



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

TEMA:

“Análisis del efecto de la velocidad de enfriamiento del acero ASTM A228, templado en agua, aceite y aire”

Trabajo de titulación, modalidad proyecto experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

AUTOR: Marco Antonio Pazmiño Lizano

TUTOR: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

Ambato - Ecuador

Junio - 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO DEL ACERO ASTM A228, TEMPLADO EN AGUA, ACEITE Y AIRE”**, elaborado por el estudiante Marco Antonio Pazmiño Lizano, portador de la cédula de ciudadanía número 1850350107, estudiante de la Carrera de Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

Que el presente trabajo experimental es original de su autor.

Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.

Está concluido en su totalidad.

Ambato, junio 2026



.....
Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

C.C.: 0501500771

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Marco Antonio Pazmiño Lizano**, con C.C.: **1850350107** declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **“ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO DEL ACERO ASTM A228, TEMPLADO EN AGUA, ACEITE Y AIRE”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, junio 2026



Marco Antonio Pazmiño Lizano

C.C.: 1850350107

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, junio 2026



Pazmiño Lizano Marco Antonio

C.C.: 1850350107

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Marco Antonio Pazmiño Lizano, de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO DEL ACERO ASTM A228, TEMPLADO EN AGUA, ACEITE Y AIRE”**, Modalidad Trabajo Experimental.

Ambato, junio 2026

Para constancia firma:



Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís, Mg.

C.C:1803100898

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa, Mg.

C.C:1802039485

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Al alcanzar una de las metas más significativas de mi formación profesional, dedico este trabajo de titulación a Dios, a mis padres Antonio y Susana por ser un pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional, por cada sacrificio realizado y por brindarme siempre su apoyo en los momentos más difíciles. Su confianza, comprensión y cariño han sido la fuerza que me ha permitido seguir adelante cuando las circunstancias parecían adversas. Este logro también les pertenece, porque sin ustedes nada de esto habría sido posible.

A mi hermano, Miguel, por ser un guía constante a lo largo de mi formación profesional y personal. Gracias por tu apoyo, tus consejos y por ser un ejemplo de esfuerzo, perseverancia y dedicación. Tu manera de afrontar los desafíos me ha enseñado el valor del trabajo constante y la importancia de luchar por aquello que uno desea alcanzar.

Y de manera muy especial, a Cristina, mi querida mascota y fiel compañera de vida, quien fue y siempre será la mitad de mi alegría. Gracias, por tu compañía incondicional e indiscutible, por el cariño más puro y sincero que jamás he conocido, y por haberme enseñado el verdadero significado de la lealtad, aquella que permanece inquebrantable con el paso del tiempo, las dificultades y la distancia. Estuviste presente en los momentos más importantes de mi vida, en las noches de cansancio, y en aquellos momentos en los que sentí que ya no podía continuar. Y aunque hoy ya no estés físicamente conmigo, este logro también es para ti, porque formas parte de quien soy y de la historia que me ha traído hasta aquí.

AGRADECIMIENTO

En este camino de esfuerzo, aprendizaje y perseverancia quiero expresar mi agradecimiento a mi tutor Ing. Segundo Espín, por su valiosa orientación, conocimiento y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Sus consejos, exigencia académica y compromiso fueron fundamentales para la culminación de esta investigación.

Mi gratitud, se extiende a una persona especial que ha tenido un impacto en mi vida, a mi tía Anita Lizano, cuya presencia y apoyo en mi vida representaron un respaldo invaluable a lo largo de mi formación académica. Su generosidad, confianza y disposición para ayudar en los momentos más desafiantes me permitieron afrontar diversas dificultades con mayor tranquilidad y continuar avanzando hacia mis objetivos y en la consecución de esta meta.

A mis amigos más cercanos, quienes me acompañaron durante este proceso, les expreso mi más profunda gratitud. Sus palabras de aliento, su confianza en mí y su constante motivación fueron fundamentales en los momentos de mayor dificultad. Haber contado con ustedes, me impulsó a seguir adelante y es uno de los mayores privilegios que obtuve en esta etapa de mi vida.

Finalmente, agradezco al Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y al personal técnico por abrirme sus puertas y aportaron conocimiento y experiencia a mi formación como profesional. Y a todas aquellas personas que de una u otra forma fueron parte de este proceso, les dedico estas palabras.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN EJECUTIVO	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	1
1.1.1. Investigaciones Preliminares.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
1.4.1. Fundamentos de los aceros.....	5
1.4.2. Definición del acero	5
1.4.3. Clasificación de los aceros	6
1.4.4. Acero ASTM A228	7
1.4.4.1. Características del ASTM A228.....	7
1.4.4.2. Composición química	7
1.4.4.3. Propiedades mecánicas.....	8
1.4.5. Proceso de trefilado.....	9
1.4.6. Diagrama hierro-carbono	10
1.4.7. Transformaciones de fases	11
1.4.8. Tratamientos térmicos del acero	14
1.4.8.1. Temple del acero	14

1.4.8.2.	Variables del temple	16
1.4.9.	Velocidad de enfriamiento en los aceros.....	17
1.4.9.1.	Definición de velocidad de enfriamiento	17
1.4.9.2.	Transferencia de calor durante el temple	17
1.4.10.	Diagramas TTT	18
1.4.11.	Medios de enfriamiento.....	19
1.4.12.	Generalidades de los medios de temple	19
1.4.12.1.	Temple en agua	19
1.4.12.2.	Temple en aceite	20
1.4.12.3.	Enfriamiento al aire	21
1.4.13.	Dureza de los aceros.....	22
1.4.13.1.	Métodos de ensayo – Ensayos de dureza	22
1.4.14.	Metalografía	24
1.4.14.1.	Fundamentos de metalografía.....	24
1.4.14.2.	Interpretación microestructural	24
1.4.15.	Normas ASTM aplicadas al análisis metalúrgico y mecánico de aceros	25
CAPÍTULO II		27
2.	METODOLOGÍA	27
2.1.	Enfoque General.....	27
2.1.1.	Enfoque Experimental.....	28
2.1.2.	Enfoque Correlacional	28
2.1.3.	Enfoque Bibliográfico.....	28
2.1.4.	Enfoque Comparativo	29
2.2.	Recursos experimentales.....	29
2.2.1.	Equipos de laboratorio	29
2.2.2.	Materiales	33
2.2.3.	Insumos	35
2.3.	Métodos.....	36
2.3.1.	Diseño experimental.....	36
2.3.2.	Población y muestra	37
2.3.3.	Procedimiento para la aplicación experimental	40
2.3.3.1.	Adquisición y caracterización del material	40

2.3.3.2.	Corte e identificación de probetas.....	40
2.3.3.3.	Tratamiento térmico de temple	40
2.3.3.4.	Tratamiento térmico de revenido	41
2.3.3.5.	Ensayo de dureza Rockwell C	42
2.3.3.6.	Preparación metalográfica.....	42
2.3.3.7.	Ataque químico y observación microestructural.....	43
2.3.4.	Método de análisis y procesamiento de datos	44
2.3.4.1.	Procesamiento de datos de dureza.....	44
2.3.4.2.	Análisis microestructural	44
2.3.5.	Operacionalización de variables	45
2.3.5.1.	Variable independiente	45
2.3.5.2.	Variable dependiente	45
2.3.6.	Hipótesis.....	46
2.4.	Limitaciones del estudio	47
CAPÍTULO III.....		48
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
3.1.	Caracterización del material en estado base.....	48
3.1.1.	Composición química del acero ASTM A228	48
3.1.2.	Dureza inicial del material	48
3.1.3.	Microestructura del material en estado base	50
3.2.	Resultados del ensayo de dureza Rockwell	53
3.2.1.	Dureza del material templado en aire.....	54
3.2.2.	Dureza del material templado en aceite	56
3.2.3.	Dureza del material templado en agua	57
3.3.	Análisis comparativo de dureza	59
3.4.	Análisis microestructural	62
3.4.1.	Microestructura del material templado en aire.....	63
3.4.2.	Microestructura del material templado en aceite	65
3.4.3.	Microestructura del material templado en agua	68
3.5.	Análisis comparativo de la microestructura	71
3.6.	Correlación dureza – microestructura	74
3.7.	Verificación de hipótesis	76
3.7.1.	Verificación de los supuestos	78

3.7.2. Tamaño del efecto	79
3.7.3. Prueba post hoc de Turkey HSD	79
CAPÍTULO IV	82
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
4.1. CONCLUSIONES	82
4.2. RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificación de uso de normas ASTM.....	26
Tabla 2. Equipos de laboratorio empleados en el desarrollo experimental.	30
Tabla 3. Materiales empleados en el desarrollo experimental.....	33
Tabla 4. Insumos empleados en el desarrollo experimental.....	35
Tabla 5. Distribución y nomenclatura de las probetas según el grupo de estudio.....	39
Tabla 6. Operacionalización de la variable independiente.	45
Tabla 7. Operacionalización de las variables dependientes.	46
Tabla 8. Composición química nominal del acero ASTM A228.....	48
Tabla 9. Valores de dureza Rockwell C del material en estado base (HRC).....	49
Tabla 10. Porcentaje de microconstituyentes del material en estado base.	52
Tabla 11. Valores de dureza Rockwell C del material templado en aire (HRC).	54
Tabla 12. Valores de dureza Rockwell C del material templado en aceite (HRC)...	56
Tabla 13. Valores de dureza Rockwell C del material templado en agua (HRC).....	58
Tabla 14. Comparación de los valores promedio de dureza Rockwell C entre los cuatro grupos experimentales.....	60
Tabla 15. Porcentaje de microconstituyentes del material templado en aire.....	64
Tabla 16. Porcentaje de microconstituyentes del material templado en aceite.	67
Tabla 17. Porcentaje de microconstituyentes del material templado en agua.....	69
Tabla 18. Comparación de los porcentajes de microconstituyentes identificados en los cuatro grupos experimentales.....	71
Tabla 19. Correlación entre los valores de dureza y la proporción de microconstituyentes en cada grupo experimental	74
Tabla 20. Valores de dureza promedios de cada probeta por grupo analizado.....	77
Tabla 21. Resultados arrojados por ANOVA.....	77
Tabla 22. Verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad.....	79
Tabla 23. Comparación de pares mediante la prueba de Turkey HSD.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama hierro-carbono.....	10
Figura 2. Apariencia microestructural característica de la fase ferrítica en aceros...	11
Figura 3. Apariencia microestructural característica de la fase perlítica en aceros ..	12
Figura 4. Apariencia microestructural característica de la fase martensítica en aceros	12
Figura 5. Apariencia microestructural característica de la fase bainítica en aceros..	13
Figura 6. Apariencia microestructural característica de la fase austenítica en aceros	13
Figura 8. Diagrama (TTT) de un acero eutectoide.....	18
Figura 9. Diagrama (TTT) esquemático para aceros	19
Figura 10. Comparación entre diferentes escalas de dureza	23
Figura 11. Geometría, de la probeta con sus respectivas dimensiones.	38
Figura 12. Distribución de indentaciones en la probeta.....	38
Figura 13. Gráfica de barras de las cinco probetas del material en estado base.	49
Figura 14. Microestructura de la sección transversal del acero ASTM A228 en estado base (500X, ataque con Nital al 3%, 7s).	50
Figura 15. Imagen procesada de la microestructura del material en estado base, mediante el software de análisis metalográfico.	51
Figura 16. Microconstituyentes del material en estado base (azul: cementita, rojo: ferrita).....	51
Figura 17. Microestructura de la sección longitudinal del acero ASTM A228 en estado base (500X, ataque con Nital a 3%, 7s).	53
Figura 18. Gráfica de barras de las cinco probetas del material templado y enfriado al aire.....	55
Figura 19. Gráfica de barras de las cinco probetas del material templado y enfriado en aceite.	57
Figura 20. Gráfica de barras de las cinco probetas del material templado y enfriado en agua.	59
Figura 21. Gráfica comparativa de los valores promedio de dureza del acero ASTM A228 en estado base y templado en los tres medios de enfriamiento.	61
Figura 22. Microestructura del acero ASTM A228 templado en aire (500X, ataque con Nital a 3%, 6s).....	63

.....	64
Figura 23. Imagen procesada de la microestructura del material templado en aire mediante software de análisis metalográfico.	64
Figura 24. Microconstituyentes del material templado en aire (azul: cementita globulizada, rojo: ferrita).	64
Figura 25. Microestructura del acero ASTM A228 templado en aceite (500X, ataque con Nital a 3%, 4s).	66
Figura 26. Imagen procesada de la microestructura del material templado en aceite mediante software de análisis metalográfico.	66
Figura 27. Microconstituyentes del material templado en aceite (azul: martensita revenida, rojo: austenita retenida*).	67
Figura 28. Microestructura del acero ASTM A228 templado en agua (500X, ataque con Nital a 3%, 3s).	68
Figura 29. Imagen procesada de la microestructura del material templado en agua mediante software de análisis metalográfico	69
Figura 30. Microconstituyentes del material templado en agua (azul: martensita revenida, rojo: austenita retenida*)	69
Figura 31. Comparación de las microestructuras del acero ASTM A228 a 500X: (a) Estado base, (b) Templado en aire, (c) Templado en aceite, (d) Templado en agua. Ataque con Nital 3%, 7s,6s,4s,3s.	72
Figura 32. Verificación Gráfica de hipótesis: ANOVA Dureza HRC	78
Figura 33. Diagrama de cajas de dureza Rockwell C por grupo experimental.....	80

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica del acero ASTM A228 adquirida por el proveedor.	91
Anexo 2. Probetas etiquetadas respectivamente del material en estado base.	91
Anexo 3. Probetas etiquetadas respectivamente del material templado en aire.	91
Anexo 4. Probetas etiquetadas respectivamente del material templado en aceite.	92
Anexo 5. Probetas etiquetadas respectivamente del material templado en agua.	92
Anexo 6. Micrografía del acero en estado Base registrada en el aumento (100X, Ataque con Nital 3%, 7s).	92
Anexo 7. Micrografía del acero en estado Base registrada en el aumento (200X, Ataque con Nital 3%, 7s).	93
Anexo 8. Micrografía del acero templado en Aire registrada en el aumento (100X, Ataque con Nital 3%, 6s).	93
Anexo 9. Micrografía del acero templado en Aire registrada en el aumento (200X, Ataque con Nital 3%, 6s).	93
Anexo 10. Micrografía del acero en estado templado en Aceite registrada en el aumento (200X, Ataque con Nital 3%, 4s).	94
Anexo 11. Micrografía del acero templado en Agua, registrada en el aumento (200X, Ataque con Nital 3%, 3s).	94
.....	94

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo analiza el efecto de la velocidad de enfriamiento del acero ASTM A228, templado en agua, aceite SAE 20W50 y aire, evaluando su incidencia sobre la dureza y microestructura, con el propósito de aportar información útil para la selección del medio de temple en aplicaciones industriales.

La metodología empleada es de tipo cuantitativo, experimental, correlacional y comparativo, desarrollada en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. El procedimiento contempló la preparación de 20 probetas distribuidas en cuatro grupos, la aplicación del temple mediante austenización a 803 °C durante 20 minutos en los tres medios de enfriamiento, seguido de revenido a 260 °C durante 35 minutos, el ensayo de dureza Rockwell C según la normativa ASTM E18 y el análisis microestructural mediante preparación metalográfica conforme a las normas ASTM E3 y ASTM E407.

Los resultados evidencian que la severidad del medio influye significativamente en la dureza y la microestructura del acero. El temple en agua generó la mayor dureza y microestructura más refinada, aparente compatible con martensita revenida; el temple en aceite produjo valores intermedios con mayor presencia del microconstituyente aparente compatible con austenita retenida; mientras que el temple en aire generó una microestructura difusiva de menor dureza que la del estado base.

Los hallazgos establecen que el temple en agua resulta la alternativa más apta para aplicaciones que requieren máxima dureza, mientras que el temple en aceite ofrece equilibrio entre dureza y reducción del riesgo de distorsión.

Palabras Clave: ACERO ASTM A228, DUREZA ROCKWELL C, MICROESTRUCTURA, MEDIO DE ENFRIAMIENTO.

ABSTRACT

This work analyzes the effect of the cooling rate of ASTM A228 steel, quenched in water, SAE 20W50 oil and air, evaluating its incidence on hardness and microstructure, with the purpose of providing useful information for the selection of the quenching medium in industrial applications.

The methodology employed is quantitative, experimental, correlational and comparative, developed in the Metallography Laboratory of the Faculty of Civil and Mechanical Engineering of the Technical University of Ambato. The procedure involved the preparation of 20 specimens distributed in four groups, the application of quenching through austenitization at 803 °C for 20 minutes in the three cooling media, followed by tempering at 260 °C for 35 minutes, the Rockwell C hardness test according to the ASTM E18 standard, and the microstructural analysis through metallographic preparation in accordance with ASTM E3 and ASTM E407 standards.

The results show that the severity of the medium significantly influences the hardness and microstructure of the steel. Water quenching generated the highest hardness and a more refined microstructure, apparently compatible with tempered martensite; oil quenching produced intermediate values with a greater presence of the apparent microconstituent compatible with retained austenite; while air cooling generated a diffusive microstructure with lower hardness than that of the base state.

The findings establish that water quenching is the most suitable alternative for applications requiring maximum hardness, while oil quenching offers a balance between hardness and reduction of the risk of distortion.

Keywords: ASTM A228 STEEL, ROCKWELL C HARDNESS, MICROSTRUCTURE, COOLING MEDIA.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1.1. Investigaciones Preliminares

El acero ASTM A228, conocido comercialmente como alambre cuerda de piano, es un acero de alto contenido de carbono ampliamente utilizado en la fabricación de resortes, componentes elásticos y piezas sometidas a esfuerzos dinámicos constantes. Su aplicación en industrias como la automotriz, aeroespacial y de precisión se debe principalmente a su elevada resistencia a la tracción y capacidad de soportar cargas mecánicas severas sin comprometer su integridad estructural. En la documentación técnica desarrollada por ASTM International se establece que este material presenta propiedades mecánicas superiores respecto a otros aceros trefilados convencionales, especialmente en aplicaciones donde se requiere alta resistencia y estabilidad dimensional [1].

La normativa ASTM correspondiente al acero A228 regula parámetros relacionados con composición química, propiedades mecánicas y requisitos de fabricación, garantizando uniformidad en su comportamiento industrial. En la investigación desarrollada por ASTM International se determinó que el comportamiento de los aceros de alto carbono depende directamente de la interacción entre la deformación plástica inducida por el trefilado y las transformaciones microestructurales generadas durante los tratamientos térmicos. En el mismo estudio se estableció que la evolución microestructural y las variaciones de dureza constituyen parámetros fundamentales para analizar la respuesta del material frente a diferentes condiciones térmicas [1].

Dentro del estudio de tratamientos térmicos aplicados a aceros al carbono, el proceso de temple representa uno de los métodos más utilizados para incrementar la dureza y resistencia mecánica del material. Este tratamiento consiste en elevar la temperatura del acero por encima de la región de austenización y posteriormente aplicar un enfriamiento rápido mediante un medio refrigerante. La investigación determinó que la velocidad de enfriamiento influye directamente sobre la formación de fases endurecidas y sobre el incremento de la dureza superficial y volumétrica del acero.

Los autores determinaron que la elección del medio de enfriamiento apropiado desempeña un papel crucial para garantizar la estabilidad del material y sus propiedades mecánicas finales [2].

En lo que respecta a los medios de enfriamiento utilizados durante las pruebas, numerosos estudios han demostrado que la intensidad del enfriamiento influye drásticamente tanto en las transformaciones microestructurales como en la dureza alcanzada tras el tratamiento térmico. En la investigación se estableció que el agua produce velocidades de extracción térmica más elevadas respecto al aceite y al aire, favoreciendo una mayor formación martensítica y alcanzando niveles superiores de dureza en aceros al carbono. Los autores señalaron que la diferencia entre medios de enfriamiento permite modificar significativamente la respuesta mecánica del acero, convirtiéndose en un criterio fundamental para estudios de templabilidad [3].

Otro estudio relevante de las propiedades mecánicas del acero AISI 1045, mediante variaciones del tiempo de sostenimiento durante la etapa de austenización, se empleó agua con hielo como medio de enfriamiento severo para analizar la capacidad de endurecimiento del material bajo condiciones térmicas controladas. Los resultados mostraron que el tiempo de permanencia dentro del horno influye directamente sobre la homogenización de la austenita y sobre la uniformidad de la dureza obtenida después del temple. El estudio concluyó que tiempos inadecuados de sostenimiento pueden generar gradientes de dureza y diferencias microestructurales entre la superficie y el núcleo del material [4].

Diferentes investigaciones metalúrgicas de la rotura prematura de componentes elásticos elaborados con acero ASTM A228. A través de la caracterización microscópica y el análisis de la superficie, los autores concluyeron que la aparición de microgrietas y las tensiones internas generadas durante el proceso de trefilado afectan de manera significativa la integridad mecánica del material, incluso cuando este cumple con los valores nominales de dureza. Los hallazgos permitieron concluir que los tratamientos térmicos juegan un papel crucial en la redistribución de tensiones internas y en el refinamiento microestructural del acero, especialmente en aplicaciones expuestas a cargas dinámicas [5].

En investigaciones recientes, sistematizaron el efecto de los tratamientos térmicos sobre la tenacidad y la evolución microestructural de aceros de alto carbono. La revisión experimental indicó que el equilibrio entre dureza y resistencia al impacto depende principalmente del control de la temperatura de revenido y de la severidad del medio de enfriamiento utilizado durante el temple. Los autores concluyeron que la variación del tamaño de grano y la morfología microestructural influyen directamente sobre la capacidad de absorción de energía del material bajo cargas dinámicas [6].

Las varillas y alambres trefilados experimentan tensiones residuales que afectan su estabilidad dimensional y propiedades mecánicas durante los tratamientos térmicos posteriores. Este estudio investigó la caída de presión interna mediante un método controlado de calentamiento y enfriamiento radial. Los resultados mostraron que la aplicación de un gradiente térmico moderado puede disminuir la anisotropía causada por la deformación en frío y minimizar las deformaciones que ocurren durante estos procesos [7].

1.2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se relaciona con el proyecto institucional “Estudio del comportamiento de válvulas reguladoras de presión en redes domiciliarias y diseño de un nuevo prototipo de mayor eficiencia y seguridad” de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM), aportando información técnica para la selección y gestión de otros componentes utilizados en la producción de materiales para resortes mecánicos y elementos con particularidad similar.

Desde una perspectiva científica y tecnológica, este estudio investiga la relación entre la velocidad de enfriamiento, la formación de la microestructura y la dureza en el acero ASTM A228. La falta de investigaciones tanto locales como internacionales, acerca del enfriamiento para endurecer el acero por medios como agua, aceite y aire limita la definición de criterios técnicos aplicables a los procesos industriales. El análisis de fases y microconstituyentes como la ferrita, la perlita y la martensita, ayudará a comprender el comportamiento metalúrgico del material bajo diferentes cambios de temperatura y proporcionará la respectiva información con validez para futuros estudios sobre el tratamiento térmico y el endurecimiento de aceros con alto contenido de carbono.

Es preciso señalar que el presente estudio aborda el efecto de la velocidad de enfriamiento desde la perspectiva de la severidad del medio de temple, y no mediante la medición directa de curvas temperatura – tiempo. La velocidad de enfriamiento constituye una consecuencia física directa del medio seleccionado, dado que cada medio – agua, aceite y aire, impone una severidad de extracción de calor característica y ampliamente documentada en la literatura metalúrgica. De este modo, el efecto de la velocidad de enfriamiento se evalúa a través de la respuesta del material ante medios de severidad creciente.

Finalmente, en el sector industrial, los resultados establecerán una base de referencia de robustez y servirá como apoyo para comparaciones técnicas entre diferentes agentes de endurecimiento utilizados durante el proceso. Puesto que este acero se utiliza ampliamente en la producción de resortes y piezas sometidas a cargas dinámicas, el control de sus propiedades microestructurales y mecánicas es esencial para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro; lo que contribuirá a mejorar los proceso de fabricación, reducir reprocesamientos y disminuir las roturas relacionadas con fallas, desgaste o inestabilidad microestructural en piezas mecánicas sometidas a tensión constante.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Analizar el efecto de la velocidad de enfriamiento del acero ASTM A228, templado en agua, aceite y aire, y su incidencia en la dureza.

1.3.2. Objetivos Específicos

Determinar la dureza inicial y microestructura del acero ASTM A228 en estado base mediante ensayos normalizados de probetas, estableciendo una línea base de referencia.

Aplicar tratamientos de temple en agua, aceite SAE 20W50 y aire a probetas de acero ASTM A228, considerando el diagrama hierro-carbono, con el fin de analizar como la velocidad de enfriamiento influye en la microestructura y dureza del material.

Evaluar la dureza y microestructura resultantes del acero templado en los distintos medios de enfriamiento empleados, correlacionando los resultados con la velocidad de enfriamiento y emitiendo recomendaciones para aplicaciones industriales.

1.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.4.1. Fundamentos de los aceros

Los aceros son aleaciones metálicas compuestas principalmente por hierro y carbono, cuyo contenido de carbono es inferior al 2,11 %. Su amplia utilización en la ingeniería se debe a la capacidad de modificar sus propiedades mecánicas mediante variaciones en la composición química y tratamientos térmicos, permitiendo obtener materiales con diferentes niveles de dureza, resistencia y ductilidad según la aplicación requerida [8].

El comportamiento de los aceros depende de su microestructura y de las transformaciones de fase producidas durante los procesos de calentamiento y enfriamiento [9].

1.4.2. Definición del acero

El acero se define como una aleación hierro-carbono diseñada para mejorar las propiedades mecánicas del hierro puro. El carbono actúa como principal elemento endurecedor, permitiendo incrementar la resistencia y la dureza del material mediante transformaciones microestructurales producidas por tratamientos térmicos [8].

- **Aleación hierro-carbono**

La aleación hierro-carbono constituye la base metalúrgica de los aceros. El hierro aporta ductilidad y capacidad de deformación, mientras que el carbono incrementa la dureza y resistencia mecánica al modificar la estructura cristalina del material [9].

- **Influencia del carbono**

El carbono es el elemento que mayor influencia ejerce sobre las propiedades mecánicas del acero, debido a que incrementa la dureza, resistencia al desgaste y capacidad de endurecimiento durante el temple. Los aceros con mayor contenido de carbono desarrollan mayores niveles de dureza y resistencia mecánica, siendo

utilizados en aplicaciones sometidas a esfuerzos dinámicos y desgaste continuo [10].

1.4.3. Clasificación de los aceros

- **Aceros al carbono**

Los aceros pueden clasificarse de acuerdo con su composición química, contenido de carbono y aplicación industrial. Entre las clasificaciones más utilizadas se encuentran los aceros al carbono, los aceros de alto carbono y los aceros especiales para resortes, debido a que cada grupo presenta propiedades mecánicas y microestructuras específicas que determinan su comportamiento frente a esfuerzos mecánicos y tratamientos térmicos [11].

Los aceros al carbono son aleaciones hierro-carbono que contienen bajos porcentajes de elementos aleantes, por lo que sus propiedades dependen principalmente del contenido de carbono presente en el material. Este tipo de acero presenta buena resistencia mecánica, facilidad de conformado y adecuada respuesta a tratamientos térmicos, siendo ampliamente utilizado en componentes estructurales y mecánicos de uso industrial [12].

- **Aceros bajo carbono**

Los aceros de bajo carbono se caracterizan por presentar elevada ductilidad, buena soldabilidad y facilidad de deformación mecánica. Su microestructura contiene predominio de ferrita, lo que proporciona baja dureza y buena capacidad para procesos de laminado, trefilado y conformado. Estos materiales son ampliamente utilizados en aplicaciones estructurales y componentes que requieren facilidad de manufactura [13].

- **Aceros medio carbono**

Los aceros de medio carbono presentan un equilibrio entre resistencia mecánica y ductilidad, permitiendo mejorar sus propiedades mediante tratamientos térmicos como temple y revenido. Su comportamiento mecánico proporciona mayor resistencia y dureza respecto a los aceros de bajo carbono, manteniendo su tenacidad característica para aplicaciones sometidas a esfuerzos mecánicos moderados [14].

- **Aceros alto carbono**

Los aceros de alto carbono se distinguen por presentar elevada dureza, alta resistencia al desgaste y mayor capacidad de endurecimiento durante tratamientos térmicos. Su microestructura favorece la formación de fases endurecidas como perlita fina y martensita, características que permiten su utilización en resortes, herramientas y componentes sometidos a cargas elevadas y desgaste continuo [15].

1.4.4. Acero ASTM A228

1.4.4.1. Características del ASTM A228

- **Alta resistencia mecánica**

Una de las principales características del ASTM A228, es su elevada resistencia a la tracción, obtenida mediante la combinación entre alto contenido de carbono y deformación en frío. Esta condición permite fabricar componentes capaces de soportar cargas dinámicas, vibraciones y esfuerzos continuos sin presentar deformaciones permanentes significativas [16].

- **Aplicaciones en resortes**

Los aceros destinados para la fabricación de resortes se caracterizan por su alta resistencia, resiliencia y comportamiento estable bajo cargas cíclicas. Se utilizan frecuentemente en resortes helicoidales, válvulas, sistemas de suspensión y piezas giratorias sometidas a movimientos repetitivos [17].

El ASTM A228, se utiliza principalmente para la fabricación de resortes helicoidales, mecanismos de cierre, válvulas mecánicas y componentes que llegan a exponerse a fenómenos como fatiga. Su comportamiento elástico y su resistencia mecánica contribuyen a prolongar la vida útil de componentes sometidos a esfuerzos, como sistemas mecánicos y controles neumáticos [18].

1.4.4.2. Composición química

La composición química del acero ASTM A228, se caracteriza por presentar un alto contenido de carbono, acompañado de elementos como manganeso y silicio en menores proporciones. Esta combinación química proporciona elevada resistencia

mecánica y una adecuada respuesta frente a tratamientos térmicos, características fundamentales para su aplicación en resortes y componentes sometidos a esfuerzos repetitivos [19]. El manganeso presente en el ASTM A228, contribuye a mejorar la estabilidad microestructural durante el tratamiento térmico, favoreciendo una respuesta más uniforme del material durante el enfriamiento.

Además, este elemento permite optimizar propiedades mecánicas relacionadas con resistencia al desgaste y comportamiento elástico, requeridas en aceros destinados a aplicaciones dinámicas [20], [21].

El manganeso presente en el ASTM A228, contribuye al incremento de la templabilidad al retrasar las transformaciones difusivas durante el enfriamiento, permitiendo una mayor formación de martensita en medios de temple moderados. La combinación entre carbono y manganeso mejora la respuesta térmica del acero y favorece el desarrollo de propiedades mecánicas como dureza y resistencia al desgaste, características fundamentales en aceros destinados a la fabricación de resortes y elementos elásticos [22].

1.4.4.3. Propiedades mecánicas

El acero ASTM A228, es un acero de alto contenido en carbono cuyas propiedades mecánicas lo posicionan como material de referencia para aplicaciones que exigen alta resistencia bajo cargas cíclicas, como resortes y mecanismos de válvulas. Las propiedades determinantes para su desempeño en servicio son la dureza, la elasticidad y la microestructura, las cuales se encuentran directamente interrelacionadas y pueden modificarse mediante tratamientos térmicos [16].

- **Dureza**

La dureza es la propiedad mecánica que cuantifica la resistencia del material frente a deformaciones permanentes localizadas sobre su superficie. En los aceros de alto carbono, esta propiedad constituye un parámetro fundamental para aplicaciones sometidas a desgaste, fricción y cargas repetitivas. La dureza obtenida depende de las condiciones térmicas aplicadas al material y de la estructura desarrollada después del procesamiento [23].

- **Elasticidad**

La elasticidad es la capacidad del material para recuperar su forma original tras cesar la carga aplicada, sin experimentar deformación permanente. El módulo de elasticidad, también denominado módulo de Young es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente, en la zona de comportamiento elástico, entre los incrementos de tensión aplicados y los incrementos de deformación longitudinal unitaria producidos; además, indica la rigidez del material, siendo mayor el módulo cuanto más rígido es este [24].

1.4.5. Proceso de trefilado

El trefilado es un proceso de deformación plástica en frío utilizado para reducir el diámetro de un alambre o barra metálica mediante su paso a través de una hilera o dado. Este procedimiento permite mejorar el acabado superficial y aumentar la resistencia mecánica del material debido a la deformación inducida durante el proceso [25].

- **Endurecimiento por deformación**

El endurecimiento por deformación corresponde al incremento de dureza y resistencia mecánica generado por la deformación plástica en frío durante el trefilado. Este fenómeno ocurre debido al aumento de la densidad de dislocaciones en la estructura cristalina del material, limitando el movimiento interno de los planos atómicos y reduciendo la capacidad de deformación del metal [26].

- **Tensiones internas**

Durante el trefilado se generan tensiones residuales internas como consecuencia de la deformación no uniforme entre la superficie y el núcleo del material. Estas tensiones pueden influir sobre el comportamiento mecánico del alambre, afectando propiedades como resistencia a fatiga, estabilidad dimensional y susceptibilidad al agrietamiento [27].

- **Orientación microestructural**

El proceso de trefilado produce una orientación preferencial de los granos y microconstituyentes en dirección del esfuerzo aplicado. Esta alineación

microestructural modifica el comportamiento mecánico del material y favorece el incremento de resistencia longitudinal, especialmente en aceros utilizados para resortes y componentes sometidos a cargas dinámicas [28].

1.4.6. Diagrama hierro-carbono

El diagrama hierro-carbono representa el comportamiento de las aleaciones hierro-carbono en función de la temperatura y del porcentaje de carbono, permitiendo identificar las fases y microestructuras presentes durante los tratamientos térmicos. Las transformaciones de fase modifican directamente las propiedades mecánicas del acero, ya que cada microestructura presenta diferentes niveles de dureza, resistencia y ductilidad [29].

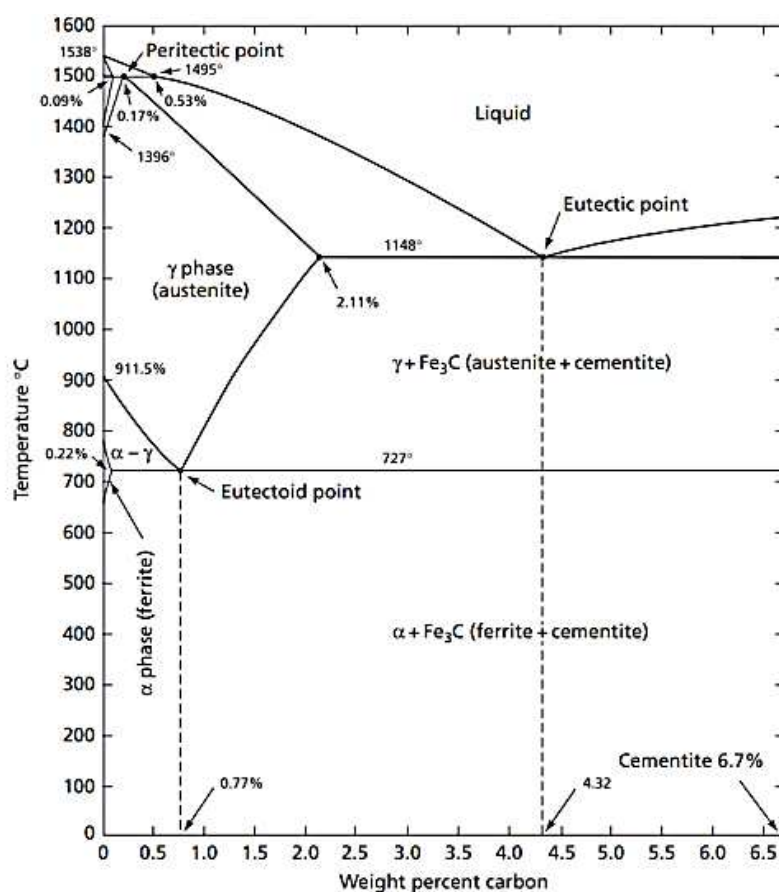


Figura 1. Diagrama hierro-carbono [30].

1.4.7. Transformaciones de fases

Las fases observadas en los aceros representan estructuras cristalinas con características físicas y mecánicas específicas. Entre las principales fases identificadas mediante metalografía se encuentran ferrita, perlita, martensita, bainita, y austenita.

- **Ferrita**

La ferrita es una fase microestructural del acero caracterizada por presentar tonalidades claras o blanquecinas durante el análisis metalográfico. Su estructura se compone de granos poligonales bien definidos y con escasa presencia de detalles internos debido a su baja reacción frente a reactivos químicos como el Nital. Generalmente, la ferrita aparece distribuida entre otras fases microestructurales y predomina en aceros hipoeutectoides o en materiales sometidos a tratamientos térmicos como el recocido [31]. Esta fase se caracteriza por poseer baja dureza y elevada ductilidad en comparación con otros constituyentes del acero.

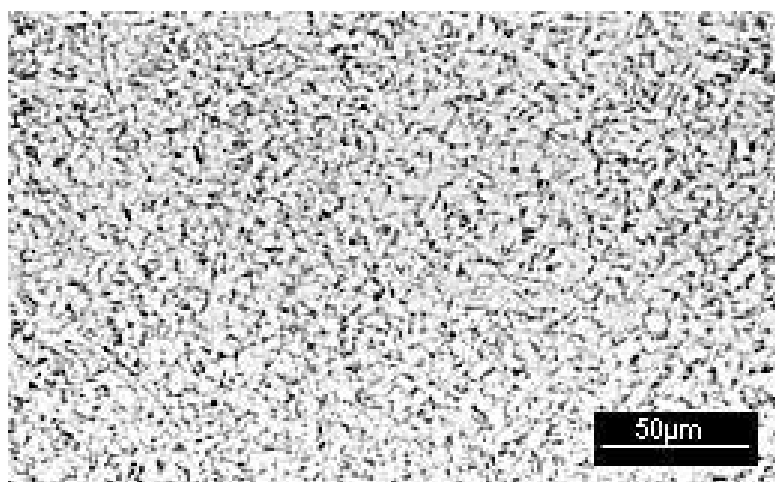


Figura 2. Apariencia microestructural característica de la fase ferrítica en aceros [32].

- **Perlita**

La perlita es una microestructura bifásica formada por ferrita y cementita dispuestas en forma laminar. Durante el análisis metalográfico se identifica por presentar colonias de tonalidad gris oscura dentro de la matriz metálica. Esta fase se desarrolla durante enfriamientos moderados y proporciona una combinación equilibrada entre resistencia mecánica y capacidad de deformación plástica [31].

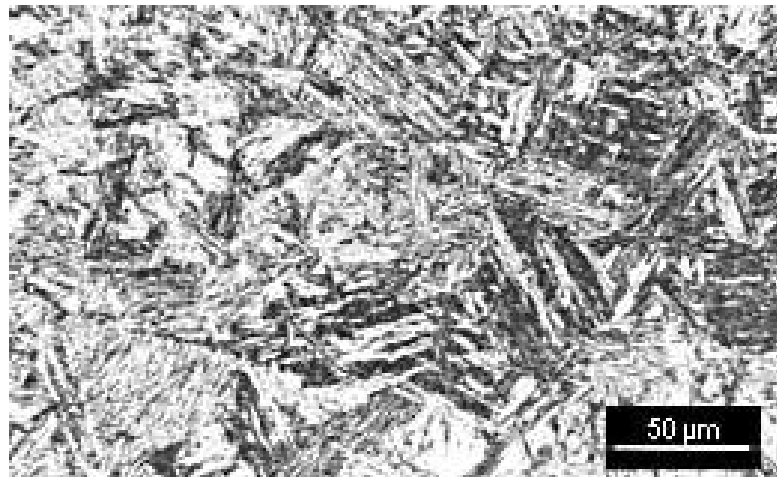


Figura 3. Apariencia microestructural característica de la fase perlítica en aceros [32].

- **Martensita**

La martensita es una fase microestructural característica de los aceros sometidos a tratamientos térmicos de temple. Su morfología presenta estructuras aciculares o en forma de agujas entrecruzadas, visibles mediante análisis metalográfico después del ataque químico. Esta fase se distingue por su elevada rigidez estructural y por presentar baja capacidad de deformación plástica en comparación con otras microestructuras del acero [31].

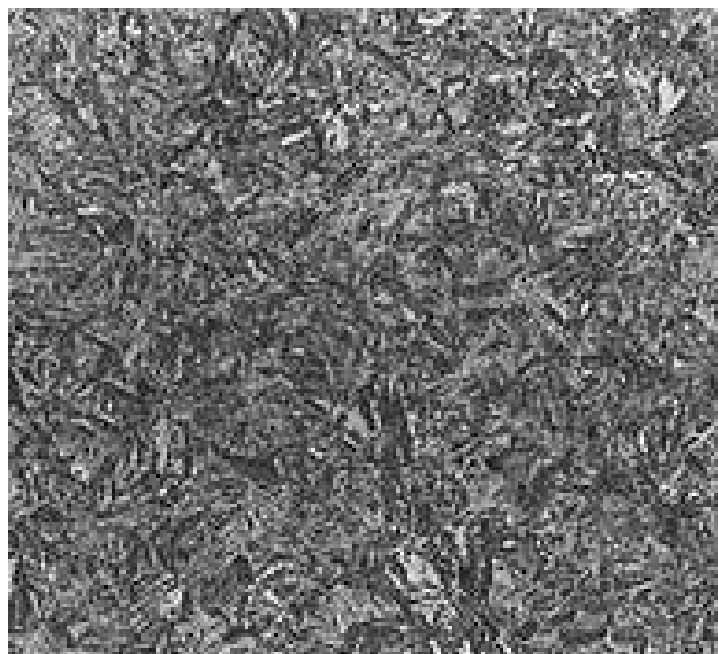


Figura 4. Apariencia microestructural característica de la fase martensítica en aceros [33].

- **Bainita**

La bainita es una microestructura formada bajo condiciones de enfriamiento intermedias. Su apariencia metalográfica puede variar entre estructuras aciculares finas o mezclas de ferrita y cementita con morfología más gruesa. Esta fase desarrolla propiedades mecánicas intermedias entre las obtenidas por estructuras perlíticas y martensíticas [31].

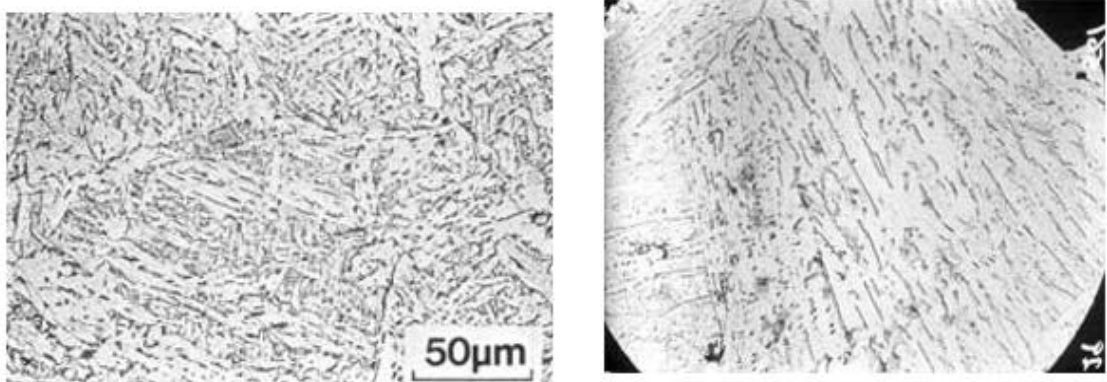


Figura 5. Apariencia microestructural característica de la fase bainítica en aceros [32].

- **Austenita**

La austenita retenida corresponde a pequeñas cantidades de austenita que no lograron transformarse completamente durante el enfriamiento rápido del acero. En el análisis metalográfico suele observarse como regiones amorfas o zonas con bajo contraste, localizadas entre estructuras martensíticas o en bordes de grano. La presencia de austenita retenida influye sobre propiedades como estabilidad dimensional, dureza y comportamiento mecánico del material tratado térmicamente [32].

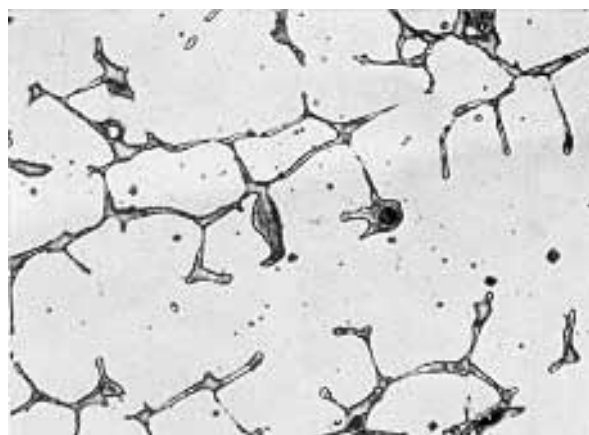


Figura 6. Apariencia microestructural característica de la fase austenítica en aceros [32].

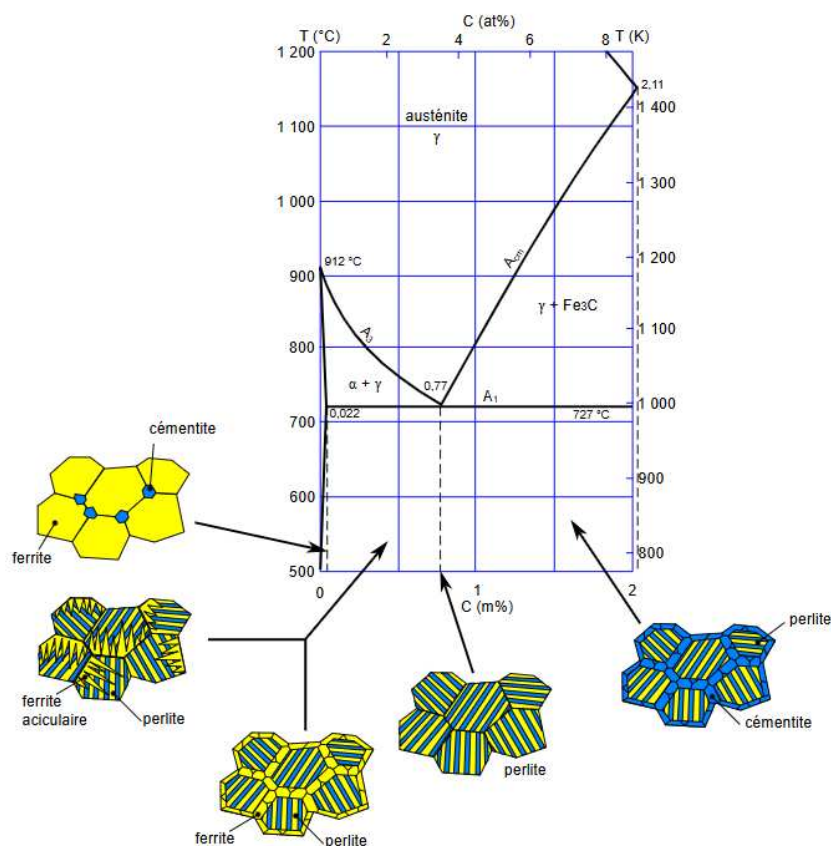


Figura 7. Diagrama de equilibrio hierro-carbono y microestructuras características de los aceros según su contenido de carbono [34].

1.4.8. Tratamientos térmicos del acero

Los tratamientos térmicos son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento aplicados a los aceros con el objetivo de modificar su microestructura y propiedades mecánicas sin alterar significativamente su composición química. Estos procesos permiten mejorar características como dureza, resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al desgaste, mediante transformaciones de fase producidas por variaciones de temperatura y velocidad de enfriamiento [35].

1.4.8.1. Temple del acero

El temple es un tratamiento térmico utilizado para modificar las propiedades mecánicas del acero mediante un calentamiento hasta la región de austenización, seguido de un sostenimiento térmico y un enfriamiento brusco en un medio refrigerante.

Durante el calentamiento, el acero transforma su microestructura inicial en austenita; posteriormente, el sostenimiento permite homogenizar la temperatura y distribución del carbono en el material. La rapidez del enfriamiento condiciona las transformaciones microestructurales y el comportamiento mecánico final del acero tratado [36].

- **Calentamiento**

El calentamiento corresponde a la etapa inicial del temple y tiene como finalidad elevar la temperatura del acero hasta la región austenítica. Durante este proceso se producen transformaciones microestructurales que permiten disolver parcialmente los carburos y homogenizar el carbono dentro de la matriz metálica. Un calentamiento adecuado favorece la obtención de una estructura uniforme antes del enfriamiento rápido [37].

- **Sostenimiento o permanencia**

El sostenimiento consiste en mantener el acero a la temperatura de austenización durante un tiempo determinado para asegurar la uniformidad térmica y la correcta difusión del carbono dentro de la estructura. Esta etapa permite completar la transformación hacia austenita y garantiza que toda la sección de la pieza alcance condiciones homogéneas antes del enfriamiento [38].

- **Enfriamiento brusco**

El enfriamiento brusco corresponde a la etapa del temple en la cual la temperatura del acero disminuye rápidamente mediante el uso de un medio refrigerante como agua, aceite o aire. La rapidez con la que se extrae el calor condiciona la estructura final obtenida y las propiedades mecánicas desarrolladas después del tratamiento térmico. La severidad del enfriamiento también influye sobre la aparición de tensiones internas y cambios microestructurales en el material [38].

- **Endurecimiento.**

El endurecimiento del acero hace referencia al crecimiento de resistencia a deformaciones plásticas producidas después del tratamiento térmico. Este suceso se relaciona con el cambio microestructural generado durante el enfriamiento y con la alteración de la estructura cristalina del material.

Aunque el temple mejora propiedades como resistencia mecánica y resistencia al desgaste, también puede incrementar la fragilidad y las tensiones internas del acero [39].

1.4.8.2. Variables del temple

Las propiedades obtenidas después del temple dependen de variables como temperatura, tiempo, composición de la pieza y medio de enfriamiento utilizado [40].

- **Temperatura de austenización**

La temperatura utilizada durante la austenización influye sobre la transformación de la microestructura inicial del acero hacia austenita. Un control adecuado de temperatura permite obtener una distribución homogénea del carbono dentro de la matriz metálica y favorece la correcta preparación del material antes del enfriamiento rápido. Temperaturas insuficientes pueden generar transformaciones incompletas, mientras que temperaturas excesivas pueden producir crecimiento de grano y alteraciones microestructurales no deseadas [40].

- **Tiempo**

El tiempo de sostenimiento corresponde al periodo durante el cual el acero permanece a la temperatura de austenización antes del enfriamiento. Esta variable permite homogenizar la temperatura en toda la pieza y favorecer la difusión del carbono dentro de la estructura. Un tiempo insuficiente puede provocar transformaciones incompletas, mientras que tiempos excesivos pueden generar crecimiento excesivo de grano y pérdida de propiedades mecánicas [40].

- **Composición**

La composición química del acero caracteriza su comportamiento durante los tratamientos térmicos y la respuesta mecánica que se adquiere tras el procesamiento. El intercambio de elementos de aleación afecta el equilibrio microestructural, el cambio de fases y las propiedades finales del material. [41].

- **Medio de enfriamiento**

Durante el temple, la velocidad de extracción térmica es controlada por el medio de enfriamiento, al mismo tiempo que determina las transformaciones a nivel

microestructural que ocurren en el acero. La capacidad de disipación de calor de cada medio influye sobre la dureza final, tensiones internas y estabilidad dimensional del material tratado térmicamente. La selección adecuada del medio permite controlar el comportamiento mecánico y reducir defectos asociados al tratamiento térmico [42].

1.4.9. Velocidad de enfriamiento en los aceros

1.4.9.1. Definición de velocidad de enfriamiento

La velocidad de enfriamiento se define como la variación de temperatura que experimenta un material en función del tiempo durante su proceso de enfriamiento. En los aceros, este parámetro influye sobre la evolución microestructural, las transformaciones de fase y la estabilidad de las propiedades obtenidas después del tratamiento térmico [42] , [43].

1.4.9.2. Transferencia de calor durante el temple

Durante el temple, la transferencia de calor ocurre mediante mecanismos físicos que permiten remover energía térmica desde el acero hacia el medio de enfriamiento. La eficiencia de este proceso depende de las propiedades térmicas del material, la geometría de la pieza y las características del medio refrigerante utilizado [44].

- **Conducción**

La conducción corresponde al transporte interno de calor desde las zonas de mayor temperatura hacia las regiones más frías del acero, permitiendo uniformizar gradualmente la temperatura dentro de la pieza [45].

- **Convección**

La convección ocurre cuando el calor superficial del acero es transferido hacia el medio refrigerante mediante el movimiento del fluido alrededor de la pieza metálica. Este mecanismo influye directamente sobre la capacidad de disipación térmica durante el temple [45].

- **Extracción térmica.**

La extracción térmica representa la capacidad del medio refrigerante para remover calor desde la superficie del acero durante el enfriamiento. La eficiencia de este

proceso depende de propiedades físicas como conductividad térmica, viscosidad y capacidad calorífica del medio utilizado [45].

1.4.10. Diagramas TTT

El diagrama TTT (Transformación-Tiempo-Temperatura) es una representación gráfica utilizada para analizar el comportamiento de la austenita frente a diferentes condiciones de temperatura y tiempo durante el enfriamiento. Estos diagramas permiten identificar el inicio y final de las transformaciones microestructurales, así como las condiciones bajo las cuales se desarrollan distintas estructuras dentro del acero [46].

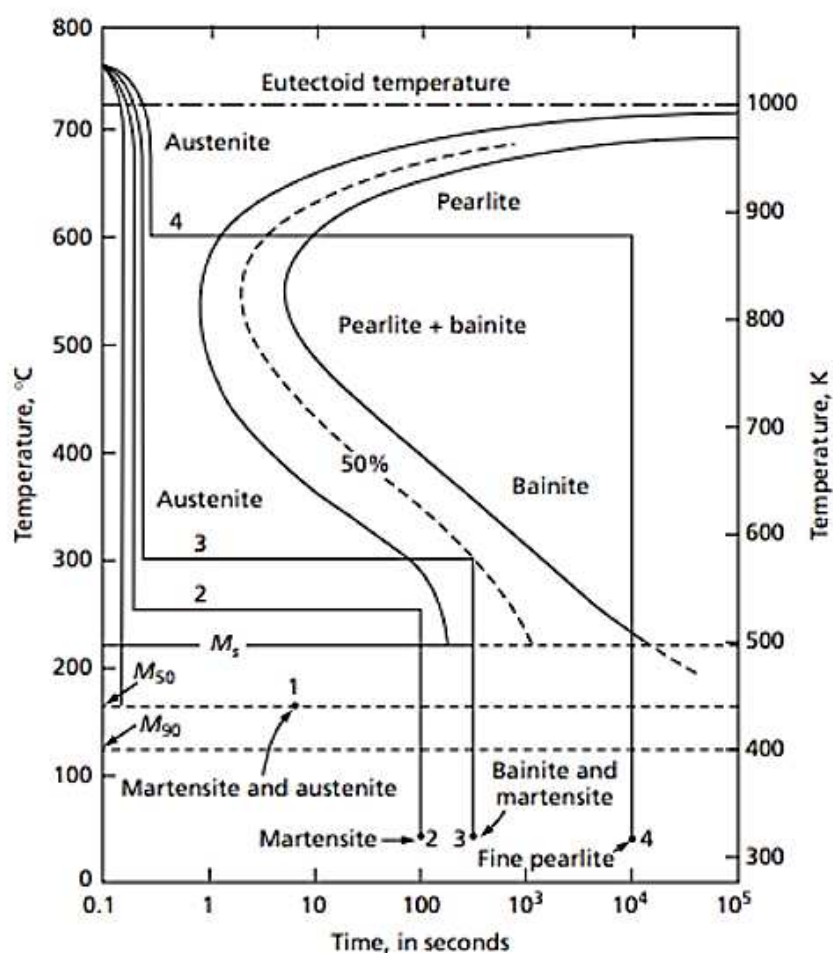


Figura 8. Diagrama (TTT) de un acero eutectoide [34].

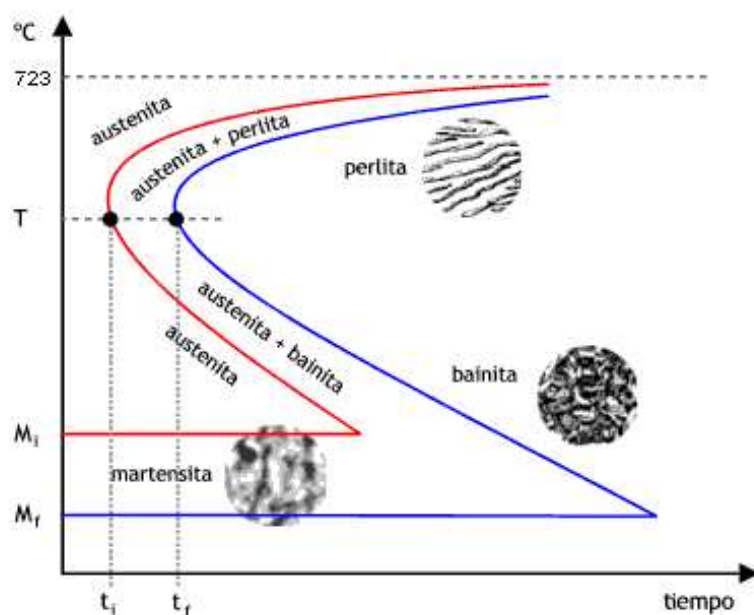


Figura 9. Diagrama (TTT) esquemático para aceros [33].

La velocidad mínima de enfriamiento para la formación de martensita a partir de la austenita se llama velocidad crítica de temple. Para templear un acero, es preciso que el enfriamiento sea más rápido que esta velocidad; si no, los productos resultantes serían perlíticos o bainíticos y la dureza del material tratado disminuiría [47].

1.4.11. Medios de enfriamiento

Los medios de enfriamiento empleados durante el temple controlan la velocidad de extracción de calor del acero y determinan las transformaciones microestructurales obtenidas después del tratamiento térmico. La severidad del medio influye directamente sobre la formación de martensita, bainita o perlita, modificando propiedades mecánicas como dureza, resistencia mecánica y presencia de tensiones residuales internas.

1.4.12. Generalidades de los medios de temple

1.4.12.1. Temple en agua

- **Máxima severidad.**

El agua es uno de los medios de temple con mayor severidad térmica debido a su elevada capacidad de disipación de calor. Su utilización genera cambios bruscos

de temperatura sobre la superficie del acero y es ampliamente empleada en tratamientos térmicos de aceros al carbono [48].

- **Enfriamiento rápido.**

El agua produce altas velocidades de enfriamiento durante las primeras etapas del temple debido a su elevada capacidad de transferencia térmica. Esta condición influye directamente sobre las transformaciones de fase y la estructura final desarrollada en el acero tratado [48].

1.4.12.2. Temple en aceite

El temple en aceite es un método de enfriamiento utilizado para controlar la disipación térmica del acero después de la austenización. Este medio presenta una severidad intermedia en comparación con el agua y el aire, permitiendo obtener cambios microestructurales más uniformes y menor riesgo de deformaciones térmicas [49].

- **Viscosidad**

La viscosidad representa la resistencia interna del aceite al movimiento y constituye una propiedad importante durante el temple. Aceites con viscosidad moderada favorecen una circulación más estable alrededor de la pieza y permiten una disipación térmica más uniforme [49].

- **Velocidad moderada**

El aceite desarrolla velocidades de enfriamiento inferiores a las obtenidas en agua debido a sus propiedades térmicas y menor capacidad de extracción de calor. Esta condición permite un enfriamiento más controlado del acero durante el tratamiento térmico [49].

- **Reducción de tensiones térmicas**

La menor severidad del aceite disminuye los gradientes térmicos entre la superficie y el núcleo de la pieza durante el enfriamiento. Esta condición contribuye a minimizar deformaciones y la aparición de tensiones residuales internas en el material tratado [49].

La selección del aceite SAE 20W50 como medio de enfriamiento se fundamenta en dichas características de viscosidad. Al tratarse de un aceite multigrado de alta viscosidad, presenta una velocidad de extracción de calor inferior a la del agua, pero superior a la del aire, lo que lo posiciona como un medio de severidad de enfriamiento intermedia, condición idónea para los fines comparativos del presente estudio. Su elevada viscosidad favorece, además, una transferencia de calor más gradual, lo que reduce el gradiente térmico brusco característico del temple en agua y, en consecuencia, disminuye el riesgo de aparición de tensiones internas y fisuras en un acero de alto carbono trefilado como el ASTM A228, susceptible a este tipo de defectos. Si bien no constituye un aceite de temple industrial normalizado, su comportamiento térmico resulta adecuado y representativo para evaluar el efecto de un medio de severidad intermedia [49].

1.4.12.3. Enfriamiento al aire

El enfriamiento al aire es un método de baja severidad térmica utilizado para disipar calor de manera gradual después del calentamiento del acero. Debido a la limitada capacidad del aire para remover energía térmica, este proceso desarrolla velocidades lentas de enfriamiento y cambios microestructurales progresivos [50].

- **Enfriamiento lento**

La baja conductividad térmica del aire produce una disminución gradual de temperatura dentro del acero, favoreciendo una evolución microestructural más uniforme durante el enfriamiento [51].

- **Menor endurecimiento**

Los medios de baja severidad térmica generan estructuras con menor resistencia superficial en comparación con tratamientos realizados mediante enfriamientos más bruscos [51].

- **Formación perlítica**

Durante el enfriamiento al aire se desarrollan microestructuras formadas principalmente por perlita y ferrita debido a las condiciones de enfriamiento gradual.

La característica principal de la perlita es su forma laminar compuesta por ferrita y cementita, proporcionando propiedades mecánicas estables entre ductilidad y resistencia [52].

Cuando la perlita está presente en mayor medida durante el enfriamiento al aire, se logra una distribución de tensiones internas más homogénea y se disminuye la posibilidad de que ocurran grietas en los componentes que experimentan esfuerzos mecánicos moderados [53].

1.4.13. Dureza de los aceros

1.4.13.1. Métodos de ensayo – Ensayos de dureza

- **Brinell**

El ensayo de dureza Brinell es un método utilizado para determinar la resistencia de un material a la penetración mediante la aplicación de una carga sobre una esfera de acero endurecido o carburo de tungsteno. Durante el ensayo, el penetrador se comprime progresivamente sobre una superficie plana y pulida del material, generando una huella permanente cuyo diámetro es medido posteriormente. La dureza Brinell se relaciona inversamente con el tamaño de la huella; mientras menor sea el diámetro de penetración, mayor será la dureza del material [54].

Este método es ampliamente utilizado en aceros y materiales metálicos de estructura heterogénea debido a que evalúa una zona relativamente amplia de la superficie, proporcionando resultados representativos del comportamiento mecánico general del material. El ensayo Brinell resulta adecuado para materiales de dureza media y elevada, especialmente en aplicaciones industriales relacionadas con tratamientos térmicos y control de calidad metalúrgico [54].

- **Rockwell C**

El ensayo de dureza Rockwell es uno de los métodos más utilizados en ingeniería debido a su rapidez, simplicidad y capacidad de adaptación a distintos materiales metálicos. El procedimiento consiste en aplicar un penetrador sobre la superficie del material mediante una carga menor inicial y posteriormente una carga mayor, determinando la dureza a partir de la profundidad permanente de penetración generada sobre la pieza [55].

La escala Rockwell C (HRC), emplea un penetrador cónico de diamante conocido como cono Brale y se maneja principalmente para materiales endurecidos o aceros sometidos a tratamientos térmicos. Valores elevados en la escala HRC revelan mayor resistencia a la deformación plástica y mayor dureza superficial. Este ensayo presenta ventajas importantes debido a que no requiere medición óptica de la huella y permite obtener resultados rápidos con buena repetibilidad en materiales templados [55].

- **Vickers**

El ensayo Vickers es un método de medición de dureza basado en la penetración de una pirámide de diamante de base cuadrada sobre la superficie del material. Después de aplicar una carga determinada, se miden las diagonales de la huella generada para calcular la dureza mediante la relación entre la carga aplicada y el área de penetración. La dureza se representa mediante el símbolo HV [56]. Este ensayo se caracteriza por su alta precisión y capacidad para evaluar pequeñas regiones del material, razón por la cual es ampliamente utilizado en análisis metalográficos y estudios de microdureza [56].

El método Vickers permite medir la dureza en microestructuras específicas, recubrimientos superficiales y zonas afectadas por tratamientos térmicos, proporcionando información detallada sobre variaciones microestructurales y comportamiento mecánico local del acero [56].

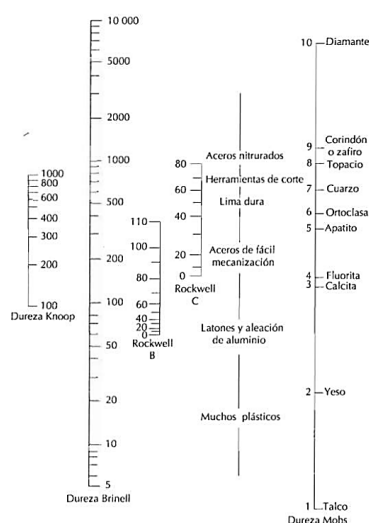


Figura 10. Comparación entre diferentes escalas de dureza [56].

1.4.14. Metalografía

La metalografía es una técnica de análisis utilizada para estudiar la estructura interna de los materiales metálicos mediante observación microscópica. Su finalidad es identificar fases, microconstituyentes, tamaño de grano, defectos y transformaciones producidas por procesos de fabricación o tratamientos térmicos. El análisis metalográfico permite relacionar la microestructura del material con sus propiedades mecánicas y comportamiento durante el servicio [56].

1.4.14.1. Fundamentos de metalografía

Los fundamentos de la metalografía se basan en la preparación adecuada de la superficie del material para permitir la observación clara de su microestructura. El corte debe realizarse evitando incrementos de temperatura que modifiquen las propiedades del acero, mientras que el lijado y pulido eliminan irregularidades superficiales hasta obtener una superficie lisa y reflectante [57].

1.4.14.2. Interpretación microestructural

- **Relación microestructura velocidad de enfriamiento**

La microestructura final del acero depende de la rapidez con la que ocurre el enfriamiento después de la austenización. Velocidades elevadas generan estructuras más endurecidas, mientras que enfriamientos moderados o lentos favorecen microestructuras con mayor ductilidad. La observación metalográfica permite identificar estas variaciones mediante el análisis de la morfología y distribución de las fases presentes en el material [58].

- **Relación microestructura-dureza**

La dureza del acero depende directamente de las fases microestructurales desarrolladas después del tratamiento térmico. Microestructuras con mayor refinamiento y menor capacidad de deformación generan mayor resistencia superficial, mientras que estructuras más dúctiles presentan menores niveles de dureza. El análisis metalográfico permite relacionar la morfología observada con el comportamiento mecánico del material [58].

1.4.15. Normas ASTM aplicadas al análisis metalúrgico y mecánico de aceros

Norma ASTM E3

La norma ASTM E3 establece los procedimientos generales para la preparación de muestras metalográficas destinadas al análisis microscópico de materiales metálicos. La normativa contempla etapas como corte, montaje, lijado y pulido, con el propósito de obtener superficies adecuadas para la observación de la microestructura sin alterar las características del material. Su aplicación garantiza condiciones uniformes durante el análisis metalográfico y mejora la confiabilidad de los resultados obtenidos [59].

Norma ASTM E407

La norma ASTM E407, define los reactivos y métodos de ataque químico utilizados para revelar las microestructuras de metales y aleaciones. Mediante estos procedimientos es posible generar contraste entre las diferentes fases presentes en el material, facilitando su identificación durante la observación microscópica. En aceros al carbono, esta norma es utilizada para evidenciar microconstituyentes como ferrita, perlita, bainita y martensita [60].

Norma ASTM E18

La norma ASTM E18, especifica el procedimiento para realizar ensayos de dureza Rockwell en materiales metálicos. Esta normativa establece las condiciones de ensayo, las cargas aplicadas y los tipos de penetradores empleados para determinar la resistencia del material frente a la penetración. La escala Rockwell C es ampliamente utilizada en aceros sometidos a tratamientos térmicos debido a su capacidad para evaluar materiales endurecidos de manera rápida y reproducible [60].

Norma ASTM A228/A228M

La norma ASTM A228/A228M, establece las especificaciones técnicas para alambres de acero trefilado duro utilizados en la fabricación de resortes mecánicos. La normativa regula parámetros relacionados con composición química, propiedades mecánicas y requisitos dimensionales del material. El acero ASTM A228 se caracteriza por su elevado contenido de carbono y alta resistencia mecánica, características que permiten su utilización en componentes sometidos a cargas dinámicas y esfuerzos repetitivos [61].

Durante la ejecución de la fase experimental se aplicaron normas técnicas internacionales de la ASTM International que regulan la especificación del material y los procedimientos de ensayo y caracterización empleados. La Tabla 1, resume dichas normas, indicando su año de edición y la función que desempeña cada una en el presente trabajo.

Tabla 1. Especificación de uso de normas ASTM.

Norma	Año	Propósito en el estudio
ASTM A228/A 228M	2018	Especificación del material (composición nominal)
ASTM E3	2017	Preparación de las probetas metalográficas
ASTM E407	2015	Ataque químico (Nital) para revelar microestructura
ASTM E18	2014	Ensayo de dureza Rockwell C

A pesar de la amplia documentación existente sobre los tratamientos térmicos de temple en aceros al carbono, se identifica una escasez de estudios específicos que evalúen de forma comparativa el efecto de distintos medios de enfriamiento sobre el acero ASTM A228 en las condiciones de disponibilidad de la industria metalmecánica local. En particular, no se dispone de información suficiente que relacione la severidad del medio de enfriamiento con la respuesta conjunta de dureza y microestructura de este acero empleando recursos accesibles en el contexto ecuatoriano. El presente trabajo busca aportar a este vacío mediante la caracterización experimental de dicho comportamiento.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe los materiales, equipos instrumentos y procedimientos experimentales empleados para analizar el efecto de la velocidad de enfriamiento del acero ASTM A228 templado en tres medios de enfriamiento distintos: agua, aceite SAE 20W50 y aire. La metodología aquí planteada se sustenta en normativas internacionales reconocidas, específicamente las normas ASTM E3, ASTM E407, y ASTM E18, las cuales rigen la preparación metalográfica, el ataque químico para un análisis microestructural y los ensayos de dureza Rockwell, respectivamente. Adicionalmente, el material base se selecciona conforme a la especificación ASTM A228/A228M, correspondiente a alambres de acero trefilado duro para muelles mecánicos.

El desarrollo experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM) de la Universidad Técnica de Ambato, durante el periodo comprendido entre febrero y mayo del 2026. La estructura del capítulo se organiza en tres ejes principales: el enfoque de la investigación, donde se justifica el carácter del estudio, los materiales, donde se describe el procedimiento experimental ejecutado y el método de análisis obtenidos.

2.1. Enfoque General

El presente trabajo de adopta un enfoque cuantitativo, dado que la información obtenida se expresa mediante variables numéricas medibles y procesables mediante análisis estadístico descriptivo. Los valores de dureza Rockwell, así como la cuantificación de fases microestructurales presentes en las probetas tratadas térmicamente, constituyen datos cuantitativos que permiten establecer comparaciones objetivas entre los grupos de estudio. En función del nivel de control de variables involucradas y del alcance deseado, la investigación se clasifica como experimental, correlacional, bibliográfico y comparativa, conforme se detalla a continuación.

2.1.1. Enfoque Experimental

El estudio es de carácter experimental, ya que regula una variable referente al medio de enfriamiento utilizado en el proceso de temple y revenido para examinar su impacto inmediato en las variables dependientes, concretamente la dureza y la microestructura del acero ASTM A228. Los ensayos experimentales se ejecutaron bajo las condiciones controladas, lo que garantizó la consistencia de parámetros como la temperatura de austenización, el tiempo de permanencia en el horno y la temperatura del medio de enfriamiento. Esta configuración facilitó vincular las diferencias en las características del material, exclusivamente a la variable que se necesitó ajustar, eliminando la posibilidad de influencias externas que afecten los resultados.

2.1.2. Enfoque Correlacional

Esta investigación se enmarcó en un enfoque correlacional, con el objetivo de identificar y medir la relación entre la velocidad de enfriamiento, determinada por el agente de temple elegido, y las características mecánicas del acero, centrándose en su dureza superficial y microestructura. Se analizó el patrón de dureza en función del medio de temple utilizado, determinando si la conexión entre estos dos factores es directa, inversa o no lineal. Esta relación hizo posible predecir, dentro de los límites experimentales estudiados, el comportamiento probable del material bajo diferentes escenarios de enfriamiento, lo que proporciona información técnica valiosa para aplicaciones industriales.

2.1.3. Enfoque Bibliográfico

El componente bibliográfico del estudio se presenta en la consulta y análisis sistemático de artículos científicos, normas técnicas internacionales y publicaciones especializadas en ingeniería de materiales, los cuales sustentan teóricamente los procedimientos experimentales adoptados, la interpretación de los resultados. La revisión bibliográfica contextualiza el comportamiento metalúrgico esperado del acero ASTM A228, compara hallazgos obtenidos con investigaciones previas realizadas en aceros de composición similar y valida la pertinencia de las técnicas experimentales empleadas en el desarrollo de la investigación.

2.1.4. Enfoque Comparativo

El estudio adoptó también un carácter comparativo, debido a que los resultados obtenidos del acero ASTM A228 templado en los tres medios de enfriamiento se contrastaron entre sí y con respecto al material en estado base, considerando como línea base de referencia. La comparación se efectuó tanto en términos cuantitativos, mediante valores de dureza Rockwell y valores en porcentaje de microconstituyentes, como cualitativos, mediante el análisis de las microestructuras observadas por microscopia óptica. Esta confrontación de resultados permite identificar de manera objetiva cuál de los medios de temple proporciona la mayor dureza, la microestructura más uniforme y, en consecuencia, las características mecánicas más provechosas para aplicaciones donde se requiere alta resistencia al desgaste y elevada capacidad de soporte de cargas dinámicas.

2.2. Recursos experimentales

En esta sección se describen los equipos, instrumentos, materiales e insumos empleados durante el desarrollo experimental del presente trabajo de titulación. La totalidad de los equipos pertenecen a laboratorio de metalografía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, lugar donde se ejecutaron los ensayos. La descripción de cada recurso se organiza en tres categorías: en equipos de laboratorio, materiales e insumos presentadas a continuación.

2.2.1. Equipos de laboratorio

Los equipos de laboratorio incluyen las máquinas y dispositivos utilizados durante el proceso de calentamiento, el procesamiento metalográfico, el análisis de la microestructura y la evaluación de la dureza. La Tabla 1, detalla los instrumentos utilizados, indicando su marca, modelo y la función específica que desempeña cada uno en el experimento.

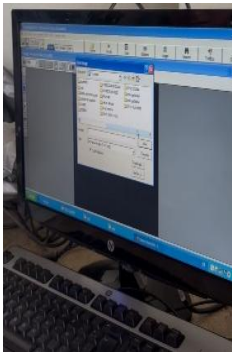
Tabla 2. Equipos de laboratorio empleados en el desarrollo experimental.

Lista de Equipos de Laboratorio			
Equipo	Marca y Modelo	Descripción y aplicación	Imagen
Horno eléctrico para tratamiento térmico	MATEST – Forno Laboratorio	Horno tipo mufla con control digital de temperatura, empleado para el calentamiento de las probetas hasta la temperatura de austenización y para el tratamiento térmico de térmico de temple.	
Horno eléctrico industrial	Laboratorio de metalografía FICM-UTA	Horno eléctrico resistivo tipo mufla con control analógico mediante perilla y termopar inferior, empleado para el tratamiento térmico de revenido posterior al temple.	
Durómetro Rockwell	Lyric - HBRV 187.5	Durómetro de banco multiescalar (Brinell – Rockwell – Vickers) con penetrador de diamante, utilizado para la medición de la dureza superficial del acero en la escala Rockwell C (HRC).	

Tabla 2. Equipos de laboratorio empleados en el desarrollo experimental (continuación).

Lista de Equipos de Laboratorio			
Equipo	Marca y Modelo	Descripción y aplicación	Imagen
Máquina de desbaste rotativa	Lytic – METAPOL 1000X	Equipo automático empleado en la preparación mecánica superficial para eliminar marcas de corte y asegurar la planaridad de las probetas mediante abrasión progresiva con papeles de lija de agua.	
Máquina pulidora abrillantadora rotativa	Lytic – METAPOL 1000X	Equipo automático empleado en la etapa final de la preparación metalográfica mediante el uso de paños y suspensiones abrasivas finales para eliminar micro rayaduras, logrando el acabado de espejo necesario para el análisis óptico.	
Pirómetro digital infrarrojo	UNI-T – UT305A	Termómetro infrarrojo sin contacto, con rango de medición de -50 a 1050°C, empleado en la temperatura de las probetas y verificación previo al ingreso al horno de revenido.	

Tabla 2. Equipos de laboratorio empleados en el desarrollo experimental (continuación).

Lista de Equipos de Laboratorio			
Equipo	Marca y Modelo	Descripción y aplicación	Imagen
Prensa de montaje metalográfica	Laboratorio de Metalografía FICM – UTA	Equipo empleado para el encapsulado de las probetas en baquelita, facilitando su manipulación durante las etapas de desbaste, pulido y observación microscópica.	
Secador de probetas	Laboratorio de Metalografía FICM – UTA	Equipo utilizado para el secado de las probetas posterior al lavado con agua, evitando la formación de microgotas que generan oxidación superficial.	
Microscopio metalográfico	Radical – RMM – 1	Microscopio óptico invertido, utilizado para examinar y registrar microestructuras a varios niveles de aumentos.	
Computadora con software para análisis de imágenes	Laboratorio de Metalografía FICM – UTA	Estación de trabajo con software de análisis metalográfico, permite la captura de las imágenes y la cuantificación del porcentaje de microconstituyentes.	

Los equipos empleados (durómetro Rockwell, horno de tratamiento térmico y microscopio metalográfico) pertenecen al Laboratorio de Metalografía de la FICM-UTA y se encontraban operativos y verificados conforme a los procedimientos internos de mantenimiento del laboratorio al momento de la ejecución de los ensayos.

2.2.2. Materiales

Aquí se presentan los recursos consumibles y a la materia prima objeto de estudio, los cuales fueron transformados o consumidos durante el proceso experimental. En la Tabla 2, se presenta a detalle los materiales utilizados.

Tabla 3. Materiales empleados en el desarrollo experimental.

LISTA DE MATERIALES		
Material	Descripción y aplicación	Imagen
Acero ASTM A228	Alambre de acero trefilado duro al alto carbono para muelles mecánicos, de 3 mm de diámetro, adquirido del proveedor [Venco, OMEGA RESORTES, ver anexo 1] bajo la equivalencia de la norma EN 10270 - 1SH.	
Lijas metalográficas 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2500	Papeles abrasivos al agua de granulometría progresiva, en la etapa de desbaste para eliminar las marcas de corte de las probetas.	
Reactivo Químico Nital 3%	Mezcla de 3% de ácido nítrico en etanol, empleada como reactivo químico para exponer la microestructura del acero, de acuerdo con la norma ASTM E407.	

Es importante mencionar que la composición química del material fue asumida conforme a los valores nominales establecidos en la norma ASTM A228, según se declara en la sección de limitaciones del Capítulo II del presente trabajo, dado que no se realizó espectrometría de verificación de lote específico.

Tabla 3. Materiales empleados en el desarrollo experimental (continuación).

LISTA DE MATERIALES		
Material	Descripción y aplicación	Imagen
Baquelita	Polímero termoestable en polvo utilizado en la prensa de montaje como matriz para el encapsulado en caliente de las probetas.	
Aceite SAE 20W50	Medio de enfriamiento de severidad intermedia. Aceite lubricante mineral multigrado, empleado en el temple del acero.	
Agua	Medio de enfriamiento de alta severidad térmica, empleado a temperatura ambiente en el proceso de temple del acero.	
Alúmina	Suspensión de alúmina alfa de óxido de aluminio ultrafino, utilizada como abrasivo de pulido final para lograr el acabado brillante en las muestras de acero.	

2.2.3. Insumos

Los insumos agrupan las herramientas y elementos auxiliares empleados para la manipulación, corte, sujeción, limpieza e identificación de las probetas durante las distintas fases del procedimiento. En la Tabla 3, se describen los insumos utilizados.

Tabla 4. Insumos empleados en el desarrollo experimental.

LISTA DE INSUMOS		
Insumo	Descripción y aplicación	Imagen
Sierra para metal	Herramienta empleada para el corte de las probetas a partir del alambre de acero, así como el seccionamiento de las muestras destinadas al análisis metalográfico.	
Lima para metales	Herramienta de desbaste utilizada para generar una superficie plana en la zona de medición de las probetas, previo al ensayo de dureza.	
Mordaza de sujeción	Elemento empleado para fijar y sostener las probetas durante la operación de corte y limado	
Envases de aluminio	Recipientes destinados a contener los medios de enfriamiento (agua y aceite) durante la inmersión inmediata de las muestras en el proceso de temple.	

Tabla 4. Insumos empleados en el desarrollo experimental (continuación).

LISTA DE INSUMOS		
Insumo	Descripción y aplicación	Imagen
Pinzas para crisol	Dispositivo móvil diseñado para manipular con seguridad las muestras a altas temperaturas, usado para colocar y retirar las muestras del horno durante el temple y revenido.	
Algodón y wipe	Materiales de limpieza utilizados para retirar residuos y secar las probetas, evitando su oxidación superficial.	
Cinta Scotch	Material empleado para el etiquetado de las probetas según su grupo experimental.	

2.3. Métodos

2.3.1. Diseño experimental

El presente trabajo, aplica un diseño unifactorial con un solo factor de variación, siendo el medio de enfriamiento empleado durante el proceso de temple. Dicho factor se evalúa en tres niveles correspondientes a los medios agua, aceite SAE 20W50 y aire, a los que se suma el material en estado base como grupo de referencia o línea base. El diseño contempla el tratamiento térmico de temple, seguido del tratamiento térmico de revenido para los grupos templados, manteniendo constantes el resto de los parámetros operativos, entre ellos la

temperatura de austenización, el tiempo de permanencia en el horno y la geometría de las probetas, de manera que las diferencias observadas en las variables de respuesta puedan atribuirse exclusivamente al medio de enfriamiento.

Con el objetivo de garantizar la confiabilidad estadística de los resultados, cada nivel de factor se evaluó mediante cinco repeticiones, es decir, cinco probetas por grupo, sobre las cuales se realizaron cinco mediciones de dureza por probeta.

De esta manera, el diseño experimental proporciona una base de datos suficiente para el cálculo de valores promedio de las mediciones en cada grupo de estudio.

2.3.2. Población y muestra

La población de estudio está constituida por el acero ASTM A228 en forma de alambre trefilado duro de 3 mm de diámetro. Para el desarrollo experimental se adquirieron seis metros de dicho alambre, de los cuales se emplearon entre tres y cuatro metros para la fabricación de las probetas, conservando el material restante como reserva ante posibles repeticiones de los ensayos.

La muestra está conformada por veinte probetas obtenidas a partir del alambre adquirido, cada una con una longitud de 15 cm. Distribuidas equitativamente en cuatro grupos de estudio de cinco probetas cada uno. El tamaño de la muestra se estableció considerando la necesidad de contar con repeticiones suficientes para obtener resultados representativos y estadísticamente confiables en cada condición experimental, así como al disponibilidad de material y la capacidad operativa del laboratorio.

La longitud de 15 cm de cada probeta se definió en función de la facilidad de manipulación durante las operaciones de tratamiento térmico, temple y limado, de igual forma como para disponer de una superficie suficiente que permitiera realizar las cinco indentaciones del ensayo de dureza de manera convenientemente espaciada, evitando la interferencia entre los puntos de medición contiguos.

Con el fin de garantizar la validez del ensayo de dureza Rockwell C sobre la geometría cilíndrica del alambre, se preparó una cara plana mediante limado y desbaste progresivo en una de las caras de cada probeta, eliminando la curvatura superficial en la zona de indentación. Esta preparación asegura el correcto

asentamiento del penetrador y la perpendicularidad de la carga, conforme a las recomendaciones de la norma ASTM E18 para superficies de ensayo. Las cinco indentaciones por probeta se distribuyeron a lo largo de la zona plana, respetando la separación mínima entre huellas establecida por la norma.

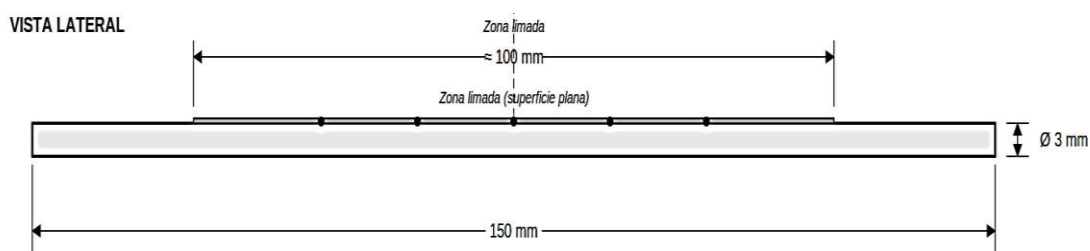


Figura 11. Geometría, de la probeta con sus respectivas dimensiones.

En cuanto al espesor del material, si bien la norma ASTM A228, corresponde a una especificación de producto y no establece la geometría de probetas de ensayo, el diámetro de 3 mm de alambre satisface el requisito de espesor mínimo que se establece en la norma ASTM E18, para el ensayo de dureza Rockwell C. La misma indica que, el espesor de la muestra debe ser al menos diez veces la profundidad de la huella generada por el penetrador; considerando que la profundidad de indentación en la escala Rockwell C es del orden de 0.2 cm, el espesor requerido sería aproximadamente de 2 mm, valor inferior a los 3 mm del alambre empleado, por lo que el material resulta apto para el ensayo. Asimismo, debido a la condición del alambre delgado, las mediciones de dureza se realizaron utilizando el soporte apropiado para asegurar la estabilidad y perpendicularidad de la probeta respecto al penetrador.

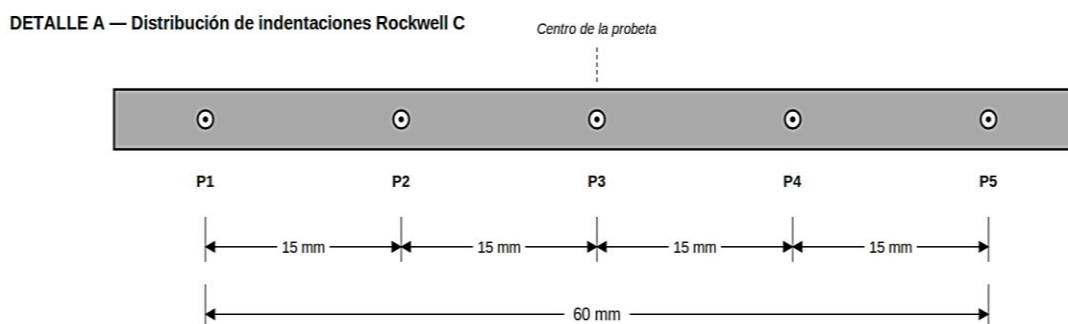


Figura 12. Distribución de indentaciones en la probeta.

Es importante mencionar que, cada probeta fue identificada mediante una nomenclatura específica que permite reconocer el grupo experimental al que pertenece. En la Tabla 4, se presenta la distribución de las probetas según el grupo de estudio y su correspondiente nomenclatura.

Tabla 5. Distribución y nomenclatura de las probetas según el grupo de estudio.

Grupo de estudio	Nomenclatura	Número de probetas
Material en estado base (base)	A228-B-01 a A228-B-05	5
Templado en aire	A228-A-01 a A228-A-05	5
Templado en aceite SAE 20W50	A228-AC-01 a A228-AC-05	5
Templado en agua	A228-AG-01 a A228-AG-05	5
Total	—	20

Donde:

- **A228:** Acero ASTM A228
- **B:** Material en estado Base
- **A:** Aire
- **AC:** Aceite
- **AG:** Agua
- **01 a 05:** Número de probetas

Para el análisis metalográfico, se obtuvieron muestras adicionales mediante el seccionamiento de probetas pertenecientes a los mismos cuatro grupos. En caso del material en estado base se prepararon dos muestras, correspondientes a las secciones transversal y longitudinal del alambre, con el propósito de observar la microestructura en ambas orientaciones. Para cada uno de los tres grupos templados se preparó una muestra representativa, obtenida mediante el corte de un tramo de 1 cm de longitud a partir de una probeta del grupo correspondiente. De este modo, se conformó un total de seis muestras metalográficas destinadas a la observación microestructural y a la cuantificación de los microconstituyentes.

2.3.3. Procedimiento para la aplicación experimental

En este capítulo se describe los pasos técnicos que se siguieron para la aplicación experimental en cada una de las fases de estudio, indicando los parámetros operativos, normas técnicas de referencia y los equipos empleados.

2.3.3.1. Adquisición y caracterización del material

Se adquirió seis metros de alambre de acero ASTM A228 de 3 mm de diámetro en estado trefilado duro. Previo al inicio había que tomar en cuenta las características declaradas por el proveedor, así como la integridad superficial del alambre, descartando la presencia de óxido, deformaciones plásticas o defectos superficiales que llegasen a comprometer la validez de los ensayos posteriores.

2.3.3.2. Corte e identificación de probetas

Una vez adquirido el alambre, se procedió a cortar veinte probetas de 15 cm de longitud mediante sierra manual para metal, utilizando una mordaza de sujeción para garantizar el corte perpendicular. Posteriormente, en uno de los extremos de cada probeta se generó una superficie plana mediante limado, esto con el fin de facilitar el contacto adecuado con el penetrador durante el ensayo de dureza. Luego, cada probeta fue identificada con cinta scotch siguiendo la nomenclatura en la Tabla 4.

Con el fin de garantizar la validez del ensayo de dureza Rockwell C sobre la geometría cilíndrica del alambre, se preparó una cara plana mediante limado y desbaste progresivo en una de las caras de cada probeta, eliminando la curvatura superficial en la zona de indentación. Esta preparación asegura el correcto asentamiento del penetrador y la perpendicularidad de la carga, conforme a las recomendaciones de la norma ASTM E18, para superficies de ensayo. Las cinco indentaciones por probeta se distribuyeron a lo largo de la zona plana, respetando la separación mínima entre huellas establecida por la norma

2.3.3.3. Tratamiento térmico de temple

El tratamiento térmico de temple se aplicó a quince probetas, correspondientes a los tres grupos templados, mientras que las cinco probetas restantes se conservaron en estado base como grupo de referencia. Luego, se introdujeron en el horno tipo mufla, programado a una temperatura de austenización de 803°C, alcanzada mediante un

precalentamiento de una hora. Una vez que se estabilizó la temperatura, cada probeta permaneció dentro del horno durante 20 minutos, tiempo establecido de manera uniforme para garantizar la homogeneización y la completa transformación austenítica del material [38].

La temperatura de austenización en el horno se controló por mediante el sistema digital integrado del horno MATEST, y se verificó de forma complementaria con un pirómetro digital infrarrojo UNI-T UT305A, considerando una tolerancia operativa de ± 5 °C respecto a la temperatura objetivo. El tiempo de sostenimiento se contabilizó a partir del momento en que el horno alcanzó la temperatura programada.

Concluido el tiempo de austenización, las probetas se extrajeron del horno mediante pinzas para crisol y se sumergieron de manera inmediata en el medio de enfriamiento correspondiente, evitando demoras que pudieran alterar la velocidad de enfriamiento. Las probetas del grupo A228–A–01 a A228–A–05 se enfriaron en aire en condiciones ambientales del laboratorio, las del grupo A228–AC–01 a A228–AC–05 se templaron en aceite Forcelube Racing Oil SAE 20W50, y las del grupo A228–AG–01 a A228–AG–05 se templaron en agua de botella. Tanto el agua como el aceite se encontraban a temperatura ambiente, en un rango de 18 a 23°C. y el agua en un rango de temperatura de 20°C a 22°C, este valor fue verificado con el pirómetro digital infrarrojo UNI – T UT305A previo a cada operación de temple.

Los tres medios de enfriamiento se emplearon a temperatura ambiente. El agua y el aceite se dispusieron en volúmenes suficientes para garantizar la inmersión completa de las probetas y evitar el calentamiento significativo del medio durante el temple. El enfriamiento se realizó sin agitación mecánica controlada, mediante la inmersión directa y manual de cada probeta, condición que se declara parte del alcance experimental del estudio.

2.3.3.4. Tratamiento térmico de revenido

Posterior al temple, las quince probetas templadas fueron sometidas a un tratamiento térmico de revenido, con el fin de aliviar las tensiones residuales generadas durante el enfriamiento brusco, manteniendo al mismo tiempo niveles de dureza elevados. Para ello, las probetas se introdujeron en el horno eléctrico industrial tipo mufla del Laboratorio de Metalografía, programado a una temperatura de 260 °C, donde

permanecieron durante 35 minutos. La temperatura del revenido se verificó mediante el pirómetro digital infrarrojo UNI-T UT305A. Los parámetros del revenido se establecieron por el rango bibliográfico de temperaturas de revenido de baja temperatura recomendadas para aceros trefilados duros, comprendido entre 200 °C y 320 °C [28], dentro del cual el valor adoptado representa un equilibrio apto de tensiones y conservación de la dureza. Una vez que finalizó el tiempo de permanencia en el horno, las probetas fueron extraídas del horno y enfriadas al aire hasta alcanzar la temperatura ambiente.

2.3.3.5. Ensayo de dureza Rockwell C

El ensayo de dureza se realizó conforme a la norma ASTM E18, empleando el durómetro Lyric HBRV 187.5 con penetrador de diamante de tipo cono Rockwell y una carga total de 150 kgf, correspondientes a la escala Rockwell (HRC). Sobre cada probeta, se efectuó cinco mediciones de dureza, distribuidas a lo largo de la zona limada de la probeta, asegurando una separación mínima entre identaciones consecutivas y entre cada indentación y el borde de la probeta, conforme a los requisitos de la norma.

Los valores obtenidos fueron registrados en tablas de manera manual y posteriormente pasadas a un archivo de hoja de cálculo, leyendo directamente la dureza indicada por el dial mecánico del equipo. De esta manera, se obtuvo 25 mediciones por grupo experimental, totalizando 100 mediciones para el conjunto del estudio.

2.3.3.6. Preparación metalográfica

La preparación metalográfica se ejecutó conforme a la norma ASTM E3. A partir de los grupos de probetas previamente ensayadas se obtuvieron seis muestras destinadas al análisis microestructura, dos del material en estado base, correspondientes a las secciones transversal y longitudinal, y una por cada grupo templado. Cada muestra se obtuvo mediante el corte de un tramo de 1 cm de longitud con sierra manual, esta operación se efectuó de manera lenta y por tramos cortos para evitar la generación de calor que pudiera alterar la microestructura original del acero.

Las muestras encapsularon en baquelita mediante la prensa de montaje metalográfica del Laboratorio de metalografía de la FICM-UTA, facilitando la manipulación durante las etapas posteriores. Luego se realizó el desbaste mecánico empleando la máquina

desbastadora Lyric METAPOL 1000X, con lijas de agua de granulometría progresiva (240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 y 2500), girando la muestra 90° entre cada cambio de lija para eliminar marcas de la etapa anterior. Posteriormente, se procedió a realizar el pulido en la maquina Lyric METAPOL 1000X, empleando paños y suspensión de alúmina alfa hasta obtener un acabado espejo libre de microrayaduras visibles.

El tiempo de ataque químico con Nital al 3% se ajustó para cada grupo en función de la respuesta de su microestructura al reactivo, dado que las estructuras más duras y de mayor contenido martensítico requieren menor tiempo de ataque para revelar adecuadamente sus constituyentes, mientras que las estructuras más blandas y de mayor contenido ferrítico precisan tiempos mayores. Este ajuste garantiza un contraste óptimo y comparable entre las micrografías de los distintos grupos.

2.3.3.7. Ataque químico y observación microestructural

Para revelar la microestructura del acero se aplicó un ataque químico siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E407, utilizando como reactivo Nital al 3%. Esta concentración del 3% fue seleccionada ya que se realizaron pruebas previas con Nital 2%, que resultaron insuficientes para activar la reacción química sobre la superficie pulida del acero.

El reactivo se aplicó por inmersión durante el tiempo necesario para evidenciar el contraste microestructural, controlando visualmente la respuesta de la superficie; concluido el ataque, las muestras se enjugaron con agua, se secaron en el secador de probetas del laboratorio, y una vez seca la zona atacada de la probeta, se pasó algodón suavemente por encima de la mancha, para evitar la formación de microgotas de agua que llegasen a oxidar superficial la probeta.

La observación de la microestructura se realizó con el microscopio metalográfico invertido Radical RMM-1, equipado con la cámara digital integrada. Las micrografías se capturaron y se almacenaron en la computadora con el software de análisis de imágenes, esta herramienta fue empleada también para la identificación y cuantificación del porcentaje de microconstituyentes presentes en cada microestructura.

2.3.4. Método de análisis y procesamiento de datos

El análisis se desarrolló en dos parámetros, los cuales fueron el procesamiento cuantitativo de los valores de dureza y la cuantificación de los microconstituyentes presentes en cada microestructura.

2.3.4.1. Procesamiento de datos de dureza

Los valores de dureza Rockwell C registrados durante el ensayo fueron tabulados en hojas de cálculo, organizándolos por probeta y por grupo experimental. Para cada probeta se calculó la dureza promedio a partir de cinco mediciones efectuadas, mediante parámetros estadísticos como la media aritmética, expresada de la siguiente Ecuación 1.

$$\overline{HRC} = \frac{\sum HRC_i}{n} \quad (1)$$

Donde:

$\overline{HRC}$: Representa la dureza promedio de la probeta expresada en escala Rockwell C

HRC_i : Corresponde al valor de la medición individual

n: es el número de mediciones realizadas por probeta.

Posteriormente se calculó la dureza promedio por grupo experimental, obteniendo cuatro valores de dureza promedio representativos.

2.3.4.2. Análisis microestructural

El análisis microestructural, mediante las micrografías obtenidas tomadas en el microscopio óptico Radical RMM.1, fueron procesadas en el software de análisis de imágenes metalográficas, donde dicha herramienta permite identificar y cuantificar de manera porcentual las fases presentes en cada microestructura, mediante el contraste tonal entre los distintos microconstituyentes.

La cuantificación se aplicó a cada una de las seis muestras metalográficas, obteniéndose el porcentaje correspondiente al material en estado base, en sección transversal y a cada uno de los tres grupos templados.

Los resultados de la cuantificación se tabularon para su comparación entre grupos, permitiendo establecer relación entre el medio de enfriamiento empleado y las transformaciones microestructurales producidas por el tratamiento térmico.

2.3.5. Operacionalización de variables

2.3.5.1. Variable independiente

Medio de enfriamiento empleado durante el temple, descritas en la Tabla 5.

Tabla 6. Operacionalización de la variable independiente.

Definición conceptual	Instrumento	Dimensiones	Indicadores	Escala / Unidad
Medio de enfriamiento: Sustancia empleada para extraer el calor durante el temple, el cual determina la severidad y, en consecuencia, la velocidad de extracción de calor del material.	Recipientes de enfriamiento; pirómetro digital UNI-T UT305A	Severidad de temple (capacidad de extracción de calor del medio)	Tipo de medio empleado; temperatura del medio	Agua, aceite SAE 20W50, aire, (valores en ° C)

2.3.5.2. Variable dependiente

Se presentan dos variables dependientes, correspondientes a la dureza superficial y la microestructura del acero, resultantes del tratamiento térmico, descritas en la Tabla 6.

Tabla 7. Operacionalización de las variables dependientes.

Definición conceptual	Instrumento	Dimensiones	Indicadores	Escala o Fase (microestructural) / Unidad
Dureza: Resistencia que opone el material	Durómetro Lyric HBRV 187,5 (Escala Rockwell)	Dureza superficial del acero tratado térmicamente	Valor de dureza Rockwell C	HRC
Microestructura: arreglo y distribución de las fases y microconstituyentes presentes en el acero, observable a nivel microscópico	Microscopio metalográfico Radical RMM – 1; software de análisis de imágenes	Microconstituyentes presentes; proporción de fases	Tipo de microconstituyente; porcentaje de cada fase	Martensita, perlita, ferrita, cementita; (valores en %)

2.3.6. Hipótesis

Hipótesis nula

La variación en el medio de enfriamiento (agua, aceite SAEW50 y aire) empleado durante el proceso de temple del acero ASTM A228 no influye significativamente en la dureza ni en la microestructura del material, por lo que no se presentan diferencias relevantes entre los valores obtenidos según los distintos medios de enfriamiento utilizados.

Hipótesis alternativa

La variación en el medio de enfriamiento (agua, aceite SAE 20W50 y aire) empleado durante el proceso de temple del acero ASTM A228 influye significativamente en la dureza y la microestructura del material, generando diferencias entre los valores obtenidos al realizar la comparación de resultados según los distintos medios de enfriamiento empleados.

2.4. Limitaciones del estudio

El presente trabajo experimental presentó las siguientes limitaciones, las cuales se declaran con el propósito de delimitar con precisión el alcance de los resultados obtenidos:

En primer lugar, la velocidad de enfriamiento no fue medida de forma directa mediante termopares ni registrada a través de curvas temperatura – tiempo en grados por segundo. En su lugar dicha variable se controló de manera indirecta mediante la selección del medio de temple, dado que cada medio impone una severidad de enfriamiento característica y documentada en la literatura metalúrgica. En consecuencia, el análisis del efecto de la velocidad de enfriamiento se desarrolló desde un enfoque cualitativo basado en la severidad relativa de los medios empleados, y no desde la cuantificación directa de la rapidez de extracción de calor.

En segundo lugar, la identificación de los microconstituyentes se realizó mediante microscopía óptica y análisis digital de imagen, técnicas que permitieron una caracterización morfológica y cuantitativa aproximada, pero que no sustituyen a métodos de validación complementarios como la difracción de rayos X (DRX) o la microscopía electrónica de barrido (SEM). Por tal motivo, las fases reportadas se interpretan como microconstituyentes aparentes coherentes con el comportamiento mecánico observado y con la literatura metalúrgica de referencia.

En tercer lugar, la composición química del material se contempló a partir de los valores nominales establecidos por la norma ASTM A228, sin verificación mediante espectrometría de emisión sobre el lote específico empleado.

Finalmente, el estudio se centró en la evaluación de la dureza y la microestructura, sin abarcar otras propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, la tenacidad al impacto o el comportamiento a la fatiga, las cuales se proponen como líneas de investigación complementarias.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del material en estado base

Previo al análisis del efecto producido por los distintos medios de enfriamiento, se establece la línea base del estudio mediante la caracterización del acero ASTM A228 en su estado base. Esta caracterización comprende la composición química del material, la dureza superficial inicial y la microestructura de partida, estos parámetros que constituyen la referencia frente a la cual se contrastan los resultados obtenidos para los grupos sometidos a el tratamiento térmico de temple y revenido.

3.1.1. Composición química del acero ASTM A228

La composición química nominal establecida por la norma ASTM A228/A228M se presenta en la Tabla 7, e incluye los elementos químicos que determinan tanto las propiedades mecánicas iniciales como la respuesta del material a los tratamientos térmicos posteriores.

Tabla 8. Composición química nominal del acero ASTM A228.

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P máx. (%)	S máx. (%)
0,70 – 1.00	0.20 – 0.60	0.10 – 0.30	0.025	0.030

El contenido de carbono comprendido entre 0.70 y 1.00 %, clasifica al material como un acero de alto carbono, condición que resulta determinante para la formación de microconstituyentes de elevada dureza durante los procesos de temple, así como para la presencia de cementita como fase estable en el estado recocido o normalizado. El manganeso, presente en proporciones entre 0.20 y 0.60%, llega a tomar papel en la formación de martensita al aumentar la velocidad crítica de enfriamiento permitida. El silicio actúa como desoxidante durante la elaboración, lo que genera resistencia a la matriz ferrítica. Los contenidos máximos de fósforo y azufre se mantienen restringidos para evitar la fragilización y segregaciones perjudiciales en el material.

3.1.2. Dureza inicial del material

Los resultados del ensayo de dureza Rockwell C aplicado a las cinco probetas del grupo en estado base, se presentan en la Tabla 8. Para cada probeta se efectuaron cinco

mediciones distribuidas a lo largo de la zona previamente limada y plana, de las cuales se calculó el valor promedio como dato representativo de la dureza de la probeta.

Tabla 9. Valores de dureza Rockwell C del material en estado base (HRC).

Medición	A228-B-01	A228-B-02	A228-B-03	A228-B-04	A228-B-05
Medida 1	41	40	40	45	42
Medida 2	45	42	42	44	42
Medida 3	43	41	41	43	45
Medida 4	44	41	40	42	43
Medida 5	45	42	42	44	44
Promedio (HRC)	43.6	41.2	41.0	43.6	43.2

La Figura 13, presenta la distribución de los promedios de dureza por probeta del grupo en estado base, mediante un gráfico de barras con línea de tendencia, que permite visualizar la dispersión de los valores respecto al promedio del grupo.

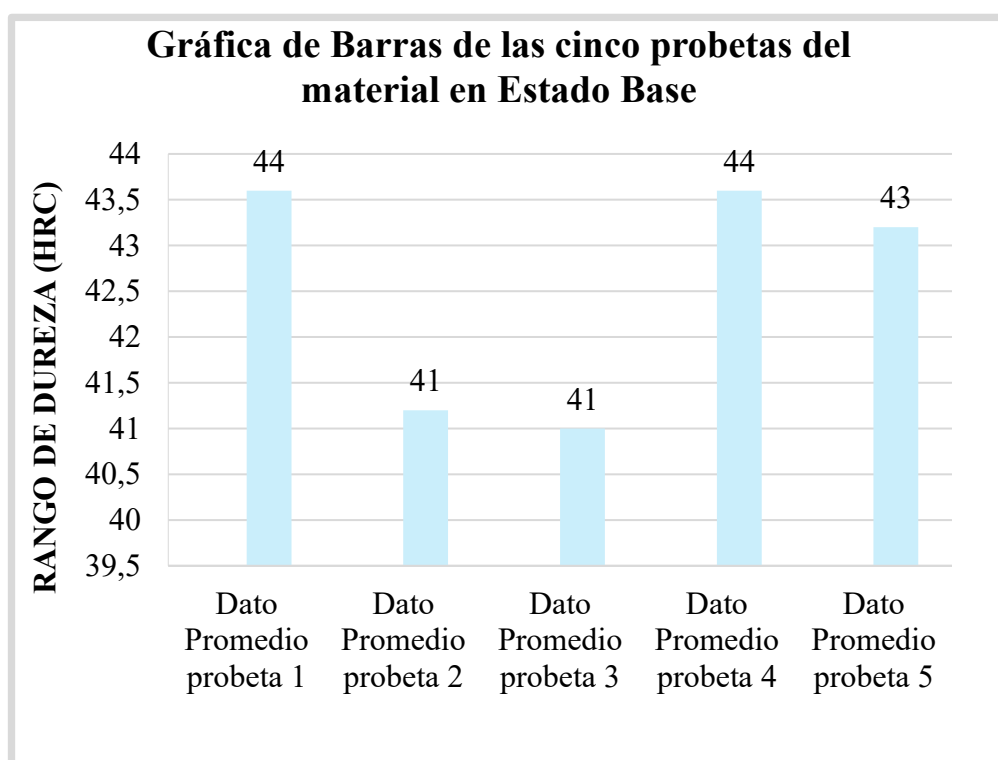


Figura 13. Gráfica de barras de las cinco probetas del material en estado base.

Los promedios de dureza que se obtuvieron para cada probeta del grupo en estado base se ubican en un rango comprendido entre 41.0 HRC y 43.6 HRC, lo que evidencia una notable homogeneidad en las propiedades mecánicas del material a lo largo del lote suministrado. La dureza promedio total del grupo, calculada como el promedio aritmético de los cinco valores representativos por probeta, se establece en 42.52 HRC. Este valor es coherente con el rango especificado por el fabricante para el acero ASTM A228 en condición trefilada, comprendido entre C41 y C60 en escala Rockwell C [54], y refleja el endurecimiento por deformación adquirido durante el proceso de trefilado en frío al que es sometido el alambre en su fabricación.

3.1.3. Microestructura del material en estado base

La caracterización microestructural del material en estado base se efectuó sobre dos muestras metalográficas, obtenidas a partir de las secciones transversal y longitudinal del alambre, con el propósito de evaluar la microestructura desde ambas orientaciones y verificar el efecto del proceso de trefilado sobre la distribución de las fases.

- **Sección transversal**

La microestructura de la sección transversal del material en estado base, observada al aumento de 500X mediante el microscopio metalográfico invertido Radical RMM-1, se presenta en la Figura 14. En la micrografía se distinguen dos fases principales diferenciadas por su tonalidad: zonas claras correspondientes a la matriz ferrítica y zonas oscuras correspondientes a la cementita, ambas distribuidas de manera homogénea sobre la superficie analizada.

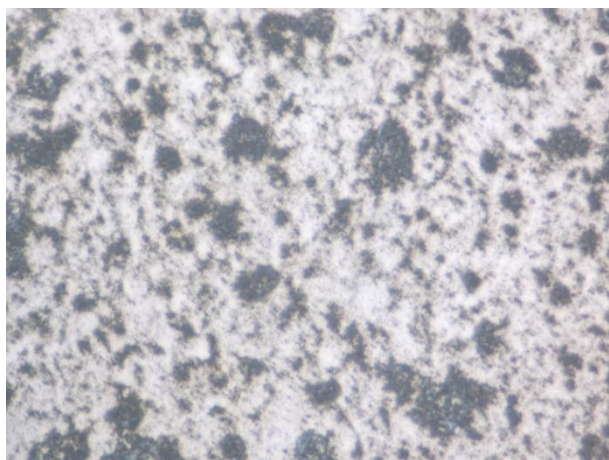


Figura 14. Microestructura de la sección transversal del acero ASTM A228 en estado base (500X, ataque con Nital al 3%, 7s).

Con el propósito de cuantificar la proporción de cada fase presente en la microestructura, la micrografía se procesó mediante un software de análisis metalográfico. El procesamiento se efectuó mediante umbralización por niveles de gris, identificando las regiones oscuras como cementita y las regiones claras como ferrita. La imagen resultante del análisis se presenta en la Figura 15, donde la fase cementítica aparece coloreada en azul y la fase ferrítica en rojo, permitiendo una visualización clara de la distribución espacial de cada microconstituyente.

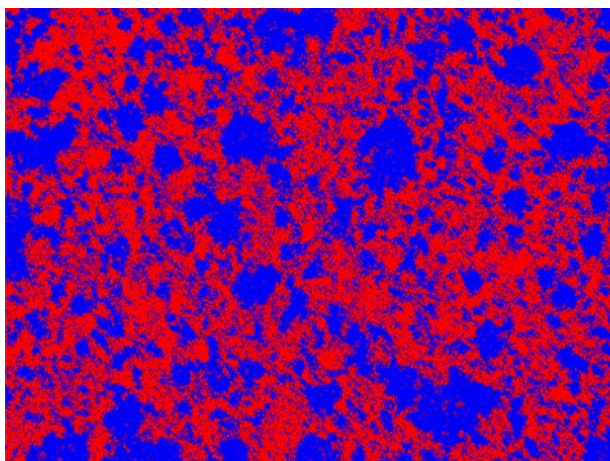


Figura 15. Imagen procesada de la microestructura del material en estado base, mediante el software de análisis metalográfico.

Los porcentajes de cada microconstituyente cuantificados por el software se presentan en la Figura 16. De igual forma en la Tabla 9, los resultados evidencian una proporción ligeramente predominante de ferrita respecto a la cementita, con una distribución cercana a la equiatómica entre ambas fases.

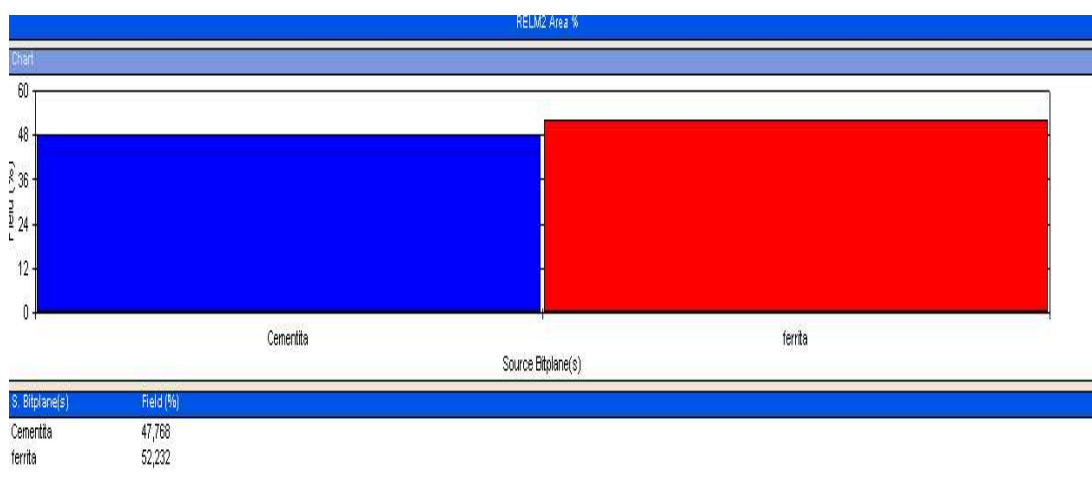


Figura 16. Microconstituyentes del material en estado base (azul: cementita, rojo: ferrita).

Cabe precisar que las regiones claras cuantificadas como ferrita corresponden mayoritariamente a la fase ferrítica integrante de la perlita, dado que el espaciamiento interlaminar fino del acero trefilado no resulta plenamente resoluble mediante microscopía óptica a 500X. En consecuencia, los porcentajes reportados en la Tabla 9, deben interpretarse como proporciones aparentes de fases claras y oscuras, compatibles con una microestructura perlítica propia de un acero alto carbono.

Tabla 10. Porcentaje de microconstituyentes del material en estado base.

Microconstituyente	Porcentaje (%)
Cementita (Fe_3C)	47.768
Ferrita ($\alpha\text{-Fe}$)	52.232
Total	100.00

Desde el punto de vista morfológico, la microestructura del estado base presenta una distribución finamente entremezclada de microconstituyentes aparentes compatibles con cementita y ferrita, fases que en su conjunto conforman una estructura perlítica característica del acero alto carbono en condición trefilada. Las zonas claras corresponden a la Ferrita ($\alpha\text{-Fe}$), solución sólida de carbono en hierro de estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo y de menor dureza relativa. La proporción cuantificada de 47.77% de cementita resulta superior a la esperada para un acero eutectoide (12% aproximadamente según el diagrama hierro-carbono), lo cual confirma el carácter hipereutectoide del acero ASTM A228, donde el exceso de carbono respecto al 0.77% eutectoide se presenta como cementita proeutectoide formada en los límites del grano, además de la cementita constituyente de la perlita.

- **Sección Longitudinal**

Complementariamente al análisis de la sección transversal, se observó la microestructura longitudinal del alambre como dato cualitativo visual, el cual evidencia el efecto del proceso de trefilado en frío sobre la distribución de los granos. La micrografía correspondiente se presenta en la Figura 17.

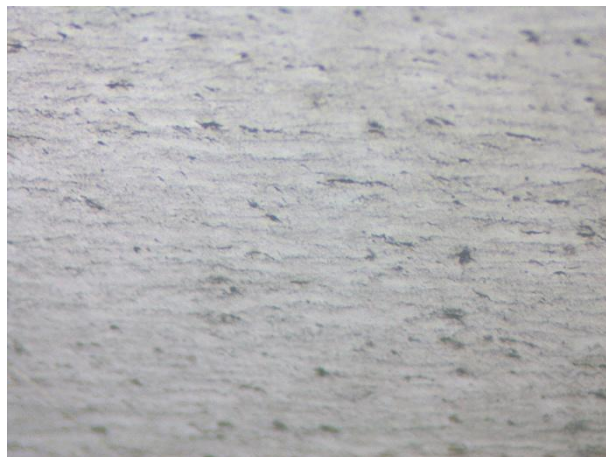


Figura 17. Microestructura de la sección longitudinal del acero ASTM A228 en estado base (500X, ataque con Nital a 3%, 7s).

En la sección longitudinal se distingue claramente la orientación preferencial de las fases, las cuales aparecen alargadas y alineadas en la dirección del eje del alambre. Este alineamiento confirma la condición del trefilado frío del material, proceso mediante el cual las colonias de perlita, originalmente equiaxiales, son deformadas mecánicamente y orientadas en la dirección de aplicación de la fuerza de trefilado. La textura morfológica observada justifica los valores de dureza obtenidos en el ensayo Rockwell C, ya que la deformación plástica acumulada durante su proceso de fabricación introduce un endurecimiento por deformación que incrementa significativamente la resistencia mecánica respecto a la condición recocida del material.

La caracterización integral del material en estado base establece de esta manera la línea base del estudio, contra la cual se contrastarán los efectos producidos por los tres medios de enfriamiento empleados en el tratamiento térmico de temple. La condición de partida queda establecida por una dureza promedio de 42.52 HRC y una microestructura aparentemente compuesta por aproximadamente 47.77 % de cementita y 52.23 % de ferrita, con orientación preferencial paralela al eje longitudinal del alambre.

3.2. Resultados del ensayo de dureza Rockwell

Tras haber establecido la línea base del material en estado base, se procedió a evaluar la dureza superficial de los grupos sometidos al tratamiento térmico de temple, empleado los tres medios de enfriamiento contemplados en el diseño experimental:

aire, aceite SAE 20W50 y agua. Los resultados que se obtuvo, se presentan en orden creciente con respecto a la severidad del medio de enfriamiento, llegando a influir en la verificación progresiva del efecto que la velocidad de extracción ejerce sobre la dureza final del acero. Para cada grupo, se reportan las cinco mediciones obtenidas por probeta, los promedios individuales y el promedio total del grupo.

3.2.1. Dureza del material templado en aire

El primer grupo analizado corresponde al material sometido al tratamiento térmico de temple con enfriamiento al aire, considerando como el medio de menor severidad entre los empleados en el estudio. Los resultados de las mediciones de dureza Rockwell C efectuadas sobre las cinco probetas del grupo se presentan en la Tabla 10.

Tabla 11. Valores de dureza Rockwell C del material templado en aire (HRC).

Medición	A228-A-01	A228-A-02	A228-A-03	A228-A-04	A228-A-05
Medida 1	35	29	29	30	29
Medida 2	30	27	28	31	31
Medida 3	32	30	29	29	30
Medida 4	30	32	30	29	29
Medida 5	34	31	29	30	29
Promedio (HRC)	32.2	29.8	29	29.8	29.6

El análisis individual de las probetas, evidencia un comportamiento particular en la probeta A228-A-01, cuya dureza promedio de 32.2 HRC resulta superior al resto del grupo. Esta diferencia se atribuye a una posible variación local en la velocidad de enfriamiento durante la extracción de la probeta del horno. Las probetas A228-A-02, A228-A-04 y A228-A-05 presentan promedio prácticamente equivalentes, comprendidos entre 29.6 y 29.8 HRC, lo que refleja una elevada homogeneidad en la respuesta del tratamiento térmico cuando las condiciones operativas se mantienen estables. La probeta A228-A-03 registra el menor valor del grupo con 29.0 HRC, dentro del rango de los demás promedios de las probetas de este grupo.

La Figura 18, presenta la distribución de los promedios de dureza por probeta del grupo templado en aire mediante un gráfico de barras con línea de tendencia, lo que permite visualizar la dispersión de los valores respecto al promedio del grupo.

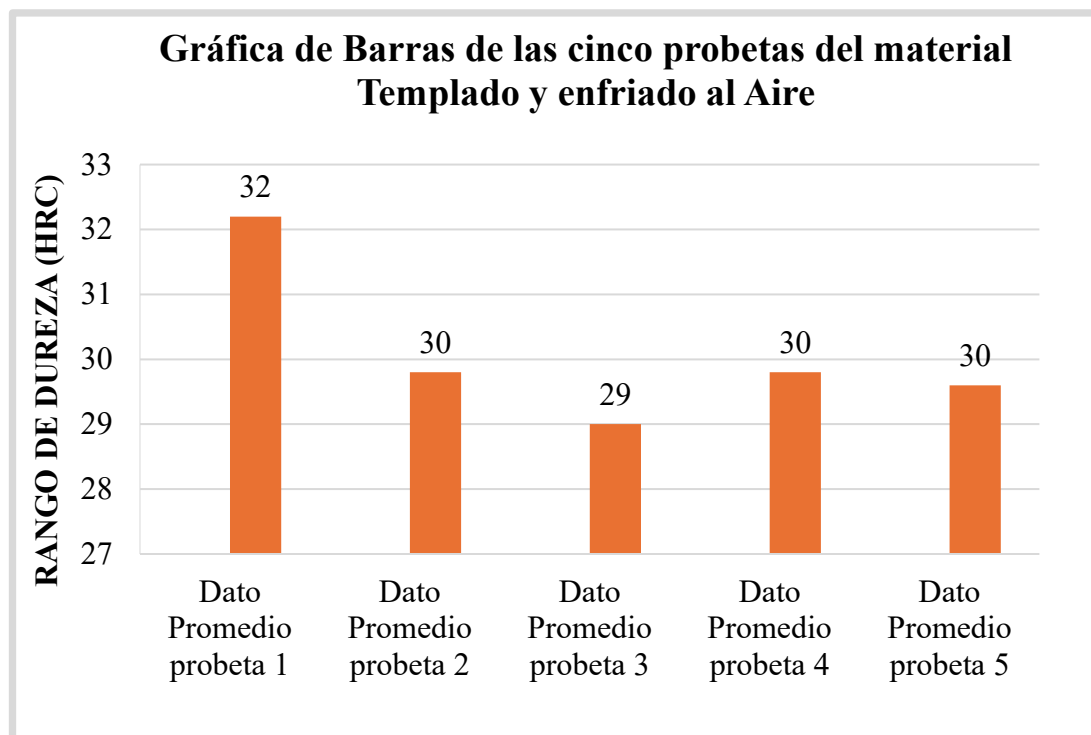


Figura 18. Gráfica de barras de las cinco probetas del material templado y enfriado al aire.

El promedio total del grupo, calculando a partir de los cinco valores representativos de las probetas, se establece en 30.8 HRC. Este resultado es notablemente inferior al valor de dureza del material en estado base, que se indicó que presentaba 42.53 HRC. Este comportamiento, que a primera llega a parecer contradictorio con el propósito de un tratamiento térmico de endurecimiento, encuentra explicación en las particularidades metalúrgicas del acero ASTM A228 en su condición de adquisición. El material en estado base es un alambre trefilado en frío que posee un endurecimiento por deformación, adquirido durante el proceso de conformado mecánico; al calentarlo a 803°C, temperatura propia de la región austenítica del diagrama hierro-carbono, se produce un fenómeno de recristalización, el cual llega a eliminar las dislocaciones acumuladas y la estructura deformada, característica del trefilado. En consecuencia, el material templado al aire pierde el endurecimiento por deformación sin compensarlo mediante endurecimiento por transformación martensítica, resultando en una dureza inferior a la del estado base.

3.2.2. Dureza del material templado en aceite

El segundo grupo elevado corresponde al material templado en aceite Forcelube Racing Oil SAE 20W50, medio de severidad intermedia entre el aire y el agua. La Tabla 11, presenta los valores de dureza Rockwell C, obtenidos para las cinco probetas del grupo.

Tabla 12. Valores de dureza Rockwell C del material templado en aceite (HRC).

Medición	A228-AC-01	A228-AC-02	A228-AC-03	A228-AC-04	A228-AC-05
Medida 1	52	48	55	55	50
Medida 2	48	53	54	52	48
Medida 3	50	49	53	54	50
Medida 4	51	50	52	55	49
Medida 5	50	51	51	54	51
Promedio (HRC)	50.2	50.2	53	54	49.6

El análisis por probeta revela un comportamiento ascendente progresivo en las tres primeras probetas, con promedios de 50.2, 50.2 y 53.0 HRC, alcanzado el valor máximo del grupo en la probeta A228-AC-04 con 54.0 HRC. La probeta A228-AC-05 presenta una ligera disminución hasta 49.6 HRC, lo que constituye el valor mínimo del grupo. La dispersión observada entre el valor máximo de 54.0 HRC y el mínimo de 49.6 HRC asciende 4.4 unidades en la escala Rockwell C, dispersión que resulta superior a la registrada en cada grupo templado en aire. Esta variabilidad se atribuye a la complejidad del temple en aceite, donde la formación de una capa de vapor en la superficie de la probeta durante los primeros instantes del contacto con el medio puede generar variaciones locales en la transferencia de calor, afectando la uniformidad de la transformación martensítica.

La distribución gráfica de los promedios de dureza del grupo templado en aceite se presenta en la Figura 19, donde se aprecia la tendencia general ascendente con un descenso final en la última probeta del grupo.

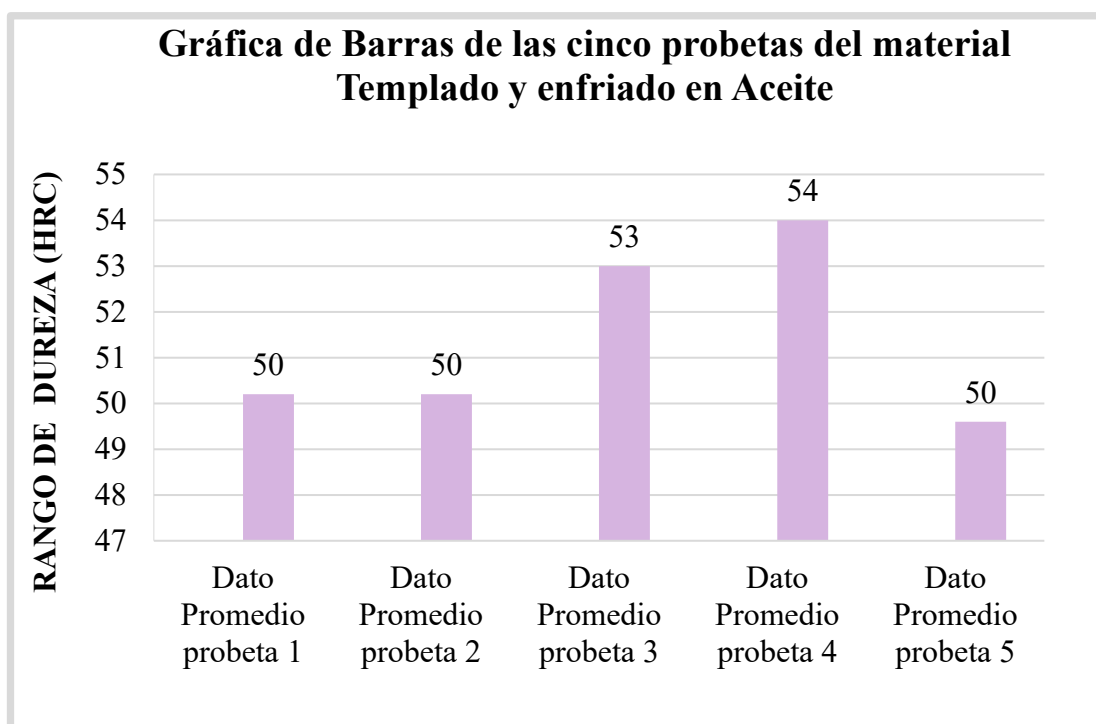


Figura 19. Gráfica de barras de las cinco probetas del material templado y enfriado en aceite.

El promedio total del grupo templado en aceite se establece en 51.40 HRC, valor que representa un incremento significativo de 21.32 unidades respecto al grupo templado en aire y de 8.88 unidades respecto al material en estado base. Este aumento sustancial de la dureza confirma que la velocidad de enfriamiento proporcionada por el aceite resulta suficiente para superar la velocidad crítica de transformación martensítica del acero ASTM A228.

3.2.3. Dureza del material templado en agua

El tercer grupo evaluado corresponde al material templado en agua, medio considerado de mayor severidad entre los empleados en el estudio, debido a su elevada capacidad de extracción de calor. Los resultados del ensayo de dureza Rockwell C aplicado a las cinco probetas del grupo se presentan en la Tabla 12.

Tabla 13. Valores de dureza Rockwell C del material templado en agua (HRC).

Medición	A228-AC-01	A228-AC-02	A228-AC-03	A228-AC-04	A228-AC-05
Medida 1	58	59	64	61	64
Medida 2	59	62	59	58	62
Medida 3	56	64	62	57	58
Medida 4	60	59	64	62	64
Medida 5	62	62	63	63	62
Promedio (HRC)	59	61.2	62.4	60.2	62

El análisis individual de las probetas del grupo templado en agua evidencia los mayores valores de dureza obtenidos en todo el estudio. La probeta A228-AG-01 registra el menor promedio del grupo con 59.0 HRC, mientras que la probeta A228-AG-03, alcanza el valor máximo de 62.4 HRC. Las probetas A228-AG-02, A228-AG-04 y A228-AG-05 presentan valores intermedios de 61.2, 60.2 y 62.0 HRC, respectivamente. La dispersión entre los valores extremos del grupo es de 3.4 unidades en la escala Rockwell C, dispersión inferior a la observada en el grupo templado en aceite y comparable a la del grupo templado en aire, lo que indica una elevada homogeneidad en la respuesta al tratamiento térmico bajo condiciones de enfriamiento severo.

La Figura 20, presenta la distribución gráfica de los promedios de dureza del grupo templado en agua, donde se observa la tendencia general de elevada dureza con variaciones leves entre las probetas.

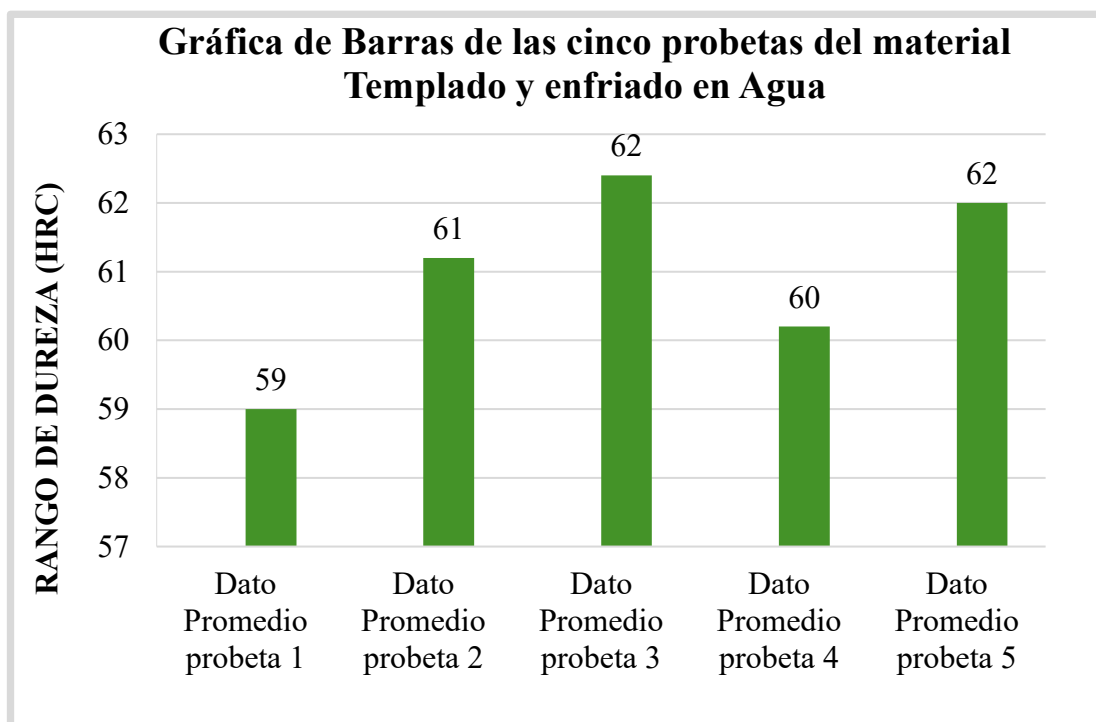


Figura 20. Gráfica de barras de las cinco probetas del material templado y enfriado en agua.

El promedio total del grupo templado en agua se establece en 60.96 HRC, el valor que constituye el mayor de los obtenidos en el estudio. Este resultado representa un incremento de 30.88 unidades respecto al grupo templado en aire, de 9.56 unidades respecto al grupo templado en aceite, y de 18.44 unidades respecto al material en estado base. La magnitud de este incremento confirma que la velocidad de enfriamiento proporcionada por el agua a temperatura ambiente supera considerablemente la velocidad crítica requerida para la transformación martensítica del acero ASTM A228, generando la máxima fracción volumétrica de martensita posible para las condiciones experimentales aplicadas. Por otra parte, los valores obtenidos resultan coherentes con el rango superior de dureza especificado por el fabricante para el acero ASTM A228, que establece un límite de C60 en escala Rockwell C, demostrando que el tratamiento térmico aplicado aprovecha plenamente la templabilidad del material.

3.3. Análisis comparativo de dureza

Una vez presentados los resultados individuales de cada grupo experimental, en la sección anterior, se procede al análisis comparativo de los valores promedio de dureza obtenidos para el material en estado base y los tres grupos sometidos a tratamiento

térmico de temple. Este análisis permite establecer cuantitativamente la influencia que ejerce la severidad del medio de enfriamiento sobre la dureza resultante del acero ASTM A228, así como identificar las tendencias generales del comportamiento mecánico del material frente a las distintas condiciones experimentales evaluadas.

En la Tabla 13, se presentan de manera consolidada los promedios totales de dureza obtenidos en los cuatro grupos del estudio, acompañados de la variación numérica que cada grupo templado registra respecto al valor del material en estado base, considerado como referencia o línea base del análisis.

Tabla 14. Comparación de los valores promedio de dureza Rockwell C entre los cuatro grupos experimentales.

Grupo	Medio de enfriamiento	Dureza promedio (HRC)	Variación respecto al estado base (HRC)
Estado Base	—	42.52	—
A228 - A	Aire	30.88	-12.44
A228 - AC	Aceite SAE20W50	51.40	+8.88
A228 - AG	Agua	60.96	+18.44

La información presentada en la Tabla 13, evidencia un comportamiento claramente diferenciado entre los tres medios de enfriamiento evaluados. El grupo templado en aire base, mientras que los grupos templados en aceite y en agua registran incrementos de 8.88 y 18.44 unidades, respectivamente. Esta diferenciación permite confirmar que el medio de enfriamiento empleado durante el temple ejerce una influencia significativa sobre la dureza final del material, y que dicha influencia depende directamente de la capacidad del medio de enfriamiento.

La Figura 21, presenta la visualización gráfica de los cuatro promedios de dureza mediante un diagrama de barras complementado con la línea de tendencia, lo que permite apreciar de manera inmediata el ordenamiento de los valores y la magnitud de las diferencias entre los grupos.

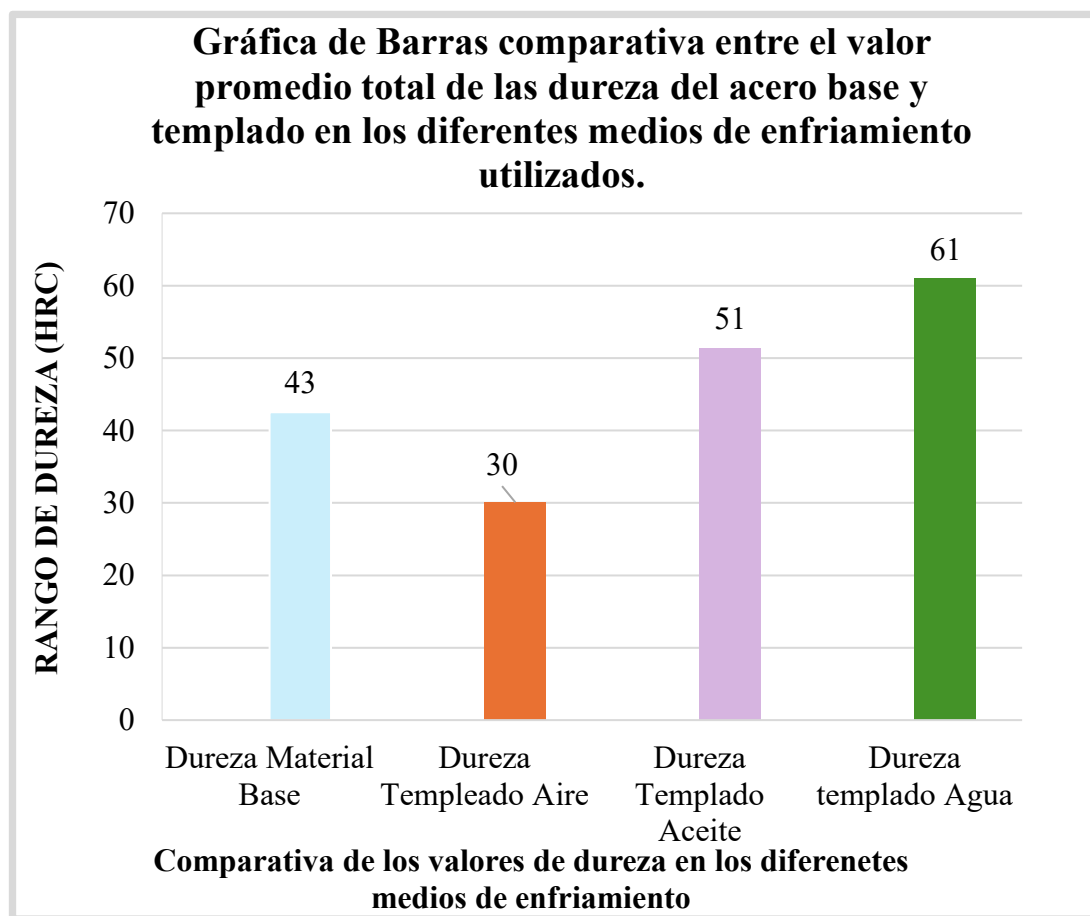


Figura 21. Gráfica comparativa de los valores promedio de dureza del acero ASTM A228 en estado base y templado en los tres medios de enfriamiento.

El análisis del comportamiento general evidencia una correlación directa entre la severidad del medio de enfriamiento y la dureza obtenida en los grupos templados. El agua, considerada como el medio de mayor severidad debido a su elevada capacidad calorífica específica y a la formación limitada de capa de vapor durante el contacto con la probeta caliente, proporciona la máxima velocidad de extracción de calor entre los medios evaluados y, consecuentemente, genera la mayor dureza del estudio con un valor de 60.96 HRC. El aceite SAE20W50, de severidad intermedia debido a su mayor viscosidad y a la formación más prolongada de la capa de vapor en la superficie de la probeta durante el temple, proporciona una velocidad de enfriamiento inferior a la del agua, pero superior a la del aire, generando una dureza intermedia de 51.40 HRC.

Finalmente, el aire, considerado como el medio de menor severidad por su baja capacidad calorífica y por el carácter principalmente convectivo de la transferencia de

calor, proporciona la menor velocidad de enfriamiento y genera el valor de dureza más bajo del estudio con 30.08 HRC.

Un resultado particularmente relevante del análisis comparativo es la diferencia significativa observada entre el grupo templado en aire y el material en estado base. Mientras que los grupos templados en aceite y en agua superan en dureza al material de referencia, el grupo templado en aire registra una dureza inferior en 12.44 unidades respecto al estado base. Este comportamiento se atribuye a la pérdida del endurecimiento por deformación que el material trefilado en frío posee en su condición base, el cual se elimina durante el calentamiento a la temperatura de austenización debido a los fenómenos de recristalización que ocurren a temperaturas elevadas. Una vez eliminado el endurecimiento previo por deformación, la velocidad de enfriamiento proporcionada por el aire resulta insuficiente para compensar dicha pérdida mediante mecanismos alternativos de endurecimiento, resultando en una dureza neta inferior al del material en estado base. Sin embargo, las velocidades de enfriamiento proporcionadas por el aceite y el agua sí logran activar mecanismos de endurecimiento que superan ampliamente el endurecimiento por el cual ha sido elaborado el material previamente, generando incrementos de dureza significativos.

La simple aplicación de un tratamiento térmico no garantiza por sí misma el endurecimiento del material, sino que la selección correcta del medio de enfriamiento resulta determinante para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas; y esto se puede comprobar con la diferencia de 30.88 unidades en la escala Rockwell C entre los grupos templados en aire y en agua, siendo esto un hallazgo significativo del presente estudio. Asimismo, la diferencia de 9.56 unidades entre los grupos templados en aceite y en agua confirma que, dentro del rango de medios capaces de inducir endurecimiento, la magnitud del efecto continúa siendo dependiente de la severidad del medio empleado.

3.4. Análisis microestructural

El análisis microestructura permite identificar y cuantificar las fases presentes en cada uno de los grupos experimentales, estableciendo así la correlación directa entre las transformaciones de fase ocurridas durante el tratamiento térmico y los valores de dureza reportados en las secciones precedentes. Las observaciones se efectuaron mediante el microscopio metalográfico invertido Radical RMM-1, y la cuantificación

porcentual de los microconstituyentes se realizó empleando un software de análisis metalográfico que diferencia las fases mediante umbralización por niveles de gris sobre las micrografías capturadas.

Si bien las micrografías fueron registradas a tres aumentos diferentes (100X, 200X, 500X) para cada grupo experimental, el análisis y la cuantificación se desarrollaron de manera uniforme al aumento 500 X. Esta decisión se fundamenta en que los aumentos inferiores no permitieron una visualización óptima de los microconstituyentes en los grupos templados en aceite y agua, dada la finura característica de las estructuras formadas por el temple severo del acero al alto carbono. Las micrografías complementarias a 100X y 200X pueden verificarse en los anexos del presente trabajo.

3.4.1. Microestructura del material templado en aire

Tras el tratamiento térmico aplicado al grupo enfriado en aire, la microestructura del acero experimentó transformaciones significativas respecto a la condición de partida. La Figura 22, y Figura 23, presentan la micrografía obtenida y la correspondiente imagen procesada respectivamente, las cuales permiten observar la diferenciación cromática de las fases identificadas.

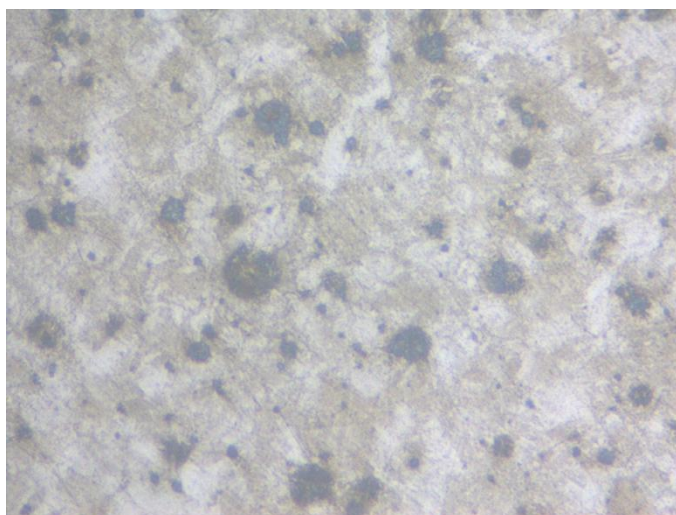


Figura 22. Microestructura del acero ASTM A228 templado en aire (500X, ataque con Nital a 3%, 6s).

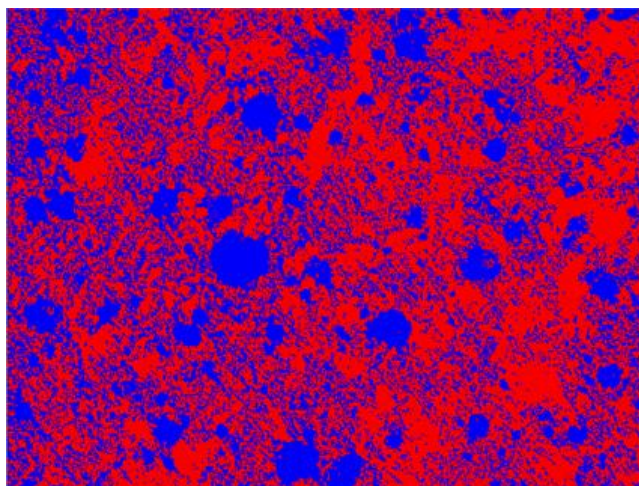


Figura 23. Imagen procesada de la microestructura del material templado en aire mediante software de análisis metalográfico.

La cuantificación de los microconstituyentes identificados en el grupo templado en aire se presenta en la Figura 24, y en la Tabla 14, respectivamente.

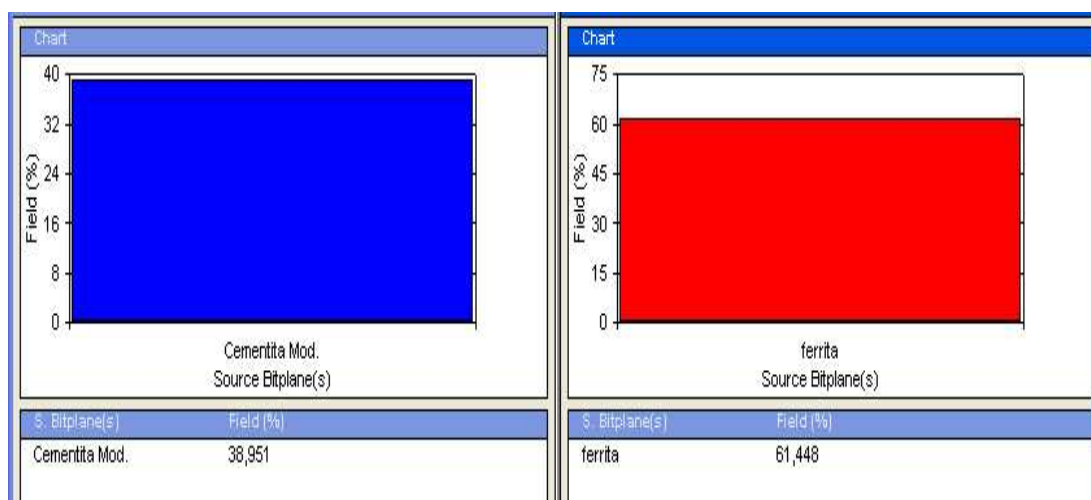


Figura 24. Microconstituyentes del material templado en aire (azul: cementita globulizada, rojo: ferrita).

Tabla 15. Porcentaje de microconstituyentes del material templado en aire.

Microconstituyente	Porcentaje (%)
Cementita globulizada	38.951
Ferrita (α -Fe)	61.448
Total	100.00

La microestructura del material enfriado al aire presenta partículas de cementita globulizada distribuidas sobre una matriz ferrítica, producto de la transformación difusional de la austenita durante el enfriamiento lento. A diferencia de la perlita laminar del estado base, el enfriamiento al aire favorece la tendencia de la cementita a adoptar una morfología globular, configuración que ofrece la menor resistencia de deformación y explica el menor valor de dureza registrado en este grupo. Cabe precisar que, dada la resolución de la microscopia óptica a 500X, las proporciones reportadas corresponden a fases claras y oscuras aparentes, compatibles a una matriz ferrítica y cementita dispersa.

El fenómeno de transformación difusional, característico de enfriamientos lentos, permite la nucleación y crecimiento de las láminas alternadas de ferrita y cementita que conforman la perlita, las cuales presentan un grado de refinamiento mayor que el observado en el estado base, debido a la velocidad de enfriamiento moderadamente superior a la del enfriamiento de equilibrio.

El término cementita globulizada aplicado en este grupo hace referencia a la cementita resultante del proceso de descomposición austenítica controlada, la cual presenta una morfología más globular y dispersa que la cementita laminar continúa observada en el estado base. La cuantificación obtenida indica una reducción del porcentaje de cementita del 47.77% del estado base a 38.95% tras el tratamiento, acompañada por un incremento correspondiente de ferrita del 52.23% al 61.45%. Este reordenamiento de fases, combinado con la pérdida del endurecimiento por deformación del trefilado original, explica metalúrgicamente el valor de dureza de 30.08 HRC obtenido para este grupo, valor inferior al del material de partida pese a haber sido sometido a tratamiento térmico.

3.4.2. Microestructura del material templado en aceite

El temple en aceite SAE 20W50, al proporcionar una velocidad de enfriamiento intermedia capaz de superar la velocidad crítica de transformación martensítica del acero, produce cambios microestructurales sustancialmente distintos a los del enfriamiento al aire. La Figura 25, y la Figura 26, muestran la micrografía y la imagen procesada para el análisis de fases de este grupo, respectivamente.

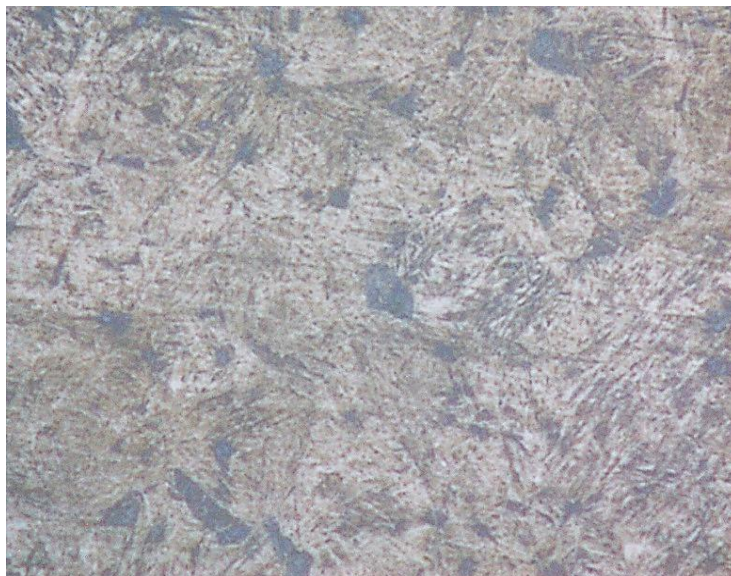


Figura 25. Microestructura del acero ASTM A228 templado en aceite (500X, ataque con Nital a 3%, 4s).

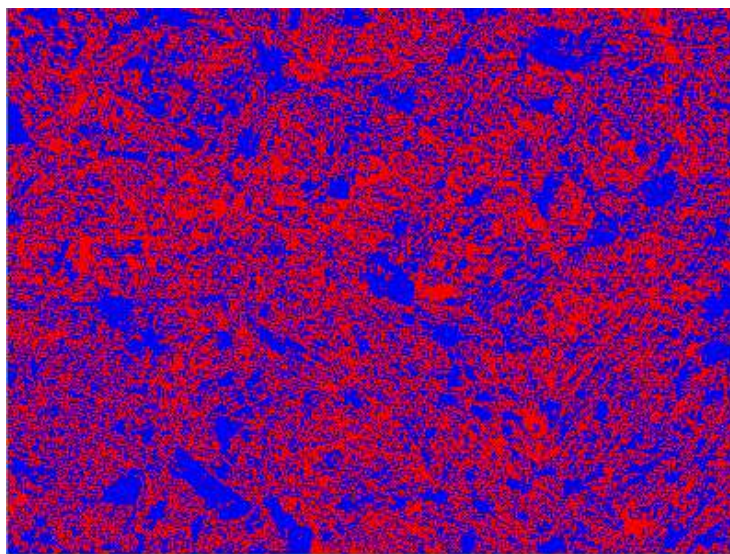


Figura 26. Imagen procesada de la microestructura del material templado en aceite mediante software de análisis metalográfico.

Los porcentajes de las fases cuantificadas para este grupo se reportan en la Figura 27, y en la Tabla 15, respectivamente.

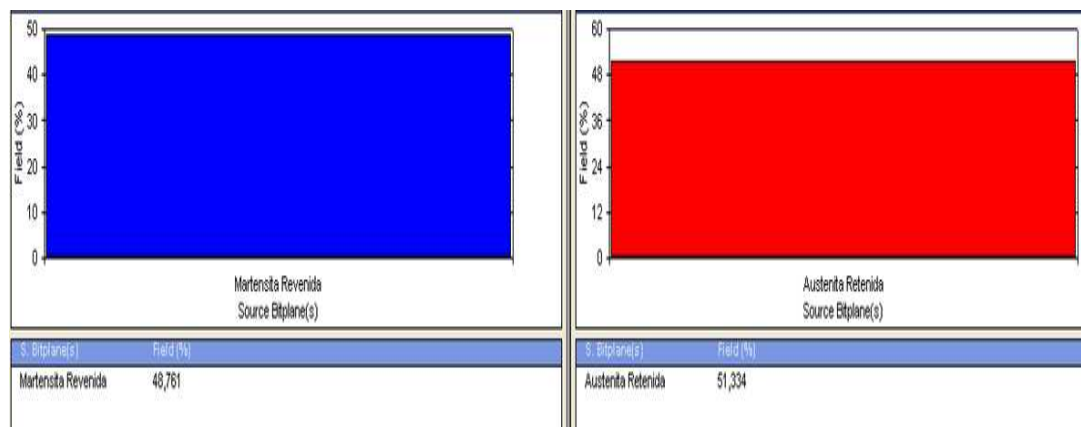


Figura 27. Microconstituyentes del material templado en aceite (azul: martensita revenida, rojo: austenita retenida*).

Tabla 16. Porcentaje de microconstituyentes del material templado en aceite.

Microconstituyente	Porcentaje (%)
Martensita revenida	48.761
Austenita retenida*	51.334
Total	100.00

“*Fase identificada mediante análisis digital de imagen sobre microscopía óptica; su confirmación cristalográfica requeriría técnicas complementarias como difracción de rayos X (DRX) o EBSD.”

En la micrografía se distingue una estructura compuesta por una red de agujas o láminas de martensita revenida, identificada como el microconstituyente predominante, junto con zonas de tonalidad clara y morfología más uniforme correspondientes al microconstituyente aparente compatible con austenita retenida. La martensita es una fase metaestable de naturaleza tetragonal centrada en el cuerpo, formada por transformación sin difusión durante el enfriamiento rápido de la austenita, en el cual los átomos de carbono quedan atrapados en posiciones intersticiales sobresaturadas, distorsionando la red cristalina y generando la elevada dureza característica de esta fase.

Adicional al temple, el revenido aplicado a 260°C durante 35 minutos transformó la martensita primaria en martensita revenida, configuración en la cual los átomos de

carbono comenzaron a difundir hacia precipitados submicroscópicos de carburos de transición, reduciendo parcialmente la tetragonalidad cristalina y aliviando las tensiones residuales generadas durante la transformación martensítica, si sacrificar significativamente la dureza.

El microconstituyente aparente compatible con austenita retenida, estimado en 51.33% mediante el análisis de imagen, corresponde a la fracción de austenita que no logró transformarse en martensita durante el temple debido a que la temperatura del fin de transformación martensítica (M_f) del acero ASTM A228, dado su elevado contenido de carbono, se encuentra por debajo de la temperatura ambiente. Como consecuencia, una porción significativa de la austenita queda atrapada en forma metaestable a temperatura ambiente, fenómeno particularmente acentuado en aceros al alto carbono templados en medios de severidad intermedia como el aceite, donde la velocidad de enfriamiento, aunque suficiente para activar la transformación martensítica, no logra forzar su completitud. La elevada proporción de austenita retenida posee una dureza significativamente inferior a la de la martensita revenida y actúa como factor reductor de la dureza global del material.

3.4.3. Microestructura del material templado en agua

El grupo templado en agua, sometido al medio de mayor severidad de enfriamiento del estudio, presenta la microestructura más refinada y de mayor dureza obtenida en la investigación. La Figura 28, y la Figura 29, muestran la micrografía original y la imagen procesada correspondientes a este grupo.

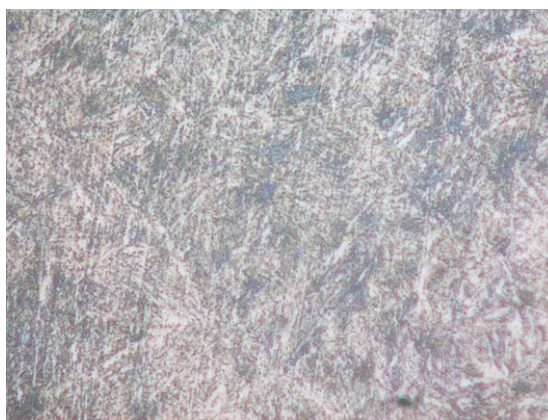


Figura 28. Microestructura del acero ASTM A228 templado en agua (500X, ataque con Nital a 3%, 3s)

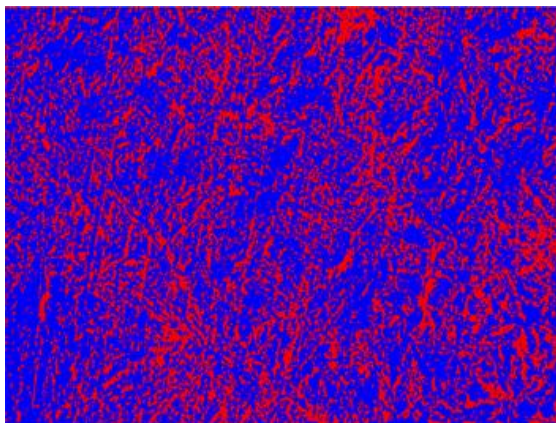


Figura 29. Imagen procesada de la microestructura del material templado en agua mediante software de análisis metalográfico

La Figura 30, y la Tabla 16, presenta los porcentajes de las fases cuantificadas en este grupo, respectivamente.

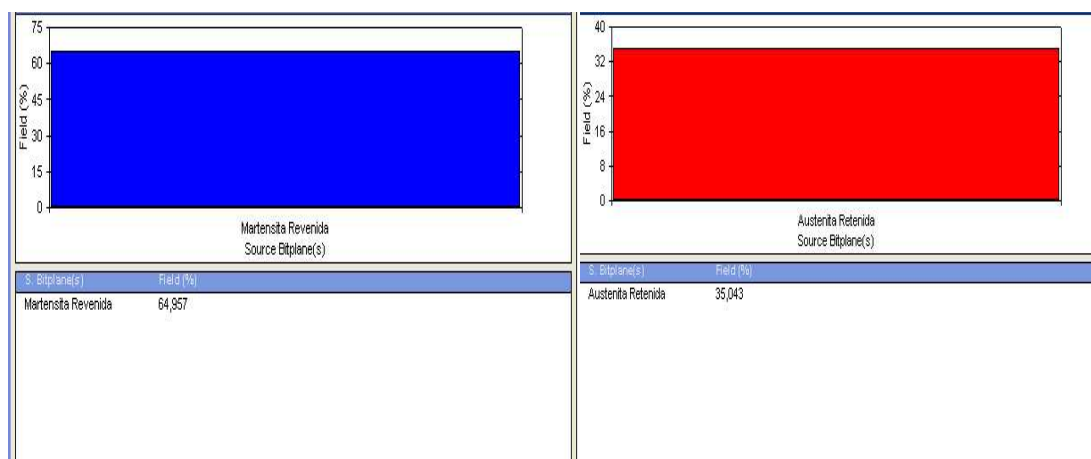


Figura 30. Microconstituyentes del material templado en agua (azul: martensita revenida, rojo: austenita retenida*)

Tabla 17. Porcentaje de microconstituyentes del material templado en agua

Microconstituyente	Porcentaje (%)
Martensita revenida	64.957
Austenita retenida*	35.043
Total	100.00

“*Microconstituyente aparente identificado por análisis de la imagen sobre microscopía óptica, ver nota en la sección 3.4.2. del presente documento.”

La micrografía exhibe una matriz densa y compacta compuesta por agujas martensíticas extremadamente delgadas y cortas, morfología notablemente más fina que la observada en el grupo templado en aceite. Esta refinación es consecuencia directa de la velocidad de enfriamiento más severa proporcionada por el agua, la cual superó holgadamente la velocidad crítica de transformación martensítica del acero ASTM A228 y permitió alcanzar la máxima fracción volumétrica de martensita posible para las condiciones experimentales aplicadas.

El revenido aplicado a 260°C favorece, según la teoría metalúrgica del tratamiento, la precipitación de carburos de transición a partir del carbono retenido en la martensita. Si bien esos precipitados son de escala submicroscópica y no resultan resolubles mediante microscopía óptica, su formación es coherente con el endurecimiento secundario y con la reducción de tensiones internas característicos de esta etapa, fenómeno ampliamente documentado en la literatura para aceros de alto carbono revenidos. La microestructura del material templado en agua está constituida predominantemente por martensita revenida, fase identificable por su morfología acicular fina y compacta, estimada en 64.96%, acompañada de un microconstituyente aparente compatible con austenita retenida, estimado en 35.04%. La mayor proporción de martensita y la menor presencia de la fase aparente de austenita retenida, en comparación con el grupo templado en aceite, son coherentes con la mayor severidad del medio de enfriamiento.

Esta diferencia se explica porque la mayor severidad del enfriamiento en agua proporciona una fuerza motriz térmica más elevada para la transformación martensítica, permitiendo que una proporción mayor de la austenita logre transformarse antes de alcanzar la temperatura ambiente.

La fracción de la fase aparente de austenita retenida que permanece en este grupo se localiza en los microconstituyentes blancos remanentes atrapados entre los paquetes de agujas martensíticas, y su presencia, aunque menor que el grupo templado en aceite, sigue siendo significativa debido a la inherente dificultad del acero al alto carbono para completar totalmente la transformación martensítica revenida fina y la reducida proporción de la aparente austenita retenida justifica directamente el valor máximo de dureza del estudio, registrado en 60.96 HRC para este grupo experimental.

3.5. Análisis comparativo de la microestructura

Tras la caracterización individual de la microestructura correspondiente a cada grupo experimental, se procede al análisis comparativo de los microconstituyentes identificados, con el propósito de evidenciar de manera integrada las transformaciones de fase producidas por los distintos medios de enfriamiento sobre el acero ASTM A228. Este análisis permite establecer un marco visual y cuantitativo unificado, a partir del cual se podrá vincular cada microestructura con los valores de dureza obtenidos y comprender de forma global el comportamiento metalúrgico del material frente a las condiciones experimentales aplicadas. La Tabla 17, consolida los porcentajes de los microconstituyentes principales y secundarios identificados en los cuatro grupos experimentales, organizados según el medio de enfriamiento empleado.

Tabla 18. Comparación de los porcentajes de microconstituyentes identificados en los cuatro grupos experimentales

Grupo experimental	Microconstituyente principal	Porcentaje (%)	Microconstituyente secundario	Porcentaje (%)
Estado base	Ferrita	52.23	Cementita	47.77
Templado en aire	Ferrita	61.45	Cementita globulizada	38.95
Templado en aceite	Austenita retenida	51.33	Martensita revenida	48.76
Templado en agua	Martensita revenida	64.96	*Austenita retenida	35.04

“*Microconstituyente aparente identificado, ver nota metodológica en la sección 3.4.2. del presente documento.”

La información consolidada, permite cuantificar unas transformaciones difusivas aparentes compatibles (ferrita y cementita en sus distintas morfologías), mientras que en los grupos templados en aceite y agua emergen las fases de martensita revenida y las fases aparentes compatibles típicas de transformación adiabática de austenita retenida. Esta transición revela el cambio en el mecanismo de transformación de fase activado en cada condición experimental, pasando de procesos controlados por difusión atómica a procesos sin difusión donde la transformación ocurre por

desplazamiento coordinado de los átomos en la red cristalina. Con el propósito de facilitar la observación visual directa de las diferencias morfológicas entre los grupos, la Figura 31, reúne las cuatro microestructuras al mismo aumento de 500X en una disposición matricial que permite la comparación inmediata entre las distintas condiciones experimentales.

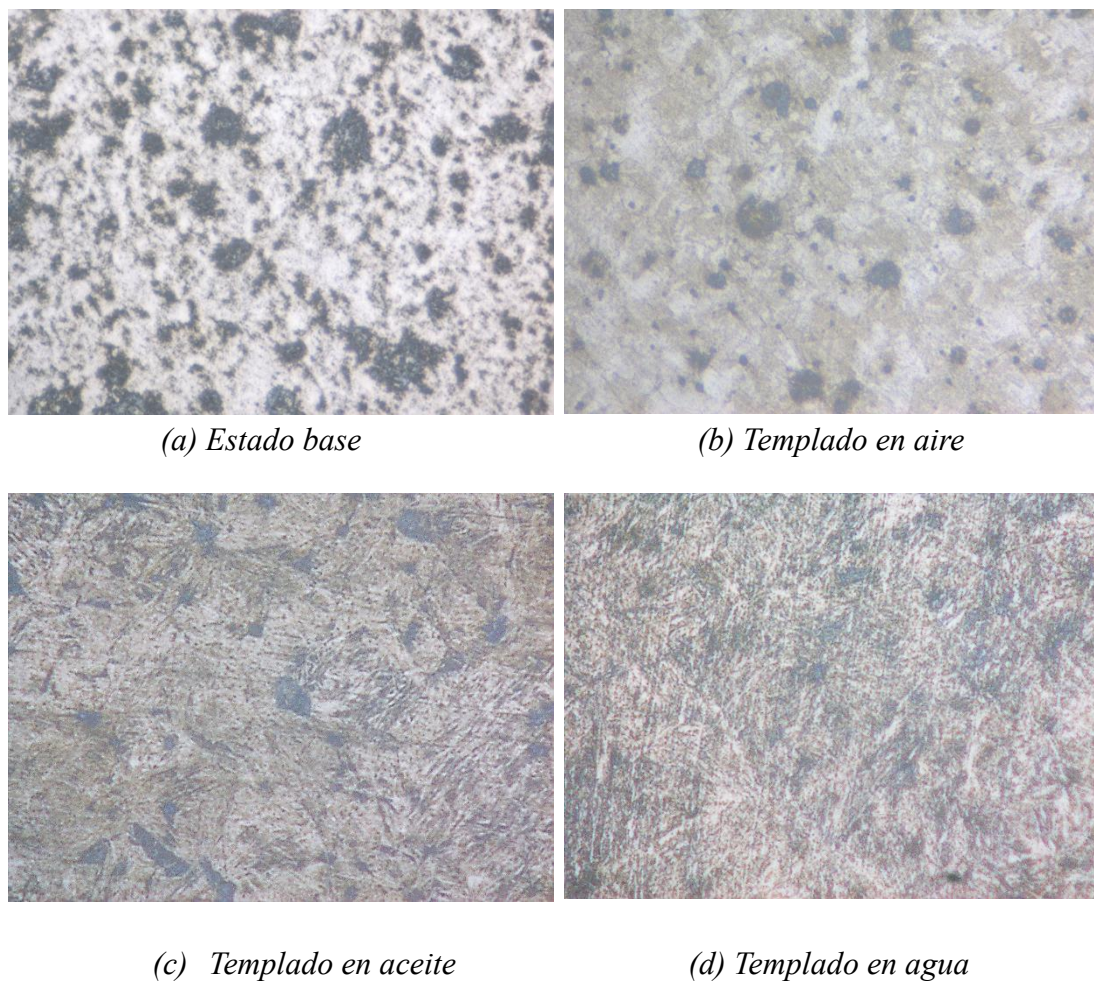


Figura 31. Comparación de las microestructuras del acero ASTM A228 a 500X: (a) Estado base, (b) Templado en aire, (c) Templado en aceite, (d) Templado en agua. Ataque con Nital 3%, 7s,6s,4s,3s.

La observación visual conjunta de las cuatro microestructuras revela diferencias morfológicas notorias entre los grupos. En la imagen (a) correspondiente al estado base, se aprecia una distribución finamente entremezclada de ferrita y cementita, con manchas oscuras dispersas que evidencian la presencia significativa de cementita propia del carácter hipereutectoide del acero. La imagen (b), correspondiente al

templado en aire, muestra una microestructura más homogénea y de tonalidad más clara, donde la cementita aparece como nódulos pequeños y dispersos en una matriz ferrítica predominante, evidenciando la descomposición difusiva controlada de la austenita durante el enfriamiento lento. La imagen (c), correspondiente al templado en aceite, presenta un cambio cualitativo radical en la morfología, donde se distingue una red de agujas martensíticas relativamente gruesas distribuidas en una matriz que contiene zonas claras del microconstituyente aparente de austenita retenida, reflejando el efecto del enfriamiento de severidad intermedia. Finalmente, la imagen (d), correspondiente al templado en agua, exhibe la microestructura más refinada del estudio, con agujas martensíticas significativamente más finas y compactas, junto con una menor proporción de zonas claras de la aparente fase de austenita retenida, lo cual concuerda con la mayor velocidad de enfriamiento aplicada.

Desde el punto de vista cuantitativo, la Tabla 18, permite identificar dos tendencias relevantes. La primera tendencia es la progresiva sustitución de las fases difusivas por fases martensíticas a medida que aumenta la severidad del medio de enfriamiento. El estado base y el grupo enfriado al aire conservan la combinación de microconstituyentes aparentes compatibles de ferrita-cementita característica de aceros enfriados en condiciones cercanas al equilibrio, mientras que los grupos templados en aceite y agua presentan la combinación del microconstituyente de martensita revenida y el aparente compatible de austenita retenida típica de aceros templados con velocidades de enfriamiento superiores a la velocidad crítica. La segunda tendencia es el aumento progresivo del porcentaje de martensita revenida y la reducción correspondiente de la aparente austenita retenida entre los grupos templados en aceite (48.76% de martensita) y en agua (64.96% de martensita). Esta variación de 16.20 puntos porcentuales en la proporción de martensita revenida resulta directamente atribuible a la diferencia de severidad entre ambos medios de enfriamiento, ya que la mayor extracción de calor proporcionada por el agua permite que una proporción mayor de la austenita logre transformarse en martensita antes de alcanzar la temperatura ambiente.

El comportamiento observado se enmarca en los principios generales de metalurgia de los aceros al alto carbono, donde la velocidad de enfriamiento durante el temple determina no solamente el tipo de microconstituyentes formados, sino que también, su

proporción relativa y su morfología característica. La presencia simultánea de martensita revenida y la aparente compatible de austenita retenida en los grupos templados en aceite y agua es un rango distintivo del acero ASTM A228, atribuible a su elevado contenido de carbono que sitúa la temperatura de fin de transformación martensítica por debajo de la temperatura ambiente, impidiendo la transformación completa de la austenita en martensita durante el temple. Por su parte, al ausencia de fases martensíticas en el grupo enfriado al aire confirma que la severidad de este medio resulta insuficiente para activa el mecanismo de transformación adiabática, limitando las transformaciones a procesos difusivos que generan estructuras de menor dureza y mayor estabilidad termodinámica.

3.6. Correlación dureza – microestructura

La correlación entre la dureza obtenida, la naturaleza y proporción de los microconstituyentes presentes, permitió verificar la coherencia interna de los resultados y validar el cumplimiento de los principios metalúrgicos esperados para el acero ASTM A228 frente a los distintos tratamientos aplicados.

La Tabla 18, reúne, para cada grupo experimental, el valor promedio de dureza junto con la identificación de la fase endurecedora principal, la fase de menor dureza y sus respectivas proporciones, organizando la información en un formato que facilita el reconocimiento de las relaciones existentes entre las variables.

Tabla 19. Correlación entre los valores de dureza y la proporción de microconstituyentes en cada grupo experimental

Grupo (Material)	Dureza (HRC)	Fase endurecedora	% Fase endurecedora	Fase de menor dureza	% Fase de menor dureza
Estado base	42.52	Cementita	47.77	Ferrita	52.23
Templado en aire	30.08	Cementita globulizada	38.95	Ferrita	61.45

Tabla 19. Correlación entre los valores de dureza y la proporción de microconstituyentes en cada grupo experimental (continuación).

Grupo (Material)	Dureza (HRC)	Fase endurecedora	% Fase endurecedora	Fase de menor dureza	% Fase de menor dureza
Templado en aceite	51.40	Martensita revenida	48.76	*Austenita retenida	51.33
Templado en agua	60.96	Martensita revenida	64.96	*Austenita retenida	35.04

“*Microconstituyente aparente identificado, ver nota metodológica en la sección 3.4.2. del presente documento.”

El análisis de la información sirve de fortaleza para identificar una correspondencia directa entre la dureza obtenida y la presencia proporcional de las fases endurecedoras en cada grupo. En el material en estado base, la dureza de 42.52 HRC se relaciona con la combinación de cementita (47.77 %) y el endurecimiento por deformación del trefilado en frío. En el grupo enfriado al aire, al reducción de dureza a 30.08 HRC se vincula tanto con la disminución del porcentaje de cementita globulizada (38.95%) como con la pérdida del endurecimiento por deformación previa, sin que se incorporen fases endurecedoras alternativas de tipo martensítico.

Para los grupos templados en aceite y en agua, donde la fase endurecedora principal pasa a ser la martensita revenida, se observa una correlación marcadamente positiva entre el porcentaje de esta fase y la dureza resultante. El grupo sometido al temple en aceite, con 48.76% de martensita revenida, alcanza 51.40 HRC, mientras que el grupo templado en agua, con 64.96% de martensita revenida, alcanza 60.96 HRC. La diferencia de 16.20 puntos porcentuales en la proporción de martensita revenida entre ambos grupos se traduce en una diferencia de 9.56 unidades en la escala Rockwell C, lo cual evidencia la influencia directa de la fase martensítica sobre la dureza del material.

Complementariamente, se identifica una correlación entre el porcentaje de la fase aparente compatible de austenita retenida y la dureza obtenida. El grupo templado en agua, donde la aparente austenita retenida como fase de menor dureza intrínseca

respecto a la martensita revenida, actuando como factor reductor de dureza global del material cuando se encuentra presente en proporciones significativas.

La coherencia entre las tendencias cuantitativas de dureza y la composición microestructural, valida la fiabilidad de los resultados obtenidos en estudio. La proporcionalidad observada entre la severidad del medio de enfriamiento, el contenido de martensita revenida y la dureza resultante produce el comportamiento esperado para un acero alto carbono sometido a temple seguido de revenido, conforme a los fundamentos teóricos de la metalurgia física de los aceros tratados térmicamente.

3.7. Verificación de hipótesis

Desde el punto de vista de la dureza, los valores promedio registrados en los cuatro grupos experimentales (42.52 HRC en estado base, 30.08 HRC en aire, 51.40 HRC en aceite y 60.96 HRC en agua) presentan diferencias significativas, con una variación máxima de 30.88 unidades entre los externos del estudio. Desde el punto de vista microestructural, la transición desde estructuras de tipo perlítico hasta estructuras compuestas por martensita revenida y el microconstituyente aparente compatible de austenita retenida evidencia un cambio cualitativo radical en la naturaleza de las fases formadas, lo que se atribuye exclusivamente a la diferencia en la velocidad de extracción de calor proporcionada por cada medio de enfriamiento.

Con base en los valores promedio de dureza Rockwell C de cada una de las cinco probetas por grupo, obtenidas para cada condición experimental, se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) [62], mediante una hoja de cálculo electrónica. Este análisis estadístico tuvo como finalidad determinar si las diferencias observadas entre los distintos medios de enfriamiento son estadísticamente significativas, y, por consiguiente, verificar la hipótesis planteada.

Para el análisis se consideraron los grupos de estudio del material en estado base, el material templado en aire, templado en aceite y templado en agua. Datos expuestos en la Tabla 19.

Tabla 20. Valores de dureza promedios de cada probeta por grupo analizado.

Valores de HRC promedio de probetas por grupo			
Base	T. Aire	T. Aceite	T. Agua
34,6	32,2	50,2	59
41,2	29,8	50,2	61,2
41	29	53	62,4
43,6	29,8	54	60,2
43,2	29,6	49,6	62

Los resultados obtenidos del análisis estadístico se muestran en la Tabla 20.

Tabla 21. Resultados arrojados por ANOVA.

Análisis de varianza de un factor (ANOVA)						
Resumen						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Base	5	212,6	42,52	1,712		
T. Aire	5	150,4	30,08	1,512		
T. Aceite	5	257	51,4	3,86		
T. Agua	5	304,8	60,96	1,908		
Análisis de varianza						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2591,44	3	863,813333	384,26	4,0926E-15	3,24
Dentro de los grupos	35,968	16	2,248			
Total	2627,408	19				

Para la toma de decisiones, se consideró los siguientes parámetros, si el valor p (significancia o confianza) obtenido es menor a 0,05 y si F es mayor que F crítico, se acepta la hipótesis alternativa. Esto se representa mejor en la Figura 32.

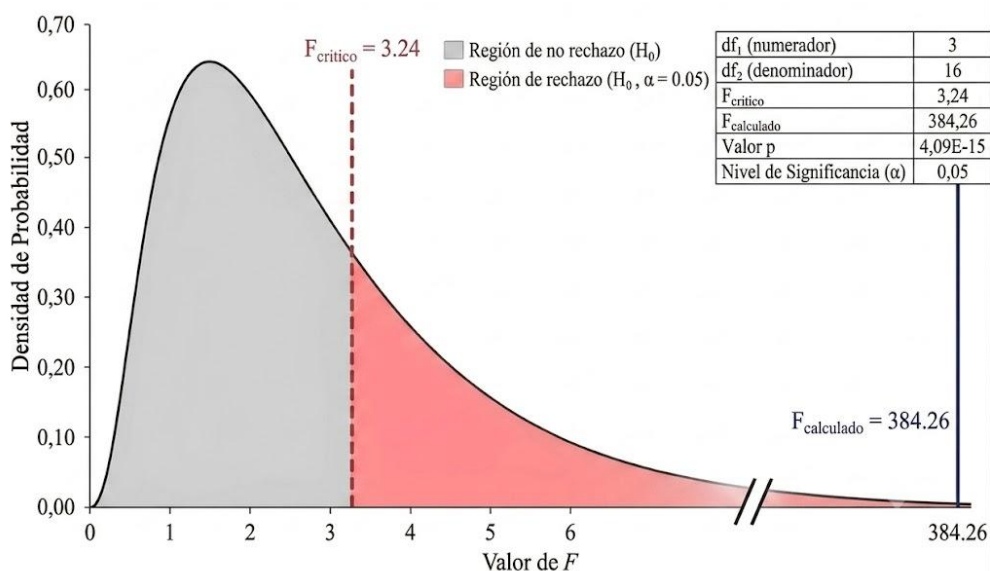


Figura 32. Verificación Gráfica de hipótesis: ANOVA Dureza HRC

Como se puede observar en la Figura 32, y en la Tabla 20, el valor crítico de F obtenido para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ fue de 3,24; mientras que el valor calculado fue de 384,26, muy superior al valor crítico F . Adicionalmente, el valor p obtenido fue de 4,0926E-15, que es inferior al nivel de significancia establecido, lo que confirma diferencias estadísticamente significativas entre los grupos analizados.

3.7.1. Verificación de los supuestos

Con el propósito de garantizar la validez del análisis de varianza aplicado, se verificaron los supuestos estadísticos requeridos por esta prueba: la normalidad de los datos y la homogeneidad de varianzas entre los grupos. La normalidad se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk aplicada a cada grupo experimental, mientras que la homogeneidad de varianzas se verificó mediante la prueba de Levene. Los resultados se presentan en la Tabla 21.

Tabla 22. Verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Prueba	Grupo	Valor p	Resultado
Shapiro-Wilk (normalidad)	Estado base	0.0524	Cumple
	Templado en aire	0.0576	Cumple
	Templado en aceite	0.1635	Cumple
	Templado en agua	0.7451	Cumple
Levene (homocedasticidad)	Los cuatro grupos	0.212	Cumple

Los valores de probabilidad obtenidos en la prueba de Shapiro-Wilk para los cuatro grupos resultaron superiores al nivel de significancia de 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis de normalidad y se concluye que los datos de cada grupo se distribuyen de manera normal. De igual forma, la prueba de Levene arrojó un valor de probabilidad de 0.212, superior a 0.05, lo que confirma la homogeneidad de varianzas entre los grupos. Al cumplirse ambos supuestos, se valida la aplicabilidad del análisis de varianza para el contraste de las medias de dureza entre los grupos experimentales.

3.7.2. Tamaño del efecto

Adicionalmente al contraste de significancia, se determinó el tamaño del efecto mediante el coeficiente eta cuadrado (η^2), el cual cuantifica la proporción de la variabilidad total de la dureza que es explicada por el medio de enfriamiento empleado. El valor obtenido fue de 0.9863, lo que indica que el 98.63 por ciento de la variación total en la dureza se atribuye directamente al medio de enfriamiento, correspondiendo a un tamaño de efecto grande según los criterios convencionales de interpretación. Este resultado confirma que el medio de enfriamiento constituye el factor determinante en la dureza final del acero ASTM A228, con una influencia muy superior a la variabilidad experimental residual.

3.7.3. Prueba post hoc de Turkey HSD

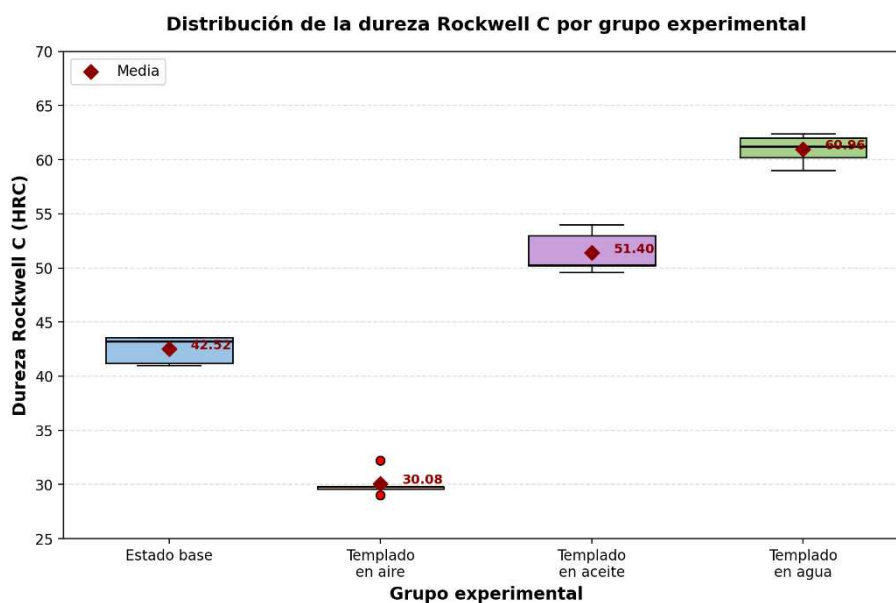
Dado que el análisis de varianza únicamente determina la existencia de diferencias significativas entre los grupos sin identificar entre cuáles de ellos se presentan, se aplicó la prueba post hoc de Tukey HSD para comparar todos los pares posibles de grupos experimentales. Los resultados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 23. Comparación de pares mediante la prueba de Turkey HSD

Comparación de pares	Diferencia de medias (HRC)	Diferencia significativa
Agua – Aire	30.88	Sí
Aceite – Aire	21.32	Sí
Agua – Base	18.44	Sí
Aire – Base	12.44	Sí
Aceite – Base	8.88	Sí
Agua – Aceite	9.56	Sí

La prueba de Tukey HSD evidencia que las seis comparaciones de pares resultaron estadísticamente significativas, lo que demuestra que cada grupo experimental presenta una dureza significativamente distinta de la de todos los demás grupos. Esto confirma que tanto el material en estado de suministro como los grupos templados en aire, aceite y agua difieren entre sí de manera estadísticamente comprobable, reforzando la conclusión de que la severidad del medio de enfriamiento produce niveles de dureza claramente diferenciados en el acero ASTM A228.

La distribución de la dureza por grupo experimental se representa mediante el diagrama de cajas presentado en la Figura 33, el cual permite visualizar la dispersión de los datos, la mediana y la media de cada grupo, así como la clara separación entre los niveles de dureza correspondientes a cada medio de enfriamiento.

Figura 33. Diagrama de cajas de dureza Rockwell C por grupo experimental

En consecuencia, a todos los análisis estadísticos realizados, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa planteada, al comprobarse que la variación en el medio de enfriamiento empleado durante el proceso de temple del acero ASTM A228 influye significativamente tanto en la dureza como en la microestructura del material, generando diferencias verificables entre los valores obtenidos según los distintos medios de enfriamiento utilizados.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Se determinó el estado de entrega del acero ASTM A228, el cuál evidencio una dureza promedio de 42,52 HRC, distinguiendo en su composición microestructural las fases metalográficas de ferrita y cementita, siendo complementada por la dureza del material que se obtuvo durante su proceso de trefilado en frío. Este estado constituyó la relación pertinente para la identificación de los tratamientos térmicos posteriores.

Se aplicó los tratamientos térmicos de temple en agua, aceite, SAE 20W50 y aire, donde la velocidad de enfriamiento reveló ser un factor directamente crucial en el cambio de la composición microestructural y la conducta de dureza del acero ASTM A228.

Se evaluó la dureza y la microestructura resultantes del acero ASTM A228 templado en los tres medios de enfriamiento, donde se logró concluir que existe una correlación claramente notable entre las variables analizadas. El análisis estadístico mediante el método de análisis de varianza por un factor (ANOVA) confirmó que las diferencias observadas entre los medios acuosos son estadísticamente significativas, verificando que la velocidad del medio de enfriamiento influye estrechamente en las propiedades finales del material.

En función de los resultados obtenidos, se puede concluir que el temple en agua constituye la alternativa más oportuna para maximizar la dureza y la resistencia al desgaste, también siendo importante mencionar que el temple en aceite es una opción equilibrada para aplicaciones o trabajos en donde se requiera un incremento de dureza, pero con menor riesgo de distorsión o agrietamiento del material.

4.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda extender el estudio mediante la incorporación de medios de enfriamiento adicionales o de variantes de los medios empleados, tales como soluciones poliméricas de temple, salmuera o aire forzado a distintas velocidades. La inclusión de los medios permitiría disponer de un espectro más amplio de severidades

de enfriamiento, facilitando la selección del medio óptimo para distintas aplicaciones industriales según los requerimientos mecánicos específicos.

Se recomienda realizar una prueba cuantitativa del tamaño de grano y del distanciamiento interlaminar de los microconstituyentes observados, en base a la norma ASTM E112 y de ser posible, procedimientos metalúrgicos cuantitativos de un nivel más avanzado. Esto serviría de soporte para poder evidenciar correlaciones más profundas entre los parámetros microestructurales y las características tanto físicas como químicas del material, aportando información valiosa para la comprensión de los factores que intervienen en el incremento de dureza en el acero ASTM A228 sometidos a distintos medios de templabilidad.

Se recomienda complementar el presente estudio con la realización de ensayos mecánicos adicionales, tales como ensayos de resistencia a la tracción, tenacidad al impacto y comportamiento a la fatiga, con el fin de llegar a caracterizar de manera integral el desempeño del acero ASTM A228 sometido a los distintos medios de temple.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Advancing Standards Transforming Markets, "Standard Specification for Steel Wire, Music Spring Quality," *Subcomite A01.03*, vol. I, no. 03, p. 5, 2024.
- [2] J. B. Agboola, O. S. I. Fayomi and N. E. Udoeye, "Influence of Quenching Media on the Mechanical Properties and Microstructure of High Carbon Steel," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / 1757-899X*, vol. 342, no. 1, 2018.
- [3] H. Patiño and B. Rosero, "Tratamiento termico de temple, influencia del medio de enfriamiento," *Journal de Ciencia e Ingeniería*, pp. 52-58, 2016.
- [4] A. W. Yusariarta Putra Parmita, "Mechanical properties of steel aisi 1045 variation of austenitization holding time in the quenchingtempering process with ice water media," *Resayaka mesin*, vol. XV, no. 1, pp. 425-432, 2024.

- [5] R. Ramasamy, . N. V, G. T and P. CR, "An Investigation into Failure of Starter Solenoid Spring," *Journal of Material Sciences & Engineering*, vol. VII, no. 1, p. 491, 2018.
- [6] S. Mudda, A. Hegde, S. Sharma, B. M. Gurumurth and U. R. Poojary, "A review of the latest developments regarding the heat treatment effects on hardness, impact toughness, and microstructure in AISI 1040, 4140, and 4340 medium carbon structural steels," *Discover Materials*, vol. VI, no. 50, 2026.
- [7] H. Kubota, Y. Akimoto, K. Saito, W. Sakurazawa and K. Yoshida, "Residual Stress Control in Drawn Bar and Wire by HeatingCooling-Drawing Process," *ISIJ International*, vol. 61, no. 11, pp. 2792-2797, 2021.
- [8] W. Callister and D. Rethwisch , *Materials Science and Engineering: An Introduction*, WILEY, 2020.
- [9] F. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, McGraw-Hill., 2021.
- [10] G. Totten, "Los fundamentos del enfriamiento del acero en aceite en el tratamiento térmico," *Paulo Heat Treating*, 2017.
- [11] J. Velepucha, J. Zambrano, D. Hidrovo, M. Zambrano and J. Zevallos, "Caracterización de los aceros 1018, 1020 y DF2 según la norma SAE.," *MQRInvestigar*, p. 130–147, 2023.
- [12] O. Ríos, C. Serna and R. Aristizábal, "Desarrollo de aceros fundidos para ser tratados térmicamente mediante carbo-austemperado," *SCIELO*, p. 718–730, 2020.
- [13] I. Qays, "Investigation of mechanical properties of low carbon steel weldments for different welding processes," *International Journal of Engineering Sciences and Applications*, pp. 116-122, 2022.

- [14] R. Hossain and T. Islam, "Classification and Application of Plain Carbon Steels," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2019.
- [15] S. Ramesh , *Applied Welding Engineering (Third Edition), Processes, Codes, and Standards*, 2020.
- [16] M. Rodriguez, E. Urday, E. Pantigoso and C. Andrade, "Evaluación de propiedades mecánicas de un acero estructural a-36 en la formación de ferritas," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, pp. 47-59, 2022.
- [17] G. Capilla , "Influencia del proceso de recocido intermedio sobre las propiedades anisotrópicas y elastoplásticas en las láminas de aceros AHSS," *Acta Universitaria*, pp. 1-11, 2022.
- [18] P. Este, P. Sáenz and A. Laura, "Evaluación de la resistencia a fatiga y límite de fatiga de aceros de medio y bajo carbono," *Revista INGENIERÍA*, pp. 69-75, 2004.
- [19] G. Luz, "ASTM A228 Propiedades (Mecánicas, Químicas y Clasificación) rev. 2022," 26 Septiembre 2022. [Online]. Available: <https://www.materiales.gelsonluz.com/2020/09/astm-a228-propiedades-mecanicas>.
- [20] I. Zurutuza, N. Isasti and E. Detemple, "Effect of Quenching Strategy and Nb-Mo Additions on Phase Transformations and Quenchability of High-Strength Boron Steels.," *JOM*, p. 3158–3168, 2021.
- [21] B. Kim, S. Lee and H. Kim, "New insight into the hardenability of high strength low alloy steel from the perspective of crystallography," *ELSEVIER*, 2021.
- [22] B. Białobrzaska , "Effect of boron accompanied by chromium, vanadium and titanium on kinetics of austenite grain growth," *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications.*, pp. 649-676, 2021.

- [23] E. Tipula, "Ensayo de dureza Rockwell," UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN, Lima, 2018.
- [24] Mecapedia, "Módulo de elasticidad," Universitat Jaume I, 2022.
- [25] N. Navarro, D. Cely, J. Urbano and D. Blanco, "Proceso de trefilado de alambres de Acero: revisión de literatura y caracterización del proceso en Colombia," *Editorial Instituto Antioqueño de Investigación*, 2021.
- [26] S. Raynier, "Endurecimiento por deformación: Proceso clave en las Ciencias de los Materiales," *Technological University of Panama*, 2023.
- [27] O. Falodun, S. Oke and M. Bodunrin, "A comprehensive review of residual stresses in carbon steel welding: formation mechanisms, mitigation strategies, and advanced post-weld heat treatment techniques," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 4107–4140, 2025.
- [28] A. Matango, "Estudio de los parámetros de trefilado de alambre de aluminio para conductores eléctricos, en diferentes condiciones de lubricación, bajo criterios de sostenibilidad," ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Riobamba, 2025.
- [29] S. Avner, *Introducción a la metalurgia física*, McGraw-Hill., 2020.
- [30] R. Abbaschian and L. Abbaschian, *Physical Metallurgy Principles*, Stamford: Cengage Learning, 2009.
- [31] B. Silva and Y. Melo, "Evaluación de microestructura en probetas jominy con temple a temperaturas intercríticas más revenido para acero aisi sae 8620," Universidad distrital francisco josé de caldas, Bogotá, 2025.
- [32] Technical Excellent, "Estructuras de austenita, martensita, bainita, perlita y ferrita," The Welding Institute, 2021. [Online]. Available: https://www-twi-global-com.translate.google/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-the-microstructural-constituents-austenite-martensite-bainite-pearlite-and-ferrite?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc.

- [33] Iesveadelturia, "TRATAMIENTOS TÉRMICOS," Tecno Iesveadelturia, 2021.
[Online]. Available:
http://tecno.iesvegadelturia.es/apuntes/tecind2/Tema_1/termicos.html.
- [34] L. Hillyard, "Metallurgy," Metadata, 2024. [Online]. Available:
<https://mhcc.pressbooks.pub/metallurgy/chapter/pearlite/>.
- [35] T. Berrezueta, A. Arregui, A. Santillán and A. Yucta, "Introducción a los tratamientos térmicos: conceptos, propósitos y aplicaciones industriales.," *ConcienciaDigital*, pp. 176-191, 2023.
- [36] A. Samuel and K. Prabhu, "Tensiones residuales y deformación durante el temple de aceros: una revisión.," *Springer Nature*, p. 5161–5188, 2022.
- [37] Y. Ysava and N. Luiggi, "Transformaciones de fases en aceros de bajo carbono," *Scielo*, 2011.
- [38] F. Castillo and A. Reyes, ACEROS, ESTRUCTURAS Y TRATAMIENTOS TÉRMICOS”, Ciudad de México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2012.
- [39] N. Solomon and I. Solomon, "Effect of deformation-induced phase transformation on AISI 316 stainless steel corrosion resistance," *Engineering Failure Analysis*, pp. 865-875, 2017.
- [40] J. Cai, J. Lin and J. Wilsius, "Microstructure Evolution in Metal Forming Processes," *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, pp. 210-236, 2012.
- [41] V. Rudnev and D. Loveless, "Comprehensive Materials Processing," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, pp. 489-580, 2014.
- [42] E. Troell, H. Kristoffersen, J. Bodin and S. Segerberg, "Control del proceso de enfriamiento: medición, análisis y garantía de calidad," *ELSEVIER*, pp. 99-121, 2014.

- [43] L. De la Torre , M. Berenguer, L. Oliva and Z. Millán, "Velocidad de enfriamiento: su determinación en problemas de templado," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, pp. 57- 64, 2011.
- [44] C. Higuera, G. Florez and L. Arroyave, "Diseño de un sistema de enfriamiento para temple de aceros," *Scientia Et Technica*, pp. 170-175, 2008.
- [45] A. Domingo , Apuntes de transmisión de calor, Madrid: Universidad Politécnica de Madrir, 2012.
- [46] J. Sousa, "Influence of alloying elements on steels duplex and superduplex stainless steel used in oil industry: a review," UFC, Fortaleza, 2021.
- [47] C. Contreras and M. García , "Una revisión de la metalurgia de los aceros inoxidables dúplex," *UAdeC*, pp. 1-14, 2025.
- [48] D. De Jesús Ortiz, "Implementación del Sistema de Control de Temperatura y Eléctrico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas," Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Arteaga, 2026.
- [49] L. Negrin, E. Pérez, R. Rodríguez, N. Cárdenas and A. Scott, "Temple del acero SAE/AISI 1045 usando aceites reutilizados como medio de enfriamiento," *Ingeniería Mecánica*, 2022.
- [50] N. Hernández, E. Pérez, R. Rodríguez, N. Cárdenas and A. Duffus , "Temple del acero SAE/AISI 1045 usando aceites reutilizados como medio de enfriamiento," *Ingeniería Mecánica*, 2022.
- [51] P. Flores, "Estudio del efecto de la velocidad de calentamiento en las propiedades mecánicas de un acero de bajo carbono," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [52] B. Ferguson, Z. Li and A. Freborg, "Phase transformations and pearlite formation in carbon steels under controlled cooling conditions.," *Journal of Materials Engineering and Performance*, p. 8421–8432, 2021.

- [53] I. Dey, S. Kumar and R. Saha, "Effects of cooling rate and strain rate on phase transformation, microstructure and mechanical behaviour of thermomechanically processed pearlitic steel," *Journal of Materials Research and Technology*, pp. 2685-2698, 2019.
- [54] ASTM International, "ASTM E10-18: Standard test method for Brinell hardness of metallic materials.," *ASTM International*, 2022.
- [55] F. Campbell, *Metals Fabrication: Understanding the Basics*, ASM International, 2013.
- [56] J. Valbuena, J. Goñi and J. Martínez, "Influencia de los Tratamientos Térmicos en la Microestructura y Propiedades Mecánicas del Acero," Universidad del País Vasco, León, 2025.
- [57] C. Helguero and J. Calva, "Análisis del tiempo de vida de una herramienta de corte para el maquinado del acero AISI d6, mediante el uso de la ecuación de Taylor y criterios de desgaste," ESPOL, Guayaquil, 2011.
- [58] D. Porter, K. Easterling and M. Sherif, *Phase Transformations in Metals and Alloys*, New York: Taylor & Francis, 2022.
- [59] American National Standard, "Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens - ASTM E3," *ASTM INTERNATIONAL*, pp. 1-12, 2017.
- [60] Advancing Standards Transforming Markets, "Práctica estándar para el micrograbado de metales y aleaciones - ASTM E407-07," *ASTM International*, pp. 1-22, 2015.
- [61] "Standard Specification for Steel Wire, Music Spring Quality - ASTM A228/A228M-18," *ASTM International*, pp. 1-5, 2024.
- [62] J. Dagnino, "Análisis de varianza," *Revista Chilena de anestesia*, vol. 43, no. 4, 2014.

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica del acero ASTM A228 adquirida por el proveedor.

VINCO
C/Bizargi, 6 | Pol. Ind. Sarrikola | E-48195 LARRABETZU | Bizkaia - SPAIN
www.vinco.es

Alambre de Acero Trefilado Duro

Composición química

ALAMBRE DE ACERO TREFILADO DURO COMPOSICIÓN QUÍMICA, % EN MASA EN 10270-1

Denominación	Norma Europea (EN)	Composición química %					
		C	Si	Mn	P máx.	S máx.	Cu máx.
SL	EN 10270-1	0,35 - 1,00	0,10 - 0,30	0,40 - 1,20	0,035	0,035	0,20
SM	EN 10270-1	0,35 - 1,00	0,10 - 0,30	0,40 - 1,20	0,035	0,035	0,20
SH	EN 10270-1	0,35 - 1,00	0,10 - 0,30	0,40 - 1,20	0,035	0,035	0,20
DM	EN 10270-1	0,45 - 1,00	0,10 - 0,30	0,40 - 1,20	0,020	0,025	0,12
DH	EN 10270-1	0,45 - 1,00	0,10 - 0,30	0,40 - 1,20	0,020	0,025	0,12
CLASE II	DIN 17223:1964-1	valores no garantizados			0,030	0,030	-

Nota: Para los diámetros $\geq 1,6\text{mm}$, el suministro puede realizarse a partir de material patentado al plomo o sin patentar.

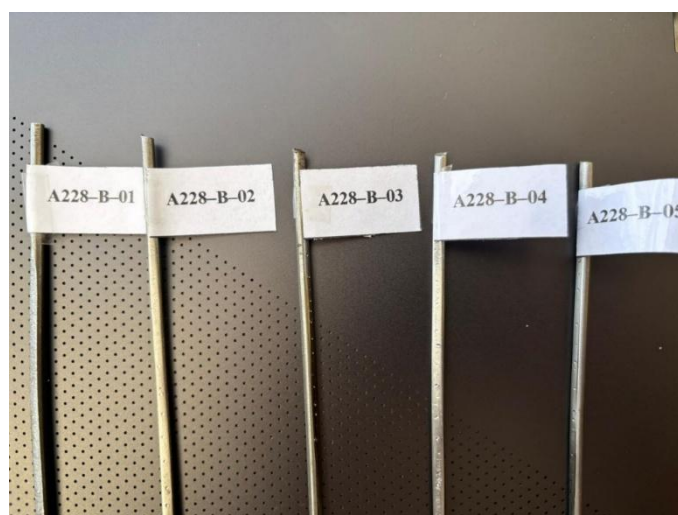
Equivalencias

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS

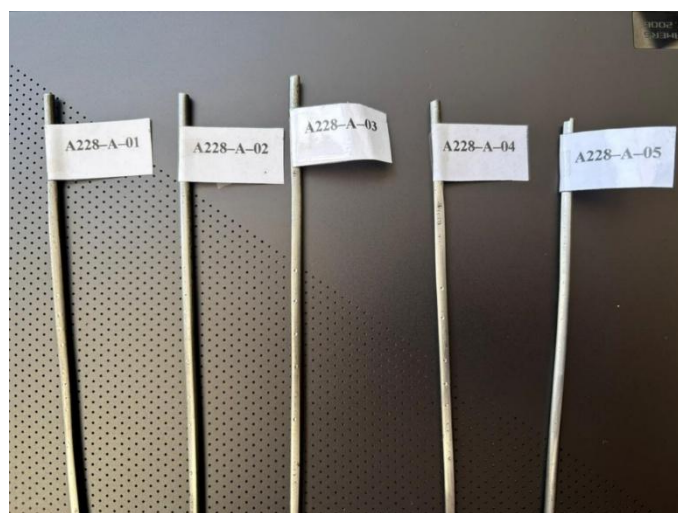
Denominación	EU		EEUU		China	
	Norma EN	DIN	ASTM	AISI	GB / T 4357	
SL	EN 10270-1	CLASE A	A 227	SWB	SL	
SM	EN 10270-1	CLASE B	A 227	SWC	SM	
SH	EN 10270-1	CLASE C	A 228	SWP-B	SH	
DM	EN 10270-1		A 227	-	-	
DH	EN 10270-1		A 228	SWP-B	DH	
CLASE II	DIN 17223:1964-1	CLASE II	-	-	-	

* Los datos contenidos en la presente web son mera información y no constituyen, en ningún caso, condiciones contractuales de suministro. Salvo error u omisión.

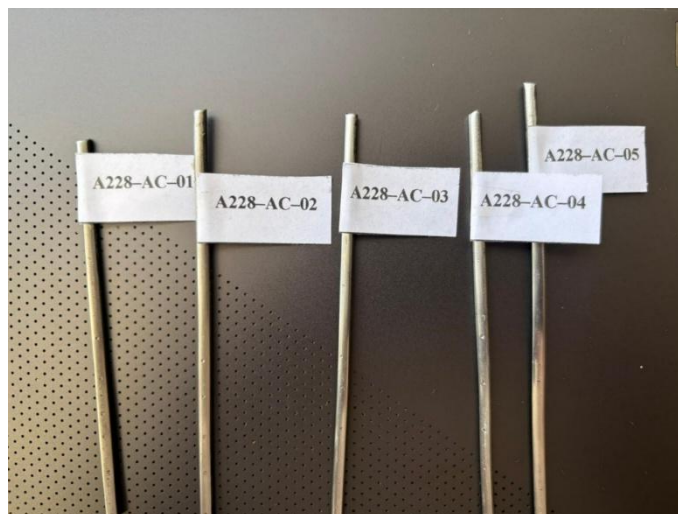
Anexo 2. Probetas etiquetadas respectivamente del material en estado base.



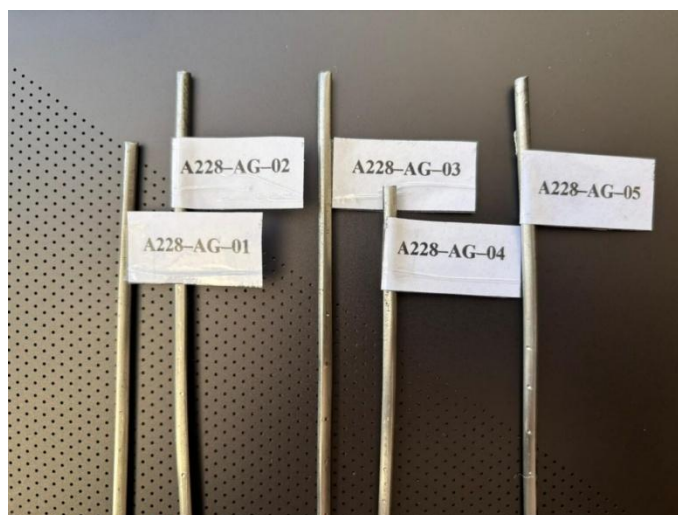
Anexo 3. Probetas etiquetadas respectivamente del material templado en aire.



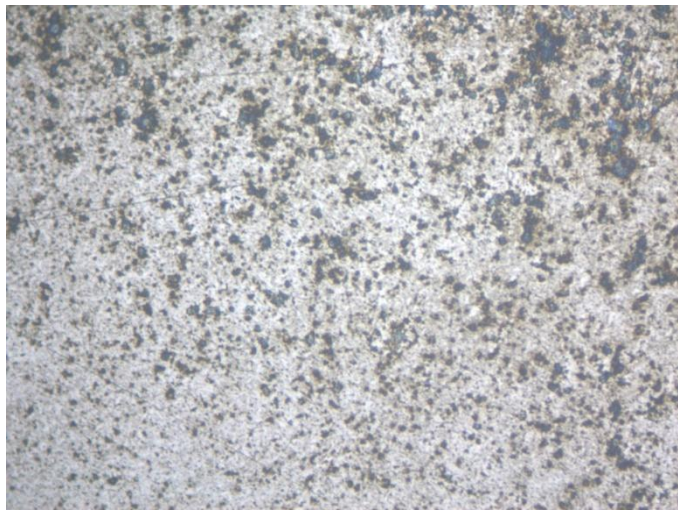
Anexo 4. Probetas etiquetadas respectivamente del material templado en aceite.



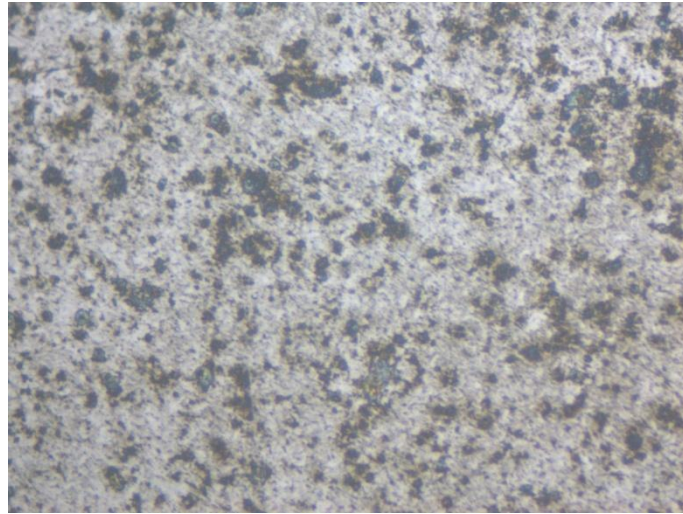
Anexo 5. Probetas etiquetadas respectivamente del material templado en agua.



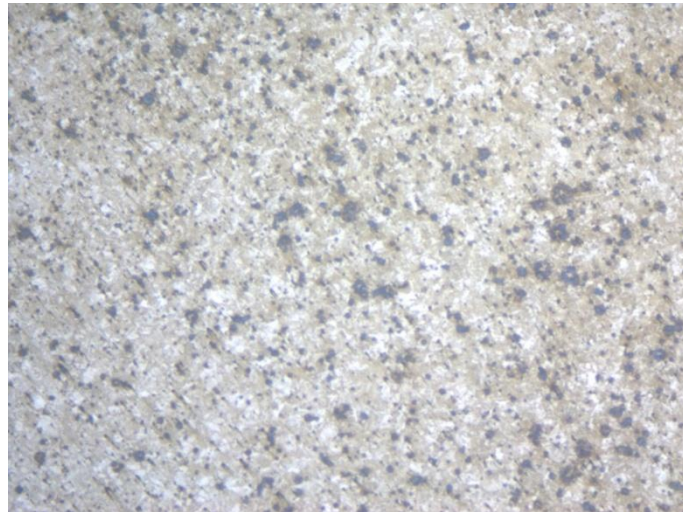
Anexo 6. Micrografía del acero en estado Base registrada en el aumento (100X, Ataque con Nital 3%, 7s).



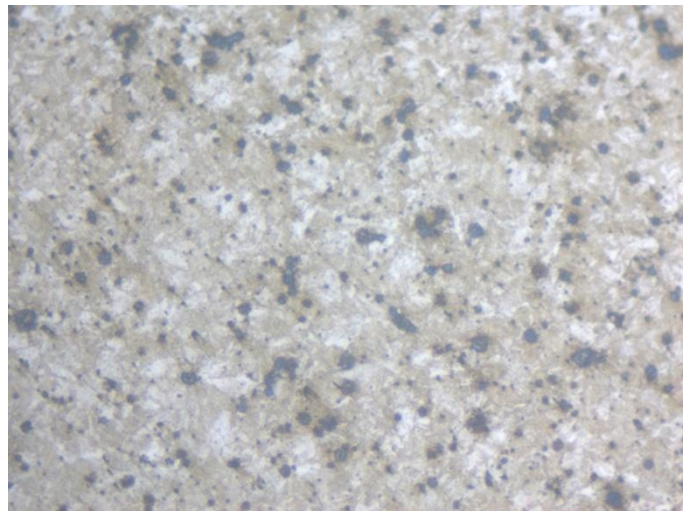
Anexo 7. Micrografía del acero en estado Base registrada en el aumento (200X, Ataque con Nital 3%, 7s).



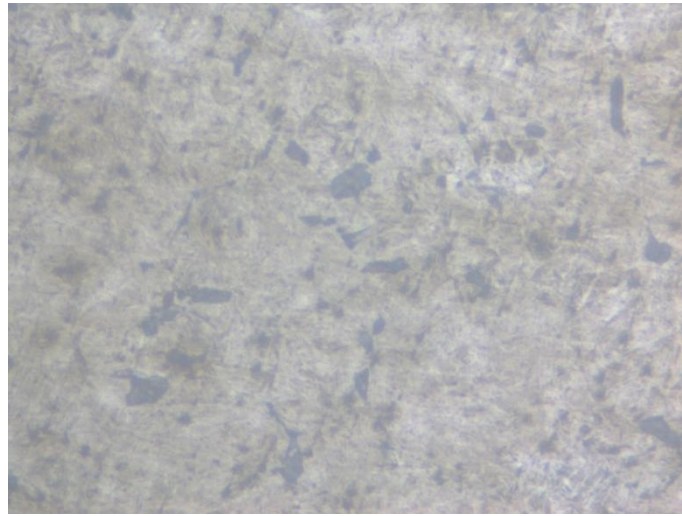
Anexo 8. Micrografía del acero templado en Aire registrada en el aumento (100X, Ataque con Nital 3%, 6s).



Anexo 9. Micrografía del acero templado en Aire registrada en el aumento (200X, Ataque con Nital 3%, 6s).



Anexo 10. Micrografía del acero en estado templado en Aceite registrada en el aumento (200X, Ataque con Nital 3%, 4s).



Anexo 11. Micrografía del acero templado en Agua, registrada en el aumento (200X, Ataque con Nital 3%, 3s).

