



**“Evaluación microestructural de piezas fabricadas  
por metalurgia de polvos, a través de mediciones de  
resistividad y/o resistencia eléctrica”.**

**Q. M. Martha Elva Pérez Ramos**

Para obtener el Grado de

**Maestro en Ciencias**

En la Especialidad de

**Materiales**

Director de Tesis: **Dr. Alejandro Manzano Ramírez**

Querétaro, Qro.



Noviembre, 2000

|         |                  |
|---------|------------------|
| CLASIF. |                  |
| ADQUIS. | Tesis-200.L      |
| FECHA.  | 29-III-01        |
| PROCED. | Docto. Serv. 005 |

Rebibliografía

## CONTENIDO

|                           |      |
|---------------------------|------|
| Agradecimientos           | iii  |
| Lista de figuras y tablas | v    |
| Objetivo general          | vii  |
| Objetivos particulares    | vii  |
| Resumen                   | viii |
| Introducción              | x    |

### **CAPÍTULO I: ANTECEDENTES**

|  |    |
|--|----|
| 1.1 Generalidades sobre Metalurgia de Polvos                           | 1  |
| 1.2 Ley de Ohm y resistividad eléctrica                                | 6  |
| 1.3 Técnicas de medición de la resistividad eléctrica                  | 8  |
| 1.4 Microscopio electrónico de barrido (MEB)                           | 12 |
| 1.5 Analizador de imágenes   | 13 |
| 1.5.1 Relaciones fundamentales para el de análisis de fracción volumen | 14 |

### **CAPÍTULO II: MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Material empleado  | 16 |
| 2.2 Equipo empleado para las mediciones de resistencia eléctrica                 | 16 |
| 2.3 Equipo empleado para realizar las metalografías                              | 17 |
| 2.4 Procedimiento para la obtención de la resistencia y/o resistividad eléctrica | 17 |
| 2.4.1 Procedimiento para los barridos de las líneas del campo eléctrico          | 18 |
| 2.5 Preparación de muestras para su observación en MEB y analizador de Imágenes  | 23 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSION</b> | <b>DE</b> |
| <b>RESULTADOS</b>                           | <b>24</b> |
| <b>CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES</b>            | <b>48</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                         | <b>50</b> |

## ***Agradecimientos***

A mis padres:

**Arturo Pérez Guerrero**

**Ma. Martha Inéz Ramos de Pérez**

A quienes les debo más que la vida, por sus desvelos, preocupaciones y su gran amor, así como un profundo gusto, que raya en la gula, por la buena comida, sobre todo si se acompaña de una buena charla y se comparte con amigos, mi eterno agradecimiento.

A mis hermanos:

**Bárbara y Juan Pablo**

a quienes les agradezco su apoyo incondicional, para quienes deseo se cumplan cada uno de sus sueños.

A cada uno de los que conforman mi familia por tener una palabra de aliento justo en el momento oportuno

A mis compañeros y amigos de generación:

**Cristian(M.A.D.P), Carlos(P.M), Mónica B., Alicia, Luisa, Jeanett, Mónica A, Hugo, y Delia,** por aceptarme como soy, a quienes les deseo vivan una de las más grandes ilusiones, **la satisfacción personal.**

**A CONACyT**

Por la beca otorgada, permitiendo con ello finalizar mis estudios de Maestría

A mi asesor

**Dr. Alejandro Manzano Ramírez**

Quiero dar mi más amplio agradecimiento, por su paciencia y dirección durante el desarrollo de esta tesis

A mis sinodales.

**Dr. José Martín Yañez Limón.**

**Dr. Yuri Vorobiev Vasilievitch.**

**Dr. Francisco Javier Espinoza Beltrán.**

Por su esfuerzo, tiempo y dedicación aportados a esta tesis

**Así como a todos mis profesores en la maestría. Gracias**

Sin restarles menos importancia a toda la comunidad que conforma el CINVESTAV- Unidad Querétaro, personal académico, administrativo, y auxiliares de investigación por dedicarme un poco de su tiempo. Un agradecimiento especial a Eduardo Morales, así como a la secretaria académica Elvia Araujo por todo su apoyo.

Mi más profundo y sincero agradecimiento al Ing. Javier Tellez, Gerente de Producción de **SINTERSTAHL México S.A. de C.V.**, por las facilidades prestadas, y más aún por el material proporcionado para la realización de esta tesis, y con este gesto cultivar aún más la relación sector industria investigación.

Quiero agradecer ampliamente las facilidades y apoyo prestado para la realización de esta tesis al Ing. Felipe Hernández, Jefe del Departamento de Eléctrica del **Centro Nacional de Metrología**, así también a I.Q.M. Eugenia Reséndiz (amiga) jefa del laboratorio de Planta I en la empresa **TREMEC**.

Por supuesto debería mencionar a muchas otras personas, profesores, amigos, y colegas, pero ante el temor de cometer alguna omisión, prefiero no mencionar a ninguno y sólo decirles que, a pesar de todo, he aprendido de todos ellos algo invaluable para mí, por lo que les doy mis más sinceros agradecimientos

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 Ilustración esquemática del proceso de compactado y sinterizado  | 2  |
| Figura 1.2. Ilustra la morfología de los polvos producidos de los diferentes procesos: a) Atomización; b) reducción de óxido y c) electrodeposición.  | 3  |
| Figura 1.3 Ilustración esquemática de un modelo de tres esferas de sinterización: a) puntos de originales de contacto, b) crecimiento de cuello, c) y d) redondeamiento del poro.                                     | 4  |
| Figura 1.4. La resistencia de un conductor de longitud $L$ , área de sección transversal uniforme $A$ , y conductividad $\sigma$ .  |    |
| Tabla 1.1 Propiedades de algunos metales como conductores   | 8  |
| Figura 1.5 Arreglo colineal de 4 puntos para las mediciones de resistencia eléctrica  | 9  |
| Figura 1.6 Ilustración del arreglo preparado para obtener medidas de resistencia eléctrica cubriendo un área $dw$ , con 2 puntas de contacto  | 10 |
| Figura 1.7 Arreglo cuadrado de 4 puntos de contacto en una superficie pequeña con un espeso $\delta$ , teniendo puntos de entrada y salida de suministro de la corriente  | 11 |
| Figura 1.8 Esquema de un microscopio electrónico de barrido   | 12 |
| Figura 1.9 Algunas de las radiaciones que pueden ser utilizadas en un microscopio electrónico de barrido  | 13 |
| 1.10 Ilustración de la intersección de un plano de prueba en una muestra de forma cúbica en tres dimensiones. El total del área ocupada por la fase sombreada(negro) en el plano de prueba varía con respecto a $z$ . | 14 |
| Figura 2.1 Arreglo colineal de 4 puntos para las mediciones de resistencia eléctrica  | 17 |
| Figura 2.2 Representación esquemática del arreglo experimental usado para realizar las pruebas  | 18 |
| Figura 2.3 Vista superior de la polea, donde se indican las zonas en que se dividió la polea para la medición, así como se muestran las zonas donde hay falla.  | 19 |
| Figura 2.4 Ilustración de la pieza (Polea)  | 20 |
| Figura 2.5 Geometría de los dispositivos de cobre empleados   | 21 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.6 Representación del área que barrida para conocer las líneas de campo eléctrico en la pieza  | 21 |
| Figura 2.7 Representación esquemática de las áreas detectadas para el registro de la caída de voltaje en cada uno de los círculos a fin de poder construir el mapa de líneas de corriente. | 22 |
| Tabla 3.1 con los valores $\Delta V$ (mV) registrados, para la polea 1   | 30 |
| Tabla 3.2. Valores de resistividad eléctrica, para la polea 1  | 30 |
| Tabla 3.3. Valores $\Delta V$ (mV) registrados, para la polea 2  | 31 |
| Tabla 3.4. Valores de resistividad eléctrica, para la polea 2  | 31 |
| Figura 3.1 Valores de resistividad vs % de porosidad   | 32 |
| Figura 3.2 Microestructura obtenida de SEM con la ubicación de los puntos de muestro para conocer la composición química.  | 34 |
| Figura 3.3 Espectros obtenidos en el análisis químico por SEM  | 35 |
| Figura 3.4 Esquema que ilustra el tipo de diagramas que se obtuvieron para mostrar las líneas de corriente.  | 36 |
| Figura 3.5 (PIEZA 1) Mapa de líneas de corriente de la pieza cuando la corriente es suministrada paralelamente a la fractura.  | 38 |
| Figura 3.6 (PIEZA 2) Mapa de líneas de corriente de la pieza cuando la corriente es suministrada paralelamente a la fractura.  | 39 |
| Figura 3.7 (PIEZA 1) Mapa de líneas de corriente de la pieza cuando la corriente es suministrada transversalmente a la fractura.   | 40 |
| Figura 3.8 (PIEZA 2) Mapa de líneas de corriente de la pieza cuando la corriente es suministrada transversalmente a la fractura.   | 41 |
| Figura 3.9 Líneas de flujo de corriente generadas en dos puntos de contacto  | 43 |
| Figura 3.10 Imágenes de microscopio electrónico de barrido y % de porosidad para la pieza y zona señalada  | 44 |
| Figura 3.11 Imágenes de microscopio electrónico de barrido y % de porosidad para la pieza y zona señalada  | 45 |
| Figura 3.12 Imágenes de microscopio electrónico de barrido y % de porosidad para la pieza y zona señalada  | 46 |



## **OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar la posibilidad de que a través de mediciones de resistencia eléctrica se pueda determinar el grado de integridad interna de piezas de acero fabricadas por metalurgia de polvos

### **Objetivos particulares:**

- a) Llevar a cabo un diseño de experimentos considerando las condiciones del producto elaborado por SINTERSTAHL.
- b) Evaluar y construir los dispositivos necesarios para la medición de la resistencia y/o conductividad eléctrica esto de acuerdo al producto proporcionado por SINTERSTAHL
- c) Llevar a cabo las pruebas correspondientes para la evaluación y/o medición de la conductividad y/o resistencia eléctrica.
- d) Analizar si la técnica permite ser empleada como una técnica no destructiva para detectar fracturas, fisuras y/o defectos en piezas de acuerdo a los estándares fijados por SINTERSTAHL.
- e) Efectuar el análisis y la racionalización de los resultados, así como ver si el procedimiento utilizado puede ser empleado como una técnica no destructiva para detectar, fisuras, fracturas o defectos en las piezas en general.

## RESUMEN

La literatura concerniente a la relación entre la ley de Ohm y resistividad eléctrica, así como la aplicación de estos términos en la técnica de los 4 puntos para conocer la resistividad eléctrica de cualquier material en general y la correlación de esta con las características microestructurales de metales ha sido revisada. El presente trabajo ha sido realizado para evaluar las características microestructurales a través de determinaciones de resistividad eléctrica en piezas fabricadas por metalurgia de polvos. Así, a partir de los valores de diferencias de potencial, los valores correspondientes de resistividad eléctrica para dichas piezas (poleas) fueron obtenidos. Para esto se empleó la técnica de los 4 puntos en un arreglo colineal, de aquí los valores de resistividad eléctrica mostraron guardar una relación lineal con respecto al %de porosidad en diferentes partes de la pieza, representada por la siguiente expresión:  $\rho = 0.00175 + 0.00629 X$  en dónde la variable dependiente es la resistividad eléctrica y la variable independiente es % de porosidad. De esta manera se demostró que la técnica es sensible a cambios microestructurales (% de porosidad). Por otra parte a través del suministro de corriente 1 amper en corriente directa paralela y transversal a la fractura o fisura en las diferentes zonas en que la pieza (polea) fue dividida, se obtuvieron mapas mostrando las líneas de flujo del campo eléctrico para cada una de las zonas de la polea con el propósito de observar y definir las características microestructurales que modifican el camino que siguen las líneas de flujo del campo eléctrico en la pieza. En general los resultados mostraron como la técnica de los 4 puntos es sensible a los cambios microestructurales (% de porosidad y fisuras, en el presente trabajo) además de poder implementarse como una técnica no

destruictiva y económica que puede ser empleada en el proceso de control de calidad en la manufactura de piezas metálicas fabricadas por medio de metalurgia de polvos.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la medición de la resistividad eléctrica ha sido empleada como un método de prueba no destructivo, confiable y económico para evaluación de tamaño de grano, % de porosidad, y nivel de modificación en aleaciones de aluminio en piezas fabricadas por metalurgia de polvos<sup>(1)</sup>.

Considerando que en pruebas de conductividad eléctrica, se tiene la facilidad de que los electrones fluyen a través de la estructura interna de la pieza y este flujo puede ser medido como un diferencial de potencial que conlleva en conocer la resistividad del material<sup>(2-3)</sup>. Así, la mayoría de los metales son excelentes conductores de la electricidad y los cambios microestructurales pueden ser evaluados a través de medidas de corriente eléctricas, ya que científicos germanos mostraron que una aleación modificada (en su microestructura) posee una mayor conductividad eléctrica comparada con la misma aleación pero ahora no modificada<sup>(2)</sup>.

Por otra parte, los mandatos de control de calidad manejan el concepto de control "preventivo", existiendo así la gran necesidad de estimar la calidad del metal o aleación antes de ser prensada y sinterizada con el objeto de minimizar la cantidad de piezas defectuosas producidas y por consiguiente lograr un aumento en la productividad. Es aquí dónde se prevé que la medición de la resistividad eléctrica puede ser empleada como una prueba no destructiva, confiable y económica, para evaluar la calidad de una pieza metálica.

En un esfuerzo por entender y conocer la relación de la resistividad eléctrica con los cambios microestructurales, así como la sensibilidad de la resistividad eléctrica como una técnica de control de calidad y la posible implementación en planta durante el proceso de control y además como un instrumento para evaluar cambios microestructurales o defectos en piezas fabricadas por metalurgia de polvos, el propósito de este trabajo es presentar los resultados de una investigación usando una técnica simple de medición de conductividad para predecir defectos tales como fracturas, fisuras, % de porosidad, en piezas elaboradas por metalurgia de polvos siendo esta una técnica no destructiva.

# CAPITULO I

## ANTECEDENTES

### 1.1 Generalidades sobre Metalurgia de Polvos

La metalurgia de polvos se puede definir como el arte de producir polvos de metal y emplearlos para hacer objetos útiles. Inicialmente los procesos de metalurgia de polvos fueron usados para remplazar al proceso tradicional de fundición para los metales <sup>(4)</sup>.

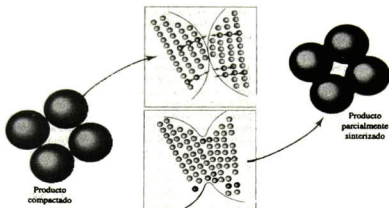
En 1829, Woolaston publicó un artículo en el cuál describía un proceso para producir platino compacto a partir de polvo con esponja de platino. Considerada la primera investigación científica en el campo de la Metalurgia de polvos (M/P), esta estableció los fundamentos de las técnicas modernas <sup>(4)</sup>.

Un desarrollo importante ha sido el uso incrementado de piezas de M/P grandes para la industria automotriz, en dichas piezas se puede obtener alta resistencia, ductilidad y tenacidad, de manera que la vieja idea de obtener piezas frágiles ya no es válida <sup>(4)</sup>.

Las principales operaciones del proceso son el compactado y el sinterizado. El compactado o también llamado presionado consiste en someter las mezclas de polvos adecuadamente preparado, a temperatura ambiente o elevada, a presión considerable. El comprimido de polvo resultante se conoce como aglomerado y se dice, que en esta forma, es “verde” y relativamente frágil <sup>(4)</sup>.

El sinterizado es una operación en la que los aglomerados verdes son sometidos a altas temperaturas, pero inferior el punto de fusión del metal sólido generalmente en una atmósfera inerte. Aquí es donde empieza el enlace entre las partículas conforme el material se calienta. El enlace incluye la difusión de átomos donde hay contacto íntimo entre partículas adyacentes que

dan lugar al desarrollo de frontera de grano<sup>(4)</sup>. En la figura 1.1 se esquematiza el proceso de compactado y sinterizado.



**Figura 1.1: Ilustración esquemática del proceso de compactado y sinterizado<sup>(4)</sup>**

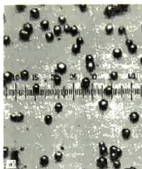
El mecanismo de empaquetamiento (inicio del enlace) abarca tres procesos: el llenado de espacios entre las partículas más grandes por partículas más pequeñas, el rompimiento de puentes o bóvedas, y el deslizamiento y rotación mutua de partículas<sup>(4)</sup>.

La forma de la partícula es importante para influir en las características de empaquetamiento y flujo de los polvos. En general, se prefiere un polvo más fino sobre un polvo más grueso, ya que los metales más finos tienen menores tamaños de poros y mayores áreas de contacto, lo cual resulta generalmente en mejores propiedades físicas después de sinterizar<sup>(4)</sup>.

Se utilizan muchos procesos mecánicos y químicos con el fin de producir polvos para aplicaciones específicas, pero los procesos más importantes son la atomización, la reducción de óxidos y la depositación electrolítica. La morfología de los polvos producidos por los procesos mencionados se muestra en la figura 1.2 La atomización es el método utilizado más frecuentemente para metales que tienen bajos puntos de fusión<sup>(4)</sup>.

Las partículas producidas por reducción de óxido son de estructura tipo esponja ideal para moldear<sup>(4)</sup>.

Los polvos obtenidos de electrodepositos duros y frágiles generalmente no son adecuados para propósitos de moldeo<sup>(4)</sup>.



a)



b)



c)

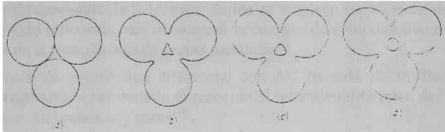
**Figura 1.2. Ilustra la morfología de los polvos producidos por los diferentes procesos: a) Atomización; b) reducción de óxido y c) electrodeposición. <sup>(4)</sup>**

Las principales etapas en un proceso de metalurgia de polvos incluye:<sup>(4)</sup>

1) Obtención de los polvos metálicos en un grado susceptible de finura y pureza.

2) Dichos polvos son sometidos a una presión adecuada en un molde para causar cohesión que ocurre entre las partículas.

3) Sinterización de la masa compactada a temperatura suficientemente alta para producir difusión y crecimiento intergranular, a continuación en la figura 1.3, se muestra el acomodo de las partículas de polvos en el proceso de sinterizado con la consecuente formación de cuellos y redondeamiento del poro.



**Figura 1.3. Ilustración esquemática de un modelo de tres esferas de sinterización: a) puntos de originales de contacto, b) crecimiento de cuello, c) y d) redondeamiento del poro. (4)**

4) Por último, inspección del producto y tamaño de la pieza.

En recientes años, ha habido un interés considerable en mostrar el desarrollo de técnicas de caracterización para determinar el grado de modificación de aleaciones de aluminio, tal como ha sido reportado en trabajos previos, las técnicas de resistividad eléctrica pueden ser usadas para control del metal fundido antes de ser vaciado, previa recolección de la muestra que es solidificada completamente, así como también medir el grado de modificación en fundiciones completamente solidificadas<sup>(5)</sup>.

La influencia de porosidad por hidrógeno y la velocidad de enfriamiento en las medidas de resistividad han sido estudiada. En donde se ha encontrado que la resistividad eléctrica se incrementa con ambos, incremento en la porosidad y disminución de la velocidad de enfriamiento. Estos poros dentro de la muestra impiden el flujo de corriente y el resultado es un incremento en la resistividad eléctrica. Inclusiones y contracciones tienen el mismo efecto en la resistividad eléctrica como lo es la porosidad por hidrógeno<sup>(6)</sup>.



Los factores que determinan la magnitud de las diferencias en conductividad o resistividad eléctrica de aleaciones metálicas modificadas y no modificadas han sido examinadas, relacionándolas con cambios microestructurales<sup>(7)</sup>.

La resistividad eléctrica fue empleada para caracterizar los cambios microestructurales después de un proceso de fundición. Esto ocurre cuando el estroncio es usado como un modificador de la estructura de la fase silicio. La resistividad eléctrica medida con la técnica de DC decrece cuando la forma de la fase eutéctica cambia de acicular a fibrosa<sup>(8)</sup>.

Medidas de conductividad eléctrica, donde se emplean las técnicas de DC y AC, han sido utilizadas para determinar la cinética de comportamiento de los procesos de la manufactura de piezas metálicas<sup>(9)</sup>.

Una técnica de resistividad diferencial con AC ha sido desarrollada para seguir progresivamente durante el recocido el tratamiento térmico del trabajo en frío para un bronce  $\alpha$  y cobre<sup>(10)</sup>.

Medidas de conductividad eléctrica usando un equipo manual de corriente de Eddy fueron usadas para determinar la factibilidad de predicción de fundiciones modificadas de Al-Si<sup>(11)</sup>

La determinación de la resistividad ha mostrado ser altamente sensible a pequeños cambios del tamaño de grano, esto ha sido observado en las mediciones de la resistividad eléctrica en aleaciones de aluminio-titanio en dónde hay una dependencia fuertemente del tamaño del grano y el contenido de titanio (Ti) en la aleación<sup>(12)</sup>.

Por otro lado, se sabe que la resistividad es una medida de la resistencia que opone el material al flujo de la corriente eléctrica en un conductor por unidad de área transversal entre longitud, es una propiedad característica de cada material. La resistividad es útil en las comparaciones entre varios materiales basándose en su habilidad que tienen para conducir la corriente eléctrica<sup>(10)</sup>. Esto es cuando se aplica la misma diferencia de potencial a los extremos de una barra de metal y de un aislante, geoméricamente similares, se producen corrientes de magnitudes diferentes.<sup>(13)</sup>

## 1.2 Ley de Ohm y resistividad eléctrica

Muchas personas están familiarizadas con la forma común de la ley de Ohm

$$V = Ri \quad (1.1)$$

donde  $V$  es la diferencia de potencial aplicada (en volts),  $i$  la corriente estacionaria (en amperes),  $R$  es la resistencia resultante en ohm ( $\Omega$ )<sup>(11)</sup>.

La resistencia  $R$  es una característica del tamaño, la forma y las propiedades de los materiales<sup>(13)</sup>.

La resistividad  $\rho$  es una propiedad intrínseca de los materiales y no de una muestra en particular, se encuentra asociada a la resistencia del material y matemáticamente se define como:

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (1.2)$$

donde  $\bar{E}$  y  $\bar{J}$  son vectores los cuáles representan el campo eléctrico  $\bar{E}$  y la densidad de corriente  $\bar{J}$  en términos de la ley de Ohm, además definidos por las ecuaciones (1.3) y (1.4) que determinan las magnitudes correspondientes:

$$E = \frac{V}{l} \quad (1.3)$$

y

$$J = \frac{i}{A} \quad (1.4)$$

La conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) y la resistividad ( $\rho$ ) son cantidades recíprocas, la relación es<sup>(14)</sup>:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.5)$$

Por sustitución de las ecuaciones 1.3 y 1.4 en la ecuación 1.2 y ordenando términos si  $R = \frac{V}{i}$ , la resistividad también se puede expresar como:

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (1.6)$$

donde  $A$  corresponde al área del flujo,  $l$  a la distancia entre los dos puntos y  $R$  a la resistencia eléctrica como se ilustra en la figura 1.4<sup>(16)</sup>.

Las cantidades macroscópicas  $V, I$  y  $R$ , se refieren a un cuerpo particular ó a una región en particular ó a una región extensa.

Mientras que cantidades microscópicas, que tienen valores definidos en cada punto de un cuerpo son  $\vec{E}$ ,  $\vec{J}$  y  $\rho$ <sup>(16)</sup>.

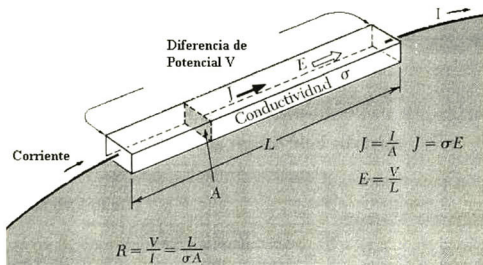


Figura 1.4 La resistencia de un conductor de longitud  $L$ , área de sección transversal uniforme  $A$ , y conductividad  $\sigma$ .<sup>(17)</sup>

**Tabla 1.1 Propiedades de algunos metales como conductores**

| <b>Metal</b> | <b>Resistividad a (20°C) <math>10^{-8}\Omega\cdot m</math></b> |
|--------------|--|
| Plata        | 1.6  |
| Cobre        | 1.7  |
| Aluminio     | 2.8  |
| Tungsteno    | 5.6  |
| Níquel       | 6.8  |
| Hierro       | 10   |
| Acero        | 18   |
| Acero 1030   | 12   |
| Manganina    | 44   |
| Carbón*      | 3500   |

\*El carbón, que no es estrictamente un metal, se incluye para comparación

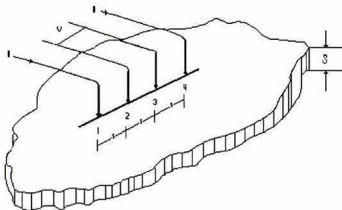
Numerosas técnicas han sido empleadas para medir propiedades eléctricas en los materiales. Algunas son adaptaciones de métodos bien conocidos y utilizados en gran variedad de materiales<sup>(18)</sup>.

### **1.3 Técnicas de medición de la resistividad eléctrica**

#### **Técnica de los 4 puntos**

Algunas mediciones emplean cuatro terminales – dos de paso de corriente y dos para detectar el voltaje correspondiente-<sup>(18)</sup>. Este arreglo provee de las medidas de resistividad de las muestras teniendo una amplia variedad de formas, incluyendo aquellas que tienen bordes irregulares, además de muestras con pequeñas regiones de resistividades incluidas dentro de una matriz con diferentes propiedades eléctricas. En la figura 1.5 se muestra cuatro puntos en contacto con una superficie plana de un material isotrópico uniforme a ser medido. Las puntas de contacto son consideradas a ser mucho más que alguno de los otros límites de la muestra así que pueden ser consideradas a ser una área infinita de resistividad uniforme. Adicionalmente, se tienen ciertas restricciones:

- El diámetro del contacto entre cada una de las puntas de contacto y la superficie en y él alrededor de las puntas de la muestra debe ser pequeña con respecto a la distancia,  $s$ , entre las puntas
- Las superficies deben tener una alta recombinación así que cualquier electrón introducido por las puntas de contacto se recombinen en sus alrededores inmediatos y sus efectos en la conductividad sean despreciables, y por último
- Los límites entre los electrodos que llevan corriente y el resto del material deben ser pequeños en diámetro y de forma semiesférica<sup>(13)</sup>



**Figura 1.5 Arreglo colineal de 4 puntos para las mediciones de resistencia eléctrica<sup>(13)</sup>.**

Donde la lectura del diferencial de potencial ( $V$ ) es registrada en un dispositivo adecuado al arreglo montado, pero además este debe tener una resistividad más alta comparada con la muestra y  $\delta$  el espesor<sup>(13)</sup>.

En dónde el valor de la resistividad se obtiene de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{V}{i} \cdot \frac{\pi \delta}{\ln 2} \quad (1.7)$$

en dónde se tiene dos condiciones, la primera de ella es cuando  $\delta \ll s$  y la última de ellas es cuando  $\delta \gg s$ .

## Técnica de 2 contactos

La resistividad de un material puede ser calculada de medidas hechas de la resistencia de una muestra la cuál tiene forma de un paralelepípedo como se muestra en la figura 1.6. Las mediciones se toman de forma ordenada para determinar la resistencia en términos de la corriente suministrada a través de dos puntos, a la muestra a partir de un origen de corriente constante y el diferencial de potencial generado entre los puntos de contacto. Además, se debe considerar las dimensiones de la muestra, así como la distancia entre las puntas de contacto

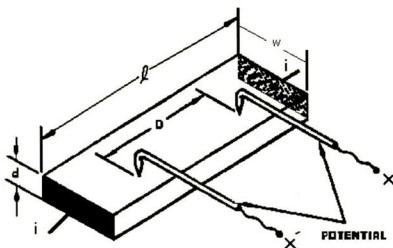


Figura 1.6 Ilustración del arreglo preparado para obtener medidas de resistencia eléctrica cubriendo un área transversal ( $d \cdot w$ ), con dos puntas de contactos<sup>(13)</sup>

Considerando un paralelepípedo uniforme, homogéneo e isotrópico como se muestra en la figura 1.6. Una corriente,  $i$ , es suministrada a los contactos los que cubren el área transversal  $d \cdot w$ , por consiguiente, la densidad de corriente es  $J = i/wd$ . El dispositivo montado que consiste de 2 puntas de acero, que puede ser de acero de herramienta o con carburos de tungsteno son colocadas en el centro de una las caras de la muestra, los contactos que suministran está orientados a lo largo de la dirección del flujo de corriente con una separación  $D$  entre ellos. Si los límites de la muestra, son menores a  $10D$  en cualquier dirección, entonces el campo eléctrico, en términos de la diferencia de potencial,  $V$ , entre ello es  $E = V/D$ .

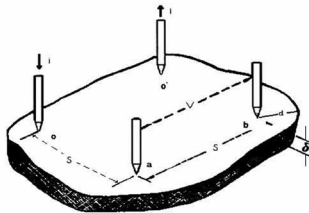
Consecuentemente la resistividad de la muestra es simplemente:

$$\rho = (V/i) \cdot (wd/D) \quad (1.8)$$

Las restricciones de esta técnica es que debe tenerse un paralelepípedo uniforme. <sup>(13)</sup>

### Técnica con 4 puntos en forma cuadrada

Un arreglo cuadrado de 4 puntos se muestra en la figura 1.7 provee de algunas ventajas más que arreglo colineal para medidas de resistividad sobre muestras de área pequeña.



**Figura 1.7** Arreglo cuadrado de 4 puntos de contactos en una superficie pequeña con un espesor  $\delta$ , teniendo puntos de entrada y salida con suministro de la corriente. <sup>(13)</sup>

Una de ellas es para muestras delgadas en forma de láminas, de espesor  $\delta \ll 0.5s$ , se miden por medio de este arreglo. la resistividad esta dada como:

$$\rho = 2\pi\delta R / \ln 2 \quad (1.9)$$

Dónde R esta dada de la siguiente forma  $R = V/i$ .

Si se considera que la distancia  $oa = ab = o'b = s$ , se tiene un arreglo simétrico. Una de las limitantes de esta técnica es la condición del espesor de la muestra, además hay que considerar que la distancia  $s$  (distancia entre los puntos de contacto) debe ser menor a la distancia  $d$  que es la distancia hacia los límites de la muestra ( $d \gg s$ ). Sin embargo, son necesarias correcciones si las medidas son realizadas en muestras de tamaño y forma definidas <sup>(13)</sup>

#### 1.4 Microscopio electrónico de barrido (MEB)

Se conoce que el análisis en microscopía se ha convertido en una técnica muy importante para la caracterización de todo tipo de materiales sólidos.

Un microscopio es un sistema óptico que transforma un objeto en una imagen. En general lo que interesa es hacer la imagen mucho más grande que el objeto. Así, por ejemplo el microscopio electrónico de barrido emplea un haz de electrones para iluminar las muestras, dicho microscopio se utiliza principalmente para estudiar la superficie o la estructura cerca de la superficie de muestras más gruesas. En la figura 1.8 se muestra el esquema de un microscopio electrónico de barrido con sus principales componentes. El haz de electrones pasa a través de las lentes condensadoras y de objetivo, y es barrido a lo largo de la muestra por las bobinas de barrido, mientras que un detector cuenta el número de electrones secundarios de baja energía emitidos por cada punto de la superficie. Al mismo tiempo se utiliza el foco de un tubo de rayos catódicos (TRC) para proporcionar contraste a la imagen. Tanto el haz de electrones que proviene del detector como el foco (TRC) es barrido de forma similar a la de un receptor de televisión dando lugar a la imagen ampliada. El mecanismo de ampliación es pues, bastante simple y es importante notar que en este tipo de microscopio no existen lentes proyectoras como en el caso de un microscopio óptico<sup>(19)</sup>

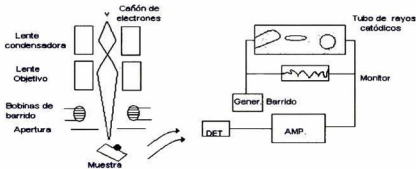


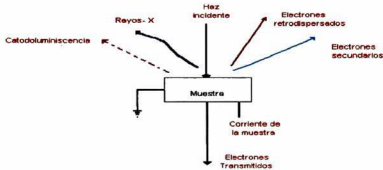
Figura 1.8 Esquema de un microscopio electrónico de barrido

El voltaje de aceleración de un microscopio electrónico de barrido se encuentra entre 2 kV y 40 kV. El microscopio electrónico de barrido puede, en principio, utilizar para formar una imagen cualquier tipo de emisión secundaria que se pueda medir.

La señal más utilizada es la que proviene de los electrones secundarios.



De las otras radiaciones, los rayos X se utilizan para el análisis químico, mientras que las restantes tienen aplicaciones interesantes pero muy especializado y no es objeto de este tema. La figura 1.9 muestra las diferentes radiaciones que se utilizan en un microscopio electrónico de barrido



**Figura 1.9 Algunas de las radiaciones que pueden ser utilizadas en un microscopio electrónico de barrido**

### 1.5 Analizador de imágenes

Es un instrumento programable el cuál da una representación de un objeto o grupo de objetos en dónde se realiza análisis cuantitativamente de estos. El analizador de imágenes manipula la información de tal manera que se obtiene mucha información valiosa de ellas, en consecuencia se puede determinar cuantitativamente las propiedades del material tales como:

1. El promedio de distribución del tamaño de granos en muestras metálicas y no metálicas
2. Medir el % de porosidad en partes metálicas sinterizadas
3. Máximos, mínimos y promedio de espesores en recubrimiento uniformes
4. Conteo de inclusiones
5. % de área de fases en muestras multifases, etc.

Un sistema básico de análisis de imagen debe contener un dispositivo que proporcione la imagen el cuál consiste de un microscopio con alta calidad de resolución e iluminación ya que la muestra debe ser claramente visible. Esto es debido a que el análisis es a partir de la microestructura de la imagen, debe evitarse cualquier distorsión de la imagen ya que se tendría también distorsión

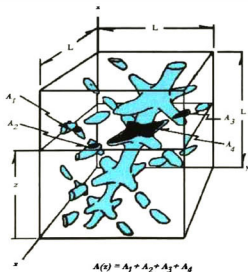
en los datos obtenidos. El escáner es una cámara de vídeo de alta fidelidad el cuál convierte la imagen de la muestra a una señal electrónica que puede convertirse a una información numérica la cuál puede ser interpretada por el técnico analizador. Un escáner tiene alta linealidad y bien definida resolución, para medir aún las partículas más pequeñas de forma exacta.

Se hace un barrido por medio de un haz de electrones a través de la imagen. Como el escáner viaja a través del campo seleccionado este genera una señal eléctrica con una amplitud dependiente de la brillantes u oscuridad del campo lo que origina señales que pueden ser cuantificadas, por medio de los diferentes tonos que se obtienen en la imagen<sup>(20)</sup>

### 1.5.1 Relaciones fundamentales para el análisis de fracción volumen

Las medidas de fracción volumen en una fase en gran parte son independientemente de su distribución espacial, excepto que algunas correcciones pueden ser requeridas, particularmente cuando las mediciones son hechas en láminas delgadas.

Para el microscopio óptico, la observación es hecha en una sección de un plano escogido al azar dentro de un volumen dado. Considerando que esta fase esta contenida dentro de un cubo de longitud  $L$ , paralelo al plano  $XY$  y a una distancia  $Z$ , como lo muestra la figura 1.10.



**Figura 1.10** Ilustración de la intersección de un plano de prueba en una muestra de forma cúbica en tres dimensiones. El total del área ocupada por la fase sombreada (negro) en el plano de prueba varía con respecto a  $Z$ .

Dada  $A(z)$  como el área de intersección de un plano de prueba particular con todas las partículas de, es decir, la fase  $\alpha$  de la estructura. La fracción del área del plano de prueba ocupado por la fase  $\alpha$  es:

$$A_A(z) = \frac{A(z)}{L^2} \quad (1.10)$$

Si  $p(z)dz$  es la probabilidad de encontrar un plano de prueba en una posición entre  $z$  y  $z+dz$ , el valor  $A_A$  significa el promedio de todas las posibles posiciones del plano de prueba el cuál se expresa como:

$$\bar{A}_A = \int A_A(z)p(z)dz \quad (1.11)$$

Si los planos de prueba están uniformemente distribuidos en posición, la probabilidad de encontrar un plano de prueba en cualquier intervalo es la misma para cualquier otro intervalo y se da como:

$$p(z)dz = \frac{dz}{L} \quad (1.12)$$

Esta condición corresponde a la selección de un plano de prueba al azar, la ecuación (1.12) la cuál llega a ser expresada como:

$$\bar{A}_A = \int A_A(z) \frac{dz}{L} = \int \frac{A(z)}{L^3} dz \quad (1.13)$$

La cantidad  $A(z)dz$  es, en el límite, el volumen de la fase contenida en un espesor  $dz$  en la posición  $(z)$ , así

$$\int \frac{A(z)dz}{L^3} = \frac{V}{L^3} = V_V \quad (1.14)$$

donde  $V$  es el volumen de la fase  $\alpha$ . Entonces, de la ecuación (1.13) y (1.14), se obtiene:

$$A_A = V_V \quad (1.15)$$

La ecuación (1.15) permite determinar la fracción volumétrica en un análisis real<sup>(21)</sup>.

## CAPITULO II

### MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 2.1 Material empleado:

Las piezas proporcionadas por SINTERSTAHL fueron poleas escogidas de manera aleatoria de este muestreo se obtuvieron dos poleas con las siguientes características: fueron fabricadas mediante el proceso de metalurgia de polvos empleando polvos de acero 1030 con un tamaño de partícula promedio de  $50 \mu\text{m}$ .

Así las piezas han sido prensadas en frío y sinterizadas en un rango de temperatura que va de 742 a 1120°C, en una atmósfera protectora (nitrógeno e hidrógeno) con el fin de evitar la formación de capas de óxido en la superficie de la muestra.

#### 2.2-Equipo empleado para las mediciones de resistencia eléctrica:

1. -Calibrador multifunciones, Datron modelo 4800.  
Rango de trabajo (0.001A – 100 A).
- 2.- Multímetro Fluke Modelo 8842 A
3. - Conexiones y aislantes.

Las mediciones se realizaron en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) en el departamento de eléctrica del mismo centro.

### 2.3-Equipo para realizar las metalografías correspondientes al estudio microestructural de las piezas.

- 1- Cortadora
- 2- Montadora
- 3- Desbastadora
- 4- Pulidora
- 5- Microscopio óptico
- 6- Microscopio electrónico de barrido
7. Analizador de imágenes

Las muestras fueron preparadas en el laboratorio del Centro Nacional de Metrología en el departamento de Microscopía Electrónica de Barrido, por otra parte para la determinación del % de porosidad en las muestras se prepararon en el laboratorio de Planta 1 de la empresa TREMEC.

### 2.4- Procedimiento para la obtención de la resistencia y resistividad eléctrica

El arreglo que se determinó usar en el presente trabajo y con base en la técnica de los 4 puntos para determinar la resistividad eléctrica de las poleas, en dónde se cuida que las 4 puntas de contacto estén bien sujetas a la pieza evitando así tener un mal contacto al momento de la lectura. Es el uso del arreglo en forma colineal que a continuación se ilustra en la figura 2.1.

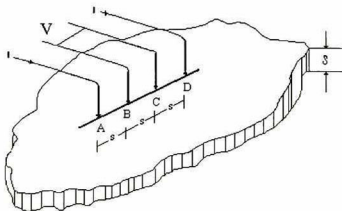


Figura 2.1 Arreglo colineal de 4 puntos para las mediciones de resistencia eléctrica

En este arreglo, se tienen cuatro puntos de contactos en la superficie de la pieza, los dos contactos exteriores que en la figura 2.1 se identifican por los puntos 1 y 4 a través de los cuales se suministra un amper de corriente continua que para las condiciones de medición establecidas en el presente trabajo son dejados fijos a la pieza, los dos restantes contactos que son los interiores están conectados a un voltímetro donde se detecta y registra la diferencia de potencial, dicha lectura corresponde a cierta distancia, la cuál para el presente trabajo comprendió de 0 a 20 mm a lo largo de la zona de interés. Los contactos interiores como son móviles el primero de ellos se fija a la distancia inicial de 0 mm para que el otro contacto se ubique a una distancia de 2 mm a partir del primero todo esto con el fin de cubrir la totalidad de la distancia siendo esta de aproximadamente de 20 mm. Esta distancia está delimitada por los bordes finales de la pieza en sí, la representación esquemática del arreglo experimental descrito se muestra en la figura 2.2.

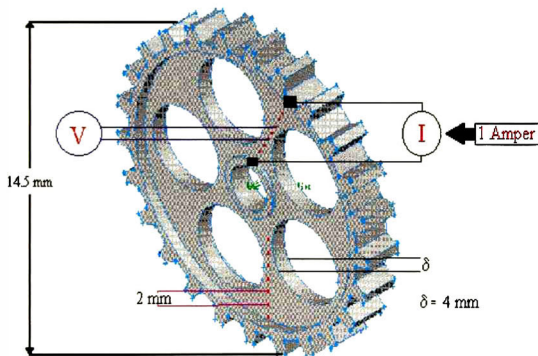
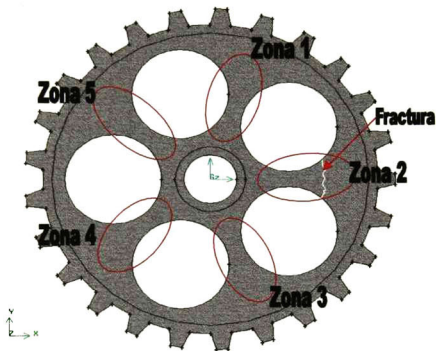


Figura 2.2. –Representación esquemática del arreglo experimental usado para realizar las pruebas

Una vez que se habían determinado y localizado las zonas con y sin fractura en la polea, se procedió a tomar lecturas en cada una de las 5 zonas que contiene la pieza, como se ilustra en la figura 2.3. Para dicha medición cuando existía fractura, esta se realizó en forma transversal y paralela con respecto a ella, como a continuación se muestra en la misma figura 2.3.



**Figura 2.3.** Vista superior de la polea, donde se indican la zona en que se dividió la polea para la medición, así como se muestran las zonas donde hay falla

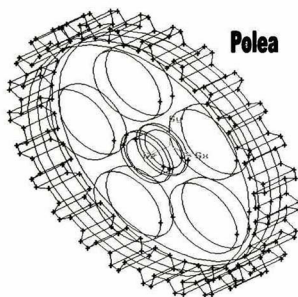
#### **2.4.1. Procedimiento para la determinación de las líneas de campo eléctrico**

Además, con las mediciones para obtener la diferencia de potencial también se decidió realizar un barrido en las diferentes zonas para conocer el mapa de líneas de corriente generadas por el paso de corriente eléctrica en este sitio.

Dichos barridos o mapeos ayudan a conocer de forma cualitativa el camino que siguen las líneas de corriente que se están produciendo en la zona. Para tal propósito se dividió la superficie total de la zona fijada dentro de la polea de tal forma que se cubriera la mayor área existente, para este fin se utilizaron los mismos dispositivos que se emplearon para suministrar la corriente, cuando se determinó la resistividad eléctrica.

Se llevó a cabo la apreciación a simple vista de las fracturas y/o fisuras que presentaban las piezas, además se ubicaron las zonas sanas dentro de las mismas.

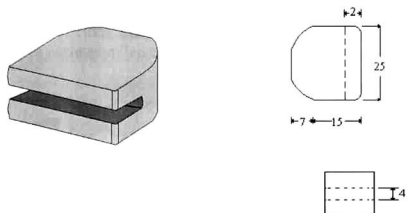
Posteriormente, se definieron los puntos de contacto dentro de la polea más convenientes para tomar las mediciones de diferencial de potencial por medio de la técnica de 4 puntos, es decir 2 puntos para el suministro de corriente y 2 puntos para la detección del diferencial de potencial generado.



**Figura 2.4. Ilustración de la pieza (Polea)**

Ya una vez que se determinó la ubicación de los 4 puntos de contacto dentro de la pieza y tomando en consideración la geometría de la pieza se construyeron los dispositivos necesarios para suministrar la corriente y tomar la lectura correspondiente a dicho punto. Tales dispositivos se fabricaron de cobre puro con la geometría mostrada en la figura 2.5 y las puntas de los contactos fueron sometidas a un chapeado en oro con el fin de conducir mejor la corriente y que la lectura que se obtuviera mostrara reproducibilidad.

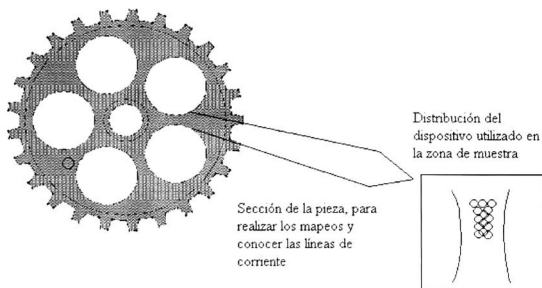




**Figura 2.5 Geometría de los dispositivos de cobre empleado**

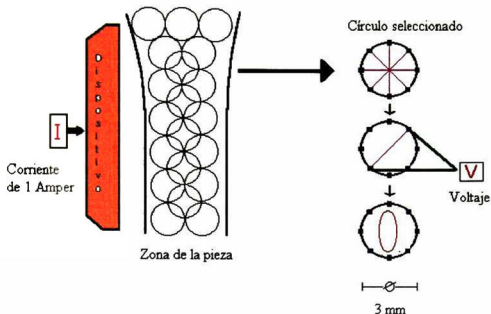
Estos dispositivos se fabricaron tomando en cuenta las dimensiones reales de la pieza.

Una vez que se seccionó el área para el barrido, en pequeños círculos de 3 mm de diámetro cada uno de ellos se seccionó en ocho partes iguales, figura 2.6.



**Figura 2.6. Representación del área barrida para conocer las líneas de campo eléctrico en la polea**

Así a continuación se procedió a detectar y registrar las lecturas para cada uno de los círculos que conforman la totalidad de la superficie, siendo que a su vez cada uno de los círculos también se dividió de forma individual para realizar las mediciones correspondientes, esto se ilustra a continuación en la figura 2.7.



**Figura 2.7. Representación esquemática de las áreas detectadas para el registro de la caída de voltaje en cada uno de los círculos a fin de poder construir el mapa de líneas de corriente**

Así de esta manera, las mediciones obtenidas se marcaron dentro del círculo correspondiente con el fin de generar una figura geométrica (elipse) que indicará la dirección de la línea de corriente generada dentro del mismo círculo.

Considerando que a partir de las lecturas obtenidas se conocerá la dirección de las líneas de corriente del campo eléctrico que se está generando en la puela, se muestran los diagramas obtenidos en el capítulo III.

## **2.5 Preparación de muestras para su observación en MEB y analizador de Imágenes**

La polea, como se ha mencionado anteriormente, se divide en 5 partes, por lo que la preparación de las probetas metalográficas corresponde a dichas partes. El procedimiento utilizado se detalla a continuación:

Como primer paso la pieza se secciona por medio de una cortadora de banda, teniendo un tamaño de muestra aproximado de 8x22 mm. Se montan las muestras en bakelita, obteniéndose las probetas correspondientes, y así manejarlas con más facilidad durante la preparación de las mismas para el análisis metalográfico.

El proceso de desbaste consiste en lijar las probetas con el fin de conseguir una superficie lisa y regular, permitiendo así continuar con el proceso de pulido. Se desbastan las probetas con lijas de agua a partir de la No 100, pasando por 240, 320, 400, 500, y terminando con la No. 600. De aquí, las probetas se secan cuidadosamente y se procede a pulirlas. La pasta utilizada fue de diamante con un tamaño de partícula de 3 $\mu$  y un paño de tela de billar, a 450 rpm, con el fin de conseguir una superficie brillante.

Ya que se obtiene una superficie brillante sin ralladuras y terminado a espejo, se atacan con una solución de nital al 2% por espacio de 7 seg, se lavan perfectamente para retirar todo los residuos de la solución, y a continuación se secan, cuidando de no dejar manchas de agua que interfirieran al momento del análisis.

A partir de aquí, las probetas están listas para su observación en SEM y analizador de imágenes.

## CAPITULO III

### RESULTADOS y DISCUSION DE RESULTADOS

Así, los resultados obtenidos se han basado en la técnica de los 4 puntos, pero se deben mencionar las modificaciones realizadas en el presente trabajo ya que los valores que corresponden a cada una de las distintas lecturas en las diferentes zonas que conforman la pieza se han trabajado bajo la restricción del espesor y la distancia entre los contactos, todo esto con el fin de conocer los verdaderos valores de resistividad eléctrica en la polea al momento de ser suministrada una corriente constante a través de ella que como ya se ha mencionado es de 1 Amper de DC, a continuación se mencionan las modificaciones pertinentes al modelo para ajustarlo a las necesidades del experimento que se ha desarrollado.

Como base se partió de dos condiciones, Figura 1.4:

- a) La primera de ellas es cuando el espesor de la muestra es mayor a la distancia entre los contactos (en este caso entre los pines) cumpliéndose la relación  $\delta \gg s$ , donde  $\delta$  es espesor de la muestra y  $s$  es la distancia entre los pines, por lo que las líneas de corriente generadas en la muestra son de forma radial, tal que las siguientes expresiones son usadas para conocer la resistividad de la muestra:

$$J = \frac{I}{2\pi l^2} = \frac{1}{\rho} E \quad (3.1)$$

$$E = \frac{I\rho}{2\pi l^2}; \quad (3.2)$$

sustituyendo el valor de E,

$$\Delta V = - \int_a^b E dl = - \int_a^b \frac{I\rho}{2\pi l^2} \quad (3.3)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{l} \Big|_a^b \quad (3.4)$$

En donde  $J$  es la densidad de corriente,  $\rho$  es la resistividad eléctrica,  $E$  es el campo eléctrico,  $\Delta V$  es la diferencia de voltaje y  $l$  la distancia entre los puntos de contacto.

Teniendo que resolver la ecuación 3.3, queda la expresión presentada en la ecuación 3.4 como una relación sencilla, para de ahí, obtener los valores correspondientes, tomando en cuenta los límites de integración, que son la distancia entre los contactos.

- b) La segunda condición es cuando se plantea el caso contrario al anterior inciso, ahora el espesor es más pequeño que la distancia entre los contactos,  $\delta \ll s$ , para este caso se tienen las siguientes relaciones que ayudan a conocer la resistividad eléctrica de la muestra quedando de la forma siguiente:

$$J = \frac{I}{\delta 2\pi l} = \frac{1}{\rho} E \quad (3.5)$$

despejando E de la ecuación 3.5, se obtiene que:

$$E = \frac{I\rho}{2\pi\delta} \quad (3.6)$$

En donde  $\frac{I\rho}{2\pi\delta} = \text{constante}$ , denominada A, así de está forma

$$A = \frac{I\rho}{2\pi\delta}, \quad (3.7)$$

por tanto sustituyendo la ecuación 3.7 en la ecuación 3.6, se obtiene

$$E = \frac{A}{l}, \quad (3.8)$$

y como

$$\Delta V = -\int_a^b E dl \quad (3.9)$$

entonces

$$\Delta V = -\int_a^b \frac{A}{l} dl \quad (3.10)$$

Resolviendo la integral de la misma manera a la descrita para la ecuación 3.3, se resuelve para la ecuación 3.10, por lo tanto queda la siguiente expresión:

$$\Delta V = -A \ell n l \Big|_a^b \quad (3.11)$$

Considerando la figura 2.1, en dónde se muestran los puntos de contacto, en donde a los puntos A y D se suministra una corriente  $i$ , y en los puntos B y C se observa un  $\Delta V$  además de considerar una distancia  $s$  entre cada uno de los puntos, la ecuación (3.11) puede ser expresada para el punto B:

$$V_B = \int_A^B \frac{A}{l} dl - \int_D^B \frac{A}{l} dl \quad (3.12)$$

$$V_B = A \left[ \ell n l \left| \frac{B}{A} - \ell n l \left| \frac{B}{D} \right. \right] \quad (3.13)$$

$$V_B = \left[ \ell n \frac{AB}{r_c} - \ell n \frac{DB}{r_c} \right] = A \ell n \frac{AB}{DB} \quad (3.14)$$

de forma análoga para el punto C, se tiene:

$$V_c = A \ell n \frac{AC}{DC} \quad (3.15)$$

si ahora se sustituye los valores de  $V_B$  y  $V_C$  en  $\Delta V$ ,

$$\Delta V_{BC} = V_B - V_C = A \ell n \frac{AB \cdot DC}{AC \cdot DA} \quad (3.16)$$

ahora sustituyendo el valor de A en la expresión 3.16

$$\Delta V_{BC} = \frac{I \rho}{2\pi \delta} \ell n \frac{AB \cdot DC}{AC \cdot DA} \quad (3.17)$$

despejando la resistividad eléctrica de la ecuación 3.17 llegamos a la siguiente expresión:

$$\rho = - \frac{2\pi \delta \Delta V_{BC}}{I \ell n \frac{AB \cdot DC}{AC \cdot DA}} \quad (3.18)$$

En donde:

$\delta$ = Espesor de la muestra,

$l$ = Distancia entre los contactos,

$E$ = Campo eléctrico,

$\rho$ = Resistividad eléctrica,

$\Delta V$ = Diferencial de potencial

$i$ = corriente aplicada,

$a$  y  $b$  = Límites de integración.

$r_c$ = radio de las puntas de contacto

A,B,C y D, ubicación de las puntas de contacto

La expresión 3.18 es la que se utiliza para conocer los valores de resistividad eléctrica en el presente trabajo, ya que se cumple la condición de espesor en el arreglo montado para este propósito. Considerando dos puntos, el inicial y final, que es la distancia entre los contactos.

Aunado con ello se obtiene una expresión donde aparecen logaritmos naturales, y los límites son las distintas distancias que tomen los puntos de contacto interiores en la zona de muestra, así mientras la distancia entre los puntos de contacto cambie de posición a través de la superficie de la pieza los límites variaron, por lo tanto los valores de resistividad reportados en los resultados están basados en la resolución de la ecuación 3.10.

Usando la aproximación de Maxwell<sup>(22)</sup> para este comparar con los datos experimentales, en donde dicha aproximación se define de la siguiente forma:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ \frac{2\sigma_0 + \sigma_p + 2\phi(\sigma_p - \sigma_0)}{2\sigma_0 + \sigma_p - \phi(\sigma_p - \sigma_0)} \right] \quad (3.19)$$

donde:

$\sigma$  = Conductividad eléctrica total

$\sigma_0$  = Conductividad eléctrica de la fase continua

$\sigma_p$  = Conductividad de la fase discontinua

$\phi$  = fracción volumen de la fase discontinua

para los valores registrados la ecuación (3.19) se expresa como:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ \frac{2\sigma_0 + \sigma_p + 2\phi(\sigma_p - \sigma_0)}{2\sigma_0 + \sigma_p - \phi(\sigma_p - \sigma_0)} \right] \quad (3.20)$$



dónde:

$\sigma$  = Conductividad eléctrica del total en la pieza

$\sigma_0$  = Conductividad eléctrica del acero

$\sigma_p$  = Conductividad eléctrica de los poros

$\phi$  = fracción volumen de la porosidad

tomando en consideración que el valor de  $\sigma_p = 0$ , la ecuación (3.20) se transforma a:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ \frac{2\sigma_0 - 2\phi(\sigma_0)}{2\sigma_0 + \phi(\sigma_0)} \right] \quad (3.21)$$

si además se considera  $\phi \ll 1$ , la ecuación (3.21) se puede expresar como:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ \frac{1 - \phi}{1 + 2\phi} \right] \approx \sigma_0(1 - \phi) \cdot (1 - 2\phi) \approx \sigma_0(1 - 2\phi) \quad (3.22)$$

por lo tanto la expresión final puede ser expresada como:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \rho_0(1 + 2\phi) \quad (3.23)$$

La ecuación 3.23 se utiliza para obtener la relación de resistividad eléctrica y % de porosidad en los datos experimentales.

A continuación se muestra la tabla y gráfica con los valores obtenidos de resistividad eléctrica en unidades de  $m\Omega\text{-cm}$ , para la polea 1 y 2, contra los valores de porosidad registrados.

Tabla 3.1 con los valores  $\Delta V(mV)$  registrados, para la polea 1

| Datos | $\Delta V(mV)$ |        |        |        |        |            |
|-------|----------------|--------|--------|--------|--------|------------|
|       | Zona1*         | Zona2* | Zona3* | Zona4* | Zona5* | Promedio** |
| 0     | 0              | 0      | 0      | 0      | 0      | 0          |
| 2     | 0.001          | 0.002  | 0.002  | 0.001  | 0.001  | 0.0014     |
| 4     | 0.01           | 0.0095 | 0.0095 | 0.0095 | 0.009  | 0.0095     |
| 6     | 0.017          | 0.017  | 0.017  | 0.024  | 0.021  | 0.0192     |
| 8     | 0.023          | 0.023  | 0.023  | 0.031  | 0.032  | 0.0264     |
| 10    | 0.03           | 0.031  | 0.031  | 0.038  | 0.039  | 0.033      |
| 12    | 0.032          | 0.033  | 0.034  | 0.035  | 0.032  | 0.034      |
| 14    | 0.035          | 0.039  | 0.038  | 0.039  | 0.037  | 0.0376     |
| 16    | 0.042          | 0.047  | 0.045  | 0.044  | 0.045  | 0.044      |
| 18    | 0.050          | 0.049  | 0.049  | 0.046  | 0.048  | 0.0484     |

\*Para cada uno de los datos reportados se realizaron 6 lecturas.

\*\*Este valor es el promedio final para las 5 zonas, del total de 30 lecturas

Tabla 3.2. Valores de resistividad eléctrica, para la polea 1

| Promedio<br>$\Delta V(mV)$ | $\rho (m\Omega\text{-cm})^{**}$<br>$X \pm 2\sigma$ |
|----------------------------|--|
| 0                          | 0  |
| 0.0014                     | $0.0073 \pm 4.1E-4$                                |
| 0.0095                     | $0.00998 \pm 5.18E-4$                              |
| 0.0192                     | $0.01162 \pm 5.65E-4$                              |
| 0.0264                     | $0.01868 \pm 9.9E-4$                               |
| 0.033                      | $0.02525 \pm 0.0021$                               |
| 0.034                      | $0.02906 \pm 0.0022$                               |
| 0.0376                     | $0.03811 \pm 0.00259$                              |
| 0.044                      | $0.04326 \pm 0.0032$                               |
| 0.0484                     |  |

Tabla 3.3. Valores  $\Delta V$ (mV) registrados, para la polea 2

| Datos | $\Delta V$ (mV) |        |        |        |        |            |
|-------|-----------------|--------|--------|--------|--------|------------|
| Mm    | Zona1*          | Zona2* | Zona3* | Zona4* | Zona5* | Promedio** |
| 0     | 0               | 0      | 0      | 0      | 0      | 0          |
| 2     | 0.001           | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001      |
| 4     | 0.005           | 0.01   | 0.008  | 0.006  | 0.009  | 0.0076     |
| 6     | 0.009           | 0.014  | 0.011  | 0.011  | 0.013  | 0.0116     |
| 8     | 0.01            | 0.019  | 0.016  | 0.018  | 0.019  | 0.0164     |
| 10    | 0.013           | 0.027  | 0.026  | 0.021  | 0.026  | 0.0226     |
| 12    | 0.016           | 0.033  | 0.031  | 0.025  | 0.032  | 0.0274     |
| 14    | 0.02            | 0.039  | 0.038  | 0.032  | 0.039  | 0.0336     |
| 16    | 0.027           | 0.047  | 0.047  | 0.039  | 0.045  | 0.041      |
| 18    | 0.035           | 0.055  | 0.057  | 0.046  | 0.052  | 0.049      |

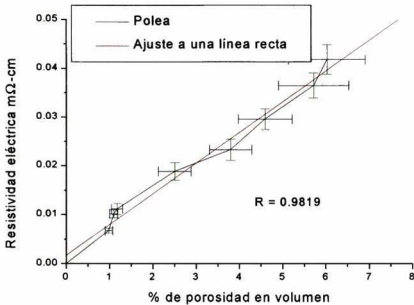
\*Para cada uno de los datos reportados se realizaron 6 lecturas.

\*\*Este valor es el promedio final para las 5 zonas, del total de 30 lecturas

Tabla 3.4. Valores de resistividad eléctrica, para la polea 2

| Mm | Promedio<br>$\Delta V$ (mV) | $\rho$ (m $\Omega$ -cm)**<br>$X \pm 2\sigma$ | % Porosidad<br>$X \pm 2\sigma$ |
|----|-----------------------------|--|--------------------------------|
| 0  | 0                           | 0 $\pm$                                      |                                |
| 2  | 0.001                       | 0.0068 $\pm$ 3.4E-4                          | 0.982 $\pm$ 0.085              |
| 4  | 0.0076                      | 0.01022 $\pm$ 5.11E-4                        | 1.094 $\pm$ 0.092              |
| 6  | 0.0116                      | 0.01123 $\pm$ 5.61E-4                        | 1.171 $\pm$ 0.13               |
| 8  | 0.0164                      | 0.01896 $\pm$ 9.48E-4                        | 2.51 $\pm$ 0.38                |
| 10 | 0.0226                      | 0.02338 $\pm$ 0.0011                         | 3.8 $\pm$ 0.49                 |
| 12 | 0.0274                      | 0.02965 $\pm$ 0.0015                         | 4.6 $\pm$ 0.62                 |
| 14 | 0.0336                      | 0.03656 $\pm$ 0.0018                         | 5.72 $\pm$ 0.81                |
| 16 | 0.041                       | 0.04185 $\pm$ 0.0021                         | 6.03 $\pm$ 0.89                |
| 18 | 0.049                       |  |                                |

En la figura 3.1 se muestra la gráfica con los valores obtenidos de resistividad eléctrica y % de porosidad para la polea 2.



**Figura 3.1. Valores de resistividad eléctrica vs % de porosidad**

La figura 3.1 muestra los valores obtenidos de la resistividad eléctrica, en dónde se aprecia que hay una dependencia de la resistividad eléctrica con respecto al % de porosidad registrado, dichos valores se ajustan a una línea recta con una desviación estándar de 0.00191, además de una correlación obtenida por arriba del 0.98, lo que permite expresar esta relación mediante una ecuación general para una línea recta de la forma:

$$Y = mX + b \quad (3.24)$$

Si ahora tenemos que los valores de la variable dependiente en este caso la resistividad eléctrica esta representada por Y, y la variable independiente que es % de porosidad es representada como X, la expresión 3.24 para la línea recta en la que se ajustan los valores experimentales:

$$\begin{aligned} \rho &= 0.00629 X + 0.00175 & 3.25 \\ &0 \\ \rho &= 0.00175 + 0.00629 X \end{aligned}$$

La expresión 3.25 es a partir de valores experimentales, si se utiliza la aproximación de Maxwell expresada por la ecuación 3.23 para comparar con la relación de los datos experimentales obtiene:

$$\rho = 0.00175 (1 + 3.5\phi) \quad 3.26$$

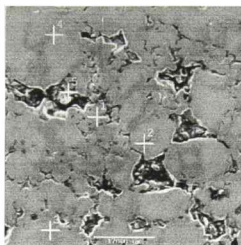
dónde:

$\rho$  = es la resistividad eléctrica del acero en unidades de  $m\Omega$ -cm

$\phi$  = fracción volumen del % de porosidad

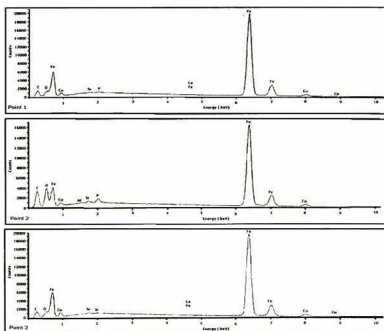
Con base en lo mostrado hasta el momento los cambios en la resistividad eléctrica pueden ser explicados si consideramos que la velocidad de flujo de electrones no para de principio a fin a través de la microestructura, en dónde si se tiene una estructura fina e interconectada, el flujo de electrones se incrementa porque hay más trayectoria directa y por tanto los valores de resistividad eléctrica son menores, por el contrario si se tiene una estructura gruesa no interconectada (debido a porosidad), dichas fases y/o poros actúan como barreras que impiden el flujo de electrones lo que provoca un incremento en la resistencia eléctrica de la pieza que se refleja en los incrementos de los valores de la resistividad eléctrica en la polea. Aunque estos incrementos no son tan marcados comparados como los registrados para el % de porosidad ya que los valores de resistividad eléctrica van del orden de 0.0068 a 0.041  $m\Omega$ -cm comparados con los valores de % de porosidad van del orden de 0.98 a 6.03% pero aún así hay variaciones de magnitud que ayudan a por medio de la técnica a detectar defectos dentro de la polea.

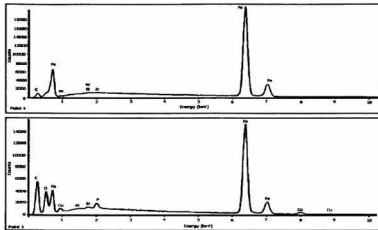
A continuación se muestra en la figura 3.2 los puntos dónde se realizó el barrido para conocer la composición química de la muestra en SEM.



**Figura 3.2** Microestructura obtenida de SEM con la ubicación de los puntos de muestro para conocer la composición química.

En la figura 3.3 se muestran los espectros obtenidos por microscopía electrónica de barrido de las 5 zonas que se marcan en la Figura 3.2.





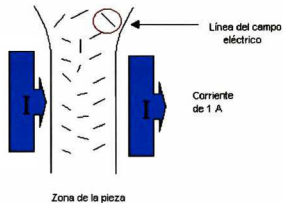
**Figura 3.3** Espectros obtenidos en el análisis químico por SEM

En la siguiente tabla se muestra el análisis químico realizado por microscopía electrónica de barrido en la muestra para el punto 4 de la figura 3.2:

**Tabla 3.5** Composición química de la polea 2

| Elemento         | % en peso | % de error |
|------------------|-----------|------------|
| <b>Aluminio</b>  | 0.70      | ±0.05      |
| <b>Fósforo</b>   | 0.13      | ±0.03      |
| <b>Fierro</b>    | 96.65     | ±0.51      |
| <b>Cobre</b>     | 2.15      | ±0.21      |
| <b>Silicio</b>   | 2.08      | ±0.03      |
| <b>Azufre</b>    | 0.03      | ±0.03      |
| <b>Manganeso</b> | 0.026     | ±0.09      |
|                  | 100 %     |            |

En la figura 3.4 se ejemplifica de forma cualitativa el tipo de diagramas de líneas de corriente que se obtuvieron para cada una de las piezas cuando se realizó el mapeo correspondiente, el procedimiento está descrito en la figura 2.7



**Figura 3.4** Esquema que ilustra el tipo de diagramas que se obtuvieron para mostrar las líneas de corriente

En dichas representaciones se muestran las variaciones en el camino que sigue el paso de electrones cuando se suministra una corriente constantemente a través de la pieza. Se hace notar que estos diagramas que a continuación se muestran son de forma cualitativa debido a que nos dan una idea del camino que sigue el flujo de electrones en las muestras, para la forma geométrica de la plega y/o características microestructurales. Por otro parte, estos resultados son cuantitativos, ya que el valor que se registró en el voltímetro para cada uno de los 8 puntos que conforman el círculo da origen a una línea dentro del mismo en la zona de interés. Los errores introducidos por efectos electro térmicos y termoeléctricos en las mediciones eléctricas de la resistividad y/o conductividad de los materiales se han reducido y/o eliminado realizando tales mediciones bajo condiciones isotérmicas para este caso en particular en donde se trabajó a una temperatura controlada de 24°C, se cambió la polaridad de la corriente aplicada a la muestra y se promediaron las medidas realizadas algebraicamente.

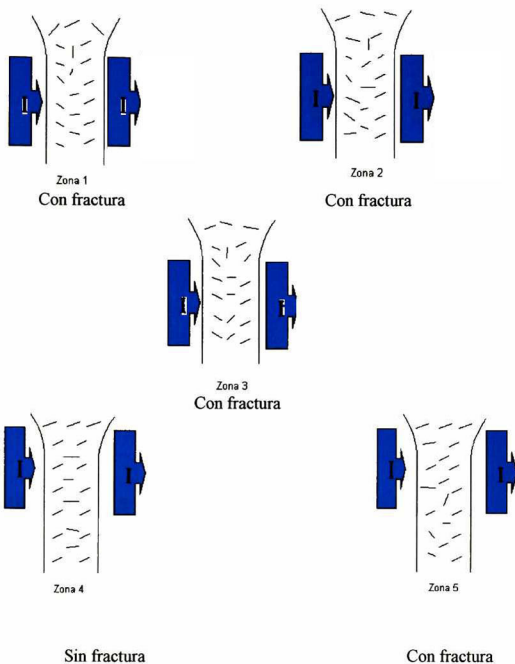
A continuación se presentan en las figuras 3.5 a la 3.8 los mapas de las líneas de corriente eléctrica. Se trazó de tal manera que el valor mayor obtenido en las lecturas para dichos puntos de los círculos se considera como la



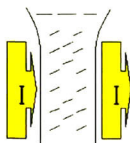
orientación que toma en el círculo esa línea al momento de ser suministrada la corriente, para este caso se suministró constantemente un amper de corriente.

Estos diagramas se realizaron para cada una de las cinco zonas que conforman la totalidad de una pieza, se practicaron dos formas diferentes de suministrar a la corriente en las piezas, una de la cuál cabe destacar sé hizo de forma paralela a la fractura que se presenta a la zona, y por otro lado la otra modalidad que se llevo a cabo fue la del suministró de la corriente en forma transversal a la fractura en la zona examinada.

Por tal razón, se muestran a continuación cada una de las zonas, además de las 2 variantes de suministro de la corriente que se realizaron.

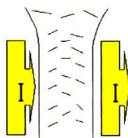


**Figura 3.5 (PIEZA 1) Mapa de líneas de corriente de la pieza cuando la corriente es suministrada paralelamente a la fractura.**



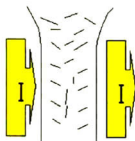
Zona 1

Sin fractura



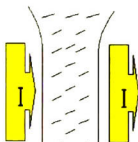
Zona 2

Con fractura



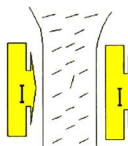
Zona 3

Con fractura



Zona 4

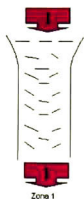
Sin fractura



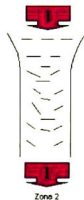
Zona 5

Con fractura

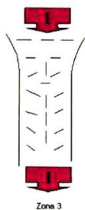
**Diagrama 3.6 (PIEZA 2) Mapa de líneas de corriente de la pieza cuando la corriente es suministrada paralelamente a la fractura.**



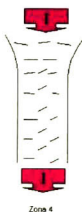
Con fractura



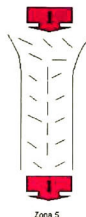
Con fractura



Con fractura

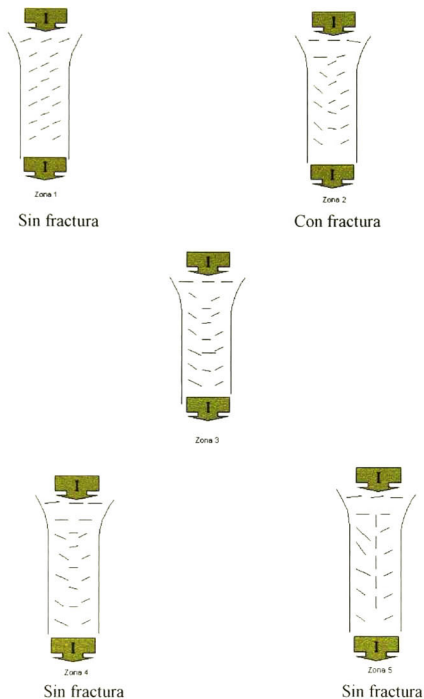


Sin fractura



Con fractura

**Diagrama3.7 (PIEZA 1) Mapa de líneas de corriente de la pieza cuando la corriente es suministrada transversalmente a la fractura.**



**Diagrama 3.8 (PIEZA 2) Mapa de líneas de corriente de la pieza cuando la corriente es suministrada transversalmente a la fractura.**

En los diagramas en las figuras 3.5 a 3.8 mostrados se puede intuir que debe existir una relación entre las desviaciones de las líneas de corriente y la estructura interna de la pieza. Se tomó como patrón de referencia para realizar las comparaciones necesarias, el diagrama de la pieza 2 y la zona 1, figura 3.6 ya que esta zona en particular, no presentó ningún tipo de fractura o fisura. La figura 3.10 ilustra como las líneas de campo generadas presentan una misma dirección a lo largo de toda la zona, siendo esta de forma inclinada y dirigida hacia el primer cuadrante si tomamos también como referencia un plano cartesiano con dos ejes X y Y para ubicarlas con más facilidad, teniéndose niveles de porosidad para la zona 1 de la pieza 2 que van del orden de 1.094 a 1.171% lo que representa un % relativamente bajo, además de poder decir que la zona se encuentra libre de fractura. Esta aseveración puede sustentarse con ayuda de las imágenes de microscopía que están dentro del mismo esquema, figura 3.10 donde además se ilustra en general la estructura que presenta la pieza en la zona, por lo tanto sirve como la base para realizar comparaciones con el resto de las zonas.

Ahora cuando la inyección de la corriente se hizo de forma transversal a la fractura, en estos diagramas se observa que las líneas de corriente no tienen el comportamiento esperado, ya que se esperaría que las líneas de flujo estuvieran orientadas de tal forma que flujo de electrones que generan las líneas de corriente mantuviera una dirección a partir del punto 1 al 4, de forma lineal o con variantes producidas por los poros se ilustra en la figura 3.7, el problema que se presume afectó la dirección que toman las líneas de flujo en el presente caso y que sorprendentemente es muy similar a aquellas cuando la corriente suministrada paralelamente a la fractura figuras 3.5 y 3.6 fue la geometría de la pieza, esto es, como la pieza tiene bordes y escalones que delimitan a la pieza junto con ello bordes irregulares y además de huecos propios del diseño, todo esto, afecta el paso del flujo de electrones que a su vez afecta al comportamiento de las líneas de corriente que pasan a través de toda la pieza; el tener malos contactos que debilitan la sujeción de los contactos en la superficie de la muestra.

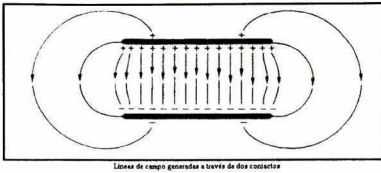


Figura 3.9. Líneas de flujo de corriente generadas en dos puntos de contacto

A continuación se muestran las imágenes que se obtuvieron, en el microscopio electrónico de barrido anexando con ellas el resultado de % de porosidad para las diferentes partes de la zona 1 de la polea 2, todas las imágenes fueron tomadas a 100x.

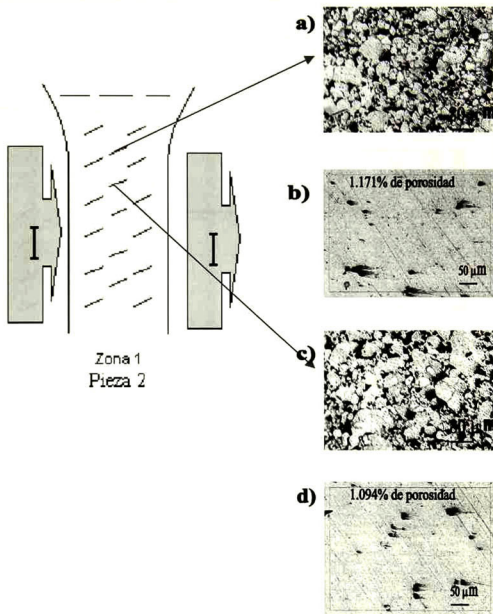


Figura 3.10 Imágenes de microscopio electrónico de barrido y % de porosidad para la pieza y zona señalada



Siguiendo el orden de las zonas a continuación se muestran los resultados de las imágenes que se obtuvieron en el microscopio electrónico de barrido anexando con ellas el resultado de % de porosidad para las diferentes partes de la zona 2 de la polea 2, todas las imágenes fueron tomadas a 100x.

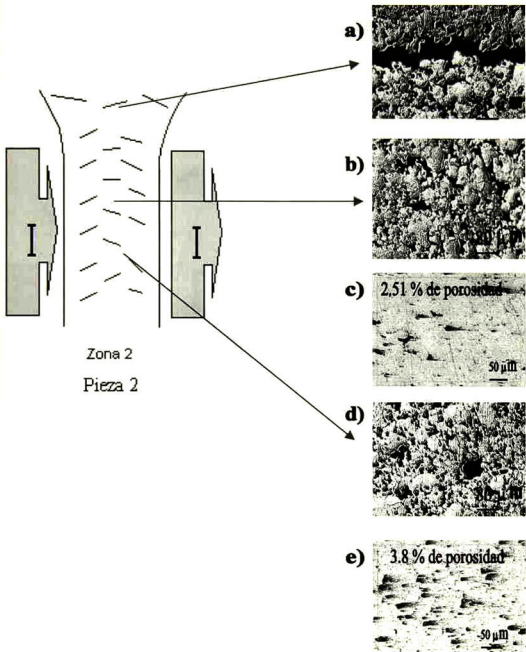
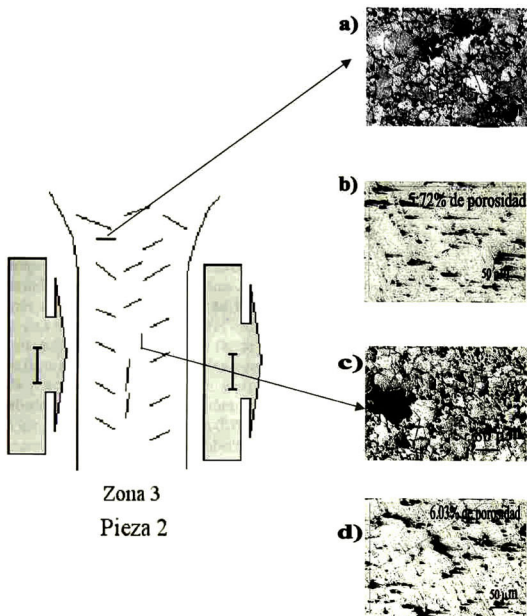


Figura 3.11 Imágenes de microscopio electrónico de barrido y % de porosidad para la pieza y zona señalada

Siguiendo un orden de las zonas ya marcadas se muestran los resultados de las imágenes que se obtuvieron en el microscopio electrónico de barrido anexando con ellas el resultado de % de porosidad para las diferentes partes de la zona 3 de la polea 2, todas las imágenes fueron tomadas a 100x.



Esquema 3.12 Imágenes de microscopio electrónico de barrido y % de porosidad para la pieza y zona señalada

Se puede observar como los esquemas presentados en las figuras 3.10 a 3.12 ilustran en forma general el comportamiento de las líneas de corriente eléctrica en el momento de que fluye a través de la pieza una corriente constante, donde hay una relación estrecha entre los niveles de porosidad presentes en las regiones y el camino que siguen las líneas de corriente eléctrica.

Como se observa en las figuras 3.11 y 3.12 hay una relación entre las desviaciones de las líneas de corriente, la geometría y estructura interna del material, como son características microestructurales (específicamente % de porosidad) que presentan las zonas examinadas de la pieza, ya que estas distorsiones en las líneas de flujo que se observaron en los anteriores diagramas figura 3.11 y 3.12, están concatenados a porosidad y el porcentaje de este en las diferentes áreas. Los porcentos de porosidad evaluados oscilan de 1.09 hasta 6.03%, hay recalcar que estos niveles se encontraron cuando las líneas del campo eléctrico tienen diferentes direcciones en los diagramas mencionados.

Así en la zona 2 presentada en la figura 3.11 se aprecia que las líneas empiezan a tomar diferentes direcciones dentro la misma zona, con respecto a aquellas mostradas en la figura 3.10, esto se atribuye a niveles de porosidad más altos como se muestra en los incisos c) y e) de la figura 3.11, aquí se tienen niveles de porosidad del orden de 2.51 a 3.81% de esta manera se tiene una diferencia de más, de un factor, de 2 ó 3, con respecto al inciso b) y d) de la figura 3.10. Por otra parte se puede apreciar como la fractura corre a través de porosidad interconectada, inciso a) de la figura 3.11. Además, se puede observar que las microestructuras de la figura 3.11 son diferentes con respecto a las presentadas en la figura 3.10, ya que se aprecian más poros; por ejemplo cuando se tiene la posición horizontal, de la línea de flujo de la figura 3.11. el % de porosidad es de 2.51. Así la microestructura empieza ha mostrar poros los que presumiblemente impiden el paso de la corriente eléctrica. En el inciso d) de la figura 3.11 se observa como hay más poros presentes dentro de la microestructura, 3.8% de porosidad.

Por último, para la zona 3 de la figura 3.12, de la misma pieza se observa como las líneas de corriente también adquieren diferentes posiciones, por un lado se tiene una línea totalmente vertical que corresponde a un % de porosidad de 6.03% él más alto registrado, además con la microestructura mostrada en el inciso c) de la figura 3.12 dónde se ven más grandes los límites de grano conteniendo a poros mucho más grandes con respecto a las microestructuras mostradas en la figura 3.10 y 3.11, junto con el inciso a) donde la dirección es de forma inclinada dónde también el nivel de porosidad es alto, de 5.72%.

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES

A partir a partir de los resultados obtenidos basados con la técnica de los 4 puntos (con arreglo colineal en algunos casos con un arreglo circular) en el presente trabajo, se puede concluir:

1. La existencia de una relación lineal entre la resistividad eléctrica y % de porosidad en las piezas, en dónde la resistividad eléctrica de la pieza; funge como una variable dependiente y % de porosidad como la variable independiente para este caso, representada por la expresión:  $\rho = 0.00175 + 0.00629 X$
2. Esta técnica mostró ser sensible a los cambios de microestructura o presencia de fisura o fractura a través de cambios en resistividad eléctrica en la pieza.
3. Dichos cambios microestructurales en el presente trabajo, fueron relacionados al % porosidad determinados a través de análisis realizado en el microscopio electrónico de barrido y analizador de imágenes.
4. Estos análisis no revelaron otra característica microestructural que pudiera ser contemplada como otra variable que afecte las mediciones esto es, no se encontraron interméticos o segregación

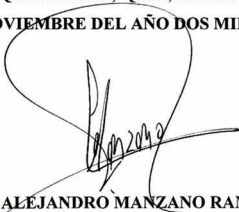
5. Con base en lo indicado hasta el momento los cambios en la resistividad eléctrica pueden ser explicados si consideramos que la velocidad de flujo de electrones no para de principio a fin a través de la microestructura, en dónde se tiene una estructura fina e interconectada, el flujo de electrones se incrementa porque hay más trayectoria directa y por tanto los valores de resistividad eléctrica son menores, por el contrario si se tiene una estructura gruesa no interconectada (debido a porosidad), dichas fases y/o poros actúan como barreras que impiden el flujo de electrones lo que provoca un incremento en la resistencia eléctrica de la pieza y/o disminución de conductividad eléctrica que se refleja en los incrementos de los valores de la resistividad eléctrica en la polea.
6. Cuando la corriente eléctrica fue suministrada en la polea en forma paralela o transversal a la fractura o fisura y con el barrido de las diferentes zonas que componen a la pieza, los mapas construidos mostraron como se comportan y modifican las líneas del flujo de corriente debido a características microestructurales (% de porosidad).
7. Con base en las conclusiones anteriores se infiere que es factible emplear la técnica de los 4 puntos a través del arreglo en forma colineal y en forma circular para conocer los valores de resistividad eléctrica como también a través de esto inferir % de porosidad en la polea además de poderse emplear como una técnica no destructiva y económica en el proceso de calidad dentro de la industria de SINTERSTAHL. Adicionalmente los valores reportados mostraron reproducibilidad.

## BIBLIOGRAFIA

1. Nava, E., Manzano-Ramírez, A. and Beech, J., Electrical Resistivity as a possible destructive technique to assess grain size in aluminium and its alloys., Archives of metallurgy., 1993:38:89.
2. Mulazimoglu, M.H., and Gruzleski, J.E., Electrical Conductivity in Aluminum Possible Alternativa to Thermal Analysis ., Modern Casting.1990:80:29.
3. Manzano-Ramírez, A. Nava-Vazquez E., and Gonzalez-Hernández, J., Electrical Conductivity and Microestructure of Aluminum Alloys., Metallurgical Transactions A., 1993:24A:2355.
4. Avner., *“Introducción a la Metalurgia Física”*,1988.,Segunda edición.,Mc Graw Hill ., México, D.F.
5. Mulazimoglu, M.H., Drew, R.A.L., and Gruzleski, J.E.,The effect of Strontium on the Electrical Resistivity and Conductivity of Aluminum-Silicon Alloys., Metallurgical Transactions A., 1987:18<sup>a</sup>:941
6. Oger, H.,Closset, B.,and Gruzleski, J.E.,Characterization of the Eutectic Microstructure in Al-Si Foundry Alloys by Electrical Resistivity.,AFS Transaction.,1983:19:17
7. Mulazimoglu, M.H., Drew, R.A.L., and Gruzleski, J.E.,The Electrical Conductivity of Cast Al-Si Alloys in the range 2 to 12.6 Wt Pct Silicon., Metallurgical Transactions A.,1989:20<sup>a</sup>:383
8. Closset, B., Pirie, K., and Gruzleski, J.E.,Comparison of Thermal Analysis and Electrical Resistivity in Microstructure Evaluation of Al-Si Foundry Alloys., AFS Transaction.,1984:92:123
9. Rosen, M.,Eddy Current Analysis of Precipitation Kinetics in Aluminum Alloys., Metallurgical Transactions A.,1989:20<sup>a</sup>:605.
10. Drew, R.A.L., Muir, W.B.,and Williams, W.M., Differential Resistivity Measurement for Monitoring Annealing. Metallurgical Transactions A.,1983:14<sup>a</sup>:175
11. Argo, D., Drew, R.A.L., and Gruzleski, J.E.,A Simple Electrical Conductivity Technique for Measurement of Modification and Dendrite Arm Spacing in Al-Si Alloys., AFS Transaction.,1987:95:455
12. Nava, E., Manzano-Ramírez, A. and Beech, J.,Electrical Resistivity as a possible non destructive technique to assess grain size in aluminium and its alloys., Archives of metallurgy., 1993:38:89
13. Wieder, H.H., **Laboratory notes on electrical and galvanomagnetic measurements**, Resistivity and Conductivity., Mc.Graw Hill.,1979:1:35

14. Duffin, W.J., **Electrical and Magnetism**. Resistivity and Conductivity. 1980., Third Edition., Mc Graw Hill., Great Britain.
15. Askeland, Donald R., "**Ciencia e Ingeniería de los Materiales**", Comportamiento eléctrico de los materiales., 1998., Tercera Edición., International Thomson Editores., México, D.F.
16. Resnick, R., and Halliday, D., "**Física**", La corriente y la resistencia Vol. 1., 1987., 4ª Edición. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México, D.F.
17. Purcell, E.M. **Electricity and Magnetism**. Electric Currents. Berkeley Physics. Vol., 2. Second Edition. Mc Graw Hill.
18. Ohring, M., **The materials science of thin films.**, Electrical and Properties of thin films., 2ª Edition. Academic Press, 1990:451:455.
19. Herrero, P., y Baró, A., **Introducción a la ciencia de materiales.**, Microscopía óptica, electrónica y por efecto túnel., Consejo Superior de Investigación Científica., Madrid, España., 1993:555.
20. BUEHLER., Manejo del analizador de imágenes., BUEHLER and OMNIMET., Illinois, USA., 1989:10
21. Sellars, C.M. Quantitative Metallography. Universidad de Sheffield. Department of Metallurgy. Inglaterra, 1986
22. Progelhof, R.C., Throne, J.L., and Ruetsch, R.R. Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems. Polymer Engineering and Science, 1976:16:9


**EL JURADO DESIGNADO POR LA UNIDAD QUERETARO DEL CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL, APROBO LA TESIS DE LA SRITA. MARTHA ELVA PEREZ RAMOS, BAJO EL TITULO: "Evaluación microestructural de piezas fabricadas por metalurgia de polvos, a través de mediciones de resistividad y/o resistencia eléctrica", FIRMAN AL CALCE DE COMUN ACUERDO LOS INTEGRANTES DE DICHO JURADO, EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE QUERETARO, QRO., A LOS DIECISIETE DIAS DEL MES DE NOVIEMBRE DEL AÑO DOS MIL.**



**DR. ALEJANDRO MANZANO RAMIREZ**



**DR. JOSE MARTIN YAÑEZ LIMON**



**DR. FRANCISCO JAVIER ESPINOZA BELTRAN**





CINVESTAV  
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000003789