}Q &= 150 * 0.0006 * \frac{2473}{0.02} \\Q &= 11115 [W]\end{aligned}$$

### Guía

Para el cálculo del área se considera el área de contacto de la muestra con la guía entonces

D=0.01 [m]

h=0.01 [m]

L=0.005 [m]

$$\begin{aligned}A_{contacto} &= \pi * D * h \\A_{contacto} &= \pi * 0.01 * 0.01 \\A_{contacto} &= 0.0006 [m^2]\end{aligned}$$

Entonces la transferencia de calor

$$Q = k * A * \frac{T}{L}$$

$$\begin{aligned}Q &= 150 * 0.0006 * \frac{2473}{0.005} \\Q &= 44460 [W]\end{aligned}$$

### Punzón superior y punzón inferior

Para el cálculo del área se considera el área de contacto de la muestra con el punzón entonces

D\_ext=0.02 [m]

D\_int=0.01 [m]

L=h=0.035 [m]

$$A_{contacto} = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$

$$A_{contacto} = \pi * (0.01^2 - 0.005^2)$$

$$A_{contacto} = 0.0002 [m^2]$$

Entonces la transferencia de calor

$$Q = k * A * \frac{T}{L}$$

$$Q = 150 * 0.0002 * \frac{2473}{0.035}$$

$$Q = 2117 [W]$$

Como el punzón superior y punzón inferior tienen la misma geometría y área de contacto la transferencia de calor será la misma para ambos.

### **Camisa exterior**

Para el cálculo del área se considera el área de contacto de la camisa Intermedia con la camisa exterior entonces

$$D = 0.04 [m]$$

$$h = 0.074 [m]$$

$$L = 0.01 [m]$$

$$A_{contacto} = \pi * D * h$$

$$A_{contacto} = \pi * 0.04 * 0.074$$

$$A_{contacto} = 0.009 [m^2]$$

Entonces la transferencia de calor

$$Q = k * A * \frac{T}{L}$$

$$Q = 150 * 0.009 * \frac{2473}{0.01}$$

$$Q = 344388 [W]$$

## 7.4 Hoja de proceso y planos.

<b>HOJA DE PROCESO</b>		N° de hoja: Hoja N°: 1	
Conjunto: Matriz para anillos de alta densidad	Pieza: Adaptador inferior	Material: Grafito	Autor:
Subconjunto:	Número de pieza: 001	Bruto:	Grupo:

N° de Fase Subfase Operac.	Descripción de:	Utillajes Herramientas Apar. de control	Condiciones de corte				Tiempo (min)	CROQUIS
			Vc m/min	N v/min	a mm/v	P mm		
1	Cilindrado 80 mm							
2	Cilindrado cónico							
3	Frenteado							
4	Re frenteado 45 mm							
5	Taladrado 5 mm							
6	Taladrado 20 mm							
7	Pulido exterior							

Figura 7.2 Hoja de proceso de adaptador inferior.

<b>HOJA DE PROCESO</b>		N° de hoja: Hoja N°: 1		
Conjunto: Matriz para anillos de alta densidad	Pieza: Adaptador superior	Material: Grafito	Autor:	
Subconjunto:	Número de pieza: 002	Bruto:	Grupo:	

N° de Fase Subfase Operac.	Descripción de:	Utillajes Herramientas Apar. de control	Condiciones de corte				Tiempo (min)	CROQUIS
			Vc m/m in	N v/mi n	a mm/ v	P mm		
1	Cilindrado 80 mm							
2	Cilindrado cónico							
3	Frentado							
4	Re frentado 45 mm							
5	Taladrado 10 mm							
6	Taladrado 20 mm							
7	Pulido exterior							

Figura 7.3 Hoja de proceso de adaptador superior.

<b>HOJA DE PROCESO</b>		N° de hoja: Hoja N°: 1		
Conjunto: Matriz para anillos de alta densidad	Pieza: Punzón inferior	Material: Grafito	Autor:	
Subconjunto:	Número de pieza: 003	Bruto:	Grupo:	

N° de Fase Subfase Operac.	Descripción de:	Utillajes Herramientas Apar. de control	Condiciones de corte				Tiempo (min)	CROQUIS
			Vc m/m in	N v/mi n	a mm/ v	P mm		
1	Cilindrado 20 mm							
2	Frenteado							
3	Re frenteado 35 mm							
4	Taladrado 10 mm							
5	Pulido exterior							

Figura 7.4 Hoja de proceso de punzón inferior.

<b>HOJA DE PROCESO</b>		Nº de hoja: Hoja Nº: 1		
Conjunto: Matriz para anillos de alta densidad	Pieza: Punzón superior	Material: Grafito	Autor:	
Subconjunto:	Número de pieza: 004	Bruto:	Grupo:	

Nº de Fase Subfase Operac.	Descripción de:	Utillajes Herramientas Apar. de control	Condiciones de corte				Tiempo (min)	CROQUIS
			Vc m/m in	N v/mi n	a mm/ v	P mm		
1	Cilindrado 20 mm							
2	Frenteado							
3	Re frenteado 35 mm							
4	Taladrado 10 mm							
5	Pulido exterior							

Figura 7.5 Hoja de proceso de punzón superior.

<b>HOJA DE PROCESO</b>		N° de hoja: Hoja N°: 1	
Conjunto: Matriz para anillos de alta densidad	Pieza: Guía	Material: Grafito	Autor:
Subconjunto:	Número de pieza: 005	Bruto:	Grupo:

N° de Fase Subfase Operac.	Descripción de:	Utillajes Herramientas Apar. de control	Condiciones de corte				Tiempo (min)	CROQUIS
			Vc m/m in	N v/mi n	a mm/ v	P mm		
1	Cilindrado 10 mm							
2	Frentado							
3	Re frentado 25 mm							
4	Taladrado 5 mm							
5	Pulido exterior							

Figura 7.6 Hoja de proceso de guía.

<b>HOJA DE PROCESO</b>		N° de hoja: Hoja N°: 1	
Conjunto: Matriz para anillos de alta densidad	Pieza: Camisa intermedia	Material: Grafito	Autor:
Subconjunto:	Número de pieza: 006	Bruto:	Grupo:

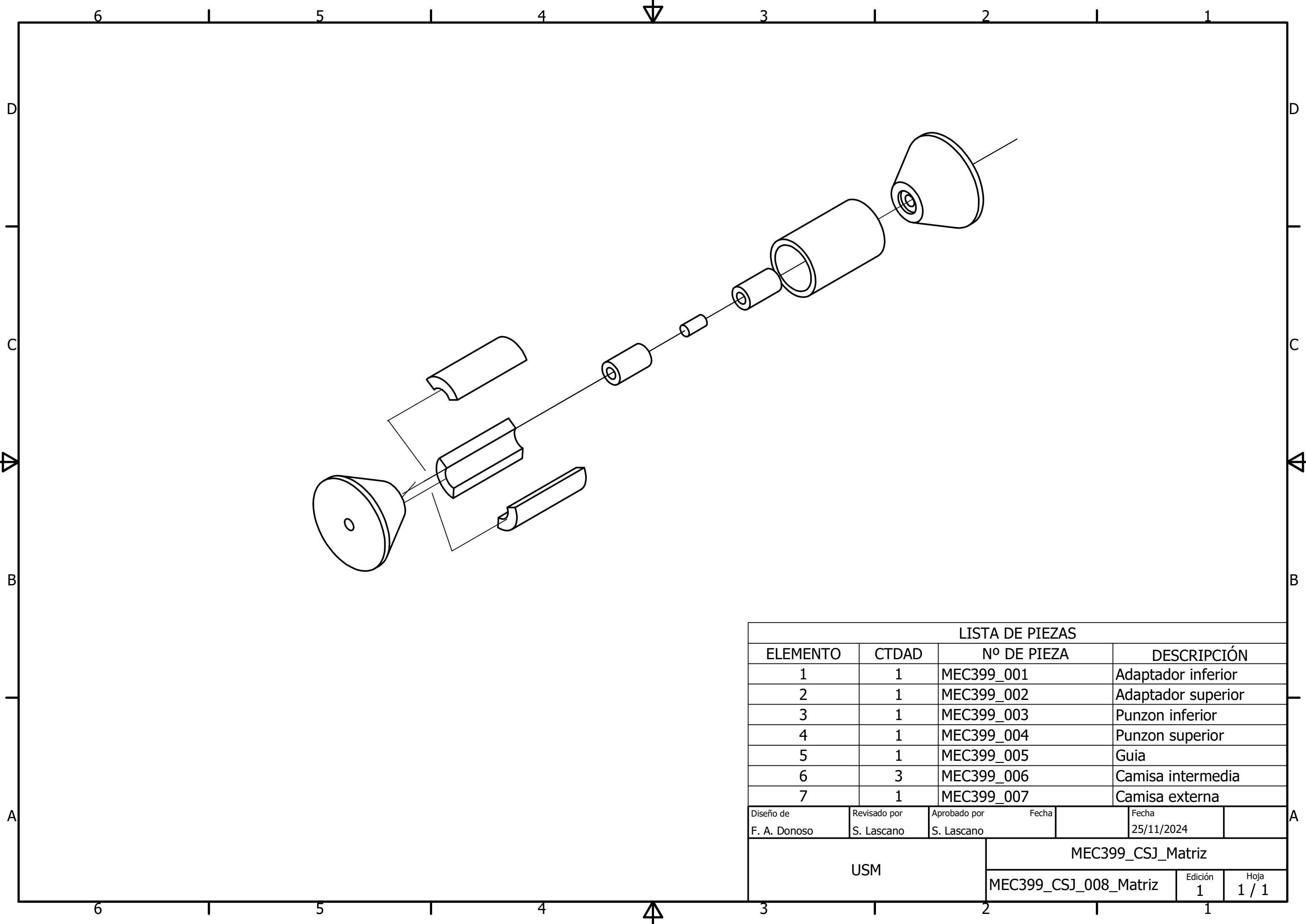
N° de Fase Subfase Operac.	Descripción de:	Utillajes Herramientas Apar. de control	Condiciones de corte				Tiempo (min)	CROQUIS
			Vc m/m in	N v/mi n	a mm/ v	P mm		
1	Cilindrado 40 mm							
2	Frenteado							
3	Re frenteado 74 mm							
4	Taladrado 20.06 mm							
5	Corte lineal							
6	Pulido exterior							

Figura 7.7 Hoja de proceso de camisa intermedia.

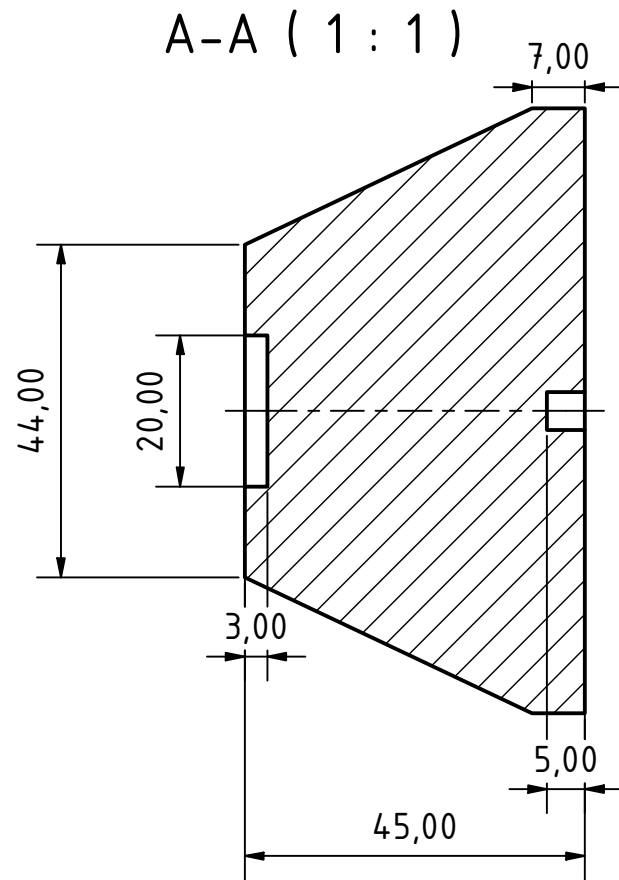
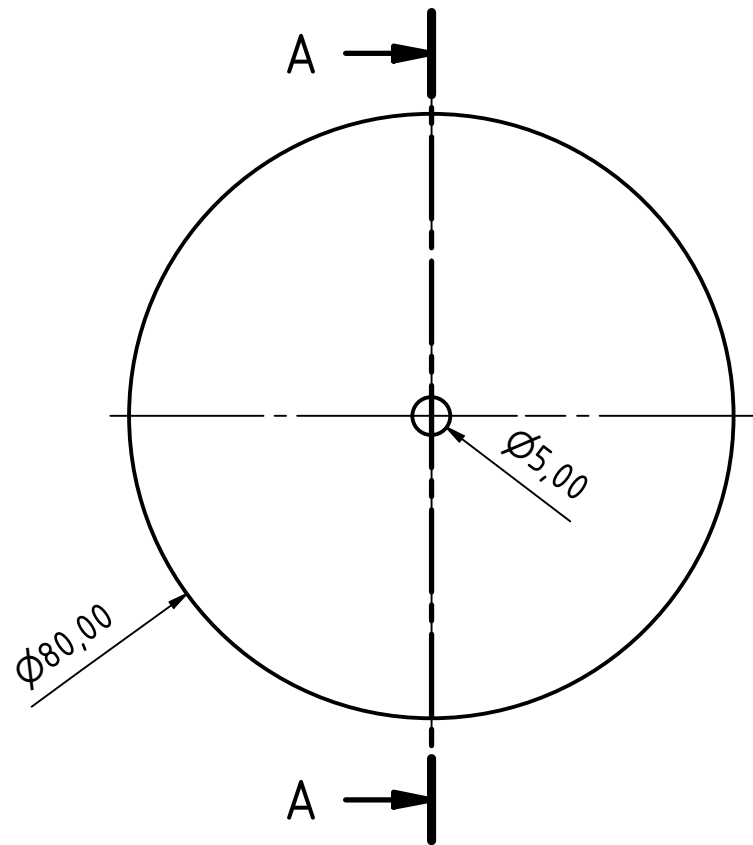
<b>HOJA DE PROCESO</b>		N° de hoja: Hoja N°: 1	
Conjunto: Matriz para anillos de alta densidad	Pieza: Camisa exterior	Material: Grafito	Autor:
Subconjunto:	Número de pieza: 007	Bruto:	Grupo:


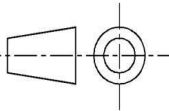
N° de Fase Subfase Operac.	Descripción de:	Utillajes Herramientas Apar. de control	Condiciones de corte				Tiempo (min)	CROQUIS
			Vc m/m in	N v/mi n	a mm/ v	P mm		
1	Cilindrado 50 mm							
2	Frenteado							
3	Re frenteado 74 mm							
4	Taladrado 40 mm							
5	Pulido exterior							

Figura 7.8 Hoja de proceso de camisa exterior.

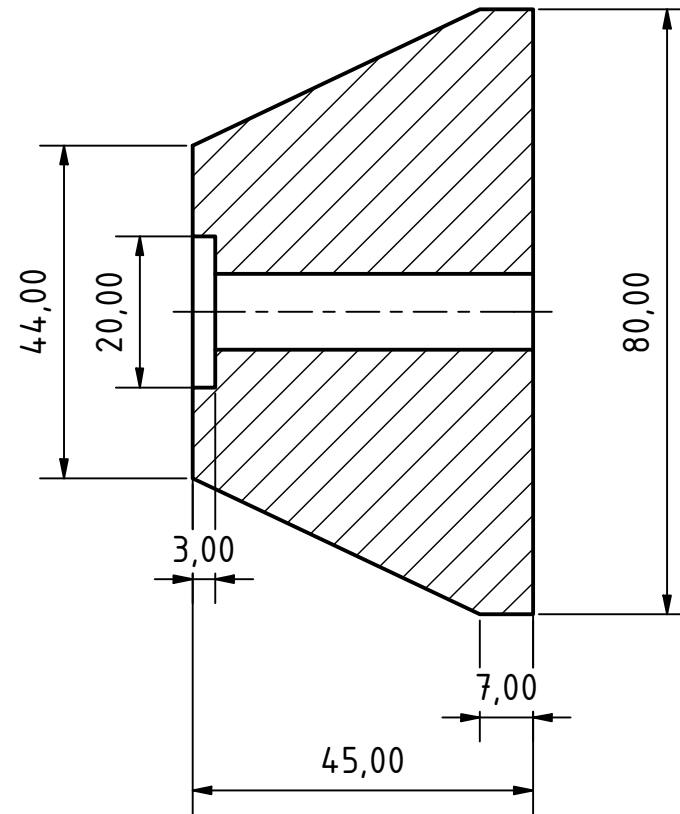
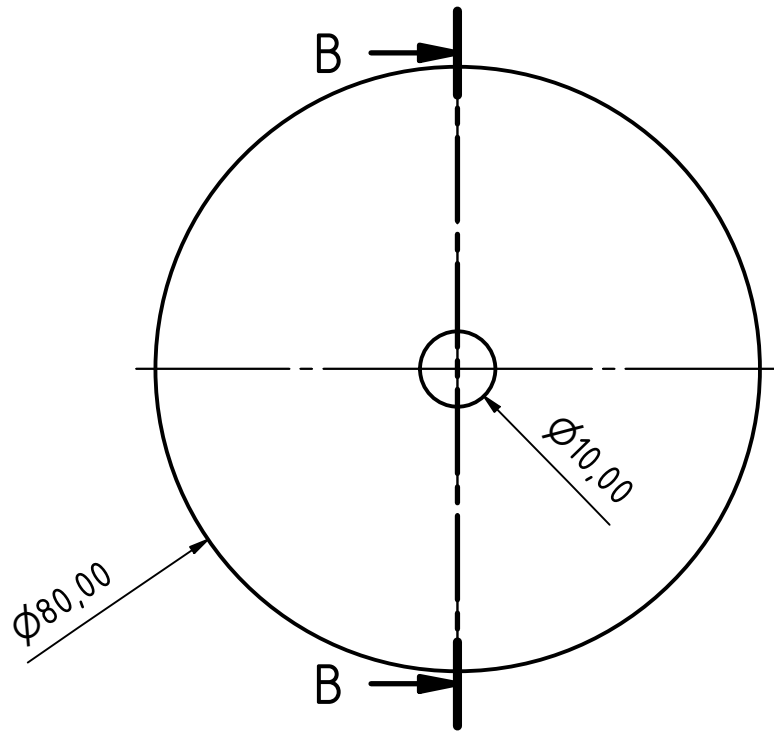



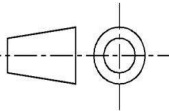
LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
1	1	MEC399_001	Adaptador inferior	
2	1	MEC399_002	Adaptador superior	
3	1	MEC399_003	Punzon inferior	
4	1	MEC399_004	Punzon superior	
5	1	MEC399_005	Guia	
6	3	MEC399_006	Camisa intermedia	
7	1	MEC399_007	Camisa externa	
Diseño de F. A. Donoso		Revisado por S. Lascano	Aprobado por S. Lascano	Fecha 25/11/2024
USM			MEC399_CSJ_Matriz	
			MEC399_CSJ_008_Matriz	Edición 1
Hoja 1 / 1				

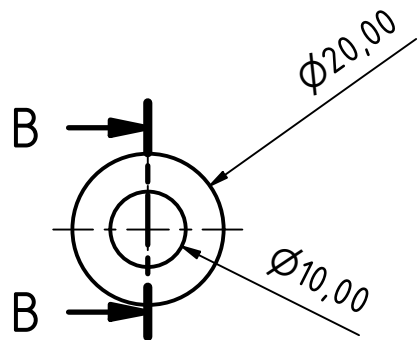


		Tolerancia: DIN 7168 medio	Medidas en [mm]
		Proyecto: Matriz para anillos de alta densidad	
Fecha	Nombre	MEC399_001_ADAPTADOR INF	
Creado	F. Donoso		
Revisado			
Norma			
MEC399_001		1	
Plano		Empresa:	Escala 1:1   Cantidad: 1
		A4	

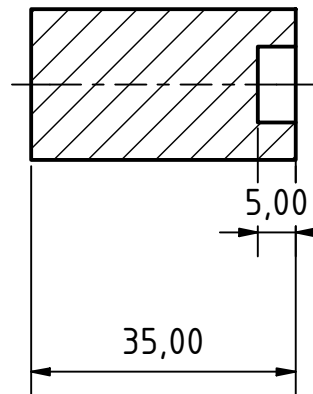
B-B ( 1 : 1 )


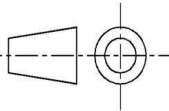


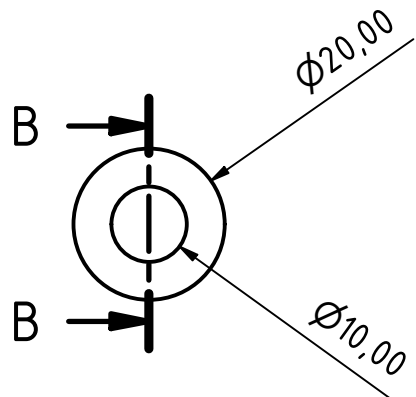
		Tolerancia: DIN 7168 medio	Medidas en [mm]
		Proyecto: Matriz para anillos de alta densidad	
Fecha	Nombre	MEC399_002_ADAPTADOR SUP	
Creado 09/12/2024	F. Donoso		
Revisado			
Norma			
		MEC399_002	1
Plano		Empresa:	Escala 1:1   Cantidad: 1
			A4



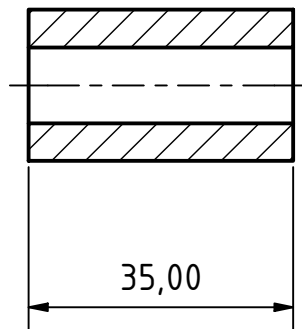
B-B ( 1 : 1 )


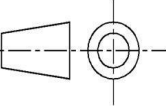


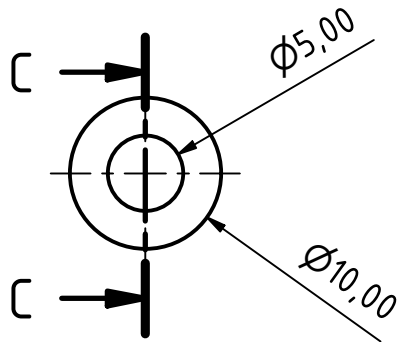
		Tolerancia: DIN 7168 medio		Medidas en [mm]	
		Proyecto: Matriz para anillos de alta densidad			
	Fecha	Nombre			
Creado	09/12/2024	F. Donoso			
Revisado					
Norma					
		MEC399_001_PUNZON INF			
		MEC399_003			1
Plano		Empresa:		Escala 1:1	Cantidad: 1
					A4



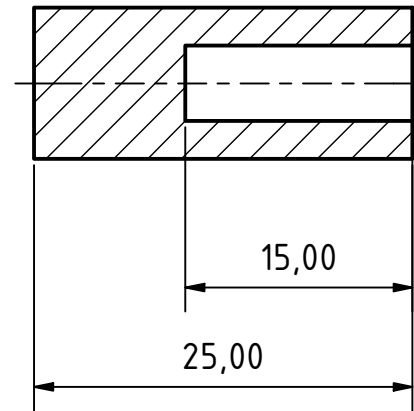
B-B ( 1 : 1 )




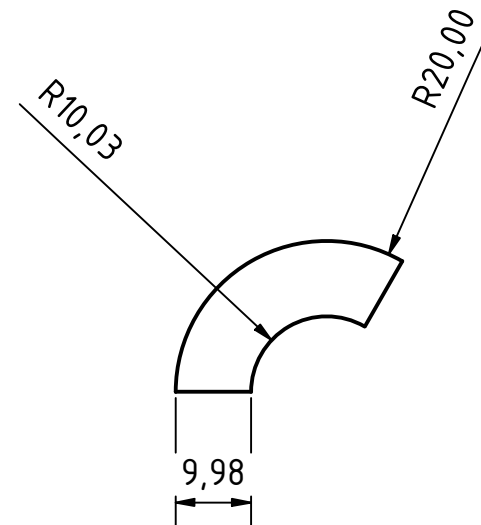
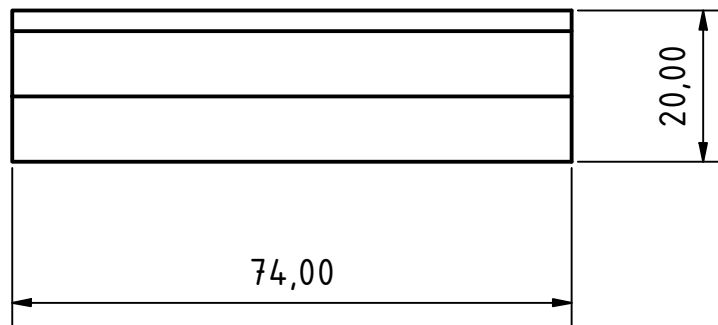
		Tolerancia: DIN 7168 medio	Medidas en [mm]
		Proyecto: Matriz para anillos de alta densidad	
	Fecha	Nombre	
Creado	09/12/2024	F. Donoso	
Revisado			
Norma			
		MEC399_004_PUNZON SUP	
		MEC399_004_PUNZON SUP	1
Plano		Empresa:	Escala 1:1   Cantidad: 1
			A4




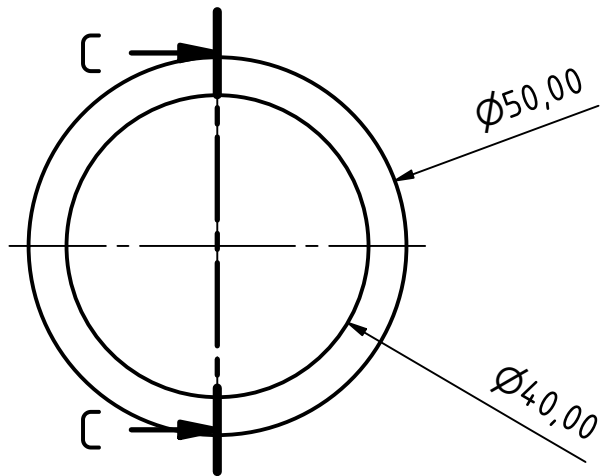
C-C ( 2 : 1 )



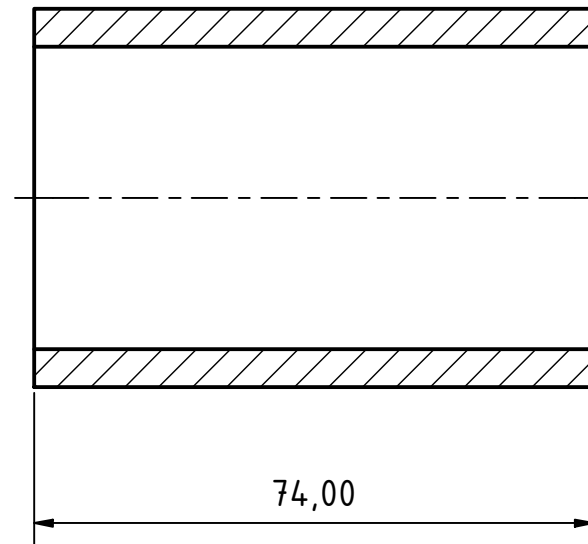
		Tolerancia: DIN 7168 medio		Medidas en [mm]
		Proyecto: Matriz para anillos de alta densidad		
	Fecha	Nombre		
Creado	09/12/2024	F. Donoso		
Revisado				
Norma				
		MEC399_005		1
				A4
Plano		Empresa:	Escala 1:1	Cantidad: 1


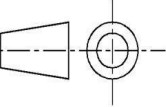


		Tolerancia: DIN 7168 medio		Medidas en [mm]	
		Proyecto: Matriz para anillos de alta densidad			
	Fecha	Nombre			
Creado	09/12/2024	F. Donoso			
Revisado					
Norma					
		MEC399_006			1
		MEC399_006			A4
Plano		Empresa:		Escala 1:1	Cantidad: 3



C-C ( 1 : 1 )



		Tolerancia: DIN 7168 medio	Medidas en [mm]
		Proyecto: Matriz para anillos de alta densidad	
Fecha	Nombre	MEC399_007_CAMISA EXTERIOR	
Creado 09/12/2024	F. Donoso		
Revisado			
Norma			
		MEC399_007	1
Plano		Empresa:	Escala 1:1   Cantidad: 1
			A4