

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO DE DESGASTE EN UN ACERO AISI 1045
TEMPLADO Y REVENIDO A BAJA Y ALTA
TEMPERATURAS, UTILIZANDO ESPIGAS DE ACERO
AIS1 O1 CON PUNTA SEMIESFÉRICA**

PRESENTADO POR:

VALERIA LAZO ARIAS

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2020

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

Ing. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**ESTUDIO DE DESGASTE EN UN ACERO AISI 1045
TEMPLADO Y REVENIDO A BAJA Y ALTA
TEMPERATURAS, UTILIZANDO ESPIGAS DE ACERO
AISI O1 CON PUNTA SEMIESFÉRICA**

Presentado por :

VALERIA LAZO ARIAS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, Mayo de 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mis padres:

Oscar Lazo y Dora de Lazo

Mi hermano:

Daniel Lazo.

Valeria

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por la salud, fortaleza y protección que me brindó; a mis padres y a mi hermano por toda la paciencia y el apoyo incondicional que me han dado en estos años de estudio.

También, agradezco a todas las personas que directa o indirectamente colaboraron con el desarrollo de este trabajo de graduación. Comenzando con mi asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por guiarme y al personal del Centro de Investigaciones de Metrología de la Universidad de El Salvador por el apoyo.

A todos los profesores e instructores que aportaron a mi formación académica en especial a los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A mis amigos Gabriela, Atilio y José Luis por haber compartido todos estos años de estudio y su apoyo incondicional en este proceso.

Agradezco a la ASEIM, que me ayudó a desarrollarme en diferentes ámbitos durante todos estos años y donde conocí personas que me brindaron su ayuda desinteresada. Al Centro de Investigación Científica (CIC-UES), por el equipamiento mediante el proyecto 12.10. Al personal del Centro de Investigaciones de Metrología de la Universidad de El Salvador (CIM-UES), por su valiosa colaboración en las determinaciones de las masas. Al M.Sc. Guillermo Mejía Díaz de la Escuela de Ingeniería de Sistemas Informáticos, por el préstamo de la cámara Mimio View patrocinada por la *Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo* (AECID).

Valeria

ESTUDIO DE DESGASTE EN UN ACERO AISI 1045 TEMPLADO Y REVENIDO A BAJA Y ALTA TEMPERATURAS, UTILIZANDO ESPIGAS DE ACERO AISI O1 CON PUNTA SEMIESFÉRICA

Estudiante: Br. Valeria Lazo Arias¹

Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz²

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha conducido una investigación en la cual se realizaron ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, se utilizaron discos de acero AISI 1045 templados en aceite y revenidos a baja y alta temperaturas, las espigas se fabricaron de un acero AISI O1 con tratamiento térmico de temple y revenido a baja temperatura. También, se determinó la dureza de los discos para las dos condiciones de temples y revenidos. Los ensayos de desgaste se realizaron para las dos condiciones de material de los discos a tres cargas y dos distancias de deslizamientos, obteniendo de esta forma seis condiciones de ensayos para cada condición de material y para cada condición de ensayo se realizaron 3 experimentos. Así, se obtuvo un incremento del desgaste de los discos cuando se incrementó la temperatura de revenido, la carga aplicada y la distancia de deslizamiento.

Palabras claves: Desgaste, dureza y temple y revenido.

1 valerialazo1@hotmail.com

2 jaberriosortiz@gmail.com

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Tratamientos térmicos en aceros.....	3
1.1.1. Temperatura y tiempo	3
1.1.2. Clasificación de los tratamientos térmicos.....	4
1.1.3. Cuatro transformaciones del acero.....	5
1.2. Proceso de temple.....	7
1.2.1. Elección de la temperatura de temple	7
1.2.2. Duración del calentamiento.....	8
1.2.3. Mecanismo de eliminación de calor durante el temple	9
1.2.4. Medio de temple.....	10
1.2.5. Temperatura del medio de temple.....	11
1.2.6. Condición superficial en el temple	12
1.2.7. Tamaños y masas.....	13
1.2.8. Templabilidad.....	13
1.2.9. Esfuerzos internos.....	14
1.2.10. Métodos de temple.....	15
1.2.11. Métodos para estudiar el comportamiento del aceros en el temple	16
1.3. Proceso de revenido.....	17
1.3.1. Modificación de las características mecánicas	18
1.3.2. Modificación de los constituyentes microscópicos	19
1.3.3. Fragilidad del revenido en la zona 225 - 350 °c.....	19
1.3.4. Fragilidad del revenido (fragilidad krupp).....	20
1.3.5. Colores del revenido	21
1.4. Investigaciones de desgaste.....	22
1.5. Aplicaciones del acero aisi 1045.....	25

2. DISEÑO EXPERIMENTAL	26
2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental	26
2.2. Dimensionamiento de los discos y espigas para los ensayos de desgaste.....	28
2.3. Maquinado de los discos y espigas.....	29
2.4. Limpieza de discos y espigas	30
2.5. Tratamientos térmicos	30
2.6. Tratamiento térmico de las espigas	33
2.7. Preparación previa al ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco	34
2.8. Determinación de dureza	34
2.9. Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco	37
2.10. Estudio metalográfico	42
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
3.1. Determinación de dureza rockwell c	45
3.2. Análisis metalográfico	46
3.3. Resultados de los ensayos de desgaste	47
3.4. Análisis de resultados	57
CONCLUSIONES.....	58
REFERENCIA	59

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Severidad del temple en relación con agua inmóvil con valor de 1 para varias condiciones de temple.....	12
Tabla 1.2. Colores de los aceros durante el revenido.	22
Tabla 2.1. Composición química de los aceros a estudiar en condiciones de entrega.	29
Tabla 2.2 Condiciones y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.	40
Tabla 3.1. Medición de dureza Rockwell C en muestras de acero AISI 1045 templadas en aceite y revenido a 200 °C.....	45
Tabla 3.2. Medición de dureza Rockwell C en muestras de acero AISI 1045 templadas en aceite y revenido a 400 °C.....	46
Tabla 3.3. Valores de desgaste en discos de acero AISI 1045 templados en aceite y revenido a 200 °C.....	49
Tabla 3.4. Valores de desgaste en discos de acero AISI 1045 templados en aceite y revenido a 400 °C.....	50
Tabla 3.5. Valores de desgaste de las espigas de acero AISI O1 templadas y revenidas utilizadas sobre discos de acero AISI 1045 templados en aceite y revenidos a 200 °C.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Esquema de un tratamiento térmico simple.	4
Fig. 1.2. Parte correspondiente al acero del diagrama del hierro-carburo de hierro.	6
Fig. 1.3. Curva típica de enfriamiento para un cilindro pequeño de acero templado en agua tibia.	10
Fig. 2.1. Diagrama de flujo utilizado en la metodología experimental.	27
Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes a utilizar en el ensayo tipo espiga sobre disco. Cotas en mm: (a) Disco; y (b) Espiga.	28
Fig. 2.3. Horno y cámara de gas inerte que se utilizará para realizar el tratamiento térmico de los discos.	31
Fig. 2.4. Disco con tratamiento térmico de temple.	32
Fig. 2.5. Grupo de espigas templadas.	33
Fig. 2.6. Durómetro marca INNOVETEST.	35
Fig. 2.7. Posicionamiento de la probeta durante la prueba de dureza.	36
Fig. 2.8. Gráfica de aplicación de la carga en ensayo de dureza.	37
Fig. 2.9. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3.	37
Fig. 2.10. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.	38
Fig. 2.11. Instrumentos utilizados para la medición de masa.	39
Fig. 2.12. Corte de una muestra metalográfica.	43
Fig. 2.13. Microscopio óptico y Mimio View utilizado para la captura de imágenes.	44
Fig.3.1 Microestructura de acero AISI1045: (a) Recocido; y (b) Templado en aceite.	47
Fig.3.2. Gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 con temple en aceite y revenidos a 200 y 400 °C con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.	53

Fig.3.3. Gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 con temple en aceite y revenidos a 200 y 400 °C con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 2000 m.	53
Fig.3.4. Gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 con temple en aceite y revenido a 200 °C con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 m y 2000 m.	54
Fig.3.5. Gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 con temple en aceite y revenido a 400 °C con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 m y 2000 m.	54
Fig.3.6. Gráfico de pérdida de masa de espiga de acero AISI O1 con tratamiento térmico utilizados sobre discos con acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a 200 y 400 °C, con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.	55
Fig.3.7. Gráfico de pérdida de masa de espiga de acero AISI O1 con tratamiento térmico utilizados sobre discos con acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a 200 y 400 °C, con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 2000 m.	55
Fig.3.8. Gráfico de pérdida de masa de espiga de acero AISI O1 con tratamiento térmico utilizados sobre discos con acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a 200 °C, con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 m y 2000 m.	56
Fig.3.9. Gráfico de pérdida de masa de espiga de acero AISI O1 con tratamiento térmico utilizados sobre discos con acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a 400 °C, con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 m y 2000 m.	56

SÍMBOLOS Y SIGLAS

f_f : Fuerza de fricción

r: Radio de trayectoria

P: Carga

PM: Pérdida de masa

μ : Coeficiente de fricción

t_c : Tiempo de calentamiento

t_p : Tiempo de enfriamiento

ω : Velocidad angular

v : Velocidad lineal

INTRODUCCIÓN

La calidad de la mayoría de los productos metálicos depende de la condición de sus superficies y del deterioro de las mismas debido al uso. Este deterioro es importante debido a que es un factor que limita la vida y desempeño de los componentes de una máquina [1].

El desgaste se puede definir como el deterioro no intencional resultado del empleo o del ambiente y se considera una de las influencias más destructivas a que están expuestas los materiales [1].

También, es de suma importancia tener presente que el deterioro que implica un solo tipo de desgaste es raro y que en la mayoría de los casos ocurre un desgaste abrasivo y adhesivo. Sí, cada forma de desgaste es afectada por una variedad de condiciones incluyendo ambiente, magnitud de la carga, velocidades relativas de las piezas que se acoplan y lubricación [1].

En consecuencia, a nivel experimental se puede determinar el comportamiento ante la fricción y el desgaste entre dos materiales utilizando diferentes equipos de ensayos, así los parámetros de operación de estos equipos permiten crear las condiciones de simulación necesarias para analizar con certeza el comportamiento del desgaste con las distintas condiciones de ensayo (carga, distancia de deslizamiento, velocidad, entre otras). Uno de estos equipos es la máquina para ensayos tipo espiga sobre discos, la cual se utilizará en el presente trabajo de graduación para caracterizar el comportamiento al desgaste de un acero AISI 1045 templado y revenido y un acero AISI O1 bajo diferentes parámetros de ensayo.

En el primer capítulo de este trabajo correspondiente al marco teórico, inicia con los conceptos generales de tratamientos térmicos en aceros, enfocado a los procesos de temple y revenido; posteriormente se desglosan los conceptos e investigaciones de desgaste en aceros AISI 1045 y las aplicaciones de este tipo de acero.

El segundo capítulo corresponde a la propuesta de diseño experimental de la investigación, su contenido consiste en las diferentes etapas que se realizarán durante el desarrollo de los experimentos, desde el dimensionamiento de los especímenes, la realización de los tratamientos térmicos en los discos y las espigas.

Finalmente, el tercer capítulo comprende la realización del ensayo tipo espiga sobre disco, estableciendo las diferentes combinaciones de carga, distancia de deslizamiento y condición de material. Además, se determinará la dureza y se interpretará los resultados de todos los ensayos realizados.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se establece los conceptos generales de tratamientos térmicos en aceros enfocados principalmente a los procesos de temple y revenido, el estudio de ambos tratamientos térmicos en aceros se complementa con la definición de los conceptos principales de desgaste e investigaciones de desgaste en aceros AISI 1045 y las aplicaciones que tiene este tipo de acero.

1.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN ACEROS

Se entiende por tratamiento térmico a los procesos de formación de las estructuras (transformaciones) y de las particularidades del estado estructural de las aleaciones (estados de desequilibrio) [2].

1.1.1. TEMPERATURA Y TIEMPO

Los factores fundamentales que influyen en el tratamiento térmico en los aceros son la temperatura y el tiempo, por lo cual el proceso de cualquier tratamiento térmico puede representarse por medio de la Fig. 1.1 en donde las coordenadas son temperatura (T) y tiempo (t). El proceso del tratamiento térmico en aceros se caracteriza por los parámetros principales siguientes: la temperatura de calentamiento ($T_{m\acute{a}x}$), es decir la temperatura máxima hasta la cual se calienta el acero durante su tratamiento térmico; el tiempo de mantenimiento (t_m), es decir el tiempo en el cual se mantiene el acero a la temperatura de calentamiento; la velocidad de calentamiento (v_{cal}) y la velocidad de enfriamiento (v_{enf}) [2].

Si el calentamiento (o el enfriamiento) se efectúa a velocidad constante, este se caracteriza en las coordenadas de temperatura-tiempo por una línea recta con determinado ángulo [2].

Si la velocidad de calentamiento (o enfriamiento) no es uniforme, la velocidad verdadera deberá referirse a una temperatura en particular, la cual se expresa como una variación infinitamente pequeña de la temperatura y del tiempo, es decir será la primera derivada de la temperatura con respecto al tiempo [2].

La velocidad verdadera se determina gráficamente por la tangente del ángulo de inclinación de la tangente a la curva de calentamiento (enfriamiento) en el punto correspondiente a una temperatura en particular [2].

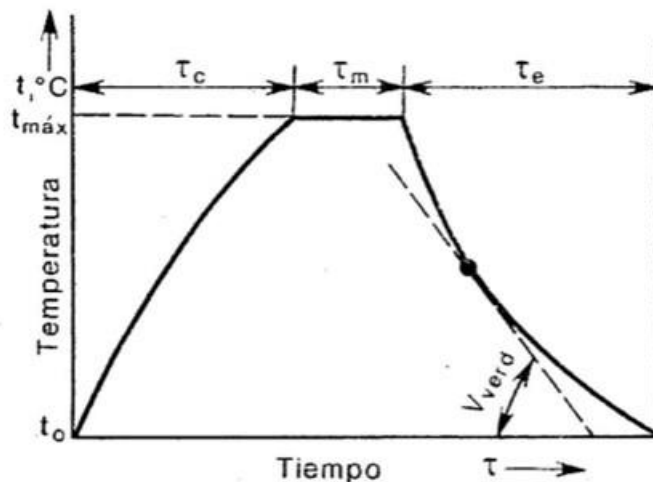


Fig. 1.1. Esquema de un tratamiento térmico simple.

1.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Las variaciones de las propiedades de un acero que se producen como resultado de un tratamiento térmico deben ser permanentes y estables [2].

Todos los tipos de tratamiento térmico en aceros se pueden dividir en cuatro grupos principales [2]:

- ✓ **Primer grupo.** Consiste en calentar un metal, que como resultado de un tratamiento anterior cualquiera, se encuentre en estado inestable, y hacerlo pasar a uno más estable, se llama recocido contra acritud. No se produce transformación de fase.
- ✓ **Segundo grupo.** Sí en las aleaciones, al ser calentadas, se produce una transformación de fase, el calentamiento por encima de cierta temperatura crítica provoca un cambio de la estructura de la aleación, se llama recocido.
- ✓ **Tercer grupo.** Sí al calentar una aleación se produce cambios de fase, la integridad de la transformación inversa depende de la velocidad de éste, normalizado y temple.
- ✓ **Cuarto grupo.** El calentamiento de una aleación templada, hasta una temperatura inferior a la de transformación de fase, se llama revenido.

1.1.3. CUATRO TRANSFORMACIONES DEL ACERO

La base para el estudio de los tratamientos térmicos del acero será el diagrama hierro-carburo de hierro (ver, Fig. 1.2), particularmente interesan los aceros cuya concentración sea hasta el 2 % de C, dado que la región del diagrama hierro-carburo de hierro correspondiente a las concentraciones de hasta 2% o más exactamente 2.14 % de C [2].

La parte superior del diagrama hierro-carburo de hierro, en la realización de los tratamientos térmicos no tiene importancia tecnológico ya que estos tratamientos se efectúan a temperaturas más bajas [2].

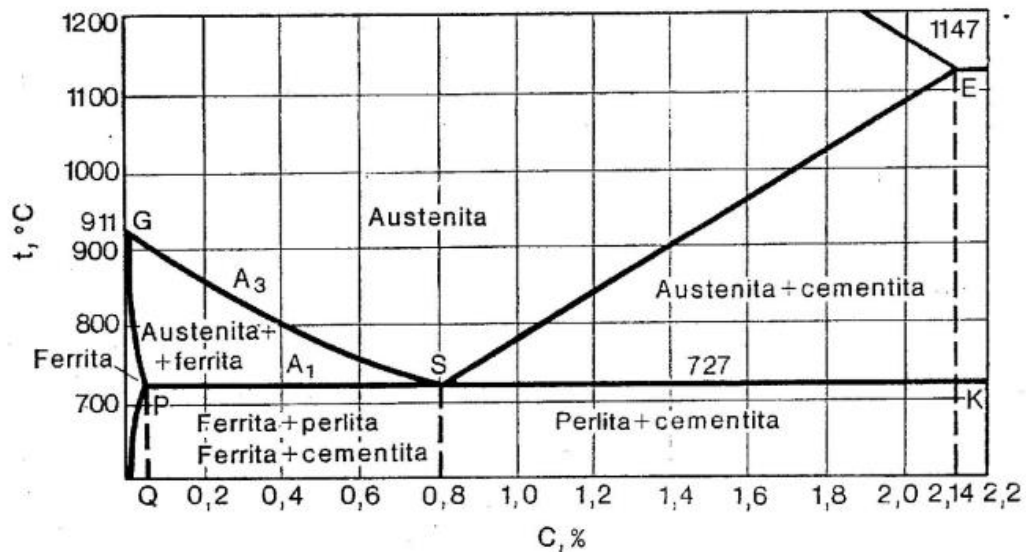


Fig. 1.2. Parte correspondiente al acero del diagrama del hierro-carburo de hierro.

En el diagrama de la Fig. 1.2 las líneas críticas se designan con la letra *A* y se pueden observar las transformaciones que puede tener el acero:

- ✓ La transformación de la perlita en austenita, transcurre por encima de A_1 , a una temperatura superior a la del equilibrio estable austenita-perlita; a estas temperaturas, de las tres estructuras fundamentales, la austenita es la que posee la energía libre mínima [2].
- ✓ La transformación de la austenita en perlita, se desarrolla por debajo de A_1 [2].
- ✓ La transformación de la austenita en martensita, esta transformación se observa por debajo de la temperatura del equilibrio metaestable austenita [2].
- ✓ La transformación de la martensita en perlita, o más exactamente, en mezcla de ferrita y carburo de hierro, esta transformación se efectúa a todas las temperaturas, ya que para todas estas la energía libre de la martensita es mayor que de la perlita [2].

1.2. PROCESO DE TEMPLE

Es un proceso de calentamiento seguido de un enfriamiento, generalmente rápido con una velocidad mínima llamada "velocidad crítica".

El fin que se pretende conseguir con el proceso del temple es aumentar la dureza y resistencia mecánica, transformando toda la masa en austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento rápido la austenita se convierte en martensita, que es el constituyente principal de los aceros templados.

1.2.1. ELECCIÓN DE LA TEMPERATURA DE TEMPLE

La temperatura de temple de los aceros para la mayoría de las marcas viene determinada por la posición de los puntos críticos A_1 y A_3 [1].

Para los aceros al carbono la temperatura de temple se puede determinar por el diagrama hierro-carburo de hierro. Por lo general, para los aceros hipoeutectoides debe de ser de 30 - 50 °C por arriba de A_{c3} y para los aceros hipereutectoides de 30 - 50 °C por arriba de $A_{c3,1}$ [1].

Cuando los aceros hipoeutectoides se templan a una temperatura superior a A_{c1} pero inferior a A_{c3} , en la estructura, junto con la martensita, se conserva parte de la ferrita la cual hace que descienda la dureza en estado de temple y empeore las propiedades mecánicas después del revenido. Este temple se llama incompleto [1].

Para los aceros hipereutectoides, por el contrario, la temperatura óptima de temple se encuentre en el intervalo entre $A_{c3,1}$ y A_{cm} , teóricamente, este temple es incompleto [1].

En los aceros templados la presencia de carburo de hierro residual en la estructura es útil, ya que las partículas de carburo de hierro elevan la resistencia al desgaste del acero [1].

El calentamiento por encima de A_{cm} , es peligroso e innecesario, ya que no eleva la dureza, sino al contrario, hace que ésta descienda un poco a consecuencia de que el carburo de hierro se disuelve y aumenta la austenita residual; con este calentamiento crece el grano de la austenita, aumenta la posibilidad de que aparezcan grandes esfuerzos residuales por el temple y que se descarbura más intensamente la superficie del acero [1].

Por lo tanto, lo óptimo es templar el acero hipoeutectoide a una temperatura que sea 30 - 50 °C por arriba que A_{c3} , y para el acero hipereutectoide 30 - 50 °C por arriba que $A_{c3,1}$ [1].

La elevación de la temperatura de temple por encima de estas temperaturas y el crecimiento del grano de la austenita que provocan se pone de manifiesto en primer lugar porque se obtiene una martensita más burda y de estructura acicular más gruesa [1].

1.2.2. DURACIÓN DEL CALENTAMIENTO

El tiempo total que dura el calentamiento se compone del tiempo de calentamiento hasta la temperatura dada (t) y del tiempo de permanencia a esta temperatura (t_p), tal como se presenta en la Ec. (1.1):

$$t_{total} = t_c + t_p \quad (1.1)$$

La magnitud t depende de la capacidad del medio para calentar, de las dimensiones y forma de las piezas y su colocación en el horno; t_p depende de la velocidad del cambio de fase, la cual está determinada por el grado de recalentamiento por encima de la temperatura crítica y por la dispersión de la estructura inicial [1].

En la práctica t_p puede tomarse igual a 1 min para los aceros al carbono y de 2 min para los aceros aleados. Cuando se calientan piezas grandes la

magnitud t_p puede despreciarse; si las piezas son pequeñas (con diámetros o espesor de menos 1 mm) se desprecia la componente t_c [1].

El calentamiento suele hacerse en un medio gaseoso o en sales y metales fundidos y se considera que cuanto mayor es la pieza mayor es t_c [1].

1.2.3. MECANISMO DE ELIMINACIÓN DE CALOR DURANTE EL TEMPLE

La estructura, dureza y resistencia resultantes de una operación de tratamiento térmico se determinan por la rapidez de enfriamiento real obtenida del proceso de temple. Si la rapidez de enfriamiento real excede a la rapidez crítica de enfriamiento, solo se obtendrá martensita; si la rapidez real de enfriamiento es menor que la rapidez crítica de enfriamiento, la pieza no endurecerá completamente [1].

Para entender el mecanismo de eliminación de calor durante el temple se debe tener en consideración la diferencia entre una curva de enfriamiento y rapidez de enfriamiento. Una curva de enfriamiento presenta la variación de temperatura con el tiempo durante el temple; sin embargo la rapidez de enfriamiento presenta la rapidez de cambio de la temperatura con el tiempo [1].

En la Fig. 1.3 se presenta una curva típica de enfriamiento para un cilindro pequeño de acero, templado en agua tibia, en esta curva se puede obtener la rapidez de enfriamiento a cualquier temperatura mediante el trazado de una tangente a la curva de esta temperatura y determinando la pendiente de la tangente. Cuando más próxima a la horizontal sea la tangente menor será la rapidez de enfriamiento [1].

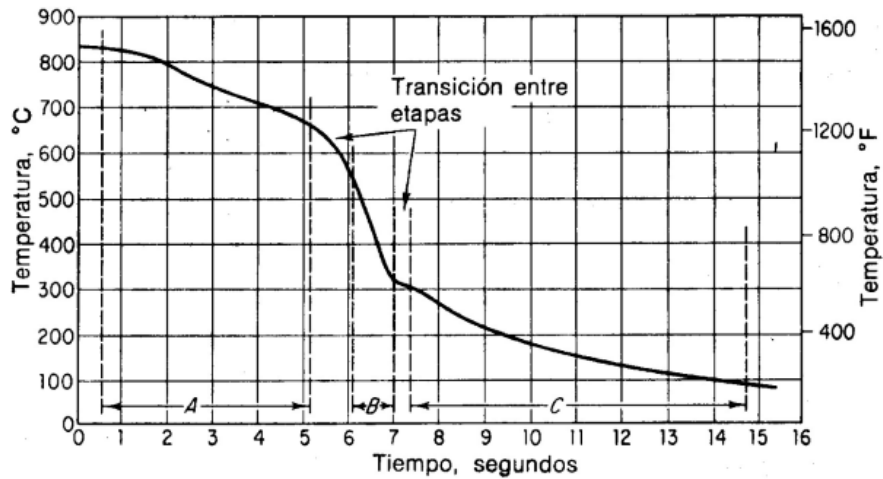


Fig. 1.3. Curva típica de enfriamiento para un cilindro pequeño de acero templado en agua tibia.

Etapa A: Estado de enfriamiento por medio de una capa de vapor.- En esta etapa la rapidez de enfriamiento es relativamente lenta en donde la temperatura del metal es tan alta que el medio de temple se vaporiza en la superficie del metal y una delgada y estable película de vapor rodea al metal caliente [1].

Etapa B: Enfriamiento por transporte de vapor.- Es la etapa más rápida de enfriamiento en donde el metal se ha enfriado a una temperatura tal que la película de vapor ya no es estable [1].

Etapa C: Enfriamiento por medio líquido.- En esta etapa la rapidez de enfriamiento es la más lenta y empieza cuando la temperatura de la superficie del metal alcanza el punto de ebullición del líquido en temple [1].

1.2.4. MEDIO DE TEMPLE

En el ambiente industrial los medios de temple pueden ser los siguientes: solución acuosa del 10% de cloruro de sodio (salmuera), agua de grifo, sales fundidas o líquidas, aceite soluble y solución acuosa, aceite y aire.

El agua y las soluciones acuosas de sales inorgánicas tienen altas rapidezces de enfriamiento inicial a través de las etapas A y B pero estas rapidezces persisten a bajas temperaturas, donde la distorsión y el agrietamiento tienden a ocurrir. Los aceites de temple convencionales tienen una mayor etapa A o capa de vapor y una etapa B más corta con una rapidez de enfriamiento menor [1].

1.2.5. TEMPERATURA DEL MEDIO DE TEMPLE

En agua y en salmuera cuando la temperatura del medio aumenta, la severidad de enfriamiento disminuye lo cual se debe al aumento en persistencia de la etapa de la capa de vapor. Como el medio está más cercano a su punto de ebullición, se necesita menos calor para formar la película de vapor [1].

En el aceite conforme la temperatura del aceite aumenta existe una tendencia a que la severidad de enfriamiento disminuya debido a la persistencia de la película de vapor; sin embargo, también se hace más fluido, lo cual incrementa la severidad ya que se incrementa la rapidez de conducción del calor a través del líquido [1].

Para prevenir un aumento en la temperatura en el medio durante el temple siempre es necesario proporcionar suficiente volumen del medio. En algunos casos se insertan serpentines de enfriamiento en el tanque de temple, para controlar la temperatura del medio. La severidad del enfriamiento puede mejorarse y la temperatura del medio mantenerse constante por la circulación del medio y agitación de la pieza [1].

La severidad de enfriamiento se puede aumentar y la temperatura del medio mantenerse constante por circulación del medio y agitación de la pieza. Esto quita efectivamente la película de vapor tan rápidamente como se forma, reduce la longitud de la etapa de la capa de vapor, y resulta un enfriamiento más rápido [1].

En la Tabla 1.1 se presenta la severidad del temple, en relación con agua inmóvil, a la cual se da el valor de 1.0, para varias condiciones de temple. Así, mediante una selección apropiada de la circulación, es posible obtener una amplia variedad de rapidezces de enfriamiento con un aceite de temple [1].

Tabla 1.1. Severidad del temple en relación con agua inmóvil con valor de 1 para varias condiciones de temple.

Método de enfriamiento	Aceite	Agua	Salmuera
No circulación de líquido o agitación de la pieza	0.25 - 0.30	0.9 - 1.0	2
Circulación o agitación suave	0.30 - 0.35	1.0 - 1.1	2 - 2.2
Circulación moderada	0.35 - 0.40	1.2 - 1.3	
Circulación buena	0.40 - 0.50	1.4 - 1.5	
Circulación fuerte	0.50 - 0.80	1.6 - 2.0	
Circulación violenta	0.80 - 1.10	4	5

1.2.6. CONDICIÓN SUPERFICIAL EN EL TEMPLE

Cuando el acero se expone a una atmósfera de oxidación, debido a la presencia de vapor de agua o de oxígeno en el horno, se forma una capa de óxido de hierro, llamada escamas. Los experimentos han demostrado que una gruesa capa de escamas (0.005 pulg de profundidad) retarda la rapidez de enfriamiento. Parte de la capa de escama también tienden a pelar la superficie cuando la pieza se transfiere del horno al tanque de temple, dando lugar así a una variación en la rapidez de enfriamiento en diferentes puntos de la superficie. Es necesario considerar la presencia de escamas solo si la rapidez de enfriamiento es muy próxima a la rapidez crítica de enfriamiento [1].

Para la selección de métodos para minimizar la formación de escama depende de la parte que se trate térmicamente, del tipo de horno utilizado, de la disponibilidad del equipo y del costo. Algunos de estos métodos son cobrizado, atmósfera de protección, recipientes con sal líquida, virutas de hierro fundido [1].

1.2.7. TAMAÑOS Y MASAS

La razón del área superficial está en función de la forma geométrica de la pieza y resulta ser la más pequeña para una pieza esférica. Las placas delgadas y los alambres de diámetro pequeño tienen una gran razón de área superficial a la masa y, por lo tanto, grandes rapidezces de enfriamiento [1].

En otras palabras, con un medio de temple fijo, una pieza grande se enfriará más lentamente que una pequeña. Conforme el diámetro aumenta, la duración de la etapa de capa de vapor aumenta por lo cual la rapidez de enfriamiento para las tres etapas disminuye considerablemente [1].

La superficie al estar en contacto real con el medio de temple, se enfría más rápidamente al templar. El calor en el interior de la pieza se debe eliminar por conducción, a través del cuerpo de la pieza, alcanzando eventualmente la superficie y el medio de temple por lo tanto la rapidez de enfriamiento en el interior es menor que en la superficie [1].

1.2.8. TEMPLABILIDAD

La dureza que se obtiene en el temple de los aceros y la templabilidad se diferencia en que la dureza es la resistencia que opone el material a la penetración y la templabilidad que viene determinada por la profundidad y la distribución de la dureza en el interior de la pieza [3].

La templabilidad influye notablemente en los resultados cuando se ensayan en piezas de bastante espesor y en cambio influyen poco cuando se templan perfiles delgados, es decir que con aceros de diferentes aleaciones y del mismo contenido en carbono se obtienen características casi idénticas cuando se trata de pequeños diámetros y muy diferentes cuando se trata de piezas de gran espesor [3].

Esto ocurre porque las características mecánicas de los aceros dependen principalmente de la microestructura del metal [3].

La dureza máxima, que se puede obtener en los aceros después del temple depende principalmente del contenido en carbono del acero. La penetración del temple depende de los elementos de aleación y del tamaño de grano [3].

1.2.9. ESFUERZOS INTERNOS

Los esfuerzos internos de primer género o esfuerzos de origen térmico son esfuerzos que se presentan entre las distintas zonas de la sección transversal o entre diversas partes de una pieza. Cuanto mayor es el gradiente de temperatura que se produce durante el tratamiento térmico en la sección y entre las distintas partes de la pieza, el cual depende del tamaño y forma de la pieza y de una serie de otras causas, mayor importancia alcanzan los esfuerzos internos de primer género [4].

Los esfuerzos internos de segundo género o tensiones estructurales aparecen entre fases diferentes debido a que éstas tienen distintos coeficientes de dilatación o que se forman nuevas fases que tienen volúmenes diferentes [4].

Los esfuerzos internos de tercer género ejercen influencia en un volumen de orden de varias celdillas elementales de la red cristalina. El caso en que un átomo diferente al de la red crea en torno a éste, en la solución sólida, deformaciones elásticas de la red cristalina es un ejemplo de cómo aparecen los esfuerzos internos de tercer grado [4].

1.2.10. MÉTODOS DE TEMPLE

En dependencia de la composición del acero, de la forma y de las dimensiones de la pieza y de las propiedades que se requieran de ella después de tratada térmicamente se tiene que elegir el procedimiento óptimo del temple, que sea más fácil de realizar y que al mismo tiempo asegure las propiedades necesarias. Los principales procedimientos de temple son:

- ✓ **Temple en un solo medio de enfriamiento.** La pieza calentada hasta determinadas temperaturas se sumerge en el líquido del temple, donde permanece hasta su total enfriamiento [4].
- ✓ **Temple en dos medios.** Primeramente, se enfría en agua hasta 300-400 °C y luego se traslada rápidamente a otro medio de enfriamiento que actúa con menos intensidad en el cual se enfría hasta 20 °C. Gracias al traslado del producto al segundo medio de temple disminuye los esfuerzos internos relacionadas con las transformaciones de la austenita en martensita [4].
- ✓ **Temple con autorrevenido.** La pieza se mantiene en el medio para templar hasta alcanzar el enfriamiento total; este se interrumpe en las condiciones cuando el núcleo de la pieza conserva todavía cierta cantidad de calor. Su desprendimiento produce un aumento de la temperatura en las capas superficiales que se enfría con más intensidad y de esta manera transcurre su revenido [4].
- ✓ **Temple escalonado.** Al efectuar el temple por este método, el acero comúnmente al carbono después del calentamiento hasta la temperatura de temple se enfría en un medio que tiene una temperatura cerca de 250 °C y manteniéndolo durante un tiempo relativamente corto y a continuación la pieza se enfría hasta la temperatura ambiente al aire libre [4].

1.2.11. MÉTODOS PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO DEL ACEROS EN EL TEMPLE

Dado que el comportamiento de los aceros en el temple es de gran interés para decidir su utilización, se han desarrollado numerosos procedimientos para ponerlo de manifiesto. Entre ellos, los más utilizados son: El examen de fractura, curvas de durezas de redondos de diferentes diámetros templados, determinación de curvas de dureza empleando discos de acero, ataque químico de las secciones transversales templadas y ensayo Jominy [3]. Así, estos procedimientos son:

- ✓ **Examen de fracturas.-** Este procedimiento se suele utilizar en los aceros de herramientas al carbono y carbono-vanadio u otros de baja aleación. Consisten en preparar una serie de barras circulares entalladas de 19.05 mm de diámetro y 125 mm de longitud que son templadas en agua desde temperaturas de 790, 850 y 875 °C. Después se rompen por impacto y se examinan las fracturas. Por diferencias entre los granos de la fractura, generalmente los gruesos están en la zona central (sin temprar) y los finos en el exterior (templados) [3].
- ✓ **Curvas de dureza de redondos de diferentes diámetros templados.-** Consiste en determinar después del temple la dureza en el interior de redondos de acero, esto se realiza preparando por forja o laminación una serie de barras de diverso diámetro que después de un ligero torneado se dejan a medidas escalonadas. Luego se templan esos redondos y a continuación se cortan las barras y se determinan la dureza en la sección trasversal desde la periferia al centro. Finalmente, con los resultados obtenidos se construyen las curvas de dureza, llamadas generalmente “Curvas U” que caracterizan cada tipo de acero [3].
- ✓ **Determinación de curvas de dureza empleando discos de acero.-** Consiste en que el acero que se va ensayar, se cortan discos de ~10 mm de espesor del diámetro que se requiere estudiar perforadas en el centro y con las superficies planas rectificadas, para luego poder medir bien las

durezas. Se coloca un disco de acero que se va a ensayar entre dos cilindros del mismo material y se sujeta todo el conjunto por medio de un tornillo pasante que lo aprisiona fuertemente, de esta forma es templado y luego se sueltan las diferentes piezas y se mide la dureza del disco con gran facilidad [3].

- ✓ **Ataque químico de las secciones templadas.-** Consiste en observar las secciones transversales de barras de aceros fracturadas después del temple y posteriormente atacadas químicamente. Se comienza entallando las barras, luego se templan, se rompen y las secciones transversales se planean por rectificado [3].
- ✓ **Ensayo Jominy.-** Método Jominy o ensayo Jominy es un procedimiento estándar para determinar la templabilidad. Se trata de templar una probeta estandarizada del acero estudiado. Primero se calienta a la temperatura de austenización, posteriormente enfriándola mediante un chorro de agua con una velocidad de flujo y a una temperatura específica, el cual sólo enfría su cara inferior. Dicha cara actúa como superficie templada y enfría la probeta de forma longitudinal hacia su extremo superior sólo por conducción, apareciendo un gradiente de velocidades de enfriamiento desde la máxima velocidad en el extremo templado (inferior), a la mínima en el extremo superior. Una vez que la probeta se ha enfriado a temperatura ambiente, se desbasta dos tiras de 0.4 mm de espesor y se determina la dureza a lo largo de los 50 mm primeros de la probeta. En los primeros 12.5 mm las lecturas de dureza se toman a intervalos de 1.6 mm y en los 37.5 mm siguientes cada 3.2 mm. Después se traza una curva de templabilidad representando los valores de dureza en función de la distancia del extremo templado [3].

1.3. PROCESO DE REVENIDO

Los aceros después del temple suelen quedar generalmente demasiados duros y frágiles para los usos que van a ser destinados. Estos

inconvenientes se corrigen por medio del tratamiento térmico de revenido, que consiste en calentar el acero a una temperatura por debajo de su temperatura crítica inferior y luego enfriado generalmente al aire, otras veces en aceite o agua, según la composición química del mismo. El objeto del revenido no es eliminar los efectos del temple si no modificarlos, disminuyendo la dureza y la resistencia, aumentando la tenacidad y eliminando también los esfuerzos residuales generados por el temple [3].

1.3.1. MODIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Los aceros al carbono con un temple teóricamente perfecto están constituidos por cristales de martensita. El acero de esta forma es muy resistente, pero tiene muy poca ductilidad y tenacidad. Si el acero templado se vuelve a calentar a diferentes temperaturas comprendidas entre la temperatura ambiente y 700 °C, después enfriarlas al aire, la resistencia a la tracción disminuye progresivamente a medida que se eleva la temperatura del revenido y al mismo tiempo aumenta la ductilidad y la tenacidad [3].

La resistencia al choque o resiliencia que es generalmente muy baja cuando el revenido se hace a temperaturas inferiores a 450 °C aumenta con un cambio notable cuando el revenido se efectúa a temperaturas elevadas [3].

En ciertos aceros especiales de alta aleación en los que después del temple quedan además de martensita algo de austenita residual sin transformarse, se presenta un aumento de dureza cuando el revenido se hace en la zona de temperatura comprendida entre 350 y 550 °C. Entonces la austenita residual se transforma en bainita, apreciándose por este motivo un aumento de dureza [3].

1.3.2. MODIFICACIÓN DE LOS CONSTITUYENTES MICROSCÓPICOS

La variación de características que experimentan los aceros por efecto del revenido, son debidas a los cambios de microestructura que se producen y que consisten principalmente en la descomposición más o menos completa de la martensita en otros constituyentes más estables [3].

En un acero de 0.90 % de C revenido se ve que la primera transformación que sufre la martensita es una modificación de su estructura cristalina. La martensita de retícula tetragonal centrada en el cuerpo obtenida durante el temple que consiste en una solución sobresaturada de carbono se transforma al iniciarse el calentamiento del acero en el revenido, en martensita de retícula cúbica centrada en el cuerpo o sea de la misma malla reticular que la ferrita. Es decir existe una ligera modificación en la malla cristalina y además el carbono que tenía la martensita en solución sobresaturada, se precipita en forma de pequeñísimas partículas microscópicas. Por efecto de esta precipitación se oscurecen las agujas de martensita y existe una disminución de volumen y un ligero aumento de dureza. Al aumentarse luego la temperatura de revenido se inicia la formación de pequeñísimas partículas de cementita [3].

1.3.3. FRAGILIDAD DEL REVENIDO EN LA ZONA 225 - 350 °C

Cuando se efectúa el revenido de algunas clases de aceros en la zona de temperaturas comprendida entre ~225 y 350 °C, se suele presentar una ligera disminución de la tenacidad [3].

Si se efectúan ensayos sistemáticos con probetas de diversos aceros templados y revenidos a distintas temperaturas, se puede observar que en esa zona, algunos aceros, a pesar de experimentar un ablandamiento no presentan como era de esperar el clásico aumento de tenacidad, sino que ésta también disminuye [3].

Este fenómeno se presenta en los aceros cuando después del temple queda en su microestructura algo de austenita retenida. Al transformarse esa austenita en otros constituyentes de menor tenacidad que ella, se manifiesta la fragilidad [3].

En los aceros de alta aleación esta fragilidad se presenta a más alta temperatura que en los aceros al carbono [3].

Los revenidos a muy baja temperatura ~150 a 200 °C, en cambio, son en general siempre recomendables porque eliminan los esfuerzos que tienen los aceros después del temple y aumenta la tenacidad, sin disminuir o disminuyendo muy poco, la dureza del acero [3].

1.3.4. FRAGILIDAD DEL REVENIDO (FRAGILIDAD KRUPP)

Es muy conocido el clásico fenómeno de fragilidad que se presenta en el revenido de los aceros cromo-níquel y en algunas otras clases de aceros. A este fenómeno se le conoce con el nombre de fragilidad de revenido o fragilidad Krupp y se presenta cuando después del temple, el acero permanece durante bastante tiempo en la zona de temperaturas comprendidas entre 450 y 550 °C [3].

Cuando el revenido se hace en la zona entre 450 y 550 °C y la permanencia a esas temperaturas es bastante prolongada, la fragilidad se presenta siempre en los aceros sensibles a este fenómeno, independientemente de la velocidad de enfriamiento. Por esa causa, deben evitarse esas temperaturas de revenido y en el caso de emplearse se procurará que la duración del revenido sea lo más corta posible [3].

Cuando el revenido se hace a temperaturas superiores a 550 °C, la fragilidad se puede producir si el enfriamiento es muy lento, por permanecer el acero durante esa fase mucho tiempo en la zona de temperaturas peligrosas. En esos casos, el fenómeno de fragilidad de revenido se caracteriza por la

diferencia que existe entre los valores de la resiliencia que se obtienen cuando el enfriamiento se hace rápido y cuando el enfriamiento es lento [3].

Para valorar la importancia de este fenómeno, se suele utilizar el coeficiente de la susceptibilidad absoluta S_a (Ec. 1.2):

$$S_a = \frac{\text{Resiliencia con enfriamiento muy rápido}}{\text{Resiliencia con enfriamiento lento}} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1.2)$$

También, se suele utilizar el coeficiente de susceptibilidad relativa (Ec. 1.3):

$$S_r = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \quad (1.3)$$

La fragilidad que tiene un acero después de un revenido efectuado en condiciones desfavorables se puede hacer desaparecer por medio de un segundo revenido a temperatura un poco más elevada, seguido de enfriamiento rápido. También, se puede volver frágil un acero que ha quedado tenaz después de un revenido efectuado con enfriamiento rápido, si se le da un nuevo revenido con enfriamiento lento. Se puede, por lo tanto, hacer aparecer y desaparecer esta fragilidad de los aceros por revenidos sucesivos [3].

1.3.5. COLORES DEL REVENIDO

Cuando el revenido de los aceros se efectúa en atmósferas oxidantes (bien al aire o en hornos en los que existe gran cantidad de oxígeno), se forma en la superficie de los aceros una película muy delgada de óxido, cuyo color varía con la temperatura máxima alcanzada en el revenido. Esa coloración superficial que adquieren los aceros templados sirve muchas veces para controlar el revenido de los aceros de herramientas. Para que la observación

sea fácil y correcta, conviene que las herramientas tengan las superficies limpias y pulidas [3].

En la Tabla 1.2 se presenta las temperaturas correspondientes a los colores que adquieren los aceros en este tratamiento. Se observará que en los aceros inoxidables los colores aparecen a temperaturas muy diferentes a la de los aceros al carbono y aleados [3].

Tabla 1.2. Colores de los aceros durante el revenido.

Color	Temperaturas, °C	
	Aceros al carbono y de baja aleación	Aceros inoxidables
Amarillo pálido	220	---
Amarillo paja	230	280
Amarillo oro	245	320
Amarillo pardo	255	350
Violeta oscuro	265	400
Violeta purpura	275	470
Azul claro	290	510
Azul pardo	297	550
Azul verdoso	330	640
Gris negro	400	725

1.4. INVESTIGACIONES DE DESGASTE

En un estudio se ha investigado la influencia de los tratamientos térmicos de recocido, normalizado y temple-revenido del acero AISI 1045, sobre el desgaste abrasivo en un medio acuoso. Los ensayos de desgaste abrasivo en un medio acuoso se desarrollaron en un equipo diseñado sobre la base de la norma ASTM designación G105, en donde la probeta se sumerge en el lodo abrasivo aplicando una carga constante, durante un determinado período de tiempo y desplazamiento, para luego proceder a evaluar el desgaste por medio de diferencia de pesos. Los parámetros establecidos para las probetas fueron fuerza tangencial aplicada 2.22 N, velocidad de rotación 250 rpm y el tiempo de exposición al medio abrasivo es 8 min basándose en la norma ASTM

designación G105. Así, se determinó que el desgaste que tuvieron los disco recocidos presentan mayor intensidad de desgaste en comparación con el acero AISI 1045 normalizado, debido que este tratamiento térmico de normalizado tiene como objetivo afinar la microestructura del acero. También se concluye que el acero AISI 1045 comercial que fue expuesto al medio acuoso de desgaste abrasivo presento mejores propiedades con respecto a la pérdida de peso para el acero AISI 1045 con tratamiento térmico de normalizado a 900 °C. Por lo tanto, la buena resistencia mostrada al desgaste abrasivo por el acero AISI 1045 con tratamiento térmico de temple a 840 °C ha permitido disminuir la pérdida de material al exponerle al medio acuoso, mejorando sus propiedades al desgaste [5].

En otro estudio se investigó la influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AISI 1045 tratado térmicamente desde temperaturas entre 760 ± 10 °C (región intercrítica) y el revenido a 500 °C a diferentes tiempos de mantenimiento de 15, 30 y 45 min. Se determinó que la resistencia al desgaste abrasivo aumento con el incremento de tiempo de revenido, lo cual hace que este acero AISI 1045 con tratamiento térmico intercrítico mejore su resistencia al desgaste abrasivo propio 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. Reportan, que los valores de dureza obtenidos en las probetas tratadas térmicamente desde 760 ± 10 °C aumentaron en ~300%, comparadas con el material base suministrado por el fabricante. Las probetas con revenido a 500 °C con tiempo de sostenimiento de 15 y 30 min proporcionan una mejor definición de los granos de ferrita en la estructura. Entre más tiempo de sostenimiento en el revenido a 500 °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 ~57.9 % según el ensayo de desgaste para las probetas

tratadas entre 760 ± 10 °C respecto al material base suministrado por el fabricante [6].

Finalmente, en otro estudio se investigó el comportamiento al desgaste tipo espiga sobre disco del acero AISI 1045 con: i) tratamiento térmico de temple y revenido, ii) tratamiento térmico de temple y revenido y tratamiento superficial de nitruración iónica y iii) tratamiento térmico de temple y revenido y tratamiento superficial de nitruración iónica y posterior temple por inducción. Los tratamientos térmicos de temple se realizaron a 850 °C durante 30 min en una atmósfera levemente carburante, y el enfriamiento en aceite; y los revenidos se llevaron a cabo a 400 °C durante 2 h y enfriamiento al aire. Los tratamientos de nitruración se llevaron a cabo en un reactor industrial de la empresa IONAR S.A. con un plasma DC pulsado donde la pieza a tratar actúa como cátodo, bajo las siguientes condiciones: en una mezcla gaseosa de 25% N_2 y 75% H_2 , a 510 °C durante 45 h, con un voltaje de 700 V y una densidad de corriente de ~ 1 mA/cm². Los temples por inducción se realizaron a una frecuencia de 200 kHz con un calentamiento de 8 s en un inductor frontal, que entrega una potencia de 6.5 kVA, seguido por enfriamiento en agua. Se analizaron cuatro probetas para cada condición de material. Los ensayos de desgaste se realizaron con carga de 2 N, una distancia de 500 m y utilizando como espiga una bola de alúmina de 6 mm de diámetro, con una velocidad tangencial de 10 cm/s. En consecuencia, el tratamiento combinado de nitruración + temple por inducción permitió aumentar tanto la dureza superficial como también la profundidad de esta, y mejorar la resistencia al desgaste por deslizamiento con respecto a las probetas sólo nitruradas. Se rectificó la capa blanca superficial obtenida durante la nitruración, lo que es beneficioso para aplicaciones donde la fragilidad sería un problema. Además, se obtuvo un coeficiente de fricción más bajo que con los otros tratamientos lo cual implicaría una reducción en el consumo de energía en aplicaciones mecánicas. Se demostró que esta combinación de tratamientos, nitruración + temple por

inducción, permitirá aumentar la vida útil de las piezas fabricadas con este acero [7].

1.5. APLICACIONES DEL ACERO AISI 1045

El acero AISI 1045 es un acero grado ingeniería de aplicación universal que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación. Frecuentemente se utiliza para elementos endurecidos a la llama o por inducción. Este acero puede ser usado en condiciones de suministro: laminado en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite y revenido; o templado en agua y revenido) [8].

Este acero a pesar de no pertenecer a la familia de aceros aleados es excelente para temple y revenido, aumentando sus propiedades mecánicas al ser un acero de medio carbono; se puede dar incluso un temple por inducción, generando una dureza superficial dejando el núcleo con menor dureza para proporcionar mayor tenacidad en la fabricación de piezas que así lo requieran [8].

Este acero de medio carbono se usa cuando la resistencia y dureza obtenidas por el tratamiento térmico o por deformación en frío, son suficientes para satisfacer las condiciones de servicio requeridas [8].

Es ampliamente utilizado en la industria automotriz, se usa en partes de máquinas que requieran dureza y tenacidad como: manivelas, chavetas, pernos, engranes para bajas velocidades, acoplamientos, arboles, bielas, cigüeñales, ejes de maquinaria de resistencia media, piezas de armas, cañones de fusiles, barras de conexión, tornillería grado 5 y pernos de anclaje [8].

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe cada etapa que se realizó en el desarrollo del estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, dicho proceso comprende en primera instancia el dimensionamiento y maquinado de los discos y espigas. Así, se fabricaron 18 discos de acero AISI 1045 y 36 espigas con punta semiesférica de acero AISI O1. También, se presentan las especificaciones del tratamiento térmico de temple y revenido que se realizó a los discos de acero AISI 1045 y a las espigas de acero AISI O1. Se presentan las combinaciones o variables bajo las cuales se realizaron los ensayos de desgaste. Finalmente, se describe el proceso de determinación de dureza en los discos. Cabe destacar que durante el desarrollo de este capítulo se consideraron los recursos que se necesitaron para ejecutar cada una de las etapas posteriores.

2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Fig. 2.1 se presenta el diagrama de flujo de la metodología experimental que se realizó, para ello es importante citar los pasos que se realizó y su secuencia. Como se explicó en la introducción del presente capítulo, se inicia con el dimensionamiento de los discos para posteriormente realizar su respectivo maquinado, luego se establecen los procesos propios de los tratamientos térmicos, dentro de los cuales se incluyen etapas de limpieza y finalmente la ejecución de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco bajo las diferentes condiciones de estudio.

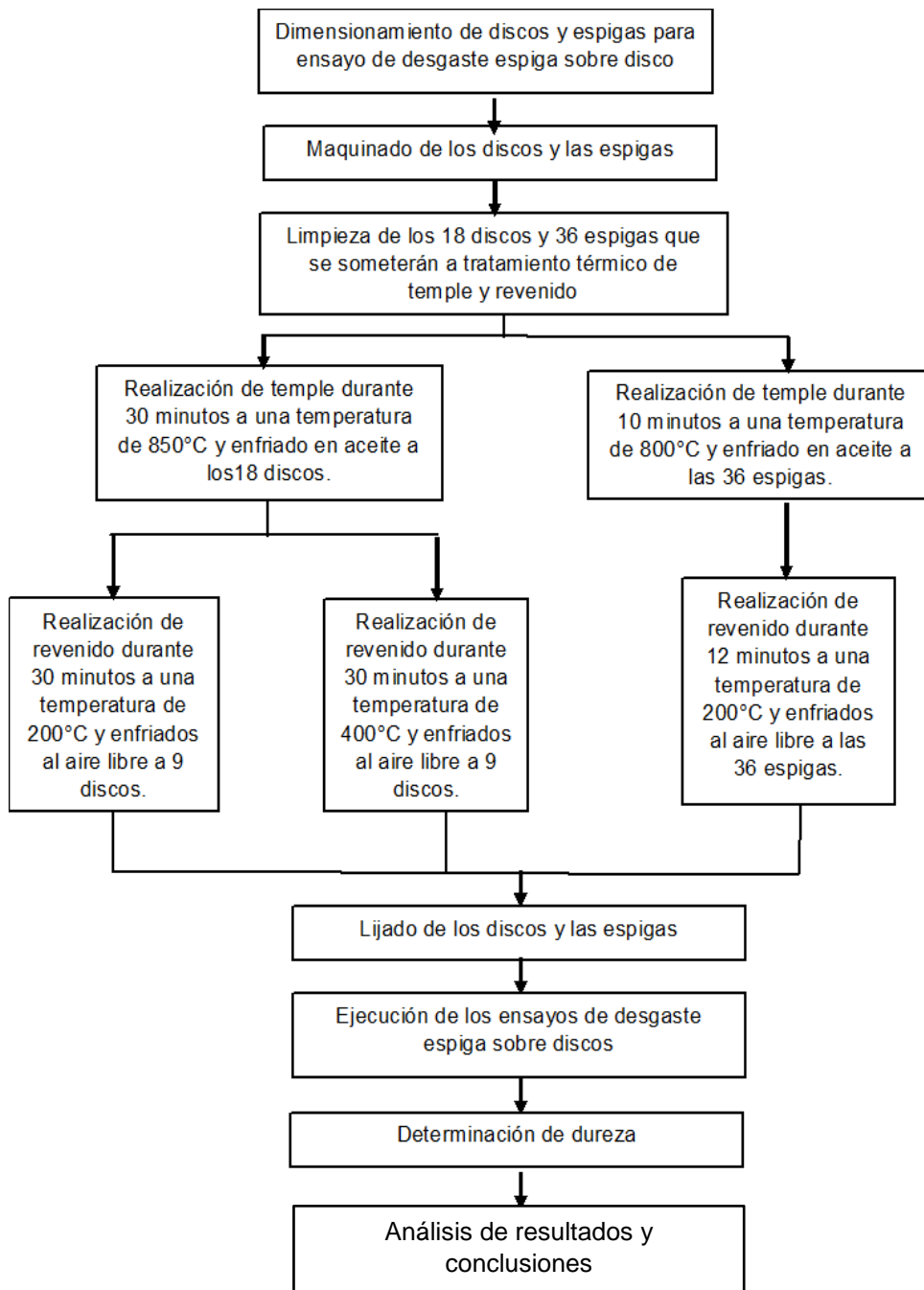


Fig. 2.1. Diagrama de flujo utilizado en la metodología experimental.

2.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS DISCOS Y ESPIGAS PARA LOS ENSAYOS DE DESGASTE

El dimensionamiento de los discos se realizó tomando en consideración el manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3. Dicho equipo se utiliza con el módulo básico de estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260. En la Fig. 2.2 se presenta las dimensiones tanto de los discos de acero AISI 1045 como de las espigas de acero AISI O1; los disco posee un diámetro de 50 mm y un espesor de 10 mm, cuentan con un bisel en ambas caras de 1 mm y un agujero de 4.37 mm en su centro; dicho agujero permite la sujeción del disco al vaso portador del mismo, mediante un perno, existe holgura entre el perno y el disco, por lo que no es necesario realizar un ajuste. La espiga posee un diámetro de 4 mm y una longitud de 25 mm.

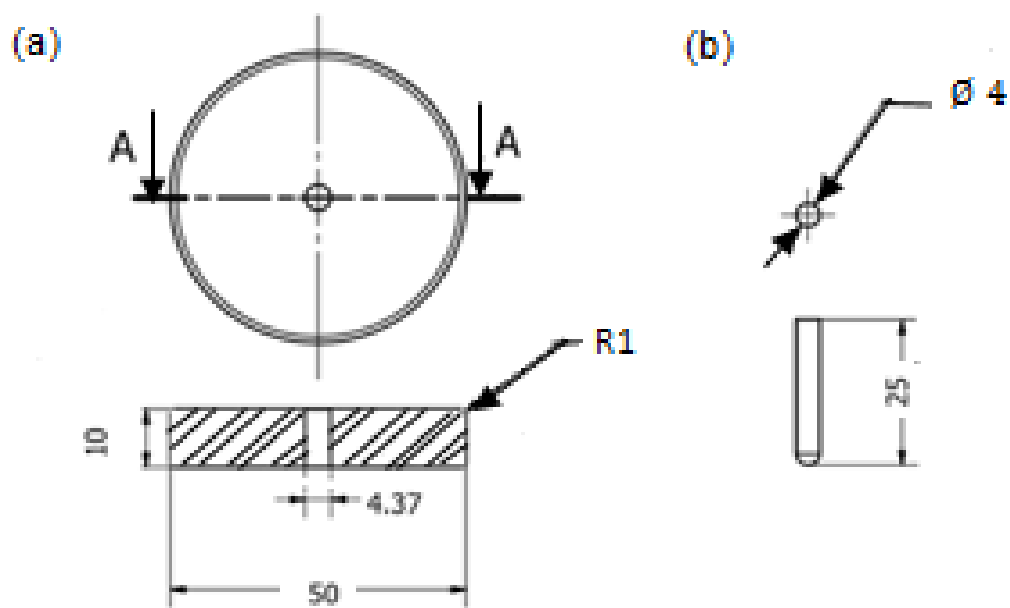


Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes a utilizar en el ensayo tipo espiga sobre disco. Cotas en mm: (a) Disco; y (b) Espiga.

2.3. MAQUINADO DE LOS DISCOS Y ESPIGAS

Los discos de acero AISI 1045 y las espigas de acero AISI O1 se maquinaron a partir de una barra cilíndrica de diámetro de 50.80 mm (2 pulg) y de 12.7 mm (1/2 pulg), respectivamente. Estas barras estaban en estado de entrega de recocido, la composición química de cada barra se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química de los aceros a estudiar.

Aleación	Elementos							
	% en peso							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	V
AISI 1045	0.43-0.50	0.6-0.9	0.2.-0.4	<0.04	<0.05			
AISI O1	0.95	1.00	0.50	0.030	0.030	0.50	0.50	0.030

El maquinado de los discos se lleva a cabo en un torno convencional marca COMEC y se inició realizando un proceso de cilindrado para obtener el diámetro de 50 mm a partir de los 50.80 mm originales de la barra. Luego se procedió a realizar cortes sobredimensionados de los especímenes a 15 mm de espesor, utilizando una sierra industrial; posteriormente, en el torno se refrentaron ambas caras y luego se perforaron un agujero en el centro de cada disco con una broca de 4.37 mm (11/64 pulg). Cada disco finalizado se colocó en un recipiente con aceite para protegerlos de la corrosión ambiental.

El maquinado de las espigas se inició realizando un proceso de cilindrado para obtener el diámetro de 4 mm a partir de los 12.7 mm de diámetro original de la barra. Luego se procedió a realizar cortes de los especímenes a 25 mm de longitud y posteriormente se realizó un maquinado en un torno CNC para obtener la punta semiesférica de las espigas.

2.4. LIMPIEZA DE DISCOS Y ESPIGAS

Previo al temple, se eliminó cualquier tipo de impureza que se encuentre presente en la superficie de las piezas; el primer paso fue un lavado con agua y jabón para remover los residuos del aceite en el que se protegieron los especímenes de la corrosión: Posteriormente, los especímenes se secan con aire caliente para propiciar la remoción total de la humedad.

2.5. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

A partir de la bibliografía y recomendaciones de los fabricantes para realizar el tratamiento térmico de temple de los 18 discos de acero AISI 1045 se eligió una temperatura de mantenimiento durante el proceso de temple de 850 °C y un tiempo de mantenimiento de 30 min, luego el enfriamiento se realizó en aceite. Posteriormente, a 9 discos se les realizó el tratamiento térmico de revenido a alta temperatura de 400 °C. También, a los otros 9 discos se les realizó el tratamiento térmico de revenido a baja temperatura de 200 °C. Así, en ambos casos de los revenidos los enfriamientos se realizaron al aire hasta la temperatura ambiente.

Es importante destacar que los tratamientos térmicos de temple y revenidos se realizaron en una cámara con atmósfera inerte de argón, con el fin de evitar la oxidación de los discos durante el proceso, en la Fig. 2.3 se presenta dicha cámara en funcionamiento durante la realización de uno de los tratamientos térmicos. El proceso para realizar el tratamiento térmico consiste en el montaje de la cámara de gas inerte dentro de la cámara del horno. Dicho montaje requirió la colocación de la cámara de gases inertes centrada en la bandeja del horno para luego sellar la parte frontal del horno con fibra cerámica, a modo de confinar la energía térmica dentro del horno, evitando así pérdidas de calor en la parte frontal del horno y propiciar un ambiente seguro de operación.



Fig. 2.3. Horno y cámara de gas inerte que se utilizó para realizar el tratamiento térmico de los discos.

Una vez el equipo se encontró colocado adecuadamente, se procedió a precalentar el horno, posteriormente se aumentó la temperatura en intervalos de 100 °C cada 15 min hasta la temperatura establecida de 850 °C. Debido a las dimensiones de la cámara, solamente se introdujeron 3 discos dentro de ésta, para facilitar la extracción y para su enfriamiento en aceite; por lo tanto, el tratamiento térmico se realizó en 6 grupos, con 3 discos en cada uno de éstos. Posterior al colocar los discos dentro de la cámara, ésta se cierra y se sella usando silicón, esto con el propósito de evitar fugas y propiciar una atmósfera controlada. Una vez alcanzada la temperatura de temple, el tiempo de mantenimiento a la temperatura de temple para un espesor de 10 mm corresponde a 30 min, tiempo en el cual se mantienen los especímenes antes de ser retirados de la cámara de gas inerte y ser enfriados inmediatamente en

aceite. En la Fig. 2.4 se representa un disco con tratamiento térmico de temple en aceite.



Fig. 2.4. Disco con tratamiento térmico de temple.

Después del enfriamiento de los especímenes, se esperó a que el horno enfriara hasta 400 °C. Posteriormente se introducen los discos en la cámara en 3 grupos, con 3 discos en cada uno de éstos. En cada grupo los discos se mantuvieron durante 30 min, así transcurrido dicho tiempo, los discos se dejaron enfriar al aire libre.

Para el revenido de los 9 discos restantes, se esperó a que el horno continuara su enfriamiento hasta los 200 °C. Posteriormente se introducen los discos en la cámara en 3 grupos, con 3 discos en cada uno de éstos. En cada grupo los discos se mantuvieron durante 30 min, así transcurrido dicho tiempo, los discos se dejaron enfriar al aire libre.

2.6. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ESPIGAS

Las espigas de acero AISI O1 fueron sometidas a un tratamiento térmico de temple y revenido. El procedimiento para realizar el tratamiento térmico de las espigas consiste en los mismos pasos que se siguieron en el tratamiento térmico de los discos, con la única diferencia que en esta ocasión se realizó el tratamiento térmico de las 36 espigas en una sola sesión, para facilitar el proceso de temple se dispusieron 5 grupos de 7 a 8 espigas cada uno, así las espigas se amarraron con alambre..

La temperatura de austenización para el acero AISI O1 corresponde a 800 °C, el tiempo de mantenimiento para una sección de 4 mm a la temperatura dada es de 10 min y el enfriamiento se realizó en aceite, igual que los discos (ver, Fig. 2.5).

El proceso de revenido se realizó una vez que el horno se enfrió a la temperatura de 200 °C. El tiempo de mantenimiento a dicha temperatura, se seleccionó considerando que para una sección de 20 mm se requiere 1 h para este tipo de acero, así este tiempo correspondió a 12 min. Una vez transcurridos los 12 min las espigas se extrajeron de la cámara del horno para un enfriamiento al aire libre. Posterior al tratamiento térmico, los especímenes se guardan en un recipiente con aceite.



Fig. 2.5. Grupo de espigas templadas.

2.7. PREPARACIÓN PREVIA AL ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Todos los discos y las espigas se sometieron a un proceso previo a la ejecución del experimento de desgaste. Así, dicha preparación consistió inicialmente en una limpieza con jabón líquido y agua con el fin de eliminar el aceite utilizado para la protección contra la corrosión ambiental después de los revenidos.

Posteriormente, para los discos se realizó un proceso de lijado semiautomático en ambas caras de los discos, se realizó el lijado desde papeles bastos de SiC número 180, 240, 320, 400 y 500, hasta llegar a las más finas 600 y 1200.

Luego los especímenes se secaron utilizando aire caliente, para asegurar la remoción de la humedad. Posteriormente, los discos se envolvieron con papel absorbente y se guardaron en bolsas plásticas con cierre hermético para protegerlos de la corrosión.

2.8. DETERMINACIÓN DE DUREZA

Para la determinación de la dureza superficial, se utilizó una prueba de dureza Rockwell C, una escala recomendada para la determinación de dureza de materiales templados y revenidos. Para la realización de dicha prueba se utilizó un durómetro marca INNOVATEST ubicado en los Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de esta Universidad (ver, Fig. 2.6).

Para utilizar la escala C de dureza se aplicó una carga total de 150 kg_f y se utilizó un penetrador de diamante de geometría cónica. Así, se realizaron 3 tomas de dureza sobre diferentes puntos en la superficie de la muestra.

Para obtener la dureza de una probeta, esta debe poseer una superficie lisa y nivelada, de esta manera se permite tener una superficie paralela a la base del porta muestra y perpendicular a la carga aplicada por el penetrador,

lo cual garantiza que la medición sea más confiable. Además, la superficie debe de estar libre de óxidos, aceites o cualquier material contaminante.

Además, para determinar la dureza de la muestra se procedió a colocarla directamente sobre el portamuestra del durómetro y se acerca el penetrador a la superficie de la probeta, pero sin que tenga contacto con la superficie tal como se presenta en la Fig. 2.7. Posteriormente se realizó la prueba de dureza de manera automática.



Fig. 2.6. Durómetro marca INNOVATEST.

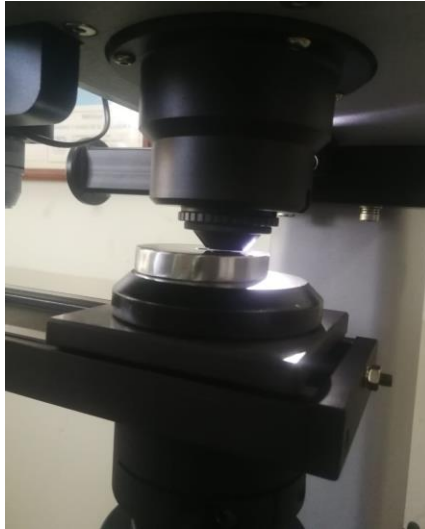


Fig. 2.7. Posicionamiento de la probeta durante la prueba de dureza.

En la Fig. 2.8 se presenta una gráfica que indica la aplicación de la carga durante la prueba de dureza, en donde se pueden resaltar los siguientes puntos:

- ✓ Aplicación de la precarga de 10 kg_f a los cinco segundos.
- ✓ Finalización de la aplicación de la precarga de 10 kg_f a los siete segundos.
- ✓ Incremento de la carga hasta los 150 kg_f a los 12 segundos.
- ✓ Finalización de la aplicación de la carga de 150 kg_f a los quince segundos.
- ✓ Disminución de la carga hasta el valor de la precarga de 10 kg_f dieciocho segundos.
- ✓ Finalización de la aplicación de la precarga de 10 kg_f a los veintitrés segundos
- ✓ Suspensión de la precarga a 0 kg_f en veinticinco segundos.

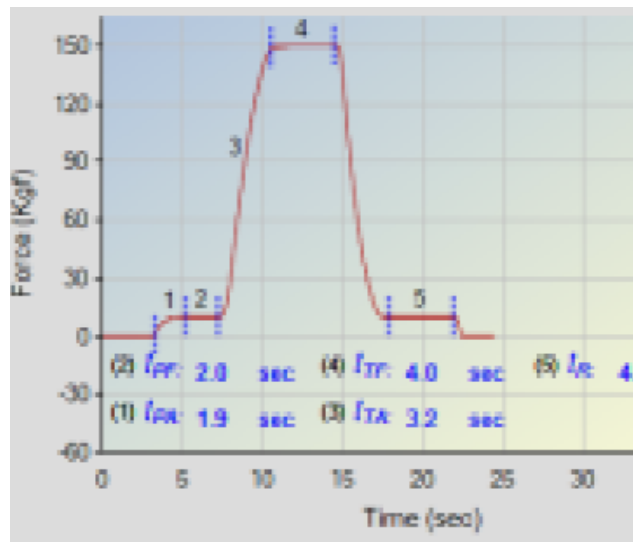


Fig. 2.8. Gráfica de aplicación de la carga en un ensayo de dureza.

2.9. ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco se realizaron en un módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3, el cual se ocupa como complemento al módulo básico para estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260, los cuales se encuentra ubicados en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica (ver, Fig. 2.9).

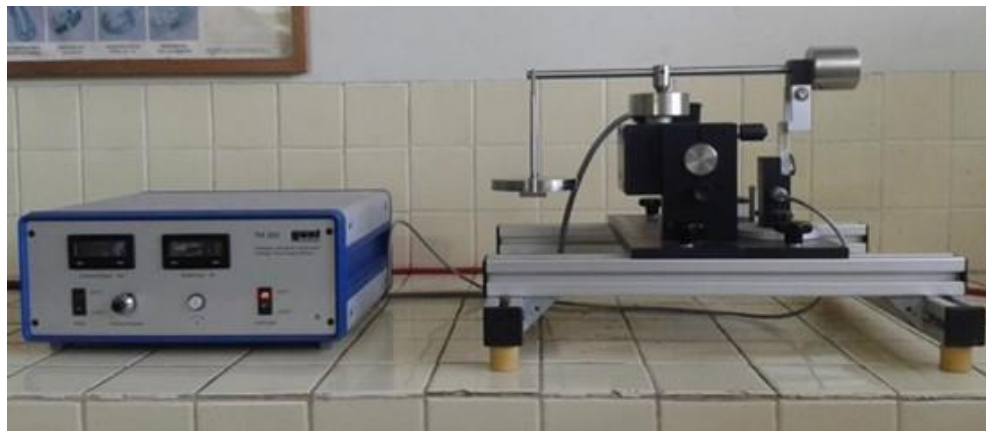


Fig. 2.9. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3.

El módulo para ensayos tipo espiga sobre disco permite posicionar una espiga con una superficie de contacto perpendicular a un disco, este último se fija a un vaso mediante un perno, permitiendo así mediante el árbol de accionamiento del módulo que el disco gire produciendo un movimiento de deslizamiento entre las dos superficies en contacto de los especímenes cuya trayectoria es un círculo en la superficie del disco; para el caso de los experimentos a realizar se utilizaron espigas de punta semiesférica. Cada espiga se posicionó contra el disco y se aplicó una carga constante por medio de un brazo al cual se le agregaron pesas, en la Fig. 2.10 se presenta un esquema del módulo para ensayos tipo espiga sobre disco en el que se enumeran sus componentes más importantes.

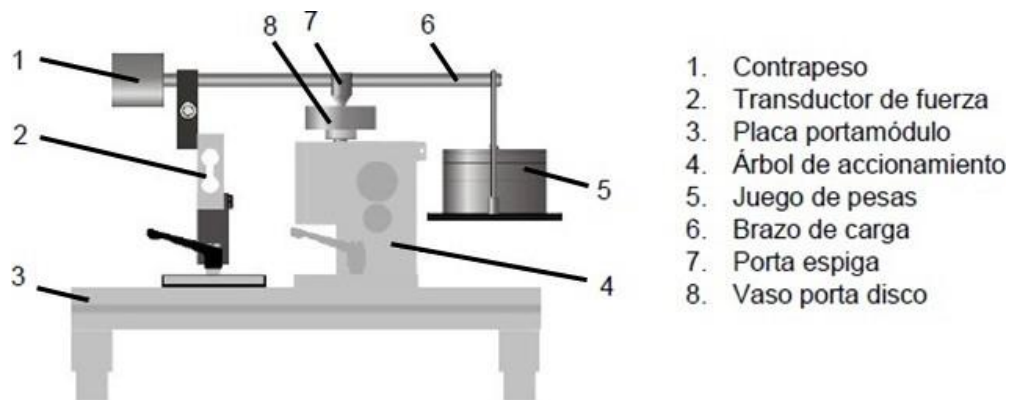


Fig. 2.10. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.

Los resultados de desgaste se reportan separadamente como la pérdida de masa en gramos para los discos y las espigas. La cantidad de desgaste se determinó pesando en una balanza analítica (ver, Fig. 2.11) ambos especímenes antes y después de la prueba. Se hace uso de los instrumentos de medición de masa ubicados en el Centro de Investigaciones de Metrología de la Universidad de El Salvador.



Fig. 2.11. Instrumentos utilizados para la medición de masa.

Los resultados de desgaste normalmente se obtienen realizando los ensayos para una distancia de deslizamiento, carga y velocidad constante. Así, en la Tabla 2.2 se presenta las diferentes variables del experimento o las condiciones de ensayo, se realizaron 3 experimentos por cada condición de ensayo.

Tabla 2.2. Condiciones y variables bajo las que se realizaron los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.

Condición	Variables		
	Velocidad, m/s	Distancia de deslizamiento, m	Carga, N
Acero AISI 1045 templado y revenido a 200 °C y espiga de acero AISI O1 templada y revenida	0.15	1000	10
			20
			30
	0.15	2000	10
			20
			30
Acero AISI 1045 templado y revenido a 400 °C y espiga de acero AISI O1 templada y revenida	0.15	1000	10
			20
			30
	0.15	2000	10
			20
			30

La velocidad a la que se realizaron todos los experimentos corresponde a 0.15 m/s, la cual es una velocidad recomendada para realizar los ensayos tipo espiga sobre disco. El módulo con que se cuenta para hacer dichos ensayos permite ajustar con el potenciómetro un número de revoluciones de salida entre 0 y 200 rpm, por lo tanto, fue necesario convertir la velocidad lineal a velocidad angular para determinar el número de revoluciones con el que se realizarán los experimentos. Para convertir la velocidad lineal a velocidad angular se ocupa la Ec. 2.1.

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2.1)$$

donde:

ω es la velocidad angular en rad/s,

v es la velocidad lineal en m/s, y

r es el radio de la trayectoria de deslizamiento en m.

El diámetro de la trayectoria de deslizamiento se obtiene realizando una medición en el disco de prueba que incluye el módulo de ensayos tipo espiga

sobre disco, en dicho espécimen se realizaran dos mediciones, la del diámetro interno de la huella y la del diámetro externo, cuyos valores fueron 4.06 y 4.26 cm, respectivamente. Luego, de ambos valores se obtiene el diámetro central de la huella de desgaste, el cual será el valor medio correspondiente a 4.16 cm. Por lo tanto, sustituyendo en Ec. 2.1 se obtiene un valor de 7.21 rad/s, convirtiéndolo a revoluciones por minuto se tienen 68.87 rpm, los cuales se aproximan a 69 rpm.

Debido a que el módulo para ensayos tipo espiga sobre disco no puede determinar la distancia de deslizamiento directamente, durante la ejecución de los experimentos se llevó un registro del tiempo, en lugar de distancias. Para obtener el tiempo equivalente a una determinada distancia se procede a dividir la distancia de deslizamiento entre la velocidad lineal, así como se indica en la Ec. 2.2.

$$t = \frac{S}{v} \quad (2.2)$$

donde:

t es el tiempo en s;

S es la distancia de deslizamiento en m; y

v es la velocidad lineal de deslizamiento en m/s.

También, debido a que la velocidad de deslizamiento es la misma para todos los experimentos 0.15 m/s y se trabaja con dos distancias de deslizamiento diferentes, el tiempo requerido tanto para 1000 y 2000 m es de 6,666 y 13,333 s, respectivamente; luego transformándolos corresponden a 1 h con 51 min y 3 h con 42 min, respectivamente.

Una vez establecidas las variables de tiempo y cargas se procedió a realizar los ensayos. Después de encender el módulo de mando y el motor de la misma, se colocaron tanto el disco como la espiga en sus respectivos soportes y se bajó el brazo de carga de manera que la espiga se apoyó en el disco, luego se colocaron en el porta pesas la combinación de pesas

correspondiente a la carga bajo la que se realizó el experimento según la Tabla 2.3, posteriormente se colocó éste en el extremo del brazo de carga. Finalmente, se ajustó el número de revoluciones en el módulo de mando y se leyó el valor de la fuerza de fricción y se llevó un registro de los valores en función del tiempo, así se realizaron lecturas cada minuto con el objetivo de generar una curva para el coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento, para determinar el coeficiente de fricción se hace uso de la Ec. 2.3.

$$\mu = \frac{f_f}{F} \quad (2.3)$$

donde:

μ es el coeficiente de fricción en ua,

f_f es la fuerza de fricción en N, y

F es la carga seleccionada en N.

2.10. ESTUDIO METALOGRAFICO

Para estudiar las características microestructurales del acero AISI 1045 se utilizó un microscopio óptico, en el cual se utilizaron dos muestras una recocida y la otra muestra templada en aceite. Para analizar las muestras en primera instancia se realizó un corte a uno de los especímenes tal como se presenta en la Fig. 2.12.

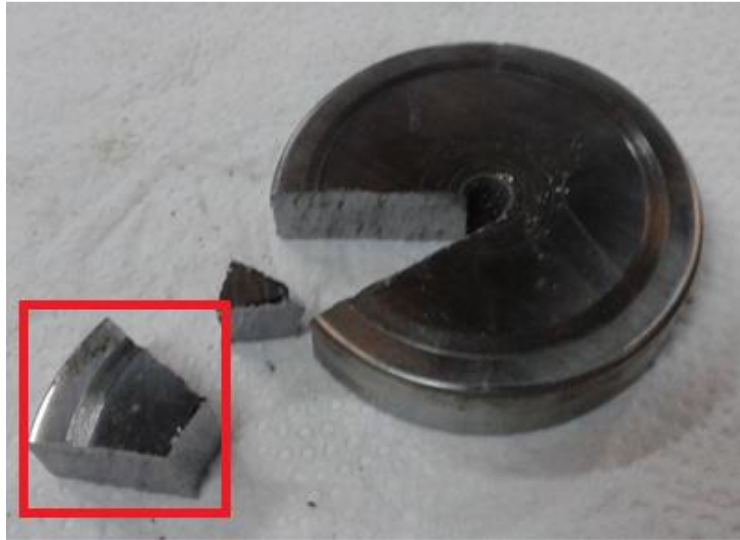


Fig. 2.12. Corte de una muestra metalográfica.

Posteriormente se realizó el embutido de la muestra extraída, para realizar dicho proceso se utilizó resina poliéster, el proceso se ejecutó en frío y se esperó ~12 h para que la resina se secase.

Luego, la superficie de las muestras se lijó utilizando lijas de SiC de los números 100, 200, 400, 500, 600 y 1200. Posteriormente, las muestras se pulieron tipo espejo, para dicha operación se utilizó alúmina (Al_2O_3) sobre un paño afelpado adherido a un plato giratorio de una máquina pulidora.

Una vez pulida la superficie se procedió a atacar químicamente la superficie pulida para poder revelar sus fases presentes. El reactivo utilizado para el ataque químico fue nital al 2% de concentración que es una solución de ácido nítrico (2%) diluido en alcohol etílico que compone el 98% restante.

Posteriormente se utilizó un microscopio óptico para poder observar la muestra a un aumento de 100x y observar la microestructura de la muestra. Además, para la captura de las imágenes se utilizó un equipo Mimio View y una computadora, tal como se presenta en la Fig. 2.13.

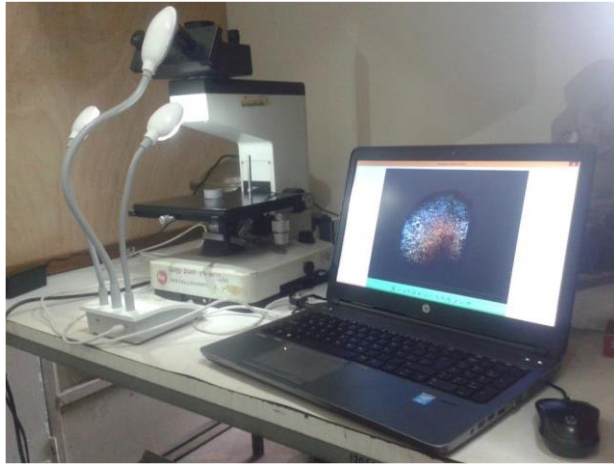


Fig. 2.13. Microscopio y Mimio View utilizado para la captura de imágenes.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la realización de los ensayos experimentales descritos en el capítulo 2, su ordenamiento y posterior análisis.

La presentación de los resultados se realiza mediante tablas y figuras tanto para el valor de dureza como también para los ensayos tipo espiga sobre discos correspondientes a las diferentes condiciones de los discos a ensayar y a las diferentes combinaciones de parámetros de los ensayos, realizando un análisis estadístico de los datos y comparándolos entre sí.

3.1. DETERMINACIÓN DE DUREZA ROCKWELL C

La determinación de la dureza de los especímenes con tratamiento térmico de templado y revenido a baja y alta temperaturas se presenta en las Tablas 3.1 y 3.2, respectivamente. Para cada condición de revenido se prepararon 3 muestras a las cuales se les realizó 2 indentaciones (o penetraciones con el inventador) a cada una de ellas. Además, para cada muestra se presenta el promedio de dureza y para cada condición de revenido se presenta el promedio y la desviación estándar de HRC C.

Tabla 3.1. Medición de dureza Rockwell C en muestras de acero AISI 1045 templadas en aceite y revenido a 200 °C.

Muestra	Número de indentación	Valores de HRC	Promedio de HRC por muestra	Promedio de HRC	DE de HRC
1	1	26.86	25.63	25.96	1.5
	2	24.39			
2	1	24.74	24.92		
	2	25.1			
3	1	26.36	27.35		
	2	28.33			

El valor promedio de dureza en las muestras de acero AISI 1045 templadas en aceite y revenido a 200 °C es 25.96 HRC, con una desviación estándar de 1.5 HRC.

Tabla 3.2. Medición de dureza Rockwell C en muestras de acero AISI 1045 templadas en aceite y revenido a 400 °C.

Muestra	Número de indentación	Valores de HRC	Promedio de HRC por muestra	Promedio de HRC	DE de HRC
1	1	23.03	23.54	23.58	0.93
	2	24.04			
2	1	23.63	23.36		
	2	23.08			
3	1	25.15	23.84		
	2	22.52			

El valor promedio de dureza en las muestras de acero AISI 1045 templadas en aceite y revenido a 400 °C es 23.58 HRC, con una desviación estándar de 0.93 HRC.

3.2. ANÁLISIS METALGRÁFICO

Utilizando un microscopio óptico, cámara Mimio View y una computadora se capturaron las imágenes. Así, en la Fig. 3.1 y 3.2 se presentan unas fotografías de la microestructura de la muestra de acero AISI 1045 recocida y una muestra del acero AISI 1045 templada en aceite.

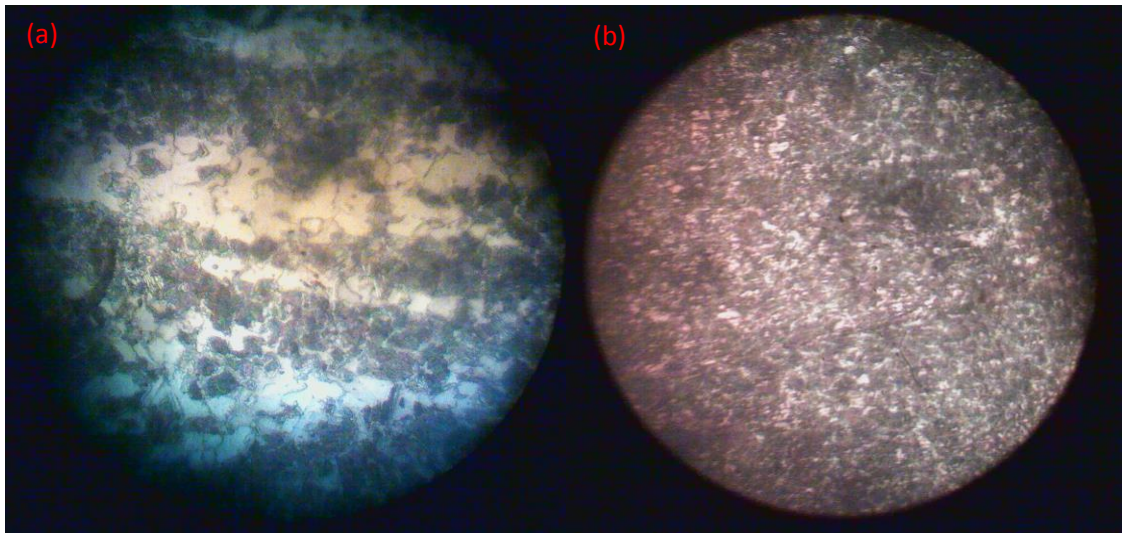


Fig. 3.1. Microestructura de acero AISI 1045: (a) Recocido; y (b) Templado en aceite.

En la Fig. 3.1a se puede observar que la estructura no contiene la cantidad de perlita que corresponde en un acero AISI 1045 con un tratamiento térmico de recocido. En la Fig. 3.2b se puede observar que presenta poca cantidad de martensita transformada la presencia de perlita, la cual corresponde con los valores de dureza obtenidos para cada condición de material.

3.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

A continuación, se presentan los resultados obtenidos después de realizar dichos ensayos tipo espiga sobre disco, dichos resultados comprenden las cantidades de desgaste tanto de los discos de acero AISI 1045 con temple y revenido a baja y alta temperaturas y el desgaste de las espigas de acero AISI O1 con tratamiento térmico temple y revenido.

En el capítulo 2 se especificó el uso de una balanza analítica para poder determinar la masa de los especímenes antes y después de cada ensayo. Para cada espécimen se realizaron 3 mediciones diferentes de masa antes y después de cada ensayo. En las Tablas 3.2 y 3.3 se presentan los valores promedio para la masa de cada condición de material, especificando los parámetros bajo los que se realizó la determinación de la masa; de la misma

manera, en las Tablas 3.4 y 3.5 se presentan los datos correspondientes a las pérdidas de masa de las espigas de acero AISI O1 utilizadas con las condiciones de los discos de acero AISI 1045 con temple y revenido a baja y alta temperaturas.

En la Tabla 2.2 se presenta las variables y condiciones bajo las que se realizaron los ensayos de desgaste, para cada condición se realizaron 3 ensayos, así en las Figs. 3.2 – 3.5 se presentan las gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 templado en aceite y revenida a baja y alta temperaturas.

En las Figs. 3.6 - 3.9 se presentan gráficas de pérdidas de masa en espigas de acero AISI O1 con tratamiento térmico de temple y revenido. Dichos resultados fueron obtenidos mediante la toma del valor de pérdida de masa durante la realización de cada experimento.

Tabla 3.3. Valores de desgaste en discos de acero AISI 1045 templados en aceite y revenido a 200 °C.

Nº	Deslizamiento, m	Carga, N	Medida de masa inicial, g	Medida de masa final, g	Diferencia de masas, g	Pérdida de masa promedio, g	D.E. x10 ⁻² , g
1	1000	10	150.4056	150.3387	0.0669	0.0495	2.68
2			149.3907	149.3721	0.0186		
3			148.6472	148.5842	0.0630		
4		20	153.5886	153.5492	0.0394	0.0622	5.04
5			151.5201	151.4930	0.0272		
6			150.2661	150.1462	0.1199		
7		30	149.4640	149.4102	0.0538	0.1015	7.05
8			151.2162	151.0337	0.1825		
9			150.2699	150.2016	0.0683		
10	2000	10	150.3387	150.2795	0.0592	0.0791	1.91
11			149.4717	149.3907	0.0810		
12			148.5842	148.4870	0.0972		
13		20	153.7164	153.5886	0.1278	0.1089	6.82
14			151.5534	151.5201	0.0332		
15			150.1462	149.9805	0.1657		
16		30	149.5196	149.4640	0.0556	0.1231	9.80
17			151.0337	150.7982	0.2355		
18			150.3480	150.2699	0.0780		

Tabla 3.4. Valores de desgaste en discos de acero AISI 1045 templados en aceite y revenido a 400 °C.

Nº	Deslizamiento, m	Carga, N	Medida de masa inicial, g	Medida de masa final, g	Diferencia de masas, g	Pérdida de masa promedio, g	D.E. $\times 10^{-2}$, g
1	1000	10	150.0995	150.0060	0.0935	0.0509	4.27
2			149.7309	149.7227	0.0082		
3			151.6351	151.4881	0.0509		
4		20	153.8308	153.7581	0.0727	0.0991	2.64
5			151.4019	151.1506	0.0991		
6			152.4895	152.3640	0.1255		
7		30	149.5238	149.3000	0.2237	0.1248	9.89
8			151.0440	151.0287	0.1248		
9			151.5652	151.5393	0.0259		
10	2000	10	150.1949	150.0995	0.0954	0.0995	5.02
11			149.7227	149.6712	0.0515		
12			151.7867	151.6351	0.1516		
13		20	153.7581	153.5949	0.1633	0.1551	0.811
14			151.1506	150.8322	0.1551		
15			152.3615	152.2144	0.1470		
16		30	149.3000	149.0057	0.2943	0.1441	13.5
17			151.0287	150.9237	0.1049		
18			151.5393	151.5063	0.0330		

Tabla 3.5. Valores de desgaste de las espigas de acero AISI O1 templadas y revenidas utilizadas sobre discos de acero AISI 1045 templados en aceite y revenidos a 200 °C.

Nº	Deslizamiento, m	Carga, N	Medida de masa inicial, g	Medida de masa final, g	Diferencia de masas, g	Pérdida de masa promedio, g	D.E. $\times 10^{-2}$, g
1	1000	10	2.1842	2.1819	0.0023	0.0018	0.503
2			2.2857	2.2844	0.0013		
3			2.2081	2.2056	0.0018		
4		20	2.3170	2.3131	0.0038	0.0024	1.39
5			2.2242	2.2238	0.0024		
6			2.1706	2.1695	0.0011		
7		30	2.3514	2.3075	0.0439	0.0149	25.1
8			2.3388	2.3386	0.0001		
9			2.2799	2.2793	0.0007		
10	2000	10	2.1842	2.1823	0.0019	0.0019	0.137
11			2.2502	2.2496	0.0020		
12			2.3099	2.3082	0.0017		
13		20	2.2609	2.2593	0.0016	0.0026	1.91
14			2.3170	2.3121	0.0048		
15			2.2634	2.2619	0.0015		
16		30	2.2481	2.1718	0.0763	0.0261	43.5
17			2.3012	2.2999	0.0013		
18			2.2807	2.2800	0.0007		

Tabla 3.6. Valores de desgaste de las espigas de acero AISI O1 templadas y revenidas utilizadas sobre discos de acero AISI 1045 templados en aceite y revenidos a 400 °C.

Nº	Deslizamiento, m	Carga, N	Medida de masa inicial, g	Medida de masa final, g	Diferencia de masas, g	Pérdida de masa promedio, g	D.E. x10 ⁻² , g
1	1000	10	2.3099	2.3078	0.0021	0.0020	0.145
2			2.3012	2.2993	0.0019		
3			2.2807	2.2800	0.0020		
4		20	2.2997	2.2994	0.0003	0.0030	4.38
5			2.2937	2.2931	0.0006		
6			2.3274	2.3194	0.0080		
7		30	2.2814	2.2810	0.0004	0.0380	37.9
8			2.2481	2.1718	0.0763		
9			2.1902	2.1531	0.0371		
10	2000	10	2.2609	2.2589	0.0020	0.0021	0.0918
11			2.3129	2.3108	0.0022		
12			2.2634	2.2613	0.0021		
13		20	2.3057	2.3048	0.0009	0.0036	3.92
14			2.3485	2.3404	0.0081		
15			2.3108	2.3090	0.0018		
16		30	2.2523	2.2519	0.0004	0.0491	43.3
17			2.2534	2.1899	0.0635		
18			2.3310	2.2476	0.0834		

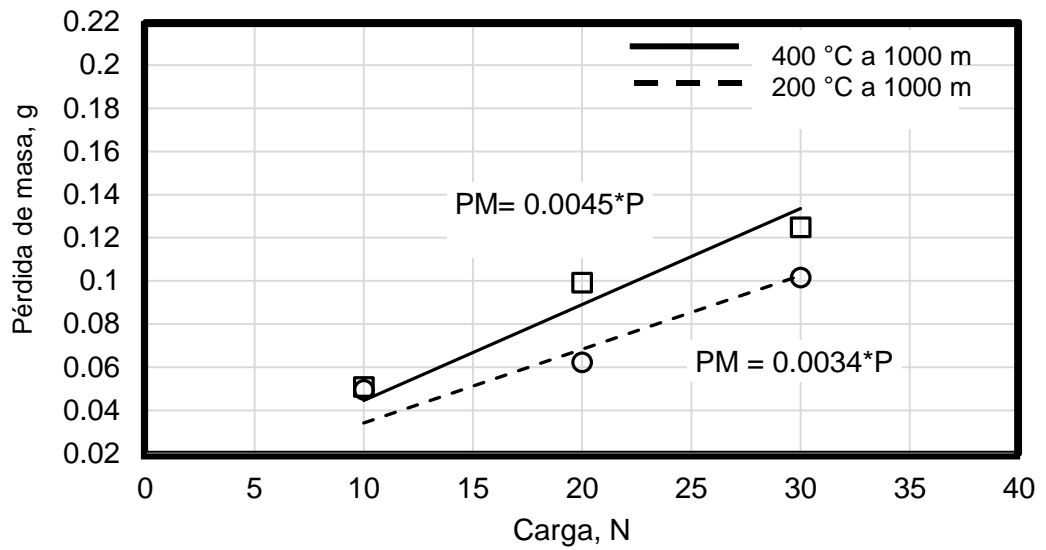


Fig. 3.2. Gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 con temple en aceite y revenidos a 200 y 400 °C con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

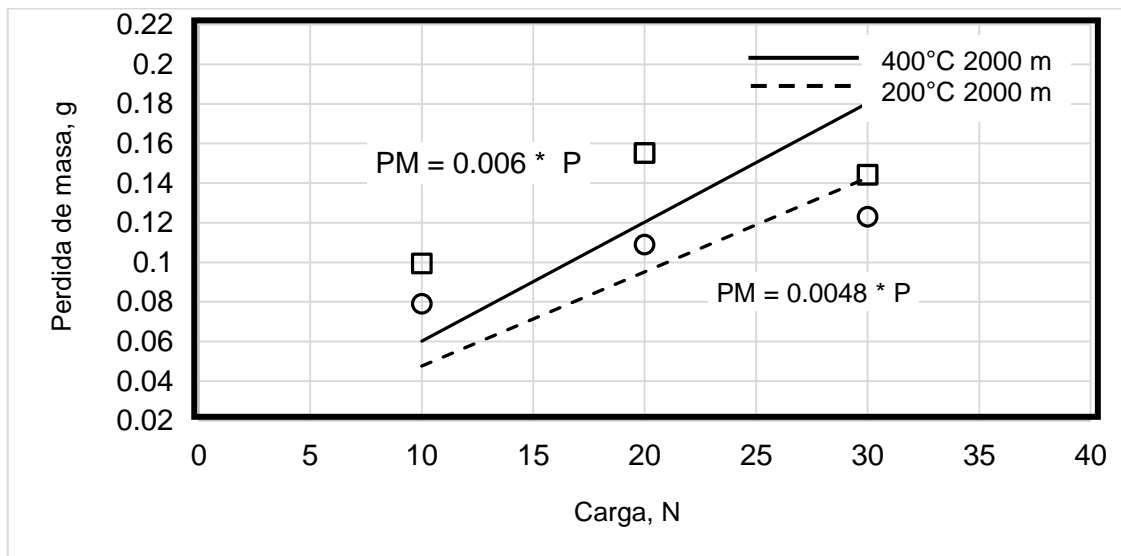


Fig. 3.3. Gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 con temple en aceite y revenidos a 200 y 400 °C con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 2000 m.

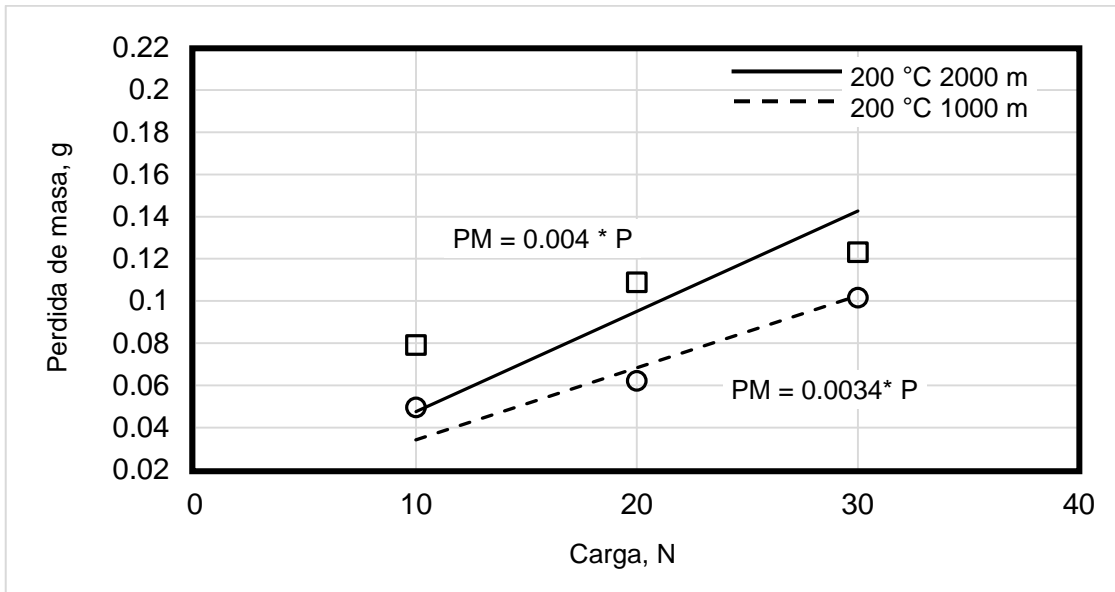


Fig. 3.4. Gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 con temple en aceite y revenido a 200 °C con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 y 2000 m.

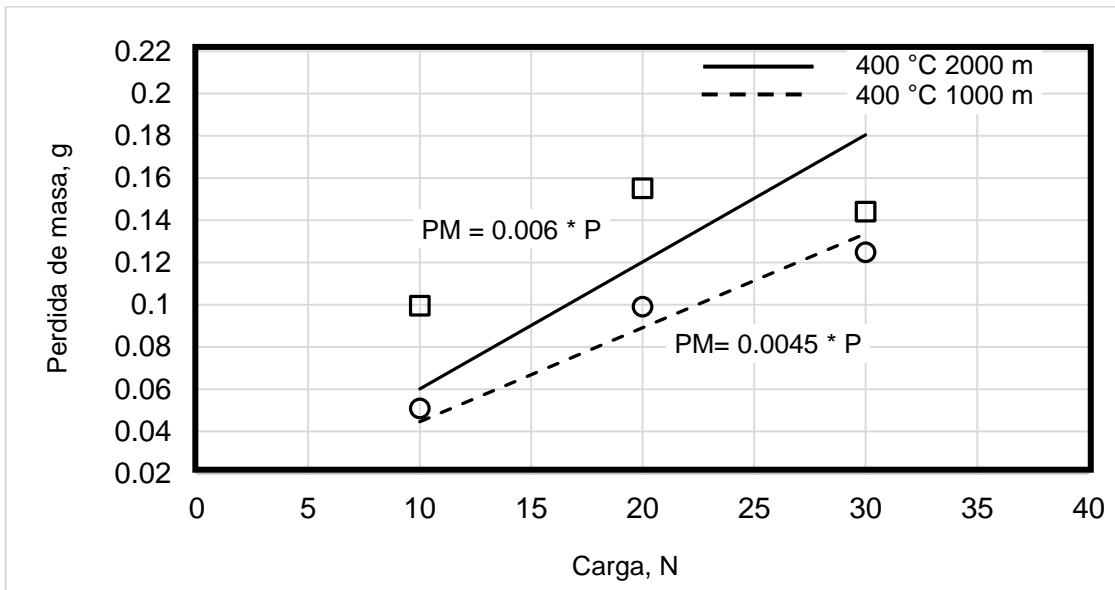


Fig. 3.5. Gráficas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1045 con temple en aceite y revenido a 400 °C con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 y 2000 m.

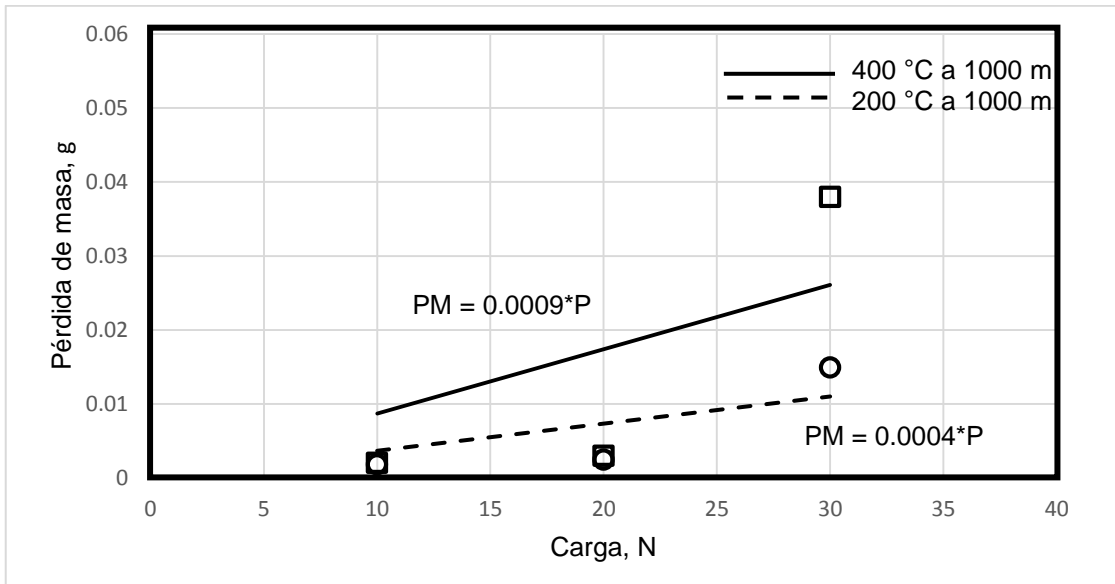


Fig. 3.6. Gráficas de pérdida de masa de espiga de acero AISI O1 con tratamiento térmico utilizados sobre discos con acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a 200 y 400 °C, con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

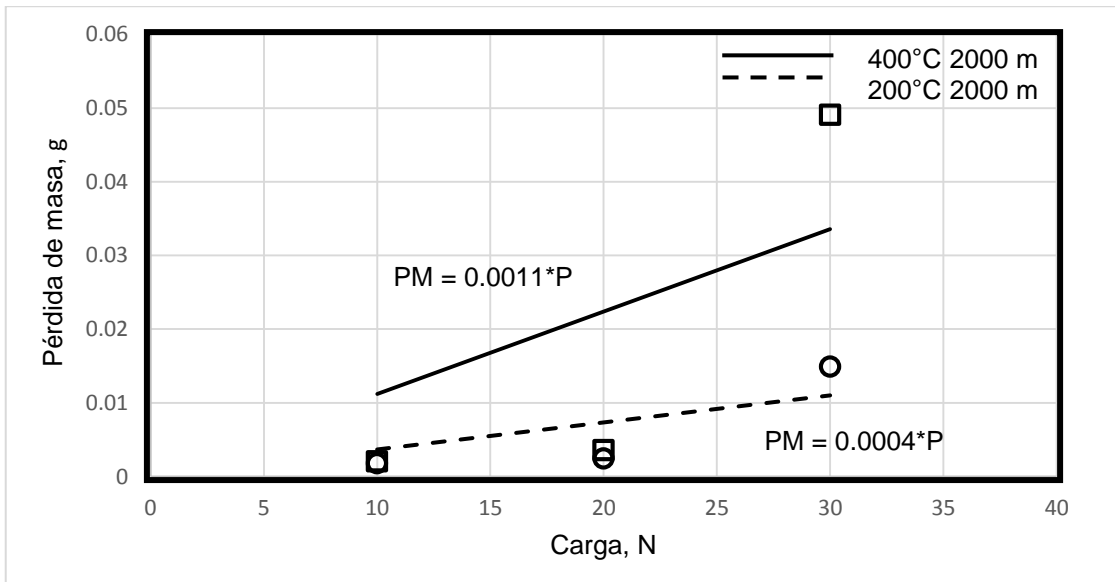


Fig. 3.7. Gráficas de pérdida de masa de espiga de acero AISI O1 con tratamiento térmico utilizados sobre discos con acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a 200 y 400 °C, con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 2000 m.

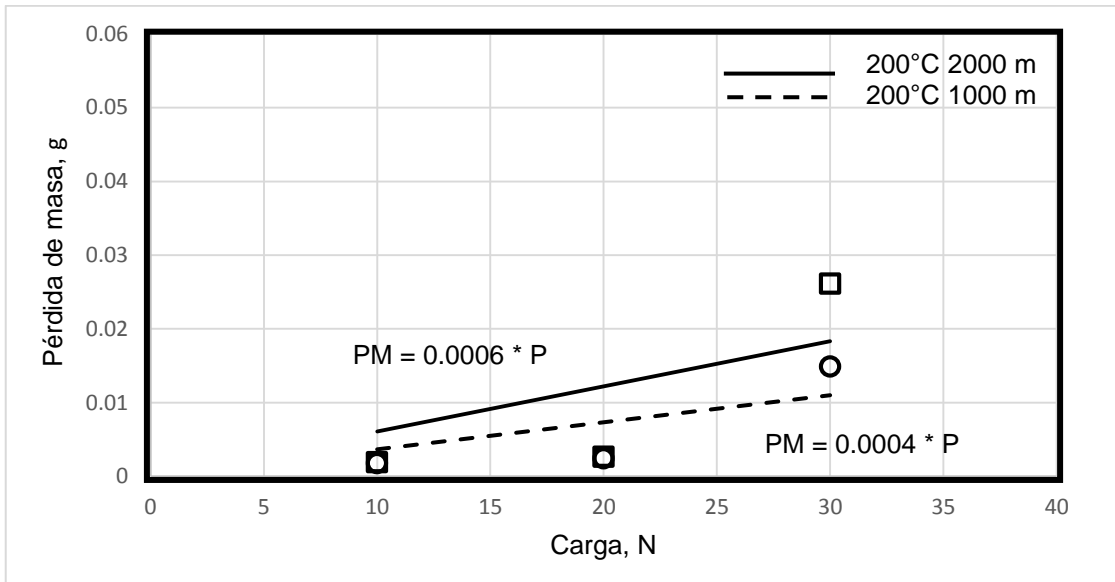


Fig. 3.8. Gráficas de pérdida de masa de espiga de acero AISI O1 con tratamiento térmico utilizados sobre discos con acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a 200 °C, con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 y 2000 m.

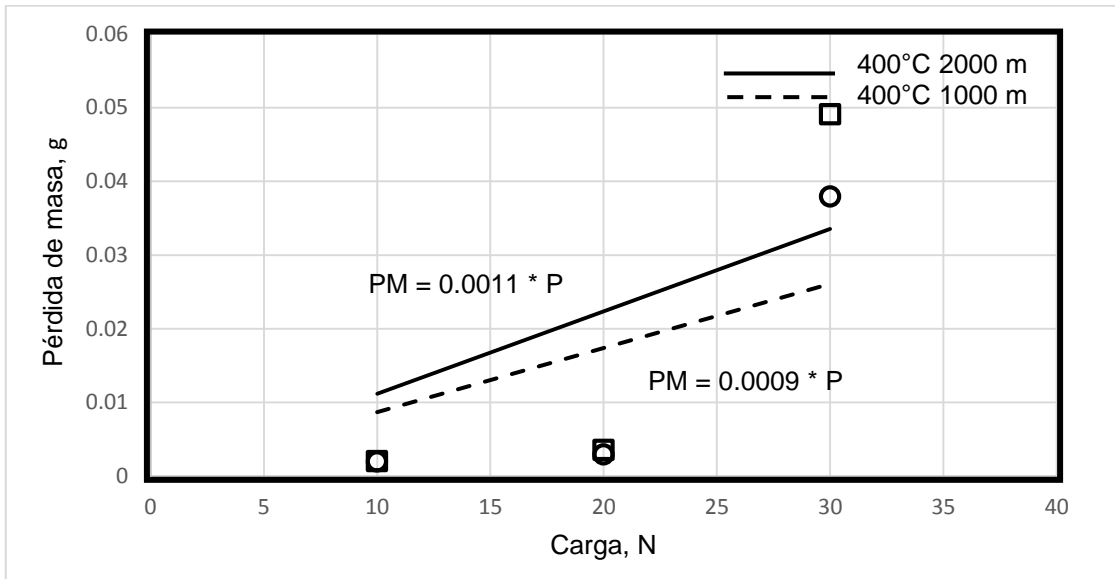


Fig. 3.9. Gráficas de pérdida de masa de espiga de acero AISI O1 con tratamiento térmico utilizados sobre discos con acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a 400 °C, con respecto a la carga de 10, 20 y 30 N y distancia de deslizamiento de 1000 y 2000 m.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos mediante el análisis de metalográfico, determinación de dureza y los ensayos de desgaste se realizó el siguiente análisis.

Del análisis metalográfico se observó que la microestructura no tiene las cantidades de fases que corresponden al acero AISI 1045 para las condiciones de material analizado. Es decir, que la muestra de acero AISI 1045 recocida no contiene la cantidad de perlita que le corresponde. En el mismo sentido la muestra de acero AISI 1045 templada presenta mayor cantidad de perlita con lo cual se puede decir que la cantidad de martensita no es la que debería presentar dicho acero con el tratamiento térmico de temple realizado. Además, es importante aclarar que dada la baja resolución del microscopio óptico no se puede cuantificar la cantidad de martensita transformada durante el temple.

Con relación a la dureza, el valor promedio de la dureza en las muestras de acero AISI 1045 templadas en aceite y revenidas a 200 °C es 25.96 HRC, con una desviación estándar de 1.5 HRC. También, el valor promedio de la dureza en las muestras de acero AISI 1045 templadas en aceite y revenidas a 400 °C es 23.58 HRC, con una desviación estándar de 0.93 HRC. Así, estos resultados están de acuerdo con el análisis metalográfico realizado en donde se destacó sobre la base del estudio metalográfico que el acero AISI 1045 recocido presenta un contenido de perlita inferior al que le corresponde.

La pérdida de masa de discos de acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a baja temperatura es menor en comparación a la pérdida de masa de discos de acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a alta temperatura, lo cual es debido a que presenta mayor dureza. También se puede observar que la pérdida de masa y por lo tanto el desgaste aumenta conforme se incrementa la carga normal aplicada a las superficies en contacto y su distancia recorrida.

En las espigas se puede observar que la pérdida de masa de las espigas aumenta conforme se incrementa a la carga aplicada y distancia recorrida.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en los ensayos realizados y del análisis de estos, se puede concluir que:

- ✓ La pérdida de masa de discos de acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a baja temperatura es menor en comparación a la pérdida de masa de discos de acero AISI 1045 templado en aceite y revenido a alta temperatura, lo cual es debido a que presenta mayor dureza.
- ✓ La pérdida de masa de las espigas aumenta conforme incrementa la carga aplicada.
- ✓ Los resultados del análisis metalográfico y los resultados de las mediciones de dureza obtenidas se constatan para las condiciones de material estudiado.
- ✓ La pérdida de masa y por lo tanto el desgaste aumenta conforme se incrementa la carga normal aplicada a las superficies en contacto.

REFERENCIA

- [1] Avner, S.H. (1988). Introducción a la metalurgia física. México D.F: Calypso S.A.
- [2] Guliáev, A.P. (1978). Metalografía. Editorial Mir-Moscú, Moscú:.
- [3] Barreiro, J.A. (1949). Tratamientos térmicos de los aceros. Madrid.
- [4] Lajtin, Y.M. (1977). Metalografía y tratamiento térmico de los metales. Moscú: Mir-Moscú.
- [5] Guerrero Lara, S.E. (2015). Estudio de los tratamientos térmicos en el acero AISI 1045 en un sistema acuoso evaluados con la norma ASTM G105 que permitirá determinar la velocidad de desgaste del material. Ambato, Ecuador.
- [6] Puerto Molina, J.A. (2018). Influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AISI/AISI 1045 templado desde temperaturas intercríticas (Digital ed.). Bogotá, Colombia: Universidad libre de Colombia.
- [7] Schierloh, G.J., Regis, M., Charadia, R., Dalibon, E.L., & Brühl, S.P. (2016). Comparación del comportamiento al desgaste de un acero AISI 1045 nitrurado y seguido de un temple por inducción. Avances en Ciencias e Ingeniería, 9.