



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE SINTERIZADO SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LOS PISTONES DE AMORTIGUADORES CONVENCIONALES.**

**Tutor académico:**  
Ing. Sandra Cabello

ALFREDO RODRÍGUEZ  
DIEGO CARRANZA

Naguanagua, Agosto de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE SINTERIZADO  
SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LOS  
PISTONES DE AMORTIGUADORES CONVENCIONALES.**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA  
ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR POR  
EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.**

Alfredo Rodríguez

Diego Carranza

**Tutor:** Ing. Sandra Cabello

Naguanagua, Agosto de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado asignado para estudiar el trabajo de grado titulado: **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE SINTERIZADO SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LOS PISTONES DE AMORTIGUADORES CONVENCIONALES**, realizado por los bachilleres; Alfredo Rodríguez C.I.: 19.230.840 y Diego Carranza C.I.: 18.264.768, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

---

**Tutor: Sandra Cabello**

---

**Jurado: Eleazar Díaz**

---

**Jurado: Luis Sidorovas**

Naguanagua, Agosto de 2011

## DEDICATORIA

*En primer lugar a mis padres, por ser quienes a lo largo de mi vida les han dado las fuerzas, los conocimientos, ejemplos y comprensión a todas mis metas.*

*A mi madre, por acompañarme fielmente, darme su apoyo incondicional y tener siempre esperanzas y mucha fe en mí durante toda mi carrera universitaria.*

*A mi padre, por ser la persona cuyo ejemplo me ha enorgullecido siempre, por su gran sabiduría, por sus grandes consejos, por darme la fuerza necesaria y por su esfuerzo y trabajo que han sido la base que sostiene nuestra familia.*

*A mi hermano, tíos, abuelos, primos y amigos, ya que de muchas maneras forman parte de esto.*

*En fin, a todo aquel que me deseó el mejor de los éxitos.*

**Alfredo Rodríguez**

## DEDICATORIA

*A Dios Todopoderoso por regalarme la oportunidad de vivir, ser venezolano y formar parte de mi gran familia; además de ayudarme a superar las adversidades que se me han presentado en el camino.*

*A mis Padres, Hermanos, Abuelos, Tías y Tíos, quienes me han apoyado en todo momento y han sido para mí ejemplo de constancia y de grandeza. Ellos son mi inspiración y lo que me impulsa a pensar en grande.*

*Muy especialmente a Mariela Villasmil, esa mujer inigualable, ejemplar y de un colosal optimismo, quien me ha dado todo el apoyo incondicional que he necesitado para el logro de ésta meta tan importante.*

*Finalmente, quiero hacer de éste trabajo de investigación un modesto homenaje a mi patria Venezuela, que me ha dado la oportunidad de formarme como un profesional orgulloso de mi idiosincrasia y de estudiar en una universidad pública.*

*A todos quiero expresarles mis más sinceros, efusivos y excelsos sentimientos por formar parte de éste gran sueño.*

**Diego Carranza**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A nuestras familias por darnos el apoyo para culminar nuestra carrera.*

*A la profesora Sandra Cabello por brindarnos la oportunidad de trabajar con ella en este trabajo de grado.*

*A todos los profesores que de alguna manera forman parte de esto.*

*A Yosmari Pérez por ayudarnos en todos y cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio de la Facultad.*

*A la empresa Gabriel de Venezuela, C.A., por habernos suministrado información y material indispensable para el desarrollo de la investigación.*

*Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (C.D.C.H), por habernos financiado los ensayos de Microscopía Electrónica de Barrido.*

*Al personal técnico que llevó a cabo los ensayos de Microscopía Electrónica de Barrido en la Universidad Central de Venezuela.*

**Alfredo Rodríguez**

**Diego Carranza**

# *Resumen*

---

---

## **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE SINTERIZADO SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LOS PISTONES DE AMORTIGUADORES CONVENCIONALES**

**AUTORES:** ALFREDO RODRÍGUEZ

DIEGO CARRANZA

**TUTOR:** PROF. SANDRA CABELLO

Se ha realizado un estudio sobre los efectos que tiene la temperatura de sinterizado a diferentes niveles en las propiedades mecánicas de pistones para amortiguadores convencionales de tipo telescópico.

Partiendo de pistones sinterizados de 1 3/16" y 35 (g) de peso a temperaturas de 954,5 °C (1750 °F), 1021 °C (1870 °F), 1065,5 °C (1950 °F) e importados, se llevaron a cabo una serie de ensayos mecánicos; entre ellos microdureza, dureza y compresión uniaxial (especialmente diseñado) y un estudio microestructural y elemental por medio de la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido para saber cómo variaban las propiedades de dureza, resistencia a la ruptura, fragilidad, entre otros, además de estudiar la morfología, la composición química y como varían estas a medida que aumenta la temperatura de sinterizado.

También se estudió la manera en que influyen las porosidades, impurezas, otros defectos indeseados y las características de partícula en las propiedades mecánicas y en la forma en que pueden afectar la funcionalidad de los pistones.

Se analizó el comportamiento de los valores obtenidos de los ensayos de microdureza y dureza a través de histogramas de frecuencias para comprobar que tan fiables son las propiedades de los pistones producidos bajo cada condición.

# *Índice de figuras*

---

---

<b>2.1</b> Flujo de aceite a través del paso permanente,	14
<b>2.2</b> Flujo de aceite a través de válvulas de apertura por presión,	14
<b>2.3.</b> Dibujo en explosión de un amortiguador,	15
<b>2.4.</b> Esquema simplificado de un amortiguador bitubo,	17
<b>2.5 y 2.6.</b> Esquema completo de un amortiguador bitubo: (A) No Presurizado y (B) Presurizado,	18
<b>2.7.</b> Esquema simplificado de un amortiguador monotubo,	20
<b>2.8.</b> Diagrama para la producción de piezas por medio de polvos,	40
<b>3.1.</b> Microscopio utilizado en los ensayos de metalografía,	46
<b>3.2.</b> Equipo empleado durante los ensayos de microdureza Vickers,	46
<b>3.3.</b> Equipo empleado para los ensayos de dureza Rockwell F,	47
<b>3.4.</b> Equipo empleado para realizar los ensayos de compresión,	48
<b>3.5.</b> Microscopio utilizado para la observación de microestructuras y análisis elemental,	48

<b>3.6.</b> Deshumidificador empleado durante el secado de las muestras,	49
<b>3.7.</b> Equipo empleado para eliminar los restos de óxido en las muestras,	49
<b>3.8.</b> Esquema del sistema utilizado para el ensayo de compresión en los pistones,	51
<b>3.9.</b> Flujograma resumen de todos los ensayos aplicados a los pistones sinterizados,	57
<b>4.1</b> Gráfica de los resultados obtenidos para los ensayos de compresión,	59
<b>4.2</b> Histograma de frecuencias para $T_s = 954,5$ (°C),	61
<b>4.3</b> Histograma de frecuencias para $T_s = 1021$ (°C),	63
<b>4.4</b> Histograma de frecuencias para $T_s = 1065,5$ (°C),	65
<b>4.5</b> Histograma de frecuencias para muestras importadas,	67
<b>4.6</b> Histograma de frecuencias para $T_s = 954,5$ (°C),	70
<b>4.7</b> Histograma de frecuencias para $T_s = 1021$ (°C),	73
<b>4.8</b> Histograma de frecuencias para $T_s = 1065,5$ (°C),	75
<b>4.9</b> Histograma de frecuencias para muestras importadas,	77
<b>4.10</b> Microscopía de la muestra sinterizada a $954,5$ (°C) con una magnificación de 500X,	78
<b>4.11</b> Microscopía de la muestra sinterizada a $954,5$ (°C) con una magnificación de 3000X,	79
<b>4.12</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 1 de la muestra ensayada a $954,5$ (°C),	80
<b>4.13</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 2 de la muestra ensayada a $954,5$ (°C),	80

<b>4.14</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 3 de la muestra ensayada a 954,5 (°C),	81
<b>4.15</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 4 de la muestra ensayada a 954,5 (°C),	81
<b>4.16</b> Microscopía de la muestra sinterizada a 1021 (°C) con una magnificación de 500X,	83
<b>4.17</b> Microscopía de la muestra sinterizada a 1021 (°C) con una magnificación de 3000X,	84
<b>4.18</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 1 de la muestra ensayada a 1021 (°C),	85
<b>4.19</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 2 de la muestra ensayada a 1021 (°C),	85
<b>4.20</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 3 de la muestra ensayada a 1021 (°C),	86
<b>4.21</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 4 de la muestra ensayada a 1021 (°C),	86
<b>4.22</b> Microscopía de la muestra sinterizada a 1065,5 (°C) con una magnificación de 500X,	88
<b>4.23</b> Microscopía de la muestra sinterizada a 1065,5 (°C) con una magnificación de 3000X,	88
<b>4.24</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 1 de la muestra ensayada a 1065,5 (°C),	89
<b>4.25</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 2 de la muestra ensayada a 1065,5 (°C),	90

<b>4.26</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 3 de la muestra ensayada a 1065,5 (°C),	90
<b>4.27</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 4 de la muestra ensayada a 1065,5 (°C),	91
<b>4.28</b> Microscopía de la muestra importada con una magnificación de 500X,	92
<b>4.29</b> Microscopía de la muestra importada con una magnificación de 800X,	93
<b>4.30</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 1 de la muestra importada ensayada,	94
<b>4.31</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 2 de la muestra importada ensayada,	94
<b>4.32</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 3 de la muestra importada ensayada,	95
<b>4.33</b> Distribución de los componentes presentes en el punto 4 de la muestra importada ensayada,	95
<b>4.34</b> Microscopía de un pistón sinterizado a 954,5 (°C) con una magnificación de 400x,	97
<b>4.35</b> Microscopía de un pistón sinterizado a 954,5 (°C) con una magnificación de 1000x,	97
<b>4.36</b> Microscopía de un pistón sinterizado a 1021 (°C) con una magnificación de 400x,	98
<b>4.37</b> Microscopía de un pistón sinterizado a 1021 (°C) con una magnificación de 1000x,	99

<b>4.38</b> Microscopía de un pistón sinterizado a 1065,5 (°C) con una magnificación de 400x,	100
<b>4.39</b> Microscopía de un pistón sinterizado a 1065,5 (°C) con una magnificación de 1000x,	101
<b>4.40</b> Microscopía de un pistón sinterizado importado con una magnificación de 400x,	102
<b>4.41</b> Microscopía de un pistón sinterizado importado con una magnificación de 1000x,	102

# Índice general

---

---

<b>Índice general</b>	<b>i</b>	
<b>Índice de figuras</b>	<b>v</b>	
<b>Índice de tablas</b>	<b>x</b>	
<b>Resumen</b>		
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción, 1	
1.2	Situación problemática, 2	
1.3	Objetivos, 3	
1.3.1	<i>Objetivo General, 3</i>	
1.3.2	<i>Objetivos Específicos, 4</i>	
1.4	Justificación, 4	
1.5	Alcance, 6	
1.6	Limitaciones, 6	
1.7	Antecedentes, 6	
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>12</b>
2.1	Amortiguador, 12	
2.1.1	<i>Definición, 12</i>	



**CAPÍTULO 4                      Resultados obtenidos                      58**

- 4.1. Ensayo de Compresión Uniaxial, 58
- 4.2. Ensayo de Microdureza, 59
  - 4.2.1 Pistones sinterizados a 954,5 (°C), 59
  - 4.2.2 Pistones sinterizados a 1021 (°C), 62
  - 4.2.3 Pistones sinterizados a 1065,5 (°C), 64
  - 4.2.4 Pistones sinterizados importados, 65
- 4.3. Ensayo de Dureza, 67
  - 4.3.1 Pistones sinterizados a 954,5 (°C), 68
  - 4.3.2 Pistones sinterizados a 1021 (°C), 71
  - 4.3.3 Pistones sinterizados a 1065,5 (°C), 73
  - 4.3.4 Pistones sinterizados importados, 75
- 4.4. Microscopía Electrónica de Barrido, 78
  - 4.4.1 Pistón sinterizado a 954,5 (°C), 78
  - 4.4.2 Pistón sinterizado a 1021 (°C), 82
  - 4.4.3 Pistón sinterizado a 1065,5 (°C), 87
  - 4.4.4 Pistón sinterizado importado, 92
- 4.5. Microscopía Óptica, 96
  - 4.5.1 Pistones sinterizados a 954,5 (°C), 96
  - 4.5.2 Pistones sinterizados a 1021 (°C), 98
  - 4.5.3 Pistones sinterizados a 1065,5 (°C), 100
  - 4.5.4 Pistones sinterizados importados, 101

**CAPÍTULO 5                      Análisis de resultados                      104**

- 5.1. Ensayo de Compresión Uniaxial, 104
- 5.2. Ensayo de Microdureza, 106
  - 5.2.1 Pistones sinterizados a 954,5 (°C), 106
  - 5.2.2 Pistones sinterizados a 1021 (°C), 106
  - 5.2.3 Pistones sinterizados a 1065,5 (°C), 107
  - 5.2.4 Pistones sinterizados importados, 108



# Índice de tablas

---

---

<b>4.1</b> Valores de microdureza Vickers para $T_s = 954,5$ (°C),	60
<b>4.2</b> Tabla de valores necesarios para el histograma de frecuencias,	61
<b>4.3</b> Valores de microdureza Vickers para $T_s = 1021$ (°C),	62
<b>4.4</b> Valores de microdureza Vickers para $T_s = 1065,5$ (°C),	64
<b>4.5</b> Valores de microdureza Vickers para pistones importados,	66
<b>4.6</b> Valores de Dureza Rockwell F para pistones a $T_s = 954,5$ (°C),	68
<b>4.7</b> Valores de mediatriz y frecuencia,	72
<b>4.8</b> Valores de Dureza Rockwell F para pistones a $T_s = 1021$ (°C),	74
<b>4.9</b> Valores de Dureza Rockwell F para pistones a $T_s = 1065,5$ (°C),	75
<b>4.10</b> Valores de Dureza Rockwell F para pistones importados,	76
<b>4.11</b> Peso en (%) de cada componente de la muestra para $954,5$ (°C),	82
<b>4.12</b> Peso en (%) de cada componente de la muestra para $1021$ (°C),	87
<b>4.13</b> Peso en (%) de cada componente de la muestra para $1065,5$ (°C),	91
<b>4.14</b> Peso en (%) de cada componente de la muestra para pistones importados,	96

# CAPÍTULO 1

## *Introducción*

---

### **1.1 Introducción**

El estudio de los componentes de los automóviles es de gran importancia para lograr mayores niveles de eficiencia en todas sus partes, así como para mantener los factores de seguridad adecuados que permitan salvaguardar la vida de las personas. Por ello, analizar muy detalladamente cada autoparte es uno de los desafíos automotrices más importantes para los ingenieros, y en el caso específico de los amortiguadores es de vital importancia que se realicen trabajos de investigación que garanticen su adecuado funcionamiento, puesto que son una de las piezas más relevantes de los vehículos automotores. Una de las partes de los amortiguadores hidráulicos telescópicos son los pistones, que son uno de los componentes (de este elemento de máquina) encargados de soportar las cargas más elevadas que se presentan. Por ello es muy importante estudiar su comportamiento mecánico, el cual está íntimamente relacionado con su proceso de fabricación: la pulvimetalurgia. Ésta técnica innovadora trae consigo grandes beneficios, en cuanto a propiedades mecánicas, a estas pequeñas piezas de gran importancia.

Por consiguiente, mediante el presente trabajo de investigación se realizará un estudio para determinar la influencia de la temperatura de sinterizado sobre el comportamiento mecánico de dichos pistones.

## **1.2 Situación problemática**

GABRIEL DE VENEZUELA, C.A. es una empresa dedicada a la fabricación de amortiguadores (de tipo convencional y McPherson) y de conjuntos modulares de suspensión para automóviles, la cual se encuentra ubicada en la urbanización industrial El Recreo, calle A, parcela I-16, Valencia – Edo. Carabobo. Dicha empresa es considerada el suplidor nacional más importante para el mercado de equipos originales; razón por la cual está constantemente en la búsqueda de avances tecnológicos que le permitan optimizar los procesos de producción que se traduzcan en mejoras para todos sus productos, así como en un aumento de los beneficios económicos que pueda percibir la misma.

Una de las técnicas utilizadas por la empresa para la fabricación de varias de sus partes es la pulvimetalurgia, la cual consiste en el compactado de una mezcla polvos (específicamente hierro, cobre y grafito), que posteriormente es sinterizada para obtener una pieza con muy buenas propiedades mecánicas. Cabe destacar que la sinterización es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, con la finalidad de incrementar la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas, razón por la cual es un tratamiento de importancia para cualquier empresa que desee maximizar la calidad de sus productos.

En la actualidad se desconoce la temperatura óptima de sinterizado de los pistones, que son los encargados de soportar los grandes esfuerzos que se producen al momento en que es aplicada una carga. Debido a las discrepancias de las características de la microestructura de los pistones sinterizados a diferentes temperaturas, se presume que ésta es un factor determinante en la vida útil del amortiguador, razón por la cual se plantea estudiar la influencia que tiene la temperatura de sinterizado sobre las variaciones de las propiedades mecánicas de dichas piezas.

Por consiguiente, se pretende con este trabajo especial de grado, obtener un resultado fehaciente de cuál es la temperatura de sinterizado más adecuada desde el punto de vista de las mejores las propiedades mecánicas de los pistones. Además se desea resaltar la importancia del efecto que tiene la temperatura de sinterizado en la prolongación de la vida útil de dichas piezas, lo que convertiría a éstos productos en un elemento de máquina mucho más confiable, seguro y con los mayores beneficios económicos tanto para la empresa como para el usuario del mismo.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Estudiar de la influencia de la temperatura de sinterizado sobre el comportamiento mecánico en los pistones de amortiguadores convencionales.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los parámetros que influyen en la variación de la temperatura de sinterizado.
- Establecer diversos niveles de temperatura de sinterizado para el estudio.
- Realizar diversos ensayos y pruebas para observar el comportamiento mecánico de los pistones a diferentes temperaturas de sinterizado.
- Caracterizar desde el punto de vista de la microestructura las distintas condiciones de estudio.
- Obtener el intervalo de temperatura de sinterizado que proporcione el mejor comportamiento mecánico en concordancia con la estructura observada.

### **1.4 Justificación**

En la actualidad, sobre todo en el área automotriz, se desarrollan de forma continua mejoras tecnológicas a cada una de las partes de los automóviles, con la finalidad de aumentar el desempeño y seguridad en los mismos.

Por ello, se plantea este trabajo especial de grado, ya que surge el interés por realizar un estudio detallado a los pistones de los amortiguadores, que son una de las partes esenciales que se encargan de mantener la correcta suspensión en un automóvil.

Es importante que todos los componentes que conforman un vehículo trabajen de forma óptima, con el fin de satisfacer las necesidades de los consumidores, las cuales son altas, sobre todo al tratarse de seguridad y confort. Entonces, al estudiar el proceso de

sinterizado como un método muy eficaz para la elaboración de pistones de amortiguadores, se pueden establecer cuales valores de temperatura de sinterizado son los más recomendados para obtener las propiedades mecánicas deseadas y así conseguir un producto de excelente calidad, el cual, haciendo su respectiva función dentro del amortiguador, influirá de manera positiva en el control de los vehículos, especialmente a altas velocidades y situaciones de riesgo.

Para la empresa de amortiguadores Gabriel, esto supone una mejora en cuanto a los procesos llevados a cabo para obtener los pistones, ya que se tendrá un intervalo de temperatura que permita estandarizar las piezas producidas y así reducir la cantidad de piezas defectuosas. Con esto se beneficia la empresa, debido a que se reducirían los costos por pérdidas y además ésta continuaría desarrollándose tecnológicamente.

Con éste trabajo, se pretende proporcionar un material que sirva como aporte a la Universidad de Carabobo en cuanto a investigación sobre el tema, destacando que actualmente se han realizado muy pocos estudios en el área de la pulvimetalurgia en la misma; además de servir como base para el desarrollo de nuevas tecnologías que contribuyan al desarrollo del país.

Para los autores de esta tesis, culminarla traería consigo un gran aporte personal, ya que de esta manera, aumentarían en gran medida los conocimientos requeridos para poder desenvolverse como ingeniero, y tener una base sólida en lo que respecta a los procesos de sinterizado en el ámbito profesional.

## **1.5 Alcance**

- Se fijarán por lo menos tres niveles de temperatura de sinterizado para la realización del estudio de los pistones.
- Se realizará un estudio metalográfico a través de un microscopio óptico (M.O.) y un estudio de la microestructura a través de un microscopio electrónico de barrido (M.E.B.).
- Se analizará una sola mezcla de polvos cuya composición es: 92,63 % de Hierro, 5,97 % de Cobre, 0,74 % de Acrawax y 0,66 % de Grafito.
- Los ensayos mecánicos a realizar serán: compresión uniaxial, dureza y microdureza.
- Se analizará un único modelo de pistón (Pistón de 1 3/16" y 35,7 (g)).

## **1.6 Limitaciones**

Como principal limitación en este trabajo se tiene la posible no disponibilidad de los equipos necesarios para realizar los diferentes ensayos en un momento determinado de la investigación.

## **1.7 Antecedentes de la investigación**

En el año 1998, Frades y Vélez realizaron un análisis teórico de la influencia del grafito en los cambios dimensionales en las partes sinterizadas y en las propiedades, haciendo énfasis en la contracción y/o dilatación de los sinterizados. Además estudiaron la influencia de la porosidad en la contracción o dilatación de las partes confeccionadas con mezcla de hierro-grafito. También hicieron un análisis exhaustivo a

una mezcla hierro-grafito basada en un diseño factorial  $2^4$ , en donde se estudiaron los cambios dimensionales, dureza y resistencia a la flexión, propiedad que es poco frecuente en los trabajos que se dan a conocer sobre las investigaciones de estas aleaciones. La mezcla hierro-grafito utilizada en este trabajo de investigación fue confeccionada empleando un polvo obtenido por reducción a partir de cascarilla de laminación. Finalmente se pudieron determinar que los resultados obtenidos manifiestan una estrecha vinculación del contenido de grafito con los parámetros que se establecieron como variables dependientes en el diseño factorial.

En 1999, Riera estudió el comportamiento elastoplástico de compactos obtenido con tres tipos de polvos base hierro, a partir de ensayos de compresión uniaxial con ciclos de carga y descarga, con la finalidad de analizar los mecanismos de deformación y densificación. En dicha investigación se pudo verificar que durante la compresión de un compacto metálico, se desarrollan tres regiones de comportamiento gobernadas por mecanismos distintos. Al inicio del ensayo, para cargas bajas, fenómenos de fricción interna, que se describen cualitativamente en este trabajo, causan una intensa deformación permanente en el agregado. Asimismo se pudo observar que para cierto valor del esfuerzo, que depende de la densidad inicial del compacto, éste comienza a dilatarse. Lo que conllevó a comprobar que este fenómeno, a diferencia de lo que se ha venido considerando, no es un mecanismo de fallo; el agregado soporta esfuerzos todavía mayores que la que provoca el inicio de su dilatación, así como una considerable cantidad de deformación plástica, antes del fallo propiamente dicho. Finalmente, los resultados experimentales lograron indicar que el comportamiento elástico de los compactos es no lineal y se pudo constatar que la fricción interna,

inherente al proceso de fabricación del compacto y a su propia naturaleza, se muestra especialmente influyente en el comportamiento elástico. Con mayor o menor intensidad, está siempre presente en él, dando lugar a una fuerte histéresis.

En el 2001, Bocanegra estudió los efectos del estado de aglomeración sobre la microestructura para el sinterizado de polvos de óxido de magnesio precipitado de agua de mar. Se estableció en este trabajo que el empleo de temperaturas altas de calcinación no sólo impone un límite sobre la densificación sino que también produce muestras con tamaño de grano menor. El autor además estableció que la densidad en verde es el parámetro de compactación que más influencia ejerce sobre la densidad final después de la sinterización, presentando mayor sinterabilidad los polvos que contienen aglomerados pequeños. En estos polvos aglomerados, la etapa intermedia - final de sinterización parece estar controlada por mecanismos tales como crecimiento de grano y engrosamiento de poros, que producen un descenso en la velocidad de sinterización. La presencia de porosidad, fundamentalmente en los aglomerados a 1200 (°C), ejerce una gran influencia frenando tanto el crecimiento de grano como la densificación.

En el 2005, Pereira y Rodríguez realizaron un trabajo especial de grado donde lograron optimizar el proceso de sinterizado que venía realizando la empresa Gabriel de Venezuela, la cual fabrica los pistones y la guía de los amortiguadores por procesos de sinterizado. En el desarrollo de este estudio se lograron definir gráficas que describen el comportamiento mecánico de dichas piezas. Adicionalmente se pudo construir tendencias de los factores y propiedades que variaban mediante la realización de ensayos en los cuales se variaron los parámetros actuales del proceso. Tales ensayos fueron: variación de la

densidad en las piezas, variación de la temperatura de sinterizado, variación del tiempo de permanencia de las piezas en el horno, y variación de las proporciones de cobre y grafito en polvo que contiene la mezcla a compactar. Para verificar la influencia de estos parámetros en las piezas resultantes, se registró tanto el peso y dimensiones iniciales en las muestras, como la dureza superficial y el tamaño de grano en las mismas; a fin de comparar los resultados obtenidos y establecer los patrones de comportamiento a través del uso del método de distribución de frecuencias. En base a las gráficas resultantes de los análisis, se logró verificar que: la pérdida de peso en las piezas es altamente sensible a la temperatura y proporción de grafito, la variación dimensional lo es a la densidad de las piezas y a la proporción del cobre, la dureza depende principalmente de la temperatura y de la proporción de cobre, y finalmente el tamaño de grano se ve muy influenciado por la temperatura y el tiempo de sinterizado.

En este mismo año, 2005, Rodríguez y Herrera estudiaron sobre la forma en que puede aumentarse la sinterabilidad de un polvo, en este caso es un polvo de aluminio aleado mecánicamente (Al AM), el cual, se mezcló, previamente al prensado, con una pequeña cantidad de polvo de cobre. Eventualmente, el polvo Al AM, usado en la mezcla, se había ablandado, con anterioridad, por recocido. Se ha podido observar que, tanto la adición de cobre como el recocido, mejoran las propiedades mecánicas del Al AM sinterizado, en particular la ductilidad. En este trabajo se concluyó que al añadir tan solo 1 (%) de polvo de cobre al polvo de Al AM, previamente a la consolidación, hay una mejora en su sinterabilidad, mediante la formación de fases líquidas durante la sinterización. Por otra parte, el ablandamiento del polvo Al AM, por recocido previo a la mezcla con el aditivo de cobre, facilita el procesado

de consolidación, al permitir el uso de presiones de compactación más bajas.

En el año 2006, Cabrera, enfoca su trabajo a la forma en la que es posible evaluar la influencia de las condiciones de procesamiento sobre la porosidad del material y el efecto de ésta en las propiedades mecánicas, particularmente la resistencia a la fractura y a la fatiga, a medida que la densidad tiende a ser igual a la de un material macizo. También se hace énfasis en uno de los métodos más eficaces para mejorar la respuesta mecánica de los aceros sinterizados, el cual consiste en reducir las porosidades del mismo. Los objetivos planteados en este trabajo están relacionados con los siguientes aspectos: Caracterizar la microestructura y porosidad del material, evaluar las propiedades mecánicas de los materiales estudiados a través de ensayos de tracción y flexión, estudiar el comportamiento a fatiga y a fractura de los materiales ensayados, evaluar el crecimiento de grietas tanto pequeñas como grandes por fatiga y el tipo de fractura formada en el material, y por último correlacionar las condiciones de procesamiento con las características microestructurales y el comportamiento mecánico de los materiales estudiados. El autor pudo concluir que el aumento de densidad conduce a una mejora notable en las propiedades mecánicas.

En el año 2007, Qin y Hua, se basan en los conocimientos teóricos tomando en cuenta que la deformación plástica es un proceso importante para mejorar el rendimiento y la obtención del producto final para los materiales en polvo sinterizado. El material ferroso sinterizado es ampliamente utilizado en muchas ramas de la ingeniería y sus parámetros de deformación son los más comunes para la mayoría de los materiales en polvo sinterizado. Concluyen que el criterio de fluencia de los materiales en polvo sinterizado puede ser aplicado no sólo a

materiales en polvo, sino también a materiales completamente densificados, y el criterio para los materiales completamente densificados puede investigarse como un caso especial de materiales en polvo sinterizado compresibles.

# CAPÍTULO 2

## *Marco teórico*

---

---

### **2.1 AMORTIGUADOR.**

#### **2.1.1 Definición.**

El amortiguador es un dispositivo que absorbe energía, utilizado normalmente para disminuir las oscilaciones no deseadas de un movimiento periódico o para absorber energía proveniente de golpes o impactos.

Los amortiguadores son componentes comunes de la suspensión de los automóviles y otros vehículos. La suspensión de un vehículo tiene como cometido absorber las desigualdades del terreno sobre el que se desplaza, a la vez que mantiene las ruedas en contacto con el pavimento, proporcionando un adecuado nivel de confort y seguridad de marcha. Se puede decir que sus funciones básicas son las siguientes:

- Reducción de fuerzas causadas por irregularidades del terreno.
- Control de la dirección del vehículo.
- Mantenimiento de la adherencia de los neumáticos a la carretera.
- Mantenimiento de una correcta alineación de las ruedas.

- Soporte de la carga del vehículo.
- Mantenimiento de la altura óptima del vehículo.

El peso del vehículo se descompone en dos partes denominadas: masa suspendida y masa no suspendida. El enlace entre ambas masas es materializado por la suspensión. El sistema está compuesto por un elástico (que bien puede ser una ballesta, muelle helicoidal, barra de torsión, estabilizador, muelle de goma, gas, aire, etc.) y otro de amortiguación (amortiguador en cualquiera de sus variantes), cuya misión es neutralizar las oscilaciones de la masa suspendida originadas por el elemento elástico al adaptarse a las irregularidades del terreno transformando la energía que almacena el resorte en calor. [5]

### **2.1.2 Principio de funcionamiento.**

Los amortiguadores tienen un sistema básico de funcionamiento que consta de un pistón que va unido a la carrocería por medio de un vástago de fijación, y que se desliza en el interior de un cilindro que está ensamblado a la rueda y por el cual corre un fluido viscoso que puede ser un aceite especial o gas. El pistón tiene una serie de agujeros calibrados por los que pasa el aceite entre las dos partes en las que está dividido el cilindro y deteniendo la oscilación gracias a que el resorte presenta resistencia ante el paso del fluido. [5]

### **2.1.3 Vida útil de un amortiguador.**

La vida útil de un amortiguador varía dependiendo de los caminos por donde se transita, el estado general del vehículo y de los neumáticos, entre otros. Aunque las estadísticas mundiales informan que la duración promedio

de un amortiguador es de 50.000 (Km), es muy habitual que el conductor se acostumbre al desgaste progresivo de esta pieza y no la cambie a tiempo, poniendo en juego su seguridad.

#### **2.1.4 Tipos de amortiguadores.**

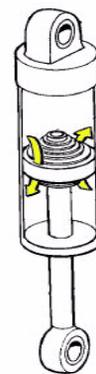
Existen varios tipos de amortiguadores dependiendo del fluido utilizado para amortiguar las oscilaciones y de otros aspectos.

##### ***Amortiguadores hidráulicos telescópicos***

Básicamente constan de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que hay aceite. Sobre el pistón existen una serie de orificios y unas válvulas recomprimidas que permiten el paso de aceite de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un valor dado. Los orificios representan el paso permanente y las válvulas el paso de apertura por presión respectivamente.



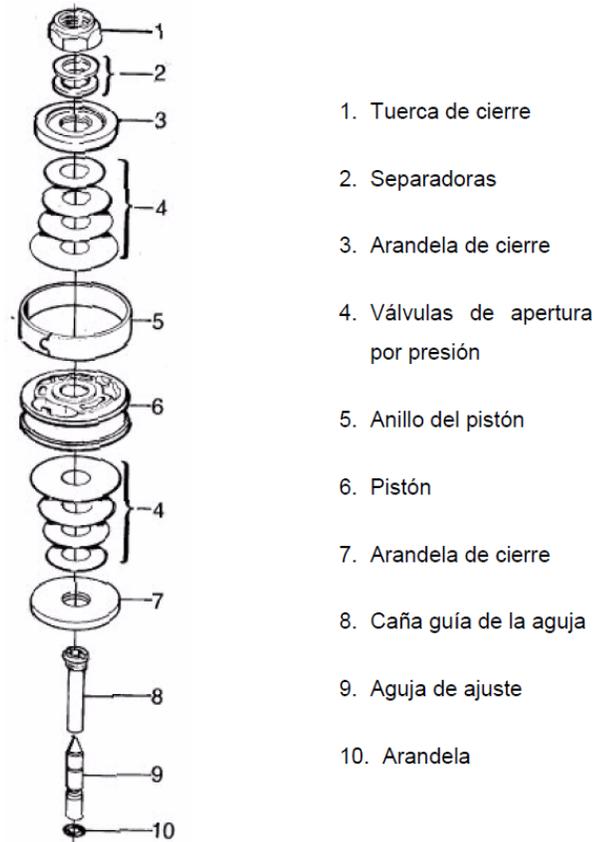
**Figura 2.1.** Flujo de aceite a de través del paso permanente.



**Figura 2.2.** Flujo de aceite a través válvulas de apertura por presión.

En la figura 2.3 se puede ver en detalle el pistón con los discos que componen las válvulas de apertura por presión y la aguja que regula

el diámetro de la válvula de apertura por área cuando el amortiguador es variable. Si se mueve la rosca de ajuste de la dureza del amortiguador para “ablandarlo”, la aguja abrirá el orificio facilitando el paso del aceite y disminuyendo la rigidez del amortiguador y viceversa. [5]



**Figura 2.3.** Dibujo en explosión de un amortiguador. [5]

Cuando la velocidad entre ambos extremos del amortiguador es baja, las válvulas de apertura por presión permanecen cerradas y el aceite pasa a través de los orificios del paso permanente. Una vez la presión del aceite alcanza la de las válvulas de presión, éstas empiezan a abrirse y dejan pasar el aceite. Cuanto más aumenta la presión, las válvulas se abren más hasta que su apertura es completa y la ley de fuerza en el

amortiguador queda controlada nuevamente por el paso del aceite a través del orificio del paso permanente.

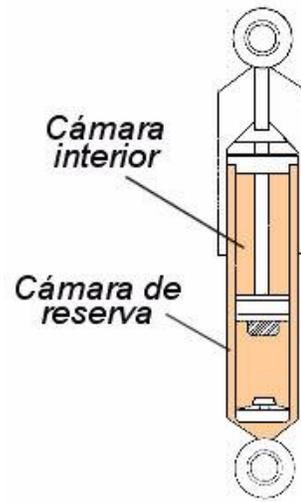
Lo normal es que las válvulas de extensión y compresión sean diferentes, lo que posibilita que el esfuerzo en compresión sea menor para una misma velocidad. En los vehículos de carretera, interesa utilizar una característica de amortiguamiento más blanda en compresión.

Esto se hace para evitar la transmisión a través del amortiguador de las grandes fuerzas compresivas que se generarían en el mismo cuando la rueda se encuentra con un obstáculo.

Fundamentalmente, existen en el mercado dos tipos de amortiguadores hidráulicos telescópicos: Los de doble tubo o bitubo y los de un solo tubo o monotubo. [5]

#### *Amortiguadores hidráulicos telescópicos bitubo.*

Son los más comunes en la actualidad. A su vez los hay de dos tipos. No presurizados (aceite) y presurizados (con aceite y gas). Constan de dos cámaras: una llamada interior y otra de reserva. Hay válvulas en el pistón y en la base del amortiguador, llamada válvula de pie. Véase figura 2.4.

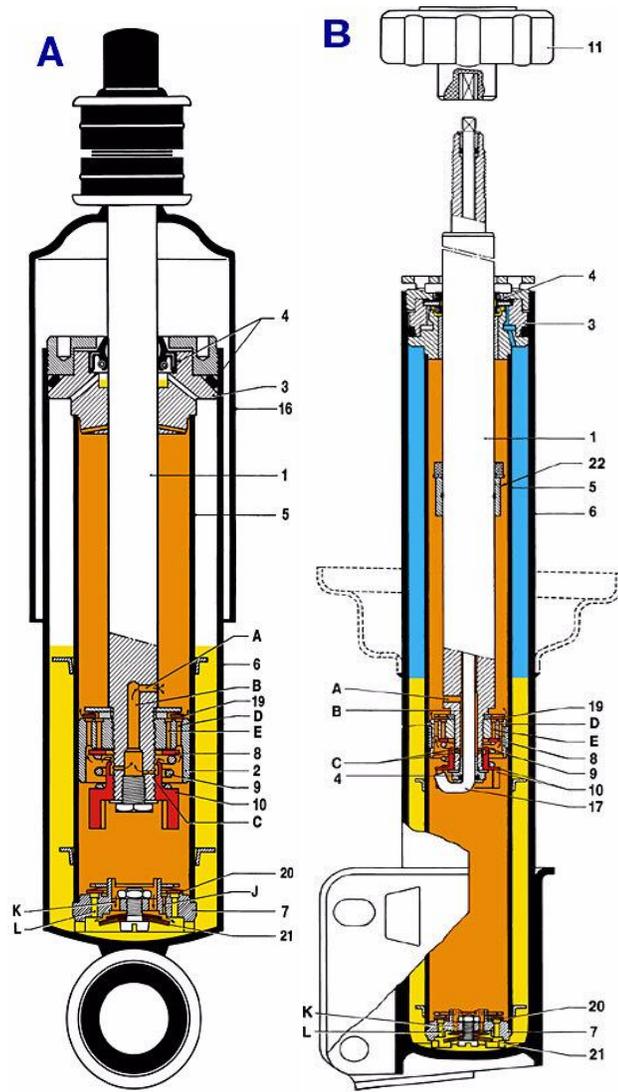


**Figura 2.4.** Esquema simplificado de un amortiguador bitubo. [5]

El funcionamiento de ambos tipos es similar. A continuación se detalla el mismo.

Componentes principales (figuras 2.5 y 2.6):

- Tubo y cámara exterior o de reserva (6).
- Tubo y cámara interior o cilindro (5).
- Pistón (2) acoplado al vástago (1).
- Válvula de pie (7).
- Guía del vástago (3).
- Acoplamientos superior e inferior.



(A)

(B)

**Figuras 2.5 y 2.6.** Esquema completo de un amortiguador bitubo: (A) No Presurizado y (B) Presurizado. [5]

Funcionamiento:

- *Carrera de compresión:* Cuando el vástago penetra, el aceite contenido en la cámara interior fluye sin resistencia a través de

los orificios A, B, C y D y la válvula de no-retorno (19) hacia el espacio generado al otro lado del pistón. Simultáneamente, una cierta cantidad de aceite se ve desplazada por el volumen que el vástago va ocupando en la cámara interior. Este aceite forzosamente pasa por la válvula de pie hacia la cámara de reserva (llena de aire a presión atmosférica o nitrógeno entre 4 y 8 bar). La fuerza de amortiguamiento viene dada por la resistencia que impone la válvula de pie al paso del aceite.

- *Carrera de extensión:* Al moverse el vástago hacia afuera, el aceite que queda por encima del pistón se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el aceite encuentra en dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento de extensión. El aceite que había llegado a la cámara de reserva (6) vuelve sin hallar resistencia por la válvula de pie a la cámara interior para compensar el volumen liberado por el vástago.

Los amortiguadores no presurizados presentan las siguientes características:

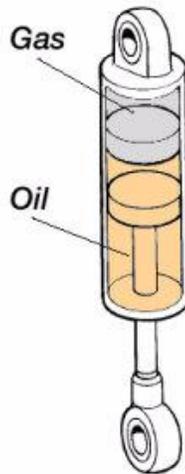
- La columna de aceite de la cámara principal cae por gravedad cuando el vehículo permanece inmóvil durante mucho tiempo.
- El aceite se contrae como consecuencia de su enfriamiento al final de un viaje y se succiona aire hacia la cámara principal.

Los amortiguadores presurizados tienen las siguientes características:

- Respuesta de la válvula muy sensible para pequeñas amplitudes.
- Buen confort de marcha.
- Reducción de ruido hidráulico.

### *Amortiguadores hidráulicos telescópicos monotubo.*

De aparición más tardía que los bitubo, su uso está cada vez más extendido, sobre todo en vehículos de altas prestaciones y en competición. Constan de dos cámaras principales. Una contiene el aceite y la otra gas a presión (normalmente nitrógeno) que están separadas por un pistón flotante. Solamente hay válvulas en el pistón. Véase la figura 2.7.



**Figura 2.7.** Esquema simplificado de un amortiguador monotubo. [5]

El funcionamiento de este tipo de pistón se explica a continuación:

*Carrera de compresión:* A diferencia del bitubo el amortiguador monotubo no tiene cámara de reserva. El problema de ubicar el aceite que ocupa el espacio tomado por el vástago al penetrar se soluciona con una cámara de volumen variable. Mediante el pistón flotante se consigue dividir la cámara interior en dos zonas. Una la del aceite, y otra rellena de gas presurizado a una presión que oscila entre 20 y 30 (bar). Al empujar el vástago hacia dentro, la presión que ejerce el aceite sobre dicho pistón

flotante hace que la zona del gas se comprima, aumentando la presión a ambos lados (gas y aceite). Asimismo, el aceite se ve obligado a pasar a través de las válvulas del pistón. La fuerza de amortiguamiento viene dada por la resistencia que oponen dichas válvulas al paso del aceite.

*Carrera de extensión:* Al moverse el vástago hacia afuera, el aceite que queda por encima del pistón se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el aceite encuentra en dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento de extensión. Por la disminución de presión en la cámara, el pistón flotante vuelve hacia arriba recobrando su posición original para compensar el volumen liberado por el vástago. [5]

Estos amortiguadores presentan las siguientes características:

- Buena refrigeración debido a que la cámara está en contacto directo con el aire. Esto se traduce en una mayor eficacia, pues hay que tener en cuenta que el amortiguador es un dispositivo que convierte la energía cinética en energía calorífica.
- Debido a la presurización, el aceite no forma espuma, evitando problemas de cavitación y resultando un buen amortiguamiento incluso con pequeñas vibraciones de alta frecuencia.
- El nivel de aceite no baja al quedar el vehículo estacionado, lo que evita funcionamientos deficientes al volver a arrancar.
- Mayores costos derivados de requerimientos superiores de precisión, tolerancias de fabricación y estanqueidad del gas. [5]

### ***Amortiguadores a gas***

Los amortiguadores de gas funcionan bajo los mismos principios que los amortiguadores hidráulicos. Una cámara en el amortiguador está cargada de nitrógeno, el cual mantiene una presión constante sobre el fluido hidráulico que hay en el amortiguador, con el fin de evitar la aireación del fluido hidráulico durante los movimientos rápidos de la suspensión. El rendimiento del amortiguador mejora cuando no existen burbujas de aire en el fluido hidráulico.

### ***Amortiguadores reológicos***

Los amortiguadores reológicos son aquellos cuya dureza es versátil y que contienen un líquido de singularidad viscosidad con delicadas microesferas de hierro suspendidas que les permiten actuar en campos electromagnéticos. Sus ventajas son las siguientes:

- Su reacción es diez veces más rápida que el amortiguador convencional.
- Los sensores pueden modificar la fluidez del líquido hasta mil veces cada segundo.
- Fiabilidad: no requiere mantenimiento.
- Bajo requerimiento energético: 20 (W) por cada amortiguador.

## **2.2. Pulvimetalurgia.**

### **2.2.1. Definición.**

Es un proceso que consiste en compactar una mezcla de finos polvos metálicos lubricados en un molde mediante una presión ejercida unidireccionalmente, para a continuación eyectar dicha mezcla del molde y finalmente ingresarla a un horno con atmósfera controlada para ser sinterizada. Piezas bastante complicadas podrán ser producidas por este método pero claramente existe un límite. La pieza deberá poder ser eyectada del molde, dado lo contrario la pieza no podrá fabricarse.

En este proceso no siempre se utiliza el calor, pero cuando se utiliza, debe mantenerse debajo de la temperatura de fusión de los metales a trabajar. Cuando se aplica calor en el proceso subsecuente de la metalurgia de los polvos se le conoce como sinterizado, este proceso genera la unión de partículas finas con lo que se mejora la resistencia de los productos y otras de sus propiedades. Las piezas metálicas producto de los procesos de la metalurgia de los polvos son producto de la mezcla de diversos polvos de metales que se complementan en sus características. Así se pueden obtener metales con cobalto, tungsteno o grafito según el uso que se le dará al material que se fabrica.

El metal en forma de polvo es más costoso que en forma sólida y el proceso es sólo recomendable para la producción en masa de los productos. En general, el costo de producción de piezas producto de polvo metálico es más alto que el de la fundición, sin embargo es justificable y rentable por las propiedades excepcionales que se obtienen con este procedimiento. [9]

### **2.2.2. Descripción del proceso de pulvimetalurgia.**

Todo el proceso de la industria de la metalurgia de polvos tiene su comienzo con los procesos por el cual se fabrican los polvos metálicos. Hay gran variedad de procesos para producir polvos de metales, entre los cuales se encuentran:

#### *Reducción al estado sólido:*

Este proceso ha sido, por mucho tiempo el más utilizado para la producción de polvo de hierro. La materia prima seleccionada es presionada, mezclada con carbón y pasada por un horno continuo. Después se presiona nuevamente, se separan los materiales no metálicos y se tamiza para producir el polvo. Debido a que no se hace ninguna refinación, la pureza del polvo es totalmente dependiente de la pureza de la materia prima. Este mismo proceso se puede utilizar para hacer polvo de cobre.

#### *Electrólisis:*

Escogiendo las condiciones apropiadas - posición y fuerza del electrolito, corriente, densidad, temperatura, etc., muchos metales pueden convertirse en polvos metálicos. Este proceso puede requerir de otros procesos (secado, aleado, lavado, etc.) para lograr las propiedades deseadas. Se usa por lo general para producir polvo de Cobre, pero también se puede utilizar para la producción de polvo de Cromo y Manganeso. Dos de las mayores cualidades de este proceso son la alta pureza y la alta densidad alcanzada en los polvos.

**Atomización:**

La atomización implica la conversión de un metal fundido en una nube de pequeñas gotas que se solidifican formando polvos. Es el método más versátil y popular para producir polvos metálicos y es aplicable a casi todos los metales, aleaciones o metales puros.

En principio, la técnica es aplicable para todos los metales que se puedan fundir pero es comercialmente utilizada para la producción de polvos de Hierro, Cobre, Aceros, Bronce, Aluminio, Plomo y Zinc. [10]

**2.2.2.1. Características de los polvos.**

Los futuros procesos y el resultado final alcanzado después del sinterizado están altamente ligados con las características del polvo tales como: tamaño, forma y distribución de las partículas, estructura y condición de la superficie, pureza, estructura del grano, velocidad de flujo y compresibilidad. Una de las propiedades más importantes de los polvos es la densidad aparente; esto se debe a que la dureza alcanzada en el compactado depende directamente de ésta. A su vez, esta característica depende de la forma y de la porosidad promedio de las partículas.

Una vez se tiene el polvo, empieza el proceso de fabricación de la pieza deseada. Este proceso está compuesto por básicamente tres etapas - la mezcla, el compactado y la sinterización. Cada una de estas etapas contribuye en las características finales de la pieza. [4]

#### **2.2.2.2. La mezcla.**

En la etapa del mezclado se debe alcanzar una mezcla homogénea de los materiales y añadir el lubricante. La principal función del lubricante es la de reducir la fricción entre el polvo metálico y las superficies de las herramientas utilizadas en el proceso. Además, el lubricante debe deslizarse durante la compactación, y así ayudar a conseguir una densidad uniforme en todo el compactado. De igual importancia resulta el hecho de que la reducción de fricción también ayuda a la eyección del compactado minimizando la posibilidad de formación de grietas. Se debe prestar especial atención en la escogencia del lubricante, debido a que una mala escogencia puede resultar en efectos adversos en la dureza del compactado antes y después de sinterizar. Otra precaución que se debe tener en esta etapa del proceso es la de no sobre mezclar. El sobre mezclar aumenta la densidad aparente de la mezcla y reduce la dureza de la pieza antes del sinterizado. [9]

#### **2.2.2.3. El compactado.**

La mezcla es introducida en un molde de acero o carburo rígido y presionada para obtener la forma deseada. La presión a la cual se somete la mezcla durante esta etapa está entre 150-900 (MPa). La mezcla debe ser presionada lo suficiente para que soporte la fuerza de la eyección del molde y que pueda ser movida antes del sinterizado.

El compactado es una etapa muy importante ya que la forma y las propiedades mecánicas finales de la pieza están fuertemente relacionadas con la densidad al presionar. Debido a que los polvos metálicos bajo presión no se comportan como líquidos, la presión no es transmitida uniformemente por el molde y hay virtualmente cero flujo lateral. Por esto, la obtención de

buenos valores de densidad en las piezas depende en un alto grado del diseño de la herramienta que aplica la presión.

Las siguientes son consideraciones que se deben tener al diseñar una herramienta para el compactado.

- Relación entre longitud y ancho. La presión aplicada y por ende la densidad decrece a lo largo de la pieza. La compactación de doble lado (se aplica presión por los dos lados de la mezcla) mejora la distribución de la presión pero sigue dejando una región en la mitad de la pieza con menos densidad. Por esto, no se recomiendan relaciones entre largo y ancho de piezas superiores a 3:1
- Cambios bruscos en las secciones se deben omitir, debido que producen concentradores de esfuerzos, lo que puede llevar a fracturas en la pieza.
- La complejidad en la forma de la pieza y el número de operaciones de compactado requerido. [8]

#### **2.2.2.3.1. Formas de compactar una mezcla.**

*Prensa hidráulica utilizada para hacer la operación del compactado.*

La fricción entre los granos del polvo y las paredes del molde reduce progresivamente la transmisión de presión y por lo tanto la densidad obtenida a lo largo de la pieza. Estos efectos se pueden minimizar con la ayuda de buenos lubricantes.

La curva de Densidad vs. Presión aplicada sigue una relación hiperbólica. A partir de esta relación se debe buscar la presión a la que la densidad es óptima ya que una mayor presión presentaría un efecto negativo en la densidad.

El compactado del polvo a temperatura ambiente y sin una atmósfera controlada es muy útil por su bajo costo para la fabricación de muchas piezas; sin embargo, tiene grandes limitantes en materia de la densidad del compactado.

### *Compactación semi - caliente (Warm Compaction).*

La compactación semi - caliente permite aumentar la densidad del compactado considerablemente con un costo extra muy bajo. Este método utiliza la maquinaria y el polvo metálico que se usa en el proceso convencional. Lo único que requiere es que la mezcla, el molde y toda la herramienta utilizada para la compactación sea calentada a una temperatura de 1300 – 1500 (°C). Al usar este método, existe un incremento significativo en la fuerza del compactado, reduciendo así los riesgos de daño en su manejo, y una vez la pieza es sinterizada, la resistencia de la misma es incrementada en aproximadamente un 10% y consigue un cambio dimensional casi de cero.

### *Presionado en Caliente (Sinterizado a presión).*

A temperaturas elevadas los metales son generalmente más blandos, haciendo posible generalmente que sean compactados a una densidad mucho mayor sin necesidad de elevar la presión. Después de esta operación también es requerido el sinterizado normal debido a que éste, en la mayoría de los casos mejora las propiedades de la pieza. El uso de este método se ve reducido por el alto costo que demanda. Requiere moldes especiales resistentes al calor, una atmósfera controlada y las velocidades de producción se ven disminuidas significativamente. Sin embargo este método

se usa para la producción de metales duros y piezas para corte hechas de diamante; estos dos materiales son costosos y por ello ameritan un tratamiento especial.

Aunque la pieza hecha por presión puede tener una calidad de tolerancias dimensionales muy alta, estas se pueden ver afectadas por la etapa de sinterización. Una nueva etapa de compactación puede servir para mejorar los niveles de las tolerancias dimensionales.

Fuera de las etapas del proceso normal, los tratamientos térmicos pueden llevar a drásticos cambios en las dimensiones. Por esto, hay que tener en cuenta, al diseñar el proceso, la influencia de los tratamientos térmicos y el uso final que tendrá la pieza. [8]

#### **2.2.4. Sinterizado.**

La etapa de la sinterización es clave para el proceso de la metalurgia de polvos. Es aquí en donde la pieza adquiere la resistencia para realizar su función ingenieril para la cual se ha fabricada. El término sinterizado tiene la siguiente definición: 'Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la temperatura de fusión de la base de la mezcla. Tiene el propósito de incrementar la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas'.

Para describir este proceso basta con decir que ocurre una difusión atómica y las partes unidas durante el proceso de compactación se fortalecen y crecen hasta formar una pieza uniforme. Esto puede inducir a un proceso de recristalización y a un incremento en el tamaño de los granos. Los poros tienden a volverse redondos y la porosidad en general como porcentaje del volumen total tiende a decrecer. Esta operación, casi siempre, se lleva a cabo dentro de un ambiente de atmósfera controlada y a

temperaturas entre el 60 y 90% de la temperatura de fusión del mayor constituyente. Cuando hay mezcla de polvos, hay ocasiones en donde el proceso de sinterización se efectúa a una temperatura superior a la de fusión de uno de los constituyentes secundarios- como en partes estructurales de Hierro/Cobre, Carburo de Tungsteno/Cobalto, etc. Al hacer el proceso a una temperatura superior a la temperatura de fusión de un constituyente, se está haciendo un sinterizado con presencia de fase líquida. Por esto es esencial controlar la cantidad de fase líquida que se presenta durante el proceso para poder asegurar paridad en la forma de la pieza.

Se debe llevar un control sobre la tasa de calentamiento, tiempo, temperatura y atmósfera para obtener resultados que puedan ser reproducidos. El horno eléctrico se usa en la mayoría de los casos, pero si se requieren temperaturas superiores (para incrementar la resistencia de las piezas) se puede variar con diferentes tipos de hornos, según la temperatura deseada. Antes de ingresar al horno, las piezas son transportadas en una banda hecha de alambre entrecruzado. Este alambre está hecho de una aleación Níquel/Cromo (80/20) que permite temperaturas hasta de 11500 (°C). Para temperaturas superiores se pueden usar Carburos de Silicio que pueden operar a temperaturas hasta 13500 (°C). Cuando son casos especiales y se necesitan temperaturas aún mayores, se utilizan piezas para calentamiento hechas con Molibdeno, aunque este requiere que sea operado en una atmósfera pura de hidrógeno.

Las atmósferas controladas son una parte esencial en casi cualquier proceso de sinterización ya que previenen la oxidación y otras reacciones que no convienen al proceso. Algunas de las atmósferas más usadas son las compuestas con hidrógeno seco o con hidrocarburos sometidos parcialmente a la combustión. Si se requieren usos más especiales y que puedan soportar el incremento en el costo de la atmósfera se pueden utilizar atmósferas

sintéticas. Debido a que son producidas mezclando cuidadosamente Nitrógeno con Hidrógeno y con gas de hidrocarburos para la sinterización de aceros. Estos tipos de atmósferas tienen la ventaja de ser mucho más limpias, tener mayor adherencia al material sinterizado y un nivel muy bajo de vapor de agua.

Hay diferentes tipos de sinterizado que se pueden aplicar según sea el caso, ya sea que se requiere bajar costo, aumentar propiedades de la pieza, trabajar con un material especial, etc. [4]

#### **2.2.4.1. Sinterizado y endurecimiento de la pieza.**

Se realiza el tratamiento térmico del sinterizado y después se somete a una caída de temperatura rápidamente. Esto se puede realizar gracias a los avances tecnológicos que se han logrado en los hornos para sinterizado, que permiten descender la temperatura a velocidades hasta 500 (°C/s). El resultado de esta operación en las piezas de acero es una estructura homogénea martensítica. Además de este excelente resultado también se obtienen tolerancias dimensionales muy precisas.

Estas dos propiedades adquiridas durante el proceso de sinterización-endurecimiento permiten obviar varios procesos de post-sinterización.

Como ya se mencionó anteriormente, en algunos casos es necesario hacer operaciones post-sinterizado ya sea por pérdida o aumento de tolerancias dimensionales o porque el uso de la pieza requiere un tratamiento adicional, entre ellos se encuentran los siguientes:

### *Re – compactado.*

Es casi inevitable que las piezas sufran un cambio dimensional en el sinterizado. Para contrarrestar este efecto negativo y en algunos casos para incrementar la densidad de la pieza, se usa el re-compactado. Como su nombre lo indica, consta de volver a compactar la pieza, devolviéndole sus dimensiones iniciales y aumentando la densidad (sólo se aumenta un poco). Esta última propiedad es vital para cuando se necesitan piezas con propiedades mecánicas óptimas, en estos casos también se recomienda volver a hacer un sinterizado.

En algunos casos también se puede hacer el re-compactado en caliente, dándole así más densidad, lo que mejora aún más las propiedades mecánicas. Tiene el problema que su control de dimensiones finales no es bueno.

### *Infiltración.*

Este es un método para mejorar la resistencia de materiales porosos que consiste en llenar los poros superficiales con un metal líquido que tenga menor punto de fusión. No necesita presión y se usa bastante con piezas ferrosas y utilizando cobre como infiltrante. Este método también es utilizado para producir materiales compuestos con propiedades eléctricas especiales como tungsteno/cobre y molibdeno/ plata.

### *Impregnación.*

Este término es análogo al de infiltración pero en vez de llenar los poros con materiales metálicos se utilizan materiales orgánicos. El ejemplo más

representativo de este procedimiento son los cojinetes impregnados con aceite.

Esta versatilidad para aplicar diferentes tratamientos a las piezas que salen del proceso de pulvimetalurgia le da una gran ventaja a este método de fabricación de piezas. Aunque el uso de la pulvimetalurgia tiene su mayor aplicación con metales comunes, también las tiene con otros tipos de materiales. [8]

#### **2.2.4.2. Materiales utilizados en el proceso de sinterizado.**

Los metales refractarios, metales con alta temperatura de fusión, son muy difíciles de producir llevándolos a la temperatura de fusión y luego moldeándolos. Algunos de estos metales son tungsteno, molibdeno y tantalio. Un polvo compactado y sinterizado con una densidad relativa menor al 90% puede ser deformado mecánicamente a temperaturas altas pero manejables. Esto hace que se le pueda dar una orientación deseada a las microestructuras, convirtiéndolo en un material denso con ductilidad hasta en temperatura ambiente. Esta propiedad sólo es alcanzable por el método de la metalurgia de polvos.

Los materiales más utilizados para la mezcla de polvos para sinterizar son:

##### ***Hierro (Fe):***

Es un metal maleable, de color gris plateado y presenta propiedades magnéticas; es ferromagnético a temperatura ambiente y presión atmosférica. Es extremadamente duro y pesado, por lo tanto bastante denso. Además presenta otras características como: baja conductividad eléctrica y

cuando entra en contacto con el aire, se forma en su superficie una capa de óxido, razón por la cual no puede utilizarse sin revestimiento superficial.

Entre sus propiedades mecánicas se encuentran:

- **Resistencia a la rotura:** Resistencia que opone el material a romperse por un esfuerzo mecánico exterior. Depende de la cohesión entre sus moléculas.
- **Deformabilidad:** Es una propiedad que da a los materiales la posibilidad de deformarse antes de su rotura. Esta deformación puede ser permanente (plasticidad) o no (elasticidad).
- **Tenacidad:** La tenacidad expresa el trabajo que realiza un metal cuando es sometido a esfuerzos exteriores que lo deforman hasta la rotura.
- **Dureza:** Es la capacidad que presenta el metal a ser deformado en su superficie por la acción de otro material. Existen variados tipos de dureza, como son: al rayado, a la penetración, al corte y dureza elástica.
- **Soldabilidad:** Propiedad que presentan algunos metales por la que dos piezas en contacto pueden unirse íntimamente formando un conjunto rígido.

En cuanto a la estructura, el hierro tiene una estructura centrada en el cuerpo a temperaturas normales. A temperaturas más altas, tiene una estructura cúbica centrada en la cara. Este hecho es de gran importancia práctica. En su forma de acero, el hierro siempre contiene una pequeña cantidad de carbono. Los átomos de carbono son menores que los átomos de hierro y, a temperaturas altas, se encajan en los espacios

abiertos de la estructura centrada en la cara. Cuando el hierro se enfría, adquiere una forma cubica centrada en el cuerpo. En esa forma, los átomos de carbono no pueden colocarse en los espacios más pequeños. Entonces, la red cristalina del hierro se distorsiona, debido al tamaño tan grande de los átomos de carbono, o el carbono se separa del hierro como carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

### *Cobre (Cu):*

Es un metal de transición de color rojizo y brillo metálico que, junto con la plata y el oro, forma parte de la llamada familia del cobre, se caracteriza por ser uno de los mejores conductores de electricidad (el segundo después de la plata). El cobre forma parte de una cantidad muy elevada de aleaciones que generalmente presentan mejores propiedades mecánicas, aunque tienen una conductividad eléctrica menor. Las más importantes son conocidas con el nombre de bronce y latones. Por otra parte, el cobre es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas.

Con respecto a las propiedades mecánicas, tanto el cobre como sus aleaciones tienen una buena maquinabilidad, es decir, son fáciles de mecanizar. El cobre posee muy buena ductilidad y maleabilidad lo que permite producir láminas e hilos muy delgados y finos. Es un metal blando, con un índice de dureza 50 en la escala de Vickers) y su resistencia a la tracción es de 210 (MPa), con un límite elástico de 33,3 (MPa). Admite procesos de fabricación de deformación como laminación o forja, y procesos de soldadura y sus aleaciones adquieren propiedades diferentes con tratamientos térmicos como temple y recocido. En general, sus propiedades

mejoran con bajas temperaturas lo que permite utilizarlo hasta en aplicaciones criogénicas.

***Grafito:***

Es un mineral untuoso, de color negro y lustre metálico, que se constituye por un carbono cristalizado.

En su estructura, el grafito cuenta con átomos de carbono que forman tres enlaces covalentes en el mismo plano, a un ángulo de 120°. Por eso, tiene una estructura hexagonal.

El grafito es una de las formas alotrópicas en las que se puede presentar el carbono. Se encuentra en yacimientos naturales, pero también se puede producir de forma artificial.

Su capacidad ha sido puesta a prueba tanto a elevadas temperaturas como en ambientes agresivos. La resistencia del grafito a los ácidos es excelente, así como a los compuestos orgánicos y a las soluciones alcalinas. Conviene, sin embargo, recalcar que su utilización debe ser cuidadosamente estudiada si se planea aplicarlo en atmósferas oxidantes y temperaturas superiores a 450 (°C).

***Acrawax:***

Es una cera sintética que presenta un alto punto de fusión y de inflamación. Su composición es de un 35 (%) de ácido esteárico, que contiene gran cantidad de sodio y potasio, y un 65 (%) de etileno bis-estearamida.

Esta cera funde aproximadamente a 142 (°C) y puede ser utilizada para muchas aplicaciones donde las ceras ordinarias no serían aptas debido a los altos riesgos de incendio que se producirían.

El Acrawax no es frágil y es mucho más hidrófugo que las ceras naturales, además tiene muchos usos en una amplia variedad de industrias que van desde adhesivos hasta barnices.

Los materiales compuestos también pueden ser fabricados por el método de la metalurgia de polvos. Algunos materiales compuestos fabricados y conformados por este método son:

- Materiales para contacto eléctrico tales como cobre / tungsteno, plata / óxido de cadmio.
- Metales duros, usados para herramientas de corte y forjado de metales. Estos incluyen Ni, Ni-Co, Ni-Cr; en general, superaleaciones en base de níquel y aceros complejos.
- Herramientas de corte especial hechas de diamante dispersado en una matriz metálica.

Los materiales porosos son un gran ejemplo del para que se debe usar la pulvimetalurgia. La mayoría de los metales son porosos hasta cierto grado, esta propiedad se da en un mayor grado en las piezas hechas por la pulvimetalurgia. La porosidad puede ser regulada y calculada según el uso que tenga la pieza. Los mayores productos de este grupo de materiales son los filtros y los bujes autolubricados. Este último producto es difícilmente, sino imposible, fabricarlo por cualquier otro método de metalurgia.

Las partes estructurales (o Mecánicas) son el grupo más grande de materiales fabricados por este método. Estas piezas están mayormente constituidas por hierro pero tienen además aleaciones con cobre, latón,

bronce y aluminio. También se pueden fabricar piezas hechas con materiales menos comunes como el titanio o berilio. En general, estas piezas no tienen mejores propiedades mecánicas que las piezas equivalentes fabricadas por otros procesos metalúrgicos. Sin embargo, las piezas fabricadas por pulvimetalurgia cumplen enteramente con los requerimientos para las cuales fueron hechas. Tienen la gran ventaja de tener mejores tolerancias dimensionales que piezas fabricadas por forjado pero en la mayoría de los casos son preferidas sobre todo por su bajo costo de producción.

Recientemente y debido al crecimiento exponencial de esta industria, se han dado avances importantes en el proceso que obligan a replantear la resistencia de las piezas hechas por la metalurgia de polvos. Estos adelantos han hecho posible la fabricación de partes con la pulvimetalurgia con propiedades iguales o en muchos casos superiores a piezas fabricadas por los métodos tradicionales.

Hay otros grupos de materiales como las aleaciones para trabajos forzosos, aceros para trabajos que requieran mucha velocidad de funcionamiento y herramientas muy especializadas que también son fabricadas por este método; y gracias a él, los costos de producción están bajando, y con esto se aumenta la producción y el uso de dichas piezas. [7]

### **2.2.5. Ventajas y limitaciones del proceso de producción por la metalurgia de los polvos.**

#### *Ventajas.*

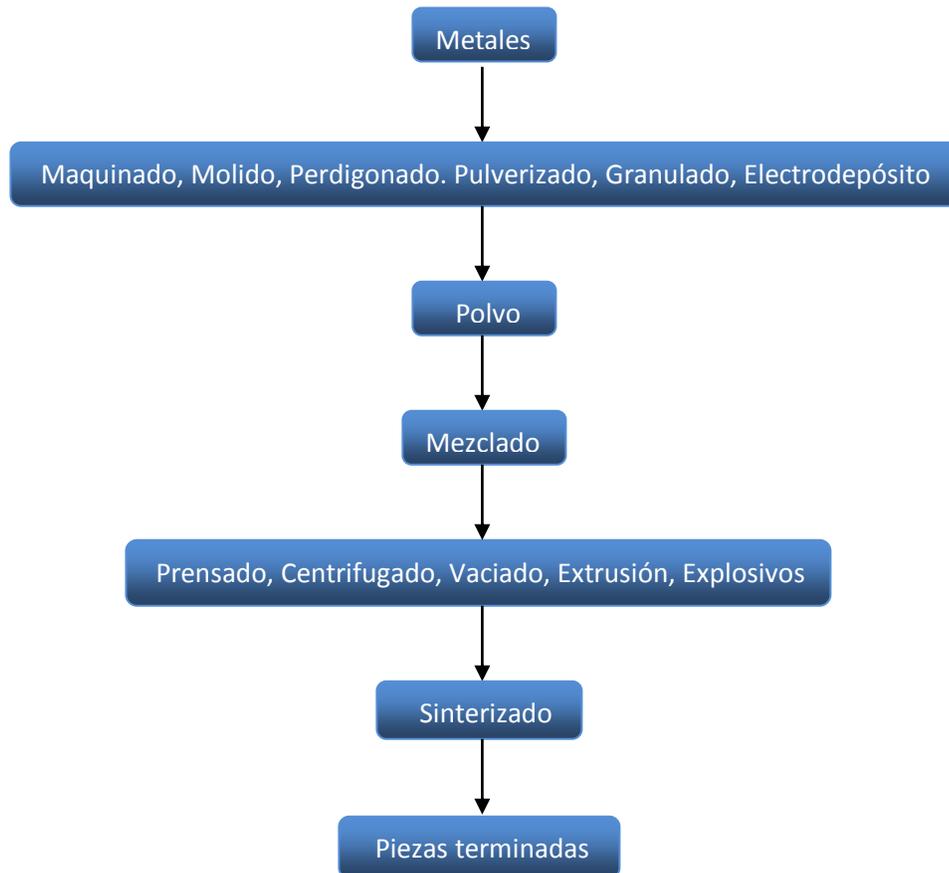
- La producción de carburos sinterizados, cojinetes porosos y bimetálicos de capas moldeadas, sólo se pueden producir por medio de este proceso.

- Porosidad controlada.
- Tolerancias reducidas y acabado superficial de alta calidad.
- Por la calidad y pureza de los polvos producidos, se pueden obtener también piezas de alta pureza.
- No hay pérdidas de material
- No se requieren operarios con alta capacitación.

#### *Limitaciones.*

1. Los polvos son costosos y difíciles de almacenar.
2. El costo del equipo para la producción de los polvos es alto.
3. Algunos productos pueden fabricarse por otros procedimientos más económicos.
4. Es difícil hacer productos con diseños complicados.
5. Existen algunas dificultades térmicas en el proceso de sinterizado, especialmente con los materiales de bajo punto de fusión.
6. Algunos polvos de granos finos presentan riesgo de explosión, como aluminio, magnesio, zirconio y titanio.
7. Es difícil fabricar productos uniformes de alta densidad. [6]

Todo el proceso de pulvimetalurgia puede resumirse a través del siguiente esquema:



**Figura 2.8.** Diagrama para la producción de piezas por medio de polvos.

# CAPÍTULO 3

## *Metodología*

---

---

### **3.1. Nivel de la investigación**

Debido a las características presentes en el trabajo, se trata de una investigación exploratoria, ya que el sinterizado de pistones de amortiguadores es un tema poco estudiado, por lo tanto, los resultados obtenidos representaron una visión aproximada de lo que sería la influencia de la temperatura de sinterizado en las propiedades mecánicas de los pistones.

Además, es una investigación descriptiva, porque se definen todos los parámetros que influyen en la temperatura de sinterizado, así como el comportamiento de los pistones bajo estas condiciones.

### **3.2. Diseño de la investigación**

La investigación se realizó sustentándose en referencias bibliográficas relacionadas con los parámetros que definen la temperatura de sinterizado y

las características que presentan los materiales metálicos que se someten a este tratamiento térmico, tales como dureza, porosidades, entre otras, siendo esta también una investigación de tipo documental.

Además, éste trabajo especial de grado se fundamenta en una investigación de tipo experimental, ya que contempla la realización de diversos ensayos a los pistones en estudio, así como la observación de las características que presentan, la representación de los resultados obtenidos mediante tablas y gráficos, para finalmente determinar en forma práctica la temperatura de sinterizado con la cual se obtienen las mejores propiedades mecánicas de las piezas estudiadas.

### **3.3. Población**

La población está conformada por todos los elementos que serán objeto de estudio durante el desarrollo del trabajo, siendo la población en este caso de 24 pistones de amortiguadores convencionales de tipo telescópico de 1 3/16" y 35 (g) tratados a 954,5 °C (1750 °F), 1021 °C (1870 °F), 1065,5 °C (1950 °F), más los importados.

### **3.4. Muestra**

La muestra está compuesta por dos subconjuntos de la población, divididos de la siguiente manera:

El primer subconjunto está conformado por 18 pistones sometidos a las condiciones de temperatura de sinterizado nombradas anteriormente, teniéndose 6 pistones por cada condición.

El otro subconjunto está compuesto por 6 pistones importados (sinterizados en el exterior).

Para cada temperatura y para las muestras importadas de pistones, se llevaron a cabo ensayos mecánicos y estudios de microscopía distribuidos de la siguiente forma:

- Se utilizaron 4 pistones para revelar la microestructura y elementos químicos a través de la microscopía electrónica de barrido. Un pistón por cada condición.
- Se emplearon 4 pistones para llevar a cabo el ensayo de compresión uniaxial. Igualmente, se usó un pistón por condición.
- Se utilizaron 12 pistones; es decir 3 por condición, para llevar a cabo lo siguiente en estricto orden: estudio para revelar la estructura y microestructura a través de la microscopía óptica, ensayo de microdureza Vickers y ensayo de dureza Rockwell F.

Finalmente, entre todos los ensayos y estudios se utilizaron 20 pistones, quedando los 4 restantes como respaldo.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas empleadas para la obtención ciertos datos fueron: la observación directa de los diferentes ensayos a realizar, así como un análisis documental que sirva como soporte para el desarrollo de éste trabajo de investigación.

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos fueron: fotografías, cuadros y tablas; donde se registraron los valores de los parámetros obtenidos en los ensayos, con los cuales se logra la elaboración de cuadros y tablas que posteriormente serán analizadas detalladamente y sometidos a procesos estadísticos básicos.

### **3.5.1 Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

A los datos recolectados se les aplicó un análisis de tendencias estadísticas a través de histogramas de frecuencias y cálculos de desviaciones estándar, con la finalidad de determinar los factores que más intervienen en el comportamiento mecánico de los pistones (sinterizados a diferentes niveles de temperatura), con lo que se pretende seleccionar cuál de las muestras presenta el mejor cuadro de propiedades mecánicas. Cabe destacar que al realizar un análisis comparativo entre las muestras a diferentes condiciones, se logra apreciar más claramente la influencia que tiene la temperatura del sinterizado en el pistón.

## **3.6. MATERIALES Y EQUIPOS.**

A continuación, se presentan los equipos que se utilizaron para llevar a cabo todos los ensayos propuestos para los pistones de amortiguadores con sus respectivas especificaciones, así como también todos los materiales necesarios.

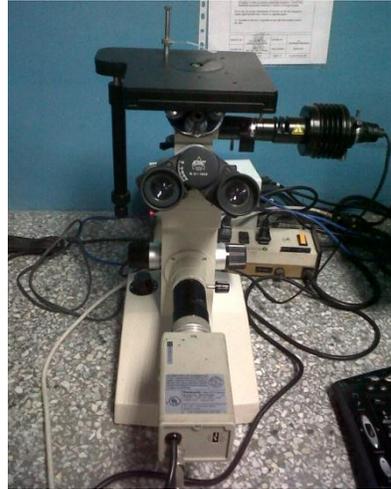
### **3.6.1. Materiales.**

- Pistones de amortiguadores tipo telescópico empleados como muestras para los ensayos.

- 12 muestras preparadas para estudio de Microscopía Óptica, ensayo de Microdureza Vickers y Dureza Rockwell F.
- 4 muestras preparadas para ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido.
- 4 muestras preparadas para ensayo de Compresión Uniaxial.
- Lija de banda de carburo de silicio N° 120.
- Papel abrasivo N° 180, 240, 320, 400, 500, 600 y 1200.
- Paños metalográficos (grueso y fino).
- Alúmina en suspensión acuosa de 0,1 ( $\mu\text{m}$ ) y 0,05 ( $\mu\text{m}$ ).
- Reactivo Nital al 2 (%).
- Agua y etanol.
- Algodón.
- Pinzas de acero.
- Papel y cinta adhesiva para identificación de las muestras.
- Agua.
- Guantes.

### **3.6.2. Equipos.**

- Microscopio Óptico, marca: UNION, modelo: MC86267, capacidad: 50-1000x. Ubicación: Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



**Figura 3.1.** Microscopio utilizado en los ensayos de metalografía.

- Microdurómetro Vickers (Indentamet), marca: Buehler, modelo: Indentamet 1100, capacidad: HV, HK, HRC, apreciación: 0,1 HV, HK, HRC. Ubicación: Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



**Figura 3.2.** Microdurómetro empleado durante los ensayos de microdureza Vickers.

- Campana extractora de gases, N° 180872.
- Lijadora de banda, marca: Bujardin.
- Televisor, marca: Toshiba de 21”.
- Banco de pulido.
- Durómetro Rockwell (Macromet), marca: Buehler, modelo: Macromet 5100T, capacidad: HRA, HRB, HRC, HRF, apreciación: 0,1 HRA, HRB, HRC, HRF. Ubicación: Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



**Figura 3.3.** Durómetro empleado para los ensayos de dureza Rockwell F.

- Máquina universal de ensayos de materiales, marca: Galdabini, modelo: CTM-20, capacidad: 20 (Ton), apreciación: 1 (Kgf). Ubicación:

Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



**Figura 3.4.** Equipo empleado para realizar los ensayos de compresión.

- Microscopio electrónico de barrido, marca: Hitachi, modelo: S-2400, capacidad: 100-5000x.



**Figura 3.5.** Microscopio utilizado para la observación de microestructuras y análisis elemental.

- Deshumidificador, marca: Ernest F. Fullham Incorporated.



**Figura 3.6.** Deshumidificador empleado durante el secado de las muestras.

- Metalizador, marca: Hitachi.



**Figura 3.7.** Equipo empleado para eliminar los restos de óxido en las muestras.

### **3.7. Ensayos**

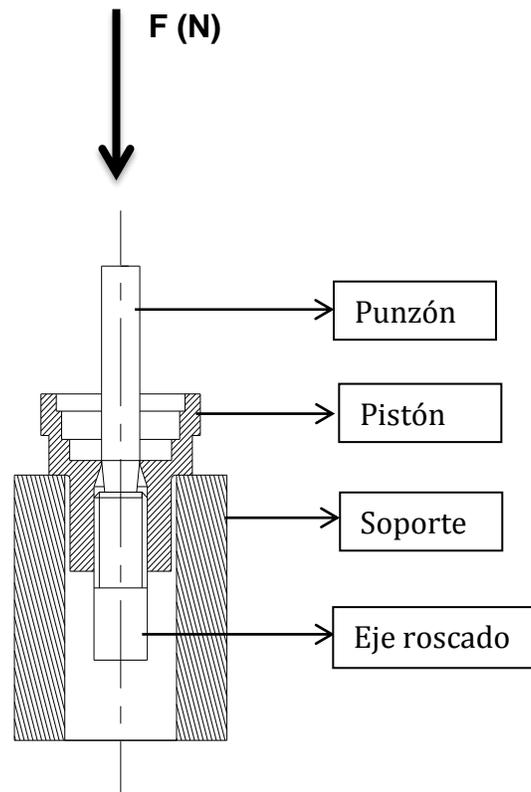
Son necesarios para observar el comportamiento mecánico de los pistones bajo las diversas condiciones a estudiar.

Los ensayos mecánicos realizados fueron: Compresión Uniaxial (especialmente diseñada), Dureza Rockwell F, Microdureza Vickers; y además se estudió la microestructura y composición a partir de microscopía, tanto en M.O. (Microscopía Óptica) como en M.E.B. (Microscopía Electrónica de Barrido).

#### **3.7.1 Ensayo de Compresión Uniaxial.**

Con este ensayo se determinó la resistencia de los pistones a una fuerza aplicada de manera gradual. En primer lugar, fue necesaria la fabricación de una matriz que sirvió de soporte (un cilindro de 110 (mm) de altura y 21,03 (mm) de diámetro interno) en la cual el pistón fue montado.

Cabe destacar que la región del pistón con un menor diámetro ( $d = 190,05$  (mm)) fue introducida en el agujero del dispositivo de prueba, y la zona de mayor diámetro ( $d = 26,97$  (mm)) quedó sobre la matriz. En uno de los extremos del pistón (suspendido dentro de la matriz) se ensambló un eje (vástago) de rosca 7/16" de diámetro y por el otro extremo del pistón se introdujo un punzón (al cual se le aplicó la carga de compresión) que aplicó una fuerza directamente sobre el vástago antes roscado, permitiendo una fractura del pistón (a elevadas cargas) por tracción, a pesar de que la fuerza es aplicada a compresión. Es necesario resaltar que la carga se aplicó hasta lograr la fractura del pistón.



**Figura 3.8.** Esquema del sistema utilizado para el ensayo de compresión en los pistones.

### 3.7.2 Ensayo de Microdureza Vickers.

El ensayo consistió en hacer (sobre la superficie de una probeta) una huella con un penetrador en forma de pirámide recta de base cuadrada con determinado ángulo entre las caras opuestas (punta de diamante), y medir las diagonales de dicha huella después de quitar la carga. Para la realización de este ensayo, las cargas aplicadas fueron muy pequeñas (entre 1 y 1000 (gf)); es decir, entre 0,0098 y 9,8 (N).

Asimismo es necesario asegurar que la superficie de la probeta esté pulida, plana, limpia, homogénea y libre de óxido y lubricantes. Para ello se procedió a preparar la superficie del pistón seleccionada (preparación

metalográfica): En primer lugar se realizó la preparación mecánica de la muestra, utilizando papeles abrasivos de grano grueso (N° 180, 240 y 320), y seguidamente de grano fino (N° 400, 500, 600 y 1200). Para pasar de un papel a otro se debe obtener una superficie plana, uniforme y las rayas deben estar en una misma dirección. Una vez logrado esto, ya se está en condiciones de utilizar el papel abrasivo siguiente (que sea de granos más finos al anterior utilizado), girando la muestra 90° para luego proceder de la misma forma (repetiendo el procedimiento).

A continuación se realizó un pulido grueso (con alúmina 0,1 ( $\mu\text{m}$ )) y luego un pulido fino (con alúmina 0,05 ( $\mu\text{m}$ )) llegando a un acabado superficial de tipo espejo. Seguidamente el microdurómetro fue calibrado para que la carga de penetración del indentador sea de 100 (gf); es decir, 0,98 (N). Después se aplicó la carga por un tiempo establecido de 5 segundos en una zona del pistón seleccionada previamente. Luego de aplicar la carga el equipo mostró el valor de la microdureza Vickers, así como de las diagonales en ( $\mu\text{m}$ ). Fue necesario realizar un mínimo de 5 indentaciones por cada pistón para obtener un valor promedio, además de una desviación menos pronunciada.

### **3.7.3 Ensayo de Dureza Rockwell F.**

El estándar ASTM E 18-03 define el ensayo de dureza Rockwell como un método de ensayo por indentación por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza un indentador cónico-esferoidal de diamante (penetrador de diamante), o una bola de acero endurecido (acero o carburo de tungsteno), bajo condiciones específicas contra la superficie del material a ser ensayado, y se mide la profundidad permanente de la impresión bajo

condiciones específicas de carga. Además, dicha norma define el número de dureza Rockwell como un número derivado del incremento neto en la profundidad del indentador cuando la fuerza en el mismo es incrementada desde una fuerza previa (preliminar específica) hasta una fuerza total (específica) y luego retornada al valor de fuerza previa.

Para la realización del ensayo, en primer lugar se procedió a establecer la escala de dureza adecuada para el material que se quiere estudiar (escala F, que es la utilizada para estudiar aceros blandos y aleaciones de cobre recocido). Para este ensayo se utilizó un indentador de bola esférica de acero endurecido (templado y pulido) de 1/16", el cual fue presionado contra las probetas una vez que estuvieron preparadas. Seguidamente se aseguró de que las caras de los pistones a estudiar estuvieran totalmente planas para el correcto desarrollo del ensayo. A continuación se le aplicó una precarga menor de 10 Kgf (98 N), básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. Luego se le aplicó durante unos 15 segundos una carga de 60 Kgf (588 N) a compresión.

Los valores correspondientes a la dureza fueron calculados por el equipo automáticamente y presentados en un panel digital. Para cada condición se estudiaron tres pistones, realizando un total de quince indentaciones por cada pieza (teniendo en cuenta que la separación del borde de la probeta y de una huella al borde de la otra debe ser mayor a 2,5 veces el diámetro de la huella), lo que permitió establecer una tendencia aproximada del efecto que tiene la variación de la temperatura de sinterizado.

### **3.7.4. Microscopía Electrónica de Barrido.**

Para este estudio se empleó un microscopio electrónico de barrido (M.E.B.), el cual hace incidir hacia la muestra un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen con lo que se pueden obtener imágenes de alta resolución, lo que permite que características espacialmente cercanas en la muestra puedan ser examinadas a una alta magnificación. Éste estudio permitió la observación y caracterización superficial de los pistones (sinterizados a los niveles de temperatura establecidos), entregando información morfológica de las zonas microscópicas, como son: tamaño de partícula, porosidad de la muestra, composición química, entre otras.

En primer lugar las muestras fueron cortadas a  $1 \times 0,5$  (cm<sup>2</sup>) (ya que el máximo tamaño que permite el equipo es de  $1 \times 1$  (cm<sup>2</sup>)). Dichas muestras se prepararon metalográficamente hasta obtener un acabado tipo espejo (es de gran importancia que no se observen ralladuras, puesto que pueden modificar notablemente los resultados del estudio). Luego se procedió a introducir las muestras en un equipo metalizador, el cual mediante un intercambio iónico, esparció uniformemente una delgada capa de oro sobre la superficie pulida, con la finalidad de cubrir las oxidaciones existentes en las muestras. Cabe destacar que las muestras deben ser ciento por ciento conductoras de electricidad para poder observar con claridad todos los detalles de las mismas (el óxido no es un conductor de electricidad). Seguidamente las muestras cubiertas de oro se introdujeron en una cámara de vacío, en la cual se extrajo cualquier indicio de humedad existente. A continuación, las muestras ya se encuentran preparadas para la realización del estudio de microscopía electrónica de barrido.

Antes de introducir las muestras al equipo (una a la vez), fue necesario verter en dicho equipo, aproximadamente dos litros de nitrógeno líquido (a una temperatura de  $-190$  ( $^{\circ}\text{C}$ )), el cual es utilizado para crear un vacío que permita la libre circulación de los electrones en el espacio confinado especialmente diseñado para el estudio de la muestra. Finalmente las muestras fueron introducidas en el equipo para realizar un estudio EDX o análisis elemental, con el cual se analizaron diversos parámetros determinantes para el desarrollo de este trabajo de grado.

### **3.7.5. Microscopía Óptica.**

Consiste en observar mediante un microscopio las diferentes muestras sinterizadas a los niveles de temperatura establecidos además de las importadas, con la finalidad de detectar las características heterogéneas de las mismas, tales como: defectos superficiales, porosidades y características de partícula. Toda la información recopilada mediante este procedimiento servirá de complemento a la obtenida en los diferentes ensayos, con lo cual se pueden analizar más detalladamente las propiedades de los pistones.

Para la preparación metalográfica de las muestras, la superficie seleccionada para la observación se debió de hacer primero plana mediante un desbaste grueso utilizando lijas de carburo de silicio N<sup>o</sup> 120 a través de la lijadora de banda. Luego del desbaste grueso, se procedió a realizar el desbaste medio (con papel abrasivo de carburo N<sup>o</sup> 180 hasta el N<sup>o</sup> 320) y fino (con papel abrasivo de carburo N<sup>o</sup> 400 hasta el N<sup>o</sup> 1200). Cuando la observación visual demostró que sólo existen las rayas producidas por el último papel empleado y se han eliminado totalmente las de las anteriores pasadas, la probeta está en condiciones de ser pulida.

En cuanto al pulido, se utilizó una pulidora metalográfica para eliminar de las superficies las rayas finas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulido (pulido espejo). La superficie de la muestra se colocó sobre un paño embebido con una suspensión de abrasivo (alúmina) y fijado a un disco que gira accionado por el motor de la pulidora; cabe destacar que se utilizó alúmina gruesa para un primer pulido y luego alúmina fina para el pulido final, teniendo cada pulido un tiempo de duración de 5 minutos.

Al tener preparada la muestra, se procedió a hacer el ataque químico aplicando el método de impregnación con Nital al 2 (%), humedeciendo un algodón con este reactivo y frotándolo contra la superficie pulida durante un tiempo de 5 segundos, después se enjuagó con abundante agua para detener la acción del reactivo, seguidamente se aplicó etanol con el objetivo de eliminar las gotas de agua restantes y por último se secó la superficie con aire caliente colocando la muestra de forma inclinada para desplazar cualquier exceso de líquido y humedad.

Al tener la muestra lista, ésta se colocó en el microscopio, y se obtuvieron imágenes de la microestructura de cada una con un aumento de 100x, 200x, 400x y 1000x, para que de esta manera se pueda hacer un análisis profundo de todas las características microestructurales de los pistones.

**3.7.6. Flujograma de los ensayos.**



**Figura 3.9.** Flujograma resumen de todos los ensayos aplicados a los pistones sinterizados.

# CAPÍTULO 4

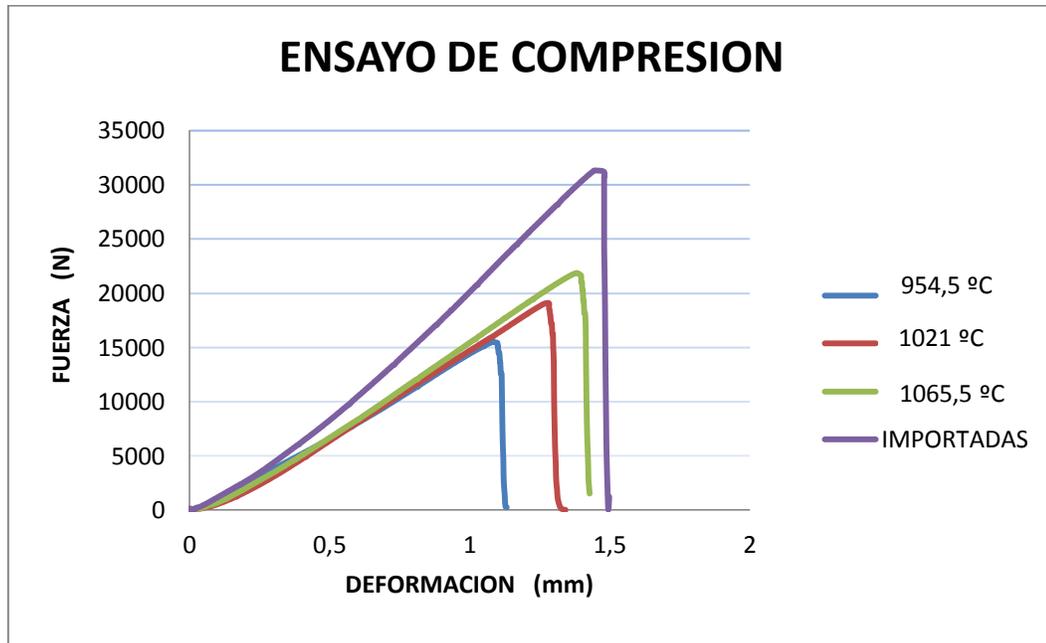
## *Resultados obtenidos*

---

---

### **4.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN.**

La grafica de la figura 4.1 muestra los resultados del ensayo de compresión uniaxial especialmente diseñado, considerando un pistón a cada una de las condiciones estudiadas (sinterizados a 954,5 (°C), 1021 (°C), 1065,5 (°C) y las muestras importadas). Cabe destacar que todas las muestras fueron sometidas a una carga estática hasta que fallaron. La curva azul es la que representa una el pistón sinterizado a 954,5 (°C) y se puede observar que fracturó a la menor carga (15499 (N)), y además obtuvo la menor deformación elástica (1,132 (mm)). La curva roja representa el pistón sinterizado a 1021 (°C), el cual falló a una carga mayor que la muestra anterior (19059 (N)), así como una mayor deformación (1,498 (mm)). Seguidamente la curva verde es la que representa una el pistón sinterizado a 1065,5 (°C), el cual fracturó a 21845 (N) y obtuvo una deformación de 1,428 (mm). Finalmente la curva morada es la que constituye los resultados obtenidos de la realización de dicho ensayo a la muestra importada, la cual falló a la mayor carga de todas las muestras estudiadas (31306 (N)), además de obtener la mayor deformación (1,498 (mm)).



**Figura 4.1** Gráfica de los resultados obtenidos para los ensayos de compresión.

## 4.2. ENSAYO DE MICRODUREZA.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para las diferentes condiciones ensayadas.

Los parámetros del ensayo para todas las condiciones fueron los siguientes:

Tiempo de indentación = 5 (s).

Carga aplicada = 0,1 (Kgf); es decir, 0,98 (N).

### 4.2.1. Pistones sinterizados a 954,5 (°C).

Los resultados se muestran a continuación en la tabla 4.1.:

**Tabla 4.1** Valores de microdureza Vickers para  $T_s = 954,5$  (°C).

	I1	I2	I3	I4	I5
M1-T1-MV	60,60	65,30	59,80	63,10	71,00
M2-T1-MV	57,90	42,60	50,70	45,20	44,60
M3-T1-MV	59,10	50,30	47,60	68,80	52,40

**Leyenda:**

I1, I2, I3, I4, I5: Indentaciones.

M1: Muestra 1.

M2: Muestra 2.

M3: Muestra 3.

T1: Temperatura de 954,5 (°C).

MV: Ensayo de Microdureza Vickers.

De este grupo de datos, se determinó el valor máximo, el mínimo, el rango, el número de clases y el ancho de clase. Haciendo un cálculo de ejemplo para esta condición se tiene:

$$\text{Valor Máximo} = 71,00$$

$$\text{Rango (R)} = 28,40$$

$$\text{Valor Mínimo} = 42,60$$

$$\text{Número de Clases (N}_c\text{)} = \sqrt{5 \times 3} = 3,87 \cong 4$$

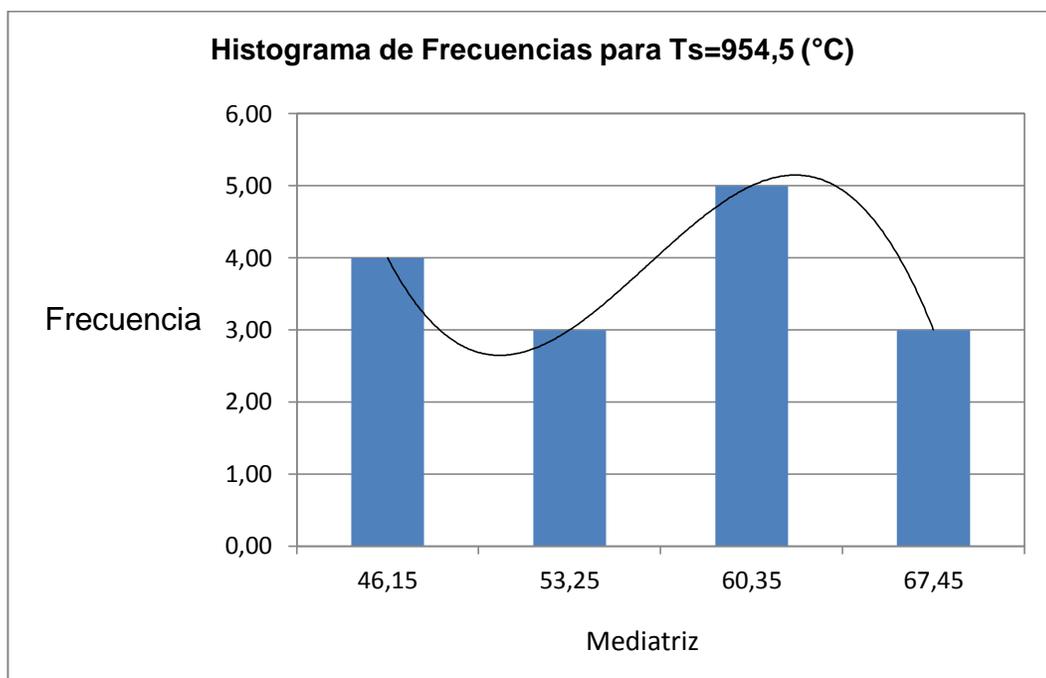
$$\text{Ancho de Clase (A}_c\text{)} = \frac{R}{N_c} = \frac{28,40}{4} = 7,10$$

Luego se calculó la mediatriz y la frecuencia las cuales definen el histograma de frecuencias:

**Tabla 4.2** Tabla de valores necesarios para el histograma de frecuencias.

Clases	Mediatriz	Frecuencia
[42,60-49,70)	46,15	4,00
(49,70-56,80)	53,25	3,00
(56,80-63,90)	60,35	5,00
(63,90-71,00]	67,45	3,00

Aplicando los conceptos de estadística básica, se elaboró un histograma de frecuencias para poder analizar la distribución de los datos obtenidos, representándose en la siguiente figura:

**Figura 4.2** Histograma de frecuencias para Ts = 954,5 (°C).

Según se observa en la figura 4.2, la mayor frecuencia es de 5, la cual corresponde a la mediatriz de 60,35; es decir, que de los datos obtenidos del ensayo, hay una mayor cantidad que están cerca de esta mediatriz, por lo

tanto para la temperatura de sinterizado de 954,5 (°C), los valores de microdureza que más se obtienen de la producción están cercanos a este valor.

Para comprobar que tan dispersos del promedio están los datos obtenidos, se calculó la desviación estándar de este grupo de la siguiente manera:

Se obtuvo el promedio de los datos que pertenecen a las muestras sinterizadas a una temperatura de 954,5 (°C), el cual es:

$$\bar{X} = 55,93, \text{ donde } \bar{X} \text{ es el promedio de datos.}$$

Luego de esto, aplicando las ecuaciones respectivas de varianza y desviación estándar se obtuvo lo siguiente:

$$\sigma = 9,04, \text{ siendo } \sigma \text{ la desviación estándar de los datos obtenidos.}$$

#### **4.2.2. Pistones sinterizados a 1021 (°C).**

Los resultados que se obtuvieron para este ensayo se muestran a continuación en la tabla 4.3:

**Tabla 4.3** Valores de microdureza Vickers para  $T_s = 1021$  (°C).

	I1	I2	I3	I4	I5
M1-T2-MV	55,40	61,80	73,60	65,20	75,40
M2-T2-MV	64,80	64,70	63,60	60,10	65,50
M3-T2-MV	74,00	60,60	62,10	63,10	73,50

#### **Leyenda:**

I1, I2, I3, I4, I5: Indentaciones.

M1: Muestra 1.

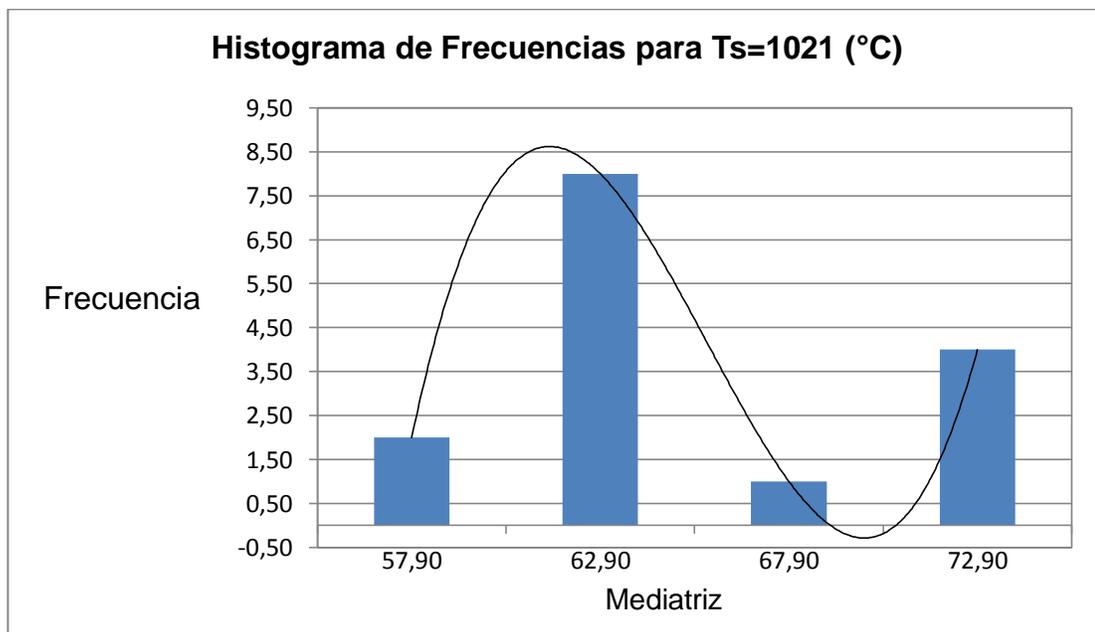
M2: Muestra 2.

M3: Muestra 3.

T2: Temperatura de 1021 (°C).

MV: Ensayo de Microdureza Vickers.

Con los datos de la tabla 4.3 se construyó el histograma de frecuencias mostrado a continuación:



**Figura 4.3** Histograma de frecuencias para Ts = 1021 (°C).

En lo que respecta a la figura 4.3, se nota que la mayor cantidad de datos está cerca de la mediatriz de 62,90; es decir, que muchos de los pistones sinterizados a esta temperatura tienen un valor microdureza Vickers similar.

El promedio obtenido es:  $\bar{X} = 65,56$  y el valor de desviación estándar viene dado por:  $\sigma = 5,92$

### 4.2.3. Pistones sinterizados a 1065,5 (°C).

Siguiendo el mismo procedimiento, para esta temperatura, los pistones fueron ensayados con las mismas condiciones.

Los resultados se muestran a continuación en la tabla 4.4:

**Tabla 4.4** Valores de microdureza Vickers para  $T_s = 1065,5$  (°C).

	I1	I2	I3	I4	I5
M1-T3-MV	103,40	93,80	90,40	87,30	80,50
M2-T3-MV	80,80	75,70	82,20	75,50	85,40
M3-T3-MV	82,90	82,20	98,00	97,80	103,40

**Leyenda:**

I1, I2, I3, I4, I5: Indentaciones.

M1: Muestra 1.

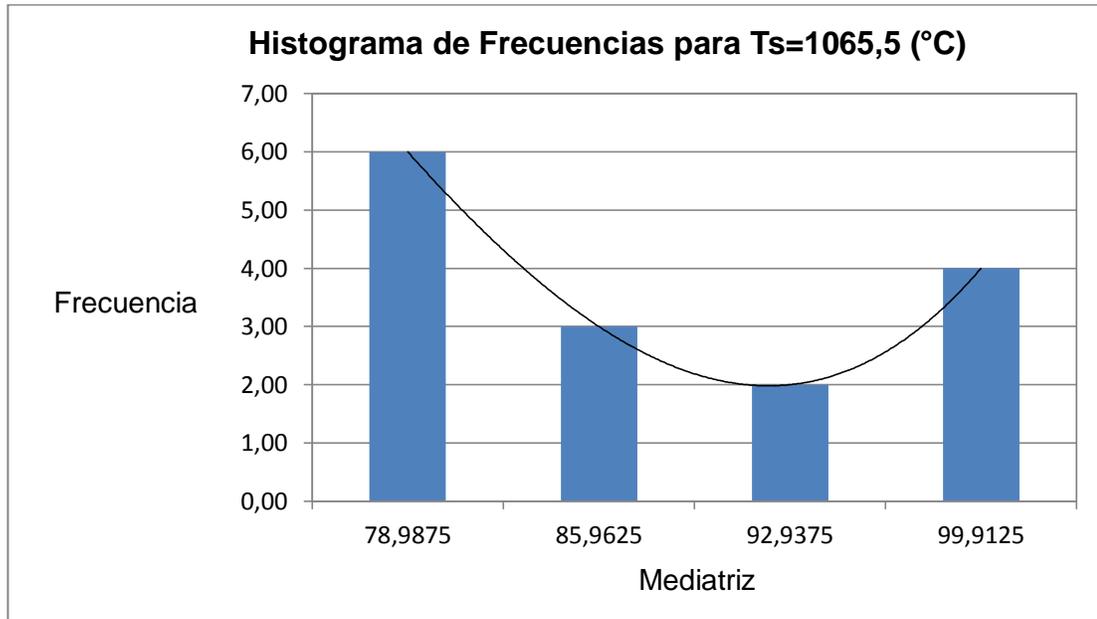
M2: Muestra 2.

M3: Muestra 3.

T3: Temperatura de 1065,5 (°C).

MV: Ensayo de Microdureza Vickers.

Con los datos de la tabla 4.4 se construyó el histograma de frecuencias mostrado a continuación:



**Figura 4.4** Histograma de frecuencias para  $T_s = 1065,5$  (°C).

En la gráfica 4.4 se observa claramente dos extremos, en el cual, el de mediatriz 78,9875 presenta una mayor frecuencia de datos (de seis).

El promedio obtenido es:  $\bar{X} = 87,95$  y el valor de desviación estándar viene dado por:  $\sigma = 9,35$

Se puede apreciar que el promedio pertenece a la parte más baja de la curva.

#### 4.2.4. Pistones sinterizados importados.

Los resultados para esta condición se muestran a continuación en la tabla 4.5.:

**Tabla 4.5** Valores de microdureza Vickers para pistones importados.

	I1	I2	I3	I4	I5
M1-Imp-MV	131,50	125,10	133,60	138,40	127,10
M2-Imp-MV	139,80	147,60	154,90	140,70	136,20
M3-Imp-MV	124,50	114,70	123,80	110,30	130,80

**Leyenda:**

I1, I2, I3, I4, I5: Indentaciones.

M1: Muestra 1.

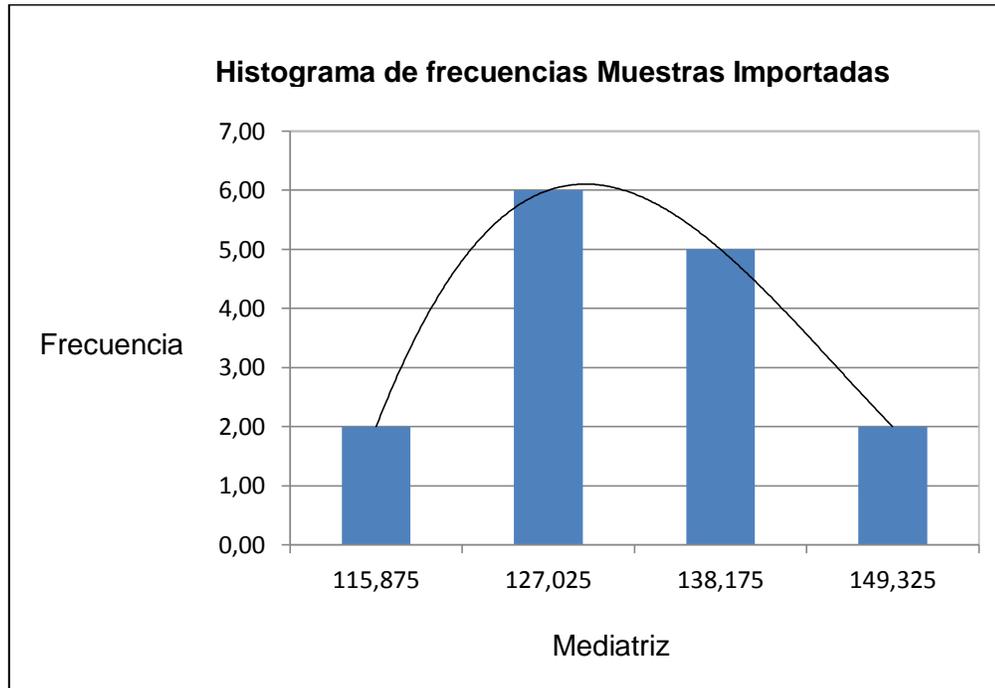
M2: Muestra 2.

M3: Muestra 3.

Imp: Pistones importados.

MV: Ensayo de Microdureza Vickers.

Obtenidos los datos, se construyó el histograma de frecuencias para esta condición:



**Figura 4.5** Histograma de frecuencias para pistones importados.

De acuerdo a la gráfica se observa que para la mediatriz de 126,975 se presenta la mayor frecuencia cuyo valor es seis, lo que indica que una gran cantidad de datos está cercana a esta cantidad, pero también hay que tomar en cuenta la frecuencia de 5 que es de la mediatriz de 138,175, porque una cantidad considerable de datos también aparecerá para esta mediatriz.

El promedio es:  $\bar{X} = 131,93$  y el valor de desviación estándar viene dado por:  $\sigma = 11,74$

### 4.3. ENSAYO DE DUREZA.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos para este ensayo con todas las condiciones estudiadas con sus respectivos histogramas de frecuencias. Los parámetros del ensayo para todas las

condiciones fueron los siguientes: Carga aplicada: 60 (Kgf); es decir, 588,4 (N).

#### 4.3.1. Pistones sinterizados a 954,5 (°C).

Cabe destacar que se empleó el mismo procedimiento utilizado en los cálculos del ensayo de microdureza para determinar los histogramas de frecuencias.

**Tabla 4.6** Valores de Dureza Rockwell F para pistones a Ts = 954,5 (°C).

	M1-T1-DRF	M2-T1-DRF	M3-T1-DRF
I1	26,6	30,2	27,1
I2	30,2	34	28,2
I3	32,8	31,6	33,1
I4	28,9	32,9	31,6
I5	31,2	30,3	32,2
I6	27,8	31,3	34,3
I7	30,7	32,4	32,8
I8	30,3	29,7	28,6
I9	27,3	27,6	30,9
I10	27,6	29,7	26,3
I11	32,3	28,4	33,5
I12	28,6	33,9	32,7
I13	27,4	31,2	30,9
I14	28,3	30,8	27,3
I15	29,6	31,6	29,8

**Leyenda:**

I1, I2, I3, I4, I5...: Indentaciones.

M1: Muestra 1.

M2: Muestra 2.

M3: Muestra 3.

T1: Temperatura de 954,5 (°C).

DRF: Ensayo de Dureza Rockwell F.

Teniendo estos datos, se calculó el valor máximo, el valor mínimo, el rango, el número de clases y el ancho de clase de la siguiente manera:

Valor máximo = 34,3

Valor mínimo = 26,3

Rango (R) = 8

Número de Clases (Nc) =  $\sqrt{15 \times 3} = 6,70 \cong 7$

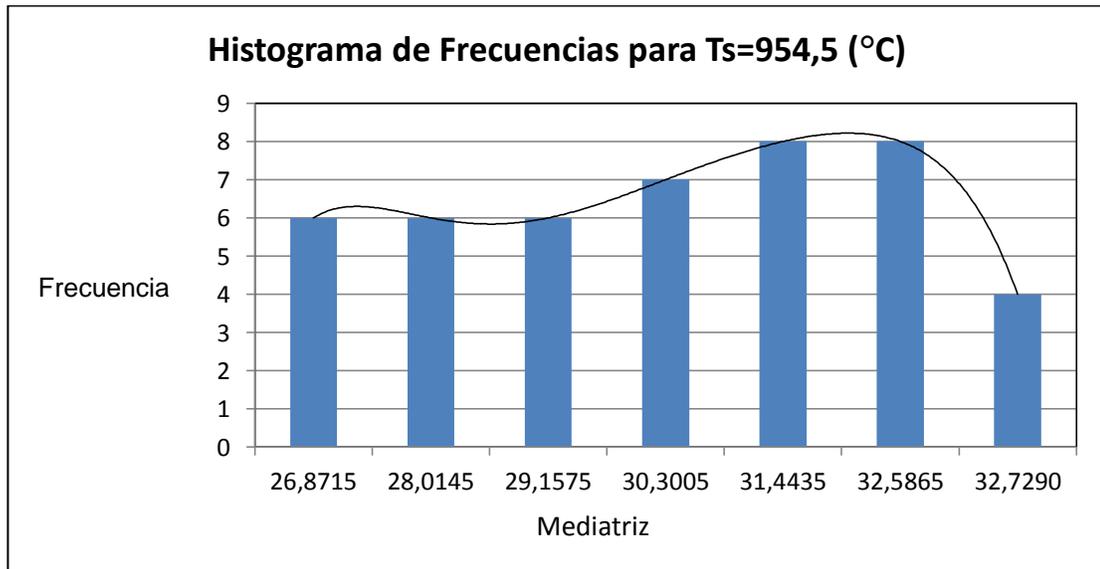
Ancho de Clase (Ac) =  $\frac{R}{Nc} = \frac{8}{7} = 1,143$

Después de esto, se calculó la mediatriz y la frecuencia, quienes son los que definen el histograma de frecuencias:

**Tabla 4.7** Valores de mediatriz y frecuencia.

Mediatriz	Frecuencia
26,8715	6
28,0145	6
29,1575	6
30,3005	7
31,4435	8
32,5865	8
32,7290	4

Al tener todos los datos necesarios y utilizando operaciones estadísticas, se obtuvo la distribución de datos con el histograma mostrado a continuación:



**Figura 4.6** Histograma de frecuencias para Ts = 954,5 (°C).

Se puede ver que en la figura 4.6 el valor más grande de frecuencia es de 8, repitiéndose en este caso para 2 mediatrices, también para la mediatriz de 30,005 se nota una alta frecuencia (siendo de 7), teniéndose la mayor concentración de datos de microdureza entre estas dos mediatrices.

Para determinar la dispersión de los datos obtenidos, se calculó la desviación estándar de este grupo obteniéndose:

El promedio es:  $\bar{X} = 30,32$  y el valor de desviación estándar viene dado por:  $\sigma = 2,21$

#### **4.3.2. Pistones sinterizados a 1021 (°C).**

Para esta temperatura, los pistones fueron ensayados con las mismas condiciones que la temperatura anterior, con el objetivo de elaborar el respectivo histograma de frecuencias y calcular la desviación estándar de los datos.

**Tabla 4.8** Valores de Dureza Rockwell F para pistones a  $T_s = 1021$  (°C).

	<b>M1-T2-DRF</b>	<b>M2-T2-DRF</b>	<b>M3-T2-DRF</b>
<b>I1</b>	34,8	36,5	31,9
<b>I2</b>	35,9	37,7	30,9
<b>I3</b>	39	44	40,5
<b>I4</b>	36,7	35,4	39,2
<b>I5</b>	38,3	43,6	38,3
<b>I6</b>	37,1	39,3	36,9
<b>I7</b>	33,3	36	31
<b>I8</b>	32,3	36,9	33,5
<b>I9</b>	32,6	43,9	31,8
<b>I10</b>	31,8	34,5	32,5
<b>I11</b>	36,9	35,3	36
<b>I12</b>	31,7	36,3	35,6
<b>I13</b>	41,5	38,6	41,5
<b>I14</b>	36,2	40	44,3
<b>I15</b>	32,7	41,1	33,2

**Leyenda:**

I1, I2, I3, I4, I5...: Indentaciones.

M1: Muestra 1.

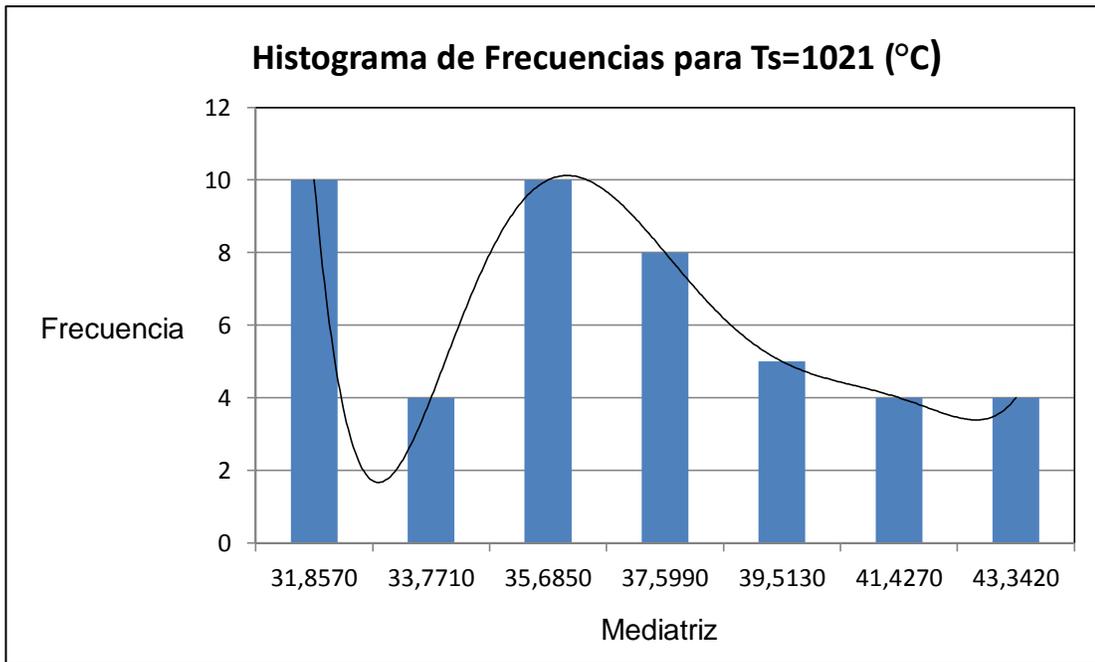
M2: Muestra 2.

M3: Muestra 3.

T2: Temperatura de 1021 (°C).

DRF: Ensayo de Dureza Rockwell F.

Se construyó el histograma de frecuencias para esta condición con los datos obtenidos:



**Figura 4.7** Histograma de frecuencias para Ts = 1021 (°C).

Se puede observar claramente que en la figura 4.7 hay 2 mediatrices que tienen la mayor frecuencia, la cual es de 10 y corresponden a valores de microdureza cercanos entre sí, pero entre estas dos mediatrices se encuentra una que presenta la menor frecuencia del gráfico, cuyo valor es 4.

Al calcular el promedio que es  $\bar{X} = 36,60$ , se obtuvo el valor de desviación estándar es:  $\sigma = 3,72$

**4.3.3. Pistones sinterizados a 1065,5 (°C).**

En la siguiente tabla se presentan los datos obtenidos para esta condición de temperatura:

**Tabla 4.9** Valores de Dureza Rockwell F para pistones a  $T_s = 1065,5$  (°C).

	M1-T3-DRF	M2-T3-DRF	M3-T3-DRF
<b>I1</b>	39	41,3	42,6
<b>I2</b>	40,6	38,5	39,2
<b>I3</b>	34,1	41,5	47,2
<b>I4</b>	34,5	42,2	42,4
<b>I5</b>	35,4	39,4	45,2
<b>I6</b>	36,6	39,6	39,7
<b>I7</b>	38,5	37,5	42,1
<b>I8</b>	38	37,7	45,7
<b>I9</b>	37,1	36,3	40,7
<b>I10</b>	38,1	33,9	41,8
<b>I11</b>	35,1	41,7	40,4
<b>I12</b>	37,4	36,4	44,2
<b>I13</b>	37,1	33,8	40,7
<b>I14</b>	38	39,5	39,8
<b>I15</b>	38,7	39	41,7

**Leyenda:**

I1, I2, I3, I4, I5...: Indentaciones.

M1: Muestra 1.

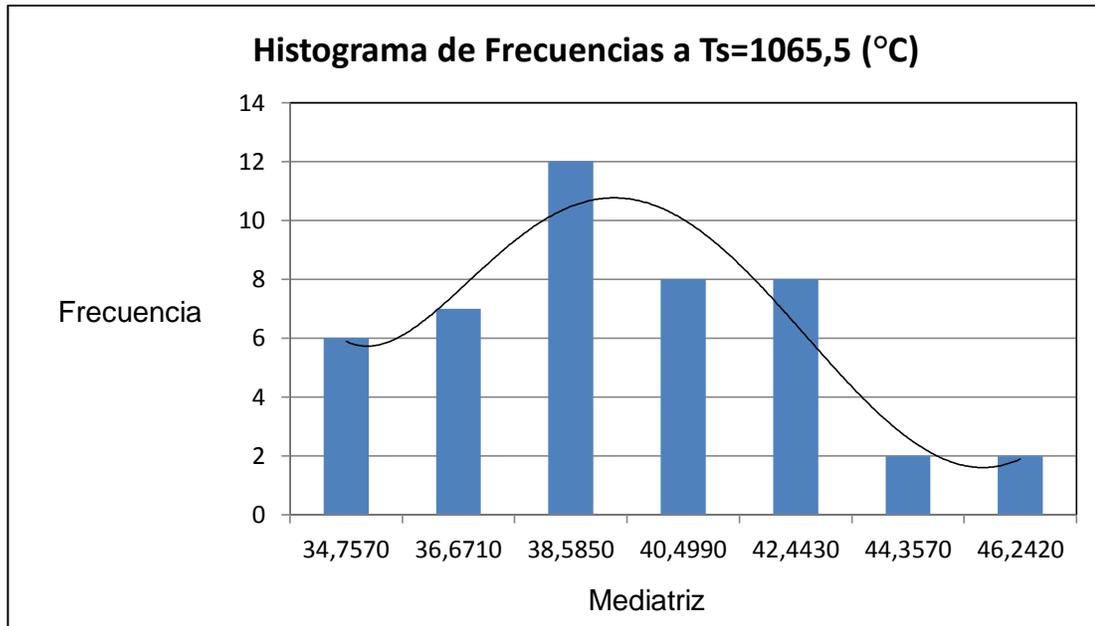
M2: Muestra 2.

M3: Muestra 3.

T3: Temperatura de 1065,5 (°C).

DRF: Ensayo de Dureza Rockwell F.

Al tener los valores de frecuencias y mediatrices, se obtuvo el histograma:



**Figura 4.8** Histograma de frecuencias para Ts = 1065,5 (°C).

En esta gráfica se puede observar claramente que los valores de dureza están cercanos a la mediatriz 38,5850, ya que su frecuencia es mayor a todas las demás a pesar de que se presentan dos matrices con valores de frecuencia de 8. También se observa que para esta temperatura las mediatrices con valores más altos presentan el número de frecuencia más bajo (en este caso 2). Este grupo de valores de dureza tiene un promedio  $\bar{X} = 39,33$ , y calculando la desviación estándar se obtuvo que:  $\sigma = 3,11$

#### 4.3.4. Pistones sinterizados importados.

A continuación se muestra una tabla en la que se encuentran los valores obtenidos de dureza para esta condición con el fin de determinar el histograma de frecuencias.

**Tabla 4.10** Valores de Dureza Rockwell F para pistones importados.

	<b>M1-Imp-DRF</b>	<b>M2-Imp-DRF</b>	<b>M3-Imp-DRF</b>
<b>I1</b>	69,4	70,3	74,8
<b>I2</b>	69,5	69,5	76,7
<b>I3</b>	71,3	71,2	74,4
<b>I4</b>	71,8	75,2	74,2
<b>I5</b>	77,9	77,8	76,4
<b>I6</b>	79,2	76,8	73,6
<b>I7</b>	77,2	78,2	75,6
<b>I8</b>	77,7	78,3	80,5
<b>I9</b>	73,8	72,9	75,3
<b>I10</b>	69,8	73,4	76,6
<b>I11</b>	72,8	69,8	77,8
<b>I12</b>	75	74,8	71,3
<b>I13</b>	75,7	75	70
<b>I14</b>	75,1	73,7	73,6
<b>I15</b>	76,4	76,6	78,7

**Leyenda:**

I1, I2, I3, I4, I5...: Indentaciones.

M1: Muestra 1.

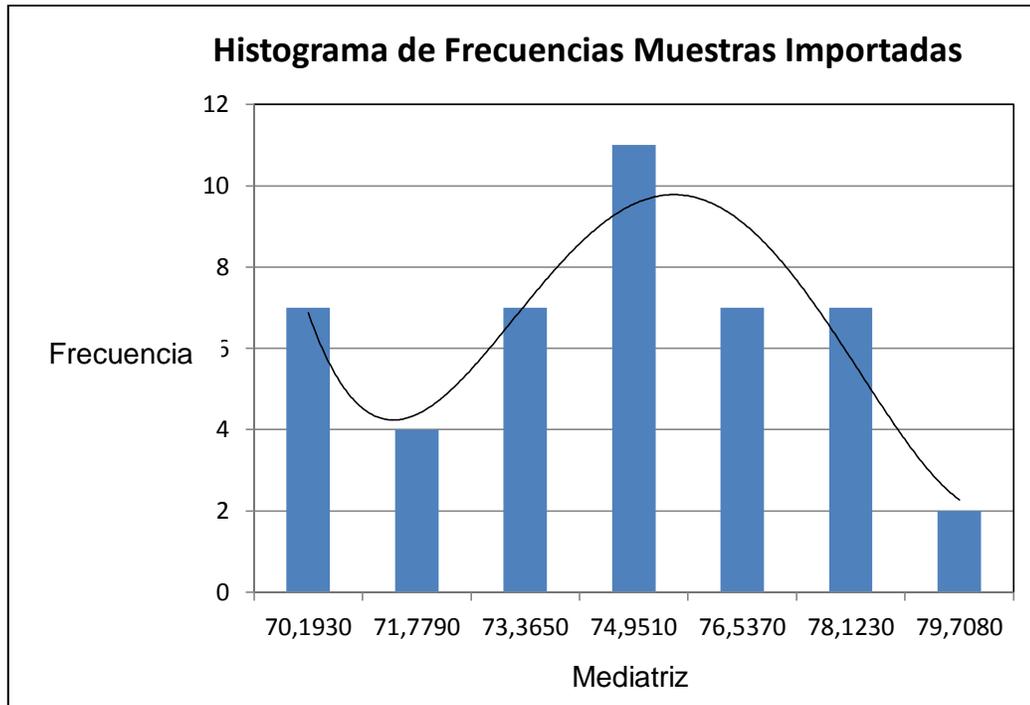
M2: Muestra 2.

M3: Muestra 3.

Imp.: Pistones importados.

DRF: Ensayo de Dureza Rockwell F.

Se procedió a elaborar el histograma de frecuencias con los datos obtenidos:



**Figura 4.9** Histograma de frecuencias para las muestras importadas.

En la gráfica de la figura 4.9 se visualiza que la frecuencia mayor pertenece a la mediatriz de 74,9510, siendo la tendencia de los valores de dureza acercarse a este valor, pero también debe tomarse en cuenta que la mayoría de las mediatrices tiene una frecuencia de 7, y que en este caso la mediatriz de mayor valor tiene la menor frecuencia.

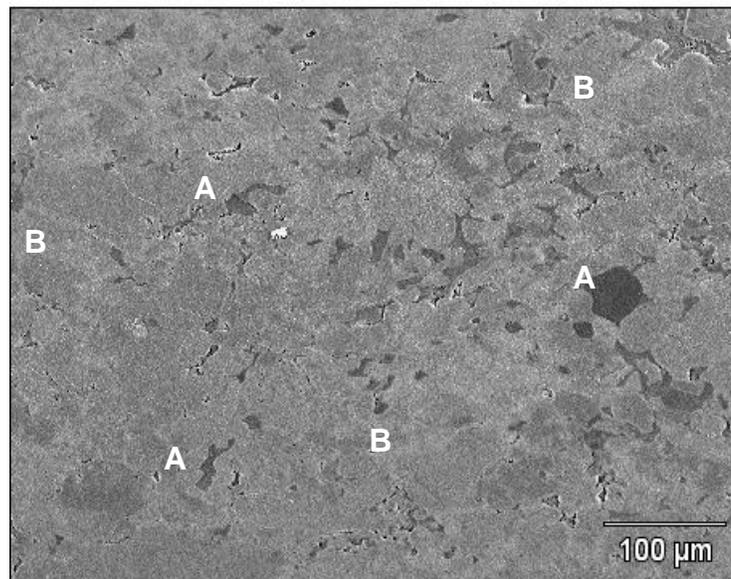
Haciendo los cálculos respectivos, se obtuvo que el promedio viene dado por  $\bar{X} = 74,57$ , y la desviación estándar es  $\sigma = 2,98$

#### **4.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.**

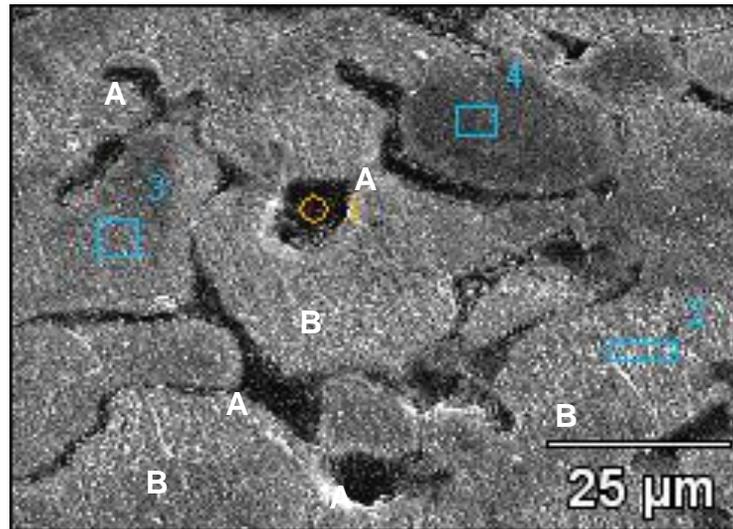
A continuación se presentan una serie de imágenes, gráficas y tablas que se obtuvieron al realizar este ensayo.

##### **4.4.1. Pistón sinterizado a 954,5 (°C).**

Para el estudio de los pistones bajo esta condición, se procedió como fue mencionado anteriormente en la metodología. En las siguientes figuras se puede ver el resultado obtenido:



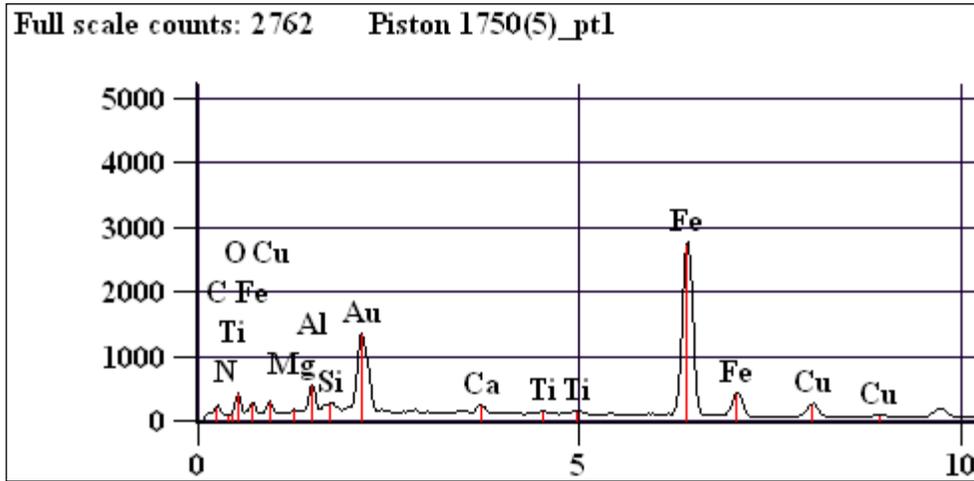
**Figura 4.10** Microscopía de la muestra sinterizada a 954,5 (°C) con una magnificación de 500X.



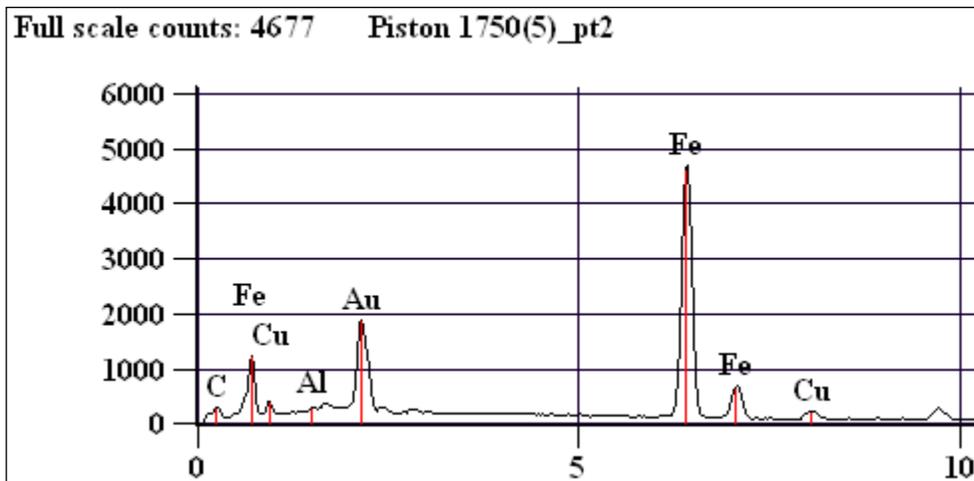
**Figura 4.11** Microscopía de la muestra sinterizada a 954,5 (°C) con una magnificación de 3000X.

Puede apreciarse en estas imágenes las diferentes zonas que presenta la muestra. Hay partes oscuras que tienen forma alargada o redondeada y que están separadas a muy poca distancia entre sí (A), pero también se observan manchas oscuras muy pequeñas e irregulares aisladas, con una zona clara predominante y que ocupa la mayor parte de la muestra (B).

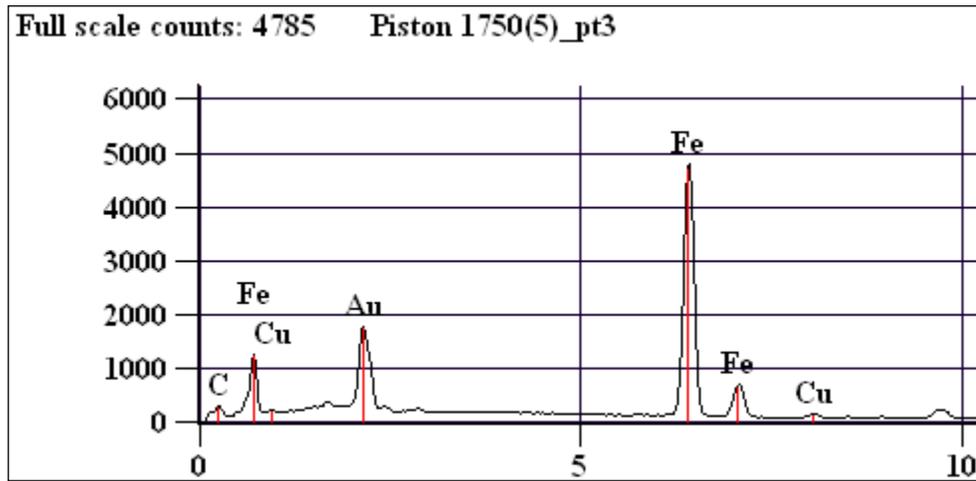
El microscopio con el que se llevó a cabo el ensayo, también tiene la capacidad de seleccionar zonas específicas para estudiar a fondo los componentes que conforman la mezcla (en este caso se seleccionaron 4 zonas, mostradas en la figura 4.11), mostrando gráficamente la distribución de cada elemento o compuesto químico presente en dicha zona, para luego presentar una tabla con el peso en porcentaje de cada componente. En el caso del pistón sinterizado a 954,5 (°C) se obtuvieron los siguientes gráficos:



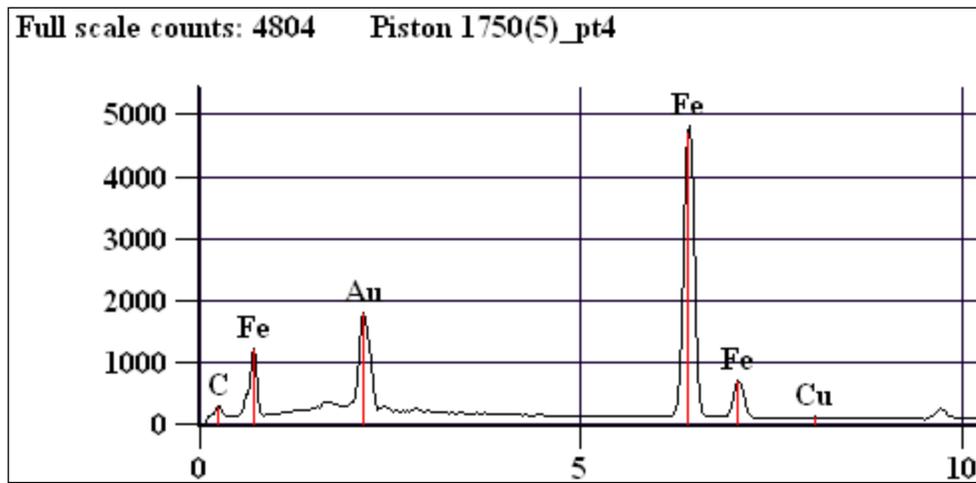
**Figura 4.12** Distribución de los componentes presentes en el punto 1 de la muestra ensayada a 954,5 (°C).



**Figura 4.13** Distribución de los componentes presentes en el punto 2 de la muestra ensayada a 954,5 (°C).



**Figura 4.14** Distribución de los componentes presentes en el punto 3 de la muestra ensayada a 954,5 (°C).



**Figura 4.15** Distribución de los componentes presentes en el punto 4 de la muestra ensayada a 954,5 (°C)

En la tabla siguiente se observa como está distribuido el peso en porcentaje:

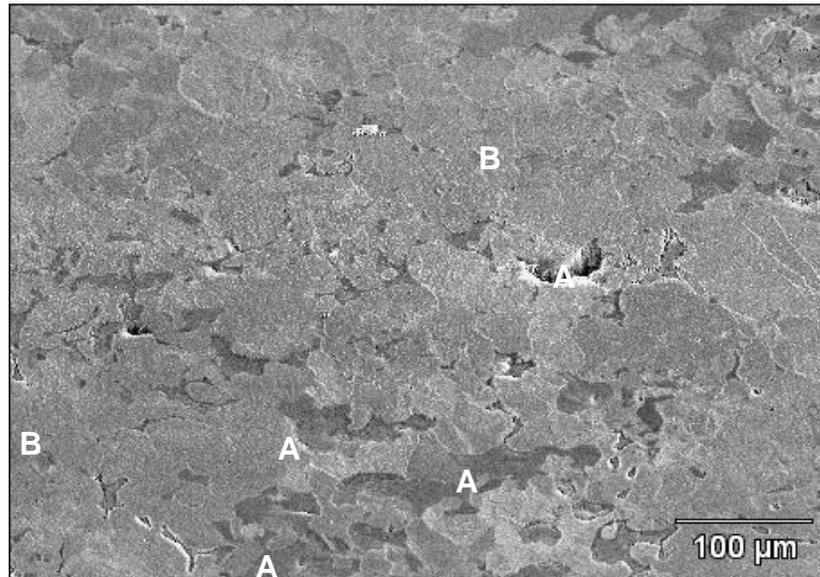
**Tabla 4.11** Peso en (%) de cada componente de la muestra a 954,5 (°C).

	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Cu
<b>Pistón 954,5 pt1</b>	1.26	4.43	1.41	1.50	1.05	78.14	12.21
<b>Pistón 954,5 pt2</b>		0.98				93.40	5.61
<b>Pistón 954,5 pt3</b>						97.43	2.57
<b>Pistón 954,5 pt4</b>						99.11	0.89

En estas gráficas se distingue la variación que tienen los componentes de la muestra; es decir, la zona o punto 1 difiere mucho respecto a los puntos 2, 3 y 4 debido a la presencia de Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Silicio (Si), Titanio (Ti), Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Cobre (Cu) en la misma, pero si se observa el punto 2, aparece Aluminio, Hierro y Cobre, y en los puntos 3 y 4 sólo aparecen los componentes principales, que son Hierro y Cobre. Se ha de notar que los componentes principales son los que presentan el mayor peso en porcentaje, y los elementos que están en el punto 1 no pasan del 5 (%) en peso cada uno. La presencia de Oro (Au) en las muestras proviene del recubrimiento inicial en la preparación para efectos de mejorar la conductividad y reducir la oxidación.

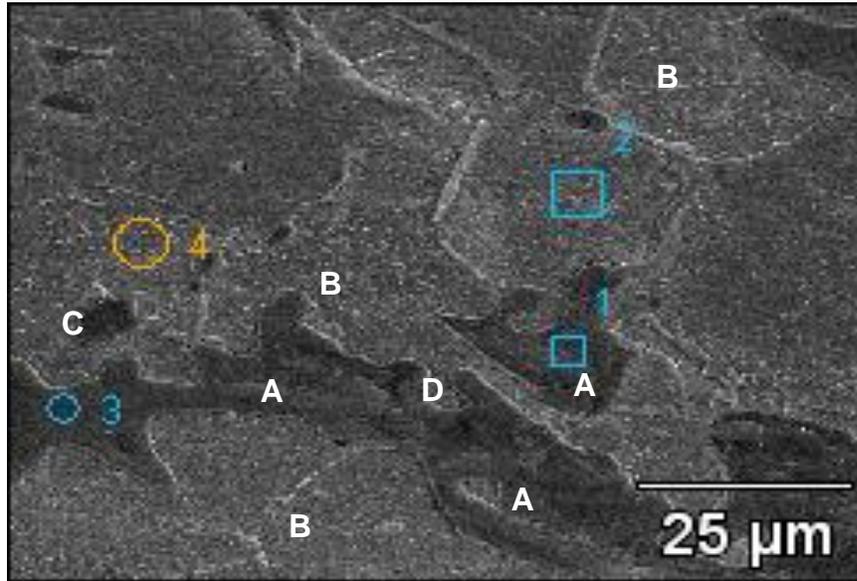
#### **4.4.2. Pistón sinterizado a 1021 (°C).**

En la figuras 4.16 y 4.17 se observa la microestructura de la muestra sometida a esta condición. En este caso también se tomaron 4 zonas para el estudio de los componentes.



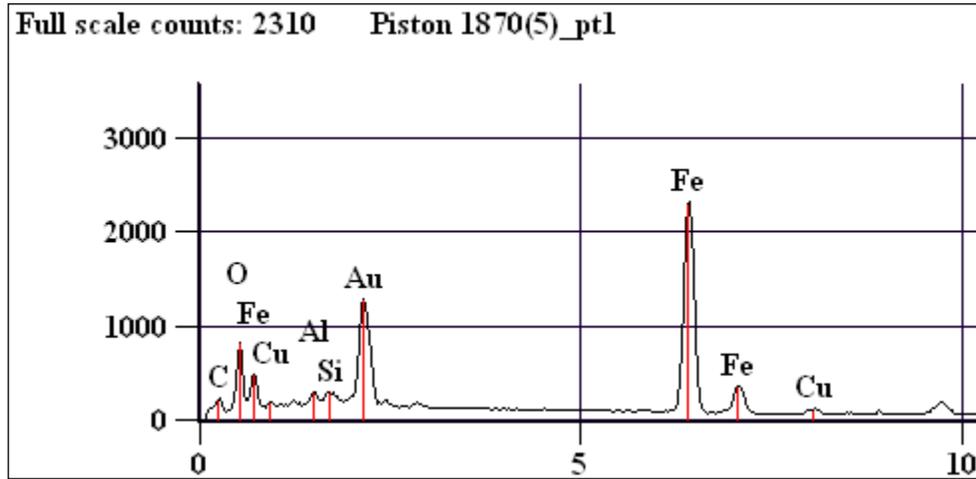
**Figura 4.16** Microscopía de la muestra sinterizada a 1021 (°C) con una magnificación de 500X.

Esta imagen presenta una morfología similar a la condición anterior, pero aquí se detalla de forma clara los bordes de partículas siendo estos de forma irregular, dándole así una apariencia no uniforme a la composición de la muestra. Se observan pequeñas zonas oscuras y con cierto grado de profundidad (A), además de pequeños puntos blancos y la zona grisácea la cual ocupa la mayor parte de la imagen (B).

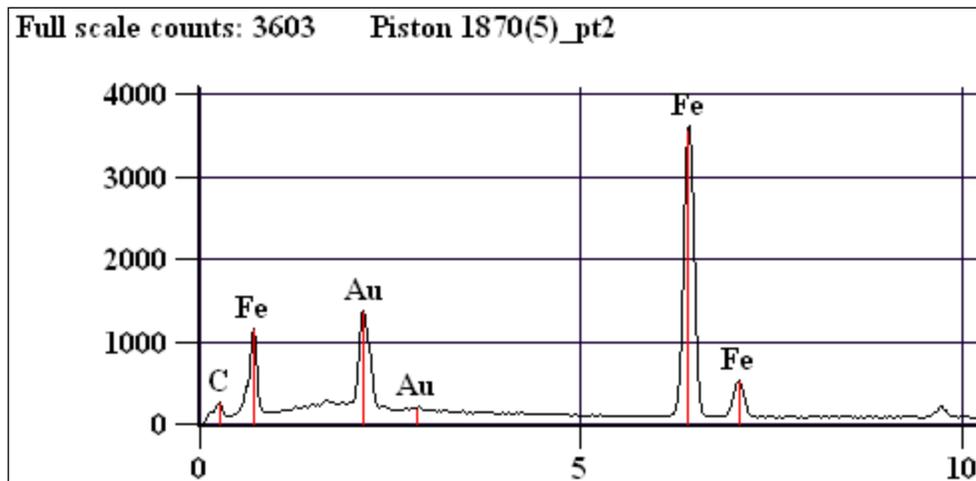


**Figura 4.17** Microscopía de la muestra sinterizada a 1021 (°C) con una magnificación de 3000X.

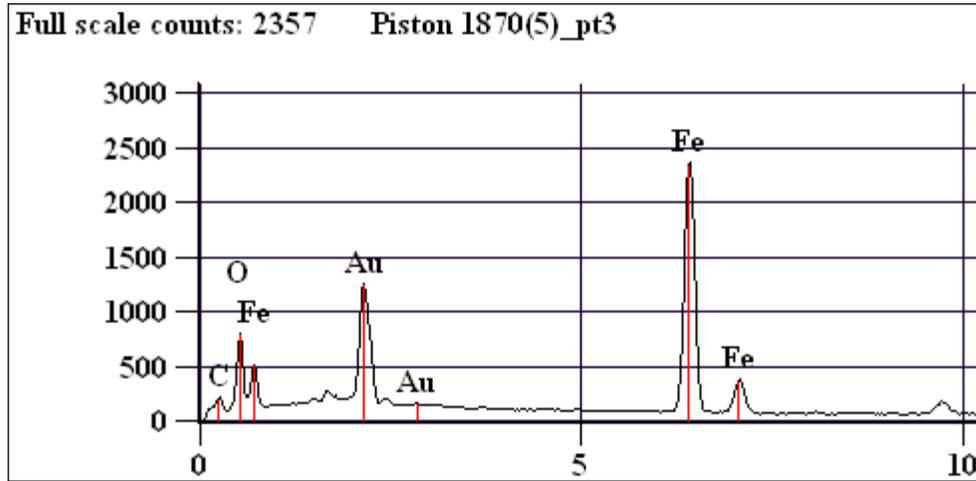
En la imagen 4.17 se aprecia una zona oscura y alargada (A), además el límite de partícula se ve claramente, dejando una zona clara la cual ocupa la mayor parte (B). En esta muestra también se hacen presente pequeñas manchas redondeadas y oscuras aisladas (C). Al ver detenidamente la figura, se puede notar la existencia de cierto desnivel o hundimiento de la zona oscura con respecto a la más clara (D). En el caso del pistón sinterizado a 1021 (°C) se obtuvieron los siguientes gráficos:



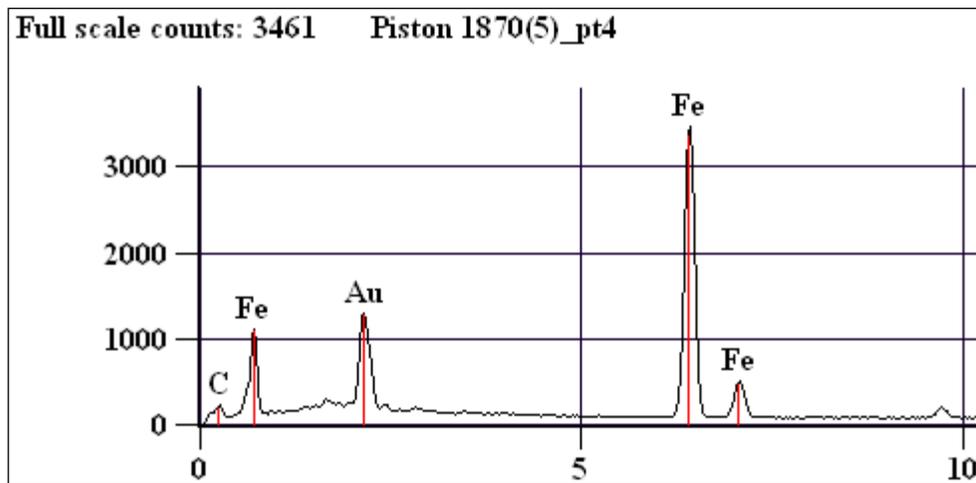
**Figura 4.18** Distribución de los componentes presentes en el punto 1 de la muestra ensayada a 1021 (°C).



**Figura 4.19** Distribución de los componentes presentes en el punto 2 de la muestra ensayada a 1021 (°C).



**Figura 4.20** Distribución de los componentes presentes en el punto 3 de la muestra ensayada a 1021 (°C).



**Figura 4.21** Distribución de los componentes presentes en el punto 4 de la muestra ensayada a 1021 (°C).

En la tabla siguiente se muestra como está distribuido el peso en porcentaje:

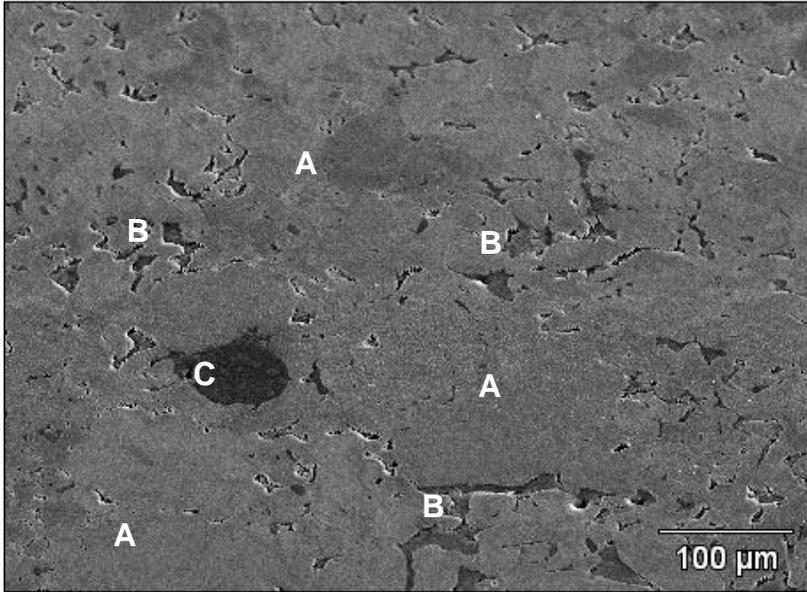
**Tabla 4.12** Peso en (%) de cada componente de la muestra a 1021 (°C).

	Al	Si	Fe	Cu
<b>Pistón 1021 pt1</b>	2.68	1.74	90.13	5.45
<b>Pistón 1021 pt2</b>			100.00	
<b>Pistón 1021 pt3</b>			100.00	
<b>Pistón 1021 pt4</b>			100.00	

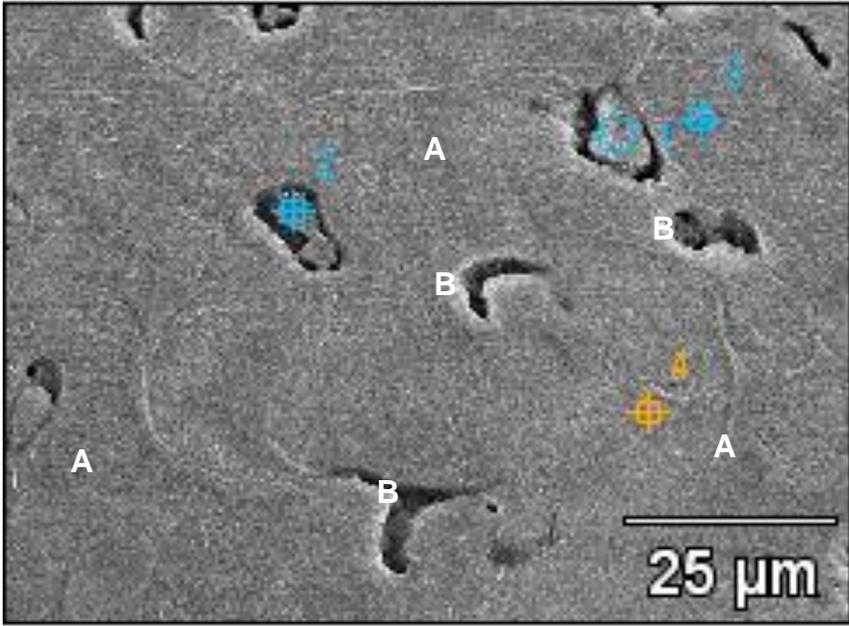
La tabla 4.12 muestra que no hay gran diferencia entre los 4 puntos marcados, ya que los puntos 2, 3 y 4 presentan un 100 (%) de Hierro, pero no hay presencia de Cobre, mientras que en el punto 1 hay otros componentes como Silicio y Aluminio en muy bajas cantidades, pero aparece un componente principal, que es el Cobre.

#### 4.4.3. Pistón sinterizado a 1065,5 (°C).

En la imágenes siguientes se observa la microestructura de la muestra sinterizada a 1065,5 (°C), y al igual que en los casos anteriores también se tomaron 4 zonas específicas para la realización de un análisis puntual de los componentes existentes.



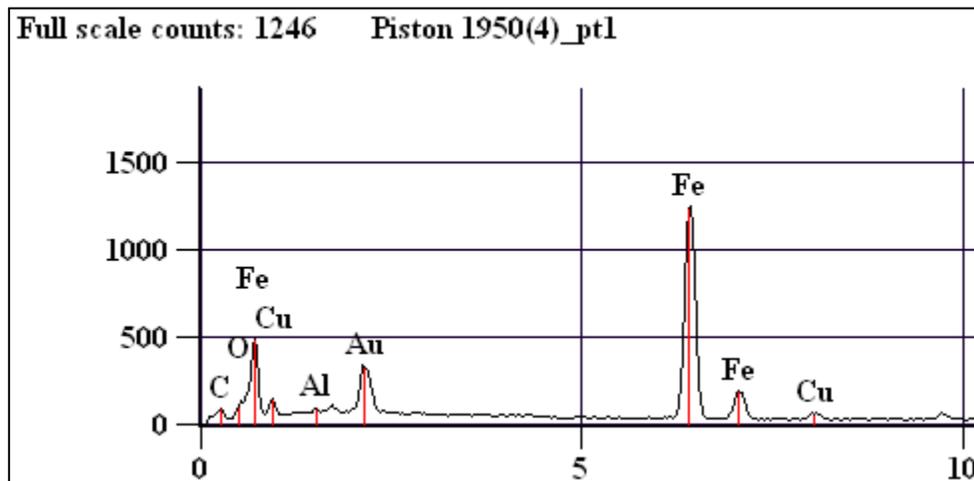
**Figura 4.22** Microscopía de la muestra sinterizada a 1065,5 (°C) con una magnificación de 500X.



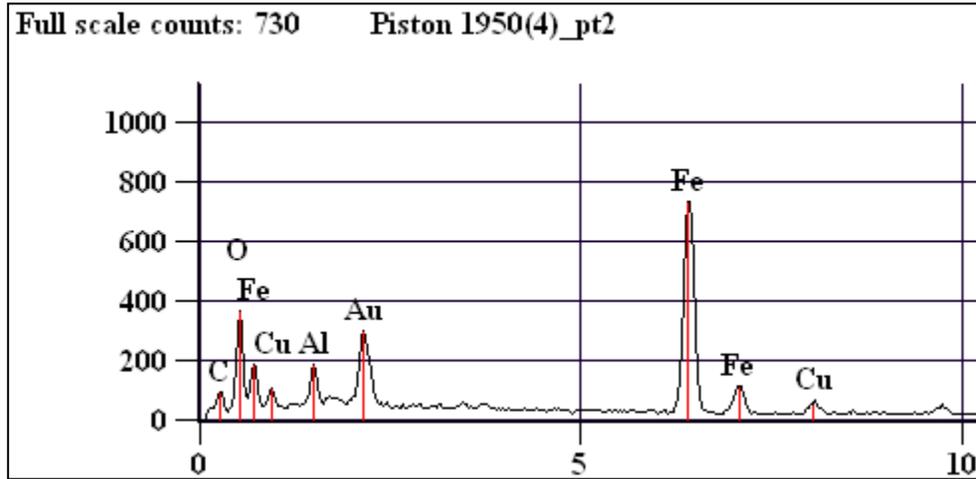
**Figura 4.23** Microscopía de la muestra sinterizada a 1065,5 (°C) con una magnificación de 3000X.

En las figuras 4.22 y 4.23 se pueden apreciar que los bordes de las partículas no están claramente definidos, además de observarse en su mayoría una zona aparentemente homogénea (A). Así mismo se detallan manchas oscuras que se presumen son porosidades (B), ya que puede notarse una ligera profundidad (en otras imágenes analizadas las manchas negras representaban una mezcla de compuestos y no una porosidad). Cabe destacar que a una magnificencia de 500x se puede observar una gran mancha oscura (C).

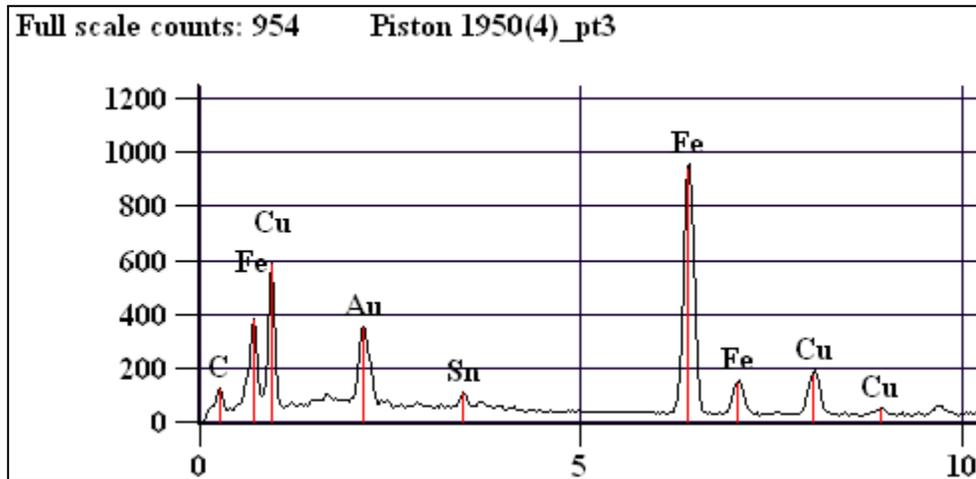
Para esta condición se obtuvieron los siguientes gráficos:



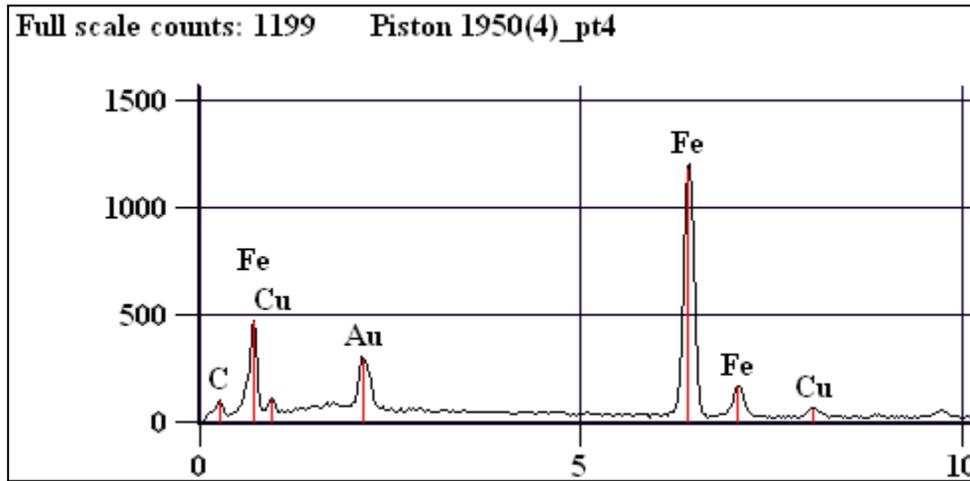
**Figura 4.24** Distribución de los componentes presentes en el punto 1 de la muestra ensayada a 1065,5 (°C).



**Figura 4.25** Distribución de los componentes presentes en el punto 2 de la muestra ensayada a 1065,5 (°C).



**Figura 4.26** Distribución de los componentes presentes en el punto 3 de la muestra ensayada a 1065,5 (°C).



**Figura 4.27** Distribución de los componentes presentes en el punto 4 de la muestra ensayada a 1065,5 (°C).

A continuación se detalla la distribución de peso en porcentaje de la muestra estudiada:

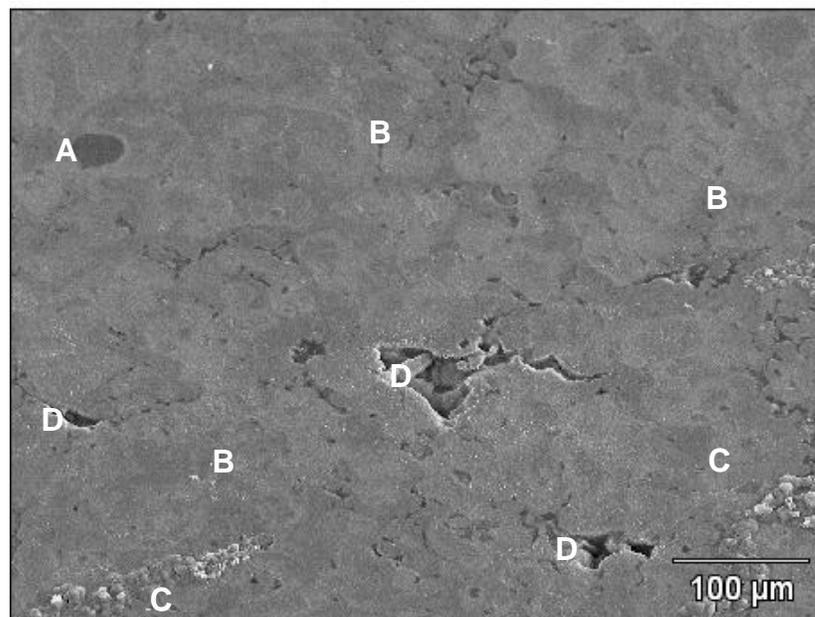
**Tabla 4.13** Peso en (%) de cada componente de la muestra a 1065,5 (°C).

	Fe	Cu	Sn
<b>Pistón 1065,5 pt1</b>	93.25	6.75	
<b>Pistón 1065,5 pt2</b>	90.67	9.33	
<b>Pistón 1065,5 pt3</b>	71.93	24.63	3.43
<b>Pistón 1065,5 pt4</b>	93.17	6.83	

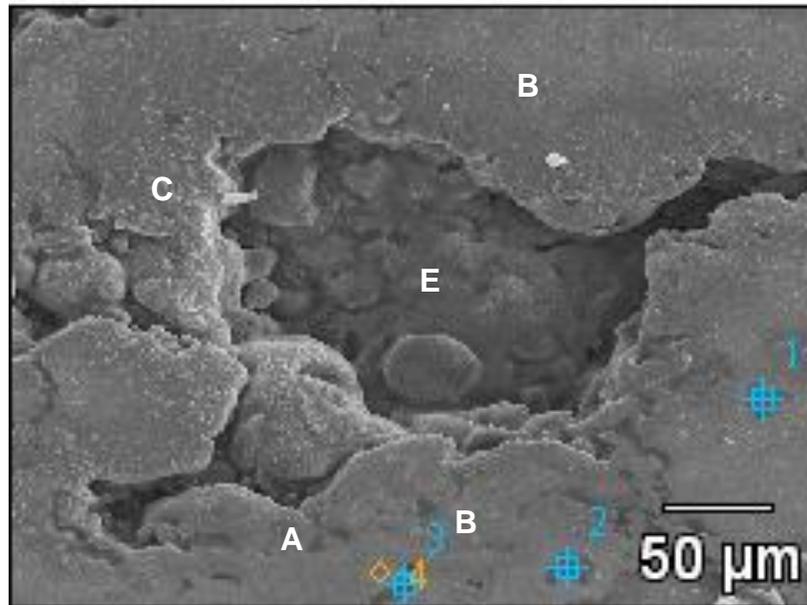
La tabla 4.13 muestra porcentaje de hierro y cobre muy cercanos a los que constituyen la mezcla de polvos original, a excepción de punto 3 el cual tuvo una considerable disminución de la cantidad de hierro y un aumento de porcentaje de cobre. Cabe destacar que las cuatro zonas estudiadas están constituidas por la mezcla base del pistón.

#### 4.4.4. Pistón sinterizado importado.

A continuación se expone la microestructura de la muestra importada. También se tomaron en cuenta 4 zonas específicas para la realización de un análisis puntual de los componentes existentes.



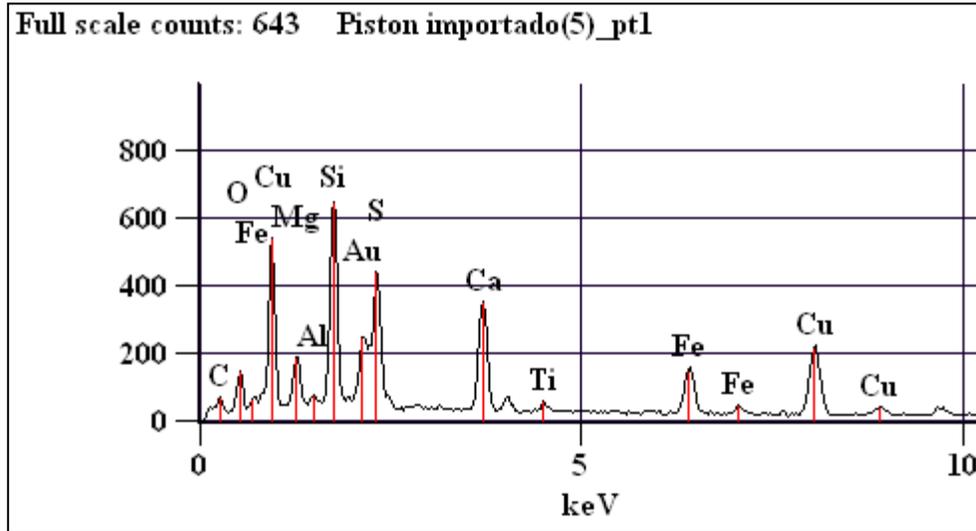
**Figura 4.28** Microscopía de la muestra importada con una magnificación de 500X.



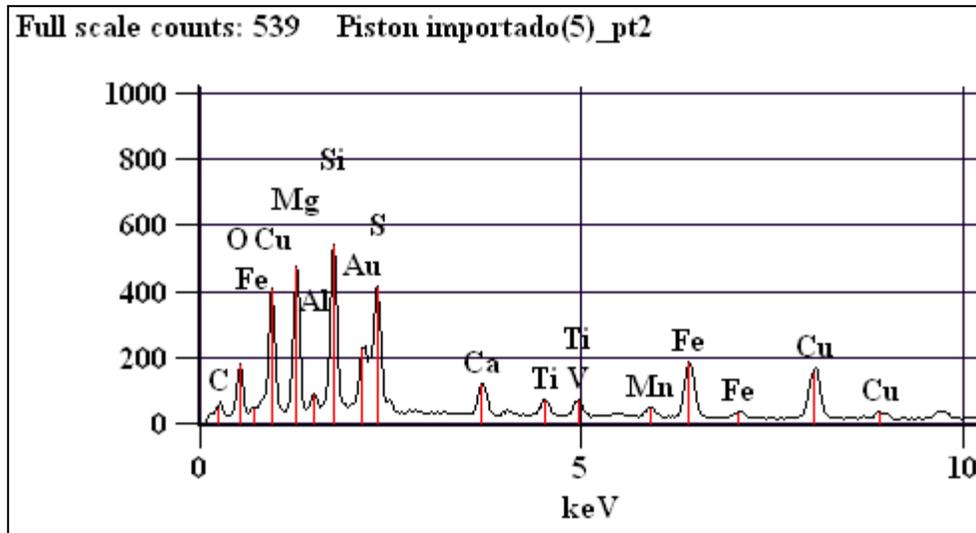
**Figura 4.29** Microscopía de la muestra importada con una magnificación de 800X.

En las figuras 4.28 y 4.29 aparecen muy pocas manchas de color oscuro de forma irregular (A), además una zona predominante de color más claro que se observa es más homogénea (B). También se pueden apreciar pequeñas cantidades de alúmina (C), debido a que no fue retirada en su totalidad en el momento en que se estaba realizando la preparación metalográfica de la probeta. No se logran detallar los bordes de las partículas. Se puede ver en detalle tres porosidades de gran tamaño (D) con bordes irregulares (en la figura 4.28), mientras que en la figura 4.29 se detalla una porosidad que prevalece en la imagen (E).

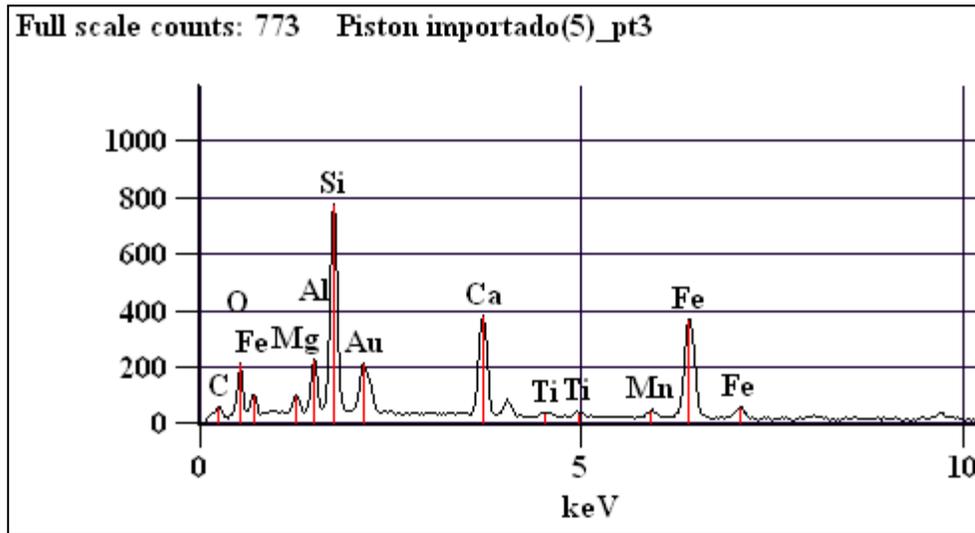
En el caso del pistón sinterizado importado, se obtuvieron los gráficos mostrados a continuación:



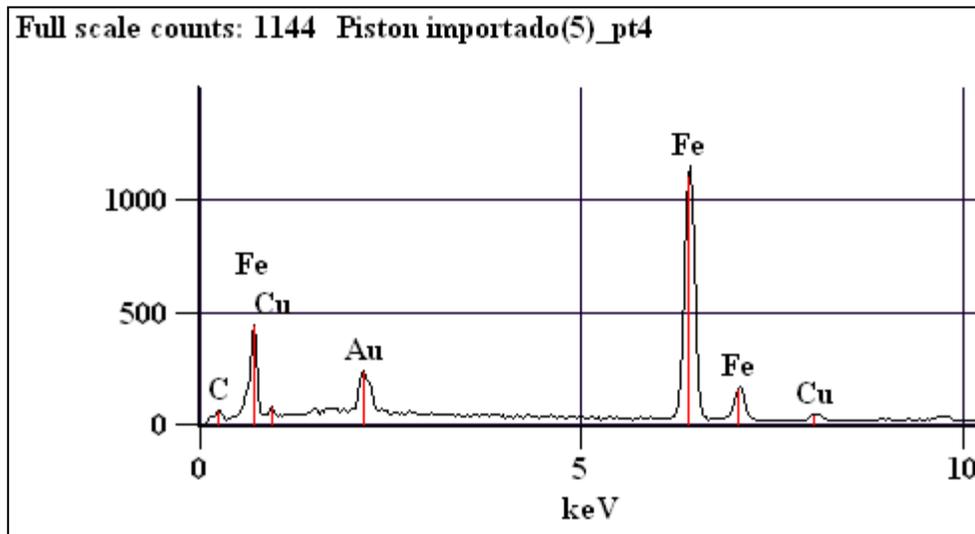
**Figura 4.30** Distribución de los componentes presentes en el punto 1 de la muestra importada ensayada.



**Figura 4.31** Distribución de los componentes presentes en el punto 2 de la muestra importada ensayada.



**Figura 4.32** Distribución de los componentes presentes en el punto 3 de la muestra importada ensayada.



**Figura 4.33** Distribución de los componentes presentes en el punto 4 de la muestra importada ensayada.

En la tabla siguiente se muestra como está distribuido el peso en porcentaje de la muestra:

**Tabla 4.14** Peso en (%) de cada componente de la muestra para pistones importados.

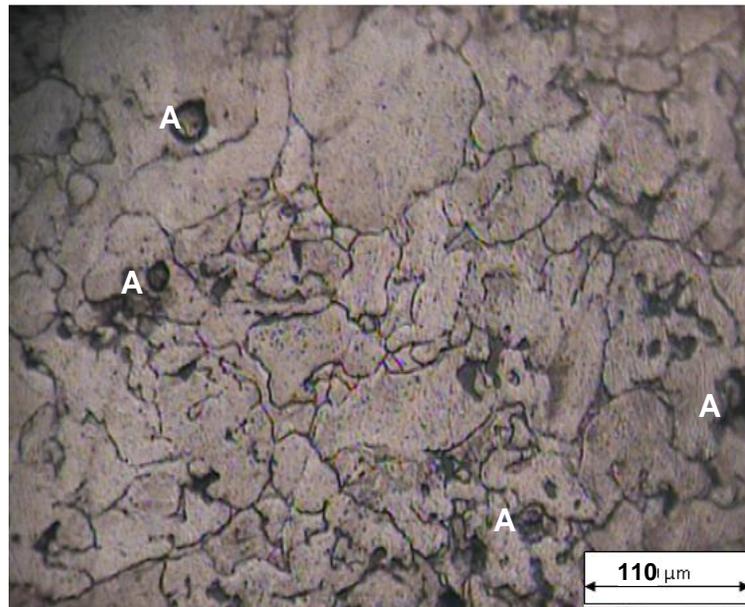
	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Cu
<b>Pistón importado pt1</b>	5.31	1.19	15.36	11.48	13.42	1.42			13.89	37.93
<b>Pistón importado pt2</b>	13.25	2.01	12.62	11.43	3.95	2.85	3.03	2.85	16.90	31.09
<b>Pistón importado pt3</b>	2.55	5.78	21.75		18.25	1.54		2.86	47.27	
<b>Pistón importado pt4</b>									94.89	5.11

La tabla muestra que el punto 4 corresponde a la mezcla base con porcentajes de hierro y cobre muy cercanos a los establecidos. En el punto 3 no se observaron indicios de cobre pero sí la presencia de otros compuestos entre como alúmina, magnesio, silicio, calcio y titanio (el porcentaje de carbono en este punto es aproximadamente la mitad de lo establecido). En los puntos 1 y 2 se observó bajos porcentajes de hierro y altos porcentajes de cobre, además de una serie de compuestos.

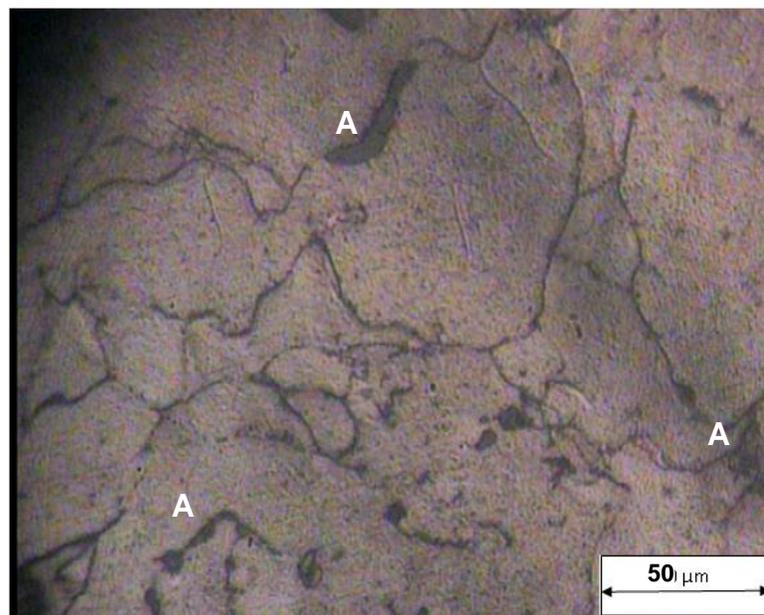
## 4.5. MICROSCOPIA ÓPTICA.

### 4.5.1. Pistones sinterizados a 954,5 (°C).

A través de las figuras 4.34 y 4.35 se ven las características microscópicas de varias muestras sinterizadas a 954,5 (°C) y como pueden llegar a tener variaciones en estas características unas respecto a otras.



**Figura 4.34** Microscopía de un pistón sinterizado a 954,5 (°C) con una magnificación de 400x.

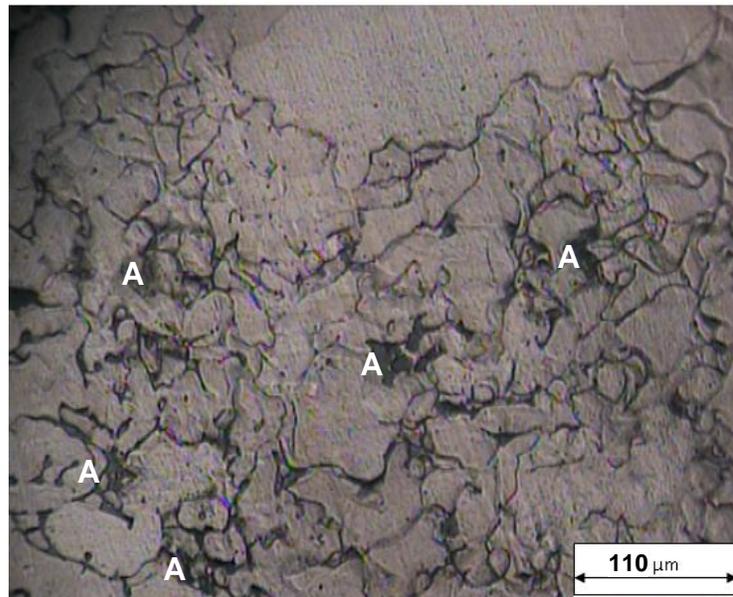


**Figura 4.35** Microscopía de un pistón sinterizado a 954,5 (°C) con una magnificación de 1000x.

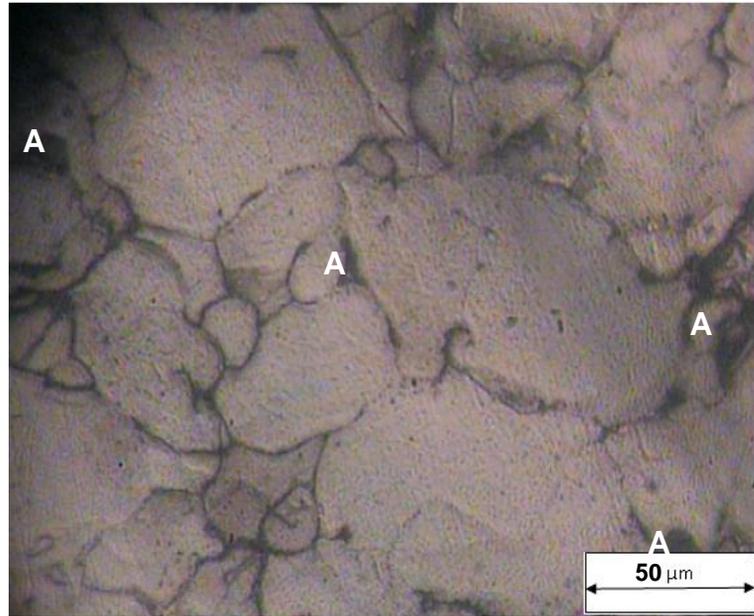
En la imagen 4.34 se observan los bordes de partícula de forma irregular en toda la superficie, también se presencian zonas o manchas muy oscuras con forma alargada y con ramificaciones, lo que hace presumir que sean porosidades (A). Sumado a esto, se ven pequeños puntos oscuros ubicados de forma arbitraria en toda la superficie de la muestra, algunos de ellos cercanos entre sí y otros aislados. En la imagen 4.35 se ve prácticamente lo mismo que la figura anterior, a diferencia que en ésta hay un borde de partícula más definido y se nota que las manchas oscuras parecen presentar cavidades poco profundas. La zona clara es la que predomina en toda la imagen (A).

#### **4.5.2. Pistones sinterizados a 1021 (°C).**

A continuación se muestran las imágenes como resultado del ensayo aplicado bajo la condición de temperatura de 1021 (°C).



**Figura 4.36** Microscopía de un pistón sinterizado a 1021 (°C) con una magnificación de 400x.

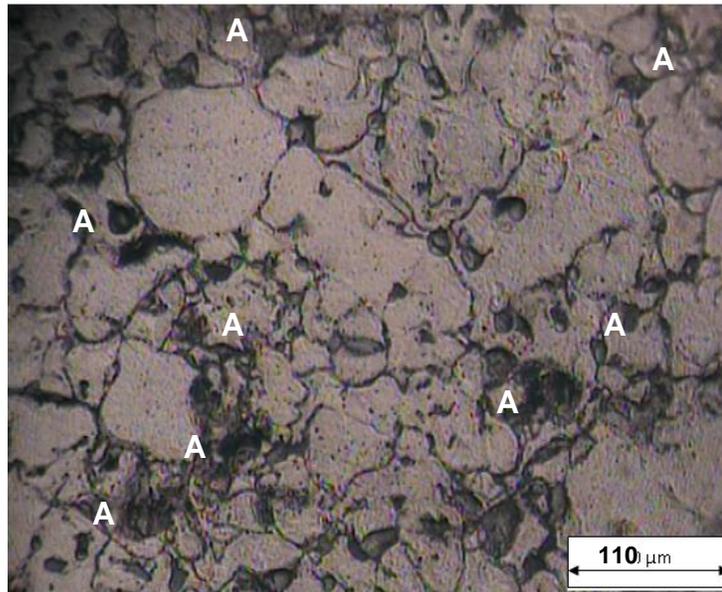


**Figura 4.37** Microscopía de un pistón sinterizado a 1021 (°C) con una magnificación de 1000x.

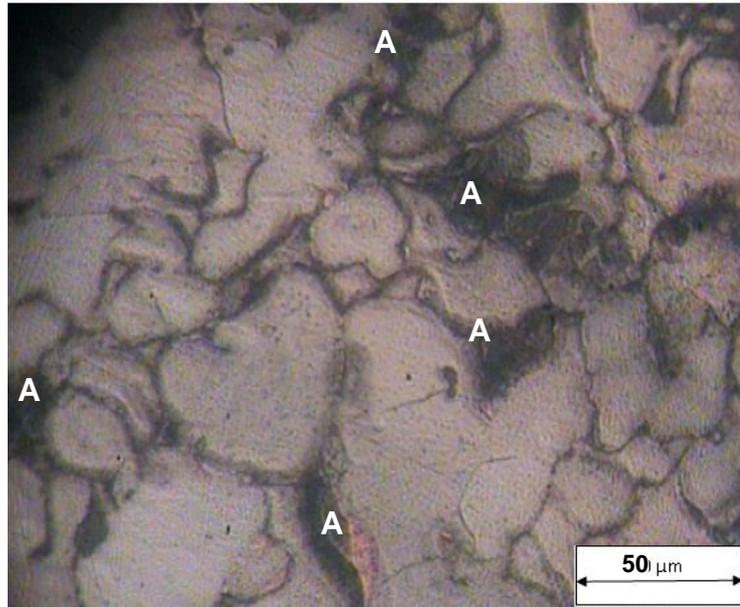
Para esta temperatura de sinterizado, se nota que el tamaño de partícula es muy variable según la figura 4.36, siendo su forma bastante irregular también. Por lo que se puede observar, hay una mayor cantidad de zonas oscuras de pequeño tamaño (A) y cercanas entre sí con ciertas ramificaciones y alargamientos semejantes a los vistos en la condición de 954,5 (°C). En la figura 4.37 puede verse con mayor detalle cómo es la forma de algunas partículas y las pequeñas cavidades que aparecen por toda la superficie de manera arbitraria (A).

#### **4.5.3. Pistones sinterizados a 1065,5 (°C).**

A continuación se exponen las imágenes como resultado del estudio microscópico realizado a las muestras sinterizadas a la temperatura de 1065,5 (°C).



**Figura 4.38** Microscopía de un pistón sinterizado a 1065,5 (°C) con una magnificación de 400x.

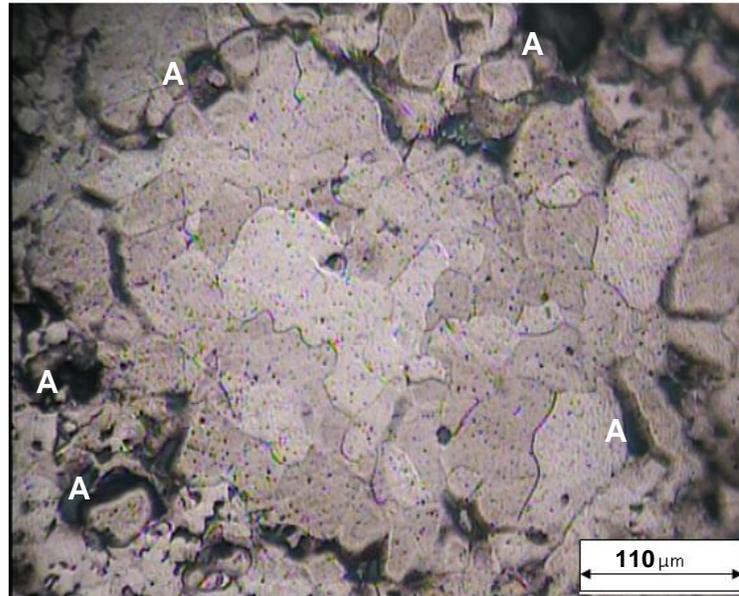


**Figura 4.39** Microscopía de un pistón sinterizado a 1065,5 (°C) con una magnificación de 1000x.

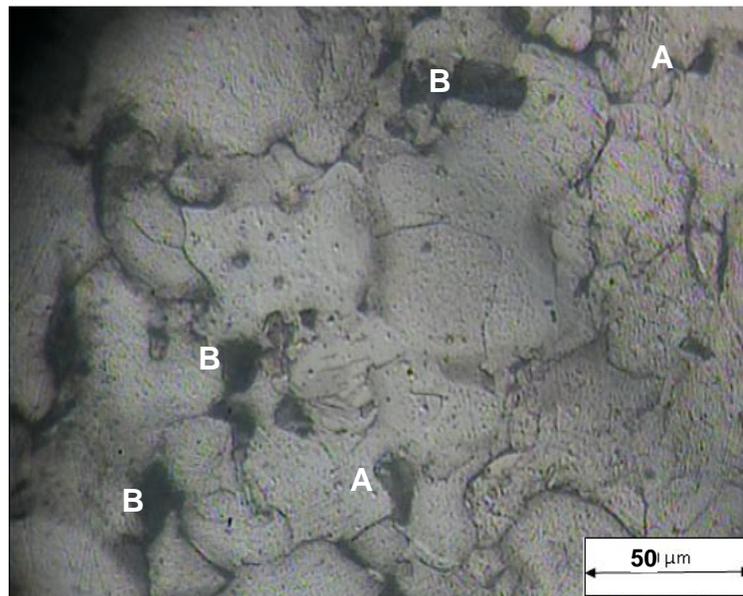
En la figura 4.38 se puede evidenciar partículas claramente definidas, así como una gran cantidad de manchas oscuras y de presuntas porosidades siendo la forma de éstos bastante irregular (A). Además se puede apreciar como las partículas, zonas oscuras y los supuestos poros son de tamaño muy variable. En la figura 4.39 se logra ver con mayor detalle los bordes de partícula de la muestra y la forma heterogénea que presentan, así como cavidades de color oscuro (A).

#### 4.5.4. Pistones Importados.

A continuación se exponen las imágenes como resultado del estudio microscópico realizado a las muestras importadas.



**Figura 4.40** Microscopía de un pistón sinterizado importado con una magnificación de 400x.



**Figura 4.41** Microscopía de un pistón sinterizado importado con una magnificación de 1000x.

Las piezas importadas muestran una cantidad de manchas oscuras mayor según la figura 4.40, siendo su forma bastante irregular al igual que en las otras condiciones estudiadas (A). Asimismo en la figura 4.41 puede verse un detalle mayor de cómo es la forma de algunas partículas y las pequeñas cavidades que aparecen por toda la superficie de manera arbitraria. Además se pueden observar algunas presuntas porosidades, pero en menor cantidad que en las muestras antes descritas (B). En ambas muestras se puede apreciar que las partículas de la mezcla de polvos están más unidas (mejor compactadas), y por lo tanto menor cantidad de presuntas porosidades.

# CAPÍTULO 5

## *Análisis de resultados*

---

---

### **5.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIAXIAL.**

La mayoría de los materiales sinterizados tienen la particularidad de fracturarse con escasa deformación, por lo que muchos se consideran materiales frágiles, a diferencia de los materiales dúctiles que se rompen tras sufrir deformaciones plásticas. Tal es el caso de los pistones estudiados, los cuales presentaron un comportamiento muy frágil según pudo apreciarse en la figura 4.1.

Durante el ensayo de compresión uniaxial aplicado a los pistones estudiados a las diferentes condiciones, se observaron tres etapas en las que predominaron mecanismos de deformación distintos. Al inicio del ensayo, para cargas bajas, hay una pequeña deformación permanente que se atribuye a fenómenos de fricción interna (la fricción que ocurre entre las partículas del polvo que conforman la mezcla). A esta pequeña deformación plástica inicial le sucede una fase dominada por la deformación elástica y que se extiende hasta un valor de esfuerzo máximo en que el compacto metálico falla súbitamente tras cierta deformación plástica adicional (justo

antes de la fractura). Dichas muestras tuvieron diferentes cargas de ruptura, las cuales iban en aumento en la medida en que la temperatura del sinterizado era mayor. Cabe destacar que los tiempos en los que fallaron todas las muestras fueron muy cortos, debido a la fragilidad que reflejaron los pistones. Igualmente es necesario resaltar que el fabricante establece como norma base que el modelo de pistón utilizado para el desarrollo de este trabajo de grado (Pistón de 1 3/16" y 35,7 (g)), debe soportar como mínimo una carga de 20017 N (4500 lb) y no presentar síntomas de falla alguna para considerarse un elemento de máquina seguro. En este contexto se logró verificar que los pistones estudiados cumplen con estos requerimientos establecidos por el fabricante, puesto que todos fallaron con cargas mayores a las establecidas.

Asimismo puede señalarse que el límite elástico aumentó de manera sostenida con la temperatura de sinterizado, y en el caso de las muestras importadas se presume influyeron notablemente las técnicas pulvimetalúrgicas utilizadas, que se sospecha son más apropiadas que las utilizadas para las muestras nacionales.

Los materiales sinterizados presentan buena resistencia mecánica ante un estado de esfuerzos combinados, pero son altamente deficientes ante cargas de tracción pura. En el caso de los pistones estudiados es de gran importancia que los mismos no sean sometidos a cargas que se acerquen demasiado a la de fractura para que presenten un comportamiento confiable y garanticen la seguridad de funcionamiento de los amortiguadores convencionales.

## **5.2 ENSAYO DE MICRODUREZA**

### **5.2.1. Pistones sinterizados a 954,5 (°C).**

En este caso, el valor de desviación estándar fue de 9,04, además, se aprecia que la distribución es poco homogénea, ya que el promedio al ser igual a 55,93 la desviación estándar representa un 16,16 (%). Esto trae como consecuencia que al estar los valores tan dispersos del promedio, éste deja de ser representativo, y por lo tanto, a esta temperatura no es recomendable aplicar el sinterizado ya que la variación de los valores de microdureza es considerablemente alta.

Los valores de frecuencia también están muy cercanos entre sí, lo cual no ayuda a determinar un claro valor de microdureza que defina las propiedades mecánicas bajo la condición de 954,5 (°C).

Como la marca que deja la indentación es demasiado pequeña, lo que se puede deducir de estos resultados obtenidos, es que dicha indentación pertenece a una zona con propiedades químicas diferentes o una morfología diferente; es decir, puede estar sobre una porosidad o parte de ella, así como también sobre un punto precipitado.

### **5.2.2. Pistones sinterizados a 1021 (°C).**

Como se puede apreciar en el punto 4.2.2, al tenerse un valor de desviación estándar ( $\sigma = 5,92$ ) y un promedio que dio 65,56, se puede apreciar que es un valor bajo de desviación respecto a la condición anterior, ya que representa el 9,02 (%) del promedio, por lo que la dispersión de los valores obtenidos respecto al promedio es pequeña, teniéndose una

distribución de valores un poco más uniforme, lo cual hace tomar en cuenta este valor de temperatura para llevar a cabo el sinterizado.

Bajo esta condición, se puede deducir que los posibles cambios en la composición química o morfológica de las diferentes zonas de las muestras a las que se les aplicó la indentación fueron pocos, dando a entender que a esta temperatura se obtienen piezas más homogéneas respecto a la temperatura de 954,5 (°C).

### **5.2.3. Pistones sinterizados a 1065,5 (°C).**

En este caso, la desviación estándar ( $\sigma = 9,35$ ) tiene un valor semejante a la condición de 954,5 (°C), y representa el 10,63 (%) del promedio (el cual es 87,95), por lo tanto muchas de las muestras ensayadas tienen valores de microdureza dispersos del promedio, siendo evidente la poca precisión con la que se obtienen piezas que se encuentren cerca del valor recomendado.

Para esta temperatura, los resultados de microdureza fueron contradictorios, ya que se esperaba que todos los datos obtenidos estuvieran cerca de una sola mediatriz, pero como se puede notar en la figura 4.4, hay dos mediatrices con los mayores valores de frecuencia en los extremos del histograma, por lo que se asume que no se tiene buena certeza de lo que puede ocurrir con la microdureza en general de los pistones bajo esta condición.

#### **5.2.4. Pistones sinterizados importados.**

Al ser la desviación estándar igual a 11,74, ésta representa un 8,89 (%) del promedio (que es 131,93), entonces la mayoría de los valores de microdureza se acerca al valor promedio, teniéndose una mejor distribución. Pero ha de notarse que a pesar de que en el histograma la distribución de datos parece normal, al tener dos frecuencias altas y cercanas entre sí (seis y cinco), el rango de datos es grande, lo cual permite que muchos valores distanciados del promedio estén dentro del rango recomendado.

#### **5.2.5. Análisis general del ensayo (Para todas las condiciones evaluadas).**

De forma general, según los datos obtenidos, la temperatura de 1021 (°C) presenta características adecuadas para utilizarse durante el proceso de sinterizado, ya que su desviación estándar es la más baja de las cuatro condiciones, y el histograma tiene una mediatriz con una sola frecuencia alta (frecuencia de 8), pero presentando como inconveniente valores bajos de microdureza comparándola con las otras temperaturas. Para las temperaturas de 954,5 (°C) y 1065,5 (°C) las desviaciones estándar fueron altas, lo cual es un inconveniente a la hora de producir piezas, ya que se obtendrán muchos valores aleatorios de microdureza, y lo que se requiere es que las piezas presenten propiedades mecánicas similares.

En cuanto a los pistones sinterizados importados se generan resultados aceptables, ya que se obtuvo un histograma de frecuencias con un valor alto de mediatriz que no se repite (frecuencia de 6), pero a pesar de que la desviación estándar es baja, el rango de valores es grande, y se presenta el inconveniente de que muchos pistones estén cercanos del promedio pero con valores de microdureza relativamente diferentes entre sí. Sin embargo,

los pistones importados son los que tienen los valores más altos de microdureza y esta es la característica que más importancia tiene en los resultados del ensayo.

### **5.3. ENSAYO DE DUREZA.**

#### **5.3.1. Pistones sinterizados a 954,5 (°C).**

En esta condición se tiene un valor de desviación estándar ( $\sigma = 2,21$ ), representando así un 7,88 (%) del promedio (el cual dio 30,32), lo que quiere decir que la dispersión de datos respecto al promedio es pequeña. Además de esto, en los resultados mostrados en el histograma de frecuencias, el rango de valores también es pequeño y al haber 2 mediatrices iguales y con la más alta frecuencia, los pistones fabricados bajo esta temperatura tienden a presentar características mecánicas muy similares, ya que sus valores de dureza están muy cercanos entre sí.

El único inconveniente de emplear esta temperatura de sinterizado es que los valores de dureza son bajos respecto a los de las otras condiciones.

#### **5.3.2. Pistones sinterizados a 1021 (°C).**

Teniendo valores de dureza un poco mayores que los de la condición anterior, la desviación estándar aumenta ( $\sigma = 3,72$ ) respecto al promedio ( $\bar{X} = 36,60$ ), siendo el 9,04 (%) del mismo, de manera que al producir piezas a esta temperatura, la variación de la dureza influirá directamente en la calidad de los pistones, debido a que pertenecerán a un rango relativamente grande.

Cabe destacar que al tener 2 mediatrices con el mismo valor de frecuencia y siendo el más alto del histograma, se presume que la mayoría de valores de dureza estén cercanos o sean iguales a estas mediatrices, pero como se acotó anteriormente, un rango grande puede impedir que se dé esta condición.

### **5.3.3. Pistones sinterizados a 1065,5 (°C).**

Para esta condición se presenta un histograma de frecuencias con una sola mediatriz que presenta el mayor valor de frecuencia del mismo (que es de 12), el cual no se repite, además, la dispersión de datos respecto al promedio es pequeña, ya que la desviación ( $\sigma = 3,11$ ), representa el 7,90 (%) del promedio (siendo este igual a 39,33), por consiguiente la distribución puede decirse que es muy poco heterogénea, a pesar de que el rango de valores es amplio.

Pudiendo presentar valores similares de dureza respecto a la temperatura de 1021 (°C), es más factible emplear la condición de 1065,5 (°C), ya que se nota una mejor distribución con un solo valor de frecuencia alto que supera claramente a los demás, de manera que la precisión con que se obtengan las piezas será mucho mayor al estar la mayoría de valores cerca de una sola mediatriz.

### **5.3.4. Pistones importados sinterizados.**

En este caso, las características que presenta el histograma de frecuencias tienen cierta similitud con la condición anterior, pero aquí la desviación estándar es menor ( $\sigma = 2,98$ ), siendo apenas el 3,99 (%) del promedio (el cual dio 74,57), con un valor de frecuencia mucho mayor que los demás, dando así una distribución homogénea de valores, lo cual permite

que muchos de estos queden cercanos al promedio y estén dentro del rango recomendado, el cual, en este caso es pequeño.

### **5.3.5. Análisis general del ensayo (Para todas las condiciones evaluadas).**

En líneas generales, después de analizar las condiciones de temperatura individualmente, se puede decir que los pistones sinterizados importados claramente presentan las mejores características en relación a la dureza, ya que los pistones producidos bajo esta condición tendrán una morfología casi homogénea, y valores muy cercanos entre sí. Esta es la mejor condición para fabricar pistones sinterizados, debido a la marcada diferencia de valores de dureza que hay entre ésta y las demás temperaturas. A pesar de que se obtuvieron buenos resultados con las otras condiciones en cuanto a distribución y características, el objetivo es producir piezas con la mayor calidad posible y, en este caso, la dureza es una propiedad mecánica sumamente importante para el desempeño del pistón en el amortiguador, debido a que la dureza está relacionada con la resistencia mecánica de los materiales; es decir, resistencia a la tracción, a altas temperaturas, y a cargas cíclicas a las que está sometido el pistón durante su funcionamiento.

Al igual que en los resultados obtenidos del ensayo de microdureza, se nota como la dureza va aumentando a medida que aumenta la temperatura de sinterizado.

#### **5.4. COMPARACIÓN ENTRE EL ENSAYO DE MICRODUREZA Y EL ENSAYO DE DUREZA.**

En el caso del ensayo de dureza se obtuvieron histogramas con mediatrices cuyos mayores valores de frecuencia se repetían un sola vez, a diferencia del ensayo de microdureza, en el cual esta característica se dio solo en la temperatura de 1021 (°C). Se presume que esto pudo haber ocurrido por las características del ensayo en sí; es decir, el área de indentación y la profundidad son mucho mayores, por lo que puede pasarse por alto el hecho de que el indentador del durómetro haya tocado una porosidad o un punto precipitado, al ser una carga mayor, la huella que deja abarca gran parte de la superficie de la muestra y puede que la dureza no varíe entre una indentación y otra.

En cambio, en el ensayo de microdureza, la huella que deja la indentación, puede quedar fácilmente sobre una zona con características morfológicas y químicas distintas, siendo en este caso una porosidad, un agujero, una impureza, entre otros, llegando a variar la microdureza a tal punto que los histogramas obtenidos presentan características que varían mucho en los resultados .

#### **5.5. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.**

El estudio realizado por microscopía electrónica de barrido permitió visualizar diferencias notables entre las muestras nacionales (analizadas a los tres niveles de temperatura) y las importadas. Quedó en evidencia que en la medida en que la temperatura de sinterizado iba en aumento, disminuían las porosidades, aunque en el pistón sinterizado a 1065,5 (°C) se presume existió una mala compactación que propició la aparición de porosidades que no coinciden con la tendencia que tienen los materiales sinterizados en

cuanto a la disminución en la cantidad de poros cuando son sinterizados a temperaturas mayores.

Los elementos encontrados en las diferentes zonas observadas en cada una de las muestras en su mayoría correspondían con los componentes de la mezcla (Hierro, Cobre y Acrawax), pero aparecieron también otros elementos no deseados (como Aluminio, Silicio, entre otros), razón por la cual se pudo apreciar una discrepancia de color con respecto a la mezcla base de polvos que conforma al pistón (de color más claro). Sin embargo existen pocos casos en donde las zonas oscuras presentaron la misma composición química del material base, por lo que se presume que en estas situaciones particulares la variación de la temperatura jugó un papel importante en los cambios presentes en la mezcla base de polvos, pudiendo reaccionar los elementos nombrados a medida que aumentaba o disminuía la temperatura. Cabe destacar que el microscopio electrónico de barrido utilizado para la realización de este estudio, solo detectaba materiales metálicos, y por consiguiente no se pudieron observar las pequeñas cantidades de grafito que son incluidas en la mezcla base de polvos.

En las muestras importadas se encontró la existencia de Titanio, que se supone fue adicionado a la mezcla de polvos como un componente clave para la mejora del comportamiento mecánico de los pistones al reaccionar con los diferentes valores de temperaturas, ya que dichas muestras tenían una tendencia claramente definida en los porcentajes de titanio encontrados, a diferencia de una de las muestras nacionales sinterizadas a 954,5 (°C), en donde se encontró una pequeña cantidad de éste elemento que se considera un contaminante, puesto que de todas las muestras nacionales estudiadas, fue la única donde se observó esta particularidad.

Dichas muestras importadas mostraron una estructura más uniforme que las nacionales. Por lo tanto se asume que la temperatura de sinterizado influye en mayor o menor grado con las técnicas utilizadas en los procesos de compactación y de sinterización, los cuales claramente son más eficientes en las muestras importadas que las utilizadas por el fabricante nacional, ya que las muestras nacionales exhibieron una microestructura más heterogénea.

Finalmente, quedaron en evidencia mejoras significativas de las microestructuras analizadas, en la medida en que se utilizaron niveles de temperatura de sinterizados más altos.

## **5.6. MICROSCOPIA ÓPTICA.**

A partir de las imágenes que se presentaron en los resultados, se puede decir que mientras más alta es la temperatura de sinterizado, mayor es la unión entre las partículas que conforman el compuesto; es decir que al disminuir el tamaño de las porosidades, impurezas y otros defectos superficiales, aumenta el área que aporta las propiedades mecánicas que se requieren para una mejor calidad del pistón.

Cabe destacar que también a medida que aumenta la temperatura, los bordes de partículas en las muestras son mucho más difusos con respecto a las muestras nacionales, mejorando así la unión entre partículas y disminuyendo las porosidades, dejando claro que el proceso pulvimetalúrgico para producir pistones tiene características diferentes al cambiar la temperatura de sinterizado.

En las muestras nacionales la morfología tiene ciertas similitudes en las tres temperaturas estudiadas en lo que respecta a la distribución, tamaño y

forma de los poros y de las partículas. Pero esta distribución no es muy favorable debido a razones ya explicadas en análisis anteriores (poros que actúan como concentradores de esfuerzos, impurezas, entre otros), por lo cual debe tenerse precaución a la hora de producir pistones bajo estas condiciones, caso contrario a las muestras importadas, que presentan pocas porosidades e impurezas.

# CAPÍTULO 6

## *Conclusiones y Recomendaciones*

---

---

### 6.1. CONCLUSIONES

- El estudio del comportamiento mecánico de las muestras consideradas en éste trabajo de grado reveló que la temperatura es un factor muy influyente en las propiedades mecánicas de las piezas sinterizadas. En La medida en que se utilicen temperaturas mayores, irá en aumento la resistencia mecánica de los pistones (es proporcional). En este contexto, se afirma que las mezclas de polvos a base de hierro obtendrán el mejor comportamiento mecánico al ser sinterizadas al nivel de temperatura más alto posible (sin llegar al punto de fundición de la mezcla).
- La caracterización mecánica ha permitido confirmar la marcada influencia de la temperatura de sinterizado, tanto en la respuesta esfuerzo - deformación del material, como en su comportamiento a fractura. Aun cuando la densidad no ha sido cuantificada, se pudo constatar (mediante observación) que la disminución de la fracción de

área ocupada por los poros resultó en un aumento de la densidad de la muestra, y según investigaciones realizadas por otros autores [9] en general un aumento en la densidad produce una mejora de todas las propiedades mecánicas, debido a que no solo reduce la fracción volumétrica de poros, sino que el tamaño de éstos disminuye mientras que se aumenta la separación entre los mismos. En consecuencia una pieza sinterizada a mayor temperatura presenta una estructura más uniforme, lo que se traduce en mayor resistencia mecánica generalizada.

- El estudio de las propiedades mecánicas realizado por medio de la microindentación de las diferentes muestras estudiadas (ensayo de microdureza a cada condición) permitió identificar diferencias significativas entre éstas. Los resultados obtenidos indicaron que en la medida en que se aumentaba la temperatura de sinterizado mayor era la dureza del pistón. La misma tendencia se observó (pero más claramente) en el ensayo de dureza, permitiendo inferir que el aumento de la dureza de las muestras es proporcional al aumento de la temperatura, es decir, que piezas sinterizadas a los mayores niveles de temperatura ofrecen mejor resistencia a la penetración de un objeto.
- La presencia y distribución de poros determina la sección efectiva del material que soporta carga, además los poros actúan como microentallas internas alrededor de los cuellos de sinterización, lo cual induce concentración de esfuerzos localizados. En consecuencia la existencia de poros disminuye la resistencia mecánica del material, ya

que el área resistente será menor. En este contexto, de cara a mejorar la resistencia mecánica del material, es deseable tener una menor cantidad de poros, de menor tamaño, con mayor espaciamiento entre sí, y con geometría más redondeada. La combinación de estos factores conlleva a la reducción de la cantidad de cuellos de sinterización y por lo tanto a una reducción de las tensiones localizadas. Dichos factores se obtienen con técnicas de compactación más eficientes y con las temperaturas de sinterizado más altas posibles.

- Quedó en evidencia que el tamaño de las partículas que conforman la mezcla de polvos aumenta conjuntamente con la temperatura de sinterización, y un aumento del tamaño de las partículas conllevará a mejorar la resistencia mecánica de las piezas elaboradas por pulvimetalurgia.
- La distribución de valores en los histogramas de frecuencias varía según la temperatura a la que fueron sometidos los pistones y según el ensayo (ya sea dureza o microdureza), teniéndose más variaciones y más irregularidades en el ensayo de microdureza, afectando así la calidad de piezas que son producidas.
- Los ensayos realizados en este trabajo de grado tienen una importancia fundamental para decidir a qué temperatura de sinterizado es recomendable fabricar los pistones, ya que al analizar y comparar características como dureza, microdureza, resistencia a la tracción, características microestructurales y composiciones químicas

obtenidas, permiten establecer un claro criterio al momento de decidir el nivel de temperatura de sinterizado.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la continuidad en el estudio de la pulvimetalurgia, como una técnica que permite la obtención de piezas con alta resistencia mecánica, a fin de extender los límites de esta investigación y lograr abarcar áreas no alcanzadas por este estudio.
- Al variar la temperatura de sinterizado, en la pieza cambian muchos factores, tanto microestructurales como estructurales, por lo que debe establecerse un criterio comparativo de las características que se ven afectadas al variar las condiciones de este tratamiento térmico.
- Para obtener piezas sinterizadas con las mejores propiedades mecánicas se recomienda utilizar la temperatura de sinterizado mayor de los tres niveles estudiados de las piezas nacionales (1065,5 °C), ya que el mejor comportamiento mecánico de los pistones se obtuvo a ésta temperatura.
- Es importante que la mezcla de polvos a utilizar sea lo más homogénea posible, ya que al tornarse heterogénea genera zonas con notables diferencias de las propiedades mecánicas. Por consiguiente la mezcla de polvo traerá mayor resistencia mecánica en la pieza.

- Una disminución del tamaño de las partículas del polvo puede mejorar notablemente la compactación de las muestras, dando como resultado muestras más densas, con menor cantidad de poros y con un mejor comportamiento mecánico. Por consiguiente, se recomienda la adquisición de polvos con un tamaño de partícula lo menor posible.
- Se recomienda la realización de un estudio detallado de la composición de la mezcla actual de polvos con la finalidad de mejorarla, ya que éste es un factor muy determinante para la obtención de buenas propiedades mecánicas en los pistones.

# Referencias

---

---

- [1] Bocanegra, M. H. (2001). *Sinterización de polvos de óxido de magnesio precipitado de agua de mar: Efectos del estado de aglomeración sobre la microestructura*. Jornadas SAM – CONAMET, 867 – 874.
- [2] Fuentes, J. J.; Rodríguez, J. A. y Herrera, E. J. (2005). *Comportamiento mecánico de materiales de aluminio AM sinterizados*. Anales de mecánica de la fractura, Vol. 22, 283 – 287.
- [3] Qin, X. P. y Hua, L. (2007). *Deformación y fortalecimiento de un material ferroso sinterizado*. Journal of Materials Processing Technology, 187 – 188, 694 – 697.

[4] Biblioteca virtual de Multiwidia; empresa argentina dedicada a la fabricación de compuestos de tungsteno para la industria del metal duro. Disponible en:

<http://www.multiwidia.com.ar/artmetalpolv.html>

[5] Alberdi Urbietta, J. (2003). *Amortiguadores y suspensión*. Escuela Superior de ingenieros. Campus tecnológico de la universidad de Navarra.

[6] Appold, H. (1994). *Tecnología de los Metales para Profesiones Técnico-Mecánicas*. Editorial Reverte.

[7] Schey, J. A. (2002). *Procesos de Manufactura*. McGraw Hill. México D.F.

[8] Ermakov, S.S. y Vyaznikov. (1990) N.F. *Aceros y piezas pulvimetalúrgicos*. Leningrado: Mashinostrienie. 319 p.

[9] Avner, S. (1988). *Introducción a la Metalurgia Física*. McGraw Hill. México D.F., México.

[10] Leyensetter, A. y Würtemberger, G. (1974). *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. Editor Reverte.