

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“Influencia de la reducción de ancho de planchón por medio de
Slab Sizing Press (SSP) en la microestructura y propiedades
mecánicas de Aceros Ultra Bajo Carbono”**

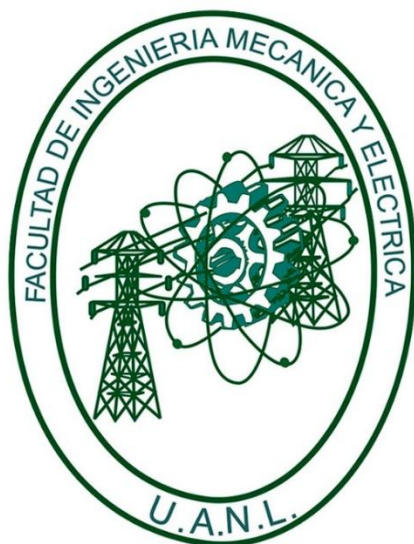
POR

IQ. JORGE EDUARDO ESPARZA ZERTUCHE

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES.**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN JUNIO, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“Influencia de la reducción de ancho de planchón por medio de
Slab Sizing Press (SSP) en la microestructura y propiedades
mecánicas de Aceros Ultra Bajo Carbono”**

POR

IQ. JORGE EDUARDO ESPARZA ZERTUCHE

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES.**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN JUNIO, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Influencia de la reducción de ancho de planchón por medio de Slab Sizing Press (SSP) en la microestructura y propiedades mecánicas de Aceros Ultra Bajo Carbono", realizada por el estudiante Jorge Eduardo Esparza Zertuche, con número de matrícula 1622566, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en ciencias de la Ingeniería con orientación en materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama
Director

Dr. Rafael David Mercado Solís
Revisor

Dr. Edgar Omar García Sánchez
Revisor

M.C. Alexis Iván Silva Fuentes
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Azael Martínez de la Cruz
Secretario de Estudios de Posgrado

**SECRETARÍA DE
ESTUDIOS DE
POSGRADO**

Institución 190001

Programa 557546

Acta Núm. 4725

Ciudad Universitaria, a 24/07/2026

Dedicatoria

A Nancy, por el apoyo incondicional en todos los momentos y a mi familia por el soporte siempre.

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo constante e incondicional a lo largo de estos años. Su respaldo, confianza y acompañamiento han sido fundamentales para mi formación personal y profesional, convirtiéndose en el pilar que me permitió avanzar con disciplina y determinación hasta alcanzar esta meta.

A Ternium, por brindarme la oportunidad de participar en esta formación de maestría y por fungir como principal facilitador al poner a disposición sus instalaciones, recursos y entorno industrial para el desarrollo de este proyecto. Su respaldo institucional y apertura técnica fueron clave para fortalecer mi crecimiento profesional y consolidar los objetivos académicos planteados.

Una dedicatoria especial a la Dirección de Producto, por la formación especializada brindada y por el acompañamiento constante durante este proceso. Su orientación técnica, disposición para resolver dudas y apoyo oportuno fueron fundamentales para fortalecer mis competencias y avanzar con solidez en cada etapa de esta maestría.

Contenido

Dedicatoria.....	3
Agradecimientos	4
Resumen.....	9
Capítulo 1. Introducción.....	10
1.1 Marco teórico y antecedentes	12
1.1 Laminación en caliente.....	12
1.1.1 Horno de recalentamiento.....	13
1.1.2 Sizing Press	14
1.1.3 Molinos reversibles	14
1.1.4 Molino acabador	15
1.1.5 Mesa de enfriamiento	16
1.2: Fundamentos de Microestructura de los Aceros UBC	17
1.2.1 Caracterización microestructural de los aceros UBC	17
1.2.2 Efecto pinning en el crecimiento de grano austenítico	18
1.2.3 Precipitaciones finas en ferrita	18
1.2.4 Textura Cristalográfica	19
1.2.5. Temperaturas críticas de transformación y control termomecánico.....	20
1.2.6 Influencia del procesamiento sobre la evolución microestructural	22
1.3: Rol del Slab Sizing Press en la Generación de Heterogeneidades Microestructurales	23
1.3.1 Mecanismo de funcionamiento del Slab Sizing Press (SSP)	23
1.3.2 Efectos microestructurales inducidos por el SSP	23
1.4: Implicaciones Mecánicas de las Heterogeneidades Inducidas.....	24
1.4.1 Correlación entre microestructura y propiedades mecánicas en UBC ..	24
1.5: Pérdidas térmicas durante la laminación en caliente: mecanismos y zonas críticas.....	26
1.6 Resumen del marco teórico.....	29
Capítulo 2. Hipótesis y objetivos.	31
2.1 Hipótesis.....	31

2.2 Objetivos generales	31
2.3 Objetivos específicos	31
Capítulo 3. Procedimiento experimental.....	32
3.1 Configuración de parámetros en SSP.....	33
3.2 Matriz experimental.....	34
3.2 Caracterización térmica del acero durante proceso.....	36
3.3 Muestreo de material	36
3.4 Análisis del material	39
Capítulo 4. Resultados y discusiones.....	43
4.1 Caracterización térmica.....	43
4.1.2 Correlación de gradiente térmico contra reducción en <i>Slab Sizing Press</i> . 45	
4.2 Caracterización de morfología microestructural por microscopía óptica.....	45
4.2.1 Micrografías aleación UBC TiNb	46
4.2.2 Micrografías aleación UBC TiB.....	48
4.2.3 Micrografías aleación UBC Ti.....	50
4.3 Caracterización de propiedades mecánicas.....	52
4.3.1 Ensayos de tensión en para aleaciones UBC	52
4.3.1 Ensayo de microdureza de Vickers en aleaciones UBC	53
4.4 Discusión de resultados	55
Capítulo 5. Conclusiones.....	58
Recomendaciones.....	58
Capítulo 6. Referencias	59
Ilustración 1. Representación de proceso de laminación en caliente en Centro Industrial Ternium Pesquería.....	12
Ilustración 2. Representación de horno de recalentamiento	14
Ilustración 3 Representación de Slab Sizing Press	14
Ilustración 4 Representación de Molinos Reversibles	15
Ilustración 5 Representación de Molino acabador.....	16
Ilustración 6 Representación de Mesa de enfriamiento (ROT).....	17
Ilustración 7. Microestructura típica de acero UBC (Elaboración propia)	20
Ilustración 8. Diagrama hierro carbono [18]	21

Ilustración 9. Ejemplo de diagrama CCT obtenido de Jmat PRO [Propia]	22
Ilustración 10. Diferencias térmicas a 25mm de borde vs centro (WS: Work side / DS: Drive side) [Propia]	28
Ilustración 11. Pérdidas térmicas después del SSP [Propia]	29
Ilustración 12. Representación de proceso de laminación en caliente en Centro Industrial Ternium (CIT) Pesquería.....	29
Ilustración 13. Metodología de caracterización.	32
Ilustración 14. Imágen ilustrativa de Slab Sizing Press	34
Ilustración 15. Configuración de hardware de medidor de temperatura en borde. (Recuperado de Technical Specification of F7 Exit Profile Thickness Gauge By Mitsubishi ®).....	36
Ilustración 16. Esquema representativo de la ubicación de cada muestra obtenida, indicando las posiciones de extracción de especímenes (A–E) y la dirección de laminación. Elaboración propia.	38
Ilustración 17. Ejemplo de material cortado en las zonas indicadas por el esquema de la ilustración 16.	40
Ilustración 18. Ejemplo de zonas muestreadas para ensayo de microdureza de Vickers según ilustración 16.....	42
Ilustración 19. Evolución térmica al centro de aleación UBC Ti con 294 mm de reducción en SSP.	43
Ilustración 20. Evolución térmica al centro de aleación UBC TiB con 264 mm de reducción en SSP.	44
Ilustración 21. Evolución térmica al centro de aleación UBC TiNb con 319 mm de reducción en SSP.	44
Ilustración 22. Gradiente térmico con respecto a la reducción en slab sizing press aplicada.....	45
Ilustración 23. Micrografías aleación UBC TiNb a 500x, muestra zona diámetro interno Cara Superior	46
Ilustración 24. Micrografías aleación UBC TiNb a 500x, muestra zona diámetro interno Cara inferior.....	46
Ilustración 25. Micrografías aleación UBC TiNb a 500x, muestra zona diámetro exterior Cara Superior	47
Ilustración 26- Micrografías aleación UBC TiNb a 500x, muestra zona diámetro exterior Cara Inferior	47
Ilustración 27. Micrografías aleación UBC TiB a 500x, muestra zona diámetro interno Cara Superior.	48
Ilustración 28. Micrografías a 500x aleación UBC TiB, muestra zona diámetro interno Cara Inferior	48
Ilustración 29. Micrografías a 500x aleación UBC TiB, muestra zona diámetro exterior Cara Superior	49

Ilustración 30. Micrografías a 500x aleación UBC TiB, muestra zona diámetro exterior Cara Inferior	49
Ilustración 31. Micrografías a 500x aleación UBC Ti, muestra zona diámetro Interior Cara Superior	50
Ilustración 32. Micrografías a 500x aleación UBC Ti, muestra zona diámetro Interior Cara Inferior	50
Ilustración 33. Micrografías a 500x aleación UBC Ti, muestra zona diámetro Exterior Cara Superior	51
Ilustración 34. Micrografías a 500x aleación UBC Ti, muestra zona diámetro Exterior Cara Inferior	51
Ilustración 35. Límite elástico en diámetro exterior del rollo con ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina diferentes aleaciones de UBC	52
Ilustración 36. Límite elástico en diámetro interior del rollo con ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina diferentes aleaciones de UBC	52
Ilustración 37. Elongación en diámetro exterior de rollo ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina con diferentes aleaciones UBC.	53
Ilustración 38. Elongación en diámetro interior de rollo ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina con diferentes aleaciones UBC.	53
Ilustración 39. Último esfuerzo en diámetro interior del rollo ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina con diferentes aleaciones de UBC.	53
Ilustración 40. Último esfuerzo en diámetro exterior del rollo ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina con diferentes aleaciones de UBC	53
Ilustración 41. Microdureza de Vickers para aleación UBC Ti en diámetro exterior	54
Ilustración 42. Microdureza de Vickers para aleación UBC TiNb en diámetro externo	54
Ilustración 43. Microdureza de Vickers para aleación UBC TiB en diámetro externo	54

Resumen

El presente trabajo de investigación se centra en el estudio del comportamiento del acero UBC cuando es sometido a una reducción de ancho en el *Slab Sizing Press* bajo condiciones industriales. Se analizó el impacto de la aplicación del *Slab Sizing Press* durante la laminación en caliente en la microestructura y las propiedades mecánicas de aceros ultra bajo carbono, con el fin de comprender su influencia en el desempeño final del material.

Al relacionar el gradiente térmico contra la reducción de ancho en el SSP, no se observa correlación significativa y esto se ve soportado por el desempeño en propiedades mecánicas y por la microestructura del material.

Se determina que el uso del Slab Sizing Press no afecta significativamente al performance tensil del material, siendo esto un indicador de buena funcionalidad del acero frente al proceso de reducción de ancho de slab.

Capítulo 1. Introducción

Los aceros ultra bajo carbono (UBC), también conocidos como aceros libres de elementos intersticiales (IF), constituyen uno de los materiales más utilizados en la manufactura de productos laminados destinados a aplicaciones automotrices y electrodomésticas que requieren alta conformabilidad y excelente homogeneidad. Su reducida concentración de carbono, junto con la presencia controlada de elementos microaleantes como titanio, niobio y boro permite la formación de una microestructura ferrítica estable y libre de solutos intersticiales, lo cual proporciona un comportamiento mecánico adecuado para procesos de formado y embutido profundo. Debido a estas características, el control de la ruta de procesamiento resulta esencial para asegurar que la microestructura y las propiedades finales cumplan con las especificaciones requeridas por el mercado actual, que cada vez son más estrictas y exigentes.

Dentro de las etapas dentro de la fabricación de acero ultra bajo carbono (UBC), la laminación en caliente es un proceso determinado como crítico ya que en él interactúa la deformación, la temperatura y la velocidad de enfriamiento en una secuencia que determina la evolución microestructural que rige el comportamiento final del material. Durante esta etapa ocurren fenómenos críticos como la recrystalización dinámica y estática, la recuperación, el crecimiento de grano austenítico, la transformación a ferrita y la precipitación de carburos y carbonitruros de los elementos microaleantes. Estos mecanismos están fuertemente influenciados por los gradientes térmicos presentes en el material y pueden generar variaciones en microestructura y propiedades mecánicas del acero.

En los últimos años, el proceso de laminación en caliente ha integrado tecnologías de control dimensional cada vez más avanzadas buscando ser más versátiles ante la demanda cambiante del mercado actual, entre las cuales destaca la *Slab Sizing Press (SSP)*. Este equipo permite ajustar el ancho de la placa mediante reducciones transversales controladas, corregir desviaciones geométricas de origen, eliminar cuñas laterales y mejorar la uniformidad de la sección antes de su ingreso a las etapas de desbaste y acabado. Sin embargo, la aplicación del *SSP* introduce efectos térmicos locales debido a la deformación concentrada en los bordes, al contacto directo con placas enfriadas y al aumento relativo del área expuesta, generando gradientes de temperatura que pueden modificar la evolución microestructural del acero. Estas variaciones térmicas afectan a la evolución térmica de la barra de transferencia que pudiera conllevar a cambios microestructurales considerables en la etapa de acabado, siendo los bordes las zonas sobre enfriadas por el contacto de *Slab Sizing Press* y por la pérdida natural de temperatura en la lámina la que tendría la iniciación de transformación de austenita a ferrita más rápida que el centro del material y a su vez la precipitación de microaleantes, lo que

potencialmente conduce a heterogeneidades en el material que impactan las propiedades mecánicas y la consistencia del producto final.

Las pérdidas térmicas inducidas por el *SSP* cobran particular relevancia en aceros UBC, cuyo comportamiento es altamente sensible a variaciones en temperatura derivado de sus temperaturas de transformación altas relacionado directamente con su bajo contenido de carbono. El enfriamiento acelerado en los bordes modifica la temperatura que, sin un buen control de proceso, podríamos generar laminaciones en zona bifásica o en zona ferrítica, lo que alteraría la fracción y morfología de la ferrita formada durante el enfriamiento y generar microestructuras más refinadas o parcialmente inhibidas respecto al centro del ancho. Como consecuencia, pueden manifestarse diferencias medibles en propiedades como límite elástico, último esfuerzo, elongación y microdureza de Vickers. Esto propiciaría un desempeño diferenciado en la aplicación final de bordes contra el centro de un mismo rollo.

En este contexto, comprender de manera integral la interacción entre el proceso *SSP*, la dispersión térmica inducida y la evolución microestructural del acero UBC es fundamental para optimizar el control del proceso y garantizar la calidad dimensional y metalúrgica del producto final. El análisis detallado de los efectos del *SSP* sobre la temperatura, la microestructura y las propiedades mecánicas constituye una herramienta clave para el diseño de estrategias industriales que minimicen heterogeneidades y aseguren niveles adecuados de desempeño.

1.1 Marco teórico y antecedentes

1.1 Laminación en caliente

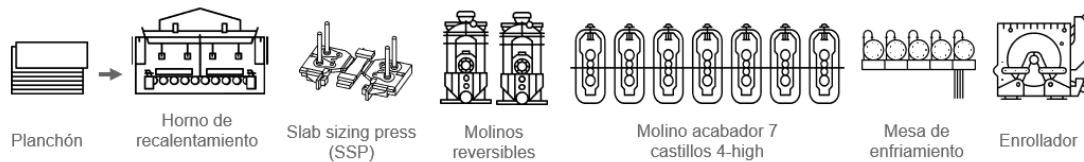


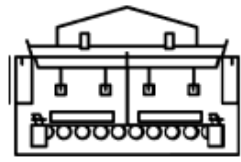
Ilustración 1. Representación de proceso de laminación en caliente en Centro Industrial Ternium Pesquería.

La etapa inicial del proceso de fabricación de bandas en caliente comienza con el recalentamiento del planchón colado, que posee un espesor entre 200 y 250 mm, un ancho de 900 a 1950 mm y una longitud que varía según su peso. Este planchón es introducido en un horno de recalentamiento de tipo viga galopante, donde se eleva su temperatura típicamente por encima de los 1200 °C. El propósito de este recalentamiento es lograr que el acero alcance el campo austenítico homogéneo, lo cual permite una deformación plástica significativa. Adicionalmente, se busca ablandar el material para mejorar su maleabilidad, formar una capa superficial de óxido que pueda ser eliminada posteriormente, y disolver precipitados indeseados como carburos o nitruros preexistentes. En aceros microaleados tipo UBC, este control térmico es especialmente crítico: por ejemplo, temperaturas de 1200 a 1250 °C se emplean para disolver compuestos de niobio y titanio. Incluso una pequeña adición de titanio puede ayudar a inhibir el crecimiento del grano austenítico durante el recalentamiento, asegurando así una estructura refinada. Posterior al recalentamiento, en instalaciones modernas se utiliza una prensa llamada Sizing press, situada antes del tren de desbaste. Esta prensa permite ajustar las dimensiones del planchón caliente, especialmente su ancho, mediante una compresión plástica que puede reducirlo hasta 300 mm en una sola pasada. El uso de esta tecnología mejora significativamente el aprovechamiento del material al reducir los recortes laterales y facilitar un ingreso más uniforme al laminador. Luego, el planchón pasa a la etapa de desbaste, en la cual se reduce su espesor de forma considerable. En este trabajo, se emplean molinos reversibles de doble stand con configuración de rodillos 4-high, donde el material se somete a múltiples pasadas. Durante este proceso, se utiliza agua a alta presión para eliminar la cascarilla superficial y rodillos verticales para evitar la expansión lateral. Es esencial mantener temperaturas elevadas, generalmente superiores a los 1100 °C, para asegurar una recristalización completa entre pasadas. En el caso de aceros UBC, mantener el acero en su fase austenítica evita la precipitación prematura de microaleantes como el Nb o el V, lo que podría comprometer la microestructura deseada. A continuación, el material ingresa al molino acabador, una sección de laminación compuesta por

siete castillos *4-high* dispuestas en serie. En esta etapa se realiza la reducción final del espesor, obteniendo una banda que puede variar entre 1.2 mm y 25.4 mm según el producto requerido. Cada castillo cuenta con sistemas de refrigeración, lubricación y guiado lateral, y se emplean loopers entre stands para desacoplar tensiones debido a la aceleración progresiva de la banda. El control de temperatura durante la laminación es estratégico: mientras los primeros castillos operan aún en el rango de austenita recristalizada, hacia el final del proceso se puede modular la temperatura para influir en la transformación microestructural. En aceros UBC, se utiliza una laminación final cerca de la temperatura de transformación Ar_3 , lo que favorece la obtención de ferrita refinada tras el enfriamiento controlado. Finalmente, la banda pasa por la mesa de enfriamiento, una sección equipada con bancos de rodillos y boquillas de agua que aplican enfriamiento acelerado. Este proceso permite ajustar la temperatura final antes del enrollado. En aceros microaleados, el enfriamiento controlado forma parte integral del tratamiento termomecánico, permitiendo la transformación deseada de la austenita en ferrita fina. Esto mejora las propiedades mecánicas del producto final, ya que se puede evitar la formación de perlita y promover estructuras como la ferrita acicular. La temperatura de enrollado se ajusta según el tipo de acero, siendo más alta para aceros IF utilizados en estampado y más baja en aceros HSLA para favorecer la precipitación de microaleantes en el rollo.

1.1.1 Horno de recalentamiento

Es la etapa previa fundamental. El planchón colado (De entre 200 a 250 mm de espesor, entre 900 a 1950mm de ancho y dependiendo del peso es el largo del slab) se introduce en un horno de recalentamiento (de tipo viga galopante) y se calienta típicamente por encima de 1200 °C. Los objetivos del recalentamiento son lograr una temperatura suficientemente alta que coloque al acero en el campo austenítico homogéneo para permitir la deformación plástica significativa, ablandar el material (disminuir la resistencia a la deformación) mejorando su maleabilidad, formar una capa superficial de cascarilla de óxido (FeO/Fe_3O_4) que luego pueda desprenderse fácilmente en etapas posteriores, limpiando la superficie y disolver precipitados indeseados (carburos/nitruros preexistentes) en la austenita, dejándolos en solución para luego controlar su precipitación. En los aceros UBC microaleados es crítico el adecuado recalentamiento: por ejemplo, se suelen usar 1200–1250 °C para disolver $Nb(C,N)$ o TiN finos; una adición de 0.015% de Ti ayuda a asegurar un grano austenítico recalentado fino al inhibir su crecimiento excesivo mediante partículas de TiN que permanecen sin disolver. El tiempo de recalentamiento (tiempo de empape o estancia) se controla para homogenizar la temperatura en todo el espesor del planchón y garantizar la solución de los microaleantes en la matriz. Durante este proceso se genera cascarilla cuya cantidad y adherencia dependen de la temperatura, atmósfera y tiempo en el horno, así como de la composición del acero.



Horno de
recalentamiento

Ilustración 2. Representación de horno de recalentamiento

1.1.2 Sizing Press

En instalaciones modernas de bandas en caliente es común un sistema de prensa hidráulica vertical ubicado a la salida del horno (antes del tren de desbaste). Su función es ajustar las dimensiones del planchón en caliente, principalmente reducir su ancho mediante una compresión plástica sin necesidad de múltiples pasadas. Esto permite obtener un ancho más cercano al final deseado, disminuyendo recortes laterales y mejorando el rendimiento metálico. Una sola pasada de la prensa puede reducir el ancho en hasta 300 mm aplicando enormes fuerzas (aprox. 20,000 kN). Adicionalmente, la reducción inicial de espesor ayuda a ingresar el material al laminador de desbaste con sección más uniforme.

El sizing press complementa a los canteadores tradicionales (rodillos verticales / *edgers*) y contribuye a un control más preciso del perfil del planchón antes del laminado continuo.



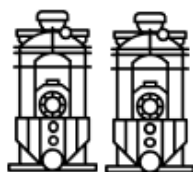
Slab sizing press
(SSP)

Ilustración 3 Representación de Slab Sizing Press

1.1.3 Molinos reversibles

Tras el recalentamiento (y eventualmente el paso por la prensa de dimensionado), el planchón ingresa a la etapa de desbaste. El objetivo aquí es reducir dramáticamente el espesor grueso del planchón (por ejemplo, de 220 mm a 34 - 54 mm) en una serie de pasadas, mientras se mantiene o ajusta el ancho y se elimina

la cascarilla superficial. La configuración utilizada en la presente tesis corresponde a laminadores reversibles de 2 stands por el cual el material va y viene aplicando múltiples reducciones. En esta zona se integran sistemas de descascarillado a alta presión de agua (Water jet de hasta 24 MPa) antes de las pasadas para arrancar la cascarilla formada, rodillos canteadores verticales (*edgers*) que controlan el ancho evitando la expansión lateral excesiva durante cada pasada. Los molinos reversibles tienen 4 rodillos por lo que se conocen como molinos 4-*high* y constan de 2 rodillos de trabajo los cuales están en contacto con la cinta y lámina y 2 rodillos de apoyo quienes ejercen la mayor parte de la fuerza durante la laminación. Durante la reducción de espesor, el material permanece generalmente a temperatura austenítica alta (1100 °C o más) asegurando recristalización completa después de cada paso, lo que mantiene un tamaño de grano austenítico relativamente uniforme antes de la etapa de acabado. El control de temperatura es importante en aceros UBC, si contienen microaleantes, se debe evitar que el material enfríe por debajo de la temperatura de precipitación de ciertos microaleantes de forma prolongada antes del tren de acabado de forma prolongada para que no precipiten prematuramente partículas de Nb, V, etc., ni comience la formación de ferrita. Por ello, a veces hay hornos intermedios o antorchas de calor que mantienen la temperatura del desbaste sin embargo en este caso, no se cuentan con estos equipos especializados. Tras la última pasada de desbaste, se suele utilizar una tijera de corte en cabeza para recortar los extremos (frontal y cola) del planchón desbastado llamado ahora barra de transferencia eliminando porciones que puedan tener defectos o temperatura no homogénea antes de entrar al molino acabador.



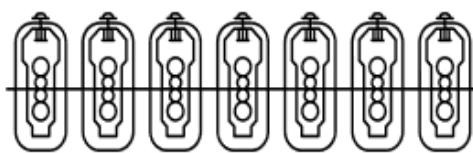
Molinos
reversibles

Ilustración 4 Representación de Molinos Reversibles

1.1.4 Molino acabador

Corresponde a la laminación final a espesor de lámina. Es un tren continuo o tándem mill compuesto por 7 castillos de laminación con tipo de molino 4-*high* dispuestas en serie. Cada castillo reduce parcialmente el espesor hasta alcanzar, al final del proceso podemos obtener entre 1.2mm hasta 25.4mm según el espesor deseado. Entre molinos, la banda acelera progresivamente (debido a la conservación de

volumen) y por ello se instalan loopers que forman ondas controladas de la banda para desacoplar tensiones y compensar las diferencias de velocidad entre stands controlando el flujo másico. También cada castillo cuenta con sistemas de guiado lateral (guías refractarias) para mantener la banda centrada, y sistemas de refrigeración de rodillos (agua a presión) e incluso lubricación para reducir el desgaste y mantener la calidad superficial. A la entrada del tren acabador hay otro descascarador por agua a presión para remover cualquier óxido residual antes de las últimas reducciones. El control de temperatura en el molino acabador es esencial, el primer castillo suele trabajar aún en el rango alto de austenita recrystalizada, mientras que hacia los últimos castillos la temperatura de la lámina puede descender significativamente (de 1050 °C al inicio a 850 °C al final, dependiendo de la velocidad y estrategias de enfriamiento). En los aceros convencionales, antiguamente se buscaba mantener la laminación completamente en caliente austenítico para obtener un “rollo caliente” uniforme. Sin embargo, con el desarrollo de la laminación controlada termomecánica, es común hoy modular la temperatura de acabado para influir en la microestructura final. En aceros microaleados UBC, a menudo se emplea una temperatura final de laminación relativamente baja (justo por encima o cercana a la temperatura de transformación Ar_3) para obtener austenita “aplastada” no recrystalizada que dará granos de ferrita refinados tras el enfriamiento.



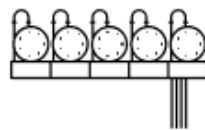
Molino acabador 7
castillos 4-high

Ilustración 5 Representación de Molino acabador

1.1.5 Mesa de enfriamiento

Al salir del molino acabador, la banda caliente (ahora de espesor final) pasa a la mesa de enfriamiento o *run-out table*. Esta es una sección equipada con múltiples boquillas de agua a lo largo de rodillos transportadores que llamaremos bancos, donde se aplica enfriamiento controlado (laminado) sobre la banda todavía austenítica o parcialmente transformada. La velocidad y patrón de enfriamiento (intensidad del agua, distancia entre secciones de agua) se regulan para lograr la temperatura deseada antes del enrollado (temperatura de enrollado o coiling temperature). En aceros UBC microaleados, este enfriamiento acelerado es parte

integral del tratamiento termomecánico: puede usarse para transformar la austenita en ferrita fina antes del enrollado, obteniendo así propiedades mecánicas mejoradas en el rollo. Por ejemplo, enfriamientos rápidos pueden suprimir la formación de perlita en aceros de muy bajo carbono, favoreciendo ferrita prácticamente libre de carburo o incluso ferrita acicular si hay microaleantes adecuados. Tras la mesa de enfriamiento, la banda (ya sea completamente transformada en ferrita, o aún con cierta austenita retenida si se controla la temperatura) es enrollada en enrollador para formar el rollo caliente final. El control de la temperatura de enrollado es crítica en aceros IF para estampado puede ser relativamente alta (para asegurar ferrita recristalizada y textura apropiada), mientras que en aceros HSLA de alta resistencia puede ser más baja (menor de 600 °C) para provocar la precipitación de carburo de Nb/V durante el enfriamiento en la lámina, endureciendo el material.



Mesa de
enfriamiento

Ilustración 6 Representación de Mesa de enfriamiento (ROT)

1.2: Fundamentos de Microestructura de los Aceros UBC

1.2.1 Caracterización microestructural de los aceros UBC

Los microaleantes son instrumentos fundamentales para refinar la microestructura de los aceros laminados en caliente y también pueden influir en la textura cristalográfica desarrollada tras las deformaciones y tratamientos posteriores. Veamos su efecto en estos dos aspectos: Refinamiento de Grano y Microestructura: La presencia de Nb, Ti, V, Al típicamente conduce a un tamaño de grano más pequeño en las fases resultantes (austenita recalentada y ferrita final). Esto se logra por varios mecanismos complementarios.

1.2.2 Efecto pinning en el crecimiento de grano austenítico

Durante el recalentamiento, partículas finas como TiN, AlN, Nb(C,N) que no se han disuelto completamente actúan como obstáculos en los bordes de grano austeníticos, impidiendo que crezcan indiscriminadamente. Por ejemplo, una adición de apenas 0.015% Ti garantiza un grano austenítico recalentado relativamente fino en placas, gracias a TiN disperso que permanece hasta 1250 °C.

De modo similar, AlN finamente disperso (si no se disolvió del todo) colabora a limitar el tamaño de grano. Un grano austenítico inicial más fino sienta las bases para una ferrita más fina tras la transformación.

Supresión de recristalización durante laminación (grano “aplastado”): Como se detallará en la siguiente sección, microaleantes en solución como Nb elevan la temperatura a la cual la austenita deja de recristalizar dinámicamente. Esto significa que en los últimos pases del laminado, la austenita queda con una estructura de granos deformados (pancake), aplanados en la dirección de laminación, en lugar de recristalizarse a granos equiaxiales más grandes.

Estos granos de austenita aplanados transformarán luego en ferrita poligonal significativamente refinada, porque cada grano austenítico aplanado engendra múltiples pequeños granos de ferrita acicular al enfriar. El resultado es una ferrita de tamaño mucho menor que la que se obtendría si la austenita se recristalizara antes de transformar.

Este principio de laminación controlada (finish rolling en el régimen no recristalizado) ha permitido reducir el tamaño de grano ferrítico de 5 a 10 μm en muchos aceros microaleados, comparado con las 20 μm de un acero al carbono laminado convencionalmente.

1.2.3 Precipitaciones finas en ferrita

Cuando microaleantes como Nb, V o Ti precipitan durante o justo después de la transformación, los precipitados formados pueden anclar o dividir los granos de ferrita en crecimiento. Por ejemplo, Nb en solución precipita como NbC al paso de austenita a ferrita, en los bordes de los nuevos granos de ferrita, lo cual refina aún más la ferrita al impedir que crezca demasiado. El vanadio precipitado como V(C,N) en ferrita también contribuye a esto (sus precipitados menores a 30 nm proporcionan sitios de anclaje en fronteras de subgrano, impidiendo el crecimiento y también introduciendo subestructura de dislocaciones). Sumado al refinamiento por nucleación abundante (debido a deformación previa), se logran microestructuras muy finas. En aceros UBC, donde la perlita no es predominante, la ferrita suele ser prácticamente la única fase: un grano ferrítico de $\sim 5 \mu\text{m}$ con precipitados dispersos de NbC/VC significa un acero con excelente combinación de resistencia y tenacidad.

1.2.4 Textura Cristalográfica

La textura se refiere a la orientación preferencial de los granos cristalinos. En aceros laminados en caliente UBC, la textura resultante inmediatamente después de laminar y enfriar suele ser principalmente la de ferrita deformada o parcialmente recrystalizada, la cual no es extremadamente pronunciada (ya que la mayor deformación ocurrió en la fase austenítica, cuya textura parcialmente se hereda). Sin embargo, muchos aceros UBC (especialmente los IF) están destinados a ser posteriormente laminados en frío y recocidos, proceso en el cual desarrollan texturas de recrystalización intensas (la llamada textura γ -*fiber* [111] favorable para procesos de embutido profundo y extraprofundo).

En aceros IF para procesos de embutido profundo, la eliminación de C y N intersticiales mediante Ti y Nb produce ferrita prácticamente libre de solutos intersticiales. Esto favorece el desarrollo de texturas de recrystalización marcadas durante el recocido posterior, porque la ausencia de C en solución elimina efectos de strain aging y facilita el crecimiento selectivo de granos orientados [111] (de alto valor r).

De hecho, los primeros aceros IF desarrollados en los 70's mostraron que al fijar C y N con Nb+Ti se lograba "una excelente textura de recocido" con alta plasticidad plana

Así, los microaleantes mejoran la textura final deseada al controlar la química (bajos intersticiales) y el tamaño de grano (un grano más fino y uniforme recrystaliza de forma más homogénea).

Durante la laminación en caliente, la presencia de microaleantes alterando la recrystalización de austenita también puede llevar a texturas heredadas diferentes en la ferrita. Por ejemplo, una austenita totalmente recrystalizada antes de transformar tenderá a producir ferrita con textura tipo [001] débil (similar a laminación al azar), mientras que una austenita tipo pancake no recrystalizada puede inducir cierta textura preferencial ([110] dirección de laminación en la ferrita acicular). Sin embargo, en aceros de bajo carbono laminados, la textura de laminación en caliente no suele ser muy intensa.

En aceros microaleados de alta resistencia que se usan tal cual laminados en caliente (sin laminado en frío posterior), la textura puede importar en propiedades como anisotropía de impacto o formabilidad. Se ha observado que la microaleación y enfriamiento controlado puede promover texturas más aleatorias (grano muy refinado tiende a reducir anisotropía) o en algunos casos texturas aciculares con ciertas orientaciones de habit planes. En general, la contribución de microaleantes a textura es menos directa que a refinamiento de grano; no obstante, controlan la textura principalmente al fijar intersticiales y al modificar las condiciones de

recristalización. Esto se evidencia en que aceros IF Nb–Ti presentan texturas algo distintas a IF solo Ti: el Nb puede retener más deformación en caliente generando más subestructura que luego influye en la recristalización en frío, resultando en texturas recristalizadas algo más débiles pero todavía dominadas por componentes γ -fiber.

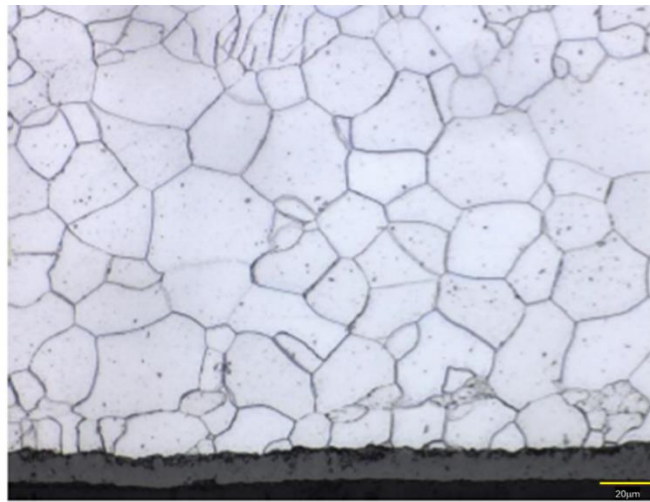


Ilustración 7. Microestructura típica de acero UBC (Elaboración propia)

1.2.5. Temperaturas críticas de transformación y control termomecánico

El conocimiento preciso de las temperaturas críticas de transformación de fase (Ac_1 , Ac_3 , Ar_1 , Ar_3) en aceros ultra bajo carbono (UBC) es esencial para definir ventanas de operación durante la laminación controlada. Dado su bajo contenido de carbono y escasa cantidad de elementos de aleación, estos aceros exhiben temperaturas Ac_3 elevadas frecuentemente superiores a los 880 °C, lo que resulta en una región de estabilidad ferrítica más extensa comparada con aceros de mayor contenido en carbono (Zajac et al., 2004; Hoile, 2000). Esta condición favorece el procesamiento en estado sólido dentro del dominio ferrítico, permitiendo una mayor eficiencia en la nucleación de ferrita y una mejor regulación del crecimiento de grano. La correcta determinación de estos puntos críticos de transformación térmica permite diseñar ciclos térmicos que optimicen la deformación plástica sin inducir transformaciones no deseadas, asegurando así un control fino de la microestructura (Kasatkin et al., 1984; Matsumura & Yada, 1987).

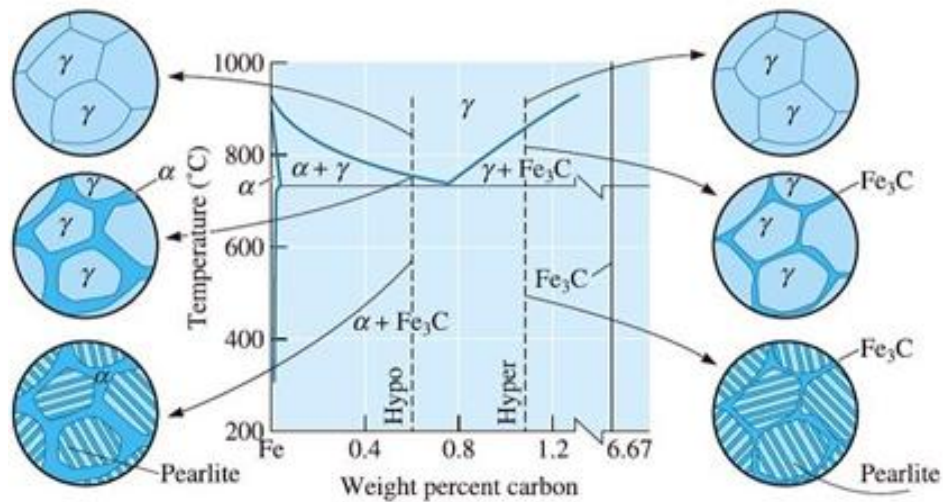


Ilustración 8. Diagrama hierro carbono [18]

El uso de diagramas de transformación como los CCT (Continuous Cooling Transformation) es clave para optimizar la velocidad de enfriamiento tras la laminación y prevenir la aparición de microestructuras indeseadas como el grano dúplex, el cual puede generar zonas localmente frágiles y afectar la resistencia general del material (Chen & Chen, 2003; Xiao et al., 2009). En particular, en líneas de laminación equipadas con tecnología como el *Slab Sizing Press*, donde se generan gradientes térmicos entre el centro y los bordes de la lámina, una mala estimación de las temperaturas de transformación podría conducir a la formación heterogénea de fases o al sobrecrecimiento de austenita en regiones críticas (Fujimoto et al., 2022; Wang et al., 2022). De esta forma, una caracterización térmica precisa no solo guía el diseño de estrategias de procesamiento, sino que también contribuye directamente a la homogeneidad microestructural y a la confiabilidad mecánica del producto final.

CCT

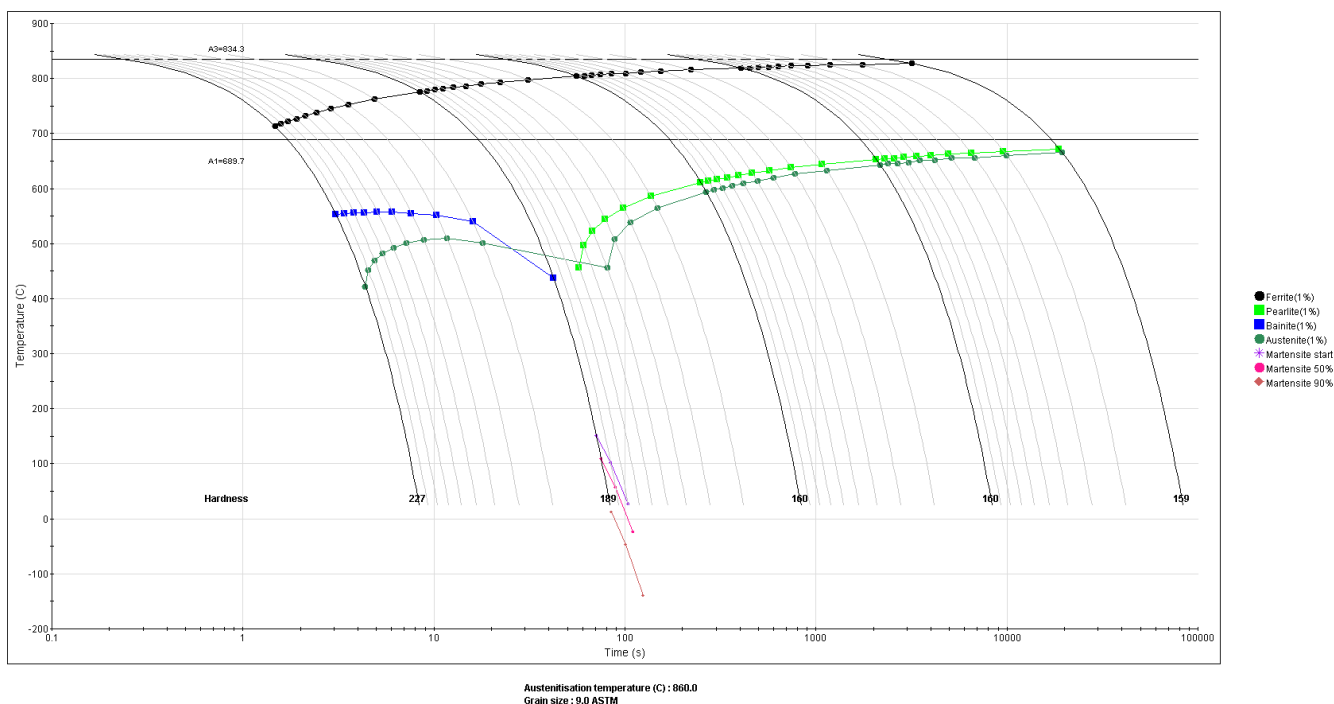


Ilustración 9. Ejemplo de diagrama CCT obtenido de Jmat PRO [Propia]

1.2.6 Influencia del procesamiento sobre la evolución microestructural

Durante el proceso de laminación en caliente, los aceros UBC experimentan una evolución microestructural fuertemente influenciada por el régimen térmico aplicado. Dado su bajo contenido de carbono, la respuesta a la deformación plástica a altas temperaturas depende principalmente del control del tamaño de grano y de los ciclos de recristalización (Zajac et al., 2004; Hoile, 2000). La aplicación de secuencias de deformación dentro del rango de no recristalización (por debajo de la temperatura crítica de recristalización dinámica) permite inducir un alto nivel de energía almacenada en el sistema, lo que favorece una posterior nucleación fina de ferrita durante el enfriamiento. Estas condiciones son ideales para lograr un refinamiento microestructural homogéneo y mejorar propiedades como la tenacidad, la resistencia al impacto y el comportamiento frente a esfuerzos cíclicos (Askeland et al., 2009; Fallahi et al., 2006).

El uso de tecnologías avanzadas como el *Slab Sizing Press* permite imponer deformaciones localizadas con alta precisión en zonas críticas del slab, afectando no solo su geometría sino también su comportamiento termo-mecánico local (Fujimoto et al., 2022; Matsuda et al., 2009). Cuando esta deformación se aplica estratégicamente en condiciones subcríticas, puede inhibirse la recristalización completa, generando estructuras subgrano o de grano refinado que ofrecen

beneficios mecánicos significativos. Además, al combinar estas estrategias con un enfriamiento acelerado y controlado como se diseña a partir de curvas CCT, se evita la aparición de microestructuras no deseadas como zonas dúplex o bandas de grano grueso, que comprometerían la homogeneidad del material (Chen & Chen, 2003; Xiao et al., 2009). Este enfoque integral de laminación-control térmico refuerza la importancia de un procesamiento termo-mecánico cuidadosamente diseñado para maximizar el desempeño de los aceros UBC en aplicaciones industriales exigentes.

1.3: Rol del Slab Sizing Press en la Generación de Heterogeneidades Microestructurales

1.3.1 Mecanismo de funcionamiento del Slab Sizing Press (SSP)

El *Slab Sizing Press* (SSP) es una prensa hidráulica instalada en las líneas de laminación en caliente, cuya función principal es aplicar una compresión transversal al planchón (slab) antes de su ingreso al Molino acabador. Este equipo permite regular con precisión la geometría transversal, especialmente el ancho del planchón, mediante un proceso similar a la forja, en el que se imponen reducciones dimensionales controladas a través de dados metálicos. El objetivo fundamental de este proceso es mejorar la rectitud y uniformidad de los bordes del slab, minimizar defectos como el “camber” o curvatura, y mejorar la eficiencia metalúrgica del laminado subsiguiente (Fujimoto et al., 2022; Matsuda et al., 2009; Primetals Technologies, 2024).

Durante el prensado, el slab sufre deformaciones plásticas significativas en sus zonas laterales, y el contacto directo con los dados los cuales suelen estar enfriados activamente genera una rápida disipación térmica en las regiones comprimidas. Esta pérdida de temperatura localizada en los bordes tiene implicaciones microestructurales importantes, ya que puede inducir condiciones térmicas no homogéneas a lo largo del ancho del planchón, afectando la uniformidad del proceso de recrystalización y del crecimiento de grano durante el posterior laminado en caliente (Wang et al., 2022; Campbell, 2023). El enfriamiento diferencial también puede influir en la transformación de fases y provocar gradientes en propiedades mecánicas, lo que requiere un ajuste cuidadoso de los parámetros operativos para garantizar un producto final con características microestructurales consistentes. Así, el SSP no solo cumple una función geométrica, sino también metalúrgica, al modificar localmente las condiciones iniciales del material antes de su procesamiento térmico-mecánico principal.

1.3.2 Efectos microestructurales inducidos por el SSP

El uso del SSP puede modificar localmente la microestructura ferrítica al inducir deformación en frío en los bordes, seguida por un enfriamiento no uniforme. En

aceros UBC, esto se traduce en regiones con grano más fino o estructuras parcialmente recrystalizadas, dependiendo de la temperatura local y la tasa de enfriamiento. Estas regiones pueden exhibir diferente respuesta mecánica comparada con el centro del planchón, generando anisotropías que afectan la embutibilidad y resistencia al impacto. En casos extremos, puede observarse endurecimiento localizado o estructuras transitorias que disminuyen la ductilidad global del material. Estudios como los de Fallahi et al. (2006) y Campbell (2023) han evidenciado que la interacción entre la orientación de los límites de grano y la dirección de la deformación puede facilitar la nucleación de microgrietas en regiones con alta densidad de dislocaciones inducidas por el prensado. En los aceros UBC, donde el crecimiento de grano es altamente sensible al balance térmico, estas zonas afectadas pueden retener una morfología de grano elongado o presentar fronteras de grano de alta energía, que actúan como sitios preferenciales para el inicio de daño bajo carga mecánica. Adicionalmente, la variación de la tasa de enfriamiento en los bordes puede inducir segregación de elementos microaleantes (especialmente B, Nb y Ti) que afectan la precipitación de carbonitruros y alteran la cinética de recrystalización. Este fenómeno ha sido reportado por Zajac et al. (2004), quienes demostraron que incluso pequeñas fluctuaciones térmicas pueden provocar diferencias significativas en la distribución de fases en aceros UBC. La formación localizada de bandas ferríticas o estructuras tipo "pancake" puede comprometer la continuidad estructural del material y generar gradientes de dureza indeseados. Para caracterizar con precisión estos efectos, se recomienda el uso de técnicas avanzadas como EBSD (Electron Backscatter Diffraction) para mapear la orientación cristalográfica y detectar zonas con baja fracción de recrystalización. La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectroscopía EDS también son herramientas útiles para identificar concentraciones localizadas de elementos y correlacionarlas con zonas de endurecimiento anómalas.

1.4: Implicaciones Mecánicas de las Heterogeneidades Inducidas

1.4.1 Correlación entre microestructura y propiedades mecánicas en UBC

La resistencia mecánica de los aceros ultra bajo carbono (UBC) está estrechamente relacionada con la morfología del grano ferrítico y la distribución de precipitados finos como carburos y nitruros de microaleantes (TiN, NbC, BN). Estos factores definen no solo la magnitud del límite elástico y la resistencia a la tracción, sino también el comportamiento del material frente a esfuerzos complejos como flexión, embutición profunda y fatiga térmica (Fallahi et al., 2006; Yada et al., 1988).

Un tamaño de grano ferrítico refinado incrementa la resistencia del acero mediante el mecanismo Hall-Petch, el cual establece una relación inversa entre el tamaño de grano y la tensión necesaria para iniciar el movimiento de dislocaciones. Esta relación es particularmente efectiva en aceros UBC, donde la presencia de una sola

fase (ferrita) permite explotar este mecanismo sin la interferencia de transformaciones martensíticas o perlíticas (Askeland et al., 2009; Campbell, 2023).

Además, una distribución uniforme de precipitados nanoestructurados aporta una barrera adicional al movimiento dislocacional, generando un efecto combinado de endurecimiento por precipitación y refinamiento de grano. En los aceros IF, estos precipitados se forman a partir de la interacción entre elementos como Ti y Nb con intersticiales residuales de C y N, generando compuestos extremadamente estables que no se disuelven fácilmente durante el recocido (Zajac et al., 2004; Matsuda et al., 2009).

No obstante, la homogeneidad microestructural que caracteriza a los aceros UBC puede verse comprometida por efectos inducidos durante el proceso de laminación en caliente, particularmente en líneas equipadas con Slab Sizing Press (SSP). Este equipo, aunque útil para corregir la geometría de los planchones antes del desbaste, genera deformaciones no uniformes en regiones periféricas debido a la naturaleza localizada de la compresión y generando un ΔT entre bordes y centro. (Fujimoto et al., 2022).

Las zonas afectadas por el SSP, especialmente cerca de los bordes del planchón, pueden exhibir un mayor grado de recristalización dinámica o incluso crecimiento anormal de grano si la temperatura local y la deformación acumulada no son controladas adecuadamente. Esto genera una heterogeneidad microestructural que se traduce en variaciones significativas en propiedades como el límite elástico, la dureza y la elongación a lo largo de la lámina final (Matsumura & Yada, 1987; Wang et al., 2022).

Estas diferencias localizadas son críticas en procesos de conformado severo como embutición profunda o estampado a alta velocidad, donde se requiere una respuesta mecánica altamente predecible en todas las direcciones. Si no se corrige, esta variabilidad puede conducir a zonas débiles que actúan como iniciadores de agrietamiento, afectando directamente la calidad del producto final y la tasa de rechazo industrial (Hoile, 2000).

De igual manera, en aplicaciones de soldadura por resistencia o láser, una diferencia en propiedades mecánicas entre el centro y los bordes puede inducir distorsiones térmicas y gradientes de tensión interna. Esto es particularmente importante en la fabricación de carrocerías automotrices, donde la tolerancia a la distorsión es mínima (Fujimoto et al., 2022).

Estudios recientes utilizando técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y mapeo de dureza Vickers han confirmado que las zonas laterales de láminas procesadas con SSP pueden presentar un endurecimiento localizado, vinculado a

una retención parcial de dislocaciones y una inhibición incompleta de la recristalización estática (Chen & Chen, 2003; Xiao et al., 2009). Esta variabilidad es muchas veces invisible a simple vista, pero tiene un impacto directo sobre la tenacidad y la absorción de energía durante impactos o vibraciones.

Desde el punto de vista del diseño metalúrgico, mitigar estas diferencias implica un control térmico riguroso en el desbaste posterior al SSP, así como un ajuste fino de las curvas de reducción en caliente. La combinación adecuada de temperatura de entrada al molino, deformación acumulada y velocidad de enfriamiento permite restablecer la uniformidad microestructural antes del enrollado final (Matsuda et al., 2009).

Por tanto, si bien el uso del SSP mejora la eficiencia del proceso y la calidad geométrica del planchón, también introduce un desafío metalúrgico que debe abordarse mediante una estrategia integral de control del proceso. Ignorar este efecto puede generar variabilidad mecánica significativa entre los bordes y el centro del producto laminado, afectando tanto la calidad como la reproducibilidad industrial.

En síntesis, los aceros UBC muestran una sensibilidad particular a las variaciones microestructurales inducidas por el proceso de fabricación. La consistencia en el tamaño de grano y la distribución de precipitados es esencial para mantener una ventana de procesamiento segura y un comportamiento mecánico confiable. Por ello, los efectos del SSP deben analizarse no solo desde una perspectiva geométrica, sino como parte integral del diseño termomecánico del acero.

1.5: Pérdidas térmicas durante la laminación en caliente: mecanismos y zonas críticas

Durante el proceso de laminación en caliente de aceros ultra bajo carbono (UBC), la gestión térmica del planchón es un aspecto crítico para garantizar la calidad microestructural y las propiedades mecánicas del producto final. Desde el momento en que el planchón abandona el horno de recalentamiento, se inicia un proceso continuo de pérdida de calor hacia el entorno, que debe ser cuidadosamente controlado. Estas pérdidas térmicas están regidas por tres mecanismos principales de transferencia de calor: radiación, convección y conducción (Askeland et al., 2009; *The AISE Steel Foundation*, s.f.).

En la primera etapa, justo al salir del horno, cuando el material alcanza temperaturas superiores a 1100 °C, la radiación térmica domina el proceso de pérdida de energía. La emisión de radiación térmica es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura (Ley de Stefan–Boltzmann), por lo que su efecto es extremadamente significativo en esta fase. Esta pérdida energética se produce incluso antes del primer contacto con el tren de laminación, lo cual puede comprometer las

condiciones térmicas óptimas si no se compensa con velocidades de transferencia rápidas y controladas (Campbell, 2023).

A medida que el planchón avanza a través de zonas abiertas del tren de laminación, la convección forzada se convierte en el principal mecanismo de transferencia de calor. La interacción entre la superficie caliente del acero y el aire o gases en movimiento genera pérdidas convectivas significativas, que dependen tanto de la velocidad del medio como de la geometría del planchón. Estas condiciones varían entre diferentes zonas del molino acabador, siendo especialmente pronunciadas en áreas sin cerramientos o con ventilación forzada (Zajac et al., 2004).

Por su parte, la conducción juega un doble papel: en primer lugar, como transferencia interna de calor desde las zonas centrales del planchón hacia las superficies externas, permitiendo un equilibrio térmico parcial y en segundo lugar, como transferencia térmica desde el planchón hacia los componentes metálicos que lo contactan, como rodillos y dados, particularmente en equipos como el Slab Sizing Press (SSP). Estos equipos, al tener superficies metálicas de gran masa térmica y temperatura relativamente baja, actúan como disipadores térmicos que intensifican el enfriamiento local (Fujimoto et al., 2022).

Las zonas más críticas de pérdida térmica son aquellas con una elevada relación superficie-volumen, como los bordes laterales, la cabeza y la cola del planchón. (Véase *ilustración 3*). En estas áreas, el enfriamiento se produce de forma acelerada, generando gradientes térmicos severos entre la superficie y el núcleo. Esta diferencia térmica puede inducir tensiones internas que, si no son disipadas adecuadamente, se traducen en deformaciones plásticas no deseadas o incluso agrietamiento (Hoile, 2000).

El *Slab Sizing Press*, en particular, tiene un impacto directo sobre el perfil térmico del planchón. Al aplicar una compresión transversal en zonas cercanas a los bordes laterales, genera una disipación de calor adicional debido al contacto directo con los dados metálicos más fríos. Esta acción puede acelerar la caída de temperatura en los bordes, haciendo que estas zonas se enfríen más rápido que el centro, lo que genera condiciones microestructurales disímiles a lo largo del espesor y ancho del material (Wang et al., 2022).

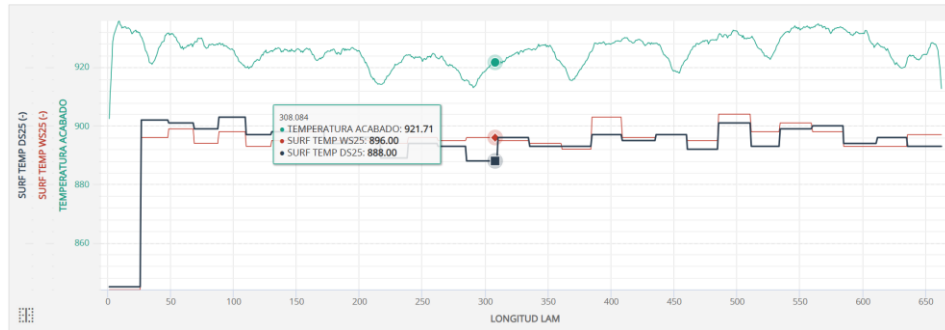


Ilustración 10. Diferencias térmicas a 25mm de borde vs centro (WS: Work side / DS: Drive side) [Propia]

Esta desigualdad térmica no es meramente un fenómeno físico, sino que tiene consecuencias metalúrgicas significativas. El proceso de recrystalización, esencial para el refinamiento del grano durante el laminado en caliente, depende estrechamente de la temperatura y la tasa de deformación. Si los bordes del planchón se enfrían por debajo de la temperatura crítica de recrystalización (aproximadamente 850–900 °C para aceros UBC), la microestructura puede permanecer deformada y no recrystalizada, provocando bandas de grano elongado o zonas con mayor densidad de dislocaciones (Matsuda et al., 2009).

Adicionalmente, el gradiente térmico transversal inducido puede desencadenar transformaciones de fase no deseadas. Por ejemplo, mientras el centro del planchón se mantiene dentro del dominio austenítico, las zonas de borde pueden ingresar al campo intercrítico o incluso ferrítico,. Estas variaciones de fase generan una heterogeneidad en el producto final, con consecuencias en tenacidad, resistencia a la propagación de grietas y comportamiento ante procesos posteriores como el estampado o la soldadura (Fallahi et al., 2006).

La variación térmica también afecta la evolución de precipitados finos de microaleantes. En los aceros UBC, elementos como Nb, Ti y B forman precipitados como NbC o TiN que actúan como inhibidores del crecimiento de grano. La estabilidad y tamaño de estos precipitados dependen directamente del perfil térmico local. Un enfriamiento excesivamente rápido puede impedir la combinación deseada, mientras que una permanencia prolongada a temperaturas elevadas puede favorecer el sobrecrecimiento de los mismos, reduciendo su eficacia en el control del tamaño de grano (Chen & Chen, 2003).

La mitigación de estos efectos requiere una estrategia de control térmico integral. Esto incluye el ajuste de la velocidad de transporte del planchón, el aislamiento térmico de zonas abiertas del tren, y la precalibración térmica de los dados del SSP. Además, tecnologías modernas como los sistemas de monitoreo infrarrojo continuo permiten cartografiar térmicamente al planchón en tiempo real, facilitando el ajuste de parámetros del proceso de forma dinámica (Fujimoto et al., 2022).

En conclusión, las pérdidas térmicas durante la laminación en caliente de aceros UBC no son solamente un fenómeno físico inevitable, sino un factor crítico de control metalúrgico. Entender la dinámica de convección, conducción y radiación en cada etapa del proceso permite anticipar la evolución microestructural del material y garantizar un desempeño mecánico homogéneo y confiable. Especialmente en líneas modernas que incluyen tecnologías como el SSP, la interacción entre temperatura, deformación y transferencia térmica debe ser gestionada con precisión para evitar defectos y asegurar la calidad del acero final.

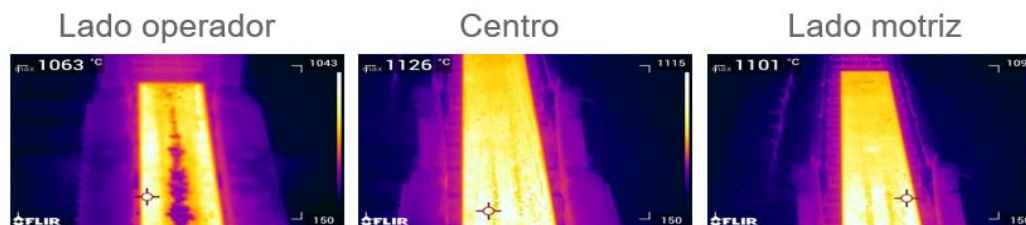


Ilustración 11. Pérdidas térmicas después del SSP [Propia]

1.6 Resumen del marco teórico

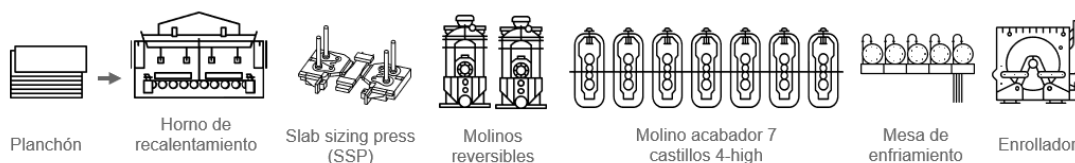


Ilustración 12. Representación de proceso de laminación en caliente en Centro Industrial Ternium (CIT) Pesquería

La laminación en caliente de aceros ultra bajo carbono (UBC) es un proceso complejo que combina control térmico, deformación plástica y diseño microestructural para alcanzar propiedades mecánicas requeridas por los aceros en cuestión. El proceso inicia con el recalentamiento del planchón colado, cuyo objetivo es llevar el acero a un estado austenítico homogéneo, disolver precipitados y estructuras dendríticas y aumentar su maleabilidad para la laminación. Posteriormente, tecnologías como el *Slab Sizing Press* (SSP) ajustan el perfil transversal del planchón, pero también inducen deformaciones y pérdidas térmicas que impactan la uniformidad microestructural. Durante la laminación, molinos reversibles y los molinos acabadores trabajan en condiciones controladas de temperatura y deformación, favoreciendo una transformación microestructural precisa. En aceros UBC microaleados, el control del enfriamiento sobre la mesa de rodillos permite obtener ferrita refinada sin presencia de perlita, mejorando la tenacidad y la ductilidad del producto final.

Desde el punto de vista microestructural, la adición de microaleantes como Nb, Ti y V permite controlar el tamaño de grano y la recrystalización. Estos elementos actúan mediante mecanismos de control de crecimiento de grano, disminuyen la recrystalización y forman precipitados finos en ferrita, los cuales endurecen y refinan la estructura. La morfología resultante, principalmente ferrita de grano fino, es clave para lograr un buen equilibrio entre resistencia y conformabilidad, siendo crítica en aceros IF destinados al estampado.

La transformación de fases en UBC se rige por temperaturas críticas (Ac_1 , Ac_3 , Ar_1 , Ar_3), que definen las ventanas operativas del proceso. Diagramas CCT permiten diseñar estrategias de enfriamiento para evitar estructuras no deseadas, como la perlita o el grano dúplex. Tecnologías como el SSP, al modificar localmente la temperatura y la deformación, pueden generar gradientes microestructurales transversales, afectando la homogeneidad de propiedades mecánicas como el límite elástico, la elongación y la dureza.

El control térmico es esencial: pérdidas de calor por radiación, convección y conducción generan zonas críticas, especialmente en los bordes del planchón, donde pueden ocurrir transformaciones prematuras y endurecimiento localizado. Estos efectos, si no se mitigan, comprometen la tenacidad y la confiabilidad del acero en aplicaciones industriales exigentes. Así, el diseño termo-mecánico de los aceros UBC debe considerar no solo la geometría y la composición química, sino también la historia térmica completa del material para garantizar un comportamiento mecánico consistente y una microestructura homogénea.

Capítulo 2. Hipótesis y objetivos.

2.1 Hipótesis

Durante el proceso de laminación en caliente a mayor reducción de ancho en el *Slab Sizing Press* induce pérdidas térmicas significativas en los bordes del slab, generando heterogeneidad en la microestructura entre 50 a 60mm del borde, lo cual se refleja en variaciones medibles de microdureza de Vickers y propiedades mecánicas transversales.

2.2 Objetivos generales

Analizar el impacto de la aplicación del *Slab Sizing Press* durante la laminación en caliente en la microestructura y las propiedades mecánicas de aceros ultra bajo carbono, con el fin de comprender su influencia en el desempeño final del material.

2.3 Objetivos específicos

Cuantificar el gradiente térmico inducido por el SSP mediante escaner infrarrojo, lo que permitirá cuantificar el efecto real de la reducción de ancho del slab durante el proceso.

Realizar caracterización de la microestructural asociada a la posición en el ancho de la lámina así como ensayos de microdureza y ensayos de tensión en las mismas posiciones en donde se realizará el análisis microestructural para evaluar el performance del material sometido a la reducción de ancho del SSP.

Correlacionar el gradiente térmico, microestructura y propiedades mecánicas en las distintas posiciones para determinar la afectación de la aplicación del SSP.

Capítulo 3. Procedimiento experimental

Con el objetivo de evaluar el impacto del proceso termo-mecánico en aceros laminados en caliente utilizando una prensa de reducción tipo *Slab Sizing Press* (SSP), se desarrolló el siguiente procedimiento experimental, implementado a nivel industrial en una línea de laminación en caliente bajo condiciones operativas reales.

El estudio se fundamentó en los principios de la metalurgia física aplicada al conformado en caliente, considerando las etapas sucesivas de calentamiento, reducción en el SSP, laminación en el tren acabador y enfriamiento acelerado. Este enfoque permitió analizar la influencia de la reducción de espesor y ancho inducida por el SSP sobre la morfología ferrítica, la distribución de deformación plástica y las propiedades mecánicas finales del acero ultra bajo carbono (UBC).

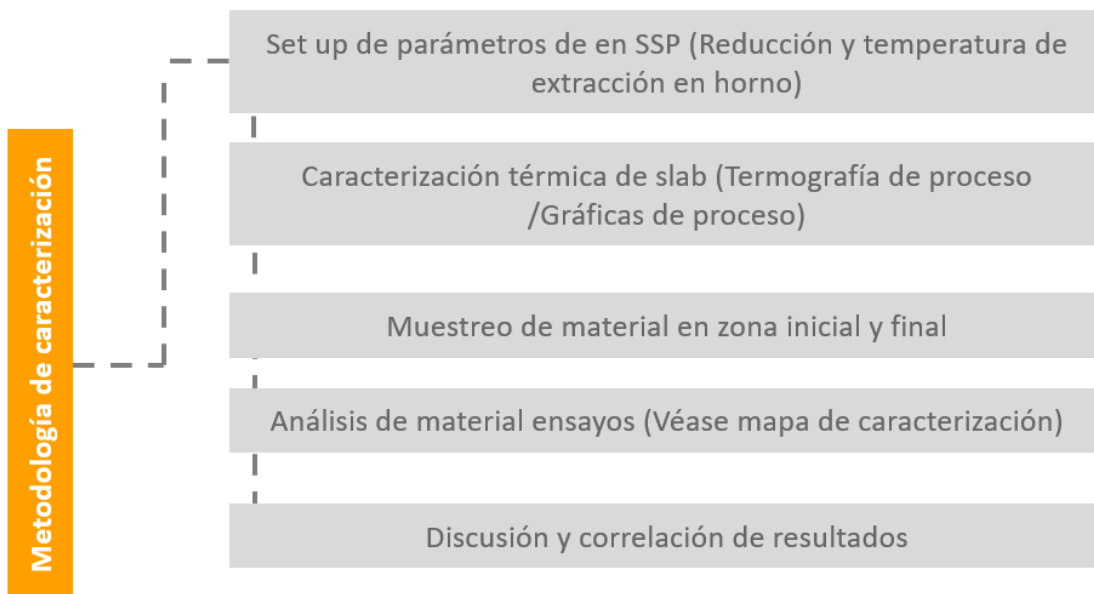


Ilustración 13. Metodología de caracterización.

La metodología fue estructurada siguiendo una secuencia experimental industrial, conforme al esquema mostrado en la Ilustración 1, que agrupa las etapas principales de la caracterización del proceso:

- A. Configuración de parámetros en el SSP (Set up): se establecieron las condiciones de reducción de ancho y la temperatura de extracción de las planchones del horno de recalentamiento, registrando los parámetros operativos del proceso industrial.
- B. Caracterización térmica del *slab*: se realizó el seguimiento térmico mediante fotografías termográficas de proceso y el análisis de las gráficas de temperatura en línea, con el fin de identificar gradientes térmicos y su evolución durante el proceso de laminación en caliente.

- C. Muestreo del material en zona inicial y final: se obtuvieron muestras en las posiciones correspondientes al inicio y final del tramo laminado, permitiendo comparar los efectos del proceso a lo largo del rollo y evaluar la estabilidad térmica y microestructural.
- D. Análisis del material y ensayos (véase mapa de caracterización): las muestras extraídas fueron sometidas a ensayos de microdureza Vickers y ensayos de tensión, además de la caracterización microestructural mediante microscopía óptica, con el objetivo de correlacionar los parámetros de proceso con la respuesta del material.
- E. Discusión y correlación de resultados: se integraron los resultados térmicos, microestructurales y mecánicos en un análisis comparativo, orientado a establecer la influencia de los parámetros del SSP sobre la uniformidad del acero y su comportamiento mecánico global.

3.1 Configuración de parámetros en SSP

Se establecieron los parámetros de operación de la prensa SSP, considerando dos variables clave:

- A. La selección de acero ultra bajo carbono se realizó para la evaluación del impacto en la evolución microestructural del material, así como la influencia de la química en la temperatura de no recristalización y Ar₃. Véase tabla 1.

Tabla 1. Químicas referenciales y temperatura Ar₃ de aceros UBC evaluados

Elemento	UBC Ti-Nb	UBC Ti-B	UBC Ti
%C	<0.004	<0.003	<0.004
%Mn	<0.15	<0.2	<0.15
%Ti	<0.05	<0.04	<0.05
%Nb	<0.024	<0.015	Residual
%B	Residual	<0.0007	Residual
A ₃ de Choo	877	878	879
A ₃ de Jmat Pro ®	894	898	899

- B. Reducción aplicada al *slab* (en mm de reducción total)
 - a. Se realizó variación de reducciones totales en el *slab sizing press* con el fin de evaluar cambios en el ΔT de bordes al finalizar el proceso en el molino acabador. (Reducción 80mm hasta 300mm).
 - b. El rango de aplicación fue de espesores mayores a 3mm derivado del riesgo de problemas operativos relacionados al posible sobre

enfriamiento de la lámina por la aplicación del *slab sizing press*, ya que en espesores $< 3\text{mm}$ la barra de transferencia pierde temperatura asociado a su longitud final en ese espesor y el tiempo de laminación en el acabador.

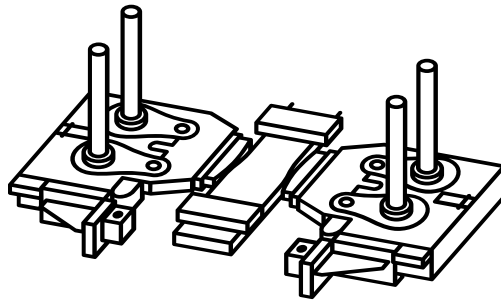


Ilustración 14. Imágen ilustrativa de Slab Sizing Press

- C. Temperatura de extracción del horno de recalentamiento, monitoreada mediante pirómetros.
 - a. Se realizó set up de curvas de calentamiento en hornos desde 1200°C como mínimo hasta un máximo de 1230°C con la finalidad de asegurar un buen performance en el proceso proyectando las pérdidas térmicas durante la laminación.
- D. Selección de práctica metalúrgica
 - a. La selección de temperaturas de acabado fue en un rango desde 900°C hasta 930°C según la evaluación de las temperaturas de transformación de los aceros evaluados en la tabla 1.
 - b. La selección de temperaturas de enrollado se realizó con respecto a las aplicaciones finales de los aceros laminados (DQ, DDQ, EDDQ, SEDDQ) y esta no se encuentra dentro de la matriz de prueba evaluada. (Véase tabla 2).
 - c. La estrategia de enfriamiento se mantuvo en el rango de entre 50 a 90°C/s y esta, al igual que la temperatura de enrollado, no se encuentra dentro de la matriz de prueba evaluada, (Véase tabla 2).

3.2 Matriz experimental

Tabla 2. Matriz experimental

Tipo de aleación	Temperatura de extracción de hornos	Temperatura de acabado	Reducción total en Sizing Press	Variables respuesta
UBC-Ti	>1200°C	920 °C +/- 30°C	Mayor a 260mm	Microestructura / Variación en propiedades mecánicas
UBC- Ti Nb	>1200°C	920 °C +/- 30°C	Mayor a 260mm	Microestructura / Variación en propiedades mecánicas
UBC-TiB	>1200°C	920 °C +/- 30°C	Mayor a 260mm	Microestructura / Variación en propiedades mecánicas

3.2 Caracterización térmica del acero durante proceso.

3.2.1 Caracterización térmica

Se realizó la caracterización térmica de la barra de transferencia y cinta final utilizando cámaras termográficas (FLIR®) y un medidor de temperatura de láser llamado LANDSCAN Infrared Linescanner LSP-HD 10®, que por medio de temperatura infrarroja permitirá obtener una medición de temperatura de borde con sensibilidad de hasta $\pm 2^{\circ}\text{C}$ a lo ancho de la lámina final, este medidor se encuentra a la salida del castillo F7. (Véase Ilustración 5 y 15).

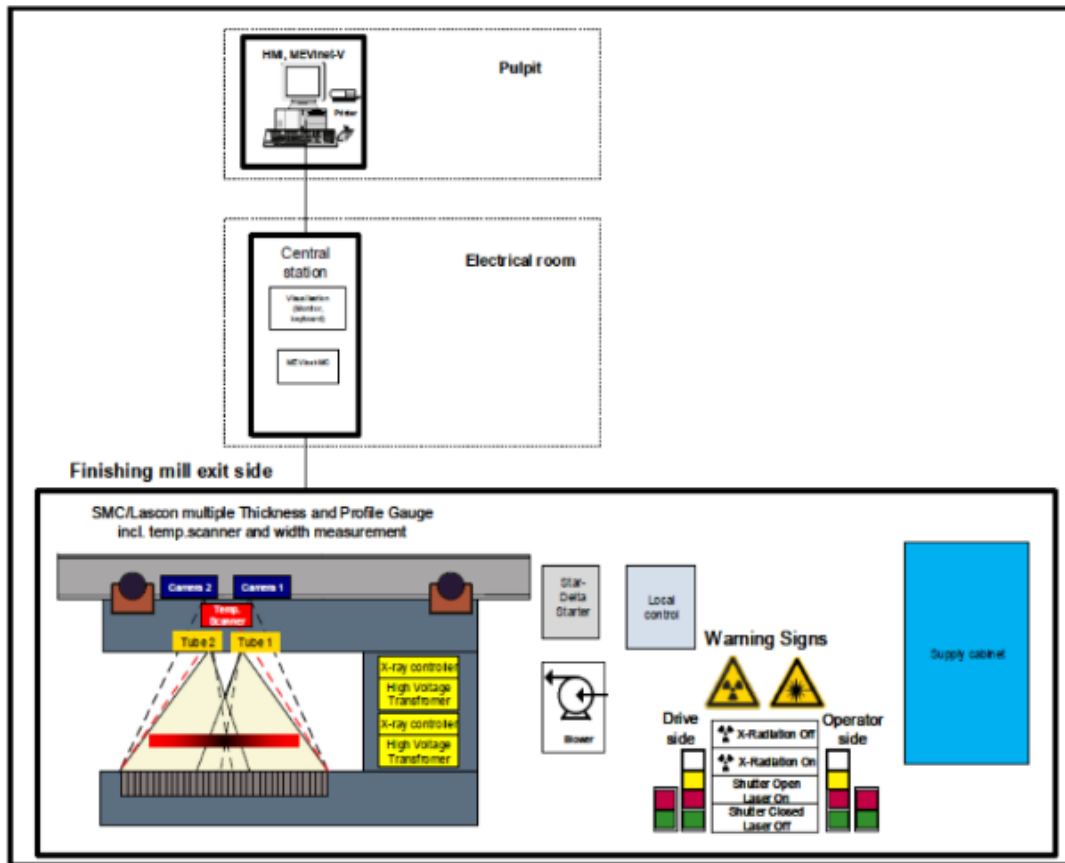


Ilustración 15. Configuración de hardware de medidor de temperatura en borde. (Recuperado de Technical Specification of F7 Exit Profile Thickness Gauge By Mitsubishi®)

3.3 Muestreo de material

Se realizó un muestreo sistemático del material procesado con el propósito de obtener información representativa sobre la evolución microestructural y mecánica del acero a lo largo del proceso de fabricación. El muestreo se llevó a cabo en dos ubicaciones estratégicas del producto final, seleccionadas en función de su relevancia para evaluar la homogeneidad del material y la influencia de las

condiciones de deformación y enfriamiento asociadas al proceso de laminación. Se extrajeron especímenes para caracterización microestructural y ensayos mecánicos, con el objetivo de evaluar la evolución del material.

A. Zonas y ubicaciones de muestreo

El muestreo se efectuó en dos regiones específicas correspondientes al diámetro externo y diámetro interno del rollo. Esta selección tuvo como finalidad analizar posibles variaciones en la morfología ferrítica y en las propiedades mecánicas derivadas de gradientes térmicos o diferencias en el grado de deformación plástica durante el procesamiento y enfriamiento del rollo una vez laminado.

B. Extracción de especímenes para el análisis de propiedades.

Para el análisis integral del material, se extrajeron especímenes destinados a dos tipos principales de estudio, (Véase ilustración 16 para observar la localización de los especímenes ensayados.)

Caracterización microestructural mediante microscopía óptica (MO), enfocada en la morfología de la ferrita, que constituye la fase predominante en aceros ultra bajo carbono (UBC). El análisis se orientó a determinar la forma y distribución de granos ferríticos, así como la presencia de posibles heterogeneidades locales originadas por gradientes térmicos o variaciones en la deformación durante el proceso de laminación.

Ensayos mecánicos, incluyendo pruebas de microdureza de Vickers y ensayos de tensión, con el objetivo de correlacionar la respuesta mecánica con la morfología ferrítica observada, permitiendo establecer la relación entre el refinamiento microestructural y la resistencia obtenida en las distintas zonas del material.

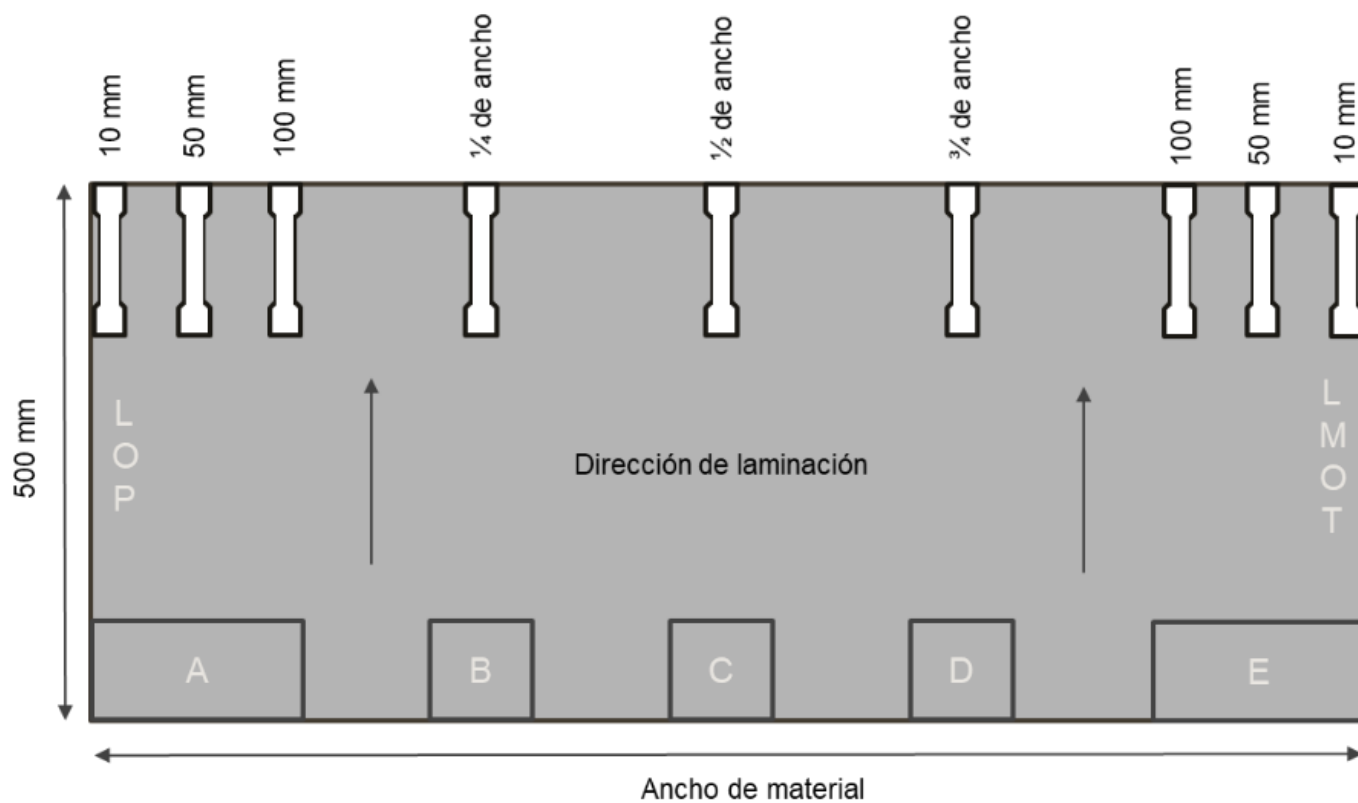


Ilustración 16. Esquema representativo de la ubicación de cada muestra obtenida, indicando las posiciones de extracción de especímenes (A–E) y la dirección de laminación. Elaboración propia.

3.4 Análisis del material

Los especímenes fueron sometidos a un conjunto de ensayos conforme a las normas ASTM aplicables:

3.4.1 Preparación metalográfica para ensayo en microscopio óptico

(Basado en ASTM E3-11, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens").

La preparación de muestras para microscopía óptica se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E3-11, con los siguientes pasos:

1. Corte:
 - a. Se extrajeron secciones transversales de aproximadamente $10 \times 10 \times 10$ mm, asegurando que fueran representativas de las zonas de interés (por ejemplo, centro y superficie).
 - b. El corte se realizó en frío mediante tronzadora metalográfica con disco abrasivo refrigerado, para evitar recocido superficial.
2. Montaje
 - a. Las muestras fueron montadas en caliente usando resina fenólica conductiva a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 25 MPa durante 10 minutos, para facilitar el manejo y proteger los bordes durante el esmerilado.
3. Desbaste
 - a. El desbaste progresivo se efectuó con papel abrasivo de carburo de silicio (SiC), con los siguientes granos: #240, #320, #600, #800 y #1200, usando agua como lubricante.
 - b. Se rotó 90° entre pasos para eliminar rayas del grano anterior.
4. Pulido
 - a. El pulido grueso se realizó con suspensión de alúmina al $6\text{ }\mu\text{m}$, seguido por pulido fino con alúmina de $1\text{ }\mu\text{m}$.
 - b. Finalmente, se empleó pulido de acabado con sílice coloidal ($0.04\text{ }\mu\text{m}$) para eliminar deformación subsuperficial.
5. Ataque químico:
 - a. Las superficies fueron atacadas con nital al 3% (3 mL de ácido nítrico concentrado en 97 mL de etanol) durante 5 a 10 segundos, dependiendo del tipo de microestructura observada.
 - b. Se enjuagó inmediatamente con etanol y se secó con aire caliente para evitar oxidación.



Ilustración 17. Ejemplo de material cortado en las zonas indicadas por el esquema de la ilustración 16.

3.4.2 Microdureza de Vickers

(Basado en ASTM E384-23, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials").

La evaluación de la resistencia mecánica local de las fases constituyentes del acero UBC se realizó mediante ensayos de microdureza Vickers, utilizando cargas bajas y una punta de diamante tipo piramidal de base cuadrada.

3.4.2.1 Preparación de la muestra

1. Las probetas utilizadas para microdureza fueron las mismas empleadas en la caracterización microestructural (sección 6.4.1).
2. Es indispensable que la superficie esté libre de deformaciones subsuperficiales y adecuadamente pulida (hasta $0.04 \mu\text{m}$) para asegurar la precisión de las mediciones.

3.4.2.2 Equipamiento

- Equipo: Durómetro Vickers microindentador digital.
- Punta: Diamante piramidal (ángulo de 136° entre caras opuestas).
- Normativa: ASTM E384-23.
- Software: Sistema digital con medición automática de diagonales.

3.4.2.3 Condiciones del ensayo

- Carga aplicada: 100 gf (HV0.1), adecuada para distinguir fases en aceros UBC.
- Tiempo de aplicación: 10-15 segundos.
- Número de indentaciones: Mínimo 5 por muestra, en zonas representativas.
- Espaciado entre huellas: Al menos 2.5 veces el largo de la diagonal promedio.

3.4.2.4 Cálculo del valor de dureza

El valor de microdureza Vickers (HV) se determinó aplicando el método de indentación con carga controlada, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM E384-17. Este ensayo permite evaluar la respuesta local del material frente a la deformación plástica concentrada, siendo especialmente útil para analizar variaciones en la resistencia dentro de una misma microestructura o entre distintas regiones del material.

$$HV = \frac{1.8544 * F}{d^2}$$

Donde:

- HV: microdureza Vickers (kgf/mm²)
 - F: carga aplicada (kgf)
 - d: longitud promedio de la diagonal de la huella (mm)
 - 1.8544: constante geométrica del indentador
- A. Durante el procedimiento, se aplicó una carga constante durante un tiempo de permanencia de 10 a 15 segundos, con el objetivo de garantizar la estabilización de la huella y minimizar la influencia del tiempo de contacto sobre el tamaño de la impresión. Posteriormente, las diagonales de las huellas fueron medidas mediante un sistema óptico acoplado al microdurómetro, garantizando la precisión del registro.

Nota: El cálculo de la dureza fue realizado automáticamente por el software del sistema de microindentación, a partir de las mediciones ópticas de las diagonales,

lo que permitió reducir la incertidumbre del operador y asegurar la trazabilidad de los resultados.

- B. Los valores de microdureza obtenidos fueron utilizados como parámetro complementario para correlacionar la morfología ferrítica con la respuesta mecánica local, permitiendo identificar posibles gradientes de resistencia asociados a variaciones en la deformación o al enfriamiento diferencial a lo largo del espesor del material. Se utilizó un mapa de caracterización para garantizar la representatividad estadística de las muestras y la cobertura de todo el ancho del producto (Véase ilustración 16).

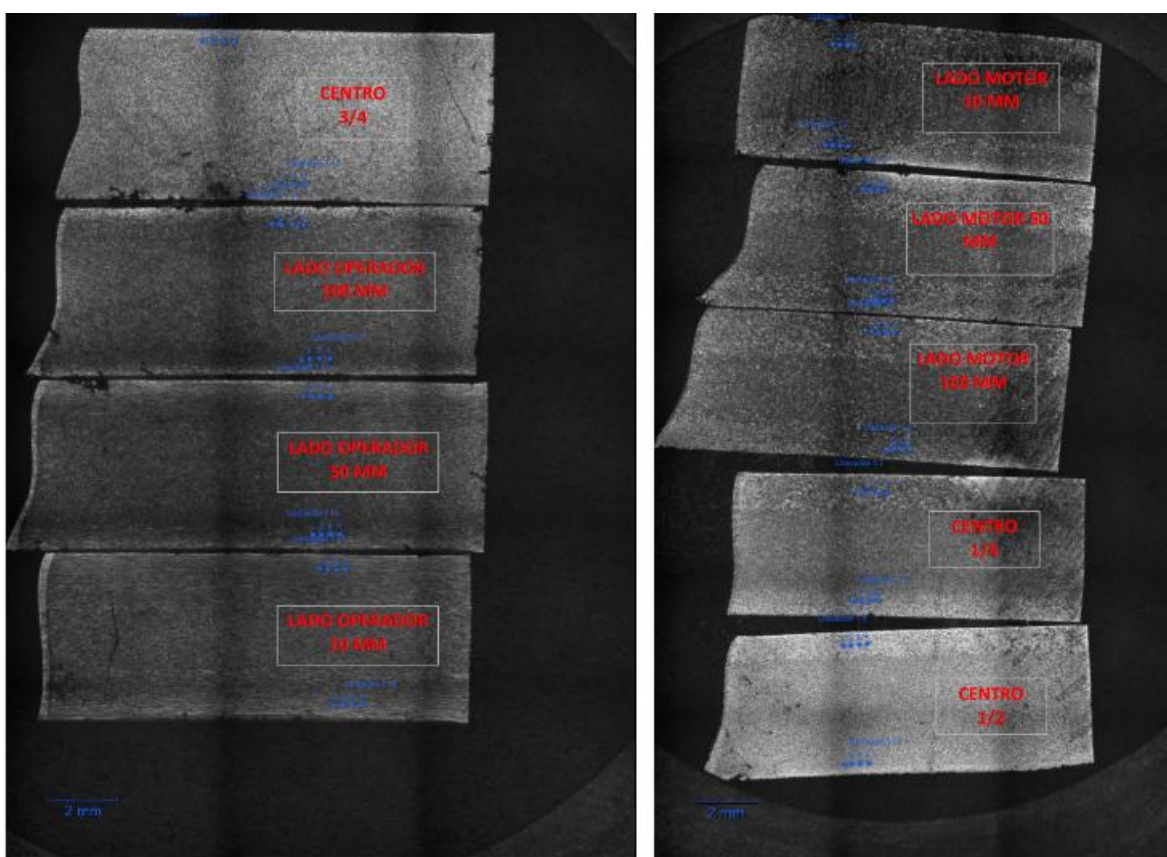


Ilustración 18. Ejemplo de zonas muestreadas para ensayo de microdureza de Vickers según ilustración 16.

Capítulo 4. Resultados y discusiones

En el presente capítulo se presentan de manera detallada los resultados obtenidos a partir de la caracterización térmica, el análisis microestructural y las pruebas físicas realizadas a las distintas condiciones del material. Se documenta la evolución del acero UBC a lo largo del proceso termo-mecánico, describiendo cómo las variables industriales, desde la intervención del *Slab Sizing Press* hasta las etapas de laminación en caliente, influyen en la morfología microestructural de cada aleación estudiada (UBC-Ti, UBC-TiB, UBC-TiNb).

Asimismo, se muestran de forma sistemática los comportamientos observados entre las diferentes aleaciones estudiadas, considerando su respuesta a los gradientes térmicos y su impacto en las propiedades físicas. Para cada composición se incluyen análisis de microdureza de vickers, ensayos de tensión y valoración microestructural por microscopía óptica, ofreciendo una visión integral del desempeño del material bajo condiciones reales de operación industrial.

4.1 Caracterización térmica

Por medio de pirómetros y parámetros de estimación se realizó la ilustración 17 en la que muestra la evolución térmica del material de prueba correspondiente a la aleación de UBC-Ti en la zona central y en bordes después de haber aplicado 294mm de reducción por SSP. Las dimensiones finales del rollo son de 4mm de espesor. Se observa que a la entrada del acabador el acero se encuentra por encima de A_{r3} para esta composición química la cual se encuentra entre 879 °C a 899°C según simulación y cálculos realizados. (Véase tabla 1). $\Delta T_{Lop\ avg} = 49^{\circ}C$, $\Delta T_{Lmot\ avg} = 40^{\circ}C$.

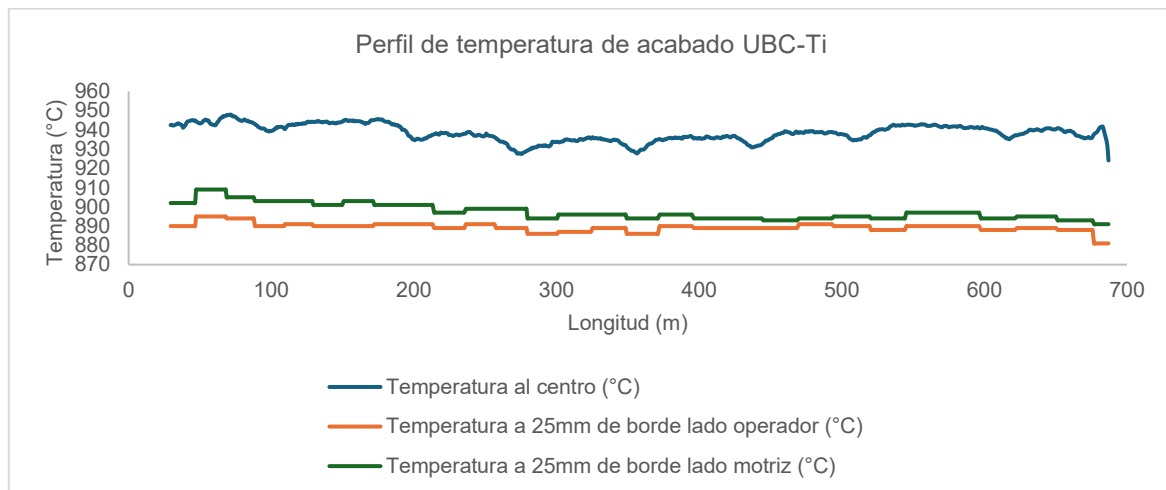


Ilustración 19. Evolución térmica al centro de aleación UBC Ti con 294 mm de reducción en SSP.

La ilustración 18 muestra la evolución térmica para el material de prueba relacionado con la aleación UBC-TiB con una reducción de ancho total de 264mm. El espesor final del material analizado es de 4.2mm. Se observa que la temperatura al centro de la lámina y en bordes se encuentra por encima de Ar_3 entre 878°C a 898°C según las simulaciones y cálculos realizados. (Véase tabla 1). $\Delta T_{Lop\ avg} = 21^\circ C$, $\Delta T_{L\ mot\ avg} = 22^\circ C$.

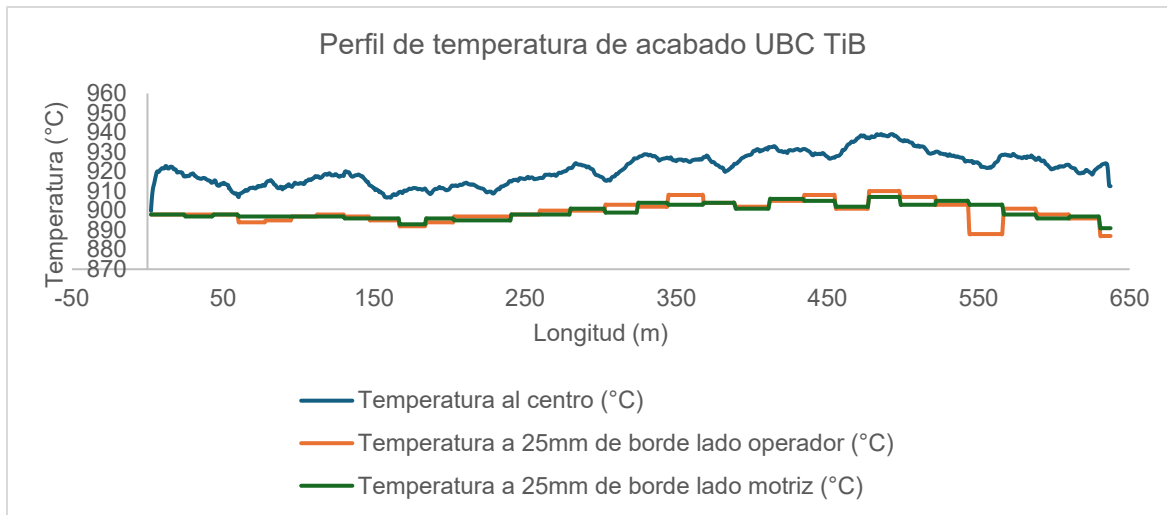


Ilustración 20. Evolución térmica al centro de aleación UBC TiB con 264 mm de reducción en SSP.

La ilustración 19 muestra la evolución térmica para el material de prueba relacionado con la aleación UBC-TiNb con una reducción de ancho total de 319mm. El espesor final del material analizado es de 4.2mm. Se observa que la temperatura al centro de la lámina se encuentra por encima de Ar_3 entre 874°C a 897°C según las simulaciones y cálculos realizados. (Véase tabla 1). $\Delta T_{Lop\ avg} = 15^\circ C$, $\Delta T_{L\ mot\ avg} = 15^\circ C$.

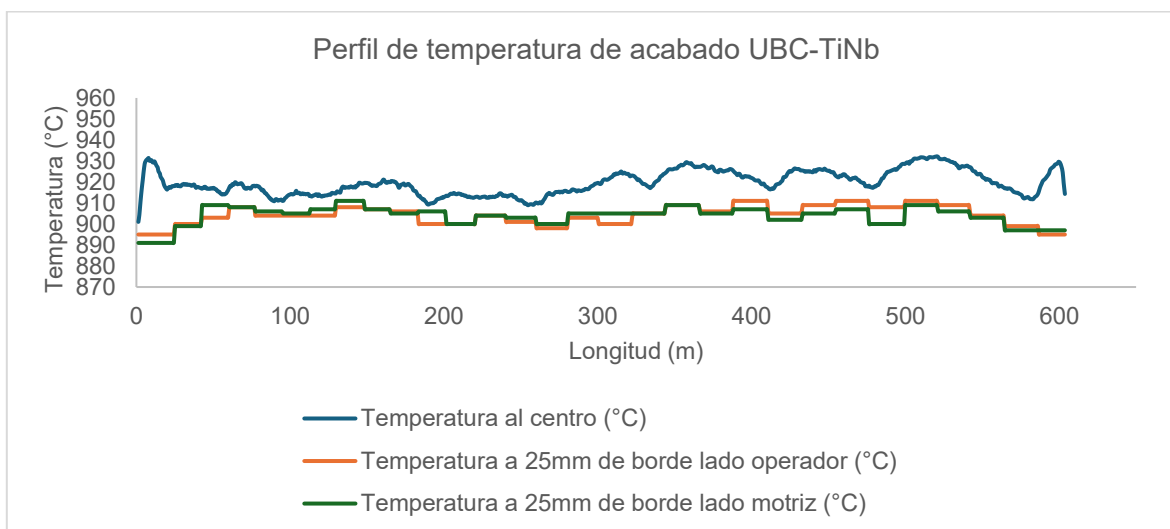


Ilustración 21. Evolución térmica al centro de aleación UBC TiNb con 319 mm de reducción en SSP.

4.1.2 Correlación de gradiente térmico contra reducción en *Slab Sizing Press*.

Se tomó una muestra estadística de 106 datos de rollos laminados con un espesor de barra de transferencia de 46mm a 49mm, siendo la población más abundante industrialmente probada relacionando el gradiente térmico con respecto a la reducción del *slab sizing press* aplicado, tal como se muestra en la ilustración 22.

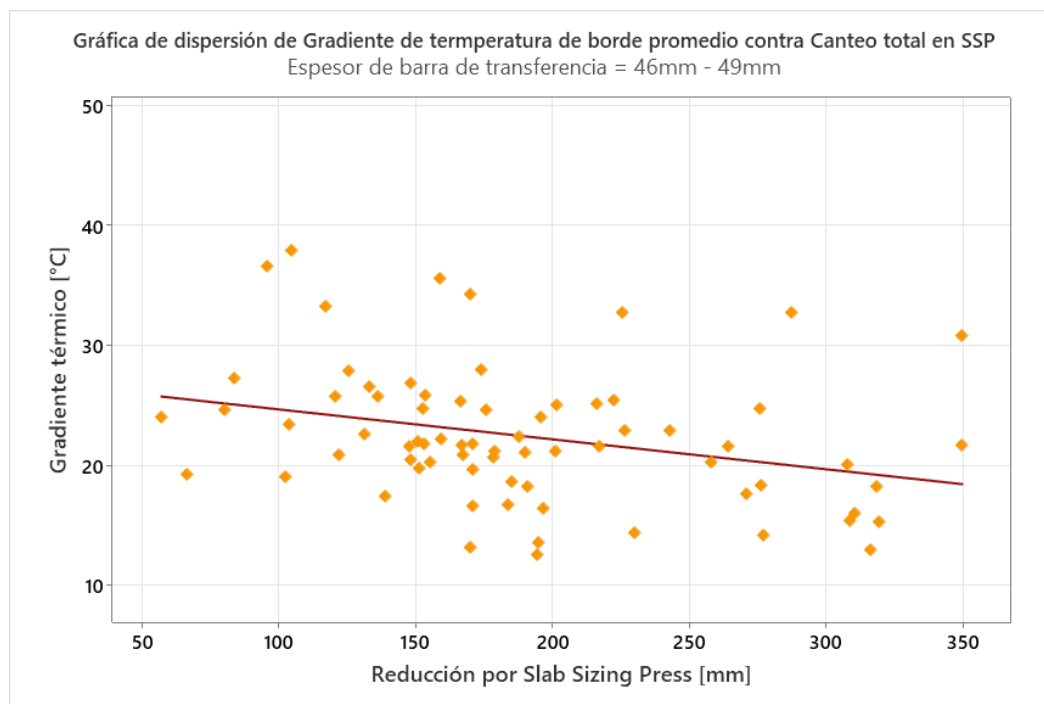


Ilustración 22. Gradiente térmico con respecto a la reducción en slab sizing press aplicada.

4.2 Caracterización de morfología microestructural por microscopía óptica.

Se realizaron ensayos a 500× con el propósito de evaluar de manera detallada el grado de deformación presente a lo largo del ancho del material y determinar cómo dicho comportamiento está asociado a los gradientes térmicos establecidos durante la laminación. Para ello, se siguió el esquema representativo de ubicación de muestras, identificando las posiciones de extracción de especímenes (A–E), las cuales permiten cubrir desde la zona inmediata al borde hasta la región central del material. La orientación de cada corte fue seleccionada de acuerdo con la dirección de laminación, con el fin de preservar la relación entre el flujo plástico y la morfología final de la microestructura. Este procedimiento se realizó de manera consistente para cada una de las aleaciones estudiadas, tal como se muestra en la Ilustración 16, lo que permitió establecer comparaciones directas entre aceros con distinta microaleación y comprender con mayor precisión el efecto localizado del gradiente térmico sobre la deformación acumulada.

4.2.1 Micrografías aleación UBC TiNb

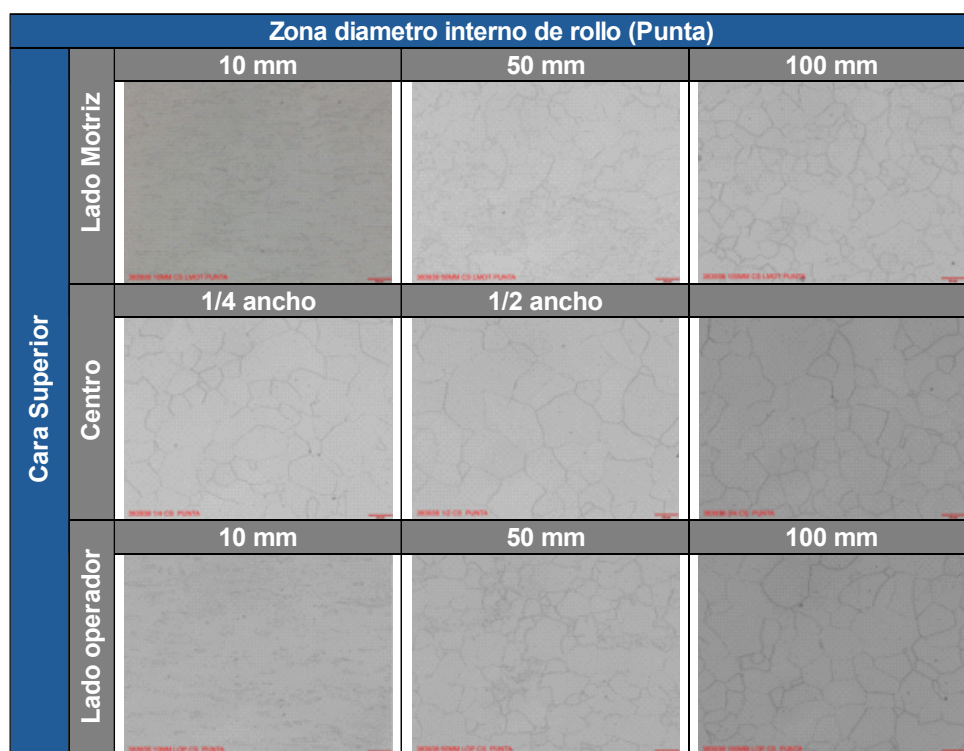


Ilustración 23. Micrografías aleación UBC TiNb a 500x, muestra zona diámetro interno Cara Superior

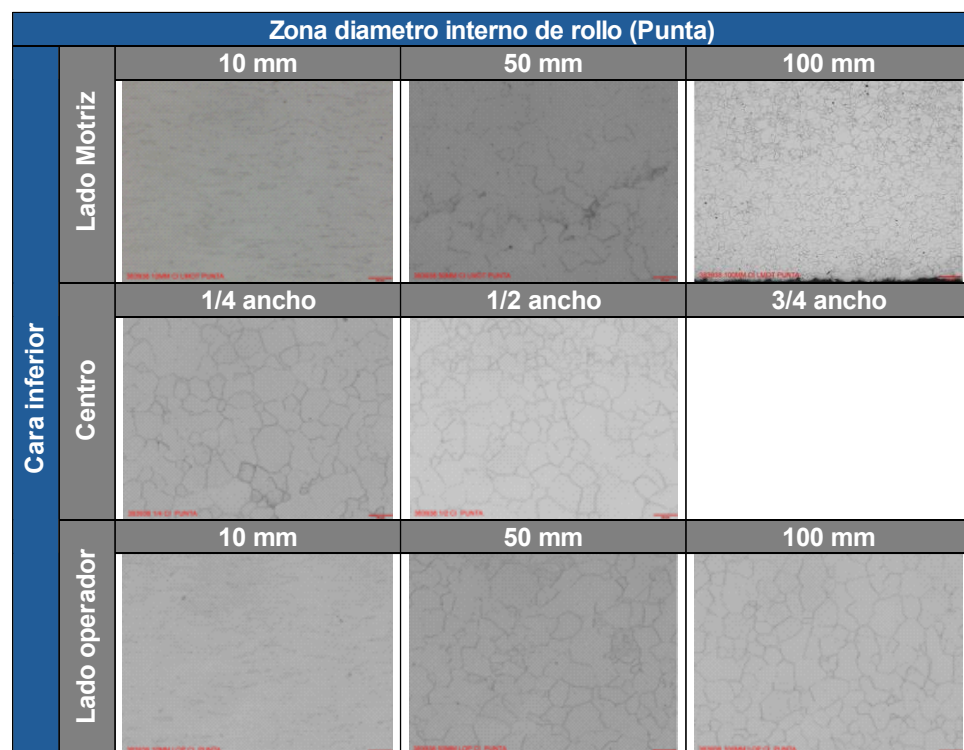


Ilustración 24. Micrografías aleación UBC TiNb a 500x, muestra zona diámetro interno Cara inferior

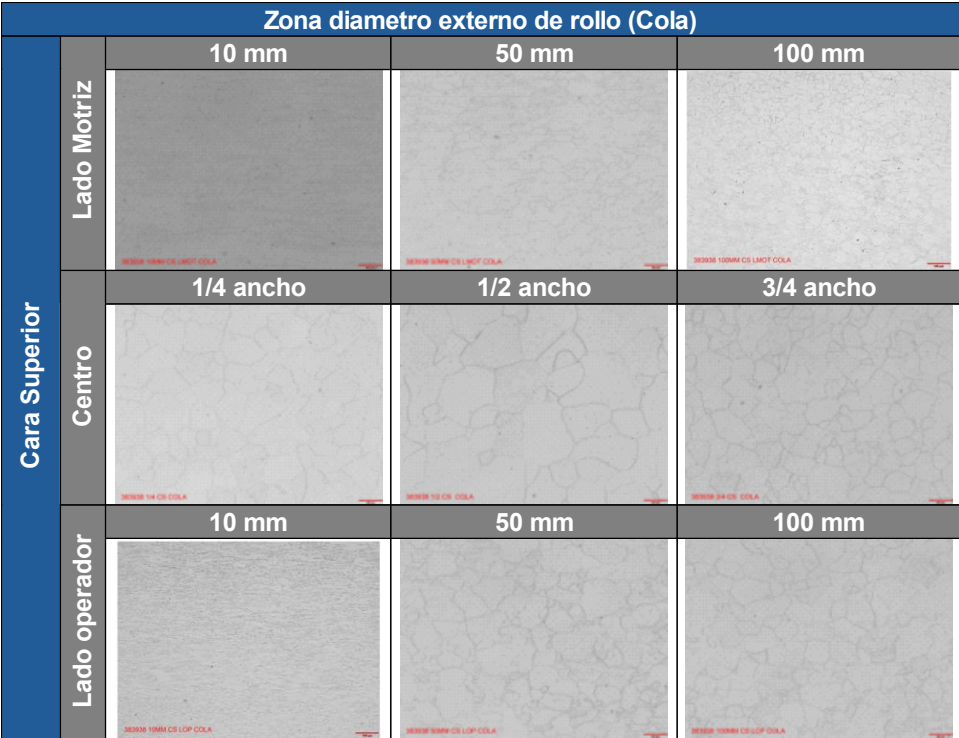


Ilustración 25. Micrografías aleación UBC TiNb a 500x, muestra zona diámetro exterior Cara Superior

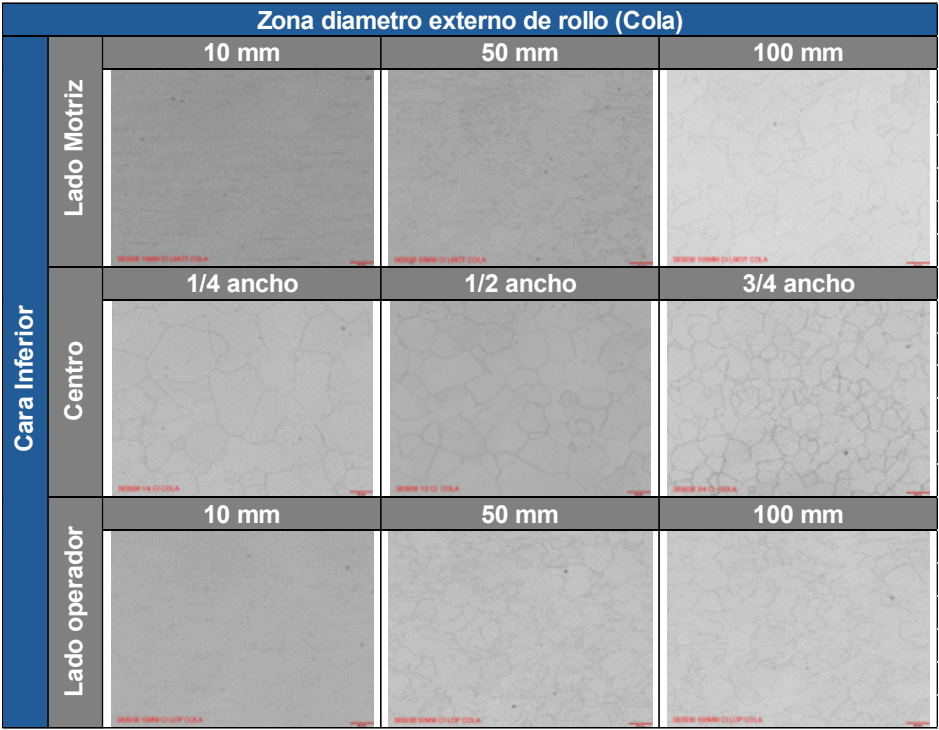


Ilustración 26- Micrografías aleación UBC TiNb a 500x, muestra zona diámetro exterior Cara Inferior

4.2.2 Micrografías aleación UBC TiB

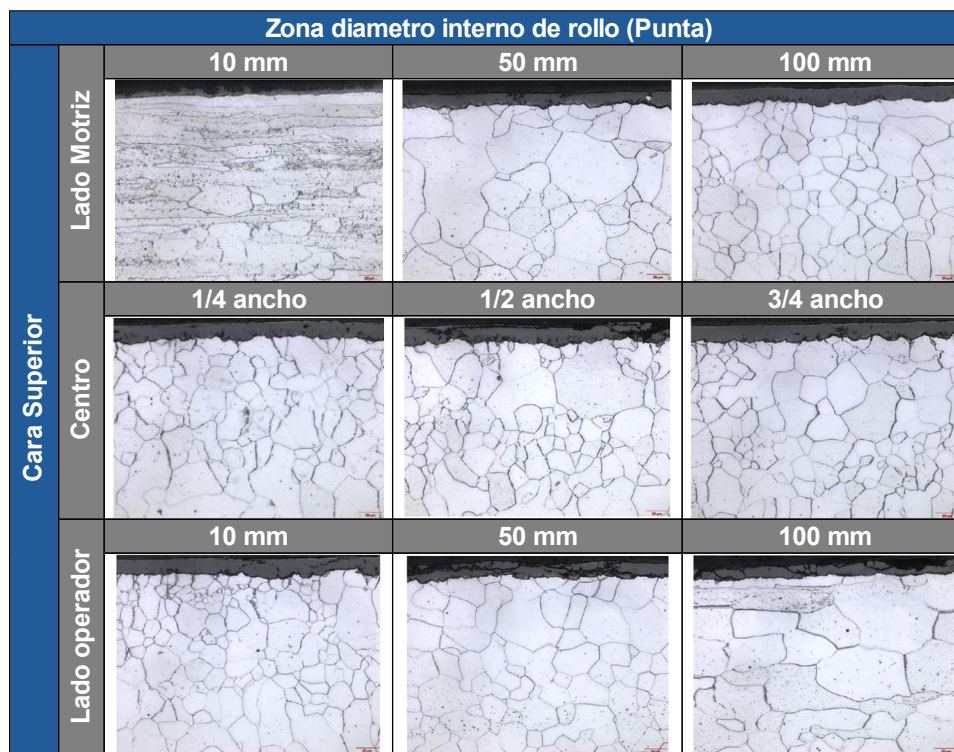


Ilustración 27. Micrografías aleación UBC TiB a 500x, muestra zona diámetro interno Cara Superior.

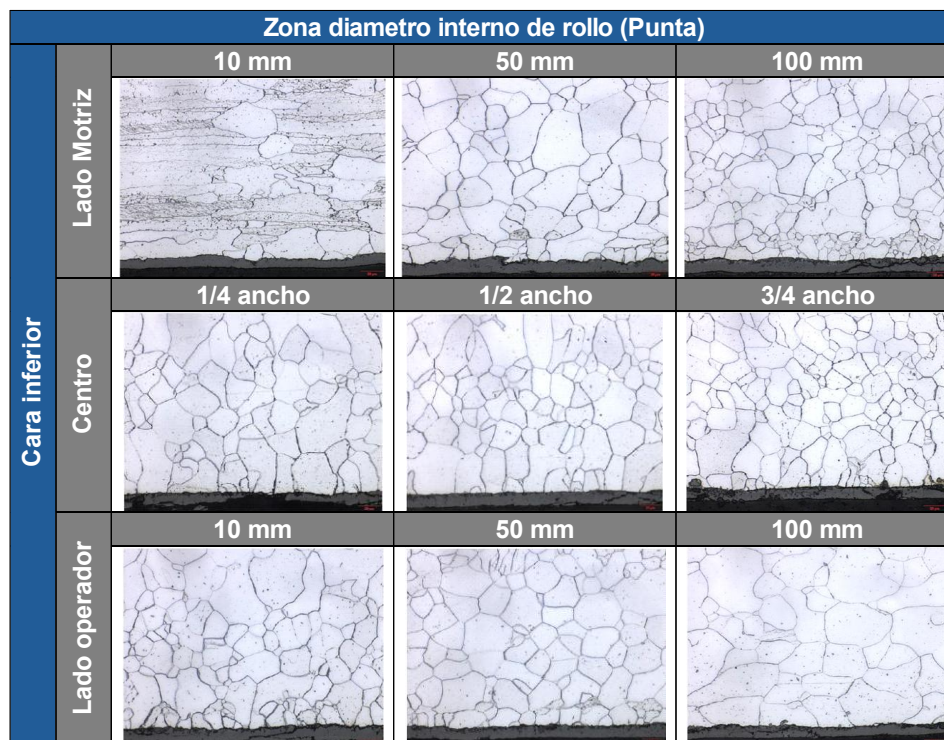


Ilustración 28. Micrografías a 500x aleación UBC TiB, muestra zona diámetro interno Cara Inferior

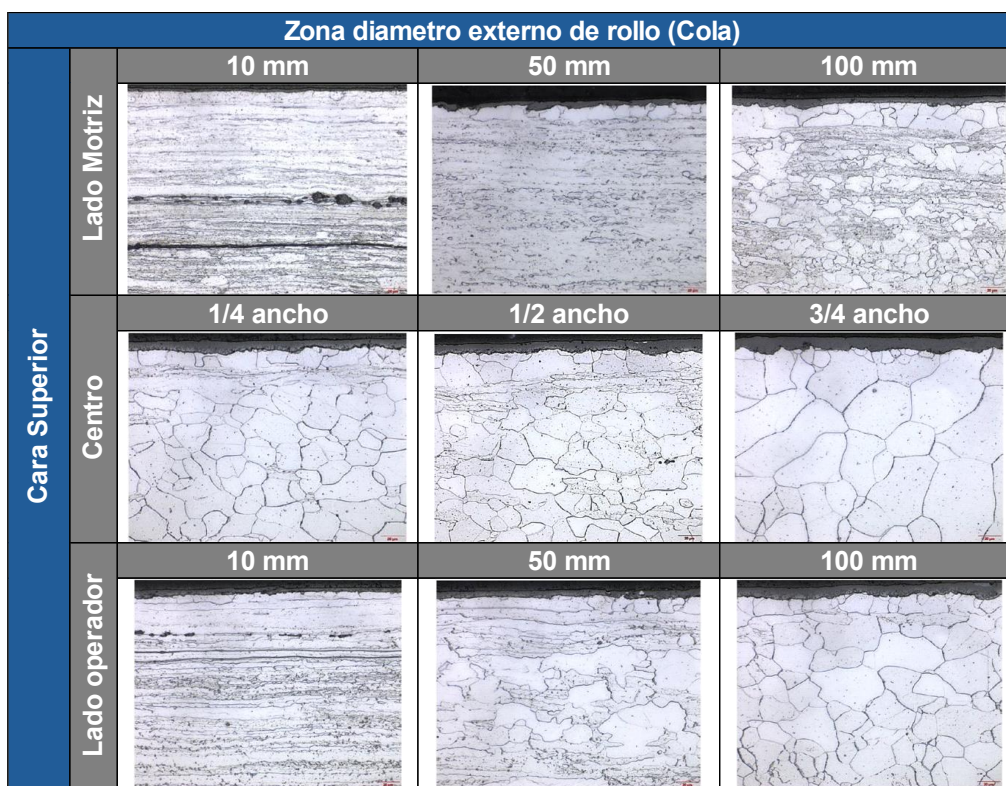


Ilustración 29. Micrografías a 500x aleación UBC TiB, muestra zona diámetro exterior Cara Superior

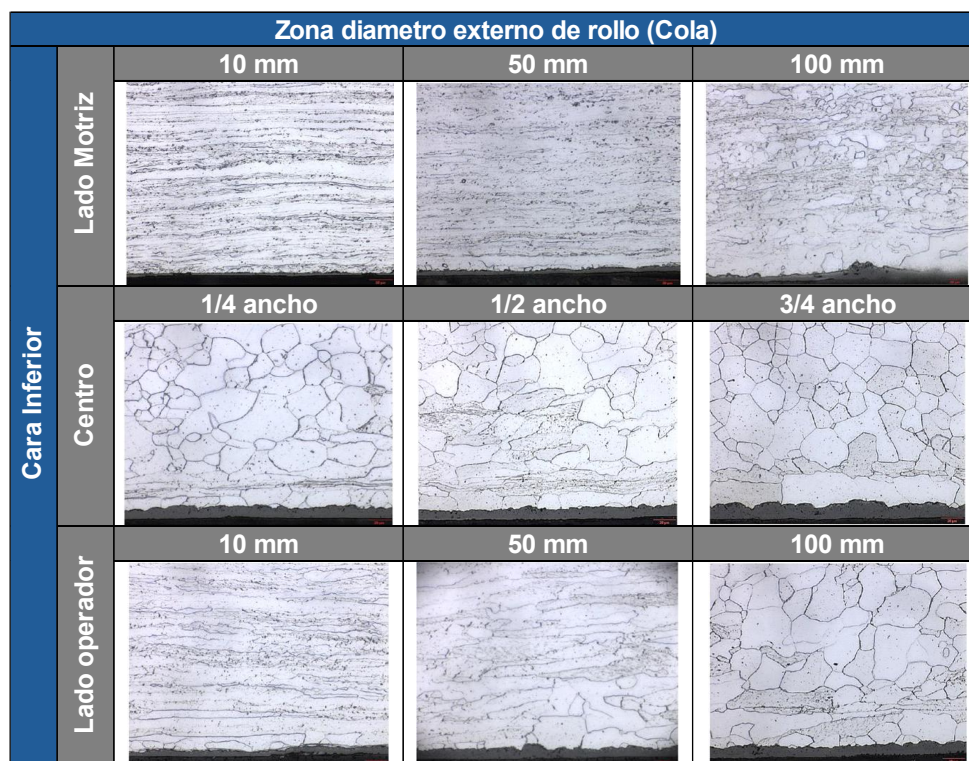


Ilustración 30. Micrografías a 500x aleación UBC TiB, muestra zona diámetro exterior Cara Inferior

4.2.3 Micrografías aleación UBC Ti

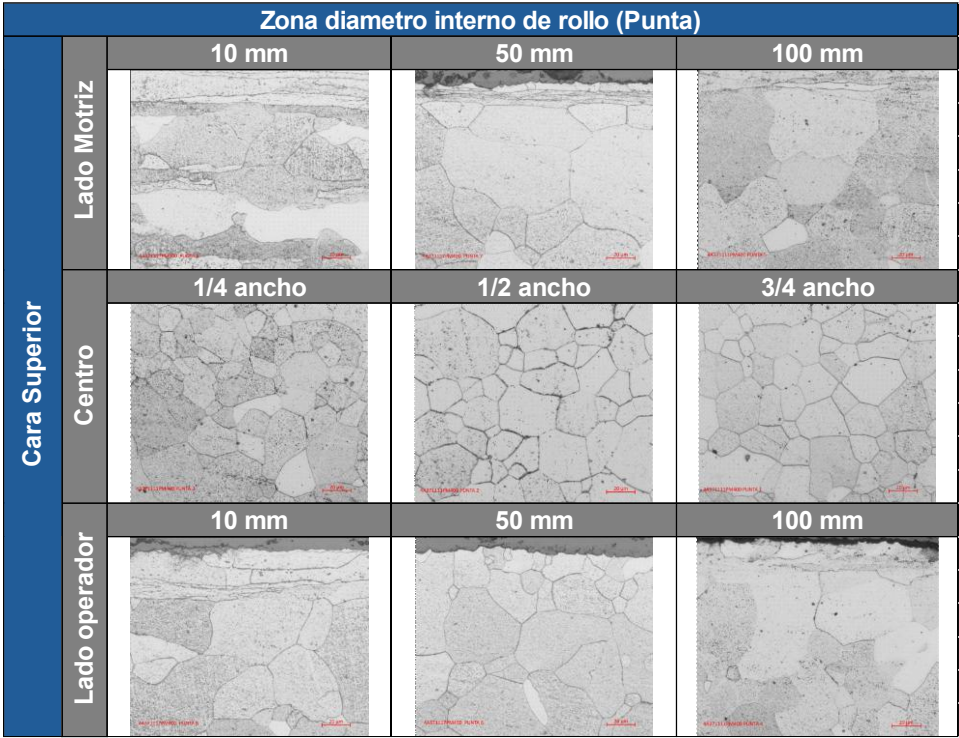


Ilustración 31. Micrografías a 500x aleación UBC Ti, muestra zona diámetro Interior Cara Superior

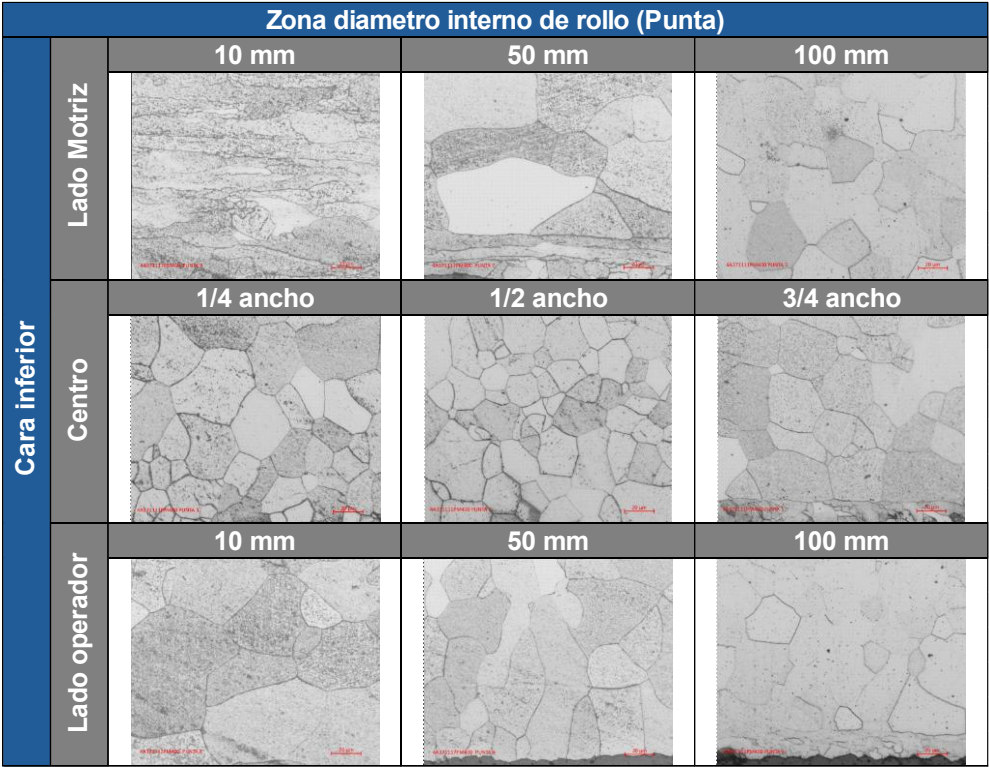


Ilustración 32. Micrografías a 500x aleación UBC Ti, muestra zona diámetro Interior Cara Inferior

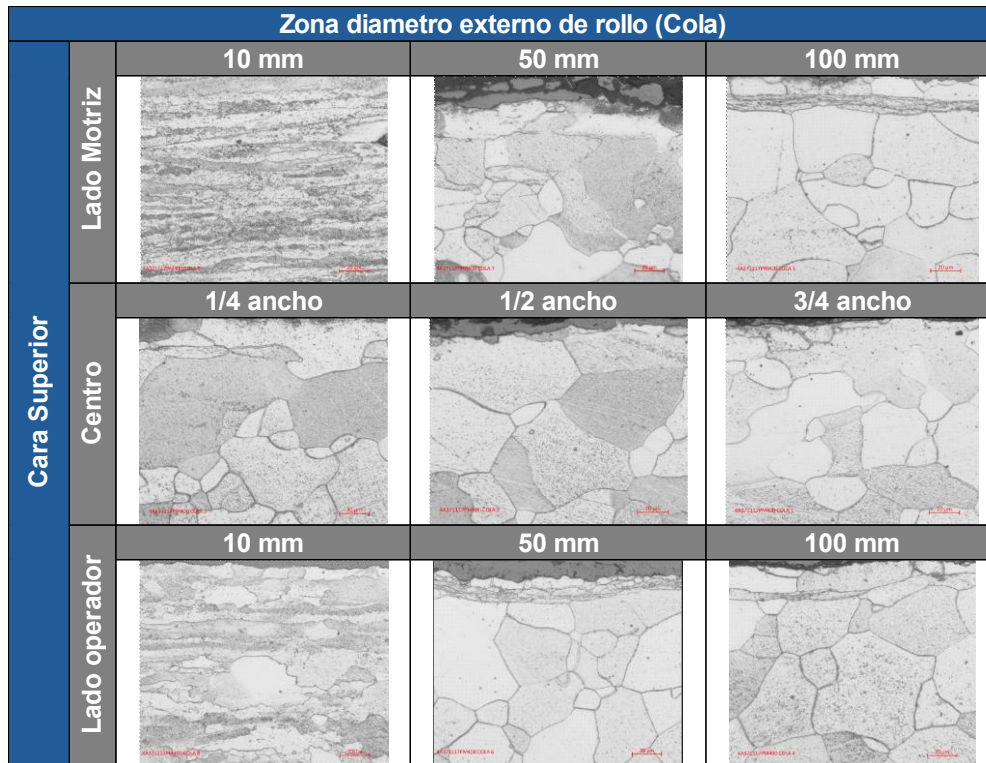


Ilustración 33. Micrografías a 500x aleación UBC Ti, muestra zona diámetro Exterior Cara Superior

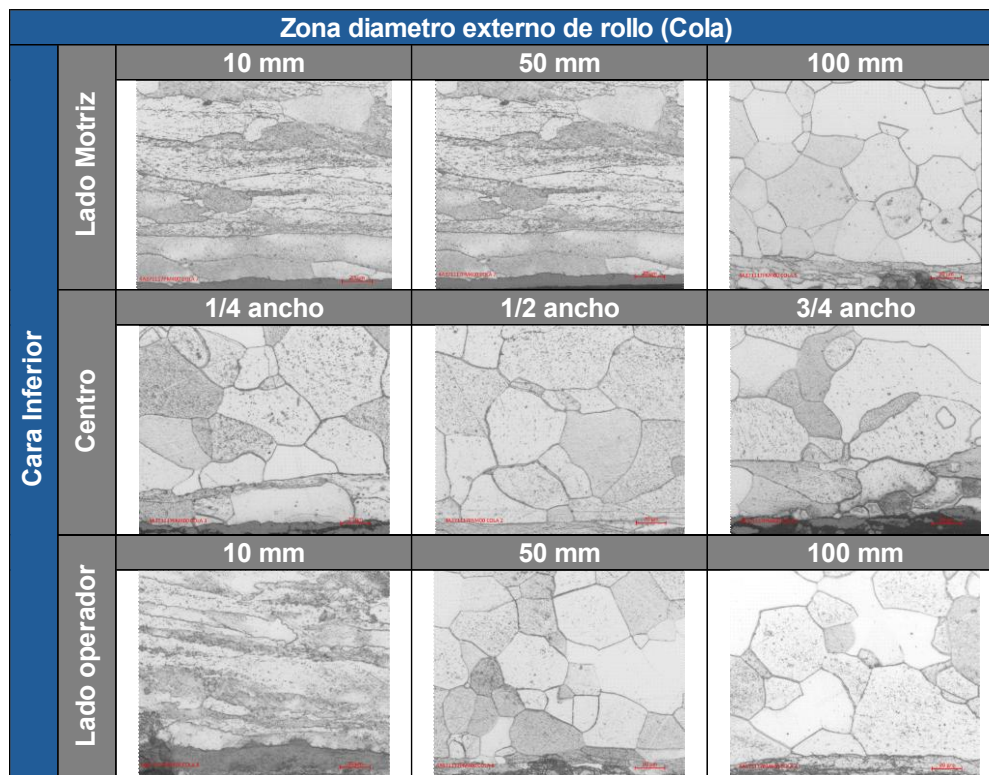


Ilustración 34. Micrografías a 500x aleación UBC Ti, muestra zona diámetro Exterior Cara Inferior

4.3 Caracterización de propiedades mecánicas

Los ensayos de tensión fueron realizados tanto en el diámetro interior como en el diámetro exterior de cada rollo, considerando un descarte promedio de 6 metros para garantizar que las probetas estuvieran libres de las zonas afectadas por las transiciones iniciales y finales del arrollado. Este procedimiento permitió obtener resultados representativos del comportamiento mecánico real del material una vez estabilizado en condiciones de laminación y enfriamiento. Las probetas fueron clasificadas de acuerdo con el tipo de aleación UBC utilizado en cada corrida, lo que facilitó comparar de manera directa el efecto de la química sobre las propiedades mecánicas globales. El mapa de ubicación de las zonas exactas de extracción dentro de cada rollo se presenta en la Ilustración 16, donde se indican las posiciones relativas empleadas para cada una de las aleaciones evaluadas y la correspondencia con el sentido de laminación, asegurando así la trazabilidad y consistencia de la información generada.

4.3.1 Ensayos de tensión en para aleaciones UBC

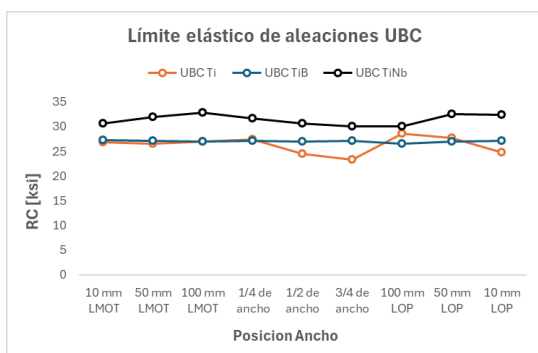


Ilustración 35. Límite elástico en diámetro exterior del rollo con ensayo en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina diferentes aleaciones de UBC.

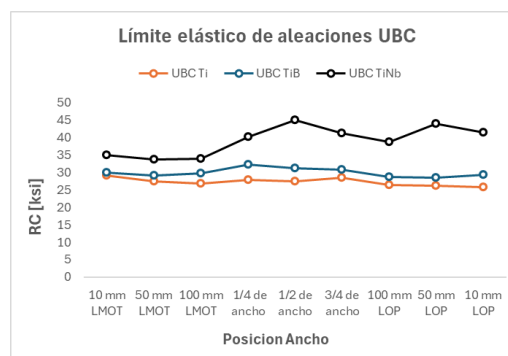


Ilustración 36. Límite elástico en diámetro interior del rollo con ensayo en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina diferentes aleaciones de UBC.

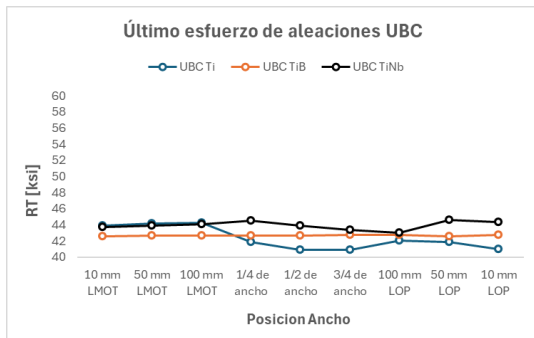


Ilustración 40. Último esfuerzo en diámetro exterior del rollo ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina con diferentes aleaciones de UBC.

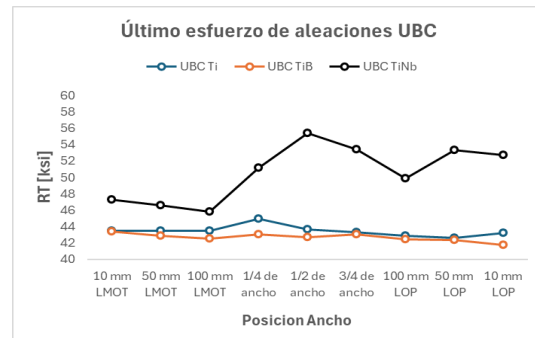


Ilustración 39. Último esfuerzo en diámetro interior del rollo ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina con diferentes aleaciones de UBC.

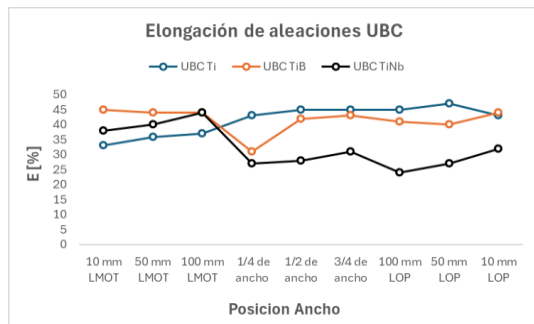


Ilustración 37. Elongación en diámetro exterior de rollo ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina con diferentes aleaciones UBC.

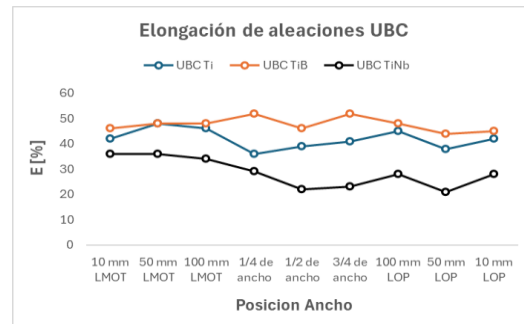


Ilustración 38. Elongación en diámetro interior de rollo ensayado en dirección longitudinal a lo ancho de la lámina con diferentes aleaciones UBC.

4.3.1 Ensayo de microdureza de Vickers en aleaciones UBC

Las mediciones de microdureza Vickers se realizaron a lo largo del ancho del material siguiendo el mismo esquema de extracción utilizado para la caracterización microestructural, garantizando correspondencia directa entre la ubicación de cada indentación y las zonas previamente analizadas. Se empleó una carga controlada y un espaciamiento constante entre huellas para evitar interferencias entre mediciones y asegurar la repetibilidad del ensayo. Las posiciones de evaluación se distribuyeron desde la región inmediata al borde hasta la zona central, permitiendo identificar variaciones asociadas a los gradientes térmico–mecánicos generados durante la laminación. Cada una de las series de mediciones fue segmentada por tipo de aleación UBC, lo que facilitó comparar el efecto de la química en la respuesta local de dureza. El mapa de referencia de las zonas ensayadas se encuentra detallado en la Ilustración 16, donde se muestran las posiciones A–E empleadas en cada aleación y su relación con la dirección de laminación, asegurando así la

trazabilidad y consistencia metodológica entre microestructura, microdureza y propiedades mecánicas.

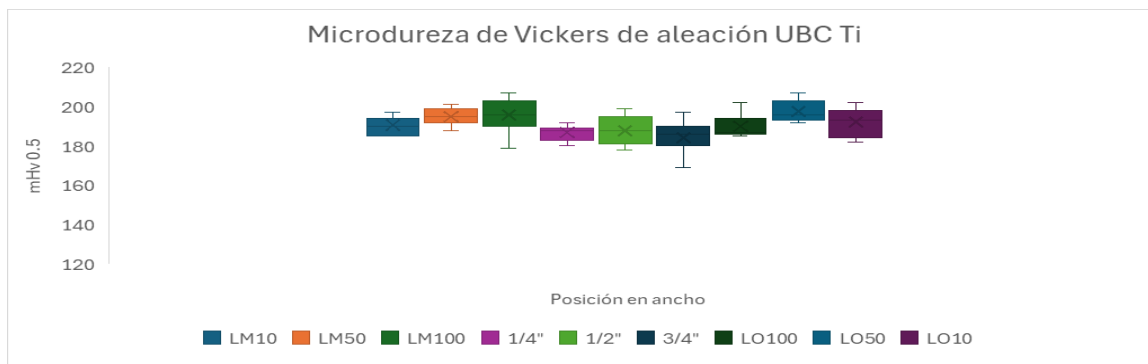


Ilustración 41. Microdureza de Vickers para aleación UBC Ti en diámetro exterior.

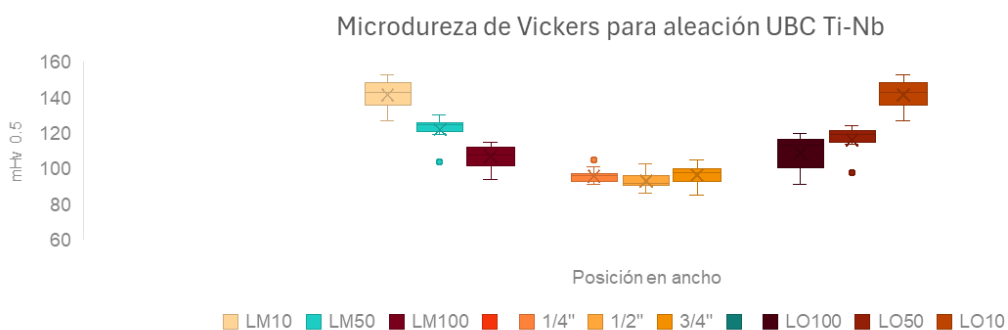


Ilustración 42. Microdureza de Vickers para aleación UBC TiNb en diámetro externo.

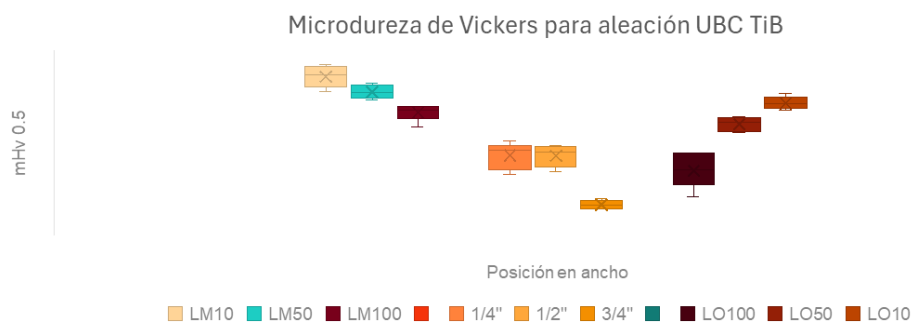


Ilustración 43. Microdureza de Vickers para aleación UBC TiB en diámetro externo.

4.4 Discusión de resultados

Los resultados de la caracterización térmica muestran que durante el procesamiento industrial no se identifica relación directa entre el incremento de reducción aplicada por el SSP y el aumento de variaciones microestructurales y de propiedades mecánicas significativas a 25mm del borde. La estabilidad térmica observada sugiere que el calor generado por la deformación plástica inducida en el proceso contribuye a mitigar parcialmente las caídas de temperatura, reduciendo el impacto esperado por la reducción del ancho de slab. Dentro de la literatura no se encuentra explícitamente declarado que este mecanismo supla por completo estas pérdidas térmicas, pero estudios como el de Fujimoto et al. (2022) y Kasatkin et al. (1984) si describen que la deformación plástica produce efectos térmicos apreciables capaces de reducir los contrastes de temperatura. Primetals Technologies (2024), documenta que la afectación más severa podría encontrarse en los primeros milímetros del borde, Si bien, la literatura menciona un valor puntual de afectación por estos gradientes térmicos a lo ancho, autores como Hoile (2000) señala que los gradientes térmicos más pronunciados en aceros UBC suelen localizarse precisamente en los primer 10 a 15mm del borde. Lo que coincide con los resultados mostrados en la sección 3.2 de la presente tesis.

Relacionando los resultados obtenidos con la evolución microestructural, se puede identificar que la zona más afectada por el gradiente térmico del proceso se ubica a 10mm del borde. En esta región se observó una microestructura significativamente deformada, caracterizada principalmente por los granos alargados, lo sugiere un descenso significativo en la temperatura de la zona pudiendo inclusive descender por debajo de Ar₃, permitiendo una laminación bifásica o en fase ferrítica. Zajac et al (2004) documenta que la deformación en fase ferrítica genera bandas alargadas con una densidad de dislocaciones significativamente mayores, lo que produce un aumento en la microdureza del material, tal como se aprecia en la sección 3.3.1 del presente trabajo. El fenómeno descrito por autores como Matsuda et al. (2009) y Fallahi et al. (2006), quienes declaran que pequeñas variaciones en temperatura inducen heterogeneidades microestructurales apreciables en la microestructura de los aceros UBC, especialmente en zonas donde el enfriamiento es diferenciado. Lo anterior comentado puede corroborarse comparando la sección 3.2 y 3.3.1.

En contraste con la variación química de los aceros analizados, esta no es una variable significativa dentro del estudio, pues el nivel de aleación parece no tener una respuesta diferencia al gradiente térmico bajo las condiciones evaluadas. Este efecto puede ser por la poca cantidad de aleación añadida y que esto pudiera no ser suficiente para apreciar un cambio significativo en la respuesta del material. Sta interpretación coincide con lo descrito or Matsuda et al. (2009) y Fallahi et al. (2006), quienes señalan que , si bien los microaleantes Ti y Nb influyen en el control de

grano austenítico mediante precipitación, su efecto sobre la respuesta del material a gradientes térmicos durante el enfriamiento pareciera ser limitado al nivel de aleación probado. El acero con TiNb presenta naturalmente un mayor límite elástico y una elongación menor al resto, esto coincide con lo documentado por Zajac et al. (2004) y Xiao et al. (2009), quienes destacan que la precipitación y el control de tamaño de grano austenítico incrementan la densidad de dislocaciones ocasionando aumento en límite elástico y reduciendo la elongación. En resumen, se determina que la variación de propiedades mecánicas por tipo de aleación se debe a la naturaleza de los mecanismos de endurecimiento propiciados por los aleantes que a los efectos térmicos inducidos por el procesamiento en el Slab Sizing Press.

El análisis de microdureza muestra un perfil característico en forma de “U”, con valores máximos concentrados en la zona a 10mm del borde, coincide por ser la microestructura que presenta mayor deformación, en consecuencia, esta tendrá mayor densidad de dislocaciones provocando el contraste con las zonas centrales del ancho analizadas, las cuales presentan una microestructura ferrítica poligonal y como resultado menor densidad de dislocaciones, dando el característico perfil “U” que se observa en el análisis de microdureza, esto coincide con lo documentado por Wang et al. (2022) donde se señala que la energía almacenada y la densidad de dislocaciones incrementan de forma proporcional a la deformación de la ferrita.

En contraste, las variaciones en los ensayos de tensión no presentan un desempeño diferenciado que se pueda atribuir a la variación en la zona de muestreo, por lo que pudiera ser que las variaciones térmicas y las heterogeneidades microestructurales queden confinadas a regiones de volumen reducido que pudieran no afectar significativamente al performance tensil del material.

Askeland et al. (2009) discute que las propiedades mecánicas globales suelen mostrar estabilidad aún cuando existen variaciones microestructurales localizadas, especialmente en materiales con alta ductilidad, como los aceros UBC. Campbell (2023) refuerza que los ensayos de tensión podrían diluir los efectos locales cuando la mayor parte del material presenta una microestructura homogénea. Así mismo Hoile (2000) comenta que las diferencias en bordes contra el centro en aceros UBC rara vez se reflejan en los ensayos de tensión debido al bajo volumen relativo de la zona afectada.

Las regiones ubicadas a 50mm del borde presentan principalmente una microestructura ferrítica poligonal homogénea. Lo observado en el presente estudio confirma que el material presenta un desempeño estable en ensayos de tensión y determinando que la distancia a 10mm es la zona con mayor afectación por los gradientes térmicos del proceso, sin embargo estos cambios térmicos no son

atribuibles a la reducción del SSP, como se observa en la Ilustración 22 y determinándose que el proceso de SSP es robusto para poder procesar aceros UBC sin afectaciones significativas al performance del material.

Capítulo 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos establecen que no existe influencia directa de la aplicación del SSP sobre los aceros analizados contrario a la hipótesis inicial, esto se puede observar en la ausencia de relación directa entre la reducción aplicada y el gradiente térmico a 25mm del borde como se observa en la ilustración 22. Esta respuesta nula de enfriamiento localizado en borde puede deberse a la atenuación de la caída de temperatura por la generada al aplicarse la deformación, siendo este un posible mecanismo de mitigación de pérdida de temperatura localizada en bordes.

A pesar de las diferencias microestructurales a 10mm del borde contra el resto de las posiciones en el ancho, las propiedades mecánicas se mantienen estables, siendo esto un indicador de funcionalidad del material.

Los hallazgos encontrados consolidan la interpretación de que el acero mantiene un comportamiento robusto ante la aplicación de reducción transversal aplicada durante el proceso en el *Slab Sizing Press*, preservando su desempeño mecánico y su uniformidad microestructural en zonas más allá de 10mm del borde.

Recomendaciones

Se recomienda realizar un modelo matemático que ayude a calcular el cambio térmico generado por la aplicación de deformación durante el proceso del slab sizing press y como respuesta obtener la compensación térmica producida por la deformación plástica inducida por el SSP durante el proceso.

Medir en tiempo real mediante cámaras térmicas el cambio térmico producido en los bordes del slab durante el procesamiento del material y realizar una gráfica térmica a lo ancho para observar el gap de temperatura entre las zonas analizadas.

Capítulo 6. Referencias

1. Fujimoto H, Kawasaki H, Koga S, Asai M. Influence of thickness profile after sizing press on width profile at head and tail portions of slab. 2022.
2. Wang M, Zhang H, Zhao W, Liu H, Wang X. Application of optimizing slab corner shapes to reduce edge seam defect on heavy plates. *Metals*. 2022;12(11):1984. doi:10.3390/met12111984.
3. Matsuda Y, Ozaki Y, Hara Y. Progress in sizing press for hot strip mill line. *Nippon Steel Tech Rep*. 2009;(94):17–22.
4. Primetals Technologies. Modernization of slab sizing press to boost reliability. Primetals Official Report. 2024. Available from: <https://www.primetals.com>
5. Zajac S, Siwecki T, Hutchinson B, Hutchinson WB. An ultra-low carbon Cu-bearing steel: Influence of thermomechanical processing and aging heat treatment on structure and properties. *Mater Sci Eng A*. 2004;387–389:787–91. doi:10.1016/j.msea.2004.01.096.
6. Askeland DR, Fulay PP, Wright WJ. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Cengage Learning; 2009.
7. Campbell J. The pre-existing microcrack population in metals: A personal overview. *Procedia Struct Integr*. 2023;43:234–9. doi:10.1016/j.prostr.2022.12.264.
8. The AISE Steel Foundation. The making, shaping and treating of steel. 11th ed. Available from: <https://www.steelfoundation.org/publications/mststoc.htm>
9. Hoile S. Processing and properties of mild interstitial free steels. *Mater Sci Technol*. 2000;16(10):1079–93. doi:10.1179/026708300101506902.
10. Fallahi A, Mason DE, Kumar D, Bieler TR, Crimp MA. The effect of grain boundary normal on predicting microcrack nucleation using fracture initiation parameters in duplex TiAl. *Mater Sci Eng A*. 2006;432(1–2):281–91. doi:10.1016/j.msea.2006.06.046.
11. Kasatkin OG, et al. Calculation models for determining the critical points of steel. *Metal Sci Heat Treat*. 1984;26(1–2):27–31.
12. Matsumura Y, Yada H. *Trans Iron Steel Inst Jpn*. 1987;27:492.
13. Yada H, Matsumura Y, Senuma T. In: Tamura I, editor. *Proc. 1st Conf. Physical Metallurgy of Thermomechanical Processing of Steels and Other Metals (THERMEC-88)*. Tokyo: ISIJ; 1988. p. 200.
14. Chen Y, Chen Q. *J Iron Steel Res Int*. 2003;10:46.
15. Tong M, Ni J, Zhang Y, Li D, Li Y. *Metall Mater Trans A*. 2004;35A:1565.

16. Xiao N, Li D, Li Y. Supplemental Proceedings. Vol 2. Materials Characterization, Computation and Modeling. Warrendale (PA): TMS; 2009. p. 87.
17. ASTM International. ASTM E384-23. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2023. doi:10.1520/E0384-23.
18. Castillo F. Tecnología de materiales. Universidad Nacional Autónoma de México; 2015. Available from: <https://unita.unam.mx/wp-content/uploads/2024/11/aleacionesfec-1000720.pdf>
19. Jonas JJ, Sellars CM. Hot working and recrystallization of steels. Metall Mater Trans A. 1992;23(7):2217–27.
20. DeArdo AJ. Fundamentals of ferrite formation in IF steels. Int Mater Rev. 2003;48(6):371–402.
21. Speich GR, Leslie WC. Structure and properties of low-carbon steels. Metall Trans. 1972;3(5):1043–54.
22. Yen H, Li C. Thermal gradients and microstructure evolution in hot-rolled ultra-low-carbon steels. J Mater Process Technol. 2018;255:45–56.