CARACTERIZACIÓN DE DUREZA Y MICROESTRUCTURA DE MATERIAL ALEADO DE ACEROS DE ALTO CARBONO

Autores:
Pablo Pontón Sánchez
Hernando Javier Ninco Diaz



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica
Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2026

CARACTERIZACIÓN DE DUREZA Y MICROESTRUCTURA DE MATERIAL ALEADO DE ACEROS DE ALTO CARBONO

Autores:
Pablo Pontón Sánchez
Hernando Javier Ninco Diaz

Monografía

Docente director:
Nicolás Gabriel Muñoz Bello

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica
Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2026

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por acompañarnos en esta travesía desde primer semestre hasta el último, por brindarnos nuestra formación profesional y a los docentes que nos apoyaron igualmente.

A los laboratoristas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Laura Estefanía Gaitán Mesa, Deibyd Méndez Contreras, Santiago Veloza, por su ayuda continua, asesoramiento y prestación de los equipos de los laboratorios de tratamientos térmicos y preparación de probetas y de los equipos del laboratorio de metalografía.

Al docente Luis Hernando Correa Murillo por ayudarnos con las condiciones iniciales del proyecto y guía inicial durante este, así mismo al docente Nicolás Gabriel Muñoz Bello por guiarnos durante el final del proyecto y así mismo asesorarnos, corregirnos y ayudarnos las condiciones finales para la culminación del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 11
ABSTRACT 11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12
2. JUSTIFICACIÓN 13
3. OBJETIVOS 14
3.1 Objetivo general 14
3.2 Objetivos específicos 14
4. MARCO TEÓRICO 15
4.1 Acero de Alto Carbono y Aceros de Aleación 15
4.2 Soldadura por Forja 15
4.3 Acero Damasquino 16
4.4 Tratamientos Térmicos 16
4.5 Análisis Microestructural (Microscopía Metalográfica) 16
4.6 Pruebas de Dureza y Microdureza 17
5. ANTECEDENTES 19
6. METODOLOGÍA PROPUESTA 27
6.1 Fase 1: Fabricación del Acero Damasquino 27
6.2 Fase 2: Aplicación de Tratamientos Térmicos 27
6.3 Fase 3: Caracterización y Análisis de Resultados 28
7. DESARROLLO EXPERIMENATAL 29
7.1 Obtención del material base 29
7.2 Fabricación de la aleación 29
8. PREPARACIÓN DE PROBETAS 32
8.1 Corte de probetas 32
8.2 Clasificación de probetas 32
8.3 Tamaño de probetas antes de los tratamientos térmicos 33
8.4 Tratamiento térmico de probetas 33
8.4.1 Fichas técnicas de los aceros 34

8.4.2 Temperatura de sostenimiento....36
8.4.3 Calculo tiempos de sostenimiento....37
8.4.4 Gráficos de ciclo térmico....37
8.4.5 Tratamiento térmico de probetas....39
8.5 Preparación de probetas según norma ASTM E3....40
8.5.1 Pulido de probetas por lijado....41
8.5.2 Pulido de acabado especular de probetas....42
8.6 Ataque químico de probetas para revelar microestructura según norma ASTM E407-07....42
9. TOMA DE MUESTRAS DE MICROGRAFÍAS....43
9.1 Examinación macro en estereoscopio....43
9.2 Procedimiento para la toma de micrografías según norma ASTM E3....44
9.3 Toma de muestras metalográficas....45
9.4 Comparación de probetas #1 a 500X y a 1000X....45
9.5 Comparación de probetas #2 a 200X, 500X y 1000X....46
9.6 Comparación de probetas #3 a 500X y 1000X....47
9.7 Comparación de probetas #4 a 500X y 1000X....48
9.8 Comparación de microestructura de la probeta D1 entre unión de capas internas y unión de capas externas....49
9.9 Comparación de microestructura de la probeta D2 entre unión de capas internas y unión de capas externas....50
9.10 Comparación de microestructura de la probeta D3 entre unión de capas internas y unión de capas externas....51
9.11 Comparación de microestructura de la probeta D4 entre unión de capas internas y unión de capas externas....52
10. PRUEBAS DE MICRODUREZA (MICRO INDENTACIONES)....53
10.1 Normativa ASTM E384 para microindentaciones.....53
10.2 Cálculo de microindentaciones.....54
10.3 Toma de pruebas de microdureza....56
10.4 Prueba de microdureza en sección de ferrita en revenido de la probeta C3....59

11. PRUEBAS DE DUREZA 60
11.1 Normativa ASTM E18 60
11.2 Cálculo de tamaño de muestras para dureza 61
11.3 Toma de muestras de dureza 62
12. COMPARACIÓN DE RESULTADOS 65
12.1 Comparación de resultados en probetas #1 65
12.2 Comparación de resultados en probetas #2 65
12.3 Comparación de resultados en probetas #3 66
12.4 Comparación de resultados en probetas #4 67
13. CONCLUSIONES 68
14. RECOMENDACIONES 70
15.1 Control de Descarburación 70
15.2 Optimización del Tratamiento Térmico 70
15.3 Calidad de la Soldadura de Forja 70
15. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS 71
16.1 Evaluación de la Tenacidad al Impacto (Charpy) 71
16.2 Estudio de la Difusión de Carbono en Interfaces 71
16.3 Resistencia a la Corrosión en el Acero Damasco 71
16.4 Ensayos de Fatiga y Flexión 71
16. REFERENCIAS 72
17. ANEXOS 74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ilustración de la unión de las 10 capas de acero. (Fuente propia).....30
Figura 2 Proceso de soldadura de forja en la PV2 a la izquierda y a la derecha el lingote forjado. (Fuente propia).....31
Figura 3 Cortadora de probetas metalográfica. (Fuente propia).....32
Figura 4 Temperatura de austenización 1095 (New Jersey Steel Baron, 2026) 35
Figura 5 Temperatura de austenización 15N20 (New Jersey Steel Baron, 2026)..35
Figura 6 Tratamiento térmico de probetas. (Fuente propia).....40
Figura 7 Método de designación de la ubicación del área mostrada en la fotomicrografía. (ASTM E3-11, 2017) 40
Figura 8 Señalización de caras pulidas en cada probeta. (Fuente Propia).....41
Figura 9 Pulido de caras según norma ASTM E3. (Fuente propia).....42
Figura 10 Estereoscopio. (Fuente propia).....43
Figura 11 A la izquierda se aprecia una delaminación gradual en la probeta D3 y a la derecha una separación total de las capas en la probeta D2. (Fuente propia) ..44
Figura 12 Secciones de barrido para las probetas, a la izquierda el barrido para las probetas D y a la derecha el barrido para las probetas C y N. (Fuente propia) 44
Figura 13 Microscopio metalográfico. (Fuente propia).....45
Figura 14 Comparación de Microestructuras de estado de suministro y post-forjado de probetas C1, N1 y D1. (Fuente propia).....45
Figura 15 Comparación de microestructuras tras temple de probetas C2, N2 y D3. (Fuente propia) 46
Figura 16 Comparación de microestructuras tras revenido en probetas C3, N3 y D3. (Fuente propia).....47
Figura 17 Comparación de microestructuras tras recocido en probetas C4, N4 y D4. (Fuente propia).....48
Figura 18 Barrido de micrografías en Probeta D1, a la izquierda tomas del centro, a la derecha tomas del extremo de la probeta. (Fuente propia) 49
Figura 19 Barrido de micrografías en Probeta D2, a la izquierda tomas del centro, a la derecha tomas del extremo de la probeta. (Fuente propia) 50
Figura 20 Barrido de micrografías en Probeta D3, a la izquierda tomas del centro, a la derecha tomas del extremo de la probeta. (Fuente propia) 51
Figura 21 Barrido de micrografías en Probeta D4, a la izquierda tomas del centro, a la derecha tomas del extremo de la probeta. (Fuente propia) 52
Figura 22 Microdurómetro. (Fuente propia 53
Figura 23 Distancia mínima de microindentaciones. (ASTM E384-22, 2022).....54
Figura 24 Ferrita en tratamiento de revenido de probeta D3. (Fuente propia).....59
Figura 25 Durómetro. (Fuente propia) 60

Figura 26 Distancia mínima de identación. (ASTM E18-22) Figura 27 Patrón repetibilidad. (ASTM E18) 61
Figura 28 Patrón de repetibilidad en pruebas piloto. (Fuente propia) 61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de probetas (Fuente propia) 33
Tabla 2 Dimensiones de probetas antes del tratamiento térmico. (Fuente propia) 33
Tabla 4 Ficha tratamientos térmicos 1095 de MetalZenith. (Fuente propia) 34
Tabla 3 Ficha tratamientos térmicos 1095 de MetalZenith. (Fuente propia) 34
Tabla 5 Temperatura de tratamiento térmico de probetas. (Fuente propia) 36
Tabla 6 Tiempo de sostenimiento de probetas. (Fuente propia) 37
Tabla 7 Prueba piloto de la probeta C1 para microidentación. (Fuente propia) 55
Tabla 8 Tamaño de muestra para las probetas de microidentación. (Fuente propia) 56
Tabla 9 Tamaño de muestra para durezas. (Fuente propia)..... 62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Rampa Temple para Acero 1095 (Fuente propia).....38
Gráfico 2 Rampa Temple para Acero 15n20 (Fuente propia).....38
Gráfico 3 Rampa Temple para Acero Damasquino (Fuente propia).....39
Gráfico 4 Gráfico de microdureza Probetas #1. (Fuente propia).....57
Gráfico 5 Gráfico de microdureza Probetas #2. (Fuente propia).....57
Gráfico 6 Gráfico de microdureza Probetas #3. (Fuente propia).....58
Gráfico 7 Gráfico de microdureza Probetas #4. (Fuente propia).....58
Gráfico 8 Gráfico de durezas probetas #1. (Fuente propia).....62
Gráfico 9 Gráfico de durezas probetas #2. (Fuente propia).....63
Gráfico 10 Gráfico de durezas probetas #3. (Fuente propia).....63
Gráfico 11 Gráfico de durezas probetas #4. (Fuente propia).....64

RESUMEN

El presente proyecto comprende la unión mediante soldadura de forja de 10 barras planas de acero de alto carbono, específicamente 5 piezas de acero 1095 y 5 piezas de acero 15N20, con dimensiones de cercanas a 300 x 30 x 3,5 mm, hasta compactarlas a un espesor posible final de 15 mm. Una vez consolidado el material forjado, se procederá al corte de probetas para la aplicación de diferentes tratamientos térmicos, tales como temple, revenido y recocido. Posteriormente, se realizará un análisis de laboratorio de la microestructura tanto del acero compuesto (forjado en patrón damasquino) como de los aceros base por separado, con el fin de establecer comparaciones. Asimismo, se efectuarán ensayos de dureza y micro dureza en cada condición de material.

PALABRAS CLAVE
Microestructura, dureza, tratamientos térmicos, forjado

ABSTRACT

This project involves forging and welding together 10 flat bars of high-carbon steel, specifically 5 pieces of 1095 steel and 5 pieces of 15N20 steel, with dimensions of approximately 300 x 30 x 3.5 mm, until they are compacted to a final thickness of 15 mm. Once the forged material has solidified, probes will be cut for the application of different heat treatments, such as hardening, tempering, and annealing. Subsequently, a laboratory analysis of the microstructure of both the composite steel (forged in a Damascus pattern) and the base steels separately will be performed to establish comparisons. Hardness and microhardness tests will also be carried out under each material condition.

KEYWORDS
Microstructure, hardness, heat treatments, forging

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la industria metalmecánica y la producción artesanal de aceros especiales, como el acero damasquino, demandan materiales con propiedades mecánicas y microestructurales optimizadas que permitan alcanzar un equilibrio entre dureza, resistencia y tenacidad. Los aceros de alto carbono, como el 1095, presentan una elevada dureza y capacidad de corte, pero tienden a ser frágiles frente a impactos; por su parte, el acero 15N20, al contener níquel, aporta mayor tenacidad y resistencia al desgaste.

Sin embargo, el comportamiento conjunto de estos materiales, cuando se combinan mediante procesos de forja y son sometidos a diferentes tratamientos térmicos, no está completamente caracterizado. Esta falta de información precisa genera incertidumbre sobre los beneficios reales de la soldadura de forja en la obtención de aceros damasquinos, limitando tanto su aprovechamiento académico como su aplicación en el ámbito industrial.

Por ello, surge la necesidad de realizar un estudio experimental que permita comparar las propiedades microestructurales y mecánicas del material forjado con las de los aceros base por separado, para establecer si la combinación de 1095 y 15N20 mediante forja representa una mejora significativa frente a su comportamiento individual.

2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de nuevos materiales con mejores propiedades mecánicas y microestructurales es una necesidad constante en la industria metalmecánica y en la fabricación artesanal de herramientas y componentes de alto desempeño. El acero damasquino, producto de la combinación de diferentes aceros mediante soldadura de forja, se ha destacado históricamente por su resistencia, durabilidad y características estéticas; sin embargo, aún existen vacíos en la caracterización científica de su comportamiento frente a los aceros que lo conforman de manera individual.

El presente proyecto busca aportar al conocimiento técnico y académico mediante la comparación de las propiedades de los aceros 1095 y 15N20 en su estado base y tras ser combinados en un patrón damasquino. Este análisis permitirá comprender cómo influyen la forja y los tratamientos térmicos en la microestructura y la respuesta mecánica del material, proporcionando datos experimentales útiles para futuras investigaciones en metalurgia.

Al mismo tiempo, la investigación ofrece un valor práctico al sector industrial, al generar información que puede contribuir a la optimización de procesos de producción, al diseño de materiales con propiedades específicas y al fortalecimiento de aplicaciones en la cuchillería, la herramentería y otros campos donde se requieran aceros de alto rendimiento. De este modo, el proyecto no solo responde a una inquietud académica, sino que también aporta a la innovación y al mejoramiento de prácticas en la industria de los materiales.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

• Analizar las propiedades microestructurales y mecánicas del acero forjado en patrón damasquino, obtenido a partir de la combinación de aceros 1095 y 15N20 mediante soldadura de forja, en comparación con las de los aceros base por separado, con el fin de evaluar la influencia del proceso de forja y de los tratamientos térmicos aplicados.

3.2 Objetivos específicos

• Realizar la unión de las barras de acero 1095 y 15N20 mediante soldadura de forja y obtener el material compuesto.

• Aplicar tratamientos térmicos de temple, revenido y recocido tanto al acero forjado como a los aceros base de manera individual.

• Caracterizar la microestructura del acero forjado y de los aceros base por separado mediante análisis de laboratorio.

• Determinar la dureza y microdureza de las probetas en cada condición de material.

• Comparar los resultados obtenidos en el acero forjado con los de los aceros base, identificando las variaciones en sus propiedades mecánicas y microestructurales.

4. MARCO TEÓRICO

La presente investigación se fundamenta en los principios de la metalurgia física y la ciencia de los materiales, centrándose en el análisis de las propiedades mecánicas y microestructurales de aceros de alto carbono. El estudio se apoya en los siguientes pilares teóricos.

4.1 Acero de Alto Carbono y Aceros de Aleación

El acero, una aleación de hierro y carbono, es uno de los materiales de ingeniería más versátiles (Smith & Jones, 2021). La concentración de carbono es un factor determinante en sus propiedades. Los aceros de alto carbono contienen entre 0.6% y 1.2% de carbono en peso, lo que les confiere una alta dureza y resistencia, pero también los hace susceptibles a la fragilidad (Callister & Rethwisch, 2018). En este estudio, se utilizan dos aceros específicos:

• **Acero 1095:** Un acero simple de alto carbono conocido por su capacidad de endurecimiento. Su composición nominal, con aproximadamente 0.95% de carbono, le permite formar martensita de alta dureza tras un proceso de temple adecuado (Boyer, 1987). Es ampliamente utilizado en herramientas de corte.

• **Acero 15N20:** Un acero de aleación con níquel, conocido en el ámbito de la forja por su bajo contenido de carbono y su tenacidad mejorada. El níquel, como elemento de aleación, incrementa la templabilidad del acero y reduce el riesgo de agrietamiento durante el temple. Además, su resistencia a la corrosión lo hace ideal para crear un contraste visual en el acero damasquino, ya que el níquel minimiza su reacción al ataque ácido (Davis, 1996).

4.2 Soldadura por Forja

La soldadura por forja es un proceso metalúrgico que une metales a temperaturas elevadas (entre 900 y 1200 °C para aceros), sin la adición de un material de relleno (Gere & Timoshenko, 1997). El éxito de este proceso depende de:

1. Limpieza superficial: Las superficies deben estar libres de óxidos (cascarilla) y otros contaminantes para permitir el contacto directo entre los átomos.

2. Temperatura: El calentamiento hasta la temperatura de forja (Gere & Timoshenko, 1997) es crucial para aumentar la ductilidad del material y promover la difusión atómica en la interfaz.

3. Presión: La aplicación de presión mediante martillado o prensado compacta las capas y asegura un enlace atómico fuerte (Lee & Park, 2019). Este proceso crea una unión metalúrgica que resulta en una pieza monolítica con una estructura de grano continua a través de la interfaz.

4.3 Acero Damasquino

El acero damasquino, a diferencia de un acero homogéneo, es un material compuesto forjado a partir de capas de diferentes aceros. Su distintivo patrón se revela a través de un ataque químico que reacciona de manera distinta a los aceros que lo componen. Más allá de su estética, el objetivo de este proceso es combinar las propiedades mecánicas complementarias de los aceros base. Por ejemplo, la combinación de un acero de alta dureza y baja tenacidad (1095) con uno de menor dureza y mayor tenacidad (15N20) resulta en un material que posee un balance deseable entre ambas propiedades (López et al., 2020).

4.4 Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento que modifican la microestructura y, por ende, las propiedades del acero (Boyer, 1987). En este estudio, se aplicarán tres tratamientos clave:

• **Temple:** Un calentamiento a una temperatura de austenización seguido de un enfriamiento rápido. Esto transforma la estructura cristalina del acero en martensita, una fase dura y frágil (Meyers & Chawla, 1999).

• **Revenido:** Proceso secundario en el que el acero templado se recalienta a una temperatura moderada, mejorando su tenacidad y ductilidad (Porter et al., 2021).

• **Recocido:** Un calentamiento a una temperatura elevada, seguido de un enfriamiento lento para ablandar el material, aliviar tensiones y refinar el grano (Davis, 1996).

4.5 Análisis Microestructural (Microscopía Metalográfica)

El estudio de la microestructura es fundamental para entender cómo el proceso de forja y los tratamientos térmicos modifican la composición y la morfología del material. En esta investigación, se empleará un estereoscopio para el análisis inicial.

• **Preparación de Muestras**: Las probetas se cortarán y se prepararán con un pulido metalográfico. Posteriormente, se someterán a un ataque químico con

reactivos como el ácido nítrico (Nital) o el cloruro férrico, que reaccionarán de manera diferente con el acero 1095 y el 15N20, revelando el patrón de capas y la interfaz de unión.

• **Análisis con Estereoscopio:** El estereoscopio o microscopio de disección es una herramienta ideal para el análisis de la macrografía y la textura superficial del material. Permite obtener una visión tridimensional de la superficie, lo cual es útil para:

o Evaluar la calidad de la unión: Observar si la soldadura por forja ha sido exitosa, identificando posibles fallas, inclusiones o delaminaciones en las interfaces entre las capas.

o Identificar el patrón: Analizar el diseño y la regularidad del patrón laminar, así como la nitidez de las transiciones entre las capas claras (15N20) y oscuras (1095).

o Análisis de la zona de transición: El estereoscopio puede ayudar a identificar si existe una zona de difusión o si la transición es abrupta, lo que podría indicar la efectividad de la soldadura.

4.6 Pruebas de Dureza y Microdureza

Estas pruebas cuantitativas permitirán comparar directamente las propiedades mecánicas del acero damasquino con las de los aceros base.

• **Pruebas de Dureza Macroscópica:** Se utilizará un durómetro Rockwell o Brinell para medir la dureza general de las probetas de cada material (1095, 15N20 y el acero damasquino), en sus diferentes estados de tratamiento térmico (temple, revenido y recocido). Esto proporcionará una visión global de cómo la dureza de los materiales cambia con cada proceso.

• **Pruebas de Microdureza (Vickers o Knoop):** Esta prueba es fundamental para esta monografía. A diferencia de la dureza macroscópica, la microdureza se medirá en puntos específicos de las probetas forjadas. La medición se realizará en las siguientes áreas:

o Dureza de la capa de acero 1095: Se medirá la dureza dentro de una capa individual de este acero.

o Dureza de la capa de acero 15N20: Se medirá la dureza dentro de una capa individual de este acero.

o Dureza de la interfaz de unión: Se realizarán mediciones en la zona de transición entre ambas capas para determinar si se ha producido un cambio en la dureza debido a la difusión de elementos durante la forja.

La comparación de estos valores de microdureza permitirá determinar si las propiedades individuales de cada capa se mantienen, se alteran o se combinan de manera específica dentro del material compuesto. Este análisis detallado es clave para entender la interacción metalúrgica que ocurre durante el proceso de soldadura por forja.

5. ANTECEDENTES

Moyano, A., Ferro, F., González, G., Calabres, R., Arias, D., Jiménez, J. M., Martínez, J. A., & Criado, A. J. (2001). Estudio y restauración del sable en acero de Damasco de Mehemet Alí. *Gladius*, *21*, 291-306. https://doi.org/10.3989/gladius.2001.91

ateriales y Preparación

Para el estudio del sable de Mehemet Alí se utilizaron técnicas de análisis y restauración tanto científicas como históricas. La preparación consistió en:
Material de estudio: un alfanje (shamshir) con hoja de acero damasquino, empuñadura de asta de rinoceronte, cruceta metálica y vaina de terciopelo verde con herrajes dorados.
Técnicas analíticas empleadas:

- Ablación por láser.
- Espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP).
- Microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Ultrasonidos.
- Ensayos de dureza superficial.
- Preparación para restauración:
- Limpieza inicial de la hoja con abrasivos controlados (papel de grano 400–1200) y pulido con alúmina α (0,3 µm) y γ (0,05 µm).
- Limpieza de elementos metálicos y damasquinados en oro con fórmulas tradicionales a base de sustancias naturales (zumo de manzana ácida, cera de carnauba, jabones de ceniza).
- Ataque químico controlado con Nital al 4 % para revelar las vetas características del acero damasquino.
- Protección final mediante laca zapón (nitrocelulosa en acetona).

Resultados

- El análisis químico determinó un contenido de 1,65 % de carbono en peso, con bajo nivel de impurezas, confirmando la autenticidad del acero de Damasco.

- La microscopía reveló la presencia de vetas sinuosas formadas por carburos de hierro, típicas de este acero.
- El MEB mostró que la hoja fue forjada cuidadosamente a temperaturas relativamente bajas (650–750 °C), lo que provocó la esferoidización de la cementita proeutectoide y eutectoide.
- Se comprobó que la hoja había sido damasquinada en oro, con inscripciones y firma del maestro herrero Assad Allâh Isfahânî (870 H. = 1465–1466 d.C.).
- El ataque químico reveló una estructura de vetas serpenteantes y patrones decorativos bien conservados tras la restauración.
- La restauración permitió recuperar el brillo, eliminar óxidos y proteger la superficie, manteniendo las inscripciones y decoraciones originales.

Conclusiones

El sable de Mehemet Alí quedó caracterizado como un auténtico acero de Damasco de gran calidad, forjado según las mejores tradiciones metalúrgicas.
La traducción de sus inscripciones confirmó la autoría del maestro herrero Assad Allâh Isfahânî, siendo una de las piezas más antiguas conocidas de su producción.
Su estilo y características permiten relacionarlo con el armamento mameluco de los siglos XV–XVI.
La microestructura mostró un dominio excepcional de las técnicas de forja y temple, con cementita globalizada y perlita fina.
El revenido localizado en la zona de la empuñadura demuestra un conocimiento avanzado de los tratamientos térmicos para reforzar la tenacidad en zonas críticas.
El sable fue un obsequio diplomático de Mehemet Alí al cónsul español Antonio Estéfani, lo que refuerza su importancia histórica.
Su restauración y estudio revalorizan la pieza, que hoy se reconoce como una de las mejores espadas de acero de Damasco conservadas en museos europeos

Criado, A. J., Martínez, J. A., Calabrés, R., & Arias, D. (1997). Fabricación del acero de Damasco: estudio metalográfico. *Revista de Metalurgia*, *33*(1), 44-49. https://doi.org/10.3989/revmetalm.1997.v33.i1.878

Materiales y Preparación

Materiales base: Aceros hipereutectoides con un contenido de carbono entre 1,4 y 1,6 % (F-516 y F-517, de composición equivalente a los aceros de Damasco históricos).

Métodos de obtención del acero:

- Carburación de hierro forjado.
- Descarburación de fundición blanca. *(Ambos métodos fueron probados, aunque para el estudio se usaron aceros comerciales uniformes para garantizar consistencia).*

Forja en caliente: Se trabajó entre 650 y 850 °C (rojo cereza a rojo sangre), con martillo manual sobre yunque. Se utilizó un termopar para control de temperatura.

Muestras preparadas:

- Probetas prismáticas de 20 × 4 × 50 mm, con reducciones hasta el 75 %.
- Una daga y una tajadera forjadas según el método medieval, usadas para validar las propiedades mecánicas.

Temple: Inmersiones sucesivas en agua a temperatura ambiente (750–800 °C tras calentamiento de 5 minutos), ajustando severidad según el tamaño de las piezas.

Ensayos y análisis:

- Ensayos de dureza Rockwell C (Equotip).
- Microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Ataque químico con Nital modificado (45 % en masa) durante 15 s.

Resultados

Los aceros con 1,3–2,1 % C mostraron alta dureza y resistencia al desgaste, pero su fragilidad solo se redujo cuando la forja se realizó en el rango de 650–850 °C. La forja trituró la cementita proeutectoide de los límites de grano y la redistribuyó en bandas en la dirección de forja, mejorando la tenacidad.

La estructura típica observada fue:

- Normalizado: cementita proeutectoide en límites de grano + cementita acicular Widmanstätten.
- Forjado: cementita proeutectoide triturada y esferoizada, distribuida en matriz ferrítica y perlítica.
- Templado: matriz martensítica con cementita esferoizada en bandas.

El temple en agua a 750–800 °C produjo durezas de 65–67 HRC (832–900 HV).

El ataque ácido reveló las estrías serpentiformes características del acero damasquino.

Conclusiones

La forja en caliente entre 650 y 850 °C es la etapa crítica para obtener aceros damasquinos con alta tenacidad, evitando la fragilidad asociada al alto contenido de carbono.
El temple en agua, realizado tras un breve calentamiento a 750–800 °C, permite obtener una microestructura martensítica muy dura, con cementita esferoizada en bandas.
La severidad del temple y el control de tiempos de inmersión influyen directamente en la tenacidad y dureza final del acero.
Las estrías superficiales características aparecen tras el ataque ácido, aunque no siempre son indicativas de máxima calidad, ya que dependen también del contenido de carbono.
El trabajo demuestra que la combinación de alta dureza y tenacidad en el acero de Damasco se debía a la forja controlada a bajas temperaturas y al temple adecuado, secretos metalúrgicos que se habían perdido en Europa medieval.

Daramola, O., Adewuyi, B., & Oladele, I. (2010). Effects of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Rolled Medium Carbon Steel. *Journal Of Minerals And Materials Characterization And Engineering*, *09*(08), 693- 708. https://doi.org/10.4236/jmmce.2010.98050

Materiales y Preparación

Material empleado: barras de acero al carbono medio laminado de 12 mm de diámetro.

Composición química (en % en peso): C 0,353; Si 0,290; Mn 0,987; P 0,050; S 0,057; Cr 0,071; Ni 0,110; Cu 0,185; Fe 97,805, entre otros elementos minoritarios. Preparación de probetas: Se elaboraron muestras para ensayos de tracción, impacto, dureza y metalografía.

Tratamientos térmicos aplicados:

- Q + Q + L + T: doble temple (830 °C, 20 min, enfriado en agua) → lamelarización (745 °C, 20 min, agua) → revenido (480 °C, 30 min).
- Q + L + T: temple único (830 °C, 20 min, agua) → lamelarización (745 °C, 20 min, agua) → revenido (480 °C, 30 min).
- L + T: lamelarización (745 °C, 20 min, agua) → revenido (480 °C, 30 min).

Ensayos realizados:

- Tracción (resistencia a la fluencia, resistencia última, alargamiento, reducción de área).
- Impacto Izod con entalla en V.
- Dureza Rockwell (HRA).
- Examen metalográfico con microscopía óptica a 400× tras pulido y ataque con nital al 2 %.

Resultados

Propiedades mecánicas:

- Las muestras tratadas térmicamente presentaron mayor resistencia a la tracción y alargamiento que el acero en estado laminado.
- El tratamiento Q + Q + L + T a 745 °C alcanzó los mejores resultados:
- σy ≈ 489 N/mm², σu ≈ 618 N/mm², alargamiento 22 %, dureza 61,5 HRA, impacto ≈ 58 J.

En general, las probetas tratadas mostraron mejor combinación de dureza y ductilidad en comparación con el acero en estado laminado.

Microestructura:

- El acero laminado presentó microestructura perlítica.
- Los tratamientos generaron microestructuras dúplex ferrita–martensita, con martensita laminar aportando resistencia y ferrita aportando ductilidad.

- En algunos casos se observó también bainita y austenita retenida.

Conclusiones

El tratamiento Q + Q + L + T a 745 °C proporcionó la mejor combinación de propiedades mecánicas, con elevada resistencia a la tracción, buena ductilidad, impacto y dureza, resultando atractivo para aplicaciones estructurales.
Los tratamientos térmicos estudiados permitieron transformar la microestructura perlítica inicial en una estructura dúplex ferrita–martensita, lo que explica la mejora en las propiedades.
Los resultados confirman que el acero al carbono medio laminado tratado térmicamente puede usarse en componentes estructurales de alta resistencia y buena conformabilidad en frío.

Duarte, A. C. R., Mendes, R. S., Fontana, M., Da Silva, F. R. F., De Castro,

G. G. P., & Lins, J. F. C. (2018). Microstructural Evolution of a Pearlitic Steel Subjected to Thermomechanical Processing. *Materials Research*, *21*(2). https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-1065

Materiales y Preparación

Material empleado: alambre de acero perlítico SAE 1070.
Composición química (% en peso): 0,712 C; 0,489 Mn; 0,225 Si; 0,016 Cr; 0,009 Cu; 0,006 Ni; 0,005 Mo; 0,01

N; Fe balance.

- Condición inicial: alambre de 5,50 mm de diámetro, producido por laminación en caliente con enfriamiento continuo.

- Deformación por trefilado: 12 pasadas sucesivas con reducción de área del 15– 20 % por paso, hasta un diámetro final de 1,55 mm.

- Tratamiento térmico posterior: recocido en horno tubular a 1000 °C durante 5 minutos, sin atmósfera protectora ni control de velocidad de enfriamiento.

- Caracterización microestructural: microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM).

Resultados

Material inicial: microestructura perlítica predominante con pequeñas fracciones de ferrita proeutectoide. Las colonias perlíticas mostraron orientaciones aleatorias.

Material deformado por trefilado:

- Formación de la estructura “curling” en sección transversal, producto de la fragmentación de lamelas de cementita y el retorcimiento de las lamelas de ferrita.
- En la sección longitudinal, las lamelas se alinearon con la dirección de trefilado.
- Se observó reducción del espaciamiento interlamelar y del grosor de las lamelas de cementita.
- La microestructura resultó anisotrópica: en el núcleo había lamelas en transición de alineamiento, mientras que cerca de la superficie se observaban lamelas más finas y completamente alineadas.

Material recocido (1000 °C, 5 min):

- La estructura “curling” desapareció, indicando la acción de fenómenos de recuperación y transformación de fases.
- Se formaron algunos granos recristalizados, aunque en baja proporción.
- El proceso dominante fue la recuperación, que redujo la densidad de dislocaciones y reorganizó defectos sin un recristalizado completo.
- Persistió un menor espaciamiento interlamelar respecto al material inicial.

Conclusiones

El trefilado severo del acero perlítico SAE 1070 genera una estructura altamente anisotrópica, caracterizada por la formación de la estructura curling y la alineación progresiva de las lamelas en la dirección de deformación.
La reducción del espaciamiento interlamelar y el aumento de la fracción de interfaces ferrita–cementita contribuyen significativamente al endurecimiento del acero tras la deformación.

El recocido a 1000 °C durante 5 min favoreció principalmente la recuperación, mientras que la recristalización fue limitada debido a la fuerte textura y a la alta densidad de interfaces generadas durante el trefilado.

Factores como la textura <110> y la fragmentación de cementita actuaron como inhibidores de la recristalización, lo que explica por qué el material mostró recuperación como fenómeno predominante.

El estudio confirma que la evolución microestructural del acero perlítico bajo procesado termo mecánico está gobernada por la interacción entre la alineación de las lamelas, la formación de estructuras de curling y los mecanismos de recuperación durante el tratamiento térmico

6. METODOLOGÍA PROPUESTA

El presente proyecto de investigación se llevará a cabo a través de una metodología experimental y comparativa, dividida en tres fases principales: fabricación del material, tratamientos térmicos y caracterización de las propiedades.

6.1 Fase 1: Fabricación del Acero Damasquino

- **Selección de Materiales:** Se adquirirán diez barras planas de acero con dimensiones cercanas a 300 x 30 x 3.5 mm. Cinco de estas barras serán de acero 1095 y las otras cinco de acero 15N20.
- **Preparación del "Paquete"**: Las barras se lijarán y se apilarán de forma alternada, comenzando y terminando con una barra de acero 1095. Se soldarán los extremos con soldadura eléctrica (soldadura de punto) para mantenerlas unidas durante la forja.
- **Soldadura por Forja:** El paquete de barras se calentará en un horno de forja a una temperatura controlada (aproximadamente 1200 °C) hasta que alcance el punto de soldadura. Posteriormente, se aplicará presión con un martillo de forja o prensa hidráulica para compactar las capas y lograr una unión sólida. Este proceso se repetirá varias veces hasta que el paquete se convierta en una única pieza monolítica de aproximadamente 15 mm de espesor.
- **Acondicionamiento del Material:** Una vez forjado, el material se someterá a un recocido para aliviar las tensiones internas y facilitar el corte. Se cortarán probetas con dimensiones estandarizadas a partir del material forjado para las fases siguientes. Adicionalmente, se prepararán probetas de los aceros base (1095 y 15N20) por separado.

6.2 Fase 2: Aplicación de Tratamientos Térmicos

Las probetas de cada material (acero damasquino, 1095 y 15N20) se dividirán en tres grupos para aplicarles los siguientes tratamientos térmicos:

- **Grupo 1 (Temple):** Las probetas se calentarán hasta la temperatura de austenización (aproximadamente 815 °C) y se sumergirán rápidamente en aceite para un enfriamiento brusco.
- **Grupo 2 (Revenido):** Las probetas de este grupo, previamente templadas, se recalentarán a una temperatura moderada (aproximadamente 200 °C) durante una hora y se enfriarán al aire.
- **Grupo 3 (Recocido):** Las probetas se calentarán a una temperatura elevada (aproximadamente 800 °C) y se dejarán enfriar lentamente dentro del horno.

6.3 Fase 3: Caracterización y Análisis de Resultados

- Análisis de Dureza: Se realizarán mediciones de dureza y microdureza a todas las probetas tratadas.
- **Dureza Macro:** Se utilizará un durómetro Rockwell para medir la dureza general de cada probeta, en sus diferentes estados de tratamiento.
- **Microdureza:** Empleando un microdurómetro Vickers, se realizarán mediciones en las probetas de acero damasquino en puntos específicos: dentro de las capas de acero 1095, dentro de las capas de 15N20, y en la interfaz de unión entre ambas.
- **Análisis Microestructural:** Se prepararán las probetas para el análisis metalográfico.
- **Preparación**: Las muestras se pulirán y se atacarán con una solución de cloruro férrico para el acero damasquino y Nital al 3% para los aceros base, revelando su microestructura.
- **Observación con Estereoscopio:** Se utilizará un estereoscopio para inspeccionar la calidad de la soldadura, la nitidez del patrón y la ausencia de defectos en la superficie.
- **Análisis Comparativo:** Se tabularán y compararán los datos de dureza y microdureza obtenidos. Se analizarán las micrografías para relacionar las propiedades mecánicas con las estructuras internas de los materiales. Esto permitirá determinar cómo el proceso de forja y los tratamientos térmicos modificaron las propiedades de los aceros base y si el acero damasquino resultante posee una combinación de propiedades mejoradas.

7. DESARROLLO EXPERIMENATAL

Para fabricar la aleación, se necesitó establecer los parámetros de la muestra y su fabricación. Lo primero era que fuera una muestra con el tamaño suficiente para su estudio, que los materiales fueran los correctos y que el proceso de creación pudiera ser cuantificable en lo mayor posible.

7.1 Obtención del material base

Para obtener material base, recurrimos a suministros para cuchillos (proveedores de acero y herramientas en España), los cuales nos previeron los aceros 1095 y 15N20, con las medidas de 3.5x40x1000 mm y 3x38x1000 mm respectivamente. Así mismo cuentan con una composición química de C:0.95-1.05 Si:0.25 Mn:0.70 para el 1095 y una composición química de C: 0.75 Si:0.30 Mn:0.40 Ni:2.00 para el 15N20.

7.2 Fabricación de la aleación

Para fabricar la aleación, requerimos de contar con las herramientas adecuadas para medir con certeza la temperatura y carga para creación de la aleación mediante soldadura de forja, para ello contratamos a la empresa española ubicada en Barcelona llamada fantastic-factoryla cual accedió a fabricarnos la pieza de acero aleado.

Para la creación se cortaron los aceros en las siguientes medidas:

- **Acero 1095**: Se cortaron en trozos de 3.8x38x145 mm.
- **Acero 15N20**: Se cortaron en trozos de 3x36x145 mm.

Una vez teniendo 5 piezas de cada acero, se procedió a lavarlas y limpiarlas con acetona, luego se apilaron en orden intercalado siendo una capa de acero 1095 y la siguiente cada de acero 15N20, tal que se tenía un lingote de 10 capas. Posteriormente se soldaron cuidadosamente con soldadura E7018 en ambos extremos, para evitar que se separen las capas de acero, así como se ilustra en la Figura 1.

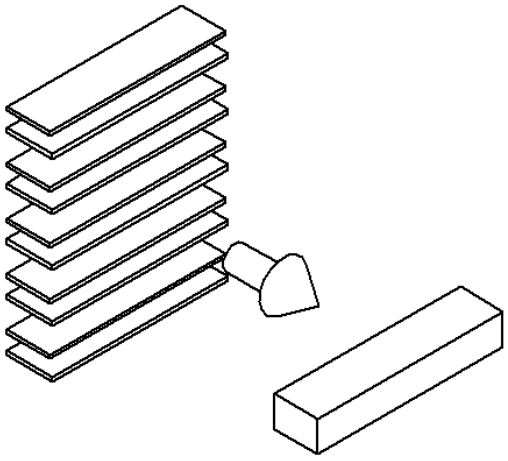


Figura 1 Ilustración de la unión de las 10 capas de acero. (Fuente propia)

Lo siguiente a realizar fue insertar el lingote en una fragua de gas con regulación de temperatura durante 15 minutos a una temperatura constante de 1350 °C, luego se extrajo de la fragua, para cubrir el lingote con fundente y se devolvió a la fragua durante 45 minutos a temperatura constante de 1350 °C, esto para garantizar que los aceros ya están en temperatura de forja.

Una vez pasado el tiempo, se extrae el lingote de la fragua, se lleva rápidamente a la Prensa hidráulica para forja modelo PV2, la cual somete el lingote a una carga fija de 21 toneladas. El proceso consiste en caldear las capas de acero en una sola pieza, para ello se presiona el acero con la matriz de prensar 23 de la PV2, iniciando desde el inicio del lingote por la clara plana, hasta llegar al final de este, luego se repite desde la parte delgada del lingote, para que mantenga la forma de lingote. Este proceso se repitió 3 veces hasta que las capas de acero quedaron unidas por la soldadura de forja. Parte de este proceso se puede evidenciar en la Figura 2.

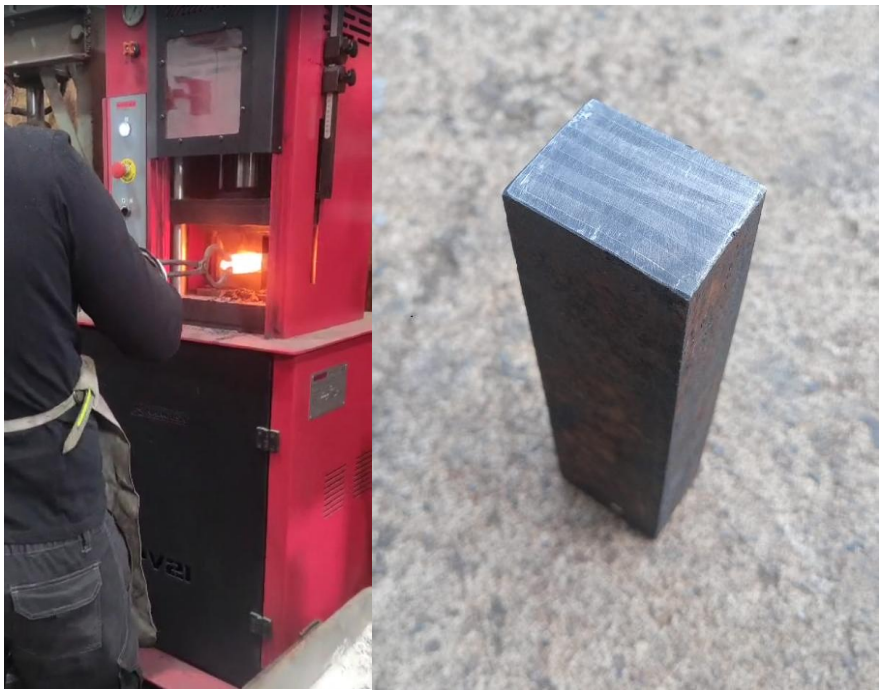


Figura 2 Proceso de soldadura de forja en la PV2 a la izquierda y a la derecha el lingote forjado. (Fuente propia)

Una vez caldeado el lingote, este se dejó enfriar a temperatura ambiente. El lingote final forjado obtuvo las siguientes dimensiones 25,4x35,5x153,7 mm y se puede evidenciar en la Figura 2 y presenta un patrón de acero damasquino simple de 10 capas.

8. PREPARACIÓN DE PROBETAS

8.1 Corte de probetas

Una vez tenido el lingote terminado se precedió a cortar las probetas en la Cortadora abrasiva manual Metkon Metacut 250 ubicada en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede tecnológica Edificio Techne piso 2. Se cortaron 4 probetas de tamaño similar del lingote de acero aleado, luego se cortaron 4 probetas de la muestra de acero 1095 y 4 de la muestra del acero 15N20. Se puede ver una imagen de la cortadora de probetas en la Figura 3 a continuación.



Figura 3 Cortadora de probetas metalográfica. (Fuente propia)

8.2 Clasificación de probetas

Una vez con las 12 probetas, se procede a clasificarlas según los tratamientos a realizar en cada una, las probetas fueron clasificadas en letras y números, a las probetas de acero aleado se les asignó la letra D, a las probetas de acero 1095 se les asigno la letra C y a las probetas de acero 15N20 se les asignó la letra N. Luego se les asigno un número del 1 al 4, siendo el número 1 dado a las probetas de estado de suministro o estado de pos forja para la probeta de acero aleado. A las probetas que se les iba a realizar el tratamiento térmico de templado se les asignó el número 2. A las probetas que se les iba a realizar el tratamiento térmico de revenido, se les asignó el número 3, y, por último, a las probetas que se les iba a realizar el tratamiento térmico de recocido, se les asignó el número 4. La clasificación completa de las probetas se puede ver en la Tabla 1 a continuación.

Referencias	15n20	1095	Damasquino
Suministro/Pos Forja	N1	C1	D1
Temple	N2	C2	D2
Temple+Revenido	N3	C3	D3
Recocido	N4	C4	D4

Tabla 1 Clasificación de probetas (Fuente propia)

8.3 Tamaño de probetas antes de los tratamientos térmicos

Una vez clasificadas todas las probetas, se midieron las probetas con un Micrómetro Exterior 0-25mm 0.01mm Métrico De Precisión, las medidas se tabularon en la Tabla 2, que se puede ver a continuación.

Probeta	Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)
C1	3,4	18,12	17,95
C2	3,4	19,01	18,01
C3	3,4	19,13	18,87
C4	3,4	19,16	18,8
D1	16,42	24,51	19,28
D2	15,39	24,44	18,58
D3	17,41	24,47	18,71
D4	15,46	20,60	19,17
N1	3,00	20,12	18.38
N2	3,00	17,37	15,67
N3	3,00	20,39	17,68
N4	3,00	18,50	17,35

Tabla 2 Dimensiones de probetas antes del tratamiento térmico. (Fuente propia)

8.4 Tratamiento térmico de probetas

Las probetas fueron tratadas térmicamente, se les aplicó temple, revenido y recocido, para ello se calculó el tiempo de sostenimiento y la temperatura a sostener, todo ello se describe a continuación.

8.4.1 Fichas técnicas de los aceros

Para identificar correctamente el ciclo térmico correcto de cada probeta, se debe conocer su composición química exacta, ficha técnica y recomendaciones del fabricante, es por ello por lo que la sección de recomendaciones de las fichas técnicas de los aceros se muestran continuación:

Ficha técnica de tratamientos térmicos de MetalZenith para el acero 1095				
Tratamiento	Rango de temperatura (°C/°F)	Tiempo típico de remojo	Método de enfriamiento	Propósito principal / Resultado esperado
Recocido	800-900°C / 1472-1652 °F	1-2 horas	Aire	Reducir la dureza, mejorar la ductilidad.
Temple	800-850°C / 1472-1562 °F	30 minutos	Aceite o agua	Aumentar la dureza
templado	150-200°C / 302-392°F	1 hora	Aire	Reduce la fragilidad, mejora la tenacidad.

Tabla 4 Ficha tratamientos térmicos 1095 de MetalZenith. (Fuente propia)

Ficha técnica de tratamientos térmicos de MetalZenith para el acero 15N20				
Tratamiento	Rango de temperatura (°C/°F)	Tiempo típico de remojo	Método de enfriamiento	Propósito principal / Resultado esperado
Recocido	700-800°C / 1292-1472 °F	1-2 horas	Aire	Reducir la dureza, mejorar la ductilidad.
Temple	800-850°C / 1472-1562 °F	30 minutos	Aceite o agua	Aumentar la dureza
templado	200-300°C / 392-572°F	1 hora	Aire	Reduce la fragilidad, mejora la tenacidad.

Tabla 3 Ficha tratamientos térmicos 1095 de MetalZenith. (Fuente propia)

Hardening

- ATP-641, Turco, or similar high temperature anti-scale/decarburization coatings can be used to reduce scale or surface decarburization.
- Data is representative of controlled heat treating equipment (e.g. oven, salts, etc.) temperatures and industrial standard quenchant.
- Suggested quench oil: Parks 50--expected as quenched hardness may be lower if a slower quench oil or non-industrial quench medium is used.
- **Austenizing soak time varies 5 to 15 minutes based on heat treating equipment and cross section--soak times are reduced to minimum for people heat treating in a forge--forge heat treating without PID temperature control limits accurate means of maintaining temperature. If using calibrated, proper industrial equipment for heat treating, use the supplied extended soak times based on over all steel thickness.**
- **Do not put blades in oven when cold, insert at or just below austenizing temperature--temperature variances is for difference in stock thicknesses and a window of margin for error.**





Austenizing Temperature	Expected RC (as quenched)
1,450-1,475°F / 788-804°C Soak 5-15 minutes	64-65RC

Figura 4 Temperatura de austenización 1095 (New Jersey Steel Baron, 2026)

Hardening

- ATP-641, Turco, or similar high temperature anti-scale/decarburization coatings can be used to reduce scale or surface decarburization.
- Data is representative of controlled heat treating equipment (e.g. oven, salts, etc.) temperatures and industrial standard quenchant.
- Suggested quench oil: Parks 50--expected as quenched hardness may be lower if a slower quench oil or non-industrial quench medium is used.
- **Austenizing soak time varies 5 to 15 minutes based on heat treating equipment and cross section--soak times are reduced to minimum for people heat treating in a forge--forge heat treating without PID temperature control limits accurate means of maintaining temperature. If using calibrated, proper industrial equipment for heat treating, use the supplied extended soak times based on over all steel thickness.**
- **Do not put blades in oven when cold, insert at or just below austenizing temperature--temperature variances is for difference in stock thicknesses and a window of margin for error.**





Austenizing Temperature	Expected RC (as quenched)
1,450-1,480°F / 788-804°C Soak 5-15 minutes	64-65RC

Figura 5 Temperatura de austenización 15N20 (New Jersey Steel Baron, 2026)

8.4.2 Temperatura de sostenimiento

Una vez sabiendo el tiempo de austenización, la regla general dice que hay que sumarle 50°C a la temperatura para garantizar que haya un temple completo, el 1095 al ser un acero de tipo hipereutectoide, sería Ac3+ 50°C, mientras que el 15N20 al ser eutectoide, sería de Ac1+50°C (A. V. Giraldo).

Basado en lo anterior, se calculó que las temperaturas a emplear para los tratamientos térmicos por probeta son los que se pueden ver en la Tabla 5 a continuación:

Tratamiento térmico a realizar	# Probeta	Temperatura de sostenimiento (°C)
Temple	C2	854
Temple + Revenido	C3	199
Recocido	C4	900
Temple	N2	854
Temple + Revenido	N3	199
Recocido	N4	800
Temple	D2	854
Temple + Revenido	D3	199
Recocido	D4	800

Tabla 5 Temperatura de tratamiento térmico de probetas. (Fuente propia)

Para calcular las temperaturas de temple, debido a que ambos aceros tienen temperaturas de austenización iguales según la ficha técnica e igualmente con la temperatura de temple, se procedió a tomar la temperatura de 804°C de austenización para ambos aceros y una temperatura de 854°C para el temple. Esto se hizo igual para el revenido de las probetas, para el recocido, se tomó 900C° para el acero 1095 y 800°C para el acero 15N20 según ficha técnica. Para las probetas de acero aleado o damasquino, al estar conformada por los aceros con temperaturas de tratamiento térmico de temple y revenido igual, se dejó la misma temperatura. Para el recocido de la probeta D4, se tomó la temperatura mínima del 1095, la cual es de 800°C que es igual a la máxima del 15N20. A la probeta #1 de cada muestra, no se le realizó ningún tipo de tratamiento térmico, excluyendo al D1 que se le realizó solamente el proceso de forjado.

8.4.3 Calculo tiempos de sostenimiento

Una vez tenido las dimensiones de las probetas mostradas en la Tabla 5, procedemos a hacer cálculos para el tiempo de sostenimiento de cada tratamiento térmico realizado, para ello usamos la formula empírica de tiempo de sostenimiento.

$$t(D) = 15 + \frac{D}{2}$$

$$t = min;\ [D] = mm$$

Ecuación 1, Formula empírica de tiempo de sostenimiento.

Los tiempos de sostenimiento por probetas, se ven en la Tabla 6 a continuación.

# Probeta	Temperatura de sostenimiento (°C)	Tiempo de sostenimiento (minutos)
C2	854	17
C3	199	33,4
C4	900	34
N2	854	17
N3	199	33
N4	800	33
D2	854	23
D3	199	47
D4	800	45,46

Tabla 6 Tiempo de sostenimiento de probetas. (Fuente propia)

8.4.4 Gráficos de ciclo térmico

Antes de llevar a la mufla las probetas, es necesario tener los gráficos de ciclo térmico o rampas, para saber exactamente cómo programas la mufla y que no falle el ciclo térmico. Es por ello por lo que se realizó una gráfica o rampa para cada probeta a la que se le realizó un tratamiento térmico. Todas las gráficas se encuentran en los Anexos del documento, a continuación, se muestran únicamente las de temple.

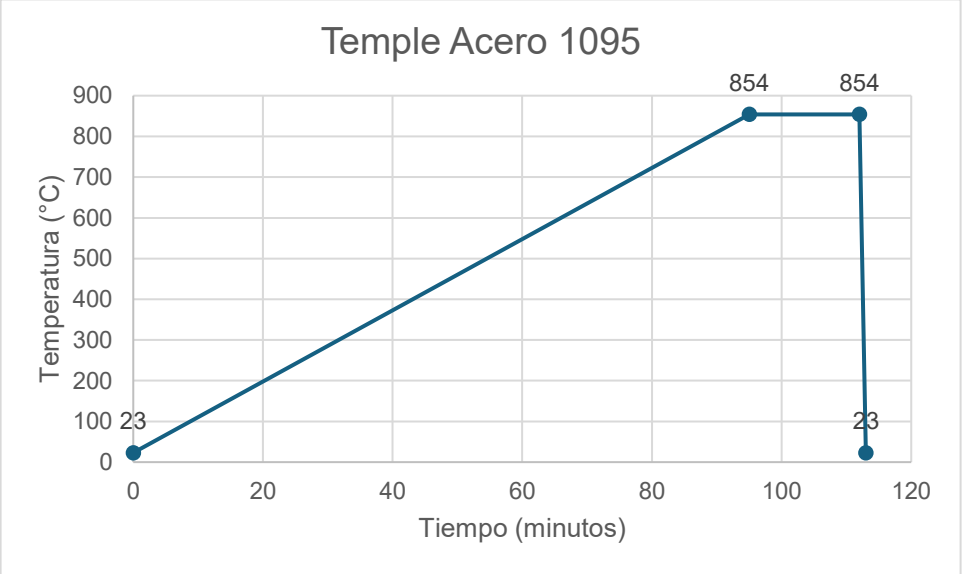


Gráfico 1 Rampa Temple para Acero 1095 (Fuente propia)

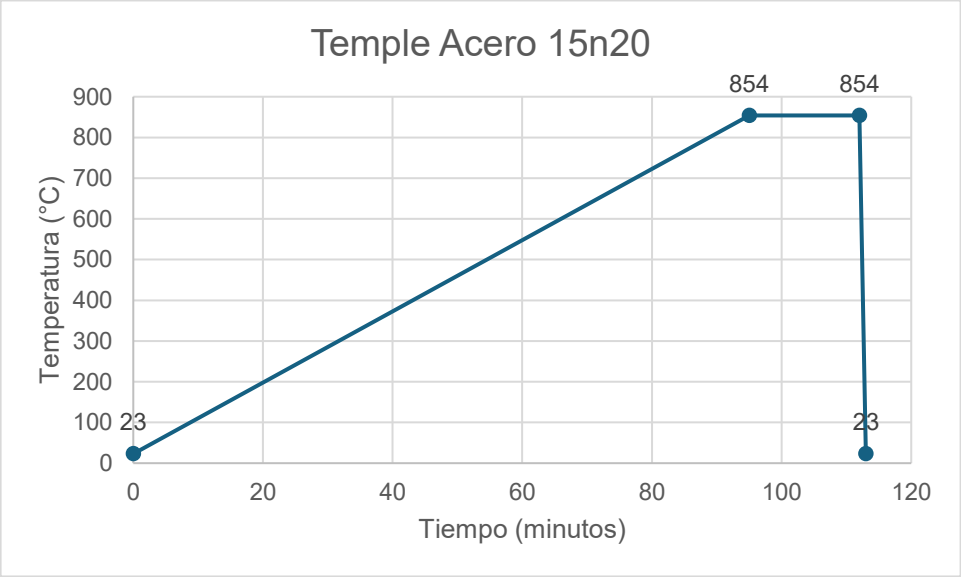


Gráfico 2 Rampa Temple para Acero 15n20 (Fuente propia)

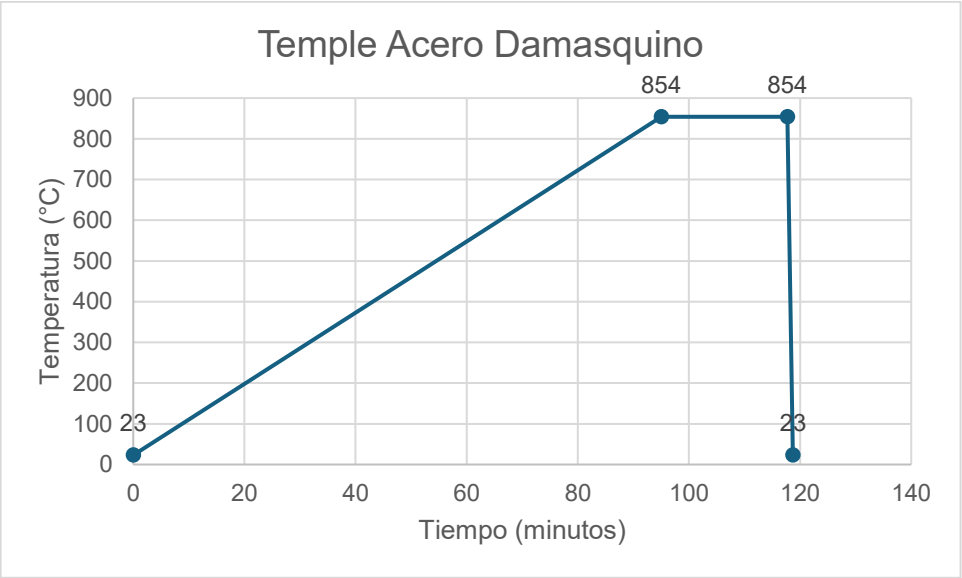


Gráfico 3 Rampa Temple para Acero Damasquino (Fuente propia)

8.4.5 Tratamiento térmico de probetas

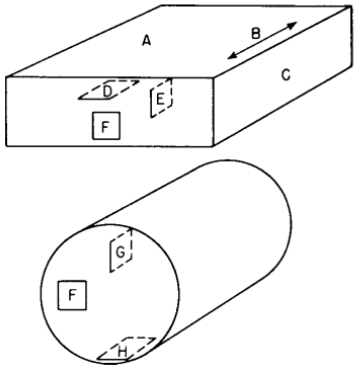
Una vez con todas las gráficas de ciclo térmico, se procedió a configurar la Mufla digital con temporizador Acequilabs MF – 2003, ubicada en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede tecnológica Edificio Techne piso 2, según cada probeta se hizo una programación de temperatura y rampas en la mufla. Las probetas C2, C3, N2 y N4 al tener gráficas iguales de temple, se introdujeron al mismo tiempo en la mufla, al terminar el tiempo de sostenimiento se extrajeron y se templaron en aceite. Posteriormente las probetas C3 y N3 se le aplicó un revenido separado debido a una diferencia menor en el tiempo de sostenimiento. La probeta D2 y D3 fueron templadas al mismo tiempo. Cada probeta fue tratada térmicamente de forma independiente exceptuando el temple de las ya mencionadas. Cabe aclarar que se tuvo que esperar a que la mufla bajara de temperatura hasta la de ambiente, para que los aceros no tuvieran algún impacto negativo debido al choque térmico. A continuación, se muestra en la Figura 6 parte del procedimiento de los tratamientos térmicos.



Figura 6 Tratamiento térmico de probetas. (Fuente propia)

8.5 Preparación de probetas según norma ASTM E3

Siguiendo los parámetros de la norma ASTM E3, donde establece cómo se deben pulir las probetas, el tipo de grano de lija y secciones para pulir, siendo en este caso, pulir 2 caras de cada probeta, una ilustración proporcionada por la misma norma se muestra a continuación.



Symbol in Diagram	Suggested Designation
A	Rolled surface
B	Direction of rolling
C	Rolled edge
D	Planar section
E	Longitudinal section perpendicular to rolled surface
F	Transverse section
G	Radial longitudinal section
H	Tangential longitudinal section

Figura 7 Método de designación de la ubicación del área mostrada en la fotomicrografía. (ASTM E3-11, 2017)

Una vez teniendo la imagen de referencia de las caras, hay que aclarar que las caras que se pulieron para las probetas fueron:
Para las probetas C y N, se pulieron las caras A y C, mientras que debido a la geometría de las probetas D, se les pulieron las caras F y C, A continuación, se muestra un ejemplo de las caras pulidas. Esto se puede entender mejor viendo la Figura 8 a continuación.

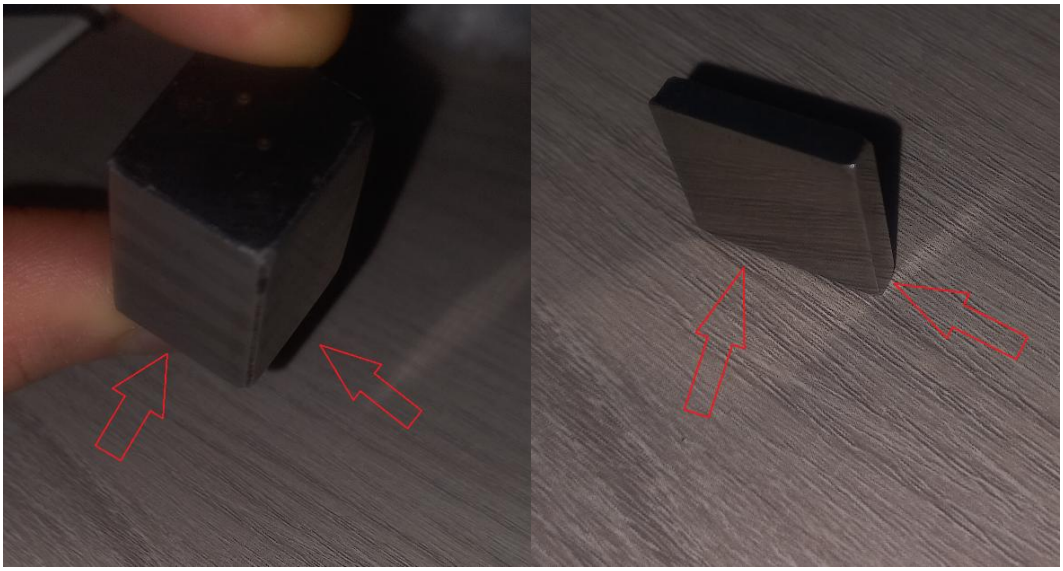


Figura 8 Señalización de caras pulidas en cada probeta. (Fuente Propia)

8.5.1 Pulido de probetas por lijado

El proceso de pulido constó de 2 etapas, la primera fue el lijado a mano, el cual, según norma, indica que se debe empezar desde un grano de lija grueso, hasta llegar a uno más fino en una superficie plana, en este caso fue una mesa de mármol, para este caso se empezó desde un grano de lija P120, hasta llegar a un grano de leja P1500, la secuencia empleada fue la siguiente: P120, P22, P320, P400, P500, P600, P1000, P1200 y P1500. El proceso detallado de lijado es tomar una cara de la probeta a lijar y moverla hacia delante y hacia atrás el tiempo suficiente hasta eliminar irregularidades en la superficie y que todas las rayas de molienda queden alineadas en una misma dirección, adicionalmente, la muestra debe girarse entre 45° y 90°, esto según especificaciones de la norma. Una ilustración se puede ver en la Figura 9 a continuación.

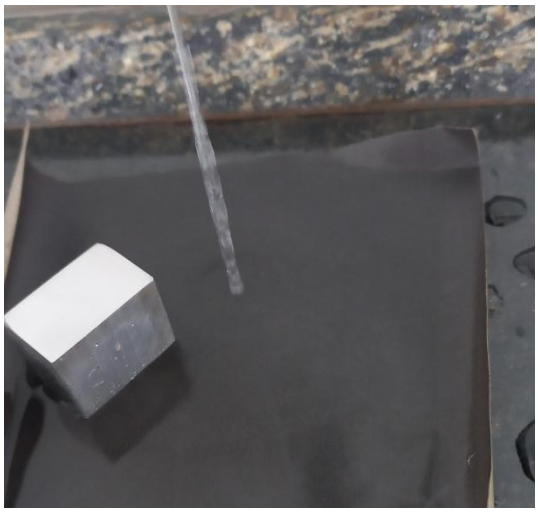


Figura 9 Pulido de caras según norma ASTM E3. (Fuente propia)

8.5.2 Pulido de acabado especular de probetas

Una vez lijadas las probetas con el grano más fino posible, se procede a pulirlas a espejo, para ello se utilizó la pulidora de probetas metalográfica o también llamado el Sistema de esmerilado y pulido Metkon Forcipol 2V, ubicada en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede tecnológica Edificio Techne piso 2, para ello se procedió a ajustar la máquina a unos 365 rpm, las probetas se pulieron en base a la norma ASTM E3. Se empleó el uso de alúmina de **0.05**µm (Al_2O_3) durante todo el proceso, flujo constante de agua, las probetas fueron pulidas hasta eliminar completamente las rayaduras de los granos de la lija P1500 y obtener una superficie pulida de espejo.

8.6 Ataque químico de probetas para revelar microestructura según norma ASTM E407-07

Para saber exactamente el tipo de ácido necesario para atacar los aceros, fue necesario recurrir a la norma ASTM E407. Según norma, para aceros al carbono, que tengan menos de 1% de carbono y menos de 4% en otros elementos, es posible usar varios tipos de ácidos, en este caso optamos por el clasificado como 74a, el cual corresponde a nital con un porcentaje que va desde del 1% al 5% y el resto del porcentaje que sea etanol o metanol.

Siguiendo la norma, se utilizó Nital al 3% durante 8 segundos para atacar químicamente a las probetas, cada una de forma individual y se revisó varias veces que estuvieran atacadas correctamente.

9. TOMA DE MUESTRAS DE MICROGRAFÍAS

Para calcular el porcentaje de fases y medir el tamaño de grano aproximado de las muestras, se utilizó el programa ImageJ, para ello se tomaron varias muestras y se promediaron los resultados, esto bajo la norma ASTM E112.

9.1 Examinación macro en estereoscopio

Una vez atacadas las muestras correctamente, se revisan en el Estereoscopio Discovery V8, ubicado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede tecnológica Edificio Techne piso 2.



Figura 10 Estereoscopio. (Fuente propia)

Utilizando el estereoscopio a 80X se pueden ver delaminaciones en las probetas D, las cuales no se apreciaban a simple vista y este es un factor para tener muy en cuenta. Todas las probetas D contaban con delaminaciones en la mayoría de las capas, exceptuando en muy pocas ocasiones, una delaminación se puede ver en la Figura 11 a continuación.

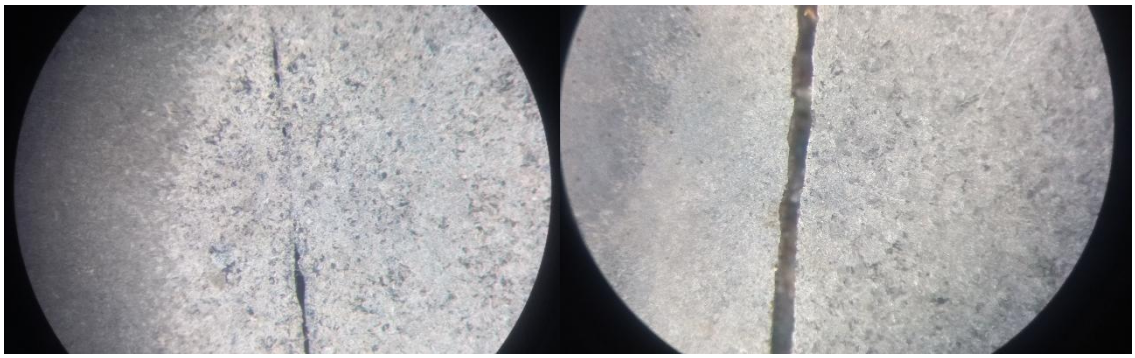


Figura 11 A la izquierda se aprecia una delaminación gradual en la probeta D3 y a la derecha una separación total de las capas en la probeta D2. (Fuente propia)

9.2 Procedimiento para la toma de micrografías según norma ASTM E3

En base a la norma ASTM E3, se menciona que los especímenes para el examen metalográfico no suelen tener un área cuadrada mayor de 12m a 25mm, para mayor comodidad.

La toma de muestras metalográficas se realizó a tomas de 100X, 200X, 500X y 1000X dependiendo de la visibilidad de la estructura. Se realizó un barrido de tomas, desde un extremo de la probeta hasta el otro y posteriormente se realizó otro barrido en la otra cara de cada probeta. Para las probetas D, se tomaron barridos tanto en el centro de las probetas siguiendo la unión de soldadura de forja, como en la capa más alejada del centro de las capas de la probeta, se puede entender mejor a continuación en la Figura 12.

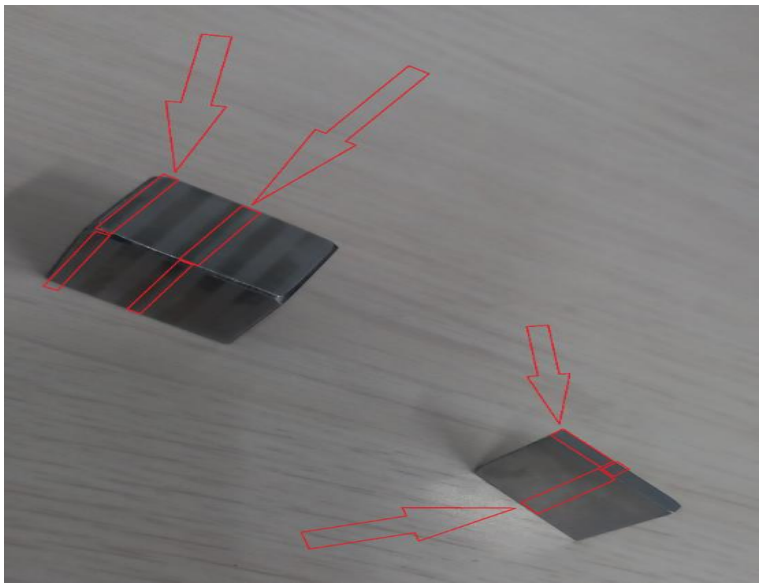


Figura 12 Secciones de barrido para las probetas, a la izquierda el barrido para las probetas D y a la derecha el barrido para las probetas C y N. (Fuente propia)

9.3 Toma de muestras metalográficas

Para la toma de muestras metalográficas se utilizó el Microscopio Axio Observer D1m ubicado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede tecnológica Edificio Techne piso 2.



Figura 13 Microscopio metalográfico. (Fuente propia)

La toma de muestras completa está ubicada en la sección de anexos. A continuación, se muestra la comparativa de fases de las probetas D1, C1 y N1 a diferentes X.

9.4 Comparación de probetas #1 a 500X y a 1000X

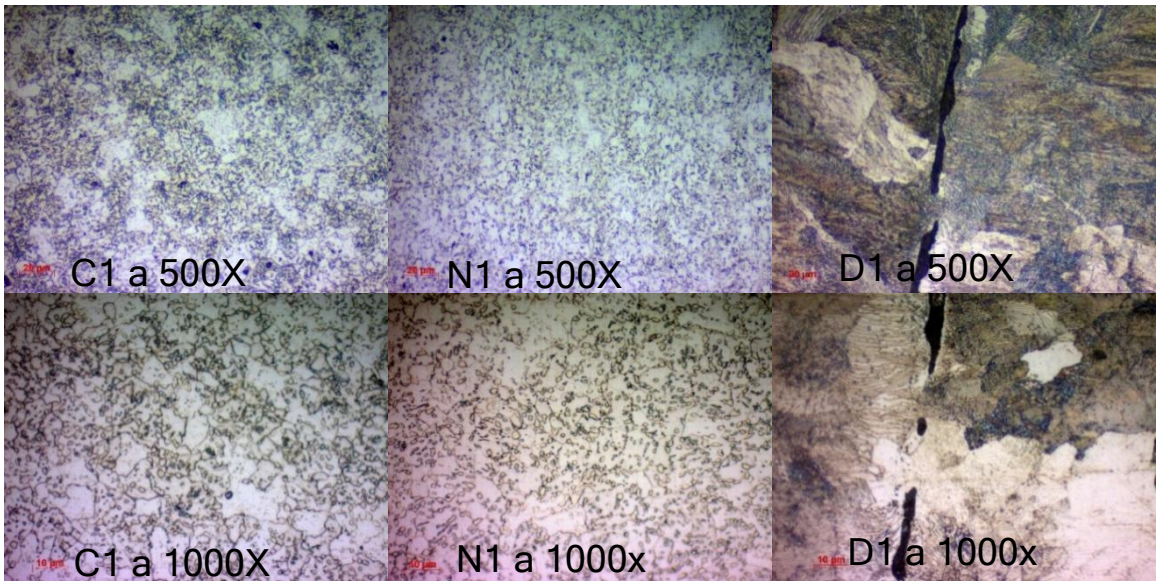


Figura 14 Comparación de Microestructuras de estado de suministro y post-forjado de probetas C1, N1 y D1. (Fuente propia)

En la figura 14, se puede observar la comparación entre las probetas de izquierda a derecha de C1, N1 y D1, de las cuales, en la C1 se puede apreciar que la fase clara continua que ocupa la mayor parte de la imagen es ferrita (hierro alfa), las partículas oscuras distribuidas por toda la matriz es cementita esferoizada (carburos de hierro Fe3C) distribuidas en porcentaje de 84,65% ferrita y 15,35% de cementita esferoizada con un tamaño promedio de 3.43 µm. En la N1 se observa igualmente que en la probeta C1, ferrita y cementita esferoizada, con una ligera diferencia de mayor concentración de cementita esferoizada en porcentajes de 87.2% de ferrita y 12,8% de cementita esferoizada con un tamaño de grano promedio de 2,98% µm. En La imagen de la probeta D1, se observan zonas de perlita y ferrita en porcentajes de 93.6% perlita y 7.4%. adicionalmente, se ve que la perlita es generalmente gruesa, tenido un tamaño de grano promedio de 48,96 µm. Por último, se ven claramente delaminaciones entre las uniones de las capas de los aceros.

9.5 Comparación de probetas #2 a 200X, 500X y 1000X

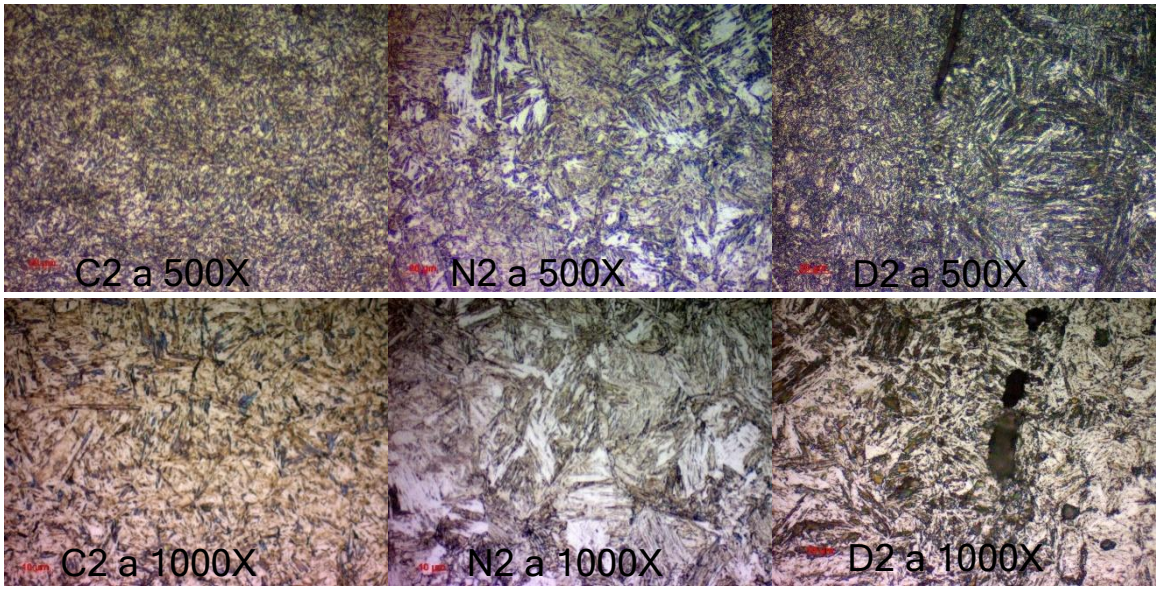


Figura 15 Comparación de microestructuras tras temple de probetas C2, N2 y D3. (Fuente propia)

En la figura 15, de la muestra de la probeta C2 se observa martensita, en porcentaje promedio de fases tiene 95.95% de martensita y 4,05% de austenita retenida, con un grosor promedio de agujas de 1 µm y un largo promedio de 4 µm. En la imagen de la probeta N2, se ve martensita y zonas de austenita retenida en porcentajes de

94,24% y austenita retenida en 5,76%, con un grosor promedio de agujas de 1 µm y un largo promedio de 5 µm. En la muestra de la probeta D2, podemos ver que, en ambos lados de la delaminación, presenta martensita con austenita retenida en porcentajes de 95,76% de martensita y 4,24% de austenita retenida, con un grosor de agujas promedio de 0,6 µm.

9.6 Comparación de probetas #3 a 500X y 1000X

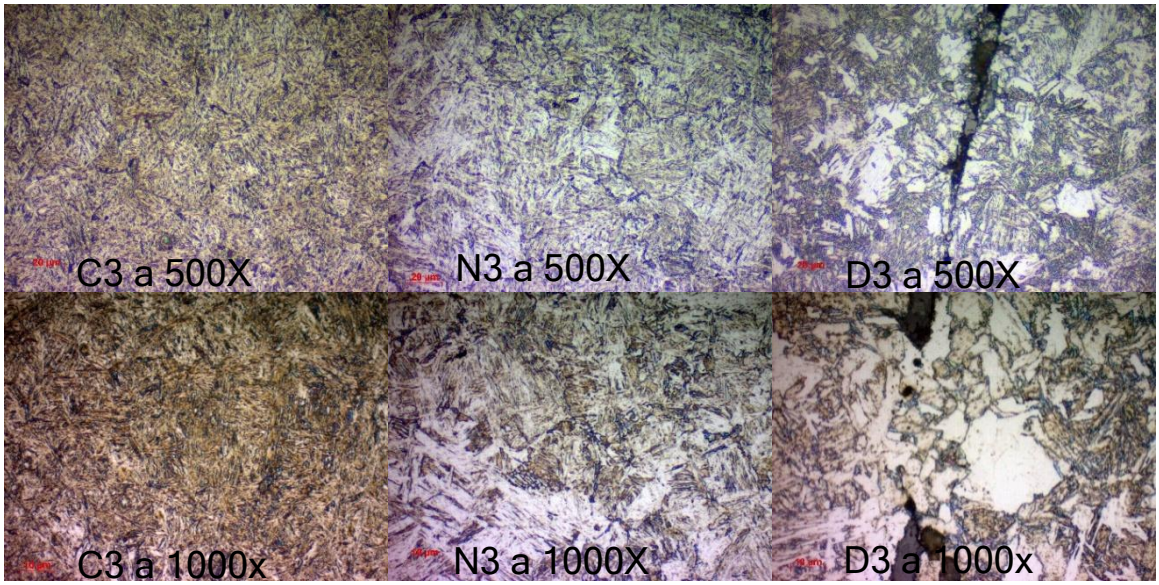


Figura 16 Comparación de microestructuras tras revenido en probetas C3, N3 y D3. (Fuente propia)

En la figura 16, en la muestra de C3, se puede observar martensita revenida y en algunas partes la aparición de austenita retenida, el promedio de porcentaje de las fases es de 92,92% de martensita revenida y de 7,08% de austenita revenida, con un grosor de agujas promedio de 0.5 µm. En la muestra de la probeta N3, se aprecia martensita revenida y austenita retenida en proporciones de 92,52% de martensita y un 7,48% de austenita revenida, con un grosor de agujas promedio de 0,7 µm. En la muestra de la probeta D3, se observa martensita revenida, austenita retenida y adicionalmente se puede ver ferrita cerca de las delaminaciones del material, en porcentajes de 91,72% de martensita, 7,04% de austenita retenida y 1,24% de ferrita, con un grosor de agujas promedio de 0,55 µm.

9.7 Comparación de probetas #4 a 500X y 1000X

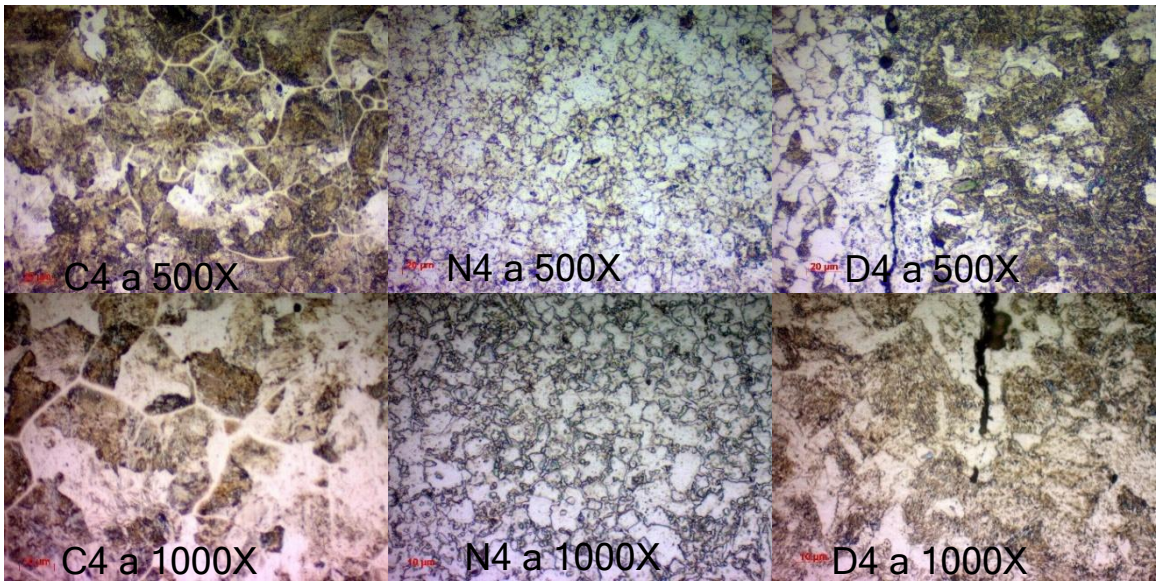


Figura 17 Comparación de microestructuras tras recocido en probetas C4, N4 y D4. (Fuente propia)

En la Figura 17, en la muestra la probeta C4, se puede ver la morfología del grano austenítico previo delineada por la cementita proeutectoide, también se puede ver perlita dentro de las delineaciones de cementita proeutectoide, el promedio de los porcentajes de fases es de 94,92% de perlita y 5,08% de cementita proeutectoide, con un tamaño de grano promedio de 24 µm. En la imagen de la probeta N4, se puede ver mayormente ferrita y algunas partes cementita esferoizada, el porcentaje de fases es de 92,45% de ferrita y 7,55% de cementita esferoizada, con un tamaño de grano promedio de 3.32 µm. En la muestra de la probeta D4, se puede ver la diferencia de fase la unión de ambos aceros, por un lado, se ve una fase mayormente ferrítica por parte del acero 1095, mientras que por el otro se ve una mayor cantidad de ferrita debido al 15N20, el promedio del porcentaje de fases es de 51,16% de perlita y 48,84% de ferrita, con un tamaño de grano promedio de 11,77 µm.

9.8 Comparación de microestructura de la probeta D1 entre unión de capas internas y unión de capas externas

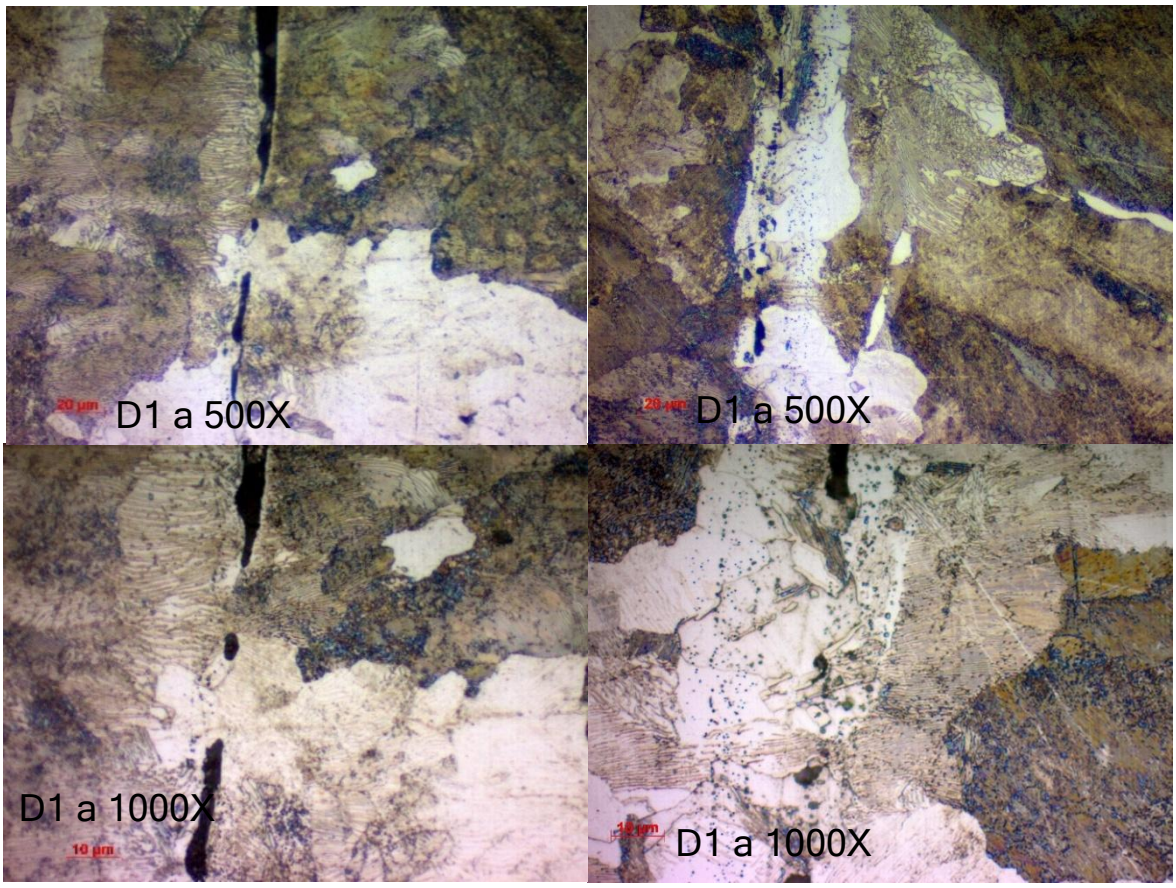


Figura 18 Barrido de micrografías en Probeta D1, a la izquierda tomas del centro, a la derecha tomas del extremo de la probeta. (Fuente propia)

En la Figura 18 se observa una matriz de perlita con evidencia de descarburación ferrítica en la zona de unión e inclusiones globulares de óxidos/fundente. La morfología del grano refleja un enfriamiento lento desde temperatura de forja.

9.9 Comparación de microestructura de la probeta D2 entre unión de capas internas y unión de capas externas

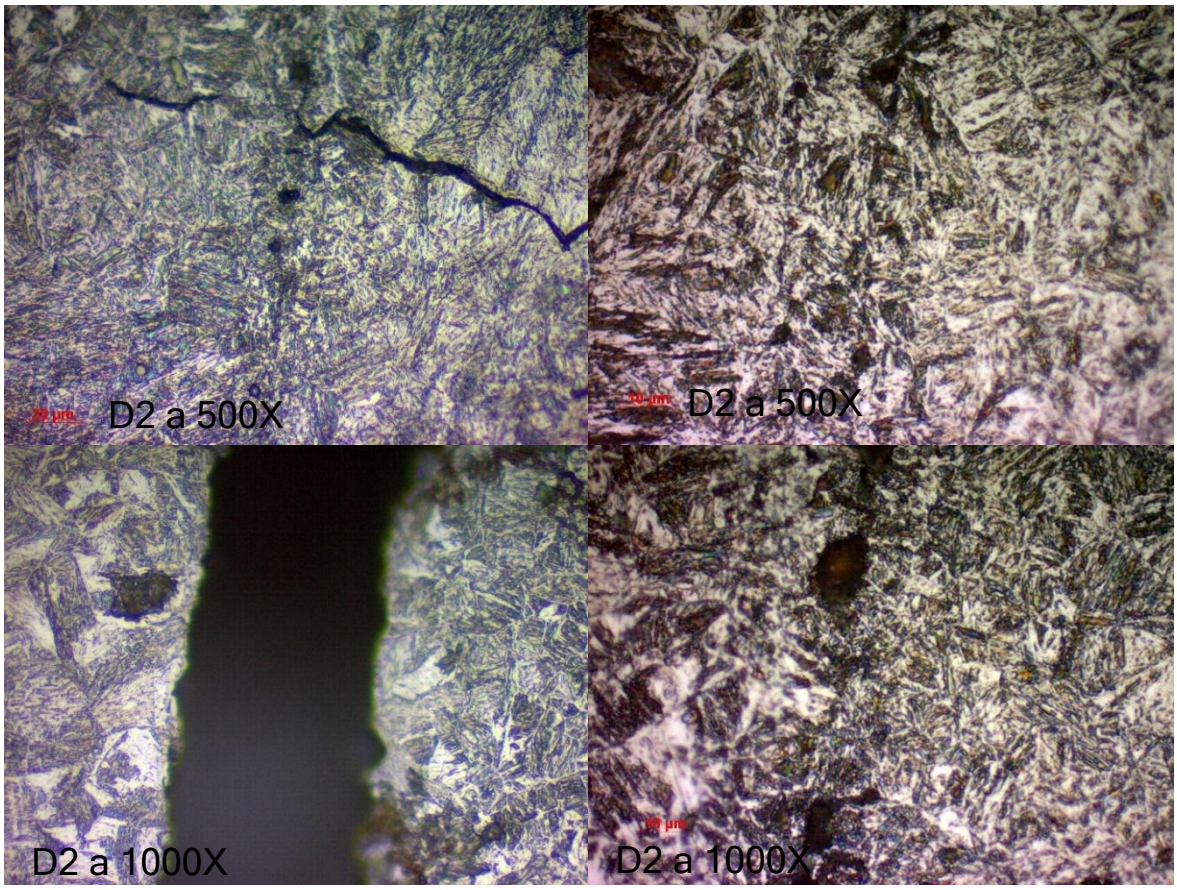


Figura 19 Barrido de micrografías en Probeta D2, a la izquierda tomas del centro, a la derecha tomas del extremo de la probeta. (Fuente propia)

En la figura 19 se observa que la microestructura consiste en una matriz de martensita, se puede ver como en las uniones de las capas de los aceros, se formó martensita, lo que indica que en esas zonas la soldadura de forja no tuvo defectos. También se puede ver una grieta de Temple, ocasionada por el choque térmico generado al templar el acero.

9.10 Comparación de microestructura de la probeta D3 entre unión de capas internas y unión de capas externas

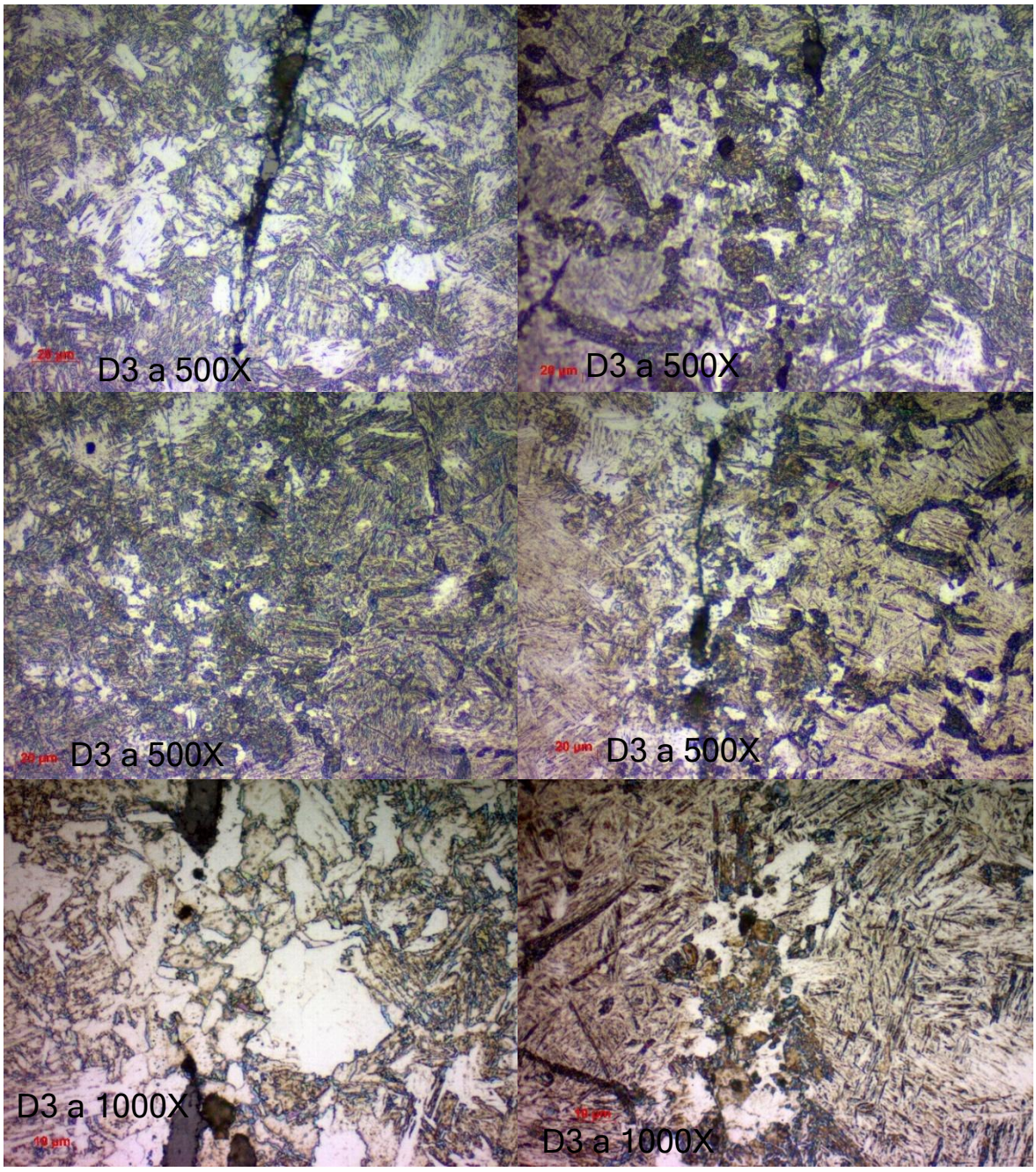


Figura 20 Barrido de micrografías en Probeta D3, a la izquierda tomas del centro, a la derecha tomas del extremo de la probeta. (Fuente propia)

En la figura 20 se observa martensita revenida, secciones con austenita retenida (mayormente en la parte del acero 15N20), adicionalmente se puede ver la aparición

de ferrita cerca de las uniones de las capas de los aceros en las zonas de delaminaciones. También se puede ver la aparición de ferrita en estas zonas, fue mayor en las zonas más centrales de las uniones de capas, mientras que, en las capas más alejadas del centro, la aparición fue menor.

9.11 Comparación de microestructura de la probeta D4 entre unión de capas internas y unión de capas externas

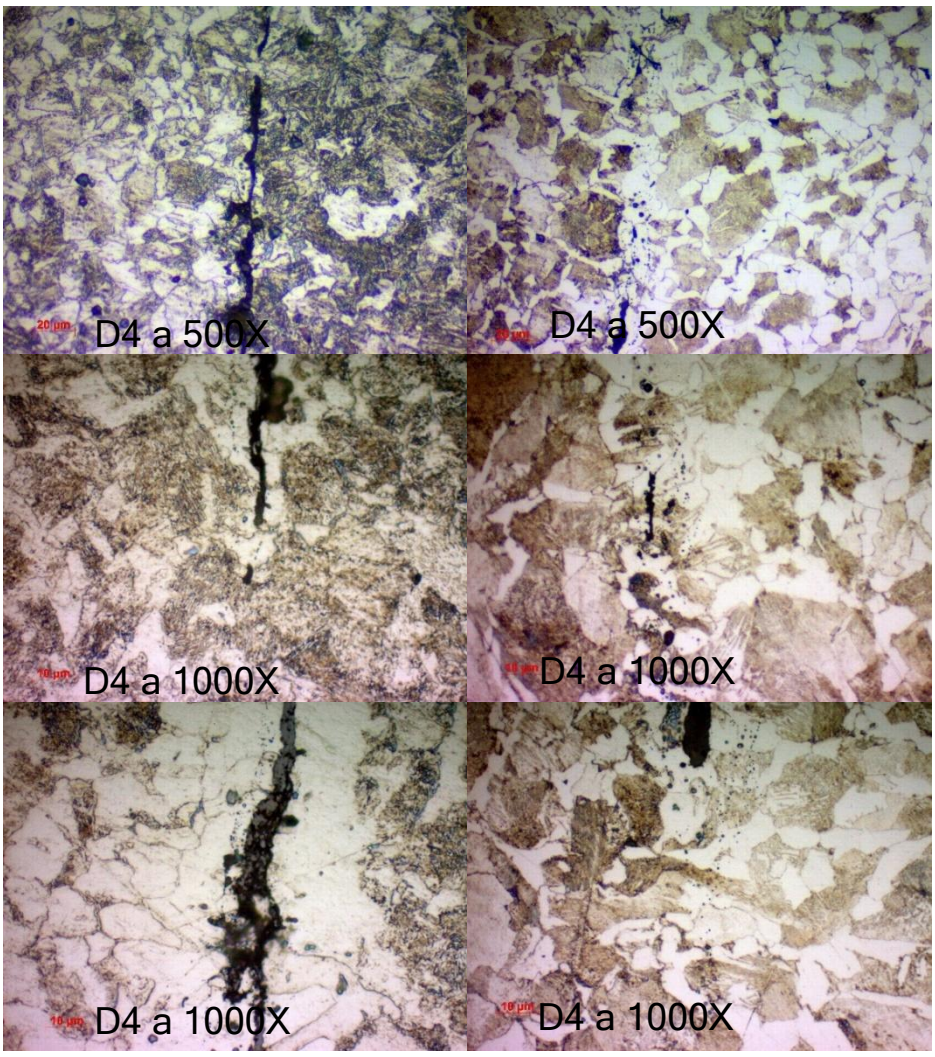


Figura 21 Barrido de micrografías en Probeta D4, a la izquierda tomas del centro, a la derecha tomas del extremo de la probeta. (Fuente propia)

En la figura 21 se observa una matriz de ferrita perlita, con mayor acumulación de ferrita cerca de las delaminaciones de las uniones de los aceros, mientras que la cantidad de ferrita visible es menor en zonas donde no hay delaminaciones cerca.

10. PRUEBAS DE MICRODUREZA (MICRO INDENTACIONES)

10.1 Normativa ASTM E384 para microindentaciones.

Para la toma de muestras de microdureza, se basó en la norma ASTM E384, la cual da indicaciones sobre las identaciones. Las pruebas de microdureza fueron realizadas con el Microdurómetro Shimadzu HMV-2 ubicado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede tecnológica Edificio Techne piso 2. Los valores de carga deben rondar de 25 a 1000 gf y estas deben durar 10 segundos, haciendo conversiones de unidades se tomó un valor cercano a 1000gf para aceros endurecidos, siendo que se tomó como valor de prueba 9.807 tal como se ve en la Figura 22.

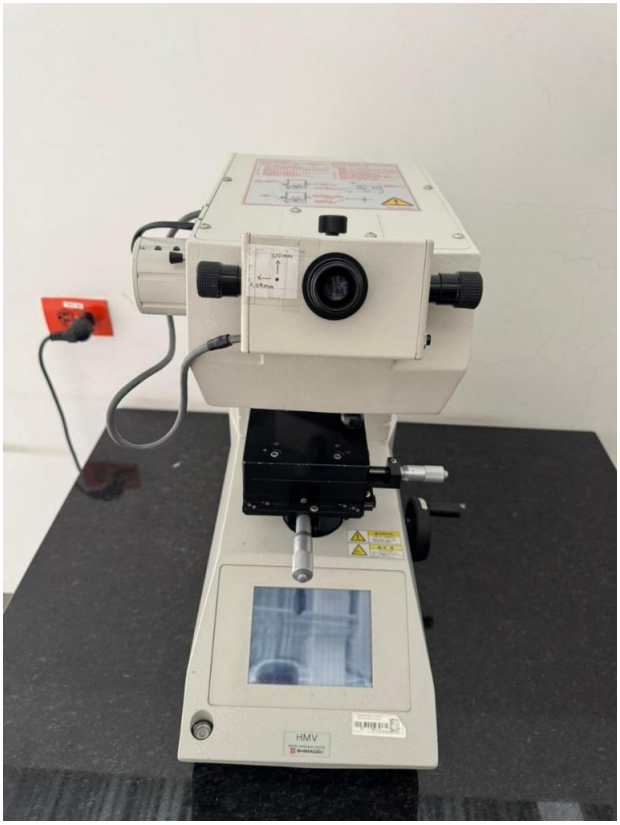


Figura 22 Microdurómetro. (Fuente propia

También se tuvo en cuenta la distancia de indentaciones según la norma, la cual dice que para Vickers esta debe ser de mínimo 2.5 huellas, para calcular esto se tomaron los valores dados por el microdurómetro dado que, si el tamaño de la diagonal más grande de la huella de una identación es de 80 µm, al multiplicarlo por

2.5, este da 0.2 milímetros o 200 µm y esta distancia se puede mover con el microdurómetro manteniendo la linealidad.

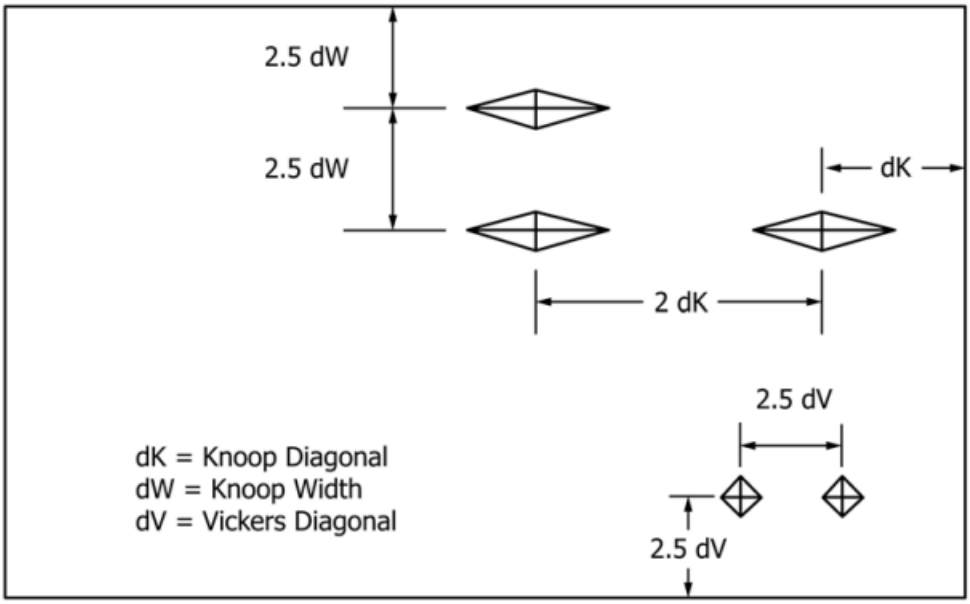


FIG. 3 Minimum Recommended Spacing for Knoop and Vickers Indentations

Figura 23 Distancia mínima de microindentaciones. (ASTM E384-22, 2022)

10.2 Cálculo de microindentaciones.

Para saber la cantidad de indentaciones mínima para tener valores de confiabilidad, la norma menciona que para una prueba piloto deben de ser 6 microindentaciones y luego se calcula la desviación estándar, margen de error y tamaño de muestra. Para las microindentaciones, la norma menciona que estas tienen una confianza del 95%.

La fórmula general de desviación estándar es la siguiente:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X-\mu)^2}{n-1}}$$

Ecuación 2. Desviación estándar

La fórmula de margen de error se muestra a continuación:

$$E = Z * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 3. Margen de error

La fórmula de tamaño de muestra se muestra a continuación:

$$n = (\frac{Z*\sigma}{E})^2$$

Ecuación 4. Tamaño de muestra

Para calcular el tamaño de muestra de cada probeta, se les realizó una prueba piloto de 6 microindentaciones, las tablas completas de microdureza se encuentran en anexos. A continuación, se muestra un ejemplo en la Tabla 5.

Prueba #	Valor Vickers
1	185
2	190
3	185
4	187
5	191
6	185
Promedio	187,166667

Tabla 7 Prueba piloto de la probeta C1 para microidentación. (Fuente propia)

Utilizando las fórmulas de desviación estándar, margen de error y tamaño de muestra se tiene que para el caso de la Tabla 5, se tomó un error del 2% y una confiabilidad del 95% (1.96) para los cálculos.

Cálculo de la desviación estándar.

$$S = \sqrt{\frac{(185 - 187.1667)^2 + (190 - 187.667)^2 + (185 - 187.1667)^2 + (187 - 187.1667)^2 +}{6 - 1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{+(191 - 187.1667)^2 + (185 - 187.1667)^2}{6 - 1}} = 2.7141$$

Ecuación 5. Cálculo de la desviación estándar

Cálculo del tamaño de muestra.

$$n = (\frac{1.96*2.71141}{187.1667*0.02})^2 = 2.0196$$

Ecuación 6. Cálculo del tamaño de muestra

Como resultado tenemos un tamaño de muestra de 2.0196 lo que es igual a 3 muestras, esto es lógico, ya que la diferencia en medidas de la prueba piloto no es mucha.

Una vez explicado el método para los cálculos del tamaño de muestra, se realizaron dichos cálculos para todas las probetas, los resultados están en la Tabla 8 a continuación.

# Probeta	Promedio de dureza prueba piloto en Vickers	Tamaño de muestra
C1	187,167	3
C2	742,833	10
C3	696,167	35
C4	330,167	7
N1	192,833	5
N2	535,167	15
N3	466,5	19
N4	211	2

Tabla 8 Tamaño de muestra para las probetas de microidentación. (Fuente propia)

10.3 Toma de pruebas de microdureza

Para la toma de microdurezas, debido a que algunas muestras no era necesario tomar tantas muestras debido a que no tenían tanta variación en sus durezas, pero de igual forma, se le tomaron por lo menos 15 muestras a cada una. A las probetas D, se les tomó muestras de dureza en 4 secciones diferentes, 2 en las capas más

internas y 2 en las capas más externas, esto fue en la misma zona que se les realizó las tomas de micrografías, esto para comprar las durezas entre capas internas y externas de los aceros 1095 y 15N20. A continuación se muestran gráficos de comparación de la microdureza promedio en Vickers con desviación estándar de las probetas por clasificación, la palabra Externo hace referencia a la capa más externas del material de dicha probeta, mientras que la Interno hace referencia a la capa más interna del material de dicha probeta.

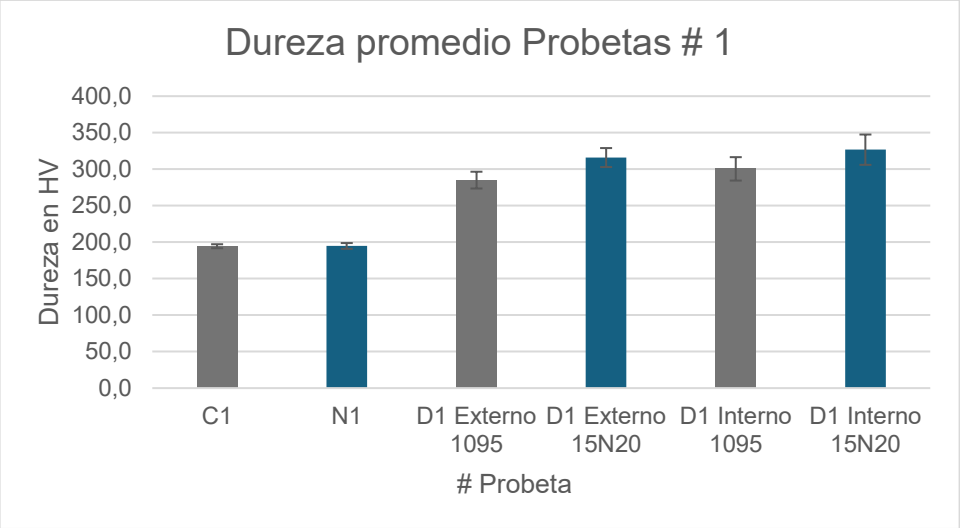


Gráfico 4 Gráfico de microdureza Probetas #1. (Fuente propia)

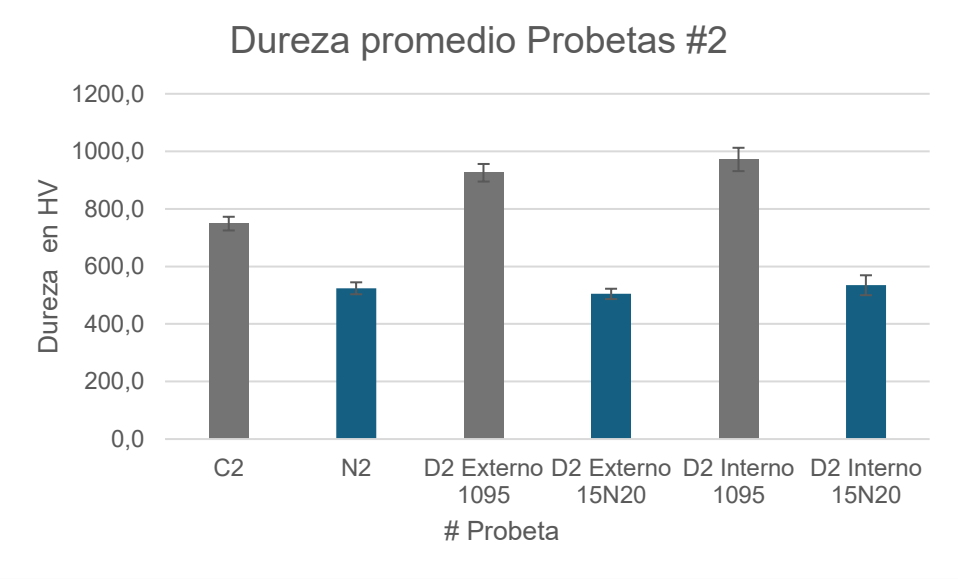


Gráfico 5 Gráfico de microdureza Probetas #2. (Fuente propia)

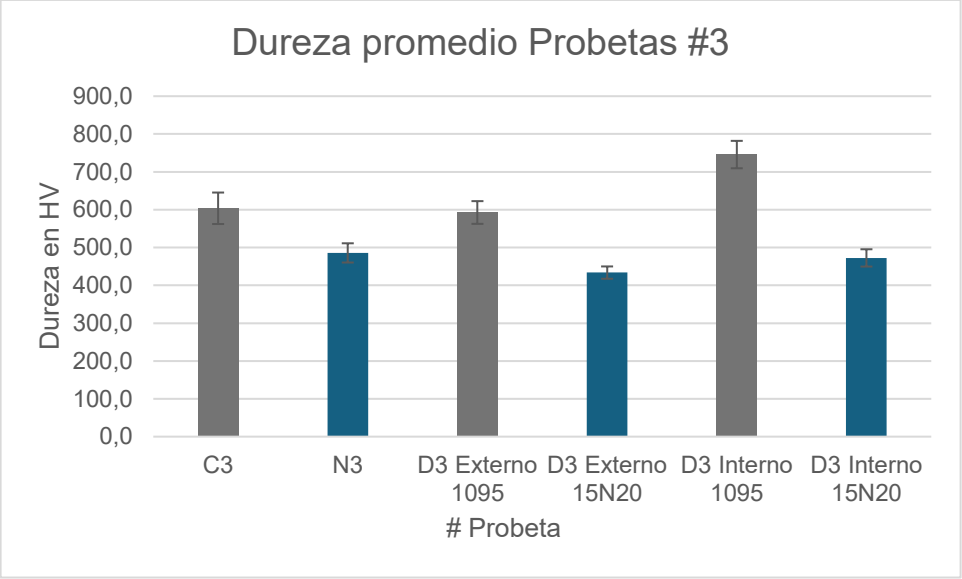


Gráfico 6 Gráfico de microdureza Probetas #3. (Fuente propia)

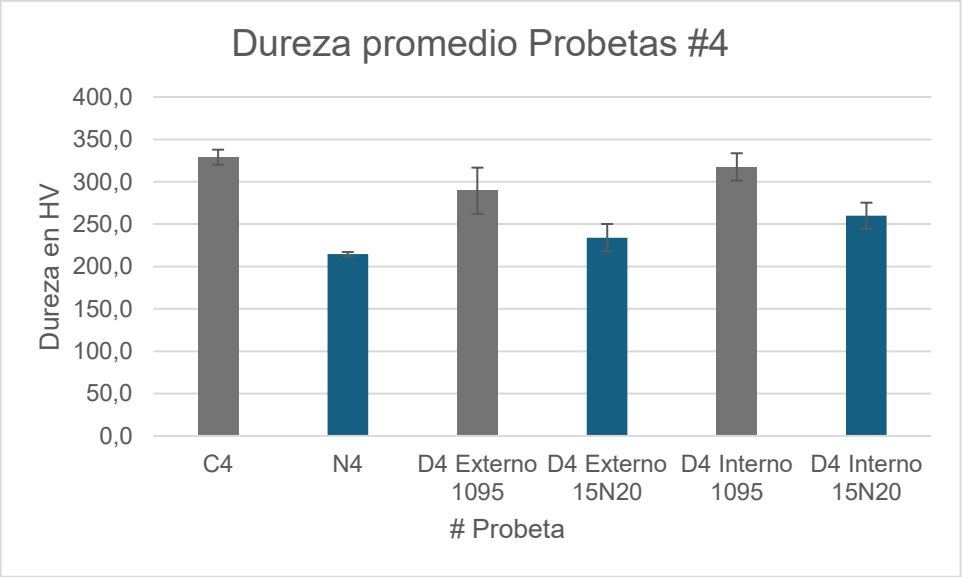


Gráfico 7 Gráfico de microdureza Probetas #4. (Fuente propia)

10.4 Prueba de microdureza en sección de ferrita en revenido de la probeta C3

Se realizan pruebas de microdureza extras, para comprobar la dureza de la ferrita cerca de las uniones de las capas de los aceros.

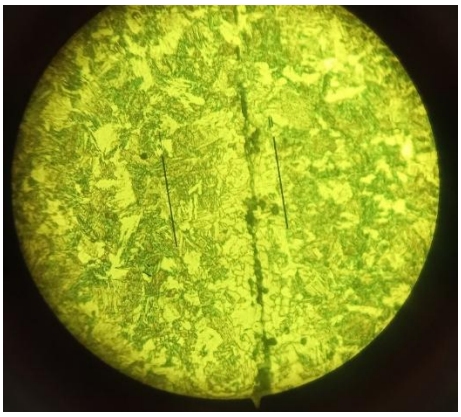


Figura 24 Ferrita en tratamiento de revenido de probeta D3. (Fuente propia)

Las indentaciones si hicieron lo más cercano a ferrita sin llegar a tocar las separaciones de los aceros, luego de varias indentaciones, se obtuvo un promedio de dureza de 215,5 HV, mientras que el promedio de dureza de las capas respectivas capas era mayores a 400 HV.

11. PRUEBAS DE DUREZA

11.1 Normativa ASTM E18

Para la toma de muestras de durezas, se basó en la norma ASTM E18, la cual da indicaciones sobre las indentaciones. Las pruebas de dureza fueron realizadas con el Durómetro Gnehm Swiss Rock ubicado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede tecnológica Edificio Techne piso 2.



Figura 25 Durómetro. (Fuente propia)

El ensayo Rockwell C utiliza las siguientes fuerzas: Precarga (Fuerza de ensayo preliminar): 10 kgf (98 N), la cual se aplica durante 10 segundos y la carga total (Fuerza de ensayo total): 150 kgf (1471 N).

Las recomendaciones de la norma para la toma de indentaciones, es de tener una distancia mínima de 3 huellas para tomar la siguiente muestra y para ensayos de repetibilidad hacer un patrón de 5 indentaciones tal como se muestra en la Figura 27 a continuación.

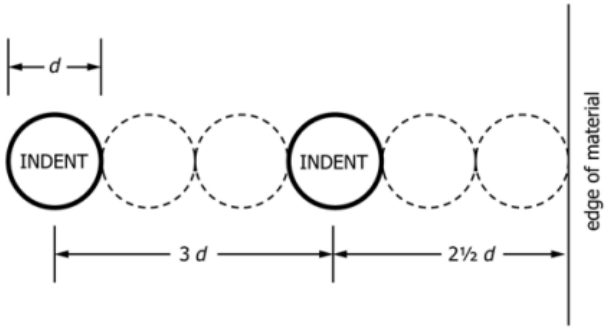


FIG. 3 Schematic of Minimum Indentation Spacing

Figura 26 Distancia mínima de identación. (ASTM E18-22)

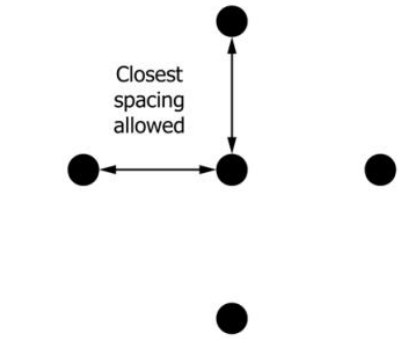


FIG. A2.1 Suggested Pattern for Repeatability Measurements

Figura 27 Patrón repetibilidad. (ASTM E18)



Figura 28 Patrón de repetibilidad en pruebas piloto. (Fuente propia)

11.2 Cálculo de tamaño de muestras para dureza

Para calcular el tamaño de muestra, se utilizó la ecuación de desviación estándar y tamaño de muestra, adicionalmente la norma menciona que para durezas menores de 60 HRC, el margen de error debe ser de +-1HRC y para durezas superiores a 60 HRC el margen de error debe ser de +-0.5HRC. Teniendo en cuenta esto, se realizaron 5 muestras de dureza en patrón de repetibilidad para todas las probetas. El resultado de las pruebas piloto está a continuación en la Tabla 9.

# Probeta	Promedio de Dureza en HRC	Tamaño de muestra
C1	6,04	4
C2	63,78	6

C3	59,9	1
C4	32,66	1
N1	9,18	2
N2	62,88	4
N3	57,24	4
N4	32,02	5

Tabla 9 Tamaño de muestra para durezas. (Fuente propia)

11.3 Toma de muestras de dureza

Para la toma de durezas, debido a que algunas muestras no era necesario tomar tantas muestras debido a que no tenían tanta variación en sus durezas, de igual forma, se le tomaron por lo menos 10 muestras a cada una. A las probetas D, se les tomó muestras de dureza en 4 secciones diferentes, 2 en las capas más internas y 2 en las capas más externas, esto fue en la misma zona que se les realizó las tomas de micrografías, esto para comprar las durezas entre capas internas y externas de los aceros 1095 y 15N20. A continuación se muestran gráficos de comparación de la dureza promedio en HRC con desviación estándar de las probetas por clasificación, la palabra Externo hace referencia a la capa más externas del material de dicha probeta, mientras que la Interno hace referencia a la capa más interna del material de dicha probeta.

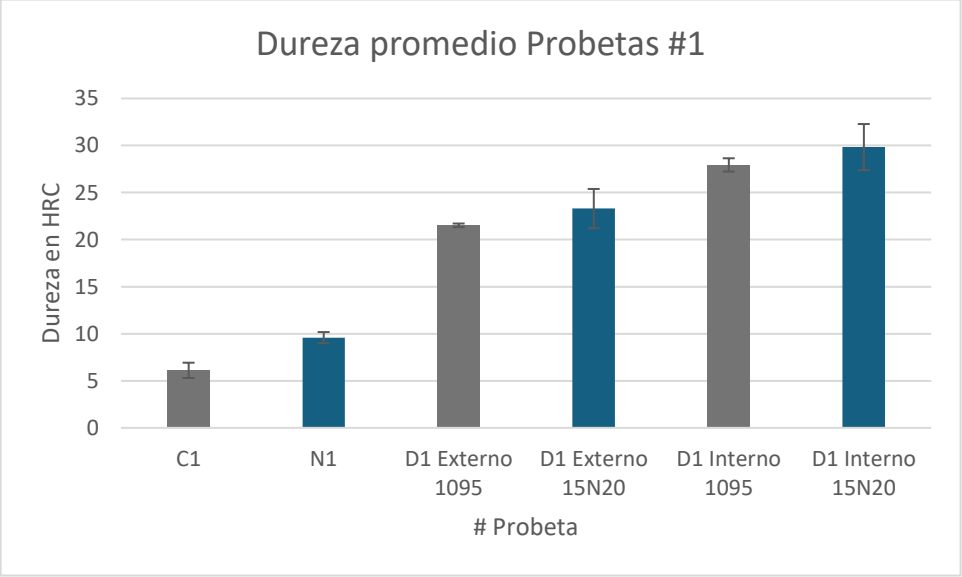


Gráfico 8 Gráfico de durezas probetas #1. (Fuente propia)

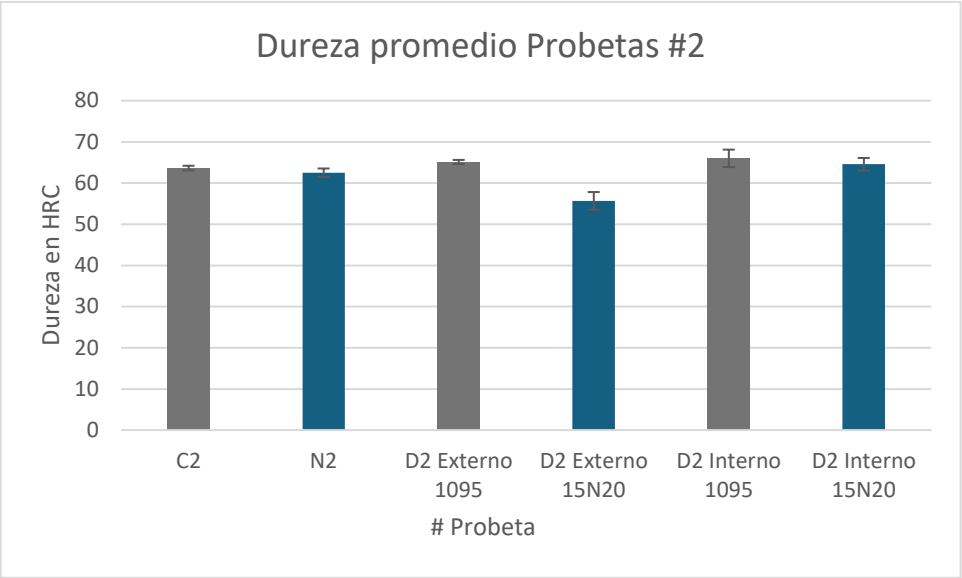


Gráfico 9 Gráfico de durezas probetas #2. (Fuente propia)

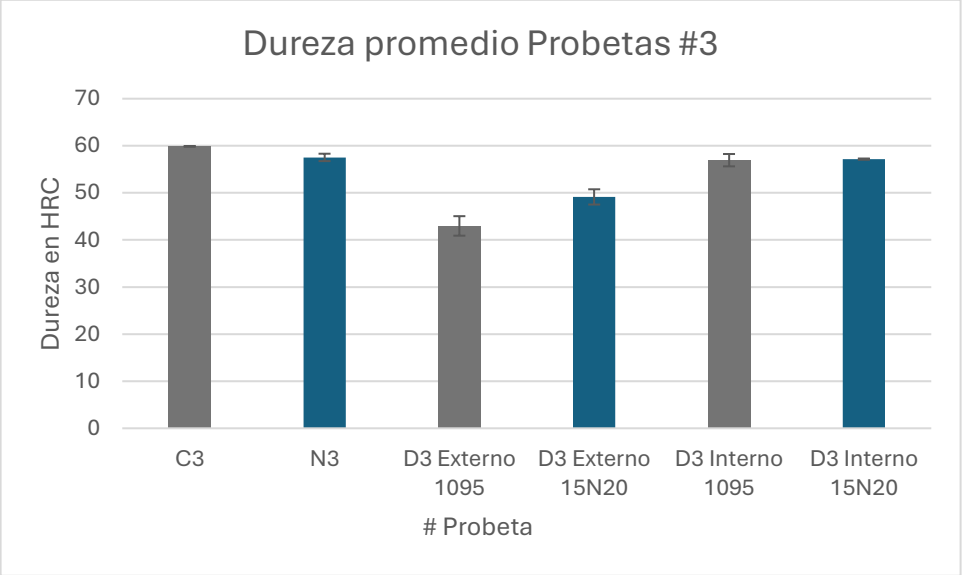


Gráfico 10 Gráfico de durezas probetas #3. (Fuente propia)

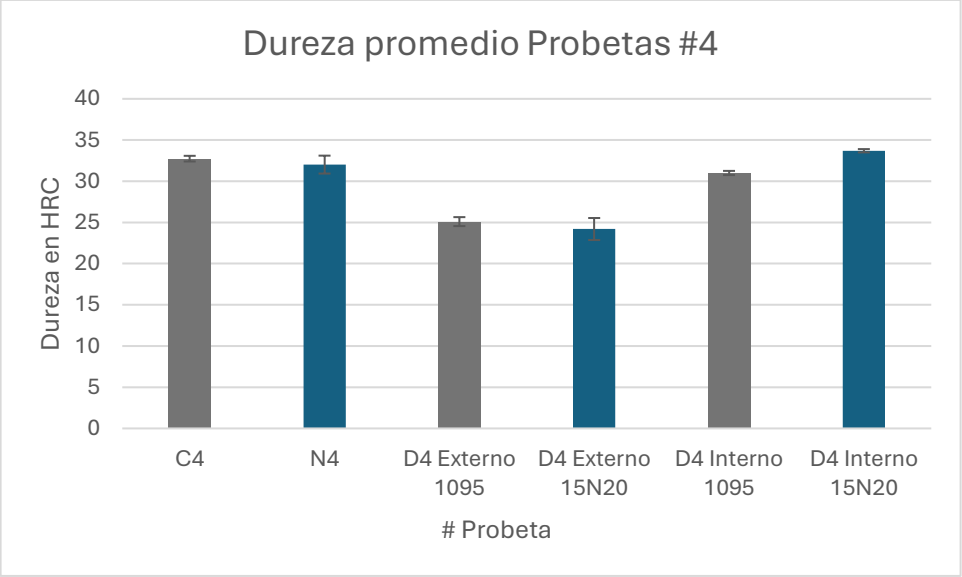


Gráfico 11 Gráfico de durezas probetas #4. (Fuente propia)

12. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para realizar la comparación de resultados, se tuvo en cuenta las propiedades obtenidas de los materiales, dureza, microdureza, las micrografías tomadas, tamaño de grano, porcentaje de fase y composición química de los materiales.

12.1 Comparación de resultados en probetas #1

Para comparar los resultados obtenidos de las probetas #1, hay que aclarar primero que tanto los aceros 1095 y 15N20, vienen con recocido de esferoidizado debido al alto contenido de carbono de estos aceros. Mientras que la probeta D1, fue sometida a un proceso de forjado y dejado enfriar al aire libre desde una temperatura de 1350°C.

Al comprar las probetas C1 y N1, notamos que tienen características similares, tanto micrográficamente como de dureza, al estar en estado de recocido esferoidizado, la cementita del material se acumula en glóbulos para bajar la dureza y maximizar la ductilidad, esto es algo que se puede ver en las gráficas de dureza y microdureza que ambos aceros tienen una dureza relativamente baja.

Al comparar las probetas C1 y N1 con la probeta D1, lo primero que hay que notar es que la probeta D1 no está en estado de recocido de esferoidizado ni en estado de normalizado, sino que está en estado de post-forjado. En este estado la cementita del material no se acumula en glóbulos, sino que se muestra en las láminas de perlita, debido a esto es de esperarse que, en este estado, presente una dureza mayor en comparación a las probetas C1 y N1. Esto se puede notar claramente en las pruebas de dureza y microdureza.

A observar las micrografías en la probeta D1 en las capas donde hubo soldadura de forja, se pudo encontrar ferrita, esto es debido a una descarbonización del material por exceso de temperatura en esta zona, debido a que es la que más se calienta durante el proceso de soldadura de forja.

12.2 Comparación de resultados en probetas #2

Para las probetas C2, N2 y D2, a diferencia de las probetas #1, a estas se les realizó un mismo tratamiento térmico, el cual fue un temple a condiciones prácticamente iguales, exceptuando por el tiempo de sostenimiento que este varió debido al espesor de las probetas.

El proceso de temple busca maximizar la dureza y la resistencia mecánica del acero, esto es algo que se puede notar tanto en las micrografías, como en las pruebas de dureza.

En las micrografías de todas las probetas #2, se puede ver martensita, con lo cual se entiende que hubo cambio de fase en las 3 probetas, en este punto se procede

a analizar el espesor de las agujas de martensita de las probetas ý el porcentaje de austenita retenida, esto se hizo mediante el programa de ImageJ.

Las probetas de C2 y D2 mostraron un porcentaje de martensita mayor al 95%, mientras que el de la probeta N2 el porcentaje fue mayor a 94%, siendo en los 3 casos el resto de austenita retenida.

El porcentaje de martensita en una muestra va directamente con el porcentaje de carbono, siendo que el 15N20 es la muestra con menor porcentaje de este, es normal que presente menos cantidad de martensita y mayor cantidad de austenita retenida, por lo que es entendible que presente menor dureza con respecto al acero 1095. Otro factor mencionar es que el níquel es conocido con un estabilizador de austenita retenida.

Para el tamaño de las agujas de martensita, se obtuvo que las agujas en todos los casos eran muy similares en tamaño, la mayor diferencia era la cantidad de austenita retenida en las muestras.

Una vez analizando la anterior, se puede entender el por qué las muestras de aceros con menor cantidad de austenita retenida obtuvieron una mayor dureza tal como se evidencia los gráficos de dureza y microdureza.

También toca mencionar el hecho de una descarburación de la probeta D2, debido a que según las pruebas de dureza y microdureza, las capas externas de la probeta obtuvieron una menor dureza con relación a las capas más internas, siendo algo a tener muy en cuenta, ya que las capas internas logran mantener de mejor forma el carbono.

12.3 Comparación de resultados en probetas #3

Para las probetas C3, N3 y D3, luego de haberles realizado un temple, se les realizó un revenido, con el fin de aliviar las tensiones internas y mejorando la tenacidad y ductilidad del material.

Analizando las microestructuras, se evidencia que la martensita se ha convertido en martensita revenida y que la aparición de austenita retenida ha aumentado.

Los porcentajes de austenita retenida pasaron de ser menores de 5% a ser menores de 8%. Con esto se entiende el cambio de dureza del revenido con respecto al temple en las probetas #2 y #3.

En cuanto a la dureza y microdureza se puede ver que, la dureza de las capas de acero 15N20 de la probeta D3, pierden mayor dureza con relación a las capas de acero 1095 debido a mayor cantidad de austenita retenida.

Adicionalmente, similar al caso de las probetas #2, las capas internas la probeta D3, retuvieron mayor dureza que las capas más externas.

Algo a mencionar es que se encontró ferrita las delaminaciones de las uniones de las capas de los aceros de la probeta D3, esto ocurrió debido a la capacidad del material de absorber calor en las zonas de delaminaciones, lo que conllevó a una descarburación enfocada en dicha zona.

12.4 Comparación de resultados en probetas #4

Para las probetas C4, N4 y D4 se les realizó un recocido. Al comparar estos, tenemos que para la probeta C4, se encontró que tenía una fase mayormente perlítica con un aproximado de 5% de cementita proeutectoide, para la probeta fuero N4, se encontró una morfología de grano similar a el estado de suministro, pero sin contar con tantos carburos de hierro o cementita esferoizada, lo cual indica que su dureza no va a estar tan cercana de su estado de suministro. Para la probeta D4 se encontró una fase muy igualada de ferrita perlita, siendo 51,16% de perlita y 48,84% de ferrita.

En cuanto a las durezas, las muestras mostraron resultados muy similares en las pruebas, con la diferencia de que, en las capas externas, la dureza fue un poco menor con relación a las capas internas.

13. CONCLUSIONES

- Se logró realizar satisfactoriamente la unión de los aceros 1095 y 15N20 mediante el proceso de soldadura de forja, aplicando temperaturas cercanas a 1350 °C y una carga de 21 toneladas mediante prensa hidráulica. El proceso permitió obtener un material compuesto con una estructura multicapa donde las láminas de ambos aceros quedaron unidas metalúrgicamente. Sin embargo, el análisis microestructural evidenció la presencia de zonas con descarburación y formación de ferrita en algunas interfaces, producto de las altas temperaturas y del tiempo de exposición durante la soldadura de forja.

- Los tratamientos térmicos aplicados al acero forjado y a los aceros base permitieron modificar significativamente su microestructura y propiedades mecánicas. El temple produjo una transformación martensítica predominante en todas las probetas, aumentando considerablemente la dureza. Posteriormente, el revenido redujo parcialmente la dureza al transformar la martensita en martensita revenida, lo que alivió tensiones internas y mejoró la tenacidad. Finalmente, el recocido generó microestructuras compuestas principalmente por ferrita y perlita, reduciendo la dureza del material y favoreciendo una mayor ductilidad.

- El análisis microestructural permitió identificar claramente las fases presentes en cada condición del material. En el estado inicial, los aceros base presentaron una estructura esferoidizada, característica de aceros con alto contenido de carbono destinados a facilitar su mecanizado. En el acero forjado en estado post-forja se observó una microestructura predominantemente perlítica, mientras que en las muestras templadas se identificó martensita con pequeñas fracciones de austenita retenida. Tras el revenido se evidenció martensita revenida, y en el recocido se observó una estructura de ferrita y perlita. Además, en las zonas de unión del acero forjado se detectaron áreas con ferrita asociadas a fenómenos de descarburación.

- Las pruebas de dureza y microdureza evidenciaron una relación directa entre la microestructura obtenida y las propiedades mecánicas del material. Las muestras templadas presentaron los valores de dureza más altos debido a la presencia de martensita, mientras que el revenido generó una disminución moderada de la dureza. Por otro lado, las muestras recocidas mostraron los valores más bajos de dureza debido a la formación de ferrita y perlita. En el caso del acero forjado, se observó que las capas internas presentaron mayor dureza que las externas, lo cual se relaciona con la pérdida de carbono en las superficies durante el proceso de forja.

- En los estados de temple y revenido, las capas internas registraron valores de dureza superiores a las externas. Este comportamiento, que se replica en el estado de recocido con una caída de dureza más pronunciada en la superficie, indica una posible descarburación superficial sufrida por el material durante su exposición a la atmósfera de la fragua, lo cual protegió las capas más cercanas al núcleo.

- La comparación entre el acero compuesto obtenido por soldadura de forja y los aceros base permitió identificar variaciones en sus propiedades mecánicas y microestructurales. El acero forjado presentó comportamientos intermedios entre los dos materiales base, dependiendo del tratamiento térmico aplicado y de la capa analizada. Se evidenció que el acero 1095, al poseer mayor contenido de carbono, desarrolló mayores porcentajes de martensita y, por lo tanto, mayores valores de dureza. En contraste, el acero 15N20, debido a su menor contenido de carbono y a la presencia de níquel, presentó mayor cantidad de austenita retenida y una ligera reducción en dureza.

- Además, en el material forjado se observaron variaciones locales de dureza asociadas a fenómenos de descarburación y delaminación en las interfaces, lo cual constituye un factor importante a considerar en la optimización del proceso de soldadura de forja.

14. RECOMENDACIONES

15.1 Control de Descarburación

Optimizar tiempos y temperaturas de forja: Dado que se detectó ferrita y pérdida de dureza en las capas externas (probetas D1, D2 y D3) por exceso de temperatura, se recomienda reducir el tiempo de permanencia del material a altas temperaturas o utilizar atmósferas controladas/recubrimientos protectores (como bórax o pinturas antiescala) para minimizar la pérdida de carbono.

15.2 Optimización del Tratamiento Térmico

Implementar tratamiento sub-cero: Para las muestras con alto contenido de níquel (15N20) o cromo, se recomienda un tratamiento de enfriamiento criogénico post-temple para transformar la austenita retenida residual en martensita antes del revenido.

15.3 Calidad de la Soldadura de Forja

Mejorar la técnica de unión en el acero damasquino, debido a las delaminaciones y la descarburación localizada encontradas en la probeta D3, se recomienda asegurar una limpieza exhaustiva de las caras a unir y un control más riguroso de la presión durante el forjado para evitar atrapamiento de óxidos o zonas de sobrecalentamiento.

15. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Para expandir el alcance de tu estudio, las recomendaciones de futuras investigaciones deberían enfocarse en cerrar las brechas técnicas que el análisis actual dejó abiertas

16.1 Evaluación de la Tenacidad al Impacto (Charpy)

Dado que el revenido aumentó la austenita retenida del 5% al 8%, es crucial realizar ensayos de impacto para determinar si este incremento mejora la tenacidad de la probeta D3 o si, por el contrario, genera una fragilidad indeseada en las interfaces de soldadura.

16.2 Estudio de la Difusión de Carbono en Interfaces

Investigar mediante microanálisis de línea (EDS/WDS) cómo migra el carbono desde el acero 1095 hacia el 15N20 durante los ciclos de forja. Esto permitiría entender si la pérdida de dureza en ciertas capas es solo por descarburación externa o por transferencia interna entre láminas.

16.3 Resistencia a la Corrosión en el Acero Damasco

Evaluar cómo las zonas de ferrita encontradas en las uniones de la probeta D1 afectan la resistencia a la oxidación del conjunto, determinando si estas áreas actúan como puntos de inicio para la corrosión galvánica entre las capas.

16.4 Ensayos de Fatiga y Flexión

Debido a que el acero damasquino es un compuesto laminado, se recomienda estudiar su comportamiento bajo cargas cíclicas para verificar si las delaminaciones encontradas en la probeta D3 comprometen la integridad estructural a largo plazo.

16. REFERENCIAS

ASM International. (2004). ASM Handbook: Vol. 9. Metallography and microstructures. ASM International.

ASTM International. (2015). Standard Practice for Microetching Metals and Alloys (ASTM E407-07).

ASTM International. (2017). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens (ASTM E3-11).

ASTM International. (2019). Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method (ASTM E691-19).

ASTM International. (2020). Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials (ASTM E18-20).

ASTM International. (2013). Standard test methods for determining average grain size (ASTM E112-13).

ASTM International. (2022). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials (ASTM E384-22).

Boyer, H. E. (1987). Practical Heat Treating. ASM International.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). Wiley.

Davis, J. R. (Ed.). (1996). Metals handbook: Properties and selection. ASM International.

Fantastic Factory. (2016.). Página de inicio. https://www.fantastic-factory.com/

Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1997). Mechanics of materials (4th ed.). PWS Publishing Company.

Giraldo, A. V. (2009). Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Medellín.

Lee, S. J., & Park, K. S. (2019). Forge welding of dissimilar steels for improved mechanical properties. Journal of Materials Processing Technology, 270, 145-152.

López, A., García, M., & Pérez, J. (2020). Análisis de la microestructura en aceros forjados. Publicaciones Académicas.

Metal Zenith. (2003.). 1095 steel properties and key applications. https://metalzenith.com/es/blogs/steel-properties/1095-steel-properties-and-key-applications

Metal Zenith. (2003.). 15N20 steel properties and key applications. https://metalzenith.com/es/blogs/steel-properties/15n20-steel-properties-and-key-applications

Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (1999). Mechanical behavior of materials. Prentice Hall.

New Jersey Steel Baron. (2010.). 1095HC. https://newjerseysteelbaron.com/product/1095hc/

New Jersey Steel Baron. (2010.). 15N20. https://newjerseysteelbaron.com/product/15n20/

Porter, D. A., Easterling, K. E., & Sherif, M. Y. (2021). Phase transformations in metals and alloys (4th ed.). CRC Press.
Radouane, N., & Maaroufi, A. (2022). Fiber Inclusions-Based Epoxy Composites and Their Applications. IntechOpen. https://www.intechopen.com
Renato, Á., Morales, P., Güemes, A., & Fernández López, A. (2019). Materiales Compuestos de Fibras Naturales.
Rodríguez, L. J., Sarache, W. A., & Orrego, C. E. (2014). Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano (Musa paradisiaca) modificada químicamente. Comparación con fibra de vidrio y fique (Furcraea andina). Información Tecnológica, 25(5), 27–34. https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000500005.
Sanjay, M., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamaraikannan, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2017). Characterization and Properties of Natural Fiber Polymer Composites: A Comprehensive Review. Journal of Cleaner Production, 172, 566–581.
Smith, R. T., & Jones, A. B. (2021). Introduction to materials science. University Press.
Smith, W., & Hashemi, J. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales (4ta ed.). McGraw-Hill.
Suministros para Cuchillos. (2010.). Acero 1095. https://suministrosparacuchillos.com/es/aceros-y-hojas/aceros-al-carbono-para-cuchillos/acero-1095.
Suministros para Cuchillos. (2010.). Acero 15N20. https://suministrosparacuchillos.com/es/aceros-y-hojas/aceros-al-carbono-para-cuchillos/acero-15n20.
Then, Y. Y., Ibrahim, N. A., Zainuddin, N., Ariffin, H., & Wan Yunus, W. M. Z. (2013). Oil palm mesocarp fiber as new lignocellulosic material for fabrication of polymer/fiber biocomposites. International Journal of Polymer Science, 2013. https://doi.org/10.1155/2013/797452.
Wang, L., Zhang, Y., & Liu, Q. (2018). Microstructural evolution and mechanical properties of Damascus steel. Materials Science and Engineering: A, 715, 234-242.