

Espacio de Integración Curricular 1

Modificación microestructural en aceros SPC590DU y
SPC1180DUB y su relación con el coeficiente de endurecimiento

Tutor: Martínez Krahmer, Daniel.

Co-tutor: Migliorino, Diego.

Participantes: Olmedo, Camila. Pérez, Agustín.

Instituto de Tecnología e Ingeniería. Universidad Nacional de Hurlingham.

Contenido

Objetivos.....	3
Introducción.....	3
Clasificación de Aceros de Alta y Ultra Alta Resistencia.....	4
Enfoque en Aceros SPC590DU.....	6
Enfoque en Aceros SPC1180DUB.....	7
Ensayo de Tracción Uniaxial.....	9
Probetas a Ensayar.....	10
Descripción Experimental.....	12
Mediciones.....	12
Corte.....	12
Inclusiones.....	13
Metalografías.....	14
Microdureza Vickers.....	14
Resultados.....	15
Mediciones.....	15
Metalografías.....	21
Microdureza Vickers.....	25
Probetas Ensayadas por Tracción.....	29
Coeficiente de Endurecimiento.....	32
Conclusiones.....	35
Agradecimientos.....	37
Bibliografía.....	38

Objetivos

Objetivo General: Estudiar y caracterizar probetas de aceros *SPC590DU* y *SPC1180DUB* en función de su deformación por ensayo de tracción.

Objetivo Específico: Caracterizar los aceros, dar con el coeficiente de endurecimiento y determinar cómo las alteraciones microestructurales y las variaciones de dureza en las distintas zonas de las probetas se relacionan con dicho coeficiente, relevando la deformación de las *grillas grabadas* en las probetas desde la zona de sujeción hasta la zona de fractura.

Introducción

Los ensayos de tracción en los materiales metálicos nos aportan una información importante acerca de las propiedades mecánicas de los mismos. Dicha información suele ser volcada en forma de datos en diferentes softwares vinculados a los equipos con los que se realiza el ensayo; al ser procesados se obtiene información del material tal como *módulo de elasticidad, % de elongación, resistencia última a la tracción, tenacidad, capacidad de deformación*, etc. Sin embargo, un dato importante que no es volcado en un software es la *modificación microestructural y la variación de dureza* que sufre el material a lo largo que se traza la curva ingenieril característica de un ensayo de tracción ordinario.

En una investigación previa, realizada por Juan Manuel Gomez y Facundo Rochi titulada "Afectación térmica de un acero de alta resistencia grillado por láser en distintas condiciones de proceso" a modo de proyecto final de la carrera de pregrado Tecnicatura Universitaria en Metalurgia denominada "ESIC", se hizo foco en la modificación microestructural debido a la afectación térmica del grabado láser en probetas de aceros al carbono *SPC590DU* y *SPC1180DUB* de alta y ultra alta resistencia y baja aleación que se utilizan en componentes de vehículos que requieran una alta estabilidad dimensional y resistencia tanto a impactos como a fatiga.

Este proyecto de investigación busca complementar la investigación previa demostrando la relación que existe entre el coeficiente de endurecimiento con la modificación microestructural usando el grillado como referencia del grado de deformación de las diferentes probetas a las cuales se les realizó ensayos de tracción.

Clasificación de Aceros de Alta y Ultra Alta Resistencia

La evolución en el diseño de componentes estructurales y de seguridad, particularmente en la industria automotriz y metalmecánica, ha impulsado el desarrollo de materiales con una relación óptima entre resistencia mecánica, peso y ductilidad. En este contexto, los Aceros de Alta Resistencia (AHSS) y los Aceros de Ultra Alta Resistencia (UHSS) son ideales para cumplir con las exigencias de estos sectores.

Estos aceros permiten:

- Reducir el peso total de las estructuras sin perder rigidez.
- Mejorar el rendimiento energético de los vehículos mediante el aligeramiento.
- Aumentar la seguridad pasiva gracias a su capacidad de absorción de energía durante impactos.
- Optimizar la eficiencia estructural, permitiendo piezas más delgadas pero más fuertes.

A diferencia de los aceros convencionales de fase única (como los aceros al carbono con microestructura ferrítica o perlítica), los AHSS y UHSS poseen microestructuras multi-fase (ferrita, martensita, bainita, austenita retenida), lo que les otorga una combinación única de resistencia y conformabilidad.

Clasificación

1. Dual Phase (DP) Steels

- Microestructura: Ferrita + martensita distribuida.
- Propiedades: buena ductilidad, alta resistencia, buen endurecimiento por deformación.
- Aplicaciones: Partes estructurales, columnas, largueros, refuerzos, zonas de absorción de energía.
- Son los más equilibrados entre resistencia y conformabilidad.

2. TRIP (Transformation Induced Plasticity) Steels

- Microestructura: Ferrita + bainita + austenita retenida.
- Propiedades: Excelente elongación total, muy buen endurecimiento por deformación (efecto TRIP).
- Aplicaciones: Áreas que requieren deformación controlada en choques (absorbedores de energía).
- La austenita retenida se transforma en martensita durante la deformación, aumentando la resistencia.

3. Complex Phase (CP) Steels

- Microestructura: Bainita + martensita + ferrita + perlita fina.
- Propiedades: Alta resistencia, moderada ductilidad, baja sensibilidad a la localización de deformación.
- Aplicaciones: Refuerzos estructurales, refuerzos de puertas, marcos de asientos.
- Están diseñados para alta resistencia con menos pérdida de conformabilidad.

4. Martensitic (MS) Steels

- Microestructura: Principalmente martensita.
- Propiedades: Muy alta resistencia (hasta 1700 MPa), baja ductilidad.
- Aplicaciones: Partes que requieren máxima protección como parantes, vigas laterales, refuerzos de impacto.
- Son los más resistentes de los AHSS convencionales, pero con menor elongación.

5. Aceros templados en prensa (Press Hardened Steels – PHS)

- Proceso especial: Se calientan por encima de la temperatura de austenización y se forman en matrices refrigeradas.
- Propiedades: Resistencia final entre 1500–2000 MPa, geometrías complejas.
- Aplicaciones: Estructuras de protección, pilares A/B, travesaños delanteros y traseros.
- Combinan formabilidad en caliente con resistencia final extrema.

6. Ultra High-Strength Steels (UHSS)

Dentro de los AHSS, se considera UHSS a los aceros con una resistencia mayor a 980 MPa. Este grupo incluye:

- Martensíticos
- Bainíticos
- PHS
- Algunos CP avanzados

Los UHSS están diseñados principalmente para:

- Minimizar la deformación en zonas críticas de impacto.
- Reforzar estructuras sin aumentar peso.
- Actuar como barreras de intrusión o jaulas de seguridad.
- A pesar de su alta resistencia, presentan desafíos en cuanto a conformado y soldabilidad, lo que requiere tecnologías específicas de procesamiento.

Enfoque en Aceros SPC590DU

- Clasificación: Acero AHSS tipo HSLA (High Strength Low Alloy) Laminado en frío.
- Resistencia mínima a la fluencia: ~590 MPa.
- Microestructura: Predominantemente ferrítica con bainita/perlita fina.
- Composición típica: Bajo en carbono (~0,09%), alto en Mn (~1,8%), con Si (~0,5%).
- Composición química de las probetas SPC590DU en estudio:

%C	%Si	%Mn	%P	%S
0.09	0.48	1.8	0.015	0.004

Procesamiento:

- Se obtiene por laminado en caliente seguido de laminado en frío y recocido controlado.
- El laminado en frío reduce el espesor y refina la microestructura, mejorando resistencia y precisión dimensional.

Ventajas:

- Buena ductilidad, buena formabilidad y excelente soldabilidad.
- Bajo costo relativo comparado con otros AHSS.

Aplicaciones:

- Automoción: estructuras internas, refuerzos, travesaños, componentes del piso del vehículo.

Enfoque en Aceros SPC1180DUB

- Clasificación: Acero UHSS tipo CP (Complex Phase) o martensítico.
- Resistencia mínima a la tracción: ~1180 MPa.
- Microestructura: Bainita + martensita, posible ferrita residual.
- Composición típica: Bajo en carbono (~0,13%), alto en Mn (~2,14%), con Si (~1,4%).
- Composición química de las probetas SPC1180DUB en estudio:

%C	%Si	%Mn	%P	%S
0.131	1.42	2.14	0.016	0.0006

Propiedades:

- Alta resistencia mecánica.
- Ductilidad mejorada respecto a un martensítico puro, gracias al diseño multiphase.

Procesamiento:

- Laminado en frío + tratamiento térmico en línea (como en líneas de galvanizado continuo). Este proceso permite obtener una estructura compleja sin comprometer excesivamente la ductilidad.

Ventajas:

- Excelente relación resistencia/peso.
- Mejora la eficiencia estructural y la seguridad en impactos.

Aplicaciones:

- Estructuras de seguridad automotrices (pilares A/B, refuerzos laterales).
- Partes que deben resistir altos esfuerzos sin deformarse.

Conceptos Clave Previamente Mencionados

1. Laminado en frío (Steel Plate Cold o SPC): Proceso de deformación plástica a temperatura ambiente posterior al laminado en caliente. Permite:
 - Mejorar el acabado superficial.
 - Aumentar la resistencia por endurecimiento.
 - Reducir tolerancias dimensionales.
 - Homogeneizar y refinar la microestructura.

2. Ductilidad mejorada (Ductility Improved o DU): En aceros de muy alta resistencia como el SPC1180DUB, la introducción de fases blandas (ferrita, austenita retenida) o el diseño multiphase permite retener cierta capacidad de deformación antes de la fractura, lo cual es esencial para evitar fallas frágiles en aplicaciones estructurales críticas.

La designación B es interna del fabricante, y significa un acero DU avanzado mejorado con composición Bainítica.

Ensayo de Tracción Uniaxial

El ensayo de tracción es una prueba mecánica fundamental para caracterizar el comportamiento de los materiales metálicos frente a una carga axial creciente. Se realiza colocando una probeta estandarizada en una máquina universal que aplica fuerza de forma controlada hasta la rotura, mientras registra la fuerza aplicada y el desplazamiento de los extremos de la muestra.

Este ensayo se realiza de acuerdo a normas técnicas como *ASTM E8/E8M* o *ISO 6892-1*, y permite obtener una gran cantidad de parámetros mecánicos fundamentales.

Información que brinda el ensayo

Del ensayo de tracción se pueden extraer los siguientes datos e interpretaciones clave:

Parámetro	Qué indica	Cómo se calcula
Límite elástico ($\sigma_{0,2}$)	Inicio de la deformación plástica	Línea paralela con offset del 0,2%
Resistencia máxima a la tracción (UTS)	Carga máxima soportada	$UTS = F_{max}/A_0$
Módulo de Young (E)	Rigidez del material	Pendiente de la zona elástica
Deformación total y elongación	Capacidad de deformación plástica	$\frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$
Coefficiente de endurecimiento (n)	Cómo se endurece el material al deformarse	Pendiente de $\ln(\sigma)$ vs. $\ln(\epsilon)$

En el contexto de aceros de alta resistencia como los SPC590DU y SPC1180DUB, el ensayo de tracción permite correlacionar el comportamiento macroscópico del material con su microestructura. Esto es fundamental para:

- Comparar ductilidad y resistencia entre ambos aceros.
- Determinar la capacidad de endurecimiento por deformación, clave para procesos como el conformado en frío.
- Relacionar la variación de dureza y microestructura con zonas específicas de la probeta (zona de amarre vs. zona de fractura).
- Validar el diseño de componentes estructurales, asegurando que cumplen con los requerimientos mecánicos según su aplicación (ej. automotriz, estructural).

Además, los resultados del ensayo de tracción alimentan modelos matemáticos (como la ecuación de Hollomon) que permiten predecir el comportamiento del material ante esfuerzos complejos o en simulaciones por elementos finitos (FEA).

Probetas a Ensayar

A las probetas de los aceros *SPC590DU* (identificadas con la serie A3 y A4) y *SPC1180DUB* (identificadas con la serie B6 y B7) se les realizaron ensayos de tracción mediante un equipo de ensayos universales INSTRON modelo 5985 de 250 kN de capacidad. La velocidad de carga durante el ensayo se fijó en 5 mm/min. Dichas probetas fueron cortadas con una máquina de corte por chorro de agua (Waterjet) con abrasivo granate 80. La máquina fue Flow Mach 3 modelo 1313b, con un cabezal de corte dinámico y una bomba intensificadora de 60.000 psi. Se utilizó una velocidad de avance de 700 mm/min en el corte.

En cuanto a la grilla de las probetas de tracción, tienen un patrón circular inicial de 2,5 mm de diámetro, tal como lo indica la norma *ASTM E2218*. Las rejillas se realizaron con un láser de fibra *Yterbio*, marca *Hans Laser* con una fuente IPG modelo YLPN-1-100-20-M, cuya longitud de onda de 1064 nm, potencia máxima de 20 W, y frecuencias ajustables entre 20 a 200 kHz.

El software del láser tenía la posibilidad de controlar 12 variables. Sin embargo, se determinó que el *foco*, la *potencia* y el *número de pasadas* fueron las variables que más influyeron en la afectación térmica y legibilidad de las marcas grabadas. La frecuencia máxima (200 kHz) también fue elegida para producir la menor penetración posible.

El objetivo final del grillado en las probetas fue poder relevar la deformación de las chapas tras los ensayos de tracción realizados.

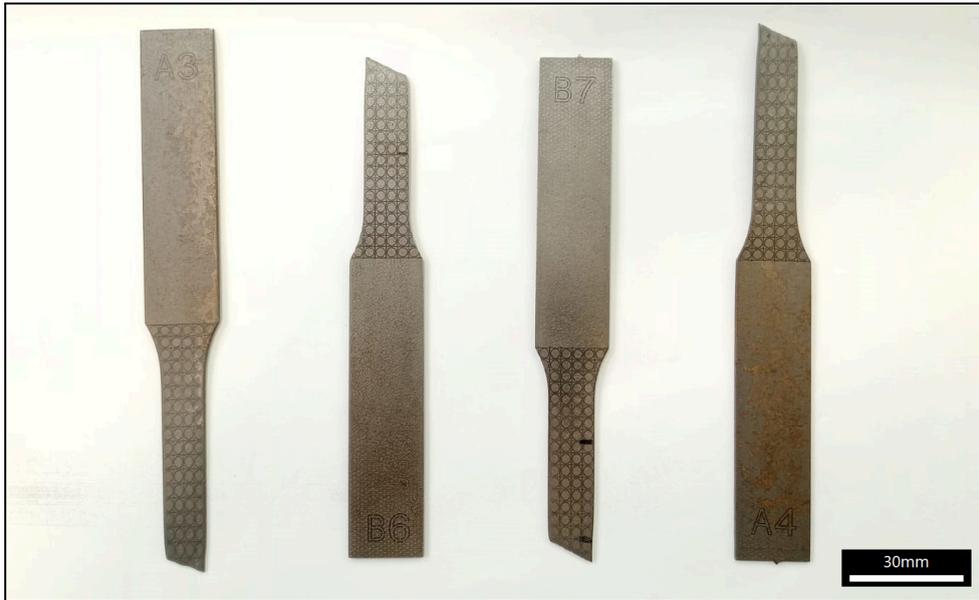


Figura 1 - Probetas Grilladas Traccionadas

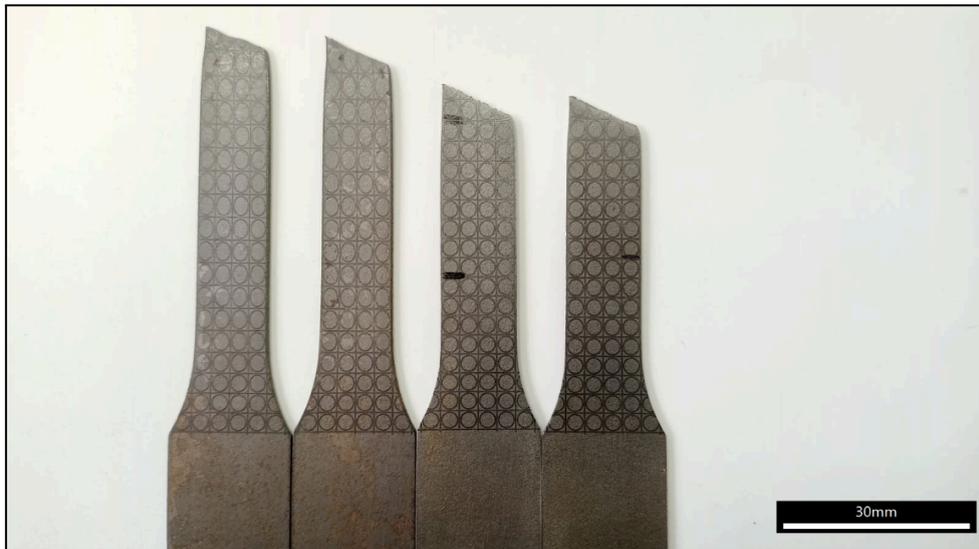


Figura 2 - Detalle de Grillado de Probetas A3, A4, B7 y B6 Correspondientemente

Descripción Experimental

Mediciones

Utilizando el software ToupView se tomaron las medidas en micrómetros (μm) de las distintas variaciones geométricas que sufrieron las grillas a lo largo de toda la zona grabada de cada una de las probetas A3, A4, B6, y B7. A partir de las mediciones obtenidas se trazaron gráficos que muestran el porcentaje de deformación que presentaron las distintas probetas.

Corte

A cada una de las probetas se les realizó un corte longitudinal hasta la zona de sujeción mediante un mecanizado por descarga eléctrica (electroerosión) en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Este proceso consiste en utilizar como electrodo un hilo de molibdeno de 0,2 mm de diámetro (Φ) en movimiento continuo bajo un chorro de agua destilada con aceite dieléctrico, el cual genera la descarga de chispas cuando entra en contacto con la pieza de trabajo erosionando la misma, obteniendo así un corte preciso perdiendo el mínimo espesor posible.

A las mitades restantes de cada probeta, se les realizó un corte transversal a la mitad de su longitud y sobre la zona de sujeción con una sierra en el Laboratorio Experimental de Soldadura y Ensayos de UNAHur.



Figura 3 - Máquina de Electroerosión

Cocchiola AR 35 - MA

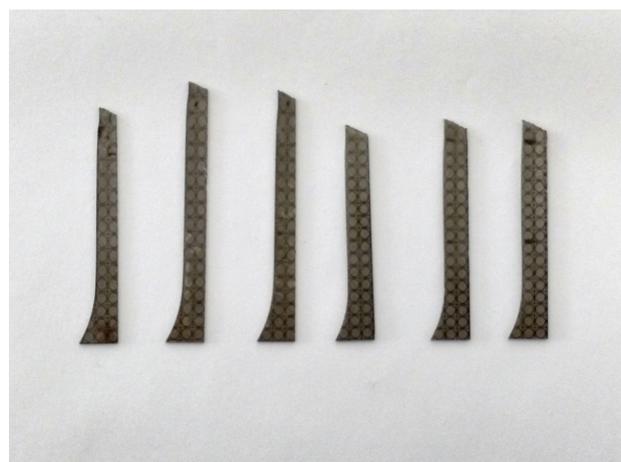


Figura 4 - Probetas Cortadas por Electroerosión

Inclusiones

Para incluir las secciones cortadas por electroerosión se optó por mandar a imprimir elipses de polímero al Laboratorio de Diseño Industrial de UNAHur, tomando como referencia una primera elipse impresa por Lucas Martínez (Sellos de Autor), y utilizar resina acrílica para incluirlas en frío en el Centro Atómico Constituyentes (CAC-CNEA). Estas probetas fueron las que se utilizaron para los ensayos de microdureza Vickers.

En cuanto a las mitades restantes de las probetas, fueron incluidas en dos partes en una incluidora metalográfica con baquelita durante 13 minutos a 130° en el Laboratorio Experimental de Soldadura y Ensayos de UNAHur, para luego hacer ensayos metalográficos.

A todas las probetas se les hizo un trabajo de desbaste y pulido a espejo con alúmina de un micrón (μm) con las pulidoras metalográficas del Laboratorio Experimental de Soldadura y Ensayos de UNAHur.



Figura 5 - Elipse de Referencia (rosa) y Elipse de UNAHur



Figura 6 - Incluidora Metalográfica IsoTest



Figura 7 - Probetas incluidas en Frío con Resina

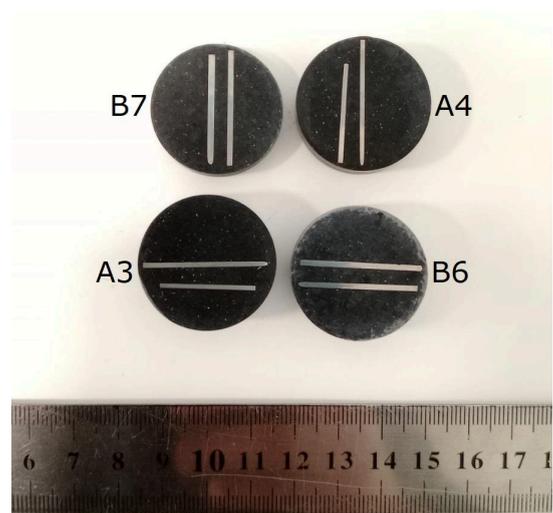


Figura 8 - Probetas Incluidas con Baquelita

Metalografías

A las probetas incluidas con baquelita se les realizó un ataque químico con Nital 0,5% por aproximadamente 20 segundos en dos a tres intervalos para revelar las microestructuras de ambos aceros y de esa manera poder estudiarlos y caracterizarlos en el microscopio óptico con un aumento 400x.



Figura 9 - Microscopio IMS 300

Microdureza Vickers

Para los ensayos de microdureza, se empleó un microdurómetro Vickers que utiliza un indentador de diamante con forma piramidal para realizar una impronta sobre la pieza de trabajo con una carga máxima de 0,2 kg; luego se realizó un ensayo de curvas de dureza para evaluar la resistencia de ambos aceros al ser penetrados. A partir de los resultados obtenidos en este ensayo se plantearon las conclusiones finales de este trabajo de investigación.



Figura 10 - Microdurómetro Vickers MHVD-1000AP

Resultados

Mediciones

Para el análisis de deformación de las probetas traccionadas, se empleó el software ToupView con el objetivo de medir las dimensiones de las elipses generadas por el grillado láser sobre la superficie de las piezas. Las mediciones se realizaron en micrómetros (μm), registrando la longitud vertical (LV) que indica el alargamiento en dirección a la deformación; y la longitud horizontal (LH) que indica el acortamiento debido a la estricción de cada elipse, siguiendo el patrón de 16 filas (17 únicamente en la probeta A3) y 4 columnas definido por el grillado.

Con el fin de determinar el porcentaje de deformación en cada región del material, se calculó el promedio de las longitudes verticales y horizontales por fila. Posteriormente, se aplicaron las siguientes fórmulas para estimar la deformación relativa en la dirección correspondiente:

$$\frac{LV_{\text{medida}} - LV_{\text{mínima}}}{LV_{\text{mínima}}} \times 100 \quad \frac{LH_{\text{medida}} - LH_{\text{máxima}}}{LH_{\text{máxima}}} \times 100$$

Donde:

- LV_{medida} es el valor calculado de las longitudes verticales en una fila determinada.
- LH_{medida} es el valor calculado de las longitudes horizontales en una fila determinada.
- $LV_{\text{mínima}}$ corresponde al menor valor de longitud vertical y $LH_{\text{máxima}}$ corresponde al mayor valor de longitud horizontal registrado (considerados como referencia del estado no deformado).

Este procedimiento permitió cuantificar la deformación local inducida por el ensayo de tracción en diferentes zonas de la probeta, facilitando el análisis del comportamiento mecánico del material.

Para la construcción de los gráficos, se organizó la información obtenida en tablas por columnas y filas de cada acero por separado, calculando los valores de deformación relativa en dirección vertical y horizontal para cada punto medido. Luego, estos datos fueron graficados con el eje horizontal superior representando LH, el eje horizontal inferior representando LV, y ambos ejes verticales el porcentaje de deformación. Aunque se generaron 16 gráficos en total (uno por columna para cada una de las cuatro probetas), debido a la similitud que presentaban entre sí, y con el fin de optimizar la presentación de los resultados, a continuación se presentarán únicamente dos gráficos representativos correspondientes al promedio de deformación obtenido entre las columnas centrales y laterales de cada probeta, para poder profundizar cómo afectaron las cargas en cada región de ambos aceros.

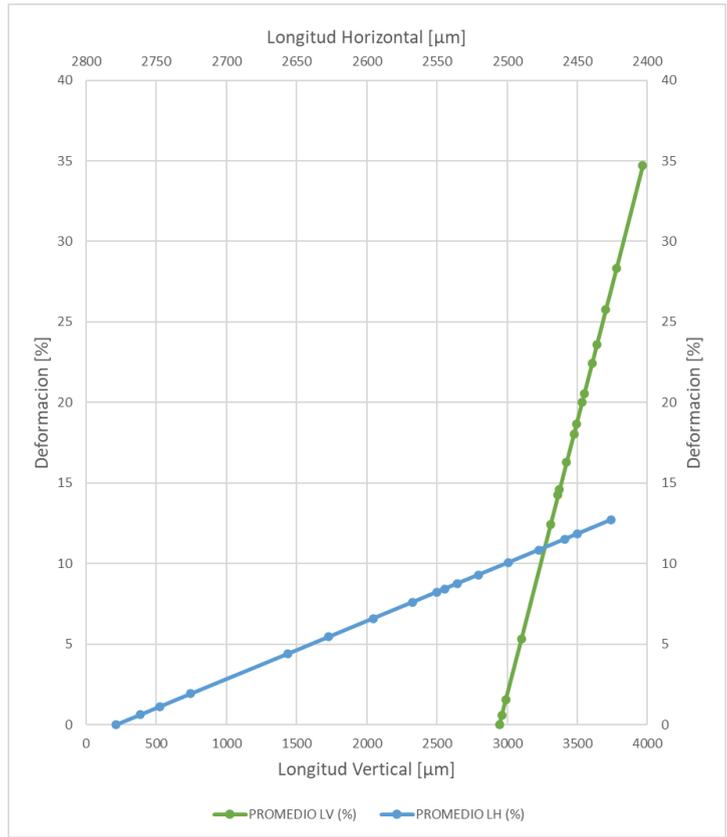


Figura 11 - Gráfico del Promedio de Columnas Centrales de Probeta A3

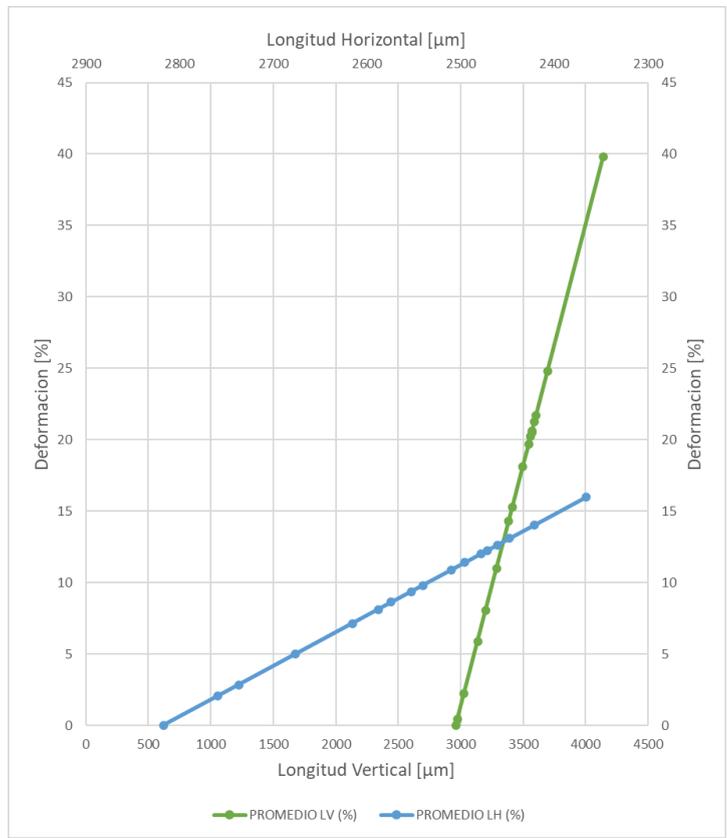


Figura 12 - Gráfico del Promedio de Columnas Laterales de Probeta A3

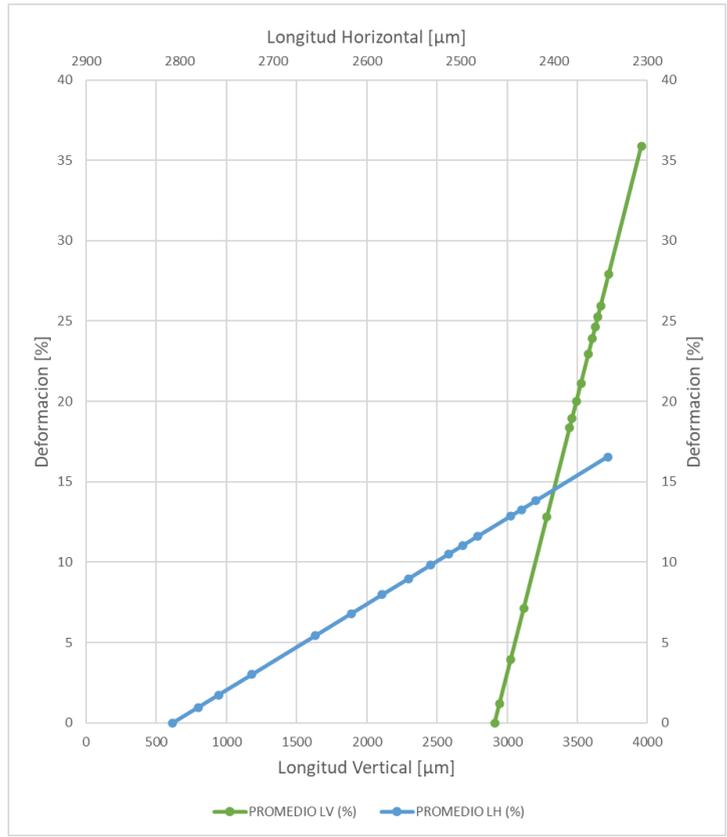


Figura 13 - Gráfico del Promedio de Columnas Centrales de Probeta A4

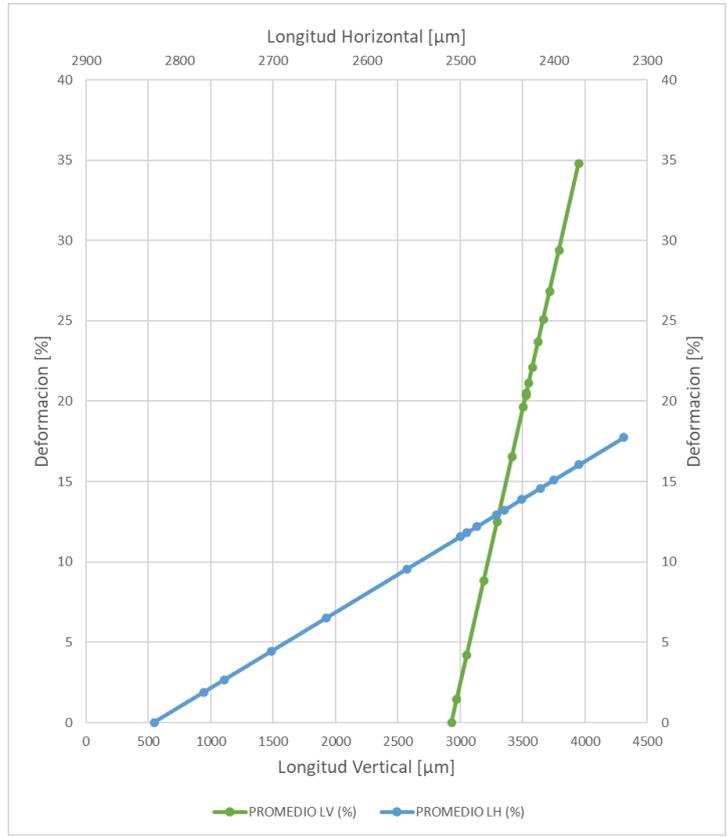


Figura 14 - Gráfico del Promedio de Columnas Laterales de Probeta A4

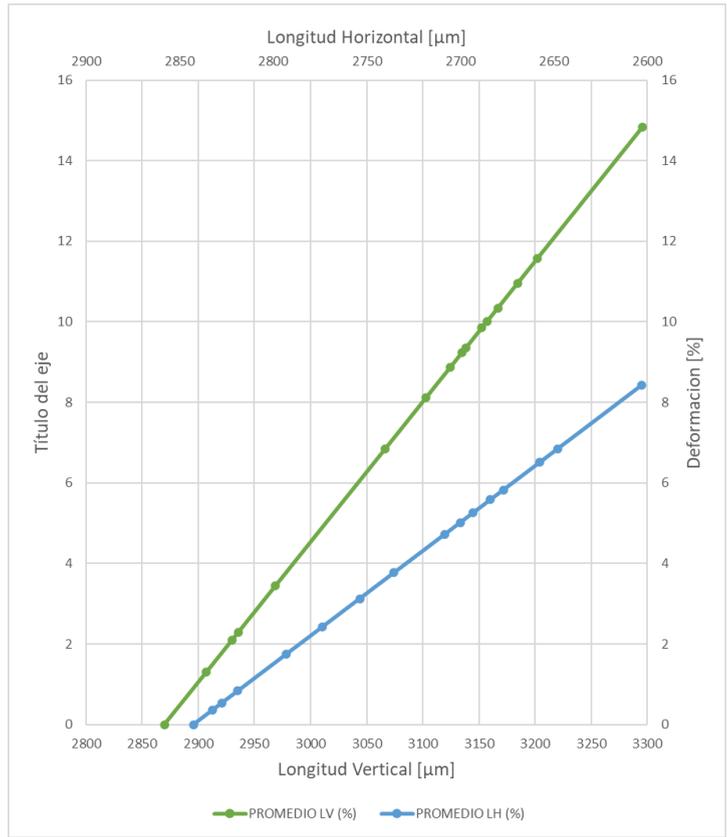


Figura 15 - Gráfico del Promedio de Columnas Centrales de Probeta B6

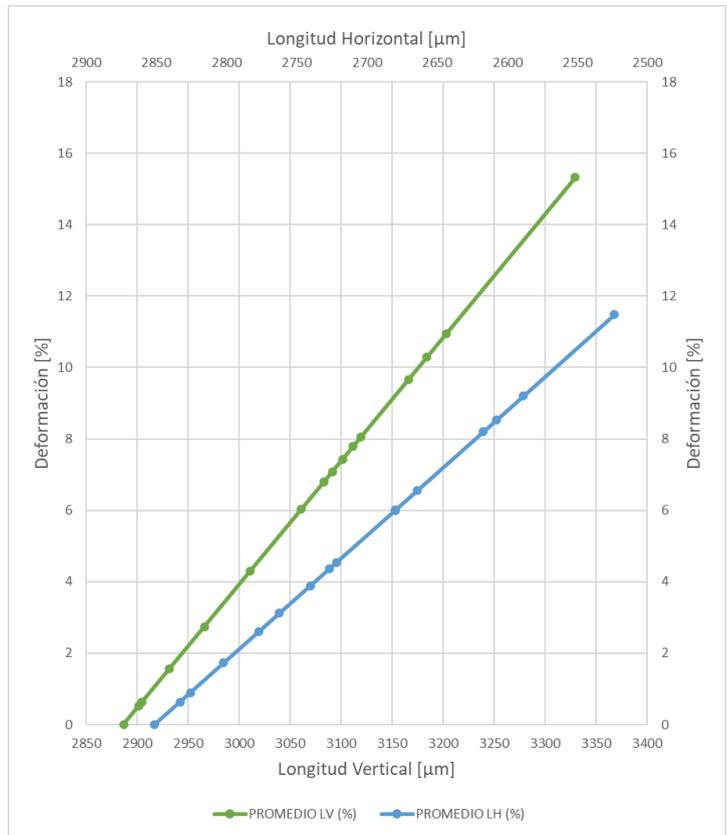


Figura 16 - Gráfico del Promedio de Columnas Laterales de Probeta B6

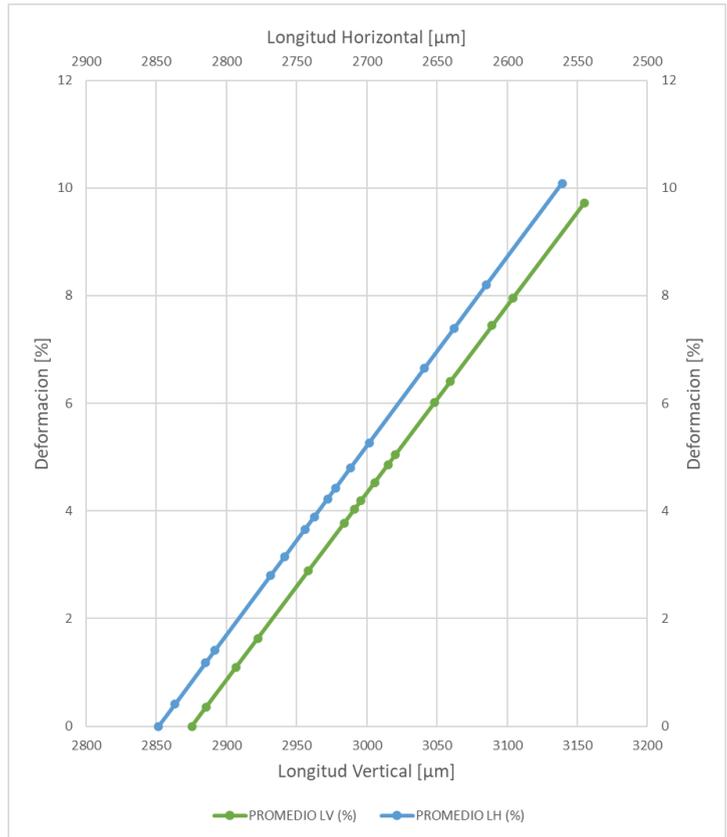


Figura 17 - Gráfico del Promedio de Columnas Centrales de Probeta B7

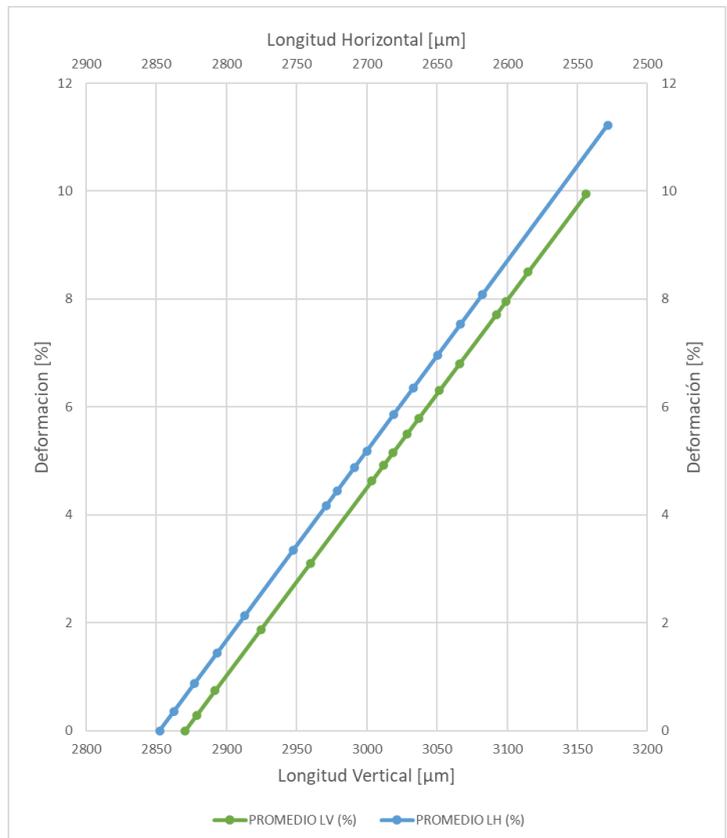


Figura 18 - Gráfico del Promedio de Columnas Laterales de Probeta B7

Tal como se puede observar, los gráficos correspondientes a las probetas A3 y A4 muestran una tendencia similar en cuanto a la evolución de la deformación tanto en la dirección vertical (LV) como horizontal (LH). En ambos casos, se observa un aumento progresivo del porcentaje de deformación vertical a lo largo de las filas. Sin embargo, una particularidad en la probeta A3, es que los valores máximos se localizan levemente hacia las columnas laterales (alrededor del 40% contra 35% para los valores centrales), mientras que en la probeta A4 estos se distribuyen de forma más simétrica entre todas sus columnas (valores cercanos al 35% en Lv y 17% en LH). La deformación horizontal, por su parte, presenta una disminución relativa más moderada (alrededor del 16% contra 13% para los valores centrales), manteniendo una tendencia casi lineal sobre la longitud de la probeta. Esta comparación sugiere un comportamiento mecánico similar entre ambas probetas, reforzando la homogeneidad que presenta el acero SPC590DU.

Por otra parte, al comparar los gráficos obtenidos de las probetas B6 y B7 del acero SPC1180DUB, se evidencian diferencias significativas en la distribución de la deformación inducida por el ensayo de tracción. En la probeta B6, se observa una mayor deformación en las columnas laterales, con valores cercanos al 16% en la dirección vertical (LV) y cercanos al 12% en la dirección horizontal (LH), mientras que en las columnas centrales estos valores fueron considerablemente menores (más cercanos al 15% y 8%, respectivamente). Esta diferencia sugiere que la probeta B6 presentó una zona de estricción más desplazada hacia los laterales, comparable con la probeta A3. En el caso de la probeta B7, se observa una distribución de deformación más uniforme entre las zonas centrales y laterales, con porcentajes de deformación similares (alrededor del 10% en LV y mayores al 10% en LH), y con una mayor deformación horizontal respecto a la vertical, lo cual contrasta con el comportamiento observado en la B6. Esto bien podría deberse a una mejor alineación durante el ensayo de tracción o a una variación relacionada con la modificación microestructural debido a la afectación térmica del grabado láser.

En conjunto, estos resultados reflejan que el acero SPC1180DUB puede presentar una respuesta mecánica heterogénea dependiendo de las condiciones específicas del ensayo de tracción, especialmente en lo que respecta a la distribución de esfuerzos en el ancho de la probeta. No obstante, tanto en el caso de B6 como B7, se evidencian porcentajes significativos de deformación, lo cual podría atribuirse a su mayor resistencia y menor ductilidad relativa frente al SPC590DU.

Metalografías

Para el análisis microestructural de los aceros, se realizó un procedimiento estándar de preparación metalográfica con el objetivo de obtener superficies óptimas para su observación en el microscopio óptico del Laboratorio Experimental de Soldadura y Ensayos de UNAHur.

Procedimiento Aplicado

Pulido: Las probetas fueron preparadas mediante un proceso de pulido progresivo con papeles abrasivos de hasta 1200, y luego se hizo un pulido final a espejo utilizando paños de tela y alúmina en suspensión de grano fino (1 μm) para asegurar una superficie lisa y reflectante.

Revelado químico: Se realizó un ataque químico con reactivo Nital al 0,5%. El ataque se efectuó en dos a tres intervalos de aplicación de aproximadamente 10 segundos cada uno, permitiendo resaltar los contornos de grano y las distintas fases presentes en la microestructura evitando el sobreataque.

Observación microscópica: Las superficies preparadas fueron analizadas mediante microscopía óptica a un aumento de 400X. Se tomaron micrografías de dos zonas representativas de cada probeta:

- La zona próxima a la fractura (para evaluar posibles cambios microestructurales por deformación o localización de esfuerzos).
- La zona media de la probeta, alejada de la fractura (como referencia del material no afectado por la deformación plástica).

Este procedimiento permitió observar con claridad las fases presentes y las características microestructurales asociadas a cada tipo de acero.

Acero SPC590DU

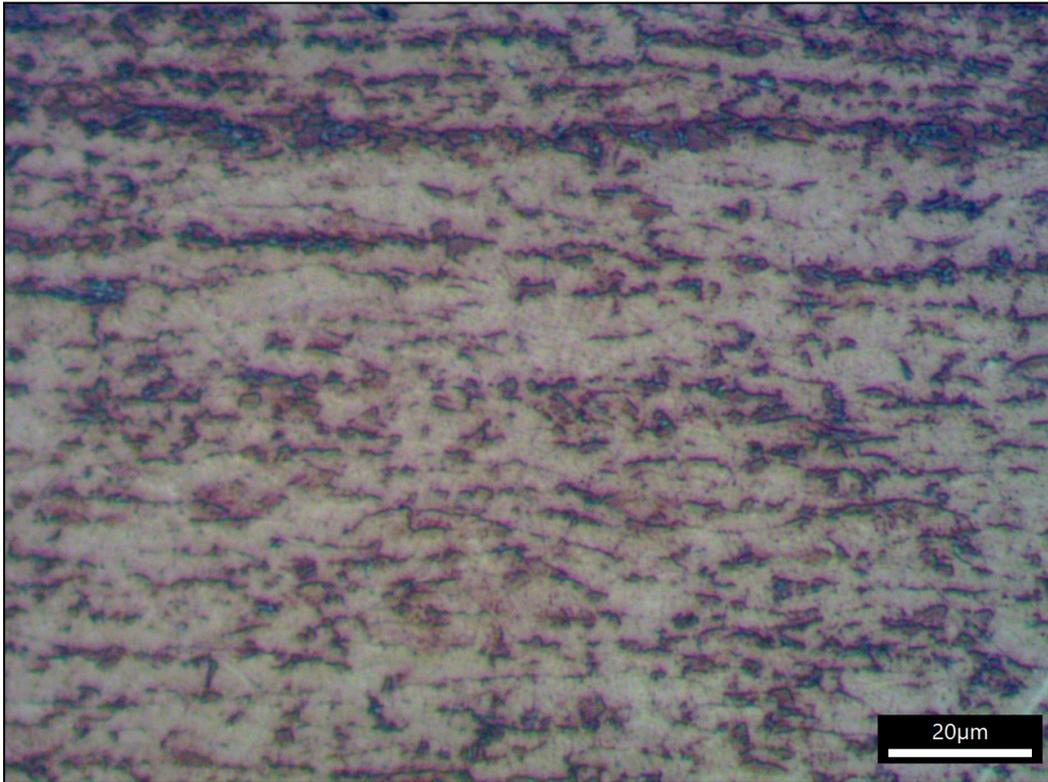


Figura 19 - Micrografía a 400X de Acero SPC590DU sobre la zona de fractura

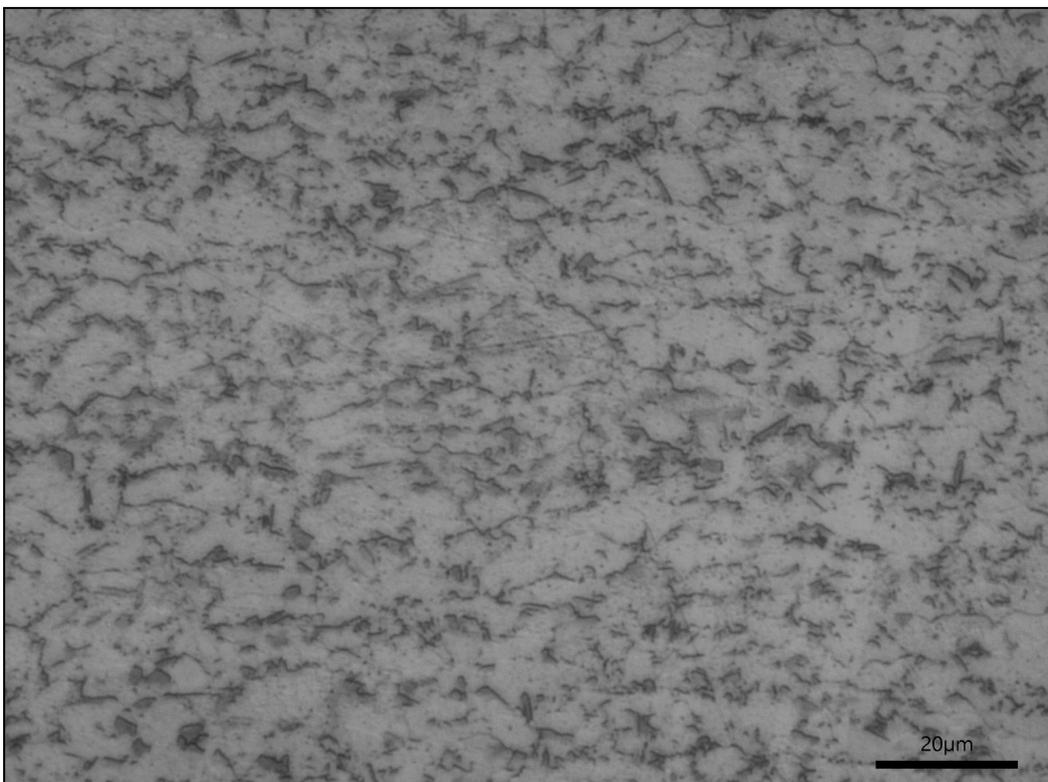


Figura 20 - Micrografía a 400X de Acero SPC590DU sobre la zona central

La microestructura de este acero presenta una matriz ferrítica, reconocible por su tonalidad clara y su morfología equiaxial y continua, que se define por su alta ductilidad y baja dureza. Dentro de la misma, se distingue la presencia de bandas discontinuas de perlita fina, que se manifiestan como regiones alargadas o aciculares y oscuras, alineadas en dirección a la deformación por el ensayo de tracción mayormente en la zona cercana a la fractura.

No se observan cantidades significativas de otras fases como bainita, martensita ni cementita libre, lo que se corresponde con este acero de bajo contenido de carbono sin tratamiento térmico.

Acero SPC1180DUB

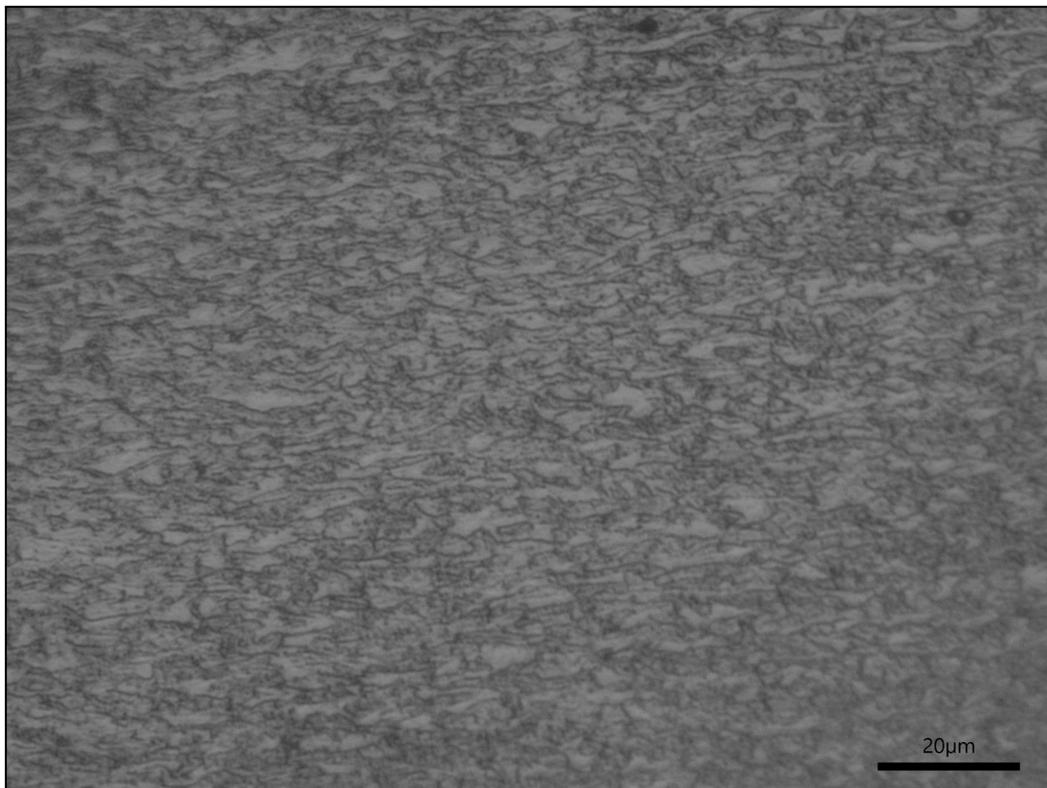


Figura 21 - Micrografía a 400X de Acero SPC1180DUB sobre la zona de la fractura

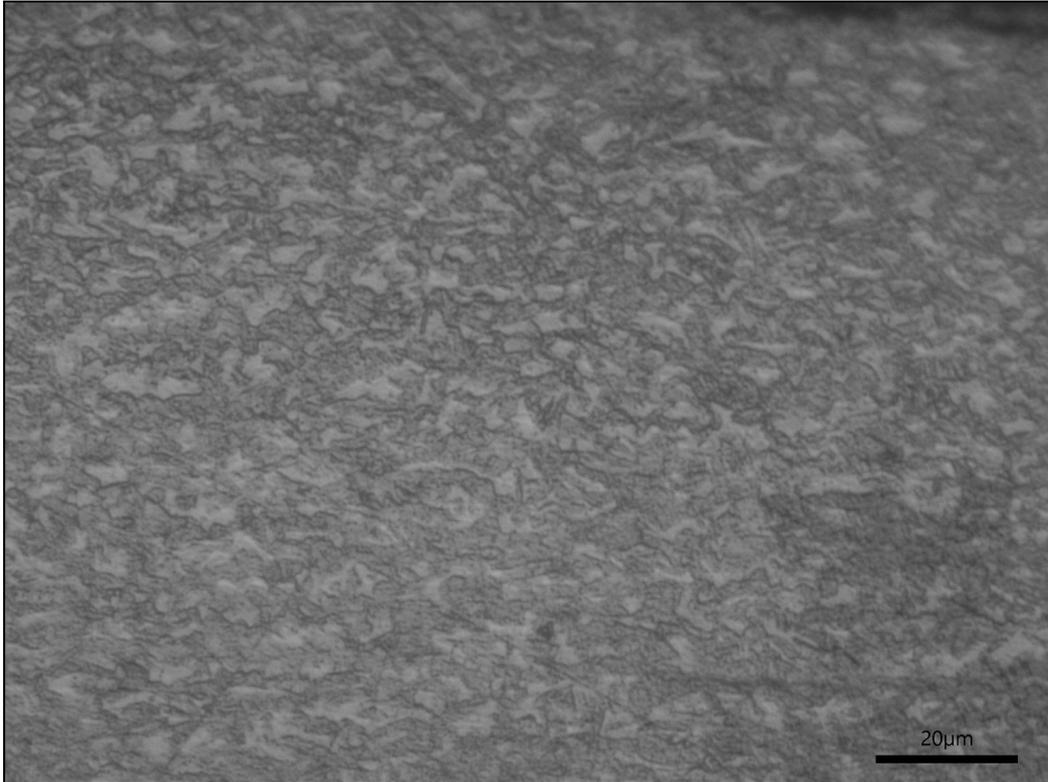


Figura 22 - Micrografía a 400X de Acero SPC1180DU sobre la zona central

La microestructura de este acero presenta una matriz martensítica, evidenciada por su aspecto acicular fino y oscuro que se alinea en dirección a la deformación por el ensayo de tracción mayormente sobre la zona cercana a la fractura. Esta morfología que se asemeja a una red enmarañada, es típica en aceros de ultra alta resistencia, debido a que la martensita es la fase principal responsable de la elevada dureza y resistencia mecánica.

Se observan también pequeñas zonas más oscuras de bainita inferior, intercalada entre las láminas martensíticas, posiblemente generadas por acumulación de calor en la zona plásticamente afectada.

Microdureza Vickers

Para la caracterización de la dureza de los aceros SPC590DU y SPC1180DUB se realizaron mediciones de microdureza Vickers sobre cada una de las probetas incluidas en frío con resina acrílica. El ensayo se llevó a cabo aplicando una carga de 0,2 kg durante 15 segundos, con una separación aproximada de 500 μm entre cada impronta, permitiendo así una distribución continua a lo largo del eje longitudinal de las probetas, desde la zona de sujeción hacia la zona de fractura.

De acuerdo con la norma *ASTM E384*, la distancia mínima entre los centros de indentaciones debe ser al menos tres veces el tamaño de la huella. Para todas las probetas, las diagonales de las huellas obtenidas fueron inferiores a 45 μm , por lo que la separación utilizada resulta adecuada y cumple ampliamente con los requisitos normativos.

En cada una de las probetas se realizaron entre 100 y 120 indentaciones, registrando las longitudes de las diagonales verticales y horizontales de las indentaciones para el posterior cálculo de las microdurezas HV 0.2. No obstante, durante la ejecución del ensayo se identificaron irregularidades en la base de las probetas debido a que algunas elipses sufrieron una leve deformación a causa de estar en contacto con la resina, o bien otras presentaban un desbordamiento de la misma, por lo que se tuvo que hacer un pulido manual para eliminar el exceso y dejar la base lisa, generando así deformaciones locales casi imperceptibles que afectaron la perpendicularidad de la carga aplicada. Como resultado, algunas mediciones presentaron valores atípicamente altos o bajos, producto de la inclinación local de la superficie.

Para asegurar la fiabilidad y coherencia de los resultados, se implementó un criterio de filtración en los datos, descartando aquellas mediciones que se desviaban considerablemente de la tendencia deseada. El criterio adoptado fue conservar una progresión creciente de dureza en dirección a la zona de fractura, lo cual se espera debido al efecto de endurecimiento por deformación generado durante el ensayo principal de tracción.

Acero SPC590DU

En el caso de las probetas A3 y A4, si bien ambas mostraron una tendencia creciente de la dureza hacia la zona de fractura, también presentaron una disminución en las últimas 20 mediciones, seguida de un incremento final. Para mitigar estas oscilaciones y obtener una representación más fiel del comportamiento del material, se descartaron aquellos valores que no seguían con la tendencia y se realizó un promedio punto a punto de las diagonales correspondientes a ambas probetas, obteniendo una serie depurada de datos promedios. A partir de esta serie, se volvieron a calcular los valores de microdureza y se elaboró un gráfico representativo del comportamiento de este acero.

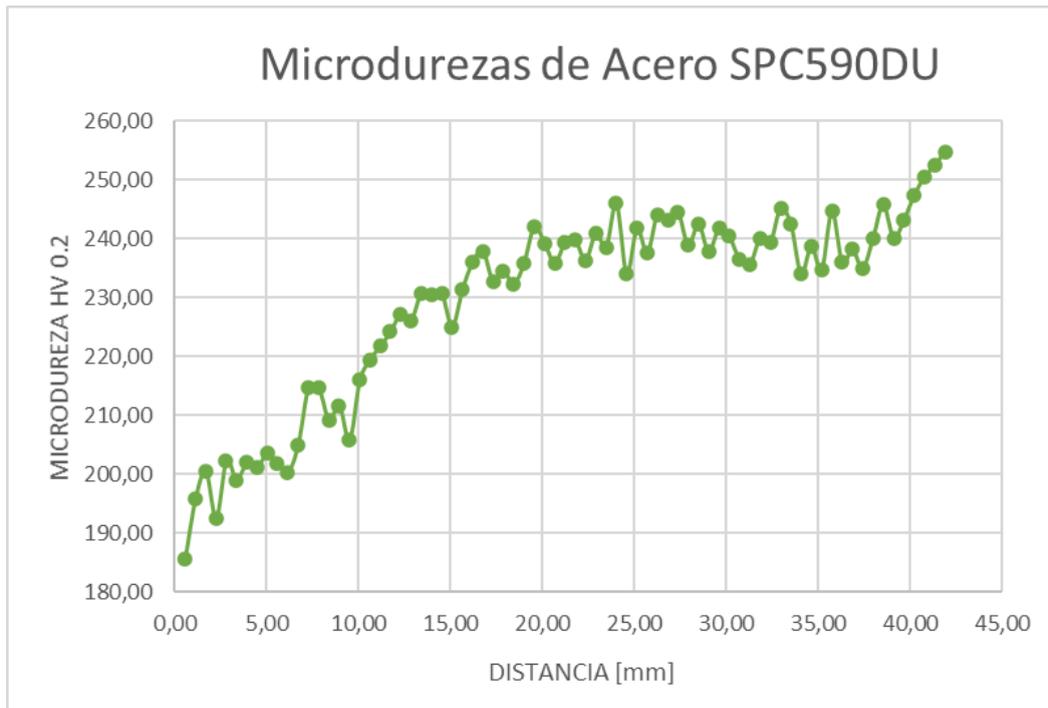


Figura 23 - Gráfico de Microdurezas para Acero SPC590DU

La variación porcentual de microdureza fue:

$$\text{Variación Porcentual} = \frac{\text{Microdureza Final} - \text{Microdureza Inicial}}{\text{Microdureza Inicial}} \times 100$$

$$\text{Variación Porcentual} = \frac{254,80 - 185,63}{185,63} \times 100 = 37,26\%$$

Acero SPC1180DUB

Para este acero, se observó un mayor grado de dispersión en los datos, particularmente en la probeta B6, la cual presentó la mayor cantidad de picos erráticos a lo largo de toda la superficie, imposibilitando el trabajo de filtración sin comprometer la continuidad de las microdurezas. En contraposición, se optó por utilizar la probeta B7 incluida en baquelita, la cual mostró una tendencia creciente más coherente y estable en dirección a la zona de fractura, por lo que se decidió conservar únicamente esta última como representativa del comportamiento de dureza para este acero.

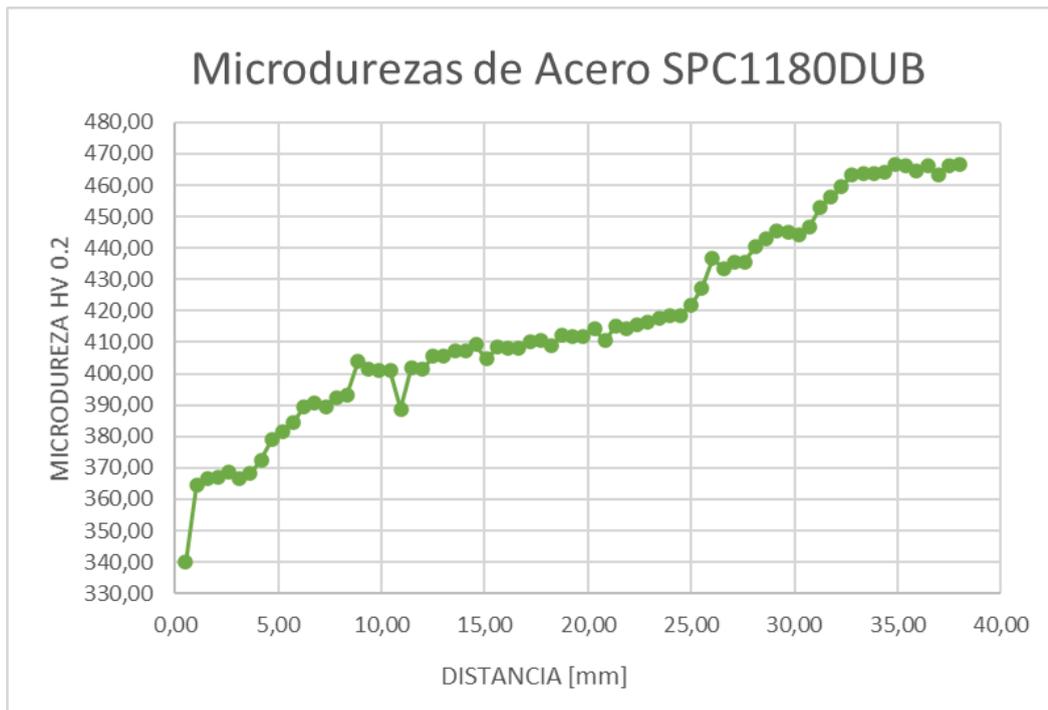


Figura 24 - Gráfico de Microdurezas para Acero SPC1180DUB

La variación porcentual de microdureza fue:

$$\text{Variación Porcentual} = \frac{\text{Microdureza Final} - \text{Microdureza Inicial}}{\text{Microdureza Inicial}} \times 100$$

$$\text{Variación Porcentual} = \frac{466,80 - 339,94}{339,94} \times 100 = 37,31\%$$

Análisis de Comportamiento en Cada Acero

- SPC590DU

El gráfico correspondiente a este acero presenta un perfil de dureza con una tendencia general creciente desde el extremo inicial hacia aproximadamente la mitad de la probeta, donde luego se estabiliza alrededor de los 235 a 245 HV 0.2, y finalmente vuelve a presentar un leve aumento.

El descenso de esas 20 indentaciones localizadas sobre la zona de fractura en ambas probetas podría estar asociado a defectos locales en la base de las mismas. Estas imperfecciones generan inclinaciones locales que afectan la perpendicularidad del penetrador, distorsionando las huellas indentadas e introduciendo errores sistemáticos en la medición, razón por la que se decidió descartar esos valores.

- SPC1180DUB

El gráfico de dureza correspondiente a este acero muestra una tendencia creciente mucho más marcada y sostenida, alcanzando valores de hasta 470 HV 0.2 hacia la zona de fractura. Remarcando nuevamente que se utilizó una probeta incluida con baquelita, se aprecia fácilmente que el incremento es continuo y sin picos erráticos, lo que indica un comportamiento mecánico más robusto y una mayor susceptibilidad al endurecimiento por deformación.

Comparación Final

El acero SPC1180DUB denota un perfil de dureza significativamente superior en magnitud y con una progresión más clara y continua.

El acero SPC590DU, aunque también muestra una tendencia creciente, presenta una curva de dureza más baja, lo que evidencia una menor capacidad de endurecimiento.

La filtración de datos fue más crítica para el SPC590DU, donde se aplicó un promedio entre probetas para reducir el ruido de las mediciones, mientras que en el caso del SPC1180DUB fue necesario descartar completamente una de las probetas.

Esta comparación respalda la coherencia entre el comportamiento mecánico observado en el análisis de deformación por tracción y la toma de microdureza en ambos aceros, debido a que a pesar de los inconvenientes que se presentaron, los resultados obtenidos de este ensayo se mantuvieron dentro del rango esperado para cada tipo de acero, confirmando las características esperadas de cada material.

Probetas Ensayadas por Tracción

La información brindada sobre los ensayos de tracción de las diferentes probetas, más específicamente los valores de fuerza y desplazamiento por unidad de tiempo (puntos), fue utilizada para representar gráficamente la relación de estas magnitudes para cada acero, la cual aportaría información importante para el objetivo específico del trabajo. Sin embargo, en los gráficos obtenidos no se observó el límite elástico ni la resistencia máxima a la tracción. El límite elástico se determinó por un método tradicional siguiendo los lineamientos de la norma *ASTM E8/E8M - 13A*. El método consiste en trazar una línea paralela a la zona recta aparentemente elástica del diagrama, pero desplazada horizontalmente un 0,2% de deformación (0,002 en valor adimensional). El punto en el cual la recta paralela a la zona elástica intersecta a la curva de tracción, será el límite elástico del material.

Para construir la recta paralela, se calculan las siguientes variables:

- Módulo E: Cociente entre la variación de fuerza y la variación de desplazamiento dentro de lo que se considere la región elástica inicial (zona lo más recta posible).

$$E = \Delta F / \Delta d$$

Este resultado será la pendiente de la recta paralela a la zona elástica

- Desplazamiento horizontal del 0,2% (DH 0,2%): Se calcula con la longitud de la zona calibrada (L_0) de las probetas ensayadas:

$$DH\ 0,2\% = 0,002 \times L_0$$

- Ecuación de la recta: Recta con desplazamiento horizontal del 0,2% = $E (d - DH\ 0,2\%)$

E = módulo E

d = valores de desplazamiento para cada punto

DH 0,2% = desplazamiento horizontal

Las dimensiones utilizadas para los cálculos realizados para los aceros SPC590DU tanto para las probetas A3 como A4 son:

ÁREA (mm ²)	ZONA CALIBRADA (L ₀)
12,3	50

Y para los cálculos realizados para los aceros SPC1180DUB tanto para B6 y B7 las dimensiones utilizadas son:

ÁREA (mm ²)	ZONA CALIBRADA (L ₀)
14,3	50

Se decidió superponer los resultados de los gráficos para ambas probetas de un mismo acero sobre un gráfico debido a su similitud en los valores, tanto para los aceros SPC590BU como para los SPC1180DUB, y los resultados fueron los siguientes:

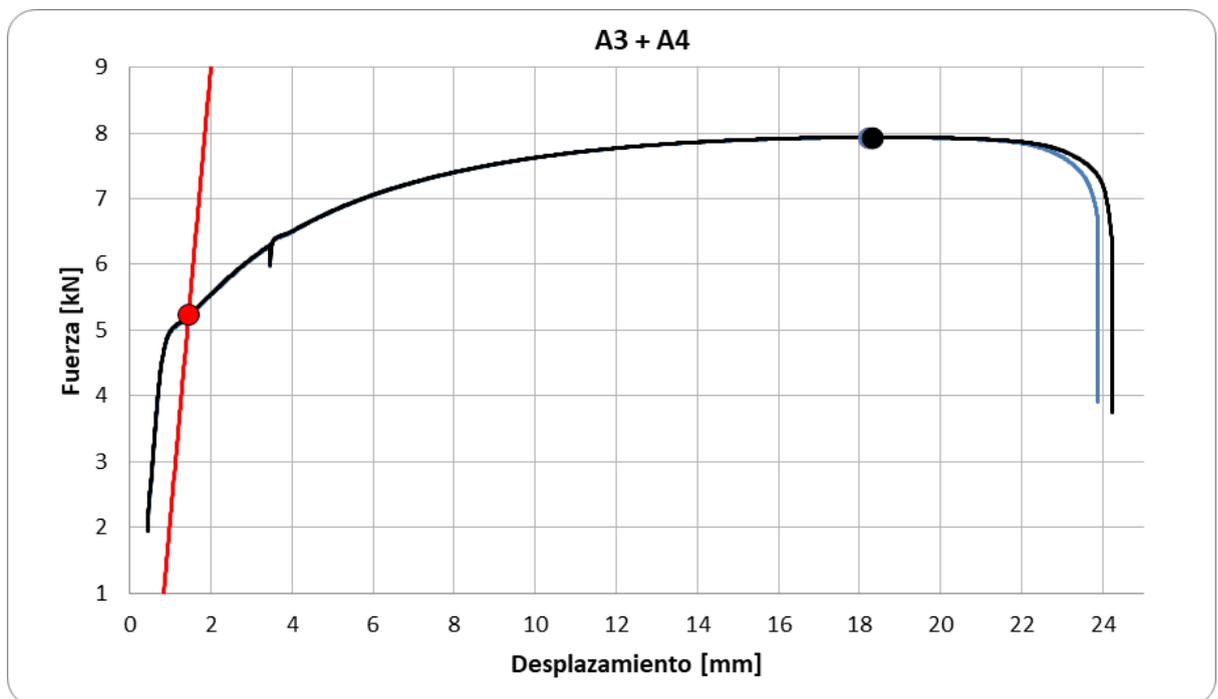


Figura 25. Gráfico de curva de tracción para las probetas A3 y A4

$\text{Límite elástico} = \text{Fuerza de ensayo} - \text{Fuerza recta } 0,2\%$

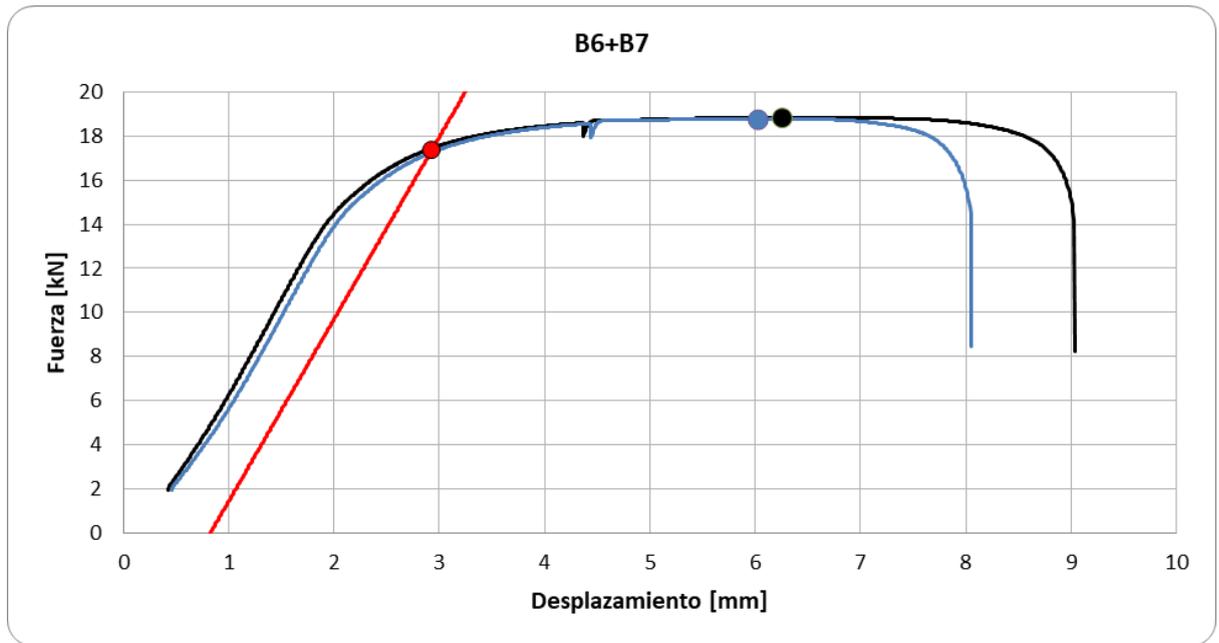


Figura 26. Gráfico de curva de tracción para las probetas B6 y B7

Límite elástico = Fuerza de ensayo - Fuerza recta 0,2%

Coeficiente de Endurecimiento

A partir de los valores de deformación LV y LH obtenidos de las grillas, junto con los resultados de los ensayos de microdureza Vickers realizados hasta el momento, es posible observar, por ejemplo, en los gráficos de microdureza, que el acero SPC590DU presenta un endurecimiento más abrupto en comparación con el acero SPC1180DUB. Esta diferencia puede estimarse al analizar la variación de microdureza en un rango de 10 a 20 unidades: en el caso del SPC590DU, dicha variación se alcanza con un número considerablemente menor de indentaciones, mientras que en el SPC1180DUB se requieren más mediciones para observar un cambio equivalente. En cuanto a las micrográficas, estas contribuyen a comprender el fenómeno de endurecimiento por deformación, al permitir comparar la microestructura previa y posterior a la deformación. Hasta el momento, los datos obtenidos permiten un análisis cualitativo sobre cómo varía la deformación y la dureza en los distintos aceros a medida que se avanza sobre la superficie de las probetas.

Para poder cuantificar este comportamiento, se calculó el Coeficiente de Endurecimiento (CE) para cada acero según lo establecido en la norma *IRAM-IAS U500 45-NM 264-2*.

Dentro de un cierto dominio de deformación plástica la curva real de tracción de los aceros de bajo carbono puede ajustarse mediante la expresión:

$$\sigma_R = K \varepsilon^n$$

Donde:

σ_R = Tensión

K = Coeficiente de Resistencia

ε = Deformación

n = Coeficiente de Endurecimiento

Calculando el logaritmo natural de la tensión (σ_R) y deformación (ε), gráficamente se obtiene como resultado una recta cuya pendiente será el Coeficiente de Endurecimiento, el cual toma valores entre 0 y 1.

- n cercano a 0: significa que el material se endurece lentamente tras la deformación.
- n cercano a 1: significa que el material se endurece en gran medida tras la deformación.

La ecuación para obtener el CE "n", exige que los datos ingresados sean valores de *tensión* (σ_R) y *deformación* (ε) para cada punto de la curva dentro del dominio de deformación plástica. Como los datos recogidos de cada ensayo son de fuerza [kN] y desplazamiento [mm], tuvimos que convertir las magnitudes de los datos de la siguiente manera:

- Desplazamiento [mm] → Deformación [%]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

$$\frac{\Delta L [\text{mm}]}{L_0 [\text{mm}]} = [\text{mm/mm}]$$

- Fuerza [kN] → Tensión [MPa]

$$1 \text{ kN} = 1000 \text{ N}$$

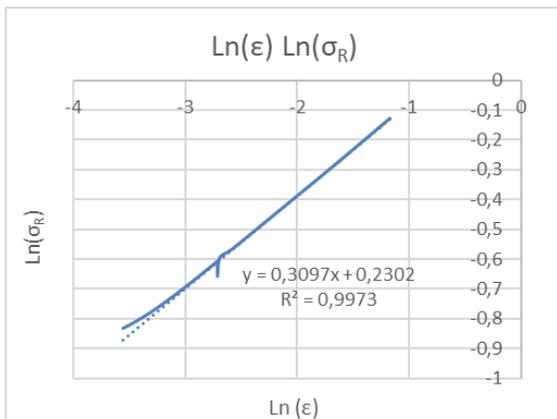
$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{\text{Fuerza}}{A_0}$$

Un CE bajo indica un material más dúctil, con poca ganancia de resistencia durante la deformación plástica. En cambio, un valor alto representa un material que endurece más rápidamente, elevando su resistencia a medida que se deforma, aunque con menor capacidad de elongación total.

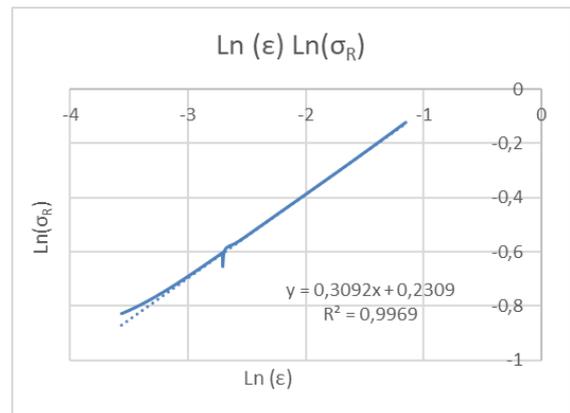
CE para los aceros SPC590DU

Gráfico Ln(ε) Ln(σ_R) probeta A3:



CE = 0.3097

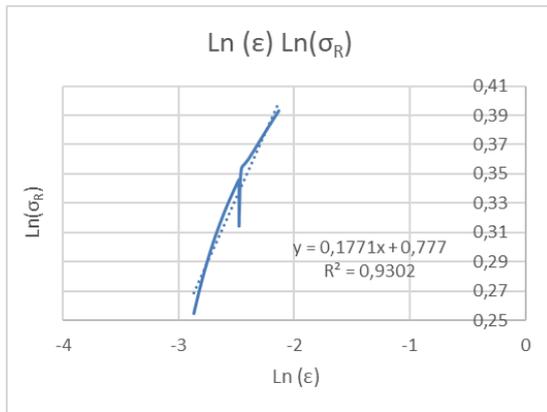
Gráfico Ln(ε) Ln(σ_R) probeta A4:



CE = 0.3092

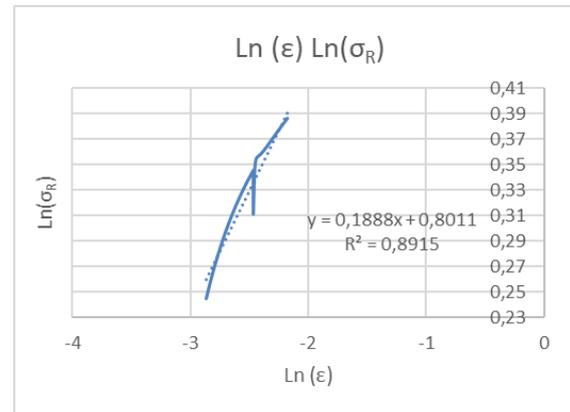
CE para los aceros SPC1180DUB

Gráfico Ln (ϵ) Ln(σ_R) probeta B6:



CE = 0.1771

Gráfico Ln(ϵ) Ln(σ_R) probeta B7:



CE = 0.1888

Los aceros SPC590DU presenta un valor de $n \approx 0.30$, lo cual tiene sentido físico debido a la alta resistencia y buena formabilidad característica de estos aceros. En cambio, los aceros SPC1180DUB tiene un valor más bajo $n \approx 0.18$, lo cual es coherente con su elevada resistencia inicial y menor capacidad de endurecimiento adicional durante el conformado.

Conclusiones

Este trabajo ha permitido establecer una conexión clara entre los cambios microestructurales de los aceros SPC590DU y SPC1180DUB y sus respectivos coeficientes de endurecimiento por deformación. Esto se logró a través de un análisis exhaustivo de los resultados mecánicos, metalográficos y de microdureza.

Primero, el desarrollo del método de ensayo de tracción, complementado con el uso de grillado láser para medir deformaciones y los perfiles de microdureza Vickers, proporcionó una visión integral sobre el comportamiento mecánico de los materiales analizados. Esto facilitó la cuantificación del Coeficiente de Endurecimiento (n) y su correlación con la evolución de la dureza y la microestructura en la zona deformada.

Los resultados indican que el acero SPC590DU tiene un coeficiente de endurecimiento promedio de $n \approx 0.30$, lo que sugiere una mayor capacidad de endurecimiento plástico, alineándose con su naturaleza ferrítica-perlítica y su buena ductilidad. Por otro lado, el acero SPC1180DUB mostró un coeficiente promedio más bajo, $n \approx 0.18$, que se relaciona con su microestructura martensítica-bainítica, lo que le otorga una alta resistencia inicial pero una capacidad limitada para endurecerse más. Estos hallazgos son consistentes con la clasificación metalúrgica de ambos aceros dentro de los grupos AHSS y UHSS, respectivamente.

El análisis de microdurezas reveló que, aunque ambos aceros presentaron un aumento porcentual similar en dureza hacia la zona de fractura ($\sim 37\%$), la forma en que esa dureza se distribuyó a lo largo de la superficie fue notablemente diferente: el SPC590DU mostró un endurecimiento más localizado y gradual, mientras que el SPC1180DUB exhibió una progresión de dureza más uniforme, pero con una mayor dispersión de valores. Esto podría deberse principalmente a irregularidades en la base de las probetas, a diferencias en las condiciones de ensayo o a la complejidad de su microestructura.

El análisis metalográfico reveló transformaciones microestructurales que se alinean con los mecanismos de endurecimiento que esperábamos: la perlita se alinea y compacta en el SPC590DU, mientras que en el SPC1180DUB se observa una densificación de martensita y bainita, especialmente en las áreas cercanas a la fractura. La relación entre los resultados del ensayo de tracción, las mediciones de la grilla deformada, la microdureza y la observación metalográfica respalda la validez del enfoque experimental que propusimos. Se demostró que la distribución de la deformación está íntimamente ligada a la microestructura del acero y su capacidad de endurecimiento, lo que influye directamente en la selección de materiales y el diseño de componentes que deben soportar cargas mecánicas elevadas.

En resumen, este estudio no solo permitió una caracterización cuantitativa de los materiales, sino que también ofrece una herramienta de análisis que puede ser utilizada en la industria para optimizar el uso de AHSS y UHSS en aplicaciones estructurales críticas. La combinación de métodos tradicionales con análisis metalúrgicos avanzados enriquece nuestra comprensión del comportamiento de estos materiales en condiciones reales de servicio.

Agradecimientos

Gadaleta, Martín (Industrias MARO)

Abate, Germán (INTI)

Martínez, Lucas (Sellos de Autor)

Mendez, Juan (Pasante del Laboratorio de Diseño Industrial UNAHur)

Duarte, Sofía (Pasante del Laboratorio Experimental, Soldadura y Ensayos UNAHur)

Iriberry, Nicolás (Ingeniero metalúrgico recibido en UNAHur - CAC-CNEA)

Loureiro, Nora (Docente de Ingeniería metalúrgica en UNAHur - CAE-CNEA)

Rodríguez, Fernando. Griffiths, Martín. Farías, Lihueel. (División Materiales Avanzados - División Recubrimientos y Tribología - Metalografía CAC-CNEA)

Vásquez, Lucas (INTI - Laboratorio Experimental, Soldadura y Ensayos UNAHur)

Bibliografía

- Rochi F, Gómez J (2021) Afectación térmica de un acero de alta resistencia grillado por láser en distintas condiciones de proceso (ESIC)
- ESIC Probetas A3 A4 B6 B7 ([Hoja de Cálculo](#))
- Norma Argentina IRAM-IAS U500-45: Método para determinar el coeficiente de endurecimiento “n” mediante ensayos de tracción axial
- Keller S, Kimchi M, Mooney P (2017) Advanced High-Strength Steels Application, Guidelines, WorldAutoSteel (Libro)
- Martínez Krahmer D, López de Lacalle LN, Polvorosa R, Alonso U (2016) Alternatives for Specimen Manufacturing in Tensile Testing of Steel Plates (Paper)
- Abate G, Antunez N, Simoncelli A, Martynenko V (2020) Grid Laser Marking Influence on High - Strength Steels Tensile Test Behavior (Paper)
- Tensile Test ([Video](#))
- Especificación de Acero SPC590DU, Industrias MARO (Catálogo)
- Especificación de Acero SPC1180DUB, Industrias MARO (Catálogo)
- Pastor A (2022) Relación Microestructura-Propiedades, Clase 3 – Mecanismos de Endurecimiento, Diplomatura en Aplicaciones Nucleares ([Documento Word](#))
- AHSS Guidelines ([Página Web](#))
- ASTM E8/E8M – Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- ASTM E384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials
- Callister, W.D., & Rethwisch, D.G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction.
- Metals handbook Atlas of microstructures of industrial alloys, 8th Edition (ASM).
- Metals Handbook Volume 09 - Metallography and Microstructures.