

**ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA Y SU  
CORRELACIÓN CON LOS VALORES DE MICRODUREZA EN UNIONES  
SOLDADAS DE ACERO SAE 8620.**



**JAIME DAVID MARTÍNEZ GARCÍA  
CÓDIGO: 20151375019  
NELSON ENRIQUE CARDOSO LEÓN  
CÓDIGO: 20151375020**

**TUTOR: Ing. LUIS HERNANDO CORREA MURILLO**

**Propuesta Anteproyecto**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD TECNOLÓGICA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ  
2016**

## TABLA DE CONTENIDO

1. TÍTULO.....	5
2. INTRODUCCIÓN.....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
4. ESTADO DEL ARTE .....	6
5. JUSTIFICACIÓN.....	11
6. OBJETIVOS.....	11
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	12
8. METODOLOGÍA.....	23
9. CRONOGRAMA .....	24
10. PRESUPUESTO Y FINES DE FINANCIACIÓN .....	24
11. BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA.....	26



## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1; Superficie morfológica de una película anódica formada en diferentes tiempos de anodizado.....	9
Ilustración 2; Correlación entre la microdureza y el esfuerzo de fluencia.....	10
Ilustración 3; Gráfica de Templabilidad del Acero SAE 8620 (Escala Rockwell C). .....	14
Ilustración 4; Nucleación Homogénea.....	17
Ilustración 5; Nucleación Heterogénea.....	18
Ilustración 6; Granos y Zona Blanda .....	18
Ilustración 7; Carta con Tamaño Real de Granos. ....	20
Ilustración 8; Granos Equiaxiales y Columnares. ....	21



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1; Cronograma. ....	24
Tabla 2; Recursos Económicos.....	25



## 1. Título

**Estudio de la variación de la microestructura y su correlación con los valores de microdureza en uniones soldadas de acero SAE 8620.**

## 2. Introducción

En el proyecto “IDENTIFICACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FERRITA PROEUTECTOIDE EN UNIONES SOLDADAS DE ACERO SAE 8620” se realizó un estudio de la aleación de Fe-C, encontrando un conjunto de microconstituyentes que dan ciertas propiedades físicas y mecánicas al material.

Implementando las muestras soldadas del anterior proyecto, se pretende abordar la variación de las microestructuras resultantes de los tratamientos térmicos llevados a cabo, los cuales fueron: normalizado, recocido, temple en agua y temple en aceite.

A lo largo de este proceso, las muestras soldadas presentan cambios en su microestructura debido al tipo de enfriamiento. Así pues, cada unión presentará una recristalización diferente, reflejada en el crecimiento de grano equiaxial, columnar y/o dendrítico.

Dependiendo de la configuración que tome cada pieza se van a presentar las variaciones de la microdureza, que serán evaluadas por medio de un análisis estadístico basado en Índices de Capacidad de Proceso.

Las diferencias entre microestructuras serán verificadas a partir de la toma de imágenes guiadas por Microscopio Electrónico de Barrido y Microscopio Óptico.

Con esto en mente, la siguiente propuesta se fundamenta en la evaluación de microestructuras y su correlación con la microdureza presentes en muestras soldadas de acero SAE 8620, por medio de un análisis estadístico.

Paralelamente, debemos tener en cuenta que el material a trabajar, SAE 8620, es clasificado por la ASM (Sociedad Americana de Materiales) como un “acero tratable de baja aleación” (HTLA)<sup>1</sup> y posee una amplia gama de aplicaciones a nivel industrial, aspectos que nos permiten garantizar el reconocimiento y la efectividad de los resultados de nuestros estudios.

---

<sup>1</sup> COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS S.A. *Ficha Técnica SAE 8620, Acero para cementación de alta resistencia*. 2012. En: **Google**. Consultado el domingo, 22 de abril de 2012. Versión HTML del archivo: [http://www.cga.com.co/index.php?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=104](http://www.cga.com.co/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=104)



### **3. Planteamiento del Problema**

El proceso de diagnóstico del problema se generó a partir del transcurso de la investigación que se llevó a cabo con respecto a procesos de solidificación y crecimiento de grano, vinculando la microestructura presente en cada una de las muestras de SAE 8620 que cuentan con tratamiento térmico. Luego, la delimitación del asunto que hay que resolver, se centró en la evaluación de microdureza y su relación con las diversas zonas afectadas por el calor en la unión soldada.

Nos vemos en la necesidad de estudiar las características de estas propiedades micro, resaltando la importancia y particularidad que desarrollan las diferentes morfologías del material en cada caso.

A pesar de las investigaciones realizadas previamente, enfocadas en este tema, se descubre un nivel bajo de información con respecto a estos tipos de análisis de variación de microestructuras y microdureza en el acero SAE 8620, específicamente.

Al respecto, conviene decir, que el diagnóstico se constituye al observar éste tipo de acero como un material muy utilizado en nuestra Facultad Tecnológica, Universidades y en la Industria; e igualmente nos permite abrir las puertas para definir y presentar un análisis estadístico, por medio de unos resultados de imágenes microscópicas, toma de durezas y un proceso de estudio, lógico y coherente, tras la aplicación de temple, recocido y normalizado en las uniones soldadas.

### **4. Estado del Arte**

En esta investigación se busca hallar la variación de la microestructura y su correlación con los valores de microdureza en uniones soldadas de acero SAE 8620. No existe actualmente un estudio específico que aborde todos los aspectos que el grupo de trabajo desea desarrollar. Por tanto, se consultan diversos trabajos y tesis de diferentes profesionales en donde se despliega parte de la evolución y panorama actual de los aspectos a investigar.

En los documentos que fueron tomados como referencia, se exponen estudios acerca de la microestructura y la microdureza de diferentes materiales, así mismo, cómo es su variación con respecto a tratamientos ejecutados en las muestras. Además de esto, se tienen en cuenta estudios estadísticos relacionados con la microestructura y determinación de la microdureza.



Uno de los inconvenientes presentados es la falta de trabajos que se relacionen directamente con la variación de la microestructura y su correlación con la microdureza, debido a que principalmente esta reciprocidad varía significativamente para cada material; adicionalmente, el estudio de la correlación entre microestructura y microdureza es un análisis relativamente novedoso y se ha venido trabajando en su desarrollo con un intervalo corto de tiempo.

Cabe resaltar que es necesario el uso de un software estadístico para la elaboración de esta investigación. De igual manera, la implementación de un Microscopio Electrónico de Barrido para poder determinar la manera en la cual son afectadas cada una de las muestras.

Elaborando una síntesis de los artículos investigados, tenemos lo siguiente:

### 1. STUDY OF STEEL-COPPER PSEUDO ALLOY MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS AFTER LASER HEAT TREATMENT.

**Autores:** V. G. Gilev, N. V. Bezmaternykh, and E. A. Morozov.

**Publicación:** Translated from *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, No. 5, pp. 34 – 40, May, 2014.

- En esta investigación se obtienen resultados para un estudio de la microestructura y microdureza de una capa de polvo de acero - cobre en una pseudo aleación después de un tratamiento térmico de láser. Con un láser de fibra de 1 kW de poder se busca predecir estadísticamente la reacción de la pseudo aleación tras ser sometida a un tratamiento térmico con un láser apuntado a diferentes longitudes de onda y frecuencias.

### 2. EFFECTS OF NANO-STRUCTURED PARTICLES ON MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS OF SN-AG SOLDER ALLOY.

**Autores:** F. Tai, F. Guo, Z. D. Xia, Y. P. Lei , Y. W. Shi

**Publicación:** 17 September 2009/Published Springer. Science+Business

- Esta investigación se realizó con partículas nanoestructuradas de forma Poliédrica Oligomérica Silsesquioxano, conocida como POSS. Estas partículas fueron incorporados en pasta de soldadura eutéctica Sn-3.5Ag, mezclándolas mecánicamente para formar la soldadura libre de plomo compuesta. Los efectos de las nanoestructuras adicionadas en el POSS y las propiedades mecánicas de las aleaciones de soldadura compuesta, se investigaron de forma sistemática.

Los resultados experimentales indicaron que el tamaño medio, distancia de separación de compuestos intermetálicos Ag<sub>3</sub>Sn (IMC) en la matriz de soldadura compuesta, disminuyó en comparación a la soldadura eutéctica



Sn-3.5Ag. El porcentaje en peso de adición de tres partículas de POSS nanoestructuradas podrían mejorar la microdureza de la soldadura compuesta por un 18,4% en comparación con la matriz de soldadura eutéctica Sn-3.5Ag. La media tamaño de grano y la distancia de separación de los IMC en Ag<sub>3</sub>Sn Sn-Ag3% en peso de POSS matriz compuesta de soldadura reduce 0,35-0,23  $\mu\text{m}$  y 0,54-0,32  $\mu\text{m}$ , respectivamente. El refinado Ag<sub>3</sub>Sn IMC, que actúa como un refuerzo de fase en la matriz de soldadura, podría mejorar la microdureza de las soldaduras compuestos.

### 3. CORRELATION BETWEEN MICROHARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF ANODIC FILM ON 2024 ALUMINUM ALLOY.

**Autores:** ZHANG Pei<sup>1</sup>, ZUO Yu<sup>1</sup>, ZHAO Xuhui<sup>1</sup>, TANG Yuming<sup>1</sup>, ZHANG Xiaofeng<sup>1</sup>

**Publicacion:** *University of Chemical Technology, Beijing 2014*

- La correlación entre la de microdureza y la microestructura de una capa anódica en una aleación de aluminio 2024 formada por la mezcla del ácido sulfúrico y ácido oxálico sulfúrico se estudió utilizando un tester de micro-dureza y un microscopio electrónico de barrido (SEM). Los resultados muestran que la microdureza de la película anódica es influenciada por la microestructura de la película anódica debido a la porosidad del material, además de que el orden y la continuidad de las células columnares hexagonales tiene a aumentar.

Con la misma densidad de la capa anódica, espesor y con el tiempo de anodizado, la microdureza aumenta debido a la porosidad decrece y el orden además de la continuidad de las células también se mejoran.

Bajo la condición del mismo tiempo de anodizado como la densidad aumenta, la microdureza de la película disminuye debido a la mayor porosidad además de esto el orden de las células y la continuidad disminuyen. La porosidad de la película aumenta debido a que el aumento de la densidad puede acelerar la reacción de oxidación.





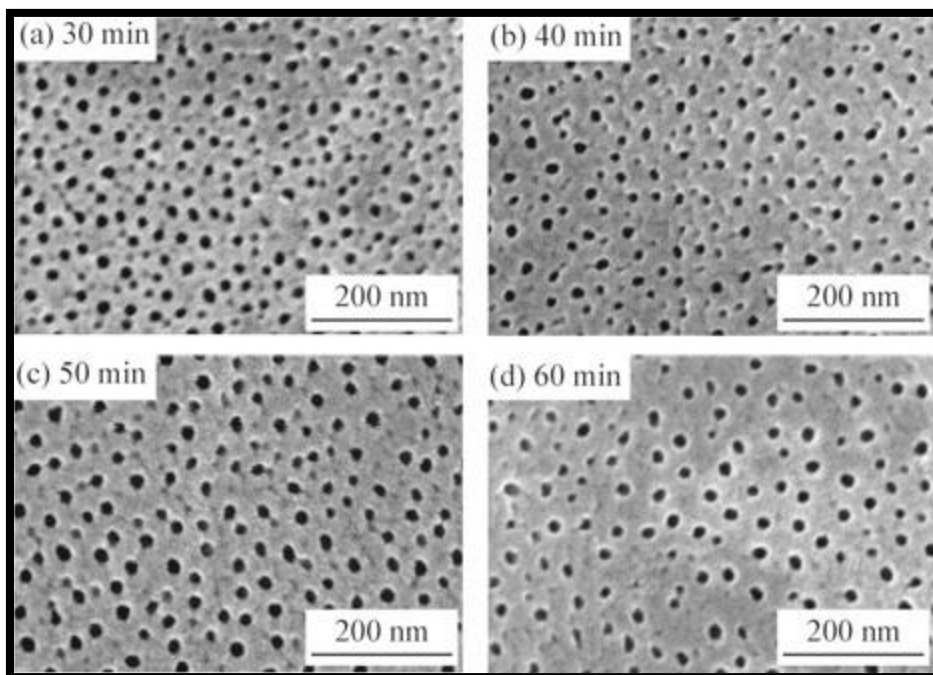


Ilustración 1; Superficie morfológica de una película anódica formada en diferentes tiempos de anodizado tomado del trabajo **CORRELATION BETWEEN MICROHARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF ANODIC FILM ON 2024 ALUMINUM ALLOY**.

#### 4. MICROSTRUCTURE OF BULK CRYSTALLIZED LINEAR POLYETHYLENE: CORRELATION OF MICROHARDNESS AND YIELD.

**Autores:** F. J. BALT, CALLEJA, L. GIRI.

**Publicación:** *Instituto de Estructura de la Materia, CSIC, Serrano*

- En esta investigación se estudió el efecto del peso molecular sobre el comportamiento y rendimiento de la microdureza por medio de la fusión y el recristalizado del polietileno con esto se determinó La influencia de las condiciones de cristalización en las propiedades mecánicas pero más a profundidad la en la microdureza Se muestra la relación de Tabor entre microdureza y la tensión de fluencia en donde los valores de microdureza son determinados a partir de estudios estadísticos.



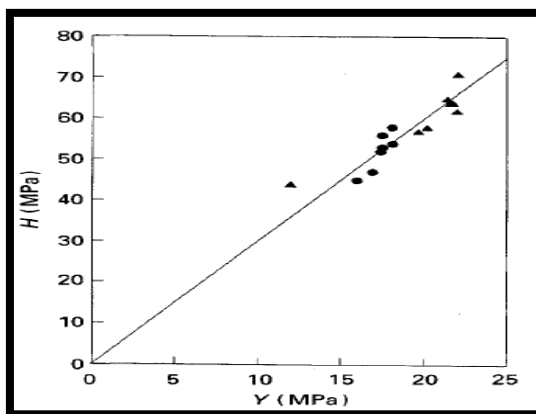


Ilustración 2; Correlación entre la microdureza y el esfuerzo de fluencia tomado del trabajo **MICROSTRUCTURE OF BULK CRYSTALLIZED LINEAR POLYETHYLENE: CORRELATION OF MICROHARDNESS AND YIELD.**

Cabe resaltar que de este estudio no tiene como eje central la correlación entre la microestructura con la microdureza, en la investigación si se aborda el tema pero no con la profundidad que en nuestra investigación se llevara a cabo. Lo que más nos interesa de esta investigación es el estudio estadístico realizado.

## 5. STRENGTH-HARDNESS STATISTICAL CORRELATION IN API X65 STEEL

**Autores:** S.H. Hashemi

**Publicacion:** Department of Mechanical Engineering, The University of Birjand.

- En esta investigación, los datos de dureza Vickers de 100 tubos de prueba (API X65) se utilizaron para derivar la correlación estadística entre fuerza y dureza. En primer lugar, se midieron los datos de dureza en diferentes subzonas de soldadura de metal (es decir, soldadura, ZAC, y el metal base). También se obtuvo el valor de las propiedades de tracción de la soldadura.

Las soldaduras se midieron en tiras planas de tracción. El mínimo, máximo, media y estándar desviación de los datos de ensayo se calcula entonces por la variación estadística y la diferencia de valor medio en cada zona de prueba. Todos los datos de prueba fueron descritas por la función de densidad de probabilidad (PDF), y las zonas con la mayor Se determinó la varianza. Se demostró que los datos de dureza se podrían usar para la predicción de resistencia a la fluencia en APIX65 acero con una precisión razonable.



La determinación precisa de límite de elasticidad de un tubo en acero API x65 (como una indicación de la resistencia del material al colapso del plástico) es de gran importancia para los ingenieros de tuberías.

## **5. Justificación**

El presente proyecto se convierte en la principal herramienta para exponer aquellos conocimientos adquiridos en el desarrollo de la carrera de Ingeniería Mecánica; enfocando la investigación en el campo de los tratamientos térmicos, el estudio de los microconstituyentes, microestructuras y propiedades de un material ampliamente utilizado en nuestra área.

El análisis de las microestructuras y sus propiedades presentes, se constituye en un campo de estudio que refleja innovación, teniendo en cuenta las características con respecto al tipo de uniones soldadas que se van a trabajar y los tipos de imágenes que se van a realizar; de la misma manera, permite abrir las puertas para generar nuevas investigaciones inclinadas en este ámbito, no solamente en aceros con bajo contenido de carbono sino en otro tipo de materiales metálicos o aceros con diferentes propiedades.

Además, las herramientas y equipos que se van a implementar, permiten identificar procesos y morfologías metalográficas, que centran nuestro interés por el análisis que se va a llevar a cabo. De esta circunstancia, nace el hecho de profundizar con respecto a nuevas tecnologías y métodos de observación de microconstituyentes del acero.

## **6. Objetivos**

### **6.1 Objetivo General**

Evaluar la variación de la microestructura y su correlación con los valores de microdureza en uniones soldadas por fusión de arco eléctrico en acero SAE 8620.

### **6.2 Objetivos Específicos**

- Preparar un conjunto de muestras de acero SAE 8620 soldadas homogéneamente por fusión de arco eléctrico mediante electrodos E6013, tomadas del proyecto: *“IDENTIFICACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FERRITA PROEUTECTOIDE EN UNIONES SOLDADAS DE ACERO SAE 8620”*.



- Efectuar ensayos de dureza y microdureza en las uniones soldadas de acero SAE 8620, analizando la manera en que afectan los cambios de la microestructura a los valores de la microdureza y determinando los motivos de su correlación.
- Realizar un estudio por medio de un análisis estadístico presentando la relación de la microdureza con los cambios microestructurales en las diferentes zonas de las muestras soldadas, basados en la toma de resultados de los ensayos de dureza y microdureza.
- Determinar las causas de aparición y formación de microestructuras en las uniones soldadas de acero SAE 8620, mediante la observación por microscopía óptica y de barrido electrónico.
- Identificar la influencia de las variables manejadas en el proceso de soldadura para la aparición de dichas estructuras en las muestras soldadas.

## **7. Marco Teórico y Conceptual**

### **7.1 Introducción**

En el presente capítulo se pretende abordar la revisión bibliográfica que se construyó tras la investigación referente al acero, las características y propiedades mecánicas del SAE 8620 y las microestructuras resultantes de los tratamientos térmicos llevados a cabo (normalizado, recocido, temple en agua y temple en aceite).

A lo largo de este proceso, las muestras soldadas presentan cambios en su microestructura debido al tipo de enfriamiento. Así pues, cada unión presentara una recristalización diferente, reflejada en el crecimiento de grano equiaxial, columnar y/o dendrítico.

Dependiendo de la configuración que tome cada pieza se van a presentar las variaciones de la microdureza, que serán evaluadas por medio de un análisis estadístico basado en Índices de Capacidad de Proceso.

Las diferencias entre microestructuras serán verificadas a partir de la toma de imágenes guiadas por MEB.



## 7.2 Aceros

Este proyecto se fundamenta en este material de gran importancia en la ingeniería. Primero debemos diferenciar entre un metal ferroso y uno no ferroso; como su nombre lo indica, depende del contenido de hierro (Fe) en su composición. De aquí, tenemos en cuenta que vamos a trabajar con una aleación o mezcla de un material ferroso.

Las aleaciones hierro-carbono (Fe-C) con menos de 1,7 por 100 de carbono son forjables y se denominan aceros; los aceros, además de poderse forjar, se pueden también soldar con más o menos dificultad y la mayoría de ellos pueden templarse, siendo frecuente llamar hierros a los que no se templan por tener poco carbono, si bien lo correcto es llamarlos aceros con el calificativo que les corresponda.<sup>2</sup>

## 7.3 Datos Técnicos del Acero SAE 8620

El material que va a ser objeto de estudio es un acero aleado al cromo-níquel-molibdeno para cementación de aceptable templabilidad. Cementado y templado ofrece una buena dureza superficial y gran tenacidad en el núcleo. Presenta una dureza uniforme o ausencia de zonas blandas en la capa cementada y baja distorsión después de algún tratamiento térmico. La presencia de níquel y molibdeno juega un papel definitivo en el balance de todas las propiedades que presenta este material y su efecto cobra mayor importancia con el aumento del tamaño de la pieza.<sup>3</sup>

Los componentes de esta aleación, con los respectivos porcentajes de límites de composición química, se presentan a continuación:

Acero	C %	Mn %	P %	S %	Si %	Ni %	Cr %	Mo %
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.040	0.040	0.20-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25

Tabla 1. Composición Química con porcentajes de análisis típico.<sup>4</sup>

La curva de templabilidad para este acero es la siguiente:

<sup>2</sup> PARETO, Luis. *Fundamentos de Mecánica*. Tercera Edición. Ediciones CEAC SA. España, 1985. Página: 458.

<sup>3</sup> COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS S.A. *Ficha Técnica SAE 8620, Acero para cementación de alta resistencia*. 2012. En: **Google**. Consultado el domingo, 22 de abril de 2012. Versión HTML del archivo: [http://www.cga.com.co/index.php?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=104](http://www.cga.com.co/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=104)

<sup>4</sup> AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Metal Handbook*. Volume: Properties and Selection of Metals. Eighth Edition. Unites States, 1961. Page: 61.



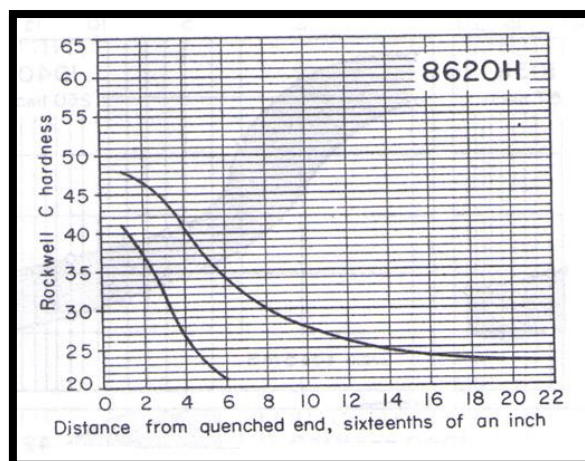


Ilustración 3; Gráfica de Templabilidad del Acero SAE 8620 (Escala Rockwell C).<sup>5</sup>

En términos de maquinabilidad, posee una viruta dura y continua. Cuando este material es utilizado en condiciones de normalizado, su mecanizado se incrementa en un 10%, para la mayoría de las operaciones.

Aunque es clasificado como un acero HTLA, el contenido de carbono de 0,20% del 8620 lo hace un acero menos susceptible al agrietamiento por soldadura que los aceros de alto contenido de carbono del mismo grupo HTLA tales como 4140 y 4340. Sin embargo, la ASM recomienda que se realice un precalentamiento a una temperatura entre pases de 150 a 200°C para espesores entre 25 y 50 mm seguido de un alivio de tensiones post soldadura (frecuentemente entre 10 a 40°C por debajo de la última temperatura de revenido). Inmediatamente después del proceso, la región soldada puede llevarse a la temperatura de alivio de tensiones, con una permanencia de una hora por cada 25 mm de espesor. Una demora entre el proceso de soldadura y el alivio de tensiones puede colocar en riesgo de agrietamiento a la muestra. El acero puede ser soldado fácilmente por procesos de gas o de arco.<sup>6</sup>

Este material ferroso, se utiliza generalmente para la fabricación de ejes ranurados, pasadores de pistón, bujes, piñones para cajas de transmisión de automotores, cigüeñales, barras de torsión, cuerpos de válvulas, herramientas manuales, tornillos, tuercas, tornillos sin fin, engranajes para reductores, pasadores, collares de cojinetes, etc.<sup>7</sup> En fin, como podemos analizar son demasiados aspectos industriales que abarca el acero SAE 8620.

<sup>5</sup> AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Metal Handbook*. Volume: Properties and Selection of Metals. Eighth Edition. Unites States, 1961. Page: 214.

<sup>6</sup> COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS S.A. *Ficha Técnica SAE 8620, Acero para cementación de alta resistencia*. 2012. En: **Google**. Consultado el domingo, 22 de abril de 2012. Versión HTML del archivo: [http://www.cga.com.co/index.php?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=104](http://www.cga.com.co/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=104)

<sup>7</sup> COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS S.A. *Ficha Técnica SAE 8620, Acero para cementación de alta resistencia*. 2012. En: **Google**. Consultado el domingo, 22 de abril de 2012. Versión HTML del archivo: [http://www.cga.com.co/index.php?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=104](http://www.cga.com.co/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=104)



## 7.4 Tratamientos Térmicos

Estos procedimientos consisten en calentar la pieza hasta una temperatura determinada y enfriarla a una velocidad adecuada para modificar su estructura, dándole unas características distintas a las que tenía antes del tratamiento. Como se ha mencionado con anterioridad, para el desarrollo del presente proyecto se enfatizará en la ejecución de solamente tres procesos de tratamientos térmicos, los cuales serán descritos a continuación:

### 7.4.1 Recocido

Se efectúa calentando la pieza uniformemente dentro de un horno a una temperatura de 25 a 50°C por encima de la temperatura crítica A3, en los aceros hipoeutectoides ( $C < 0,89\%$ ). Se debe tener precaución para no sobrepasarse de dichas temperaturas, porque se pueden obtener granos demasiado grandes, perdiendo tenacidad y pudiendo llegar a quemar el acero.

Las piezas se mantienen a la temperatura debida sólo el tiempo necesario para que el material adquiriera una temperatura uniforme, puesto que, al prolongarse innecesariamente la operación, se producen unos efectos parecidos al recalentamiento.

Transcurrido el tiempo de calentamiento se deja enfriar al aire para aquellos aceros de bajo contenido de carbono, como el que será implementado en nuestra investigación.

Los efectos del recocido son: la eliminación de tensiones interiores y de la acritud de las piezas sometidas a tratamiento mecánico, la regeneración de los aceros recalentados (los quemados no pueden regenerarse), la eliminación de los efectos del temple y la obtención de la estructura adecuada para los tratamientos posteriores.<sup>8</sup>

### 7.4.2 Normalizado

Es un recocido a una temperatura algo más elevada y enfriado al aire, que se efectúa generalmente en los aceros para darles una estructura de grano fino y uniforme y mejorar sus propiedades mecánicas.<sup>9</sup>

---

<sup>8</sup> PARETO, Luis. *Fundamentos de Mecánica*. Tercera Edición. Ediciones CEAC SA. España, 1985. Página: 460.

<sup>9</sup> PARETO, Luis. *Fundamentos de Mecánica*. Tercera Edición. Ediciones CEAC SA. España, 1985. Página: 460.



### 7.4.3 Temple

Consiste en calentar el material un poco por encima de la temperatura crítica A3 (911°C), mantenerla el tiempo necesario y preciso para que sea uniforme en toda la pieza y enfriarla rápida y uniformemente en agua, aceite o cualquier líquido que reúna las condiciones necesarias para enfriarlo en el tiempo preciso.

En los aceros hipoeutectoides, debemos tener cuidado, ya que al calentarse por encima de los 911°C se obtiene una solución sólida llamada austenita, que al enfriarse rápidamente se transforma en martensita, que es una estructura de cristales en forma de lanza, que es muy dura, no teniendo tiempo de formarse los cristales de ferrita (muy blandos) ni la perlita; junto con la martensita aparecen cristales de austenita que no han tenido tiempo de transformarse, y de troostita que es la transformación que sufre la martensita cuando se enfría demasiado lentamente.

Otro grado de transformación de la austenita, antes de convertirse en perlita, es la sorbita que parece en los recocidos que se enfrían demasiado rápidamente.

La escala de dureza de las distintas estructuras cristalinas del acero es la siguiente, de mayor a menor: cementita, martensita, austenita, troostita, sorbita, perlita y ferrita, por lo que con el temple el acero pasa de una estructura menos dura a otra de mayor dureza, aumentando su carga de rotura y su límite elástico, en tanto que disminuye su alargamiento, estricción y resiliencia.<sup>10</sup>

### 7.5 Proceso de solidificación en metales

La gran mayoría de metales para poder generar productos requieren de un proceso de extracción (minerales), derretirlo para que fluya por gravedad a un molde en el cual este se enfría y solidifica. Este proceso de solidificación es diferente si el caso es el de un metal puro o el de una aleación, como será explicado más adelante.

---

<sup>10</sup> PARETO, Luis. *Fundamentos de Mecánica*. Tercera Edición. Ediciones CEAC SA. España, 1985. Página: 460.





En la solidificación de un material existe una etapa llamada nucleación (formación de núcleos en el metal líquido). Este tipo de nucleación puede ser homogénea o heterogénea.

### 7.5.1 Nucleación Homogénea

Consiste en que el metal líquido fundido proporciona por sí mismo los átomos para formar núcleos. Este proceso se divide como se muestra en la figura.

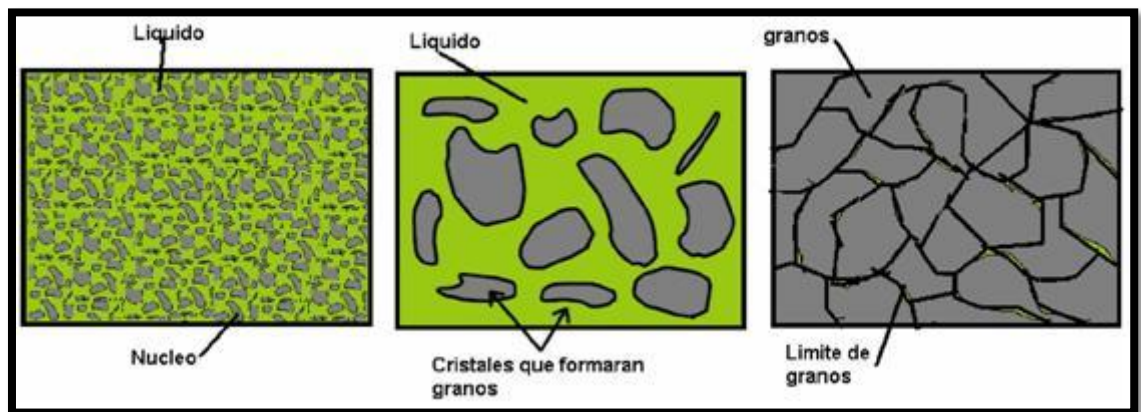


Ilustración 4; Nucleación Homogénea Ilustración.<sup>11</sup>

- Generación de núcleos: Es la agrupación de átomos a partir de pequeños movimientos de estos.
- Generación de cristales: En este paso algunos núcleos se generan y se disuelven mientras exista suficiente líquido, otros continúan creciendo hasta formar los cristales.
- Creación de límites de grano: Al continuar el proceso de enfriamiento, algunos núcleos crecen y se reorientan para convertirse en granos, los cuales crearan una frontera llamada límite de grano.

### 7.5.2 Nucleación heterogénea

Este tipo de nucleación se produce en el metal líquido sobre las paredes del molde al usar un agente insoluble; es decir sin refinadores de grano. Esta nucleación difiere si el caso es un metal puro o una aleación. El proceso de solidificación de un metal puro se caracteriza porque solidifica a temperatura constante ( $T_m$ ), estos puntos son conocidos por medio de tablas. El proceso que ocurre en el molde se muestra en la siguiente figura.

<sup>11</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA, *Materiales industriales*. Unidad 2: Solidificaciones en materiales. Capítulo 2.5.6.



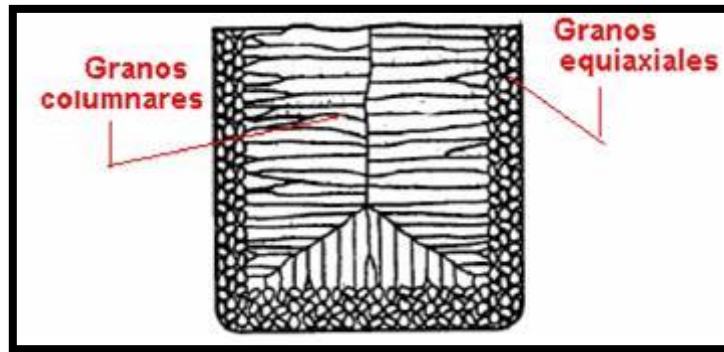


Ilustración 5; Nucleación Heterogénea Ilustración<sup>12</sup>

- Generación de una capa delgada producto del rápido enfriamiento en las paredes al vaciar el líquido en el molde.
- El espesor de esta película aumenta generándose una costra
- En las costras que se forman, los granos son equiaxiales, fino orientado aleatoriamente producto del rápido enfriamiento.
- Se sigue introduciendo metal fundido y se generan granos columnares, debido a que se enfrían perpendiculares a la costra y las paredes del molde, este proceso recibe el nombre de crecimiento dendrítico.

Las aleaciones generalmente no poseen una temperatura única de solidificación sino un rango de temperaturas, este rango depende de la aleación y composición particular. El proceso que se ilustra en la figura consiste en:

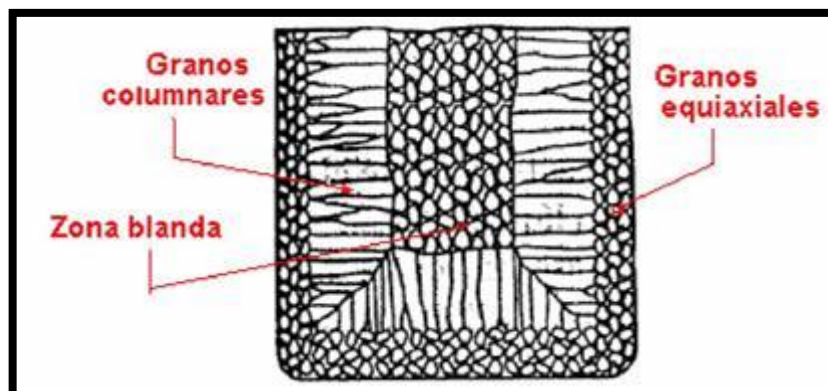


Ilustración 6; Granos y Zona Blanda..<sup>13</sup>

<sup>12</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA, *Materiales industriales*. Unidad 2: Solidificaciones en materiales. Capitulo 2.5.6.

<sup>13</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA, *Materiales industriales*. Unidad 2: Solidificaciones en materiales. Capitulo 2.5.6.



- Al igual que el metal puro se vierte el material fundido y se forma una capa fina.
- Luego se forma granos columnares o dendritas como en el metal puro, similar al paso del metal puro.
- Como es una aleación y por lo tanto dos puntos de fusión de los elementos de la aleación diferentes, se genera una zona donde existe sólido con islas de líquido (zona blanda). Esta zona puede ser ancha o angosta en la aleación por las siguientes razones: 1) Diferencia alta de temperatura entre líquidos y sólido 2) Lenta transferencia de calor del metal fundido hacia fuera del molde.

### **7.5.3 Tamaño de Grano.**

El tamaño de grano tiene un notable efecto en las propiedades mecánicas del metal. Los efectos del crecimiento de grano provocados por el tratamiento térmico son fácilmente predecibles. La temperatura, los elementos aleantes y el tiempo de impregnación térmica afectan el tamaño del grano.

En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande. Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento. El grano fino es mejor para herramientas y dados. Sin embargo, en los aceros el grano grueso incrementa la endurecibilidad, la cual es deseable a menudo para la carburización y también para el acero que se someterá a largos procesos de trabajo en frío.

Todos los metales experimentan crecimiento de grano a altas temperaturas. Sin embargo, existen algunos aceros que pueden alcanzar temperaturas relativamente altas (alrededor de 1800 F o 982 C) con muy poco crecimiento de grano, pero conforme aumenta la temperatura, existe un rápido crecimiento de grano. Estos aceros se conocen como aceros de grano fino. En un mismo acero puede producirse una gama amplia de tamaños de grano.

### **7.5.4 Clasificación de los Tamaños de Grano:**

Existen diversos métodos para determinar el tamaño de grano, como se ven en un microscopio. El método que se explica aquí es el que utiliza con frecuencia los fabricantes. El tamaño de grano se determina por medio de la cuenta de los granos en cada pulgada cuadrada bajo un aumento de 100X. La figura presentada a continuación es una carta que representa el tamaño real de los granos tal como aparece cuando se aumenta su tamaño 100X. El tamaño de grano especificado es por lo general, el tamaño de grano austenítico. Un acero que se temple apropiadamente debe exhibir un grano fino.



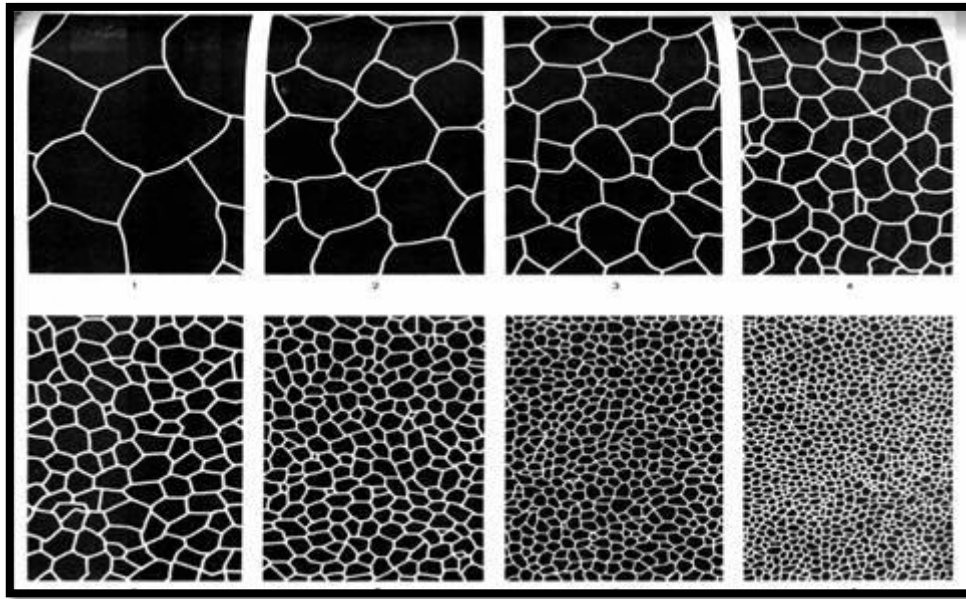


Ilustración 7; Carta con Tamaño Real de Granos.<sup>14</sup>

### 7.5.5 Crecimiento dendrítico.

Las dendritas por lo general se forman en *aleaciones multifase*. Para que se produzcan es preciso que el metal fundido se sobreenfríe por debajo del *punto de solidificación* del metal. Por el contrario, si los ritmos de enfriamiento son lentos, el frente de solidificación será plano y estable. Pero a ritmos de enfriamientos más rápidos, la solidificación puede realizarse en forma tan rápida que la concentración de la aleación en el frente de solidificación será distinta de la concentración promedio en el sistema. Este aumento de la concentración origina un punto de fusión más elevado que impide la solidificación en proximidades del frente. La solidificación también libera energía, lo cual se opone a la solidificación. A una pequeña distancia del frente de solidificación, la concentración es más favorable al proceso de solidificación además de que la temperatura es menor. Esto aumenta la velocidad de solidificación en los puntos más prominentes, lo que produce la formación de la dendrita. Es de destacar que una interfase curva es menos favorable desde un punto de vista energético, por lo tanto las dendritas en este caso serán mucho menos agudas.

### 7.5.6 Granos Equiaxiales:

Si las condiciones de nucleación y crecimiento en el metal líquido durante la solidificación son tales que los cristales pueden crecer por igual en todas las direcciones, se obtendrán granos equiaxiales. Los granos equiaxiales se encuentran normalmente junto a la pared del molde frío, como se muestra en la figura. Un gran enfriamiento cerca de la pared crea una elevada concentración

<sup>14</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA, *Materiales industriales*. Unidad 2: Solidificaciones en materiales. Capítulo 2.5.6.



de núcleos durante la solidificación, una condición necesaria para producir una estructura de granos equiaxiales.

### 7.5.7 Granos columnares:

La zona columnar contiene granos alargados, orientados en una dirección cristalográfica particular. Conforme el material del molde extrae calor de la fundición, los granos de la zona fría crecen en dirección opuesta al flujo de calor o desde las áreas más frías de la pieza a las más calientes. Esta tendencia por lo general significa que los granos crecerán perpendicularmente a la pared del molde.

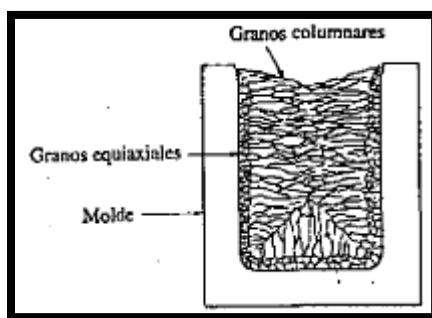


Ilustración 8; Granos Equiaxiales y Columnares.<sup>15</sup>

## 7.6 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Debido a que esta máquina va a tener un papel importante en la presentación de los resultados, decidimos investigar acerca de su funcionamiento y aspectos técnicos del microscopio a utilizar.

### 7.6.1 Aspectos generales de la Máquina

El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) hace parte de los equipos interfacultades de la *Universidad de los Andes*, hoy en día.

Uno de los laboratorios, posee un microscopio JEOL, modelo JSM 6490-LV de última generación, que opera en los modos de alto y bajo vacío; al mismo tiempo, adquiere cuatro detectores que permiten la obtención de imágenes de electrones secundarios (tridimensionales), imágenes de electrones retrodispersados (topográficas,

<sup>15</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA, *Materiales industriales*. Unidad 2: Solidificaciones en materiales. Capítulo 2.5.6.



composicionales y de sombra) e imágenes de mapas de puntos EDS (mapping).<sup>16</sup>

### 7.6.2 Definición

Prácticamente, la microscopía electrónica de barrido es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electrodensa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV.

Aquel haz de electrones tiene un movimiento sobre la capa superficial de la muestra, realizando un barrido de trayectoria paralela. La variación morfológica de la muestra entrega diversas señales (electrones secundarios, electrones retrodispersados, emisión de rayos X, etc.), que son recogidas por distintos detectores; los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales.<sup>17</sup>

### 7.6.3 Funcionamiento

Un MEB funciona con un haz de electrones producido por una fuente de electrones, que puede ser ejecutada en dos métodos:

- Cañón termoiónico (filamento de tungsteno o de hexaboruro de lantano).
- Cañón de emisión de campo FEG (Field Emission Gun).

Al cañón se le aplica un potencial eléctrico que acelera el haz de electrones hacia una columna y éste es focalizado por medio de lentes electromagnéticas sobre la muestra. Los electrones chocan e interactúan con la muestra produciendo varias señales que podrán ser recogidas de acuerdo a los detectores presentes.

Conviene mencionar, que las señales producidas están relacionadas entre sí y dependen en gran medida de la topografía, el número atómico y el estado químico de la muestra.

Ahora, la amplificación de la imagen se produce por un conjunto de

---

<sup>16</sup> UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Vicerrectoría de Investigaciones. Microscopio Electrónico de Barrido – MEB; Introducción. 2013. En: **Google**. Consultado el viernes 19 de Abril de 2013. Versión HTML del archivo: <http://investigaciones.uniandes.edu.co/index.php/es/centro-de-microscopia/microscopio-electronico-de-barrido-meb>

<sup>17</sup> UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Vicerrectoría de Investigaciones. *Descripción de la Técnica MEB*. 2013. En: **Google**. Consultado el viernes 19 de Abril de 2013. Versión HTML del archivo: <http://investigaciones.uniandes.edu.co/index.php/es/centro-de-microscopia/microscopio-electronico-de-barrido-meb/descripcion-de-la-tecnica-meb>



lentes electromagnéticas que mediante un tratamiento adecuado de las señales electrónicas son proyectadas en un tubo de rayos catódicos (CRT). <sup>18</sup>

## 8. Metodología

Va a estar enfocada por el desarrollo de tres fases principales, que generan un orden de progreso y pretenden analizar, interpretar y presentar los resultados y los procedimientos necesarios para el logro de los objetivos propuestos.

### 8.1 Fase de Documentación

Hacemos alusión a todo el proceso de investigación, para nutrir el marco conceptual y para diagnosticar y contextualizar todo el estudio realizado a los diversos tipos de solidificación y características con la dureza en las muestras. Paralelamente, esta fase nos permite ampliar nuestros conocimientos y ayudas prácticas frente a los diversos mecanizados, procesos de soldadura, tratamientos térmicos y ensayos que se van a ejecutar. Esta fase abarca una buena parte del desarrollo del proyecto, tal cual como se referencia en el cronograma, debido a la importancia que le debemos resaltar y fijar.

### 8.2 Fase de Adecuación

Comprende aquella etapa de preparación y alistamiento de las probetas, teniendo en cuenta las dimensiones exigidas por el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) con el fin de realizar correctamente la respectiva toma de imágenes.

Podemos distinguir varios procesos invariables:

- Mecanizado de muestras SAE 8620
- Aplicación de soldadura de arco con electrodos 6013 a las muestras.
- Ejecución de tratamientos térmicos, específicamente de temple, normalizado y recocido.

---

<sup>18</sup> UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Vicerrectoría de Investigaciones. *Descripción de la Técnica MEB*. 2013. En: **Google**. Consultado el viernes 19 de Abril de 2013. Versión HTML del archivo: <http://investigaciones.uniandes.edu.co/index.php/es/centro-de-microscopia/microscopio-electronico-de-barrido-meb/descripcion-de-la-tecnica-meb>



- Preparación metalográfica para la ejecución de observaciones y pruebas.

### 8.3 Fase de Pruebas y Análisis

Comprende una etapa decisiva en el logro de los objetivos. En este momento vamos a llevar a cabo cada una de las pruebas a nuestras tres uniones soldadas, la toma de imágenes con el microscopio metalográfico y con el microscopio electrónico de barrido; y obviamente el posterior estudio estadístico de cada uno de los resultados arrojados en las anteriores actividades.

## 9. Cronograma

En la siguiente tabla se muestra todo el tiempo estimado que se prevé para darle solución al problema. Así pues, se evidencia la duración total del proyecto de investigación, especificando el tiempo necesario para el desarrollo de cada una de las actividades mencionadas:

ACTIVIDAD	MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO			
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4
Consulta de Información																								
Redacción de Anteproyecto																								
Correcciones de Anteproyecto																								
Radicación de Anteproyecto																								
Fase de Documentación																								
Fase de Adecuación																								
Fase de Pruebas																								
Redacción de Documento Final																								
Correcciones de Documento Final																								
Radicación de Documento Final																								

Tabla 1; Cronograma.

## 10. Presupuesto y Fines de Financiación

Basados en la definición total de la metodología, a continuación presentamos aquellos recursos inherentes al desarrollo del proyecto de investigación:





### 10.1 Recursos Materiales

Actualmente dentro de las instalaciones de la Universidad Distrital, se cuenta con un conjunto de Laboratorios Aplicados; para el avance de la investigación se va a hacer uso del Laboratorio de Metalografía y del Laboratorio de Tratamientos Térmicos y Preparación de Probetas Metalográficas.

Es necesario recalcar que también se va a hacer una solicitud al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la Universidad de los Andes para registrar los análisis de la observación en el MEB, de cada una de nuestras muestras.

Se utilizará como herramienta de apoyo un software estadístico que nos permita almacenar y analizar los datos arrojados en el estudio realizado.

### 10.2 Recursos Humanos

Principalmente los recursos humanos se van a enfocar en el investigador y el tutor, como aquel apoyo en el proceso de construcción y corrección del presente proyecto. De la misma forma, contaremos con la presencia de personal calificado en cada uno de los laboratorios mencionados y en los centros de consulta como bibliotecas y empresas.

### 10.3 Recursos Económicos

En este punto se destacan los costos pronosticados que permitirán la ejecución eficiente de la investigación. Precisa advertir que la fuente de financiación va a estar dirigida al investigador, debido a que no son muy altos los valores de material para las muestras, los tratamientos térmicos se realizarán dentro de la Facultad Tecnológica y prácticamente la mayor inversión se va a enfocar en la observación con el MEB. Sin embargo, se sintetizan los costos generales en la siguiente tabla:

DESCRIPCIÓN	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	COSTO
Platinas de SAE 8620	\$2000	3	\$6000
Proceso de soldadura	\$10000	3	\$30000
Observación en MEB	\$150000	1	\$150000
Papelería	\$200	200	\$40000
Transportes	\$1500	80	\$120000
Asesorías	\$30000	5	\$150000
<i>Total Aproximado</i>			<i>\$530000</i>

Tabla 2; Recursos Económicos.



## 11. Bibliografía e Infografía

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Metal Handbook*. Volume: Properties and Selection of Metals. Eighth Edition. Unites States, 1961.
- APRAIZ BARREIRO, José. *Tratamientos Térmicos de los Aceros*. Décima Edición. Editoriales Dossat. España, 2000.
- AVILA APOLINAR, Adalberto. *Tesis: Efecto de la Temperatura Superficial generada por un Láser de Diodos de Alta Potencia sobre las propiedades de un Temple en un Acero AISI-1045*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia Michoacán, 2009. En: **Google**. Consultado el miércoles, 6 de Marzo de 2013. Versión HTML del archivo: <http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/handle/123456789/3654?mode=full>
- COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS S.A. *Ficha Técnica SAE 8620, Acero para cementación de alta resistencia*. 2012. En: **Google**. Consultado el domingo, 22 de abril de 2012. Versión HTML del archivo: [http://www.cga.com.co/index.php?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=104](http://www.cga.com.co/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=104)
- PARETO, Luis. *Fundamentos de Mecánica*. Tercera Edición. Ediciones CEAC SA. España, 1985.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Vicerrectoría de Investigaciones. *Descripción de la Técnica MEB*. 2013. En: **Google**. Consultado el viernes 19 de Abril de 2013. Versión HTML del archivo: <http://investigaciones.uniandes.edu.co/index.php/es/centro-de-microscopia/microscopio-electronico-de-barrido-meb/descripcion-de-la-tecnica-meb>

