

**INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REVENIDO EN LA RESISTENCIA AL  
DESGASTE ABRASIVO DE UN ACERO AISI/SAE 1045 TEMPLADO DESDE  
TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS**

JOSÉ ANTONIO PUERTO MOLINA

Universidad libre de Colombia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

2018

**INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REVENIDO EN LA RESISTENCIA AL  
DESGASTE ABRASIVO DE UN ACERO AISI/SAE 1045 TEMPLADO DESDE  
TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS**

JOSÉ ANTONIO PUERTO MOLINA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director:

Ingeniero Carlos Arturo Bohórquez  
Docente Facultad de Ingeniería Mecánica

Universidad libre de Colombia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

2018

**Nota de aceptación**

---

---

---

**Jurado 1**

---

**Jurado 2**

---

**Jurado 3**

---

Bogotá, Colombia; Fecha de entrega

## Dedicatoria

La presente tesis está dedicada a Dios,  
ya que gracias a él he logrado culminar mi carrera.

A mis padres, porque ellos estuvieron  
a mi lado brindándome su apoyo y consejos  
para hacer de mí una mejor persona.

A mis hermanas, por sus palabras  
y compañía en los momentos que creí caer.

**José Antonio Puerto Molina**

## *Agradecimientos*

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida, algunas están aquí y otros en mis recuerdos y corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por construir mi ser, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

## TABLA DE CONTENIDO

1	TÍTULO.....	10
2	INTRODUCCIÓN.....	10
3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	11
3.1	Descripción del problema .....	11
3.2	Antecedentes del problema .....	11
3.3	Formulación del problema .....	12
4	JUSTIFICACIÓN .....	13
5	OBJETIVOS .....	14
5.1	Objetivo general .....	14
5.2	Objetivos específicos.....	14
6	MARCO REFERENCIAL .....	15
6.1	Marco teórico.....	15
6.1.1	Tratamiento térmico intercrítico .....	15
6.1.2	Definición y características de un acero AISI/SAE 1045 .....	16
6.1.3	Variables asociadas al tratamiento térmico.....	17
6.2	Marco conceptual .....	18
6.3	Marco legal y normativo.....	19
7	METODOLOGÍA.....	20
7.1	Tipo de investigación .....	20
7.2	Variables e indicadores .....	20
7.3	Pruebas piloto y diseño de experimentos .....	20
7.4	Diseño de experimentos .....	21
8	DESARROLLO METODOLÓGICO .....	23
8.1	Composición química del acero AISI/ SAE 1045 .....	25
8.2	Determinación de temperaturas críticas de temple .....	25
7.7	Metodología de calentamiento y enfriamiento del tratamiento térmico .....	27
8.3	Diagrama de tiempo, transformación, temperatura (TTT) .....	27
8.4	Ensayo de dureza.....	28
9	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	29
9.1	Estudio metalográfico .....	29
9.2	Ensayo de dureza.....	34
9.3	Fracciones volumétricas de Martensita.....	39
9.4	Relación fracciones volumétricas vs dureza .....	42
9.5	Pruebas de microdureza en probetas .....	43

9.6	Pruebas de desgaste abrasivo .....	46
9.6.1	Normas aplicadas al estudio.....	46
9.6.2	Resultados de pruebas a desgaste abrasivo .....	48
9.6.3	Pérdidas volumétricas en pruebas de desgaste abrasivo por medio de análisis de imágenes .....	49
9.6.4	Pérdidas volumétricas en pruebas de desgaste abrasivo basada en la norma ASTM G65.....	51
9.6.5	Comparación entre pérdidas volumétricas generadas por análisis de imagen VS perdidas calculas por norma ASTM G65 .....	52
9.6.6	Análisis de datos obtenidos en temple a 750 °C en diferentes tiempos de revenido.....	54
9.6.7	Análisis de datos obtenidos en temple a 770 °C en diferentes tiempos de revenido.....	54
9.6.8	Influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste abrasivo.....	55
9.7	Análisis de fallas presentes en las pruebas de desgaste .....	57
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
10.1	Recomendaciones.....	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	64
	ANEXOS .....	66

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Microestructura de un acero DP .....	15
Ilustración 2 Curvas de análisis de varianza .....	22
Ilustración 3 Metodología de trabajo .....	24
Ilustración 4 Intervalo de temperaturas de temple intercrítico .....	26
Ilustración 6 Secuencia tratamientos de térmicos .....	27
Ilustración 7 Diagrama TTT para temple y revenido del acero .....	28
Ilustración 8 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 750 °C con 15 minutos de revenido a 500°C.....	29
Ilustración 9 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 770 °C con 15 minutos de revenido a 500°C.....	30
Ilustración 10 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 750 °C con 30 minutos de revenido a 500°C.....	30
Ilustración 11 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 770 °C con 30 minutos de revenido a 500°C.....	31
Ilustración 12 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 750 °C con 45 minutos de revenido a 500°C.....	32
Ilustración 13 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 770 °C con 45 minutos de revenido a 500°C.....	33
Ilustración 14 Durezas material base .....	35
Ilustración 15 Durezas del temple.....	36
Ilustración 16 Resultados de dureza para temple a 750°C con distintos tiempos de revenido.....	37
Ilustración 17 Resultados de dureza para temple a 770°C con distintos tiempos de revenido.....	38
Ilustración 18 Fracciones encontradas en las metalografías.....	40
Ilustración 19 Fracciones de Martensita en temple a 750°C para diferentes tipos de revenido.....	41
Ilustración 20 Fracciones de Martensita en temple a 770°C para diferentes tipos de revenido.....	41
Ilustración 21 Relación dureza con temple a 750°C vs fracción Martensita .....	42
Ilustración 22 Relación dureza con temple a 770°C vs fracción Martensita .....	42
Ilustración 23 Matriz para indentador de microdureza.....	43
Ilustración 24 Puntos para la determinación de la microdureza .....	43
Ilustración 25 Comparación de microdurezas templadas a 750°C .....	44
Ilustración 26 Comparación de microdurezas templadas a 750°C .....	45
Ilustración 27 Tamaño de grano arena 60.....	47
Ilustración 28 dimensiones huella de desgaste.....	49
Ilustración 29 Resultado de pérdida volumétrica en temple a 750 °C con diferentes tiempos de revenido .....	51
Ilustración 30 Resultado de pérdida volumétrica en temple a 770 °C con diferentes tiempos de revenido .....	52
Ilustración 31 Comparación de pérdidas volumétricas para temple a 750°C .....	53
Ilustración 32 Comparación de pérdidas volumétricas para temple a 770°C .....	53
Ilustración 33 Influencia del tiempo de revenido comparandolo resistencia al desgaste abrasivo.....	56
Ilustración 34 Equipo de estereografía.....	57



Ilustración 35 Imágenes de estereografía de las pruebas a desgaste abrasivo .....	58
Ilustración 36 Perfil de desgaste .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición química de un acero 1045 .....	16
Tabla 2 Variables e indicadores.....	20
Tabla 3 Pruebas de desgaste piloto acero ASI SAE 1045 .....	21
Tabla 4 Resultados obtenidos de dureza en un acero 1045 .....	21
Tabla 5 Resultados obtenidos de $\tau$ .....	22
Tabla 6 Determinación de los factores beta para el tratamiento térmico .....	23
Tabla 7 Composición química del acero AISI/SAE 1045.....	25
Tabla 8 Durezas acero 1045 normalizado .....	34
Tabla 9 Microdurezas en probetas templadas a 750°C.....	44
Tabla 10 Microdurezas en probetas templadas a 770°C.....	45
Tabla 11 Proceso D ASTM G65.....	47
Tabla 12 Resultados de pedida en peso para temple a 750 °C con diferentes tiempos de revenido.....	48
Tabla 13 Resultados de pedida en peso para temple a 770 °C con diferentes tiempos de revenido.....	48
Tabla 14 Resultado de pérdidas volumétricas para diferentes tiempos de temple .....	50

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Metodo Andrews para temperature AC3.....	22
Ecuación 2 Metodo Andrews para temperature AC1.....	23
Ecuación 3 Media aritmética.....	42
Ecuación 4 Varianza.....	42
Ecuación 5 Desviación estandar.....	43

## 1 TÍTULO

### **INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REVENIDO EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE UN ACERO AISI/SAE 1045 TEMPLADO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS.**

## 2 INTRODUCCIÓN

El constante desarrollo y mejoramiento de los procesos de obtención del acero estructural, han generado un gran impacto socio- económico, debido a la necesidad de alcanzar altos márgenes de calidad y optimizar procesos de elaboración en el acero. Para poder cumplir con esta meta, se debe estudiar y garantizar la durabilidad del acero estructural, en los diferentes tipos de aplicación, asegurando de esta manera la integridad mecánica. [1]

Los aceros avanzados de alta resistencia (aceros AHSS por sus siglas en inglés) son aceros que cumplen con elevadas propiedades mecánicas que las industrias exigen a un menor costo de producción. Estos aceros muestran una combinación de buena resistencia mecánica y una excelente facilidad de conformado. La principal característica de estos aceros, es lograr reducir el peso de las estructuras sin comprometer la resistencia mecánica otorgando rigidez, resistencia y absorción de energía en cada una de las partes que la conforman. [4]

En el grupo de aceros AHSS, se encuentran los aceros de doble fase (DP), este tipo de acero se obtiene luego de una serie de tratamientos térmicos de temple en temperaturas intercríticas, donde el acero es llevado a la zona de austenización parcial o completa y luego de un rápido enfriamiento en agua, la matriz Austenítica se transforma en dos fases Ferrita y con islas de Martensita. Las propiedades de un acero DP, varían con respecto a las fracciones volumétricas de Martensita que no llegan a ser mayores al 35%. [7] [16]

En Colombia se han trabajado este tipo de aceros AHSS de doble fase, pero las investigaciones comprenden unas temperaturas de templado definidas a lo largo del rango intercrítico, por esta razón, este proyecto trabajara la aplicación de dos temperaturas intercríticas de templado, además de una secuencia de tiempos en un tratamiento térmico de revenido, obteniendo diferentes volúmenes de Martensita, estos se van a caracterizar microestructuralmente, mediante microscopía óptica convencional, igualmente se va a evaluar su comportamiento mecánico en la pruebas de dureza, microdureza, desgaste abrasivo para determinar, cuál es la influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste; de igual modo, se obtendrá la temperatura que tiene las mejores propiedades. [6]

### 3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

#### 3.1 Descripción del problema

Actualmente la industria automotriz se encuentra en constante desarrollo, una gran parte de este se centra en optimar el consumo de combustible aplicando materiales estructurales livianos que contengan las mejores propiedades mecánicas sin desatender temas ambientales y financieros. Como resultado a las investigaciones sobre el mejoramiento estructural de los vehículos se ha encontrado que las pruebas con aceros AHSS este tipo de acero cumplen con las propiedades mecánicas necesarias para las condiciones de trabajo, brindando la posibilidad de aumentar la seguridad de los pasajeros y disminuyendo de forma notoria el consumo de combustible. [9] [23] [24]

#### 3.2 Antecedentes del problema

En el año 2005 en la ciudad de Belo horizonte (Brasil) el investigador **Rocha** y su grupo de colaboradores, realizo una investigación sobre las características de los aceros de doble fase (DP) laminados en frío con un tratamiento de recocido intercrítico, variando la velocidad de calentamiento, tiempo de enfriamiento y temperatura de enfriamiento. Estas variables, tienen un efecto en la microestructura y propiedades mecánicas de un acero DP laminado en frío. Las microestructuras presentes de cada muestra fueron analizadas y simuladas en un equipo Gleeble, por de una microscopía electrónica de barrido (SEM). De igual manera, se realizaron pruebas de tracción a cada una de las muestras. Como resultado, se determina que las propiedades mecánicas están influenciadas por las fracciones volumétricas de los componentes de Martensita, Bainita, Austenita y carburos, que dependen de los parámetros del procesamiento de recocido. La cantidad de fracciones volumétricas muestran que el límite de elasticidad aumenta y la resistencia a la tracción final disminuye con el aumento de la temperatura intercrítica. Esto se puede explicar, por la mayor formación de Bainita granular asociada con la mayor fracción de volumen de Austenita formada a las temperaturas más altas. Los datos experimentales también mostraron que, para los ciclos de recocido llevados a cabo, se podían obtener valores de resistencia a la tracción superiores a 600 MPa con el acero investigado. [16] [6]

**Demir y Erdogan** en el 2008 en una investigación en la cual, se usaron dos aceros con diferentes composiciones químicas para estudiar el comportamiento de endurecimiento de la Austenita, con diferente contenido de aleación y dispersión, en un acero de doble fase (DP). Los resultados mostraron que no se formaron agregados de carburo de Ferrita y que una cantidad considerable de la Austenita presente en las temperaturas intercríticas se transformó en Martensita

incluso a la velocidad de enfriamiento de 0,01 °C/s (enfriamiento del horno) en las muestras. En los aceros de doble fase (DP), la ausencia de formación de carburo es inusual a esta velocidad de enfriamiento y las tasas de enfriamiento críticas para la formación de Martensita son muy bajas, en comparación con los estudios previos. Se concluye que, sin un alto enfriamiento, estas composiciones de acero son adecuadas para la producción industrial de acero de doble fase, a través de una línea de recocido continuo de plantas de hierro y acero. [5] [15]

Por otra parte, en una investigación realizada en el 2016 por **Quin Lai**, en su trabajo de investigación donde se desarrollaron microestructuras de doble fase en un acero, con el fin de observar la fracción de volumen de Martensita y la dureza de Martensita en el comportamiento plástico de los aceros de doble fase. La fracción de volumen de Martensita oscila entre el 11% y el 37%, lo que implica dos niveles de dureza de Martensita. El límite elástico y la resistencia a la tracción, aumentan con el aumento de la fracción de volumen de Martensita, mientras que el alargamiento uniforme disminuye. La dureza de la Martensita tiene un impacto débil en el límite elástico inicial, pero afecta significativamente el comportamiento de flujo para una fracción de volumen de Martensita suficientemente grande. El aumento de la dureza de la Martensita, conduce a una mayor resistencia a la tracción combinada con solo un impacto limitado en el alargamiento uniforme, lo que da como resultado un equilibrio de resistencia / ductilidad mejorado. Los resultados experimentales se capturan con éxito utilizando análisis micromecánicos basados en elementos finitos. [15]

### **3.3 Formulación del problema**

Teniendo en cuenta que en Colombia no se han desarrollado proyectos en donde se determine la influencia del tiempo de revenido en resistencia al desgaste abrasivo de aceros doble fase, se hace necesario analizar las características que posee, dejando plasmadas en este documento algunas de sus características microestructurales y propiedades mecánicas para que en un proyecto futuro se busquen sus debidas aplicaciones, especialmente en la industria automotriz.

El presente proyecto trabajara un acero de bajo contenido de carbono AHSS de doble fase con temperaturas de temple intercrítico (entre AC1 y AC3), con fases de Ferrita y presencia de islas con Martensita, evaluando sus propiedades mecánicas. [14]

## 4 JUSTIFICACIÓN

Los aceros empleados en la fabricación de estructuras en automóviles deben resistir cargas de trabajo por lo que sus propiedades se han ido mejorando, así el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo último y la resistencia al desgaste son cada vez mayores, en la parte estructural del vehículo encontramos los estribos que son elaborados a partir de aceros doble fase, para la distribución de las deformaciones, y un buen comportamiento a la fatiga y una alta resistencia mecánica lo que genera una buena capacidad de absorción de energía. Los tratamientos térmicos se convierten en una forma fácil y económica de mejorar dichas propiedades con la intención de satisfacer las necesidades mecánicas de su aplicación; en una de sus transformaciones se encuentran los aceros de medio contenido de carbono con una característica de doble fase (DP), **Lizcano Carlos** indica que estos aceros (Dual Phase) son una parte importante de los aceros de alta resistencia (AHSS) estos materiales tienen una buena combinación de propiedades mecánicas. [16] [17]

En ese mismo sentido, la manera de conseguir esta mezcla de propiedades son los tratamientos térmicos intercríticos; llamados así por el rango de temperaturas a los que se efectúan, para aceros de bajo contenido de carbono aleaciones con carbono inferior al 0,2%, se realiza un temple desde el intervalo de temperaturas de  $A_1$  y  $A_3$ , este tratamiento hace que la Austenita presente se transforme en Martensita, dando lugar a la aparición de una microestructura que reemplaza la convencional de ferrita y perlita, al aumentar la temperatura de tratamiento se aumenta la cantidad de Martensita transformada. [9]

Es indudable, que el rango de temperaturas intercríticas es amplio, es decir, se pueden lograr diferentes propiedades en acero para cada una de estas temperaturas. Es entonces que los estudios del acero, tratado a diferentes temperaturas y tiempos son indispensables, para permitir no solo encontrar las mejor combinaciones de propiedades, sino además presentar una reducción en los costos de producción, ya que el acero no se llevara a una austenización completa.

## **5 OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo general**

Establecer la Influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AISI/ SAE 1045 tratado térmicamente desde temperaturas intercríticas.

### **5.2 Objetivos específicos**

- Determinar la influencia de la secuencia de tratamientos térmicos intercríticos entre AC1 Y AC3 y sostenimiento de revenido de 15, 30 y 45 minutos en el comportamiento al desgaste abrasivo del acero AISI 1045.
- Determinar la relación entre las fracciones volumétricas de los microconstituyentes y las propiedades de resistencia al desgaste abrasivo
- Analizar los tipos de fallas que se presentan en este tipo de pruebas por medio de imágenes estereográficas.

## 6 MARCO REFERENCIAL

### 6.1 Marco teórico

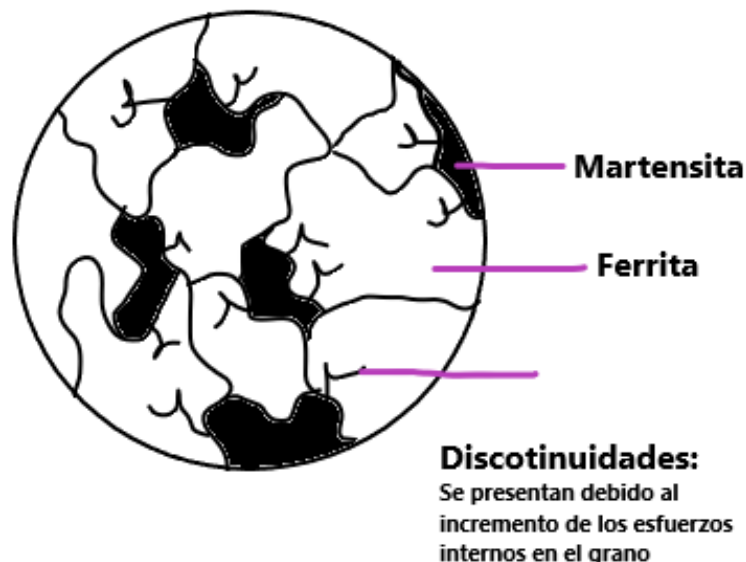
#### 6.1.1 Tratamiento térmico intercrítico

El resultado de un tratamiento intercrítico, es un acero con doble fase (DP) “Dual phase”; este tipo de acero, presenta una característica única en su microestructura, ya que en ella, se encuentran dos tipos de constituyentes, los cuales, forman una matriz Ferrítica. La parte blanda, con la presencia de una segunda fase compuesta principalmente de Martensita en forma de islas, la cual, incrementa la resistencia al desgaste en este tipo de acero. [18] [17]

La presencia de estos constituyentes en un acero Dual Phase una parte blanda (Ferrita) y otra dura (Martensita), hace que estos aceros DP se distingan por un gran equilibrio entre la resistencia y una gran capacidad de absorber energía. Estos aceros son muy adecuados para piezas estructurales y de refuerzo. [6]

En la **Ilustración 1**, se muestra un esquema de la microestructura de los constituyentes de la matriz de un acero de doble fase (DP).

**Ilustración 1 Microestructura de un acero DP**



Fuente: Adaptado [16]

Gracias a su gran capacidad de absorción de la energía y a su buena resistencia a la fatiga, los aceros Dual Phase son especialmente de piezas estructurales y de seguridad para el automóvil como largueros, vigas y refuerzos. [6]

### 6.1.2 Definición y características de un acero AISI/SAE 1045

Se designa acero AISI/SAE 1045, según la norma del Instituto Americano del Hierro y el Acero cuyo acrónimo en inglés es AISI (American Iron and Steel Institute) y de la Sociedad de Ingenieros Automotores, cuyo acrónimo en inglés es SAE (Society of Automotive Engineers), los cuales, se encargan de clasificar los aceros y las aleaciones de materiales no ferrosos. [20] [22]

El acero es una aleación de hierro y carbono que contiene otros compuestos, los cuales le conceden propiedades mecánicas específicas para su utilización en la industria metalmeccánica.

Aunque el Carbono es el elemento primordial que añadir al Hierro, los otros elementos, según su porcentaje, ofrecen características específicas para determinadas aplicaciones, en la Tabla 1, se puede observar la composición química de acero 1045, empelada en este proyecto. [22]

**Tabla 1 Composición química de un acero 1045**

tipo de acero	c	Si	Mn	maximos	
				S	F
1045	0,42 a 0,50	0,20 a 0,60	0,50 a 0,80	0,045	0,045

Fuente: Adaptado [22]

Los elementos como el azufre y el fosforo, son perjudiciales para el acero, debido a que los aceros altos en azufre son difíciles de soldar generando, además, porosidades en la soldadura. A su vez, un elevado porcentaje de fosforo reduce la ductilidad y resistencia al impacto. [19]

Según la compañía **Cía. general de aceros S.A** (Colombia), sugiere que las condiciones para elaborar el tratamiento térmico de temple son las siguientes<sup>1</sup>:

**Temperatura:** 830 - 850 °C      **Medio:** agua      **Dureza:** 52-62 HRC  
**Temperatura:** 840 - 870°C      **Medio:** aceite      **Dureza:** 44-58 HRC

<sup>1</sup> Cía. general de aceros S.A. Catalogo SAE 1020 y SAE 1045. Colombia. 2007, pg. 4 -6



### **6.1.3 Variables asociadas al tratamiento térmico**

El cambio de propiedades mecánicas al acero, utilizando temperaturas altas o bajas se conoce como tratamiento térmico. El conjunto de operaciones que afectan de forma directa las propiedades del acero es: la permanencia, velocidad, presión. [22]

Con los tratamientos térmicos apropiados, se pueden minimizar los esfuerzos internos, tamaño de grano, aumentar la dureza o lograr una superficie dura con un interior dúctil. El fundamento de los tratamientos térmicos se debe enfocar en las reacciones que se producen tanto en el acero, como en aleaciones son ferrosas que ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriado del material. [20]

Variables que afectan un tratamiento térmico

- Temperatura.
- Tiempo a temperatura (Tamaño de grano).
- Velocidad de Enfriamiento.
- Composición del Acero

#### **6.1.3.1 Variables Dependientes**

Las principales variables dependientes asociadas con el temple en agua que se tuvo en cuenta para el acero AISI/SAE 1045 de este proyecto fueron: [14]

- Tiempo de Calentamiento.
- Temperatura del Sistema.
- Velocidad de Enfriamiento.

#### **6.1.3.2 Variables Independientes**

Las principales variables independientes asociadas con el temple en agua que se determinaron para el acero AISI/SAE 1045 de este proyecto fueron: [14]

- Temperatura media del medio de enfriamiento.
- Porcentaje de descarburación del acero AISI/SAE 1045.
- Temperatura de precalentamiento del sistema.
- Composición química del acero AISI/SAE 1045.

## 6.2 Marco conceptual

**Abrasión:** se define como la capacidad de un sólido a oponerse al desgaste debido a una fricción.

**ASTM:** (American Society for Testing and Materials) es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas más grandes del mundo. Las normas de ASTM International, se usan en investigaciones y proyectos de desarrollo, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos y transacciones comerciales por todo el mundo.

**Ataque químico:** En este punto la probeta es plana y está pulida, es un espejo. El ataque químico, pondrá de manifiesto la estructura del metal ya que atacará los bordes de los granos y afectará de manera diferente a las distintas fases presentes en el metal.

**Cementita.** Es el componente más duro de los aceros con dureza superior a 60HRc y moléculas muy cristalizadas, por ende, frágiles.

**Desgaste:** la pérdida de material debido al excesivo contacto entre sólidos.

**Doble-fase (Dual Phase DP):** Característica que poseen algunos aceros de bajo carbono, cuyas propiedades mecánicas como conformabilidad, resistencia y soldabilidad son muy altas.

**Ductilidad:** Es la propiedad del material de poder ser trabajado, sin que se produzcan cambios en su estructura, o grietas.

**Dureza Brinell:** se usa una esfera duro que se fuerza con el material y se mide el diámetro de la huella.

**Ferrita.** Es hierro casi puro con impurezas de silicio y fósforo (Si-P). Es el componente básico del acero.

**Fracción volumétrica:** es equivalente al cociente de volumen perdido sobre el volumen total.

**Martensita.** Es el constituyente de los aceros cuando están templados, es magnética y después de la Cementita es el componente más duro del acero.

**Microscopia óptica:** es la técnica usada para observar características

**Metalografía:** es la preparación de la probeta metálica, observación y registro de la microestructura.

**Precipitado:** fase sólida que se forma a partir de la matriz original, cuando se excede el límite de solubilidad.

**Dureza:** mide la resistencia a la penetración de la superficie de un material por un objeto duro.

**Propiedades mecánicas:** son aquellas que describen que tan bien soportan las fuerzas aplicadas un material.

**Tratamiento térmico:** Consiste en calentar el acero a una temperatura determinada, mantenerlo a esa temperatura durante un cierto tiempo, hasta que se forme la estructura deseada y luego enfriarlo a la velocidad conveniente.

**Tribología:** ciencia que trata de establecer fenómenos físicos y químicos, basándose en problemas generados por el contacto entre dos o más elementos.

### 6.3 Marco legal y normativo

En el siguiente apartado se observarán las diferentes normas, códigos y leyes, con las cuales, se encuentra relacionado el presente proyecto de investigación, a continuación, se especifican.

- **ASTM A108 Standard Specification for Steel Bar, Carbon and Alloy, Cold-Finished.** Para la elaboración de este proyecto se exige cumplir con la especificación del acero AISI SAE 1045, el cual, estará sometido a pruebas de desgaste, esta norma hace referencia a las composiciones químicas mínimas y máximas para de este tipo de acero.
- **ASTM G65 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.** Esta norma será aplicada para la estandarización de las pruebas de desgaste a las que van a ser sometidas las probetas de acero AISI SAE 1045. De igual manera nos dan a conocer las medidas específicas de las probetas para esta prueba siendo 1 pulgada X 3 pulgadas X 1/3 de pulgada.
- **ASTM G40 standard Terminology Relating to Wear and Erosion** La aplicación de estas normas en este proyecto da a conocer la terminología relacionada o aplicada con pruebas de desgaste y erosivas.
- **ASTM 2240 Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.** La estandarización de procesos, se hace necesaria para lograr obtener resultados acordes al procedimiento, por ese motivo la implementación de esta norma para estandarizar los procesos de pruebas de micro durezas en probetas de acero AISI SAE 1045.

## 7 METODOLÓGIA

### 7.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación utilizada en este proyecto es una investigación descriptiva aplicada, debido a que tiene como finalidad fundamental la resolución de problemas prácticos y además tiene como objetivo central la descripción de los fenómenos. Se sitúa en el primer nivel de conocimiento científico.

### 7.2 Variables e indicadores

En la **Tabla 2**, se muestra, la operacionalización de las variables involucradas en el proyecto de un plano abstracto a un más concreto, lo que se busca es maximizar el significado que otorga cada variable del determinado estudio. El siguiente cuadro muestra las variables involucradas en el proceso.

**Tabla 2 Variables e indicadores**

Objetivo específico	Variable	Indicadores	Fuente
Establecer la influencia de la secuencia de tratamientos térmicos en el comportamiento Abrasivo del acero AISI 1045.	Temperatura	°C	Termocupla
	Dureza	HRC	Durómetro
	Tiempo	seg	Cronometro
Determinar la relación entre las fracciones volumétricas de los micros constituyentes y las propiedades de Resistencia al desgaste abrasivo.	Metalografía	Imagen	Microscopio metalográfico
	% volumen perdido	gramos	Balanza
Analizar los tipos de fallas que se presentan en este tipo de pruebas.	Fallas en el material	Observación	Estereografía

Fuente: Autor

### 7.3 Pruebas piloto y diseño de experimentos

A continuación, en la **Tabla 3**, se muestran los resultados de las pruebas de desgaste elaboradas, a tres probetas de acero ASI/SAE 1045 son ningún tipo de tratamiento. Estas pruebas se elaboran con el procedimiento D de la norma ASTM G-65.

**Tabla 3 Pruebas de desgaste piloto acero ASI SAE 1045**

Probeta	Dureza (HRC)	Volumen perdido (mm <sup>3</sup> )
1	18.2	925.214
2	20.5	899.258
3	18.9	951.527
4	20.5	895.503

Fuente: Adaptado [2]

Los datos requeridos para la ejecución del diseño de experimentos se muestran en la Tabla 3, fueron tomados del artículo titulado (INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 1045), que trabaja un tratamiento térmico intercrítico con similitudes a las de este proyecto. [2]

**Tabla 4 Resultados obtenidos de dureza en un acero 1045**

TEMPERATURA (°C)	DUREZAS (HRc)
750	50
750	60
750	68
750	63
750	58
780	55
780	60
780	57
780	57
780	64

Fuente: Adaptado [2]

Se puede observar la gama de diferentes durezas obtenidas con el temple en la tabla 6, desde temperaturas intercríticas, con estos resultados se puede ejecutar el diseño de experimentos [17].

$$\text{Media } 750\text{ }^{\circ}\text{C} = 59.8\text{ HRC} \quad \text{Media } 780\text{ }^{\circ}\text{C} = 58.6\text{ HRC}$$

#### **7.4 Diseño de experimentos**

Para el cálculo del diseño de muestreo, se selecciona una temperatura de 750°C, por la similitud en los datos que se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5 Resultados obtenidos de  $\tau$**

750°C	HRC
$\tau_1$	-9,8
$\tau_2$	0,2
$\tau_3$	8,2
$\tau_4$	3,2
$\tau_5$	-1,8
	1.8

Fuente: Autor

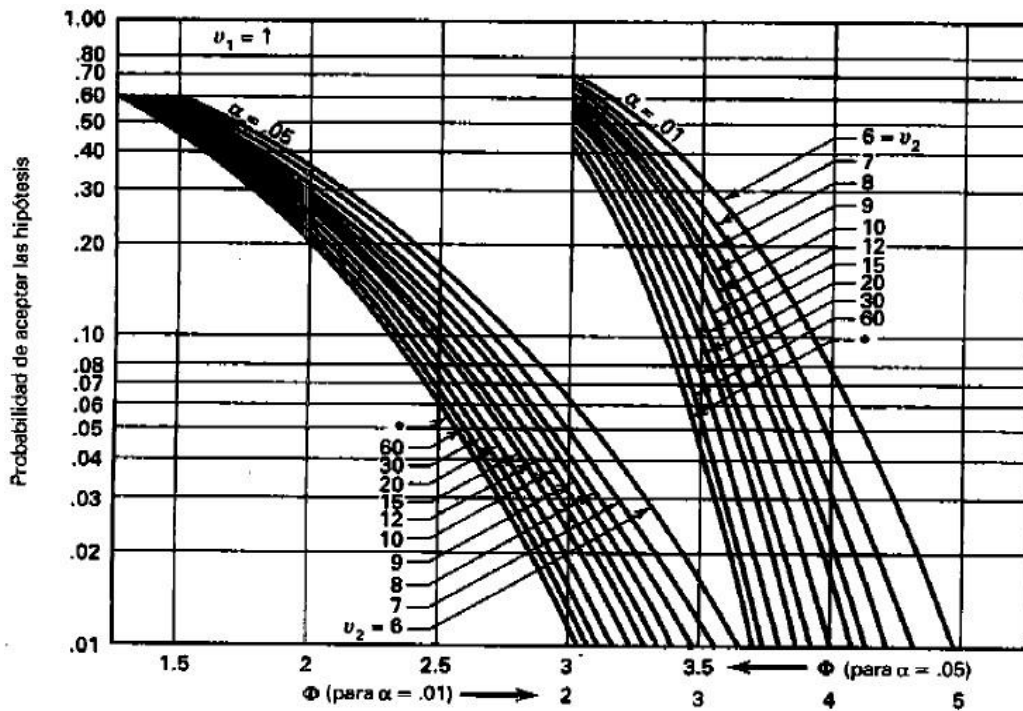
Desviación estandar de los datos = 6,64831 HRC

Sumatoria de los  $\tau$  al cuadrado = 176 ,8

La desviación estándar de la toma de durezas muestra una diferencia del alrededor del 10%, esto debido en gran manera en los procesos de elaboración de la lámina. [2] [4]

La forma de encontrar los factores de aprobación y rechazo, se elaboran siguiendo una serie de cálculos y pasos con el fin de encontrar el valor de **N** replicas necesarias para cada temperatura y determinándolos en la ilustración 2.

**Ilustración 2 Curvas de análisis de varianza**



Fuente (Motgomery, 2004) pág. 647

El parámetro B, se determina asociándolo a variables como la probabilidad nula de 0.01 y los parámetros H(N-1) que se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6 Determinación de los factores beta para el tratamiento térmico**

N	$\varphi^2$	$\varphi$	H(N-1)	B	1-B
2	10,6373	3,2615	3	0,3	0,7
3	15,955	3,9944	6	0,07	0,93

Fuente: Adaptado Motgomery, 2004) pág. 647

El factor B representa el rechazo en los diferentes tratamientos térmicos y el factor (1-B) representa la aprobación de los tratamientos. Se puede observar que utilizando una cantidad de N=2 réplicas, la aprobación del tratamiento llega a un 70%. En cambio, si se aplican 3 réplicas del tratamiento se obtiene una aprobación del 93%.

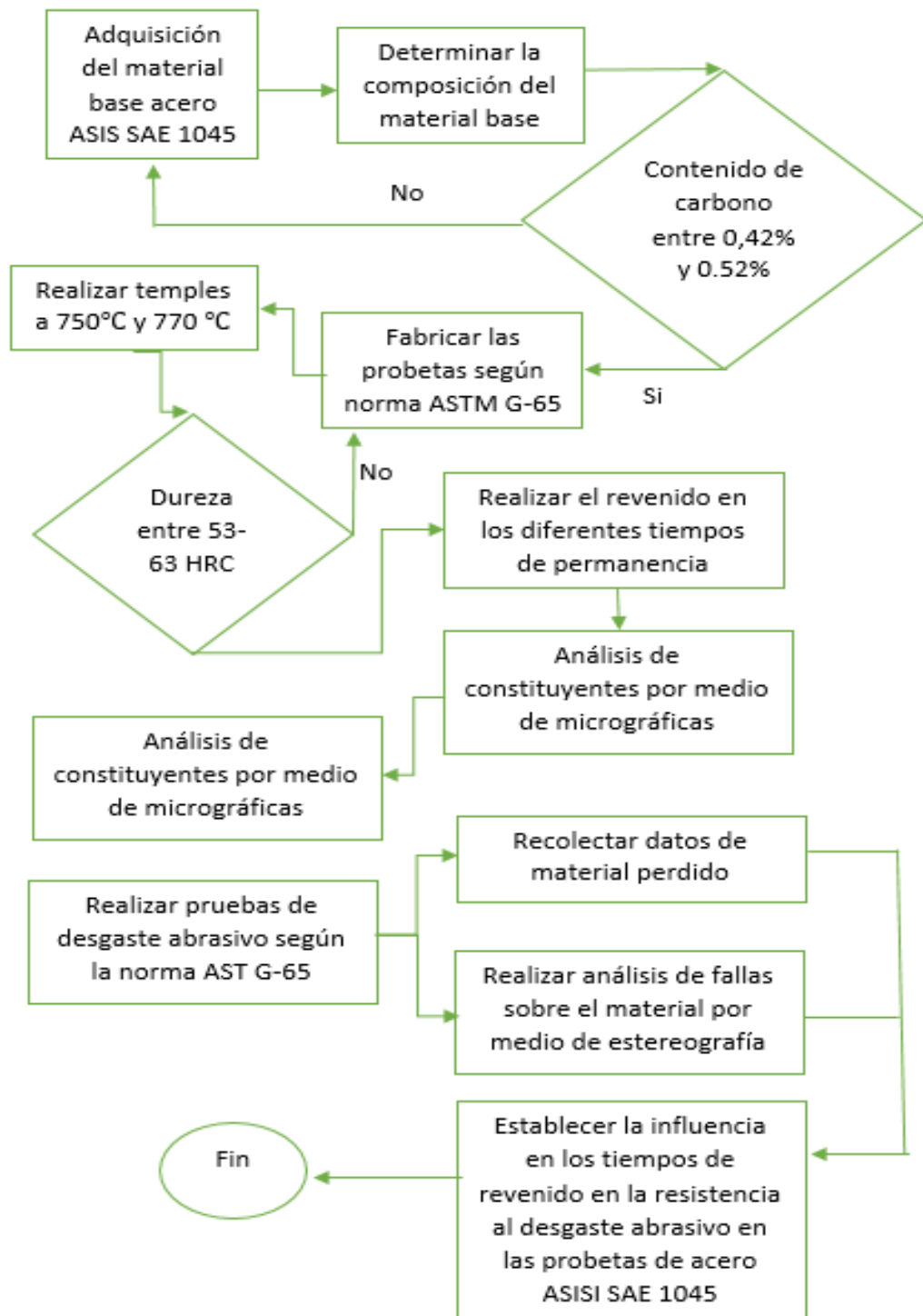
Determinando de esta manera que las réplicas a utilizar son 3 por tratamiento obteniendo

- Tasa de fallo de 7%
- Confiabilidad de 93%

## 8 DESARROLLO METODOLÓGICO

La **Ilustración 3**, un diagrama de flujo denota de manera secuencial las actividades pertinentes para la resolución del presente proyecto. De esta manera, otorga una ayuda en la toma de decisiones en diferentes puntos del proyecto.

**Ilustración 3 Metodología de trabajo**



Fuente: Autor



## 8.1 Composición química del acero AISI/ SAE 1045

En la siguiente **Tabla 7**, se muestra los componentes químicos realizados a la lámina de acero ASI /SAE 1045 adquirida.

**Tabla 7 Composición química del acero AISI/SAE 1045**

Prueba 1									
Fe	98,654	C	0,453	Mn	0,029	p	0,012	S	0,004
Si	0,219	Cu	0,009	Ni	0,012	Cr	0,011	V	0,001
Mo	0,008	W	0,013	Co	0,003	Ti	0,003	Sn<	0,001
Al<	0,001	Nb	0,02	B<	0,0001	Pb	0,006	Mg	0
Prueba 2									
Fe	98,624	C	0,425	Mn	0,648	p	0,014	S	0,004
Si	0,226	Cu	0,01	Ni	0,013	Cr	0,13	V	0,0001
Mo	0,008	W	0,016	Co	0,004	Ti	0,003	Sn<	0,001
Al<	0,001	Nb	0,004	B<	0,0001	Pb	0,008	Mg	0
Prueba 3									
Fe	98,631	C	0,404	Mn	0,653	p	0,016	S	0,004
Si	0,0226	Cu	0,01	Ni	0,013	Cr	0,012	V	0,002
Mo	0,008	W	0,015	Co	0,004	Ti	0,003	Sn<	0,001
Al<	0,001	Nb	0,004	B<	0,0001	Pb	0,008	Mg	0

Fuente: Laboratorio análisis químico universidad Nacional

El análisis químico realizado se muestra en la Tabla 7 y la certificación se encuentra en el Anexo A, con base en los resultados se puede afirmar que la composición química está muy cerca de la composición propuesta, es decir, el contenido de carbono en la lámina de acero, se encuentra entre 0,40% a 0,50% en contenido de carbono.

## 8.2 Determinación de temperaturas críticas de temple

Para las temperaturas comprendidas entre Ac1 y Ac3, zona conocida como: de Austenización parcial, de temperaturas intercríticas o de doble fase; derivando su nombre por la presencia de Ferrita y Austenita, las temperaturas se pueden calcular de la siguiente manera (método Andrews).<sup>2</sup>

$$AC3 = 910 - 203\sqrt{C} - 15.2 Ni + 44.7 Si + 104 V + 3.15Mo + 13.5W$$

**Ecuación 1**

<sup>2</sup> K.W. Andrews, Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures, JISI, Vol. 183, 1956, p 349-359.

$$AC_1 = 723 - 10.7Mn - 16.9Ni + 29.1Si + 16.9Cr + 6.38W$$

### Ecuación 2

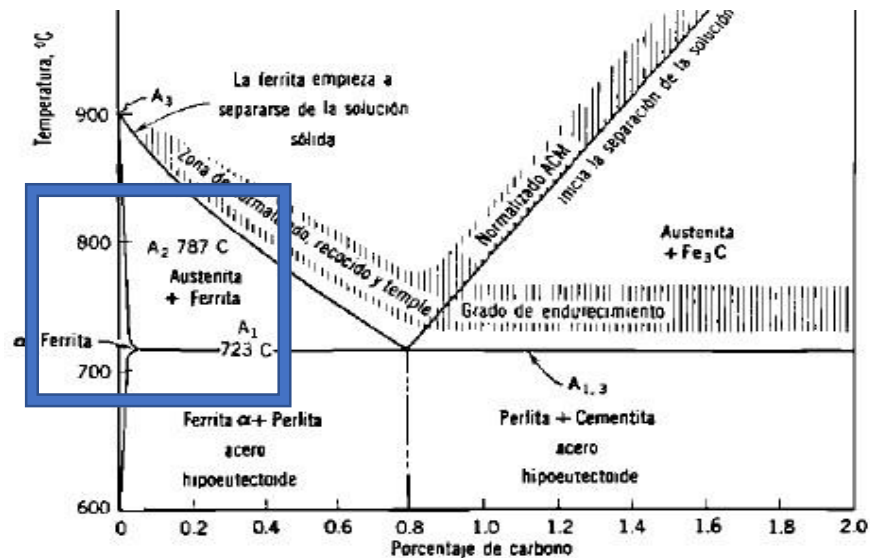
$$AC_3 = 910 - 203\sqrt{0.413} - 15.2(0.012) + 44.7(0.219) + 104(0.001) + 31.5(0.008) + 13.5(0.013)$$

$$AC_3 = 789.69 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$AC_1 = 723 - 10.7 (0.6929) - 16.9 (0.012) + 29.1 (0.219) + 16.9 (0.011) + 390(0.039) + 6.38 (0.013)$$

$$AC_1 = 738.908 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Ilustración 4 Intervalo de temperaturas de temple intercrítico

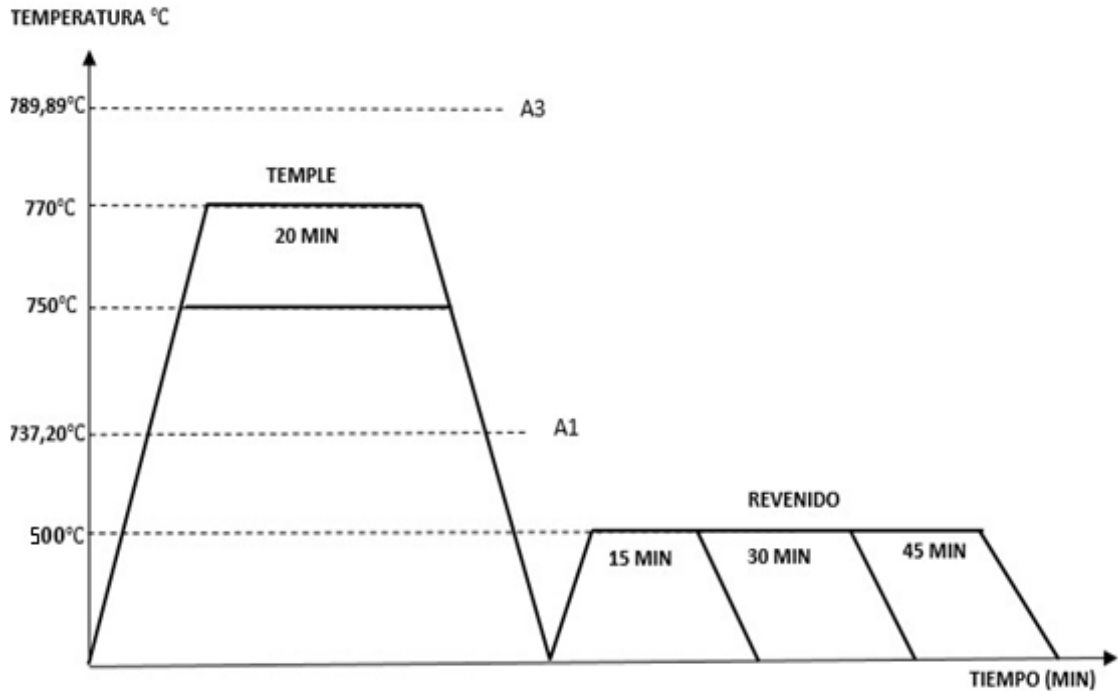


Autor: Adaptado [22]

Para lograr una microestructura Dual-Phase es preciso llevar el material a la zona ( $\alpha + \gamma$ ) del diagrama Fe-C, esto es en el rango de temperaturas comprendidas entre  $Ac_1$  y  $Ac_3$ , llamado también de temperaturas intercríticas. Ejecutando un enfriamiento rápido desde estas temperaturas la Austenita presente, se transforma en Martensita obteniendo las dos fases a temperatura ambiente. [13]

**7.7 Metodología de calentamiento y enfriamiento del tratamiento térmico**  
A continuación, en la ilustración 6, se observa un esquema de la secuencia de tratamientos térmicos aplicados en el proyecto. Ilustración 6 Secuencia de tratamientos térmicos [3] [8].

**Ilustración 5 Secuencia tratamientos de térmicos**



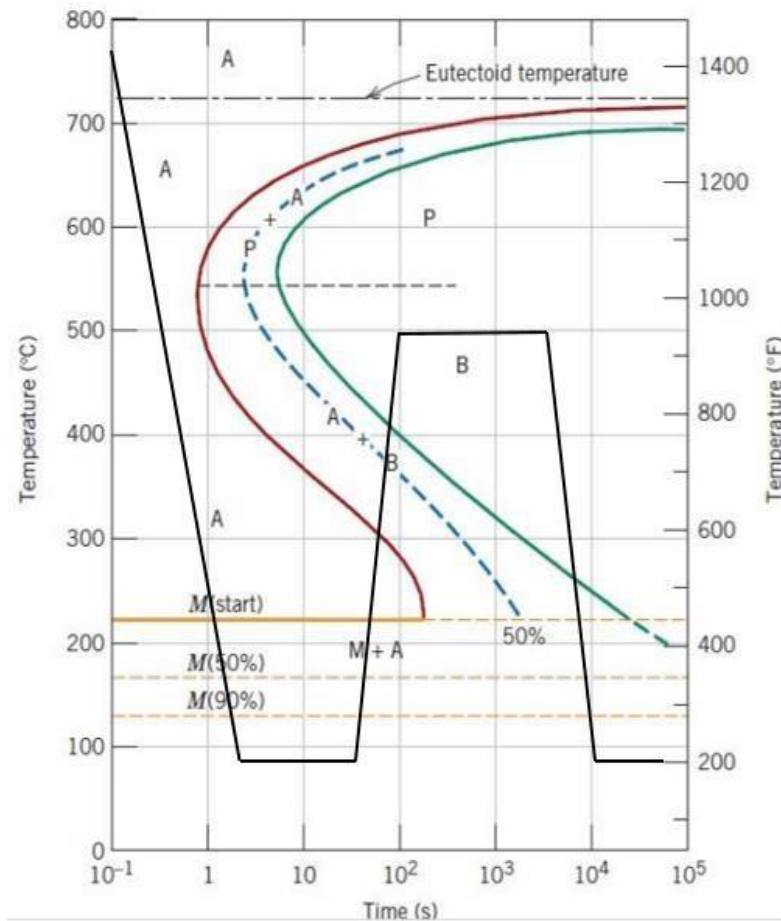
Fuente: Autor

La temperatura aplicada en el revenido, se establece en 500°C, recomendada por el catálogo de aceros de Colombia, así se varía la temperatura de sostenimiento del temple. [18]

### 8.3 Diagrama de tiempo, transformación, temperatura (TTT)

Los diagramas TTT, Son muy útiles para entender las transformaciones de un acero que se enfría isotérmicamente. En este caso para la fase Austenítica, que es inestable debajo de la temperatura de transformación Eutectoide.

**Ilustración 6 Diagrama TTT para temple y revenido del acero**



Fuente: Adaptado [22]

La ilustración 7, muestra las transformaciones presentes durante un temple. Se empieza en una zona Ac1 o Ac3, donde se encuentra la Austenita estable, cuando descendemos la temperatura bruscamente con agua a temperatura ambiente con agitación, la línea de transformación se encuentra en la zona de Austenita inestable. [1]

#### 8.4 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza Rockwell consiste en aplicar una carga mediante un penetrador ya sea de bola o de tipo cónico con un ángulo de  $120^\circ \pm 30^\circ$  sobre una probeta. Con este ensayo se busca determinar la resistencia que tiene el acero AISI/SAE 1045 a ser penetrado lo que comúnmente se le llama la dureza.

El ensayo de durezas Brinell, es el que se emplea para determinar la dureza de un material mediante la penetración en él de una esfera o bola de acero templado de determinado diámetro en la superficie que se ensaya, bajo una carga dada y durante determinado intervalo de tiempo.

El valor de dureza Vickers son continuos al largo del rango de durezas del material. Generalmente los valores de dureza son independientes a la carga

aplicada en el ensayo, de esta manera si el perfil de durezas es constante se obtendrán los mismos resultados en Vickers con cargas de 50g como a 500g

Para este estudio, se ha utilizado el método de aplicación HRC y HRB, es decir Dureza Rockwell de clase C. Se ha utilizado este método, porque es aconsejable para cualquier tipo de acero o aleaciones que hayan sido endurecidos, el cual, aplica para este caso debido a que el acero AISI/SAE 1045 trabajado se ha influenciado bajo un tratamiento térmico de temple en agua y posterior revenido.

## 9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 Estudio metalográfico

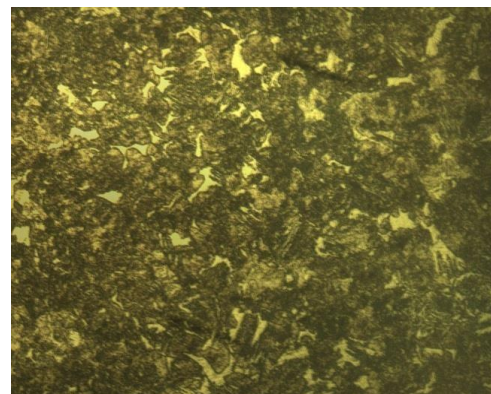
Esta probeta o muestra, es pulida metalográficamente acondicionándola mediante la abrasión de lijas o polvos muy finos. Una vez pulida la muestra o probeta, se procede a atacarla químicamente, el cual, para este proyecto se utilizó Nital, con una concentración máxima del 3% y después se procedió a observar y determinar sus características, mediante un microscopio de barrido marca Olympus de referencia CH2. Resultados estudio metalográfico

En las ilustraciones 8, 9, 10, 11, 12, 13, se muestran las diferentes imágenes obtenidas a través del microscopio óptico Convencional unas vistas metalográficas tomadas a 200 y 500 aumentos.

#### ***Ilustración 7 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 750 °C con 15 minutos de revenido a 500°C***



**(a)**



**(b)**

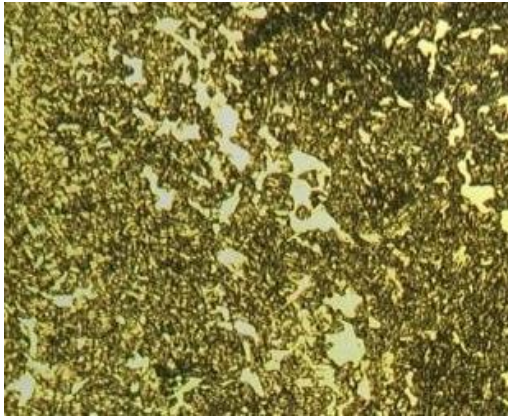
**(a) Aumentos 200 (b) Aumentos 500**

Fuente: Autor (Laboratorio universidad Libre)

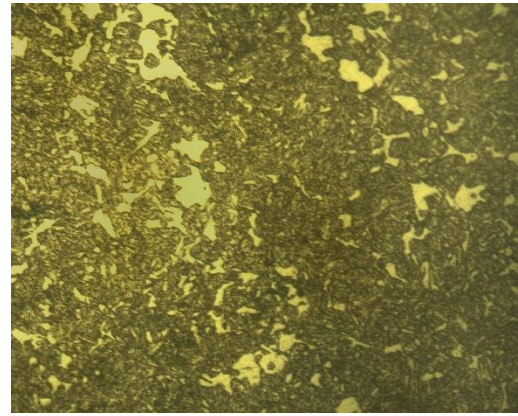
En estas micrografías se logra descartar la presencia de Bainita, la cual tiene un patrón direccional referente, en cambio, la Martensita no presenta ninguna direccionalidad en particular, lo que permite descartar la Bainita en la microestructura. [14]

La ilustración 8, denota que en las metalografías realizadas al material con un temple de 750°C, después del revenido con 15 minutos. La microestructura evidencia su composición bifásica compuesta por una matriz Ferrítica con pequeñas islas de Martensita, aunque también se refleja también en muy baja cantidad de pequeños rastros de perlita.

***Ilustración 8 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 770 °C con 15 minutos de revenido a 500°C***



**(c)**



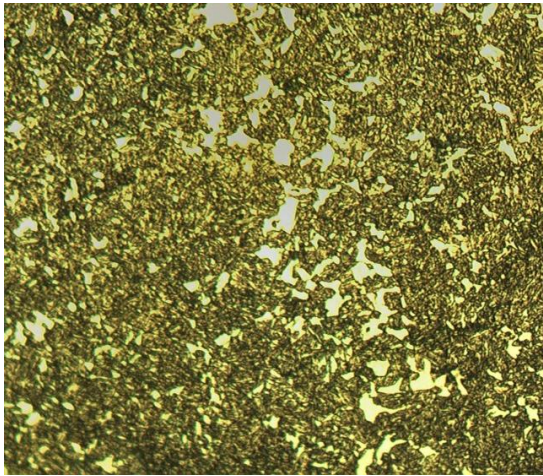
**(d)**

**(c) Aumentos 200 (d) Aumentos 500**

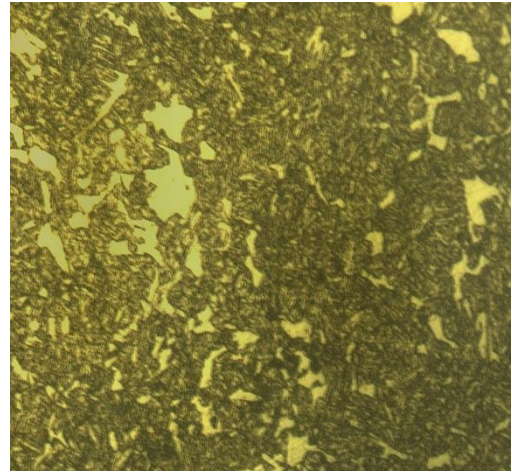
Fuente: Autor (Laboratorio universidad Libre)

La ilustración 9, denota que en las metalografías realizadas al material con un temple de 770°C, después del revenido con 15 minutos. La microestructura evidencia su composición bifásica compuesta por una matriz Ferrítica con pequeñas islas de Martensita, en esta ilustración se refleja un ligero aumento en las islas de Martensita, producto del aumento de la temperatura de temple.

***Ilustración 9 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 750 °C con 30 minutos de revenido a 500°C***



**(e)**



**(f)**

**(e)** Aumentos 200 **(f)** Aumentos 505

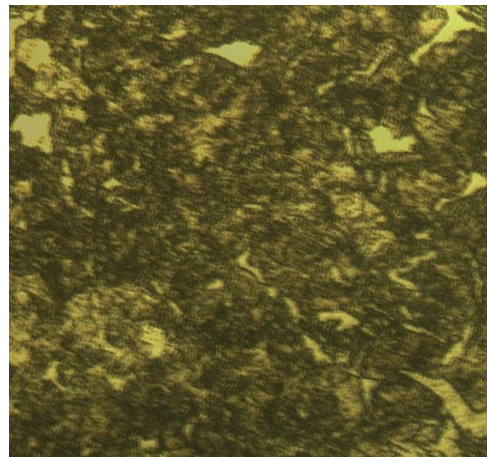
Fuente: Autor (Laboratorio universidad Libre)

La ilustración 10, denota que en las metalografías realizadas al material con un temple de 750°C, después del revenido con 30 minutos. La microestructura evidencia su composición bifásica compuesta por una matriz Ferrítica con pequeñas islas de Martensita, en esta ilustración se refleja un cambio en la matriz Ferrítica, debido a la transformación de Austenita retenida a Ferrita.

***Ilustración 10 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 770 °C con 30 minutos de revenido a 500°C***



**(g)**



**(h)**

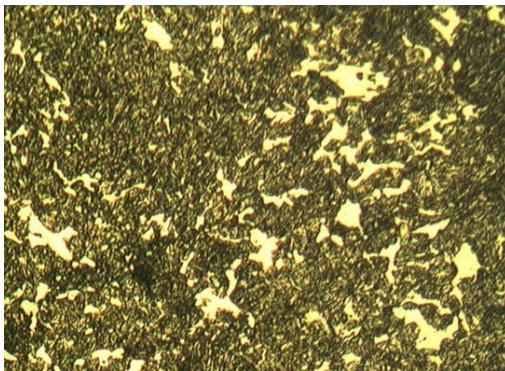
**(g)** Aumentos 200 **(h)** Aumentos 500

Fuente: Autor (Laboratorio universidad Libre)

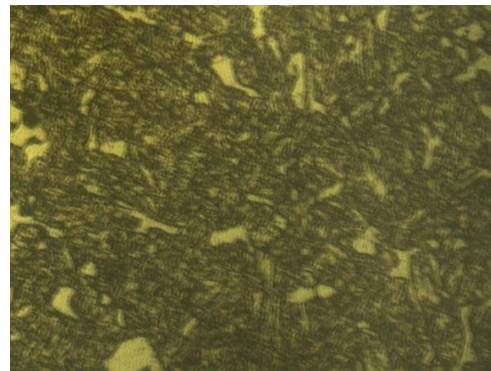
La ilustración 11, denota que en las metalografías realizadas al material con un temple de 770°C, después del revenido con 30 minutos. La microestructura evidencia su composición bifásica compuesta por una matriz Ferrítica con pequeñas islas de Martensita.

La aplicación de revenidos con 15 y 30 minutos no produce cambios apenas apreciables en la estructura de la Martensita. La Martensita templada disminuía rápidamente durante el revenido. Esta disminución inicial se debe principalmente a la eliminación de los bordes de bajo ángulo entre láminas de orientaciones similares.

***Ilustración 11 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 750 °C con 45 minutos de revenido a 500°C***



**(i)**



**(j)**

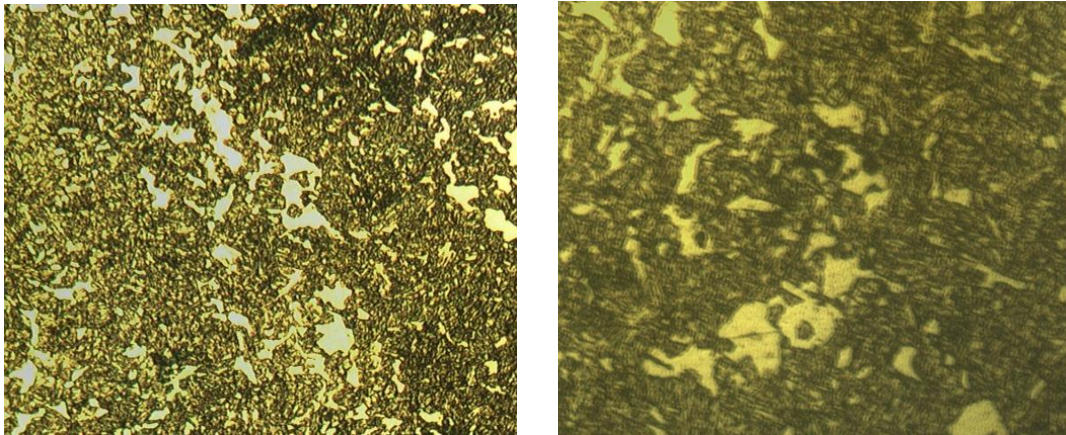
**(i) Aumentos 200 (j) Aumentos 500**

Fuente: Autor (Laboratorio universidad Libre)

La ilustración 9, denota que en las metalografías realizadas al material con un temple de 770°C, después del revenido con 45 minutos. La microestructura evidencia su composición bifásica compuesta por una matriz Ferrítica con pequeñas islas de Martensita.



**Ilustración 12 Metalografía AISI/SAE 1045 temple en agua a 770 °C con 45 minutos de revenido a 500°C**



**(k)**

**(l)**

**(k)** Aumentos 200 **(l)** Aumentos 500

Fuente: Autor (Laboratorio universidad Libre)

Las anteriores tomas son el resultado de atacar las probetas con NITAL al 3%.

En estas micrografías se logra descartar la presencia de Bainita, la cual tiene un patrón direccional referente, en cambio, la Martensita no presenta ninguna direccionalidad en particular, lo que permite descartar la Bainita en la microestructura. [14]

Las ilustraciones 8, 9, 10, y 11, denotan que en las metalografías realizadas al material después del revenido con 15, 30 y 45 minutos respectivamente. La microestructura evidencia su composición bifásica compuesta por una matriz Ferrítica con pequeñas islas de Martensita, aunque también se refleja también en muy baja cantidad de pequeños rastros de perlita.

En las micrografías **(d)** y **(f)**, se pueden observar una microestructura acicular típica de aceros templados, se aprecian algunas agujas de Martensita y unos puntos blancos que parecen ser Ferrita Eutectoide, la microestructura, que se presenta es preferencialmente Martensítica. Las zonas claras de las metalografías, muestran la base Ferrítica del acero, las zonas oscuras dan a conocer la cantidad de Martensita obtenida después del tratamiento térmico intercrítico. [18]

La aplicación de revenidos con 15, 30 y 45 minutos no produce cambios apenas apreciables en la estructura de la Martensita. La Martensita templada disminuía rápidamente durante el revenido. Esta disminución inicial se debe principalmente a la eliminación de los bordes de bajo ángulo entre láminas de orientaciones similares. [7]

La semejanza en la microestructura del material se relaciona con el poco cambio generado por el revenido, en la dureza, debido a que los valores no sufren un cambio significativo, en los diferentes tiempos permanencia.

## 9.2 Ensayo de dureza

Para este estudio las pruebas de dureza, se tomaron a lo largo de una probeta del material base. Sin ningún tipo de tratamiento térmico, los resultados se reflejan en la Tabla 9. En la Ilustración 13, se muestra el comportamiento de las durezas obtenidas.

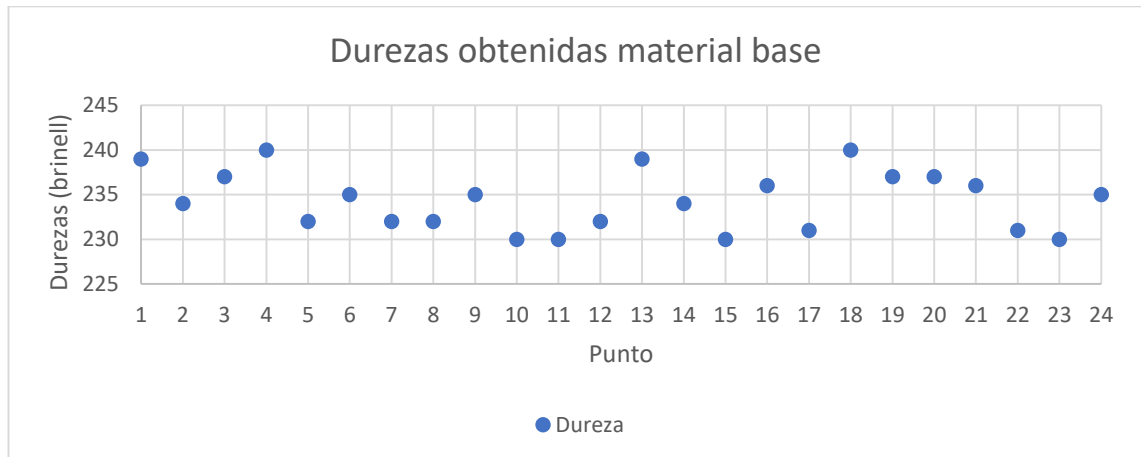
**Tabla 8 Durezas acero 1045 normalizado**

Punto	Dureza HV (Vickers)	Punto	Dureza HV (Vickers)	Punto	Dureza HV (Vickers)
1	251	9	242	17	243
2	242	10	241	18	253
3	249	11	234	19	249
4	240	12	244	20	251
5	252	13	251	21	248
6	247	14	246	22	243
7	244	15	242	23	239
8	239	16	248	24	247

Fuente: Autor (Laboratorio universidad Libre)

En la ilustración 14, La desviación estándar muestra, que la dispersión de datos respecto a la media aritmética obtenida de 234.288 HRB, es de 3.261 HRB, la cual, es un 0.62% de dispersión del promedio de dureza en las muestras. La poca desviación se debe a un buen proceso de función y conformado de la lámina de acero AISI SAE1045 adquirida. [14]

### Ilustración 13 Durezas material base



Fuente: Autor

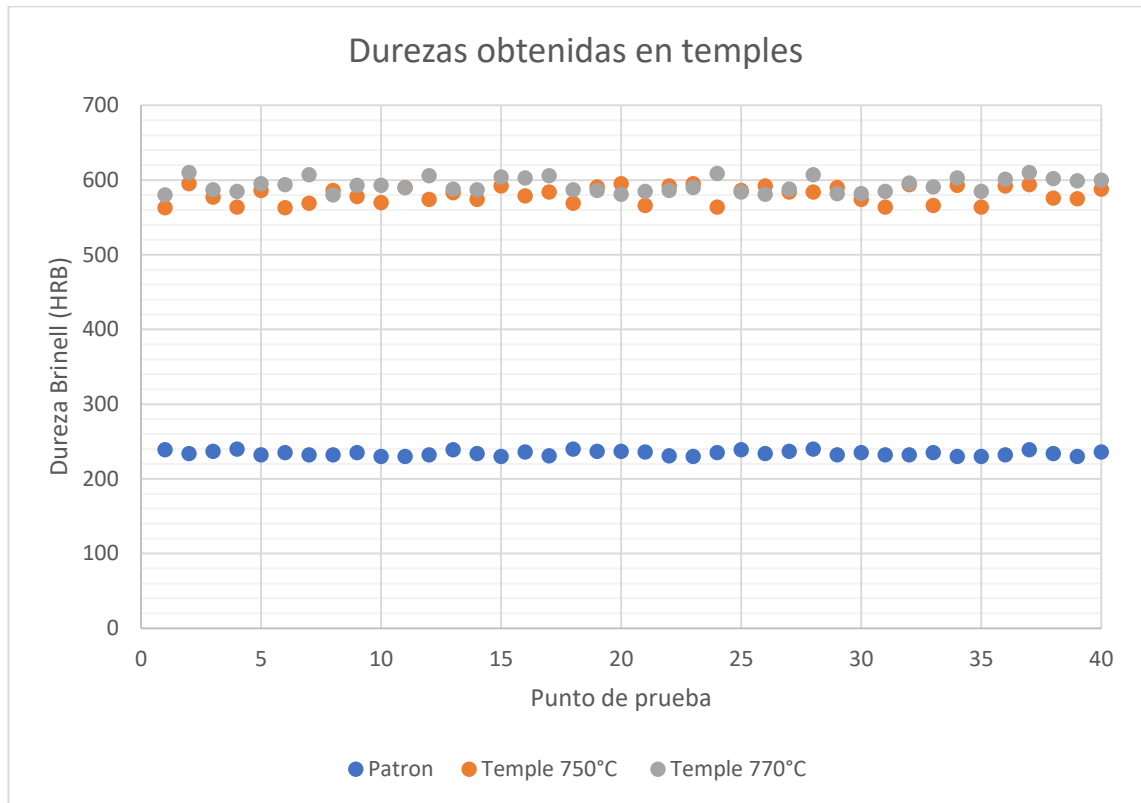
*Media aritmética = 234.288 HRB*

*Desviación estandar = 3.261 HRB*

#### **9.2.1.1 Resultado de dureza probetas templadas**

En este estudio, las pruebas de dureza se elaboraron con las probetas templadas a 770°C y 750°C. Este temple se elaboró en un medio de enfriamiento en agua. Como resultado en la Ilustración 14, se obtuvo un gran incremento en la dureza del material base.

### Ilustración 14 Durezas del temple



Fuente: Autor

En la Ilustración 14 se observa un aumento considerable en la dureza HRC obtenidas en las probetas de 770°C y 750°C, de aproximadamente el 300 % comparado con el material entregado por el fabricante.

- Temple a 750°C

*Media aritmética temples a 750°C = 580.1 HRB*

*Desviación para temples a 750°C = 8.65 HRB*

- Temple a 770°C

*Media aritmética temples a 770°C = 592.1 HRB*

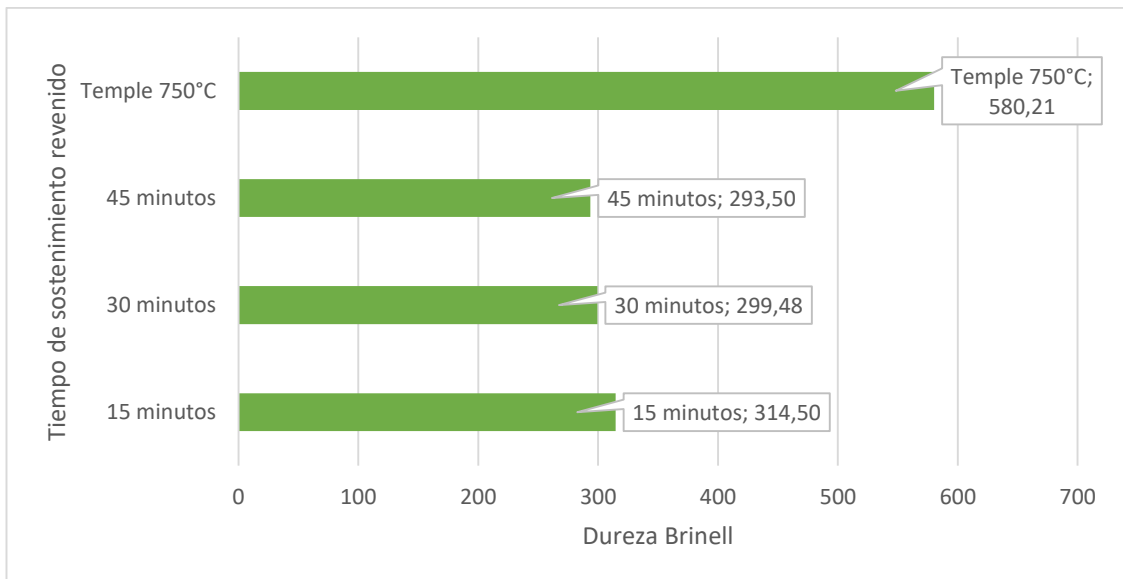
*Desviación para temples a 770°C = 9.64 HRB*

En la ilustración 14, la desviación estándar de las muestras para temples a 750°C y 770°C, son de 8.65 y 9.64 HRB respectivamente, la cual, es un 0.63% de dispersión con respecto a la media aritmética de dureza. Se observa un comportamiento de mejor endurecimiento en las zonas cercanas a los bordes de las probetas, esto debido, al procedimiento de extracción del horno.

### 9.2.1.2 Resultado de dureza probetas revenidas

En este estudio, las pruebas de dureza se elaboraron con las probetas templadas con diferentes tiempos de permanencia en la mufla. Este revenido se elaboró a 500°C. Como resultado en la Ilustración 15, se obtuvo que la dureza inferior a la obtenida en el temple con un 8% de diferencia.

**Ilustración 15 Resultados de dureza para temples a 750°C con distintos tiempos de revenido**



Fuente: Autor

- Probetas con temple a 750°C y revenido de 15 minutos de sostenimiento

*Media aritmética temples a 750°C revenido 15 minutos = 311.9HRB*

*Desviación para temples a 750°C revenido 15 min = 9.28 HRB*

- Probetas con temple a 750°C y revenido de 30 minutos de sostenimiento

*Media aritmética temples a 750°C revenido 30 min = 301.41 HRB*

*Desviación para temples a 750°C revenido 30 min = 9.43 HRB*

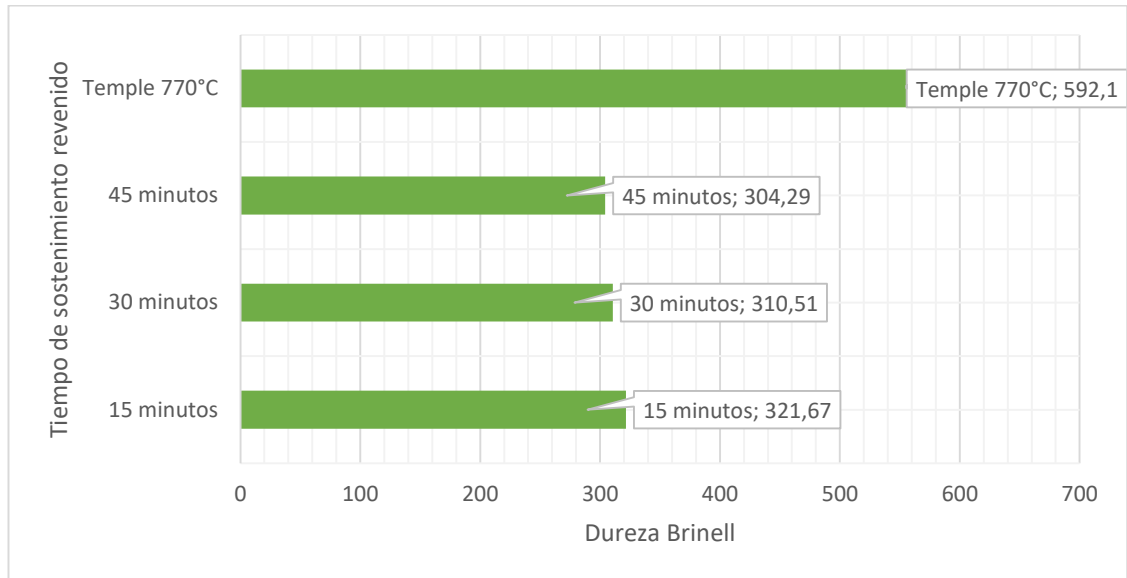
- Probetas con temple a 750°C y revenido de 45 minutos de sostenimiento

*Media aritmética temples a 750°C revenido 45min = 293.58 HRB*

*Desviación para temples a 750°C revenido 45 min = 9.44 HRB*

En la ilustración 15, las desviación estándar de las muestras para temple a 750°C con revenidos de 15, 30 y 45 minutos de permanencia en el horno, son de 9.28, 9.43 y 9.44 HRB respectivamente, la cual, es un 0.74% de dispersión con respecto a la media aritmética de dureza.

**Ilustración 16 Resultados de dureza para temple a 770°C con distintos tiempos de revenido**



Fuente: Autor

- Probetas con temple a 770°C y revenido de 15 minutos de sostenimiento

*Media aritmética temple a 770°C revenido 15 minutos = 582.29HRB*

*Desviación para temple a 770°C revenido 15 min = 8.61 HRB*

- Probetas con temple a 770°C y revenido de 30 minutos de sostenimiento

*Media aritmética temple a 770°C revenido 30 min = 583.83 HRB*

*Desviación para temple a 770°C revenido 30 min = 8.884 HRB*

- Probetas con temple a 770°C y revenido de 45 minutos de sostenimiento

*Media aritmética temple a 770°C revenido 45min = 581.58 HRB*

*Desviación para temple a 770°C revenido 45 min = 9.08 HRB*

En la ilustración 16, las desviación estándar de las muestras para temple a 770°C con revenidos de 15, 30 y 45 minutos de permanencia en el horno, son

de 8.81, 8.884 y 9.08 HRB respectivamente, la cual, es un 0.54% de dispersión con respecto a la media aritmética de dureza.

En la Ilustración 15 y 16, se observa una disminución en la dureza HRC debido a la aplicación del revenido a una temperatura de 500°C, aproximadamente el 8% comparado con las probetas templadas a 770°C y 750°C. A medida que se incrementa la temperatura de revenido y el efecto del contenido de carbono de la Martensita templada, disminuye la dureza. [12]

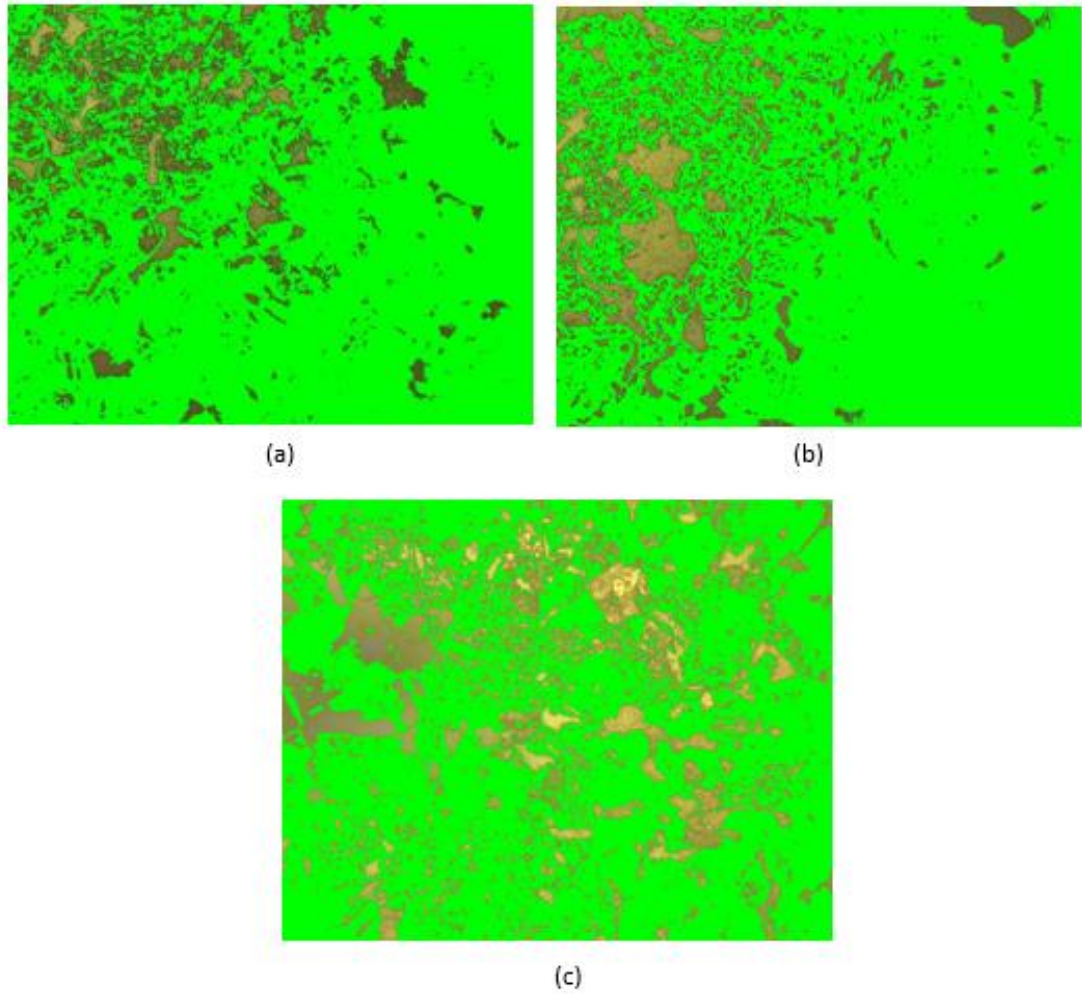
La similitud en la microestructura del material se relaciona con el poco cambio generado con el revenido en cuanto a la dureza del material ya que tampoco hubo un cambio significativo como se mostró anteriormente, aunque se observa que dado el rango de temperatura tan alto del revenido generó un re afinamiento de grano en las probetas.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas de dureza se puede decir que no hay una relación directa entre la dureza y la temperatura. Puesto que para las probetas templadas en agua, aun con el aumento de la temperatura de tratamiento no se presentó una mayor dureza.

### **9.3 Fracciones volumétricas de Martensita**

La determinación de las fracciones volumétricas de Martensita obtenidas por el tratamiento térmico se determina por medio de análisis computacional, calculado con el programa adjunto al microscopio de metalografías de la universidad libre. A continuación, se muestra una ilustración de como el programa selecciona las zonas oscuras de la metalografía y nos da el resultado en porcentaje de la fase Martensita. [10]

**Ilustración 17 Fracciones encontradas en las metalografías**



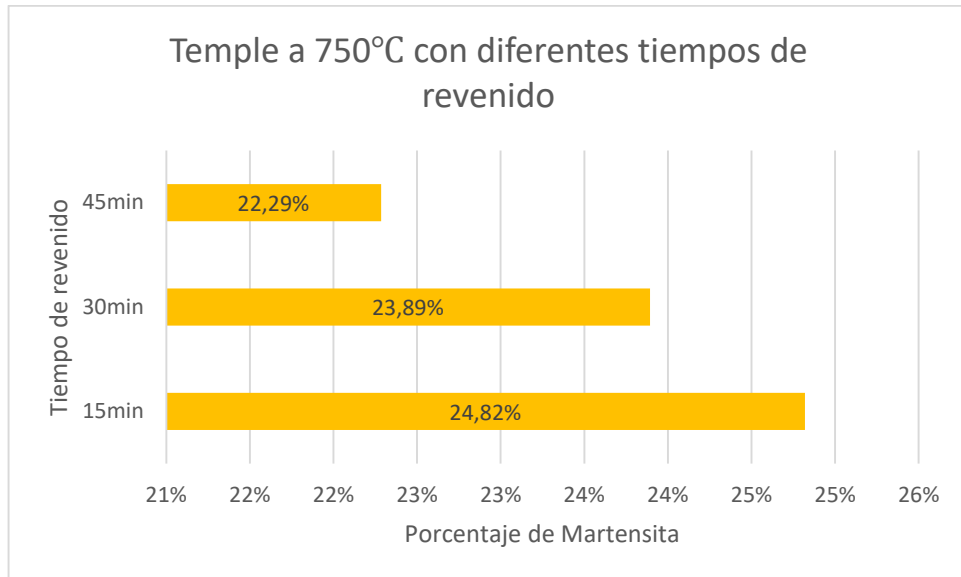
Fuente: Laboratorios de metalurgia, Universidad Libre de Colombia

(a) Fracciones de fases, temple a 770°C con revenido 15 minutos; (b) Fracciones de fases, temple a 770°C con revenido 30 minutos; (c) Fracciones de fases, temple a 770°C con revenido 45 minutos.

Posteriormente, el programa calcula los porcentajes de las fases presentes en el acero. En las siguientes ilustraciones 17 y 18, se muestran los resultados en porcentajes de las fracciones de Martensita encontradas en el acero tratado térmicamente.

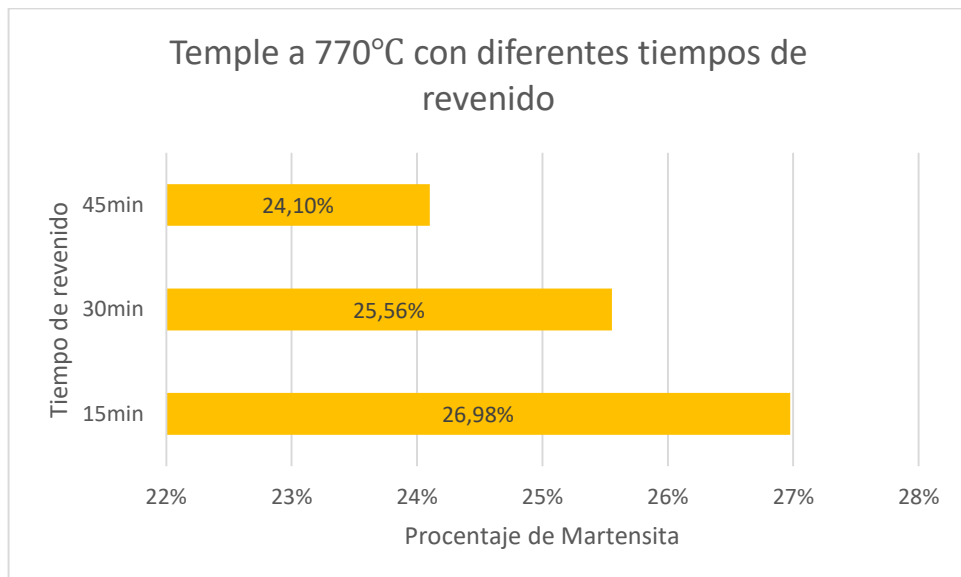


**Ilustración 18 Fracciones de Martensita en temple a 750°C para diferentes tipos de revenido**



Fuente: Autor

**Ilustración 19 Fracciones de Martensita en temple a 770°C para diferentes tipos de revenido**

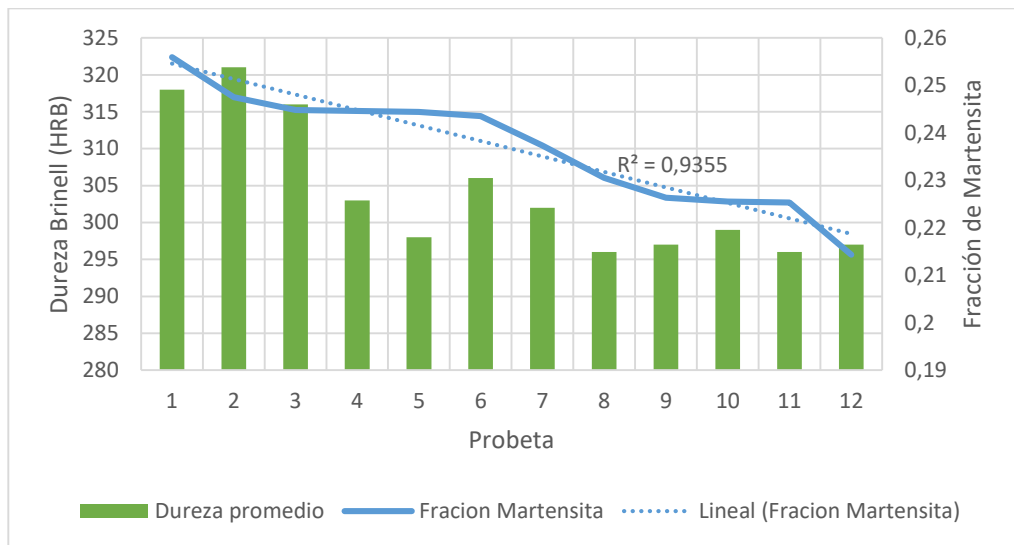


Fuente: Autor

#### 9.4 Relación fracciones volumétricas vs dureza

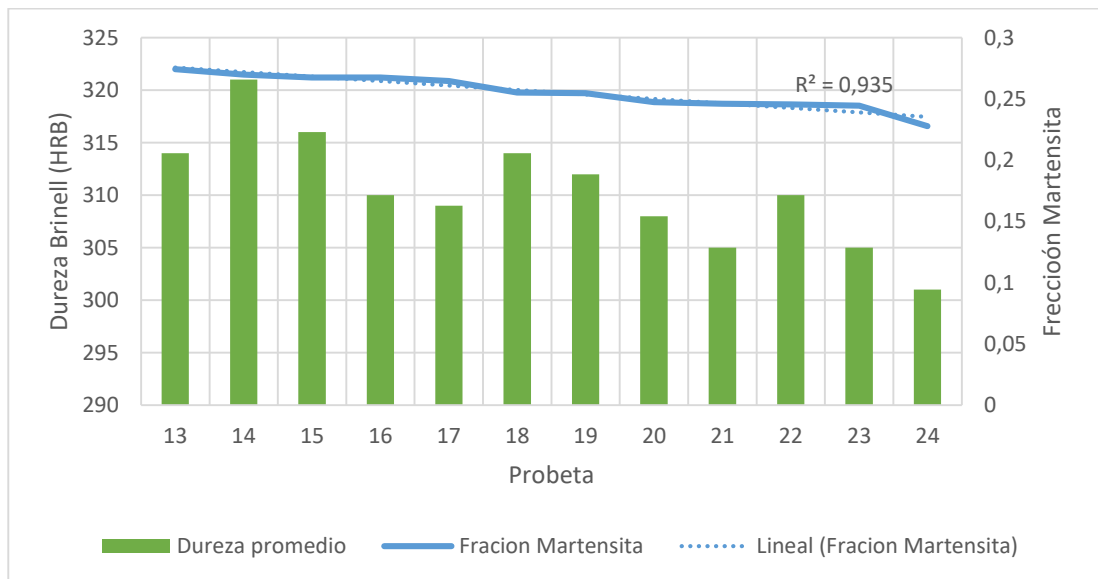
El desarrollo de la tecnología en el área de la computación, han permitido la automatización de procedimientos de análisis de imágenes que reducen el tiempo y los probables errores en el análisis de muestras metalográficas. Este método de prueba, describe un procedimiento de conteo manual sistemático para estimar estadísticamente la fracción de volumen de un componente o fase, a través de la microestructura, por medio de resaltar en una imagen la cantidad en fracción de dicha microestructura.

**Ilustración 20 Relación dureza con temple a 750°C vs fracción Martensita**



Fuente: Autor

**Ilustración 21 Relación dureza con temple a 770°C vs fracción Martensita**



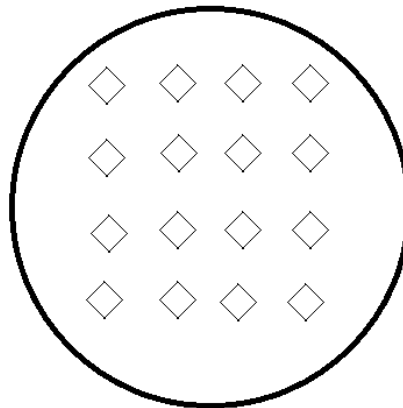
Fuente: Autor

En las ilustraciones 17 y 18, se observa como las fracciones tienen relación directa con las durezas obtenidas después del temple, se observa como al aumentar la temperatura de tratamiento la fracción de Martensita aumenta también.

### 9.5 Pruebas de microdureza en probetas

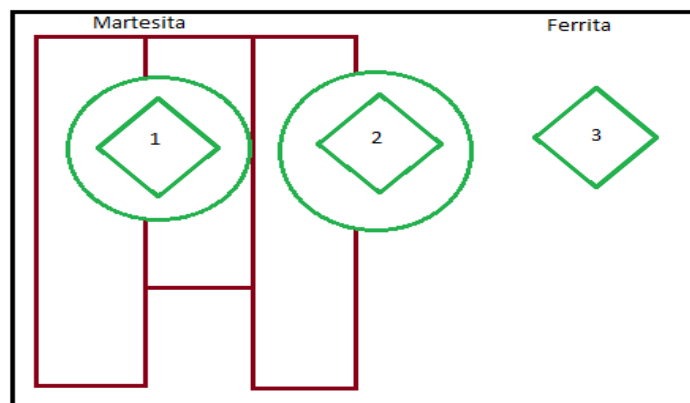
El ensayo de dureza, es simple y de alto rendimiento además de particularmente útil para evaluar propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material. El valor de dureza Vickers, son continuos al largo del rango de durezas del material. Generalmente los valores de dureza son independientes a la carga aplicada en el ensayo, de esta manera si el perfil de durezas es constante se obtendrán los mismos resultados en Vickers con cargas de 30g como a 500g. A continuación, en la ilustración 19, se muestra la forma en que el indentador aplica la carga en la probeta, se aplica un matriz de 4x4, para cada probeta estudiada.

**Ilustración 22 Matriz para indentador de microdureza**



Fuente: Autor del proyecto

**Ilustración 23 Puntos para la determinación de la microdureza**



Fuente: Autor del proyecto

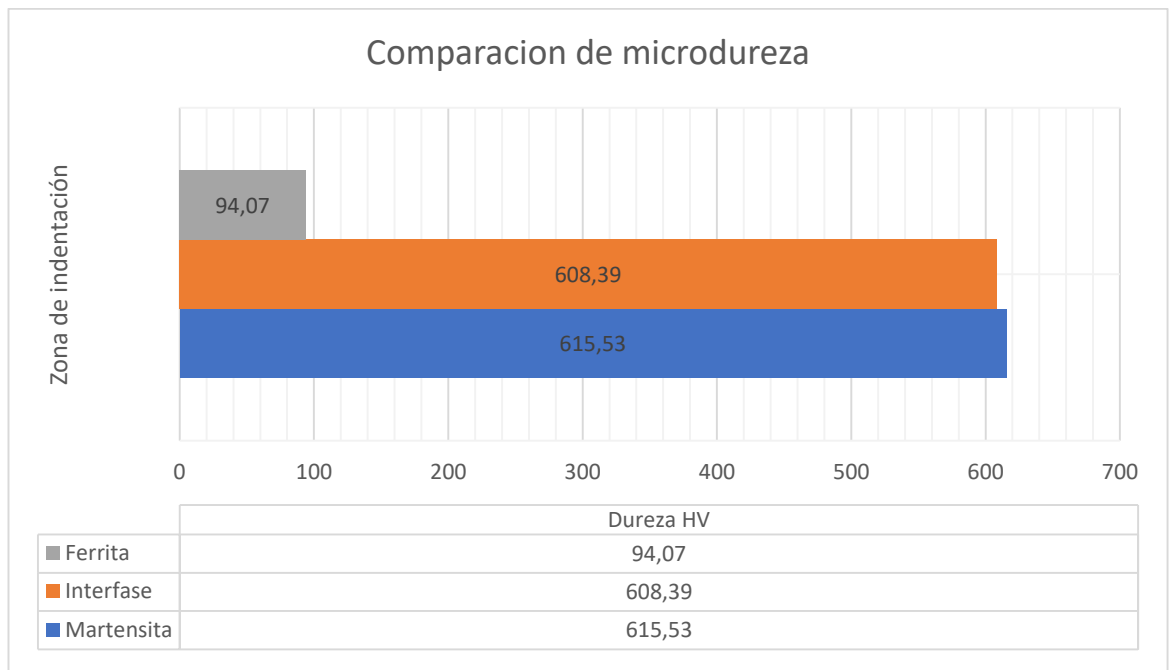
A continuación, en las tablas 9 y 10, se muestra el resultado de las diferentes indentaciones, para determinar la microdureza sobre las probetas.

**Tabla 9 Microdurezas en probetas templadas a 750°C**

Microdureza en probetas templadas a 750°C					
Toma	Dureza HV	Toma	Dureza HV	Toma HV	Dureza HV
1	614	1	614	1	617
2	620	2	619	2	616
3	620	3	621	3	610
4	612	4	612	4	617
5	613	5	623	5	613
Promedio					616,07
6	610	6	604	6	608
7	608	7	601	7	614
8	604	8	602	8	601
9	614	9	600	9	600
10	605	10	607	10	600
11	609	11	614	11	601
Promedio					605,67
12	90	12	96	12	102
13	93	13	91	13	102
14	96	14	98	14	89
15	92	15	94	15	102
16	98	16	91	16	95
Promedio					95,27

Fuente: Laboratorio de metalurgia, Universidad libre Bogotá, Colombia

**Ilustración 24 Comparación de microdurezas templadas a 750°C**



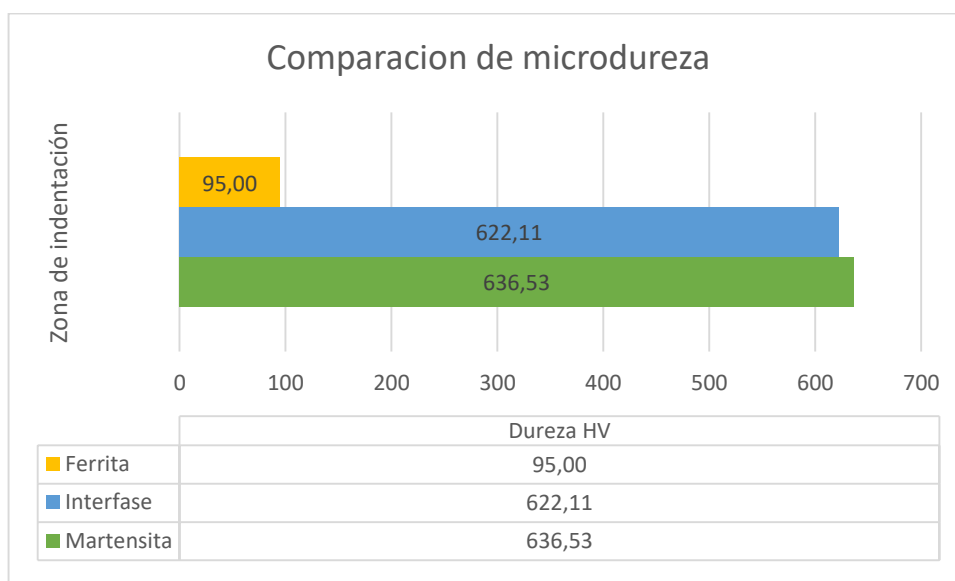
Fuente: Autor del proyecto

**Tabla 10 Microdurezas en probetas templadas a 770°C**

Microdureza en probetas templadas a 770°C					
Toma	Dureza HV	Toma	Dureza HV	Toma	Dureza HV
1	636	1	640	1	653
2	653	2	640	2	642
3	626	3	638	3	617
4	625	4	626	4	621
5	653	5	621	5	622
Promedio					<b>634,20</b>
6	629	6	613	6	620
7	613	7	623	7	611
8	616	8	634	8	631
9	620	9	620	9	618
10	621	10	611	10	620
11	629	11	630	11	624
Promedio					<b>621,28</b>
12	99	12	95	12	97
13	95	13	98	13	92
14	98	14	95	14	102
15	94	15	98	15	91
16	92	16	93	16	94
Promedio					<b>95,53</b>

Fuente: Laboratorio de metalurgia, Universidad libre Bogotá, Colombia

**Ilustración 25 Comparación de microdurezas templadas a 750°C**



Fuente: Autor del proyecto

En la tabla 9, se muestran los datos de dureza tomados de las probetas templadas a 750°C, para cada una de ellas posee un total de las 16 indentaciones. La dureza en las probetas muestra similitud en sus valores, encontrándose una baja desviación estándar en los datos encontrados, en las probetas 1 – 3 siendo un poco mayor para probeta número 1 con respecto a las demás.

En la tabla número 10, se muestran los datos de dureza tomados para las probetas templadas a 770°C, se observa baja variabilidad de los valores de dureza, respecto a los anteriormente analizados, se encuentra en general baja dispersión de los datos. La dureza teórica para el material tratado en estas condiciones en promedio es de 600 HV.

Los datos de dureza para las probetas templadas a 750°C, se muestran en la tabla 9, se aprecia una mayor similitud en los datos de dureza hallados entre las probetas lo que genera aún, una menor desviación entre los valores con respecto a un valor promedio. Se puede evaluar una reducción significativa de dureza con respecto a las probetas templadas a 770°C. [15]

En las ilustraciones 21 y 22, Es evidente el cambio en la dureza, debido a la presencia de dos fases. En la zona de Martensita, se obtienen un promedio de microdureza de 640 HV. En la interface de las dos fases se observan valores un poco aleatorios de microdureza, un poco menores a los obtenidos en la Martensita. En la zona de la Ferrita, la parte blanda del acero, se logran microdurezas máximas de 100 HV.

## **9.6 Pruebas de desgaste abrasivo**

Las pruebas de desgaste abrasivo, comprenden el estudio y conocimiento de fenómenos como es la fricción y el rozamiento. Básicamente, se basa en estudio de las superficies que están en contacto y el movimiento relativo, así como los fenómenos que de ello se derivan. La abrasión se aplica en la industria y en el mantenimiento industrial, convirtiéndose en una ciencia multidisciplinar, en la cual, los conocimientos de física, química, matemática, mecánica de sólidos y fluidos, termodinámica, diseño de equipos o elementos de máquinas y procesos de mantenimiento se hacen necesarios

### **9.6.1 Normas aplicadas al estudio**

Los análisis de los datos obtenidos en las pruebas de desgaste abrasivo, se exponen por peso y volumen perdido.

El proceso de pesaje de las probetas, consta de una limpieza con alcohol para evitar posibles inconsistencias, este proyecto se basa en el proceso D de la norma ASTM G65, la cual, establece las variables de operación de proceso.



## 9.6.2 Resultados de pruebas a desgaste abrasivo

**Tabla 12 Resultados de pedida en peso para temples a 750 °C con diferentes tiempos de revenido**

Probeta	Condición	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Diferencia (gr)
1	750°C/45min	98,6661	95,7563	2,9098
2	750°C/45min	100,3324	97,4033	2,9291
3	750°C/45min	103,5855	100,6389	2,9466
4	750°C/45min	101,6148	98,7806	2,8342
5	750°C/30min	98,2266	95,8207	2,4059
6	750°C/30min	102,5564	99,9195	2,6369
7	750°C/30min	106,1586	103,6699	2,4887
8	750°C/30min	102,095	99,4865	2,6085
9	750°C/15min	96,1636	93,7669	2,3967
10	750°C/15min	101,0371	98,1943	2,8428
11	750°C/15min	100,9031	98,3977	2,5054
12	750°C/15min	101,6735	98,9249	2,7486

Fuente: Laboratorio de materiales, Universidad de los Andes

**Tabla 13 Resultados de pedida en peso para temples a 770 °C con diferentes tiempos de revenido**

Probeta	Condición	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Diferencia (gr)
13	770°C/45min	101,9663	99,1018	2,8645
14	770°C/45min	106,9603	104,1152	2,8451
15	770°C/45min	101,6942	98,7408	2,9534
16	770°C/45min	97,0272	94,2678	2,7594
17	770°C/30min	102,5236	99,7309	2,7927
18	770°C/30min	102,1142	99,1057	3,0085
19	770°C/30min	104,0593	101,2677	2,7916
20	770°C/30min	107,5676	104,8892	2,6784
21	770°C/15min	99,0776	97,029	2,0486
22	770°C/15min	108,5372	106,0936	2,4436
23	770°C/15min	101,7323	99,3128	2,4195
24	770°C/15min	102,9497	100,7475	2,2022

Fuente: Laboratorio de materiales, Universidad de los Andes



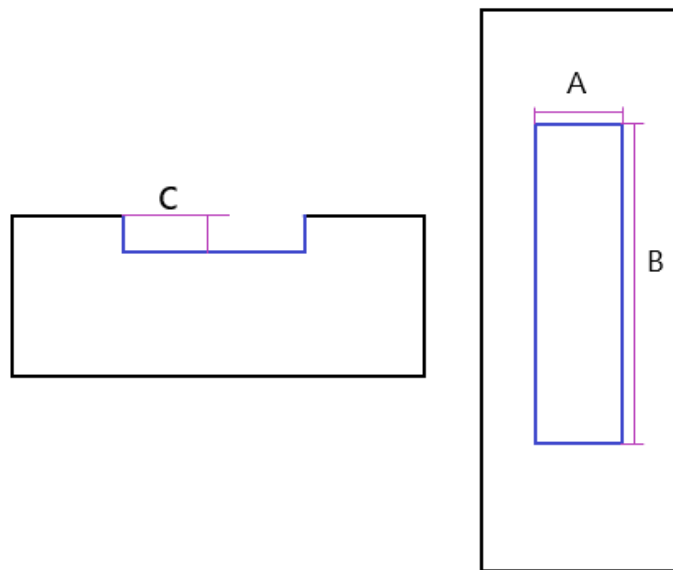
Los datos obtenidos en las tablas 10 y 11, demuestran que las probetas de este acero AISI SAE 1045, tratadas térmicamente tienden a ser duras, superior al material base utilizado. Para la evaluación del desgaste abrasivo, se debe obtener la cantidad de volumen perdido, se observa un comportamiento de aumento de pérdida con respecto al tiempo de revenido.

### 9.6.3 Pérdidas volumétricas en pruebas de desgaste abrasivo por medio de análisis de imágenes

Por medio de estereografía se pueden obtener imágenes aumentadas y claras, de la huella ocasionada por el desgaste. Por medio de un analizador de imágenes, se adquiere las medidas de la respectiva huella. De esta manera se pueden comparar las pérdidas volumétricas obtenidas por el medio matemático según la norma ASTM G65 y compáralas con un cálculo de volumen, basado en la geometría de la huella.

En la **Ilustración 28**, se muestra de manera ilustrativa las dimensiones tomadas en las diferentes probetas, estas medidas se obtienen por medio de un estereoscopio.

**Ilustración 27 dimensiones huella de desgaste**



Fuente: Autor

Para las dimensiones A y B, se utilizó un calibrador die de rey digital. Para medir la profundidad de la huella dimensión C, se utilizó un software analizador de imágenes, con el cual se determina la profundidad de la huella.

En la siguiente **Tabla 14**, se encuentran estipulados los resultados del cálculo para obtener el volumen perdido ( $mm^3$ ), para las dos diferentes temperaturas de temple realizados.

**Tabla 14 Resultado de pérdidas volumétricas para diferentes tiempos de temple**

<b>Perfidias volumétricas (mm<sup>3</sup>)</b>			
<b>750°C</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
<b>1</b>	294,532	305,113	314,590
<b>2</b>	315,084	296,408	366,039
<b>3</b>	319,892	307,821	348,771
<b>4</b>	305,113	328,656	384,151
<b>Promedio</b>	308,655	309,499	353,388
<b>770°C</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
<b>1</b>	278,392	272,428	299,378
<b>2</b>	276,692	275,236	307,821
<b>3</b>	273,839	285,819	290,521
<b>4</b>	290,521	305,113	320,228
<b>Promedio</b>	279,861	284,649	304,487

Fuente: Autor

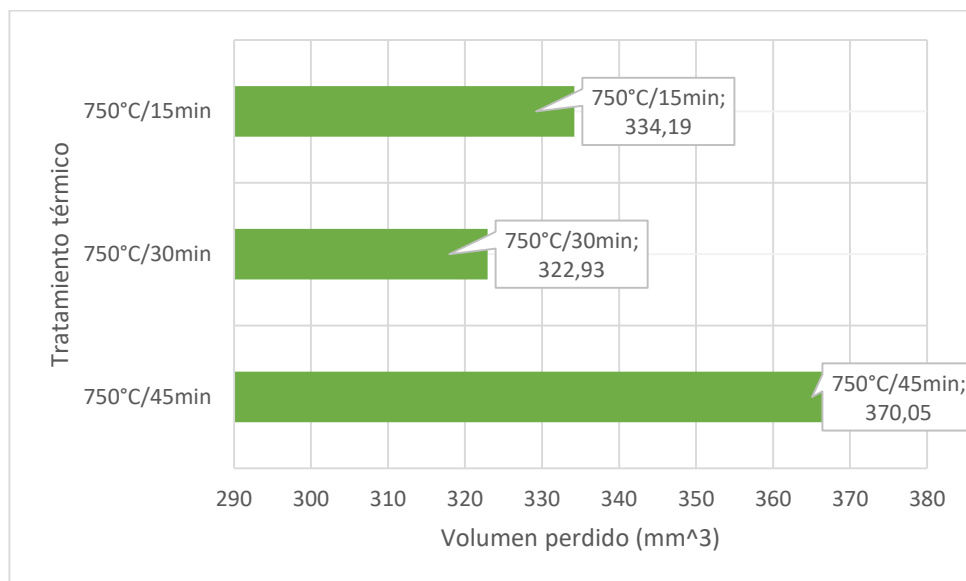
El comportamiento de los datos obtenidos por medio de cálculo dimensional muestra similitud, comparándolos con los datos obtenidos por medio de la norma ASTM G65, se encuentra una diferencia en la exactitud de los resultados, esto debido a errores en la medición de las probetas.

#### 9.6.4 Pérdidas volumétricas en pruebas de desgaste abrasivo basada en la norma ASTM G65

Para determinar la pérdida volumétrica se debe tener presente la densidad del acero la cual se muestra a continuación<sup>3</sup>:

Densidad del acero AISI SAE 1045 :  $7.85 \frac{gr}{cm^3}$ .

#### **Ilustración 28 Resultado de pérdida volumétrica en temple a 750 °C con diferentes tiempos de revenido**

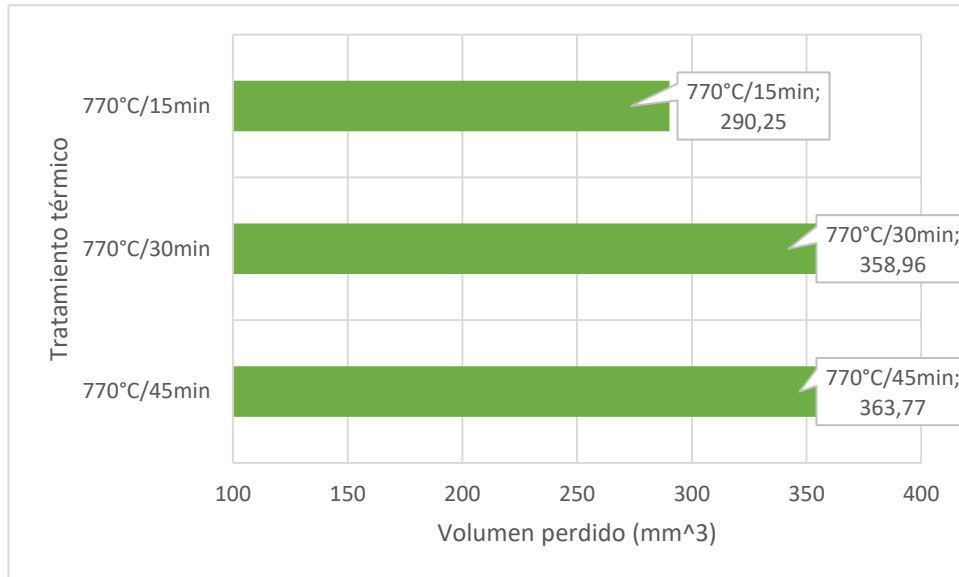


Fuente: Autor

La resistencia al desgaste abrasivo aumento, como se observa en la ilustración 22, las probetas de acero AISI/SAE 1045, trabajadas con tratamientos térmicos de doble fase con tiempos de revenido de 15 minutos, obtienen un mayor dureza que las tratadas con tiempos de permanencia mayores a 30 minutos.

<sup>3</sup> Catálogo SAE 1020 y SAE 1045, General de aceros S.A, Colombia 2007 pág. 3

**Ilustración 29 Resultado de pérdida volumétrica en temple a 770 °C con diferentes tiempos de revenido**



Fuente: Autor

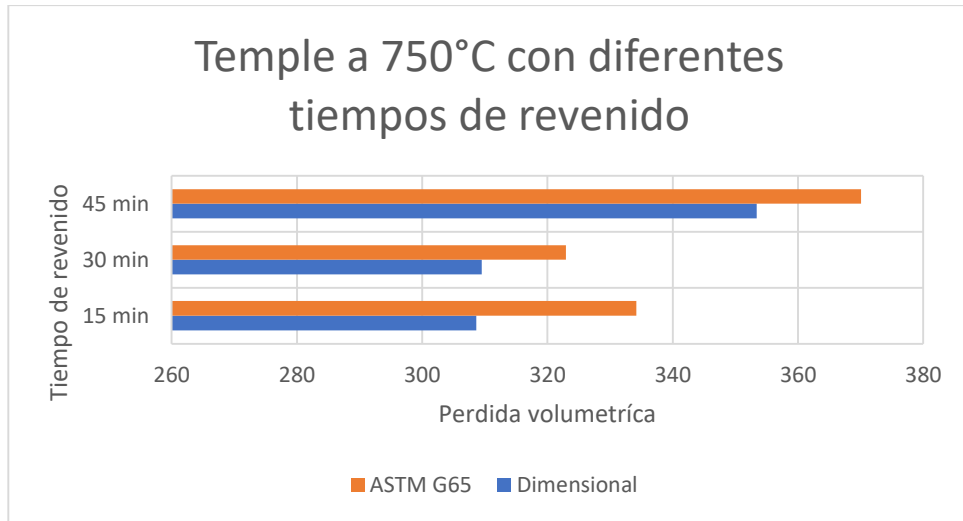
En la ilustración 23, se obtiene un comportamiento similar al encontrado en los tratamientos térmicos intercríticos de 750 °C, el acero mejora su resistencia al desgaste abrasivo propia del material.

La duración de la prueba reside en 30 minutos por probeta; por tal motivo, se resaltan valores altos de volúmenes perdidos, además de ser el acero 1045 un material duro después del tratamiento. Las pérdidas volumétricas, disminuyen cuando aumenta la dureza de la probeta.

**9.6.5 Comparación entre pérdidas volumétricas generadas por análisis de imagen VS pérdidas calculas por norma ASTM G65**

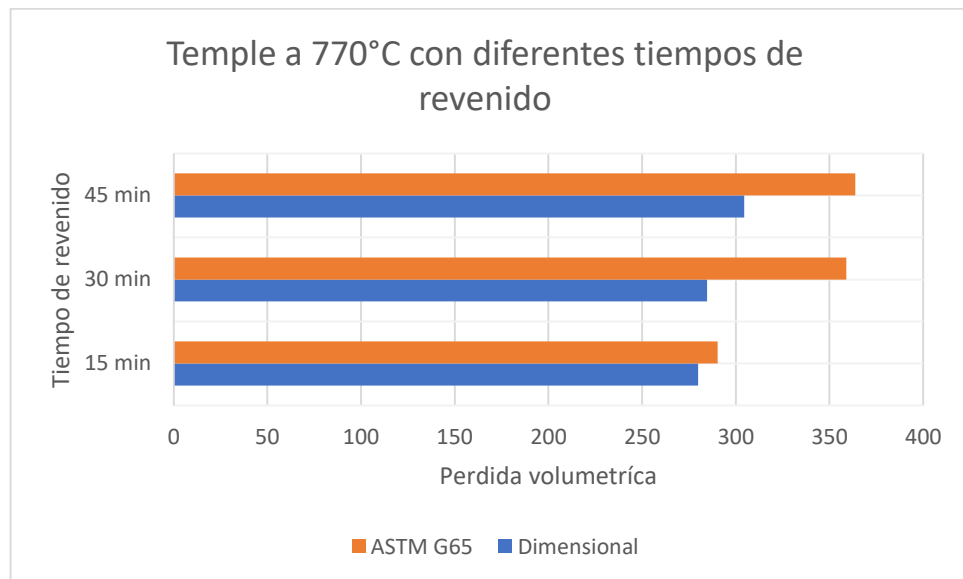
En las siguientes **ilustraciones 31 y 32**, se muestra la comparación generada a partir de los cálculos de pérdida volumétrica, en estas se resaltan dos métodos de obtención, el primero el cálculo dimensional, apoyándose en un software analizador de imágenes. Por último el método presentado en la norma ASTM G65.

**Ilustración 30 Comparación de pérdidas volumétricas para temple a 750°C**



Fuente: Autor

**Ilustración 31 Comparación de pérdidas volumétricas para temple a 770°C**



Fuente: Autor

En las **ilustraciones 31 y 32**, las pérdidas volumétricas, presentan un comportamiento similar, se encuentra una diferencia entre los resultados de  $\pm 25 \text{ mm}^3$  para el caso de temple realizado a 750 °C y para el caso de 770 °C una diferencia de  $\pm 18 \text{ mm}^3$ , esta diferencia resulta del método de obtención del dimensionamiento de la huella, debido a errores de precisión.

### 9.6.6 Análisis de datos obtenidos en temple a 750 °C en diferentes tiempos de revenido

$$Media = \frac{\sum \text{volumenes perdidos}}{\text{numero de muestras}} \text{ (Ecuación 1)}$$

$$Media \ 45 \text{ min} = 370.0505 \text{ mm}^3$$

$$Media \ 30 \text{ min} = 322.9324 \text{ mm}^3$$

$$Media \ 15 \text{ min} = 314.1990 \text{ mm}^3$$

$$\sigma^2(\text{varianza}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - Media)^2}{\text{Numero de muestras}} \text{ (Ecuación 2)}$$

$$\sigma^2 \ 45 \text{ min} = 2309.2703 \text{ mm}^5$$

$$\sigma^2 \ 30 \text{ min} = 930.8141 \text{ mm}^5$$

$$\sigma^2 \ 15 \text{ min} = 2668.2960 \text{ mm}^5$$

$$\sigma(\text{desviacion}) = \sqrt{\sigma^2} \text{ (Ecuación 3)}$$

$$\sigma \ 45 \text{ min} = 48.0548 \text{ mm}^3$$

$$\sigma \ 30 \text{ min} = 30.5092 \text{ mm}^3$$

$$\sigma \ 15 \text{ min} = 51.6555 \text{ mm}^3$$

El análisis de datos, nos demuestra la fiabilidad de las pruebas, se observa que los temple a 750°C y revenidos a 30 y 15 minutos arrojan una buena desviación, caso contrario ocurre con los revenidos a 45 minutos, donde una prueba con el flujo de arena incorrecto aumento la desviación.

### 9.6.7 Análisis de datos obtenidos en temple a 770 °C en diferentes tiempos de revenido

$$Media = \frac{\sum \text{volumenes perdidos}}{\text{numero de muestras}} \text{ (Ecuación 3)}$$

$$Media \ 45 \text{ min} = 363.3756 \text{ mm}^3$$

$$Media \ 30 \text{ min} = 358.3655 \text{ mm}^3$$

$$Media \ 15 \text{ min} = 290.2567 \text{ mm}^3$$

$$\sigma^2(\text{varianza}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - Media)^2}{\text{Numero de muestras}} \text{ (Ecuación 4)}$$

$$\sigma^2 \ 45 \text{ min} = 2955.4495 \text{ mm}^5$$

$$\sigma^2 \ 30 \text{ min} = 231.7145 \text{ mm}^5$$

$$\sigma^2 15min = 349.2625mm^5$$

$$\sigma(\text{desviacion}) = \sqrt{\sigma^2} \text{ (Ecuación 5)}$$

$$\sigma 45min = 54.3664mm^3$$

$$\sigma 30min = 15.22mm^3$$

$$\sigma 15min = 18.68mm^3$$

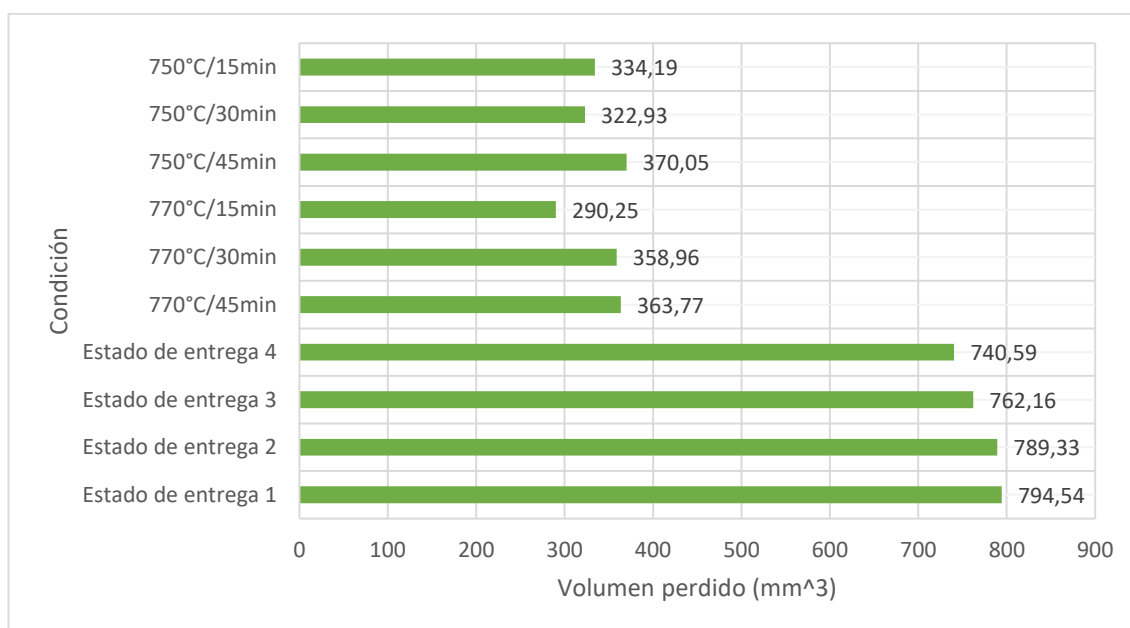
La desviación estándar, nos muestra la separación de los volúmenes perdidos en las probetas de acero 1045 después de haber sido tratadas térmicamente, los resultados muestran la una diferencia alrededor del 10% de paso entre las probetas con el mismo tiempo de revenido, dando a conocer un comportamiento uniforme en las pruebas de desgaste abrasivo, se observa una desviación baja alrededor de  $15 \text{ mm}^3$ ,

#### **9.6.8 Influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste abrasivo**

A continuación, se muestra de forma gráfica las diferencias obtenidas en pérdida volumétricas, de las condiciones de temple y revenido establecidas en el proyecto comparado con probetas sin ningún tipo de tratamiento térmico.

El comportamiento al desgaste abrasivo que tienen las probetas tratadas térmicamente es superior a las probetas con el material base. Este comportamiento es generado por la dureza lograda a partir del temple.

### **Ilustración 32 Influencia del tiempo de revenido comparandolo resistencia al desgaste abrasivo**



Fuente: Autor

Como resultado se obtiene, que el revenido a 15 minutos tiene los menores resultados de volumen perdido de material, debido a que la dureza lograda en este tiempo es mayor a los demás por la cantidad de Martensita en la probeta. En variaciones porcentuales comparadas con las probetas en estado de entrega, se observa que los temple a 750°C con diferentes tiempos de revenido, tienen una mejora en la resistencia al desgaste de 93%.

En el caso de los temple elaborados a una temperatura de 770°C, se obtiene una mejora en el comportamiento al desgaste abrasivo, la pérdida volumétrica de las probetas revenidas a diferentes tiempos, Obtienen un crecimiento promedio de 96%, comparadas con las probetas de acero AISI SAE 1045 en estado de entrega. En relación al tiempo de revenido, la condición con mejores resultados se encuentran los revenidos a 15 minutos.

La ilustración 25, muestra todos los resultados obtenidos en la prueba de desgaste abrasivo, basados en la norma ASTM G65, las condiciones nombradas como estado de entrega, son los resultados obtenidos con probetas sin ningún tipo de tratamiento térmico. En todos los tratamientos térmicos elaborados obtenemos una mejora mayor al 80%, los mejores resultados se obtienen con los tratamientos térmicos con temple a 770°C y un posterior revenido a 500°C con un tiempo de sostenimiento entre 15 minutos y 30 minutos, arrojando como resultado la mayor dureza y mejor resistencia al desgaste abrasivo.



### 9.7 Análisis de fallas presentes en las pruebas de desgaste

La remoción de material metálico, es producto de micro cortes o debido a la deformación plástica, que está estrechamente relacionada con las condiciones de trabajo de la pieza y la naturaleza de las partículas abrasivas.

***Ilustración 33 Equipo de estereografía***



Fuente: Laboratorio de óptica. Universidad distrital

**Ilustración 34** *Imágenes de estereografía de las pruebas a desgaste abrasivo*



**(a)**



**(b)**



(c)



(d)



**(d)**

Fuente: laboratorio de óptica, Universidad distrital

**(a)** acero 1045 temple a 770°C con 15min de revenido **(b)** acero 1045 temple a 770°C con 30 min de revenido **(c)** acero 1045 temple a 770°C con 45 min de revenido **(d)** acero 1045 temple a 750°C con 15 min de revenido **(e)** acero 1045 temple a 750°C con 30 min de revenido

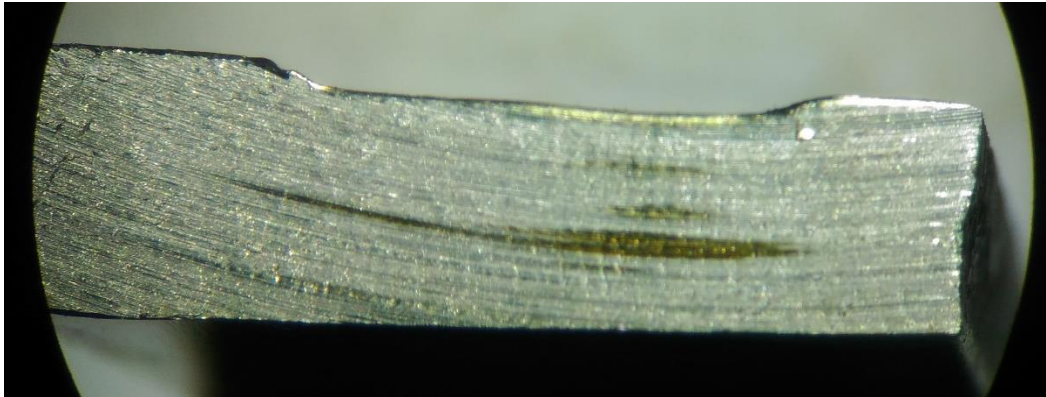
Los resultados de las pruebas de desgaste por abrasión, se encuentran una serie de marcas típicas y características que muestran el tipo de desgaste, las figuras (b), (c) y (d), muestran la aparición de microsurcos producto del material removido de la probeta con el cuerpo abrasivo. Se encontraron microgrietas superficiales y ralladuras en dirección paralela al fijo de material abrasivo. Esto debido a que, el material abrasivo penetra a las probetas por la fuerza normal ejercida en la superficie. [12] [16]

Las figuras (c) y (e) además, muestran la aparición de microgrietas, estas son generadas debido a la remoción del material, por la acción de varias partículas que generan concentradores de tensiones, ocasionando microgrietas y posteriormente la remoción del material. [11]

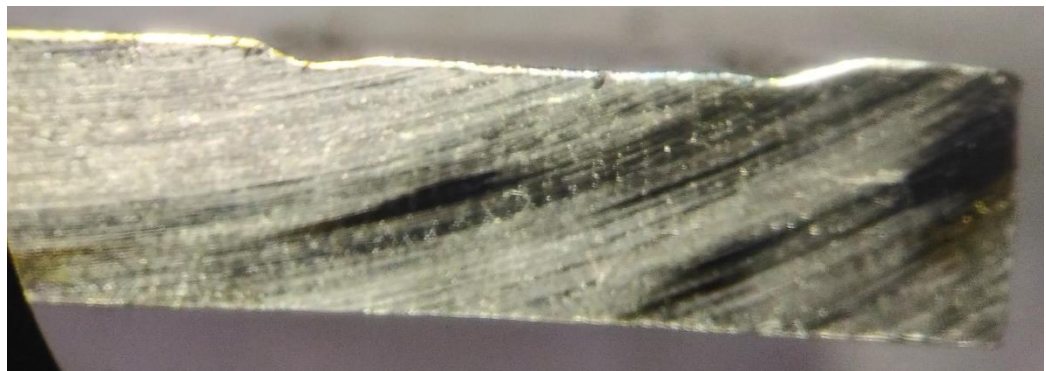
Se evidencia que el material alivio tensiones, por lo cual permite que la huella presente una homogeneidad en su forma, se observa microcortes que pudieron ser generados por la incrustación de material abrasivo o el desprendimiento del material por la prueba. [11]

A continuación en la **ilustración 36**, se observan dos tipos de huellas comúnmente generadas por las pruebas de desgaste abrasivo por el método descrito en la norma ASTM G65.

**Ilustración 35 Perfil de desgaste**



**(a)**



**(b)**

Fuente: laboratorio de física, Universidad Libre

**(a)** Perfil de desgaste en “u” **(b)** Perfil de desgaste en “w”

En la **ilustración 36 (a)**, se muestra la huella y perfil óptima, resultado de la prueba de desgaste, se aprecia la combinación de bajo desprendimiento de material acompañado de mayor cantidad de microarado en la superficie, ya que la tensión del material es menor por el tratamiento térmico de revenido, se puede apreciar que en regiones de la huella se forman patrones más claros.

En la **ilustración 36 (b)**, se observa un perfil con alta deformación plástica mostrando desprendimiento de material y la aparición de surcos, generado por la dosificación de arena.

## 10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede determinar que los valores de dureza conseguidos, lograron aumentar la dureza HRC en las probetas tratadas térmicamente desde 750°C y 770°C de aproximadamente 300%, comparadas con el material base suministrado por el fabricante. Las probetas con revenido a 600 °C con tiempo de sostenimiento de 15 y 30 minutos proporcionan una mejor definición de los granos de ferrita en la estructura. Entre más tiempo de sostenimiento en el revenido a 600 °C, la concentración de Martensita disminuye gradualmente y se presenta una mejor distribución de los granos en la superficie analizada.

La propiedad de la resistencia al desgaste abrasivo aumento aproximadamente el 57,9 % según el ensayo de desgaste para las probetas tratadas a 770°C respecto al material base entregado por el fabricante.

Según la aplicación de ingeniería que se requiera, se pueden configurar las condiciones y propiedades mecánicas para tal propósito.

La resistencia al desgaste abrasivo aumento, lo cual hace que este acero AISI/SAE 1045 trabajado con tratamientos térmicos de doble fase (DP) mejore su resistencia al desgaste abrasivo propia del material. Ejecutando este tratamiento térmico de doble fase se logra disminuir tiempos y costos en los procesos de fabricación, debido a que no es necesario llevar el acero hasta Austenización completa.

Para producir un acero doble fase (DP) que tenga las propiedades mecánicas óptimas según las condiciones de trabajo, es necesario tener en cuenta, que estas propiedades se rigen por la temperatura y el tiempo, comprendidos en el calentamiento y enfriamiento. Un pequeño cambio en las variables, logra que el acero de doble fase, modifique sus propiedades mecánicas por efecto de las distorsiones en la matriz inducidas por el enfriamiento.

Los resultados de las pruebas de desgaste por abrasión, se encuentran una serie de marcas típicas y características que muestran el tipo de desgaste, la ilustración 32 (b), (c) y (d), muestran la aparición de microsurcos producto del material removido de la probeta con el cuerpo abrasivo. Se encontraron microgrietas superficiales y ralladuras en dirección paralela al fijo de material abrasivo. Esto debido a que, el material abrasivo penetra a las probetas por la fuerza normal ejercida en la superficie.

Las figuras (c) y (e) además, muestran la aparición de microgrietas, estas son generadas debido a la remoción del material, por la acción de varias partículas que generan concentradores de tensiones, ocasionando microgrietas y posteriormente la remoción del material.

## 10.1 Recomendaciones

- Evaluar la resistencia al desgaste con otros equipos tribológicos
- Evaluar y comparar la resistencia al desgaste por medio de modelos matemáticos
- Implementar pruebas de desgaste en proyectos empresariales existentes
- Encontrar la resistencia al desgaste de diferentes materiales

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Allen, C., & Protheroe, B. (1981). The abrasive - Corrosive wear of stainless steels. *Wear*, 287-305.
- [2] Bohorquez, C. (2012). INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 1045. *Mecánica Computacional*, 3577-3587.
- [3] Bolívar, F., Bejarano, G., & Gómez, A. (2013). Influencia de los recubrimientos dúplex sobre las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste del acero AISI SAE 4140 bonificado. *Revista EIA*, 151-160.
- [4] Casarin, S., Kestenbach, H., & Valencia, E. (200). *Influencia de los tratamientos de revenido intercríticos en la concentración de níquel correspondiente a partículas de austenita residual en un acero con 9% de Ni*. Madrid, España: Revista de Metalurgia.
- [5] Demir, B., & Erdogan, M. (2008). The hardenability of austenite with different alloy content and dispersion in dual-phase steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 75-84.
- [6] EL TIEMPO, R. (25 de Septiembre de 2005). LAS CARROCERIAS AHORA PESAN MENOS. *EL TIEMPO*, pág. 13.
- [7] Fu Hau, & Fu Li. (2008). Abrasion Mechanisms of Stainless Steel/Carbon Fiber-Reinforced Polyether-Ether-Ketone (PEEK) Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 973.
- [8] Gómez, A., Lousa, A., & Esteve, J. (2012). Efecto del contenido de carbono sobre la resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos de CrC depositados por pulverización catódica magnetrón. *Revista EIA*, 9-17.
- [9] Hernandez, R., Cruz, M., Casellas, D., Riera, M., & Prado, J. (2007). *Evaluación del comportamiento al desgaste en aceros de herramienta: simulación por ordenador y verificación experimental*. Barcelona, España: Anales de la mecánica de fractura.
- [10] Hüseyin, A., Havva, K., & Ceylan, K. (2010). Effect of Intercritical Annealing Parameters on Dual Phase Behavior of Commercial Low-Alloyed Steels. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 73-78.
- [11] Jiman Han. (2011). *Contact Mechanics Analysis an Experimental*. Ronchester, Michigan: Pro Quest.



- [12] Kobrick, R., & Budinski, K. (2010). *Three-Body Abrasion Testing Using Lunar Dust Simulants to Evaluate Surface System Materials*. Washington DC, EEUU: National Aeronautics and Space Administration.
- [13] Konstantinov, T. (1997). *Scuffing of aluminum/steel contacts under dry sliding conditions*. Urbana, Illinois: Unibversity of Illinois.
- [14] Lafleur, J.-P. (2011). *A Study of Abrasion in Steel During Commnution*. Ottawa, Canada: McGill University.
- [15] Lai, Q. (2016). Influence of martensite volume fraction and hardness on the plastic behavior of dual-phase steels: Experiments and micromechanical modeling. *International Journal of Plasticity*, 187-203.
- [16] Lizarazo, P., Rodriguez , R., Olaya , J., Sierra, M., Mejía , I., & Bedolla , A. (2013). Evaluación del comportamiento al desgaste de los aceros Bainíticos aleados con Boro. *Revista Colombiana de Materiales*, 91-97.
- [17] Lizcano, C. J. (2001). Comportamiento mecánico y microestructural de los aceros doble fase. Ciudad universitaria, Mexico.
- [18] Metals Handbook. (1973). Metallografia, Structure and phase. En *Metals Handbook*. Ohio: ASTM.
- [19] Muñoz, P., Díaz, N., & Cassier, Z. (2011). Prediction of Tool Wear Mechanims in Face Milling AISI 1045 Steel. *Jornal of Materials Engineiering and Performance*, 797.
- [20] Olivas, V. (2009). *INVESTIGATING THE USE OF THE STEEL WHEEL ABRASION TEST FOR ORE CHARACTERIZATION*. Ottawa, Canada: McGill University.
- [21] Rocha, R., Melo, T., & Pereloma, E. (2005). Microstructural evolution at the initial stages of continuous annealing of cold rolled dual-phase steel. *Materials Science and Engineering: A*, 296-304.
- [22] Totten. G. (2007). *Steel heat treatmen methallurgy and thecnologies*. Taylor ans Francis group.
- [23] Wei, M., Wang, S., & Zhao, Y. (2011). Wear Behavior and Mechanism of Cr-Mo-V Cast Hot-Working Die Steel. *Metallurgical and Materials Transsactions*, 1646.
- [24] Zhang, R. (2011). *Thermal Analysis and Exprimental Investigation of Scuffing Process*. Ronchestre, Michigan: Pro Quest.
- [25] Zhao, Z., & Yin, G. (2009). Miscostructure Evolution and Mechanical properties of 1000 MPa Cold Roll Dual Phase Stell. *Trans. Nonferrous Met. Soc*, 563-566.

## ANEXOS

### Anexo A Análisis químico material base, acero AISI SAE 1045

```

STORE DATA          : 2012
ORDEN DE TRABAJO    : INTERNA
COMPANIA            : ESTUDIANTE
ENTERANTE           : MAURICIO SIERRA
FIRMA ANALISTA      :
ANALISTA            : JHON JAIRD CASTANEDA.
FIRMA JEFE LAB      :
JEFE LABORATORIO    : ING. ORLANDO SANTAMARIA
REFERENCIA          : LAMINA
Alloy               : LAS2010      Mode :PA  21-Jan-2015   Time  9:24

Burn 1
Fe 98.654      C  0.413      Mn  0.629      P  0.012      S  0.004
Si  0.219     Cu  0.009      Ni  0.012      Cr  0.011      V  0.001
Mo  0.008      W  0.013      Co  0.003      Ti  0.003      Sn< 0.001
Al< 0.001     Nb  0.002      B < 0.0001    Pb  0.006      Mg  0.000

Burn 2
Fe 98.624      C  0.400      Mn  0.648      P  0.014      S  0.004
Si  0.226     Cu  0.010      Ni  0.013      Cr  0.013      V  0.001
Mo  0.008      W  0.016      Co  0.004      Ti  0.003      Sn< 0.001
Al< 0.001     Nb  0.004      B < 0.0001    Pb  0.008      Mg  0.000

Burn 3
Fe 98.615      C  0.399      Mn  0.653      P  0.016      S  0.004
Si  0.232     Cu  0.010      Ni  0.013      Cr  0.012      V  0.002
Mo  0.008      W  0.016      Co  0.004      Ti  0.003      Sn< 0.001
Al< 0.001     Nb  0.004      B  0.0001     Pb  0.008      Mg  0.000

Average
Fe 98.631      C  0.404      Mn  0.643      P  0.014      S  0.004
Si  0.226     Cu  0.010      Ni  0.013      Cr  0.012      V  0.001
Mo  0.008      W  0.015      Co  0.004      Ti  0.003      Sn< 0.001
Al< 0.001     Nb  0.004      B < 0.0001    Pb  0.008      Mg  0.000
    
```

$A_3 = 783^{\circ}\text{C}$     $A_2 = 719^{\circ}\text{C}$