

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y
METALURGICA



EFFECTO DE LOS ELEMENTOS MICROALEANTES EN
UN ACERO LAMINADO EN CALIENTE

INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALURGISTA

ELABORADO POR:
GEAN FRANCO TORRES CORDERO

ASESOR:
ING. JULIO UZA TERUYA

LIMA – PERU

2013

DEDICATORIA

El presente informe se lo dedico a mi padre por siempre aconsejare y guiarme hacia el camino correcto, a mi madre que con su amor y confianza siempre me muestra el lado positivo de las cosas, a mi hermano por siempre acompañarme y a mi hijo quien me motiva a ser mejor cada día. Gracias por estar siempre conmigo.

RESUMEN

En este informe se presenta y explica los resultados observados en el ensayo de tracción a temperatura ambiente de dos aceros C-Mn, uno sin microaleantes y otro con microaleantes de V y Nb.

La estructura del informe consta de 3 capítulos; en el primer capítulo se describe los objetivos específicos y su justificación; en el segundo capítulo se detalla el marco teórico del informe, indicando el efecto que tienen los elementos microaleantes sobre el acero; en el tercer capítulo se hará un estudio de comparación entre un acero laminado en caliente sin elementos microaleantes y un acero laminado en caliente con presencia de microaleantes (HSLA). Este estudio abarca el análisis químico en acería, análisis de la estructura, tamaño de grano del producto laminado y propiedades mecánicas. La adición de microaleantes tanto en las barras de 1/2" y 5/8" de diámetro significo un aumento en el límite elástico.

ABSTRACT

This report presents and explains the results observed in the tensile test at room temperature two C-Mn steels, one without and one with microalloying of V and Nb microalloying.

The structure of the report consists of three chapters: the first chapter describes the specific objectives and justification, in the second chapter details the theoretical framework of the report, indicating the effect microalloying elements on steel, in the third chapter will make a comparison study between hot rolled steel without microalloying elements and hot rolled steel microalloying presence (HSLA). This study includes a chemical analysis in steelworks, analysis of the structure, grain size of the rolled product and mechanical properties. Microalloying adding both bars 1/2" and 5/8" diameter, mean an increase in the yield.

INDICE

CAPITULO I: INTRODUCCION

1.1 Objetivo general	10
1.2 Justificación del desarrollo de los aceros microaleados	10
1.3 Evolución Histórica	14

CAPITULO II: ACEROS MICROALEADOS O HSLA

2.1 Definición	17
2.1.1 Categorías y especificaciones de los aceros HSLA	21
2.2 Aplicaciones y selección de los aceros HSLA	24
2.2.1 Aplicaciones de los Aceros HSLA	25
2.2.2 Guías para la selección	26
2.2.3 Oleoductos y conducciones de gas	27
2.2.4 Aplicaciones en el sector automotriz	28
2.2.5 Aplicaciones estructurales exteriores	29
2.2.6 Láminas formadas en frío	29
2.2.7 Aceros estructurales	29
2.2.8 Construcción de barcos	30
2.2.9 Aplicaciones para vehículos y grúas	30
2.2.10 Aplicaciones en el transporte ferroviario	30
2.2.11 Aplicaciones para vigas, refuerzos	31
2.3 Microaleantes más comunes	31
2.3.1 Vanadio	32
2.3.2 Niobio	33
2.3.3 Titanio	34
2.3.4 Aluminio	34
2.3.5 Otros elementos microaleantes	35
2.3.6 Efecto de los diferentes elementos microaleantes	35
2.3.7 Efecto combinado	36

2.4 Mecanismos de endurecimiento	37
2.4.1 Endurecimiento por solución sólida	37
2.4.2 Afino de grano	39
2.4.3 Fases precipitadas	40
2.4.4 Transformaciones de fase	42
2.4.5 Endurecimiento por deformación	43
2.5 Mejora de las propiedades mecánicas	44
2.6 Control del tamaño de grano	45
CAPITULO III: RESULTADOS EXPERIMENTALES	
3.1 Descripción experimental	47
3.1.1 Composición Química	48
3.1.2 Ensayos Mecánicos	50
3.1.3 Ensayos Metalográficos	57
CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFIA	60
ANEXOS	62

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Reducción de peso según el valor del límite elástico del acero	13
Figura 1.2: Descubrimiento y desarrollo de los aceros microaleados con relación al avance en los procesos modernos de soldadura, la crisis del petróleo y regulaciones más estrictas	16
Figura 2.1: Esquema de laminación termomecánica	19
Figura 2.2: Barra corrugada de 3/8" laminada en caliente por el proceso Tempcore	20
Figura 2.3: Efecto del Vanadio en la transformación y Estructura de los Aceros HSLA	33
Figura 2.4: Efecto del Niobio en la transformación y Estructura de los Aceros HSLA	34
Figura 2.5: Efecto del Titanio en la transformación y Estructura de los Aceros HSLA	35
Figura 2.6: Esquema de una celda de hierro BCC con los posibles lugares que ocuparán los elementos en solución sólida	38
Figura 2.7: Endurecimiento por solución sólida en la ferrita de algunos Elementos	39
Figura 2.8: Influencia del tamaño de grano de ferrita en el Límite Elástico y en la Temperatura de transición de un acero al carbono	40
Figura 3.1: Proceso de Acería	47
Figura 3.2: Proceso de Laminación	48
Figura 3.3: Espectrómetro de emisión óptica ARL 4460	49
Figura 3.4: Huellas de muestras de acero luego de análisis químico	50
Figura 3.5: Muestras cortadas en la laminación para los ensayos mecánicos	50
Figura 3.6: Máquina de ensayos universales Tinius Olsen, donde se realizan los ensayos de límite de fluencia, resistencia a la tracción y alargamiento	51

Figura 3.7: Máquina dobladora para el doblado a 180° según norma de fabricación	51
Figura 3.8: Propiedades mecánicas de barra corrugada de 1/2" sin microaleantes	53
Figura 3.9: Propiedades mecánicas de barra corrugada de 1/2" con microaleantes	54
Figura 3.10: Propiedades mecánicas de barra corrugada de 5/8" sin microaleantes	55
Figura 3.11: Propiedades mecánicas de barra corrugada de 5/8" con microaleantes	56
Figura 3.12: Corte transversal para análisis de muestras	57
Figura 3.13: Zonas de análisis en cada muestra, 6X	57
Figura 3.14: Fotomicrografías de muestras	58

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1: Reducción de peso y ventajas económicas entre un acero al carbono y un acero HSLA.	13
Tabla 2.1: Proporción de los productos hechos con aceros HSLA en las diferentes potencias mundiales (1986).	26
Tabla 2.2: Productos fabricados con acero HSLA y sus aplicaciones.	31
Tabla 2.3: Propiedades de los elementos microaleantes.	32
Tabla 2.4: Efectos de los elementos de aleación en las propiedades de los aceros microaleados.	36
Tabla 3.1: Composición química de muestras analizadas.	49
Tabla 3.2: Diámetros ensayados en la máquina de tracción.	52

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo General

El objetivo del presente informe es mostrar los beneficios que sobre las propiedades mecánicas de un acero estructural C-Mn, aporta la adición de V y Nb como microaleantes.

1.2 Justificación del desarrollo de los aceros microaleados

Los aceros microaleados (High Strength Low Alloy –HSLA) son aceros al C-Mn con pequeñas adiciones de aleante que mejoran sus propiedades mecánicas así como sus propiedades a la corrosión. Los aceros microaleados difieren de otros aceros en que no son fabricados para cumplir una composición química específica sino para cumplir con propiedades mecánicas específicas. Tienen un contenido de carbono entre 0,05% y 0,25% en peso para mantener la conformabilidad y la soldabilidad. Otros elementos de aleación incluyen hasta un 2,0% de manganeso y pequeñas cantidades de cobre, níquel, niobio, nitrógeno, vanadio, cromo, molibdeno, titanio, calcio, tierras raras, o zirconio.

El cobre, titanio, vanadio y niobio son agregados para incrementar la resistencia. Estos elementos tienen por objeto alterar la microestructura de los aceros al carbono, la cual es generalmente una mezcla de ferrita-perlita, para producir una dispersión muy fina de aleaciones de carburos en una matriz casi pura de ferrita. Esto elimina el efecto de reducción de la tenacidad provocado por la fracción en volumen de perlita,

aunque manteniendo e incrementando la resistencia del material mediante el refinamiento del tamaño de grano, el cual en el caso de la ferrita incrementa la tensión de fluencia en un 50% para cada reducción a la mitad del tamaño de grano promedio. El endurecimiento por preprecipitado juega un rol menor también.

La tensión de fluencia para estos aceros puede estar entre 250 MPa y 590 MPa. Debido a su mayor resistencia y tenacidad, los aceros microaleados suelen requerir entre un 25% y un 30% más de energía para conformarse, en comparación con aceros al carbono.

El cobre, silicio, níquel, cromo y fósforo son agregados para incrementar la resistencia a la corrosión. El zirconio, calcio y las tierras raras son agregadas para controlar la forma de las inclusiones de sulfuros, que incrementa la conformabilidad. Son necesarios porque la mayoría de los aceros microaleados tienen propiedades altamente dependientes de la dirección considerada. La conformabilidad y la resistencia al impacto pueden variar significativamente cuando son ensayados longitudinal o transversalmente al grano. Las flexiones paralelas al grano longitudinal son más propensas a fisurarse cerca del borde externo debido a las tensiones de tracción provocadas. Esta característica direccional se ve significativamente reducida en los aceros microaleados que han sido tratados para el control de las formas de sulfuros.

Los aceros microaleados también son más resistentes a la corrosión que la mayoría de los aceros debido a su falta de perlita – las finas capas de ferrita (casi hierro puro) y cementita. El Ángel del Norte es un ejemplo conocido de una estructura de acero microaleado sin pintar (la aleación específica utilizada se llama COR-TEN e incluye una pequeña cantidad de cobre). Los aceros microaleados tienen densidades de alrededor de 7800 kg/m³.

Durante las últimas cuatro décadas se ha trabajado en el desarrollo y diseño de aceros microaleados o HSLA. En este periodo, estos aceros se han convertido en un tipo de aceros indispensables para el diseño de estructuras. Presentan ventajas respecto a los aceros estructurales, no sólo con respecto a sus propiedades mecánicas (poseen

límites elásticos del orden de 550-600 MPa), sino también por el hecho de obtenerse con las propiedades deseadas directamente del proceso de laminación controlada sin la necesidad de someter al material a tratamientos térmicos posteriores de afino de grano que encarecerían el costo del producto.

Debido al total de ventajas de estos materiales respecto a los aceros estructurales, el consumo de aceros microaleados en el mercado se estima en un 10-15% del consumo total de aceros en el mundo (unos 80-120 millones de toneladas por año). Así pues, este salto en el consumo de aceros HSLA supone grandes beneficios económicos no solo para los fabricantes de aceros, sino también para los usuarios.

Gracias a los avances tecnológicos y a la adaptación a una serie de etapas de reducción de costo, los aceros HSLA presentan una serie de ventajas que los hacen aptos para reemplazar a los aceros al carbono tradicionales, en áreas como la construcción, transporte y construcción.

En la industria del automóvil se ha hecho importante y necesaria la reducción de peso para el diseño de carrocerías de automóviles resistentes y seguros con bajos costos. Para ello, en el área de los materiales, el cambio más importante ha sido la sustitución de aceros al carbono por aceros HSLA. Básicamente se usan aceros HSLA con límites elásticos de 210- 420 MPa.

Los aceros HSLA presentan límites elásticos 2-3 veces superiores a los aceros laminados tradicionales. La reducción de peso alcanzado con estos aceros no sólo depende de su valor de límite elástico, sino también del modo de carga a la que la estructura está sometida. Así pues, un aumento en el valor del límite elástico puede contribuir en una reducción del peso en un 34% o más, dependiendo del caso. Considerando factores de seguridad, esta reducción de peso puede suponer un 25%. La siguiente figura muestra los rangos de reducción de peso según el límite elástico del acero considerado.

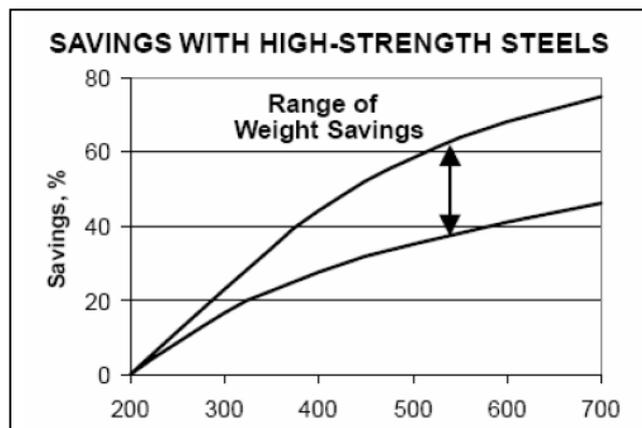


Figura 1.1: Reducción de peso según el valor del límite elástico del acero.

Veamos un ejemplo de la reducción de peso y las ventajas económicas que ello implica. Para ello comparamos un acero al carbono con un acero HSLA, y consideramos el 25% de ahorro en peso.

Tabla 1.1: Reducción de peso y ventajas económicas entre un acero al carbono y un acero HSLA.

Beneficios de los Productores de Aceros (en euros por tonelada de acero)		
	<i>Acero al Carbono</i>	<i>Acero HSLA</i>
<i>Coste acero base</i>	350	415
<i>Coste elementos microaleantes</i>	0	-15
<i>Costes de Producción</i>	-300	-300
Beneficios	50	100

**Puesto que se da una reducción en peso del 25%:
0,75 Tn de Acero HSLA sustituye a 1 Tn de Acero al Carbono**

Menores costes para usuarios (en euros por tonelada de acero)		
<i>Acero al Carbono</i>	(1 Tn x 350)	350
<i>Acero HSLA</i>	(0,75 Tn x 415)	311
Total Ahorro		39

Se observan los beneficios tanto para el productor como para el usuario: el productor obtiene el doble de beneficios por el valor añadido de estos aceros, y el usuario a parte del menor costo del producto (39 euros), consigue una serie de ventajas como facilidad de fabricación, mejora de propiedades mecánicas y menores costos de transporte.

1.3 Evolución Histórica

Para mejorar las propiedades de soldabilidad, conformabilidad y resistencia a la fractura, en la década de los 50 se empezó a estudiar el efecto que ocasionaba la adición de pequeñas cantidades de Niobio en el comportamiento mecánico de los aceros tradicionales. Se aprovechó el hecho de que en aquella época el Niobio era un metal económico debido a la gran cantidad de yacimientos de dicho metal que se descubrieron en esta época. Al poco tiempo ya se conocía el efecto de afino de grano y endurecimiento de la matriz en la estructura de estos aceros a través de la formación de pequeños precipitados de carburo de niobio. Pero en esta la época no sólo se estudió el efecto generado por la adición de pequeñas cantidades de niobio, sino que en paralelo también se estudió el efecto que ocasionaba la adición de Vanadio, Titanio y Aluminio, obteniéndose resultados similares con la formación de precipitados de carburos, nitruros y carbonitruros.

Los aceros microaleados se generaron en Gran Bretaña, en la década de los 60, donde aparecieron los primeros aceros de bajo contenido en carbono que presentaban unas buenas características de soldabilidad y un elevado límite elástico.

Antes de su aparición en la industria de la construcción se empleaban dos tipos de aceros: los de baja resistencia (límite superior de 250-400 MPa) obtenidos por laminación en caliente o normalizados y los de alta resistencia (límite elástico superior a 560 MPa) templados y revenidos. Estos aceros presentaban una soldabilidad, conformabilidad y resistencia a la fractura frágil limitadas.

Fue a partir de 1962 cuando surgió el término de acero microaleado, para referirse a los aceros en los que los elementos de aleación se añadían en una o dos potencias de diez menor de lo que sería en el caso de un elemento de aleación en el sentido convencional de la palabra.

La evolución de estos aceros en desarrollo se vio favorecida por tres acontecimientos:

- **Desarrollo de métodos modernos de soldadura:** la soldadura era el principal método de fabricación del siglo pasado, y con la aparición de los nuevos métodos de soldadura se hizo necesario un aumento de la resistencia de los aceros. Las formas convencionales (aumento del contenido en Carbono y de elementos de aleación) resultaban costosas y poco prácticas. En cambio el desarrollo de los aceros microaleados, con bajos contenidos en carbono y, elementos de aleación y unas buenas propiedades, suponían una alternativa factible y económica a los aceros convencionales.

- **Crisis del petróleo, 1973:** con la enorme restricción de combustible en el sector industrial, se buscaron vías para reducir el peso de los automóviles y así generar un menor consumo de combustible. Así los aceros microaleados, junto a aleaciones ligeras y materiales poliméricos, fueron empleados en el diseño de vehículos de transporte ligeros.

- **Aplicaciones de regulaciones más estrictas:** al sustituir un acero de baja resistencia por otro de resistencia superior se produce una reducción en la cantidad de material requerida para cumplir la misma función, de manera que también se reduce el costo energético necesario para la extracción y afino de este acero. La disminución en los tonelajes de producción contribuye a la reducción de la contaminación medioambiental y al cumplimiento de la legislación ecológica vigente, cada vez más restrictiva.

Así pues, el desarrollo de los aceros microaleados continuó a lo largo de las décadas viéndose influenciado por los cambios en los factores socio-económicos y tecnológicos producidos, tal y como se muestra en la siguiente figura.

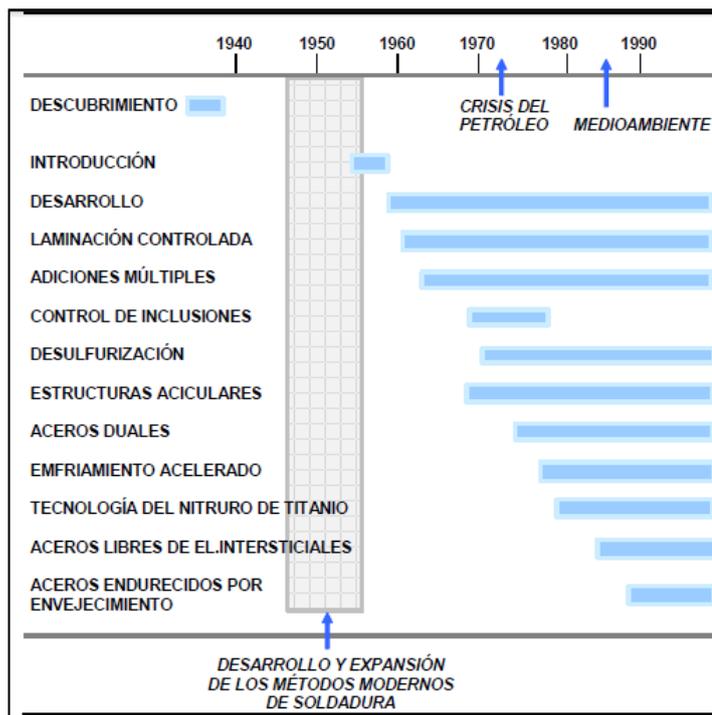


Figura 1.2: Descubrimiento y desarrollo de los aceros microaleados con relación al avance en los procesos modernos de soldadura, la crisis del petróleo y regulaciones más estrictas.

En la actualidad, los aceros de alta resistencia y baja aleación continúan en permanente evolución e investigación. Así por ejemplo, su desarrollo también se ha visto favorecido por las exigentes normativas de seguridad en el sector automovilístico, que requieren unas elevadas resistencias al impacto, que de no haber sido por la ligereza que otorgan los aceros microaleados, hubieran aumentado considerablemente el peso de los vehículos.

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS ACEROS MICROALEADOS

2.1 Definición

La aplicabilidad y utilidad de un acero están determinadas en muchos casos por su resistencia y su tenacidad, ambas características relacionadas entre sí.

Los aceros microaleados, también conocidos como aceros HSLA (High Strength Low Alloy Steels) o de alta resistencia y baja aleación pueden definirse como aquellos que contienen pequeñas cantidades, generalmente menores del 0,15%, de elementos de aleación formadores de carburos, nitruros y carbonitruros los cuáles controlan directa o indirectamente la resistencia y otras propiedades de los aceros estructurales.

Estos elementos de aleación son denominados “microaleantes”, y modifican las propiedades del acero debido a que forman fases precipitadas de carburos y/o nitruros. Inicialmente el término "microaleado" fue acuñado para aceros laminados, pero actualmente se ha extendido su uso a cualquier otro tipo de perfil comercial, ya sea redondo, barras, etc.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación son un grupo de aceros al carbono que llegan a alcanzar límites de elasticidad por encima de los 275 MPa. Estos aceros tienen mejores propiedades mecánicas e incluso mejores resistencias a la corrosión que los aceros al carbono. Aún así, y debido a que la alta resistencia de los aceros HSLA se consigue con bajos contenidos en carbono, tienen características de soldabilidad similares a los aceros dulces.

Los buenos resultados en las propiedades mecánicas de los aceros HSLA son debido a lo que hoy en día es conocido como laminación termomecánica. Mediante la laminación termomecánica se procura obtener una buena combinación de propiedades mecánicas en los productos directamente tras el conformado en caliente, sin necesidad de aplicar tratamientos térmicos posteriores. Su uso está estrechamente ligado a la utilización de elementos microaleantes, como niobio, titanio y vanadio, utilizados para facilitar el proceso de acondicionamiento de la austenita, bajar las temperaturas de transformación y proveer endurecimiento por precipitación de la ferrita.

Los procesos termomecánicos se aplican a los productos planos desde hace varias décadas. En cambio, la aplicación a los productos largos es relativamente reciente. La aplicación de tratamientos termomecánicos tiene como objeto la obtención de estructuras de ferrita uniformes, de tamaño de grano fino, directamente tras el proceso de laminación; esto implica obtener límites elásticos elevados y altas tenacidades. Con la aplicación de los tratamientos termomecánicos se persiguen tres objetivos principales:

- Acondicionar la austenita, evitando el crecimiento de grano durante el precalentamiento y tras la recrystalización entre pasadas, o impidiendo la recrystalización tras la deformación.
- Controlar la transformación austenita/ ferrita, incrementando en la medida de lo posible los lugares de nucleación para la ferrita.
- Endurecer el acero por medio de la precipitación en ferrita de carbonitruros finos.

En la deformación a temperaturas elevadas, en el desbastador, se busca el afino de la austenita por recrystalizaciones sucesivas, evitando el crecimiento de grano durante el precalentamiento y entre pasadas. Se trata de la laminación controlada de recrystalización.

En la deformación en la región de no recrystalización, cuando la temperatura a la que se produce la deformación es inferior a la temperatura de no recrystalización, se

busca la formación de granos alargados, con defectos en su interior (laminación controlada convencional).

La deformación en la región bifásica austenita- ferrita conduce a un aumento de la resistencia de la ferrita.

Finalmente, el enfriamiento acelerado durante la transformación aplicado a los tres casos mencionados, conduce a un mayor afino de la ferrita, y en el caso de deformación en la región bifásica, a la obtención de estructuras duales de ferrita y martensita por temple. En la Figura 2.1 se presenta, en función del tiempo y de la temperatura, un esquema de los diferentes tipos de laminación controlada y las estructuras resultantes.

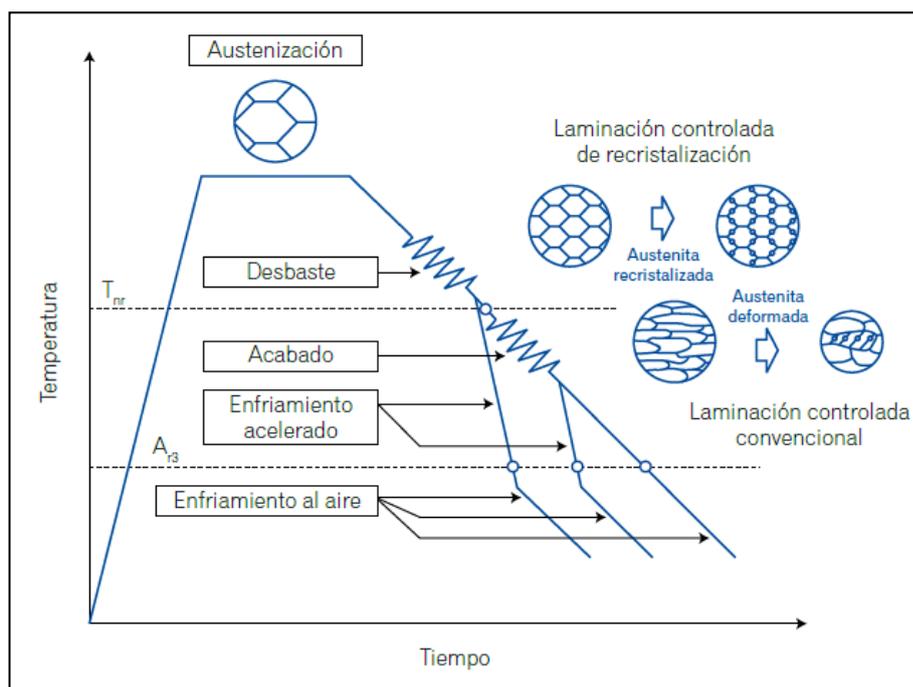


Figura 2.1: Esquema de laminación termomecánica.

Uno de los procesos termomecánicos utilizados hoy en las grandes siderurgias y que no requiere de elementos microaleantes en su composición química para alcanzar óptimas propiedades mecánicas es el proceso Tempcore. Este proceso está basado en dos tratamientos térmicos; el temple y el revenido. El material es laminado en la fase

austenítica y al salir de la última caja de laminación ingresa en los tubos (o elementos) de un sistema de enfriamiento basado en agua a presión. Aquí el material se enfría rápidamente, produciendo un temple en cáscara en las varillas. De esta manera la estructura superficial de las mismas estará constituida por una fase martensítica, mientras que la estructura de la zona interna de los productos está formada por fases ferrítico-perlíticas. Entre ambas zonas existirá un cambio microestructural gradual.

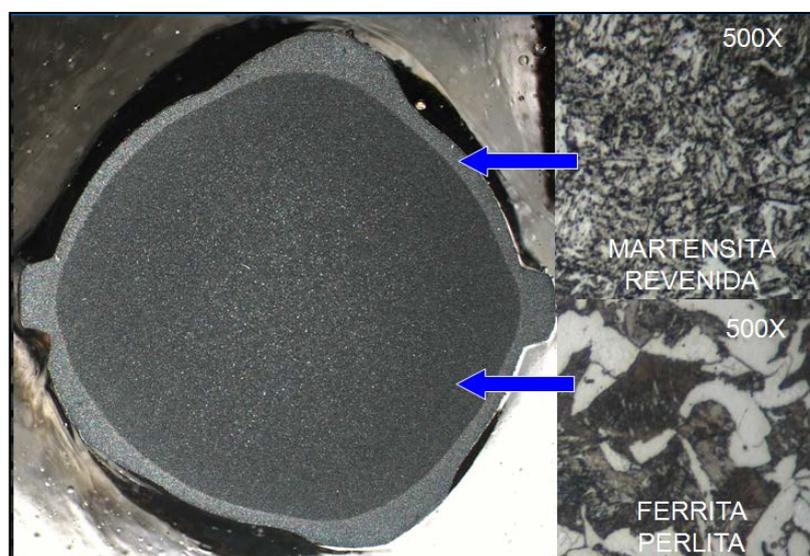


Figura 2.2: Barra corrugada de 3/8" laminada en caliente por el proceso Tempcore.

Es muy importante que el enfriamiento sea altamente eficiente, es decir que la alta circulación de agua remueva inmediatamente la película de vapor que se forma y además que la temperatura del medio de temple permanezca baja (40°C aprox.), ya que el material permanece tiempos muy pequeños en el sistema de enfriamiento (debido a su alta velocidad de laminación), que en algunos casos es del orden de la décima de segundo. El enfriamiento realizado no alcanza para extraer todo el calor del material, de manera que cuando éste salga del sistema de enfriamiento, el calor remanente en el núcleo calentará la periferia, efectuando un revenido sobre la martensita obtenida en el temple. Hacia el final del proceso, el material se enfriará lentamente en el lecho de enfriamiento.

Las propiedades finales del material procesado serán un promedio de las propiedades de las fases presentes (martensita, ferrita y perlita), esto hará que el producto obtenga una excelente combinación de resistencia mecánica (gracias a la fase martensítica) y ductilidad (debida a la presencia de la estructura ferrítico-perlítica en el material).

La utilización, ventajas y costo de estos métodos de procesado dependen fuertemente de la forma del producto y de la composición del material y se estudia con detenimiento a continuación.

2.1.1 Categorías y especificaciones de los aceros HSLA

Dentro de esta categoría de aceros de baja aleación existen muchas especificaciones y grados propios de los fabricantes, y hacen referencia al cumplimiento de unas propiedades deseadas como resistencia, resistencia a la corrosión, etc. Este tipo de aceros no se considera como aceros aleados. Su precio se basa ordinariamente en el precio base de los aceros al carbono, y no por el precio base de los aceros aleados. Los aceros HSLA se venden sobre la base de que cumplan unas propiedades mínimas siendo decisión del productor el contenido de la aleación. Aunque hay numerosas normas y grados comerciales, los aceros HSLA están divididos en siete categorías.

a) Aceros para exposición al ambiente

Se trata de aceros con pequeñas cantidades de elementos aleantes como cobre y fósforo que mejoran el comportamiento frente a la corrosión.

Los aceros de uso estructural están recogidos en la ASTM A 242, mientras que los aceros para aplicaciones estructurales pesadas se recogen en la ASTM A 588. Estos dos aceros reducen la corrosión a partir de formar su propio óxido como película superficial. Aunque inicialmente se corroen a la misma velocidad que los aceros al carbono, pronto esta decrece, y después de varios años prácticamente no existe corrosión. La capa de óxido es continua y adherente, siendo una barrera para la humedad y el oxígeno. Este tipo de aceros sin embargo no son recomendables para exposiciones a condiciones industriales severas o a ambientes marinos, ni tampoco para aquellas donde vaya a ser sumergido.

b) Aceros microaleados ferríticos - perlíticos

Se trata de aceros donde se utilizan elementos de aleación como el niobio y el vanadio para aumentar la resistencia sin aumentar los contenidos en carbono o en manganeso. De esta forma el contenido en carbono se puede disminuir para aumentar la soldabilidad y tenacidad ya que el efecto de endurecimiento dado por el niobio y vanadio compensan la reducción de resistencia debida a la reducción de carbono. Gracias a la presencia de estos aleantes, este tipo de aceros llega a tener contenidos en carbono por debajo de 0,06% o incluso inferiores, desarrollando límites elásticos de 485 MPa. El límite elástico se ve incrementado por la combinación de los efectos: un tamaño de grano pequeño desarrollado por una controlada laminación en caliente y el endurecimiento por precipitación gracias a la presencia de vanadio, niobio y titanio.

También en este caso, en muchas especificaciones no especifican el rango de aleantes a introducir para conseguir un determinado nivel de resistencia. Normalmente estos aceros se especifican en términos de lograr unas propiedades mecánicas y se deja en manos del fabricante la combinación de elementos para conseguirlas. Algunas especificaciones como la J410 establecen los máximos de los aleantes.

c) Aceros perlíticos laminados

Se trata de un grupo específico de aceros donde se aumentan las propiedades mecánicas a partir de la adición moderada de uno o varios elementos además del carbono.

Algunos de estos aceros son los aceros al carbono - manganeso que se diferencian tan solo de los aceros al carbono en la cantidad de manganeso.

Estos aceros una vez laminados tienen límites elásticos de 290 a 345 MPa. No se les suele templear, aunque algunas veces se aplican tratamientos de normalizado, o de relajación de tensiones. Cuando estos aceros se utilizan en estructuras soldadas se debe tener muy en cuenta el procedimiento de soldadura. Los inconvenientes de estos

aceros son sobre todo que la microestructura perlítica tiene una transición dúctil-frágil y que por su alto contenido en carbono no son muy soldables.

d) Aceros de ferrita acicular (Bainita de bajo carbono)

Se trata de aceros HSLA donde se ha conseguido que la microestructura sea muy fina de ferrita acicular y de elevada resistencia.

Se consigue a partir de la transformación por enfriamiento de aceros con muy bajos contenidos en carbono (menos de 0,08%) aunque endurecibles, por la adición de manganeso, molibdeno y/o boro.

Se obtienen por enfriamiento sobre todo por aire de aceros convenientemente aleados. La principal ventaja de este tipo de aceros es la inusual combinación de altos límites elásticos (de 415 a 690 MPa), alta tenacidad, y buena soldabilidad. La principal aplicación de estos aceros es como oleoductos y tuberías en zonas árticas.

Estos materiales que se utilizan para oleoductos y tuberías, tienen contenidos de carbono entre 0,01 y 0,05% de carbono. Por debajo de 0,01% el material afectado térmicamente por la soldadura se fragiliza y tiende a la rotura inducida por hidrógeno y pérdida de ductilidad. La adición de boro o de enfriamientos acelerados en línea, asegura además de una buena soldabilidad, elevada resistencia y tenacidad.

e) Aceros de doble fase

Tienen una microestructura con un 80-90% de ferrita y de un 10 a un 20% de islas de martensita dispersas en la matriz. Aunque estos aceros tienen bajo límite elásticos son susceptibles de endurecer a partir de ser trabajados. El límite elástico de estos materiales va de los 310 a los 345 MPa. Este tipo de acero puede producirse a partir de aceros de bajo carbono por tres procesos:

- Austenitización de aceros carbono manganeso seguidos de un rápido enfriamiento.
- Adición de formadores de ferrita como el silicio y de cromo, manganeso y/o molibdeno.
- Aceros al carbono-manganeso seguido de recocido y templado.

f) Aceros libres intersticiales (IF)

El acero libre de intersticiales (Interstitial Free: IF) es una aleación de elevada pureza que tiene un contenido mínimo de C y N; en el caso de los aceros con ultra bajo carbono los elementos intersticiales se remueven de la matriz añadiendo Ti y Nb en cantidades mayores que sus equivalentes. Este tipo de acero exhibe propiedades únicas, como un bajo punto de cedencia, no se envejece, tiene una gran ductilidad y una alta relación de deformación plástica y es adecuado para producción en las líneas de recocido continuo y galvanización.

g) Aceros con inclusiones de forma controlada

Se trata de una mejora muy sustancial de este tipo de aceros. Las inclusiones de sulfuros, son plásticas a la temperatura de laminación, y se transforman a estas temperaturas en inclusiones deformadas y elongadas que afectan negativamente a la ductilidad en la dirección perpendicular al espesor. El objetivo de controlar la forma de las inclusiones es conseguir inclusiones que no sean plásticas cualquiera que sea la temperatura de laminación.

El método preferido para el control de la forma es la adición de calcio - silicio. También se consigue con la adición de tierras raras como circonio y titanio, modificando la forma de las inclusiones, desde las formas elongadas a los pequeños, dispersos y casi esféricos glóbulos.

Este cambio en la forma de las inclusiones de sulfuros aumenta la resistencia al impacto lateral y mejora la maquinabilidad.

2.2 Aplicaciones y selección de los aceros HSLA

Las aplicaciones de estos aceros están directamente relacionadas por su mayor relación Resistencia/Peso respecto a los aceros C-Mn.

Así suponen un buen sustituto para aceros estructurales empleados en la construcción de puentes y edificios (dan ligereza a las estructuras aportando una muy buena resistencia), y también juegan un papel importante en la industria del automóvil.

Cabe citar el ahorro que supone su conformado por laminación en caliente respecto a otros aceros, puesto que debido a su afino de grano, no necesitan un revenido posterior que en otros aceros tendría como objetivo la mejora de propiedades mecánicas. El hecho de que ya de por sí presenten buenas propiedades y no requieran de tratamientos térmicos adicionales supone un ahorro respecto a los aceros tradicionales.

Las ventajas técnicas y económicas de la sustitución de aceros al Manganeso por aceros de alta resistencia, se demostró en el proyecto “Ultra Light Steel Auto Body” ([5]), cuyos objetivos eran el diseño de una carrocería para el automóvil resistente y segura, con una reducción de peso y a menor costo posible. En dicho proyecto se optó por la elección de los aceros HSLA como claros candidatos a su uso en la industria del automóvil, puesto que cumplen todos los requisitos: elevadas propiedades mecánicas, baja densidad y bajo costo (presentan poca cantidad de elementos de aleación que son los que encarecen, y además, comparados con el resto de aceros, para una misma estructura se requiere menos material debido a su alta resistencia con baja densidad).

2.2.1 Aplicaciones de los Aceros HSLA

Los aceros de baja aleación y alta resistencia empezaron a ser utilizados al principio de los años 60 con usos estructurales, debido a su fácil soldabilidad.

En los años 70 empezaron a ser utilizados como materiales para oleoductos tanto para servicios a altas como bajas temperaturas. Más tarde con la crisis energética de los años 70, se pensó en el uso también de los aceros HSLA en el campo de los automóviles y camiones en un intento de reducción del peso total. A partir de los años 80 se empezaron a utilizar como materiales estructurales y de refuerzo con formas muy variadas.

Los aceros de baja aleación y alta resistencia se utilizaron para una gran variedad de usos, ya que sus propiedades pueden ser encaminadas al cumplimiento de unos requerimientos específicos por la combinación de la composición y microestructura

obtenida por tratamientos térmicos. La siguiente Tabla.1 muestra el uso de estos materiales en diversos productos en función de las potencias mundiales indicadas:

Tabla 2.1: Proporción de los productos hechos con aceros HSLA en las diferentes potencias mundiales (1986).

Product form	Proportion made with HSLA steel, %		
	Europe	North	Japan
Linepipe	95	95	95
Shipbuilding	40	20	75
Offshore steels			
Plate	90	30	70
Sections	70	20	10
Pressure vessels	30	25	85
Structural			
Sections	30	20	10
Sections, automotive	70	70	30
Sections, ships	15-30	20	10
Sheet piling	25	15	100
Rebar	100	>50	100
Plate	25	20	10-30
Sheet and coil (including galvanized)			
Automotive	20	10	20
Building (not rebar)	95	80	70

2.2.2 Guías para la selección

Como regla se hace necesario justificar el uso de aceros HSLA mediante comparación en costo con otros materiales. Estos aceros casi siempre cuestan más que los aceros al carbono y algunas veces incluso que los aceros aleados con los que compiten para una determinada aplicación.

Los aceros HSLA tienen ventajas sobre otros materiales tales como:

1. Reducciones de peso.
2. Nuevos o más eficientes diseños con mejoras en sus propiedades.
3. Una reducción atractiva en cuanto a costos por fabricación o manufactura.
4. Reducción de costos de transporte debido a su reducción de peso.

Por ejemplo en la industria del automóvil, la principal ventaja de sustituir el acero dulce por HSLA es la reducción de peso. Esta reducción de peso se debe a que la sección de las piezas se reduce al ser más fuerte el acero HSLA. Esta reducción de peso no solo consigue el ahorro de combustible, sino que también el aligeramiento de un componente lleva aparejado el aligeramiento de un buen número de piezas en su entorno. En algunos casos la sustitución del material a HSLA puede ser considerado únicamente sobre la base de un ahorro de material. Incluso en alguna ocasión el ahorro que representa la reducción de peso puede ser suficiente para considerar el cambio a HSLA.

Otro tipo de beneficio que representa el utilizar este tipo de materiales es la simplificación de operaciones de fabricación / manufactura asociadas al tratamiento térmico de los aceros al carbono. Así por ejemplo el uso de un acero HSLA representa la eliminación de los procesos recocido, templado, endurecimiento y eliminación de tensiones. Así en el uso de este acero para la empresa aeronáutica o para varillas de unión puede llegar a representar ahorros de hasta un 10%.

2.2.3 Oleoductos y conducciones de gas

Fue una de las primeras aplicaciones para los aceros HSLA, y en particular en regiones árticas. Se han desarrollado gracias a estos aceros tuberías de grandes diámetros capaces de soportar en su interior elevadas presiones (11 MPa). Se pueden utilizar tipos HSLA de límites elásticos hasta de 483MPa y de espesores de 25 mm.

Una de las propiedades críticas es la resistencia a tracción, aunque existen otras no menos importantes como la soldabilidad, tenacidad, resistencia a fractura y resistencia por ataques ácidos. Todos estos aspectos son cubiertos perfectamente por los aceros HSLA.

Uno de los mayores problemas es la soldadura circunferencial que se utiliza en las líneas, y que se desarrolla a alta velocidad. Este problema se resuelve utilizando aceros de bajo contenido en carbono equivalente posible.

La tenacidad a fractura también es otro requerimiento importante. Se intenta evitar la rotura frágil a partir de utilizar bajos contenidos en carbono, microalea y laminaciones termomecánicas.

Por otro lado la forma de evitar la propagación de grietas dúctiles es un oleoducto es asegurar bajos contenidos en azufre (por debajo de 0,005%). Además el utilizar bajos contenidos en azufre también asegura la no reacción con gas ácido o con el aceite que se transporta.

2.2.4 Aplicaciones en el sector del automóvil

Los aceros HSLA se utilizan ampliamente en la fabricación de automóviles. En este campo son importantes los aspectos: tenacidad, comportamiento anti choques, vida a fatiga, resistencia a corrosión, propiedades acústicas, formabilidad y soldadura.

La casa Opel (Empresa de automóviles alemana) encontró las siguientes desventajas en el uso de los aceros HSLA:

1. Posibilidad de ser mecanizados más limitada.
2. La resistencia a fatiga de las zonas soldadas es no muy superior a la de los aceros dulces.
3. En el uso de perfiles delgados, hay una reducción en rigidez, susceptibilidad a la corrosión y comportamiento ruidoso.

La función que deba desarrollar la pieza en el automóvil es también importante para decidir si utilizar aceros HSLA o no. En aplicaciones donde lo más importante sea el límite elástico, como puertas y zonas estructurales, los aceros HSLA pueden ser muy eficientes al ahorrar entre un 40 y un 60% de peso respecto a aceros dulces. Sin embargo en otras piezas donde lo realmente importante sea la tenacidad y que estén sujetas a flexión como los paneles exteriores, no hay justificación económica para cambiar los aceros dulces por los HSLA.

Existen otros muchos campos como los camiones, locomotoras, vagones de tren, etc. donde el uso de aceros HSLA puede repercutir en un importante ahorro de peso.

2.2.5 Aplicaciones estructurales exteriores

Las características esenciales para este tipo de aplicación serían:

- a. Límite elástico entre 350 y 450 MPa.
- b. Buena soldabilidad.
- c. Minimizar la necesidad de precalentamiento en soldadura.
- d. Alta tenacidad en la zona afectada térmicamente en la soldadura.
- e. Buena tenacidad a la fractura en las temperaturas de operación.

Muchas de estas características se han conseguido a partir de una reducción del contenido en impurezas como azufre, nitrógeno y fósforo. Por otro lado, se debe de tener en cuenta la reducción del contenido de carbono equivalente para favorecer la soldabilidad manteniendo la resistencia. Esto se ha conseguido mediante la adición de niobio y tratamientos de enfriamiento acelerado.

2.2.6 Láminas formadas en frío

La atracción fundamental del empleo de aceros HSLA en este caso vuelve a ser la reducción de peso de los componentes, sobre todo en las láminas que se utilizan en el sector del automóvil. La posibilidad de mecanización es el mayor problema que se presenta en estos aceros.

2.2.7 Aceros estructurales

Se suelen utilizar adiciones de niobio, vanadio y titanio como microaleantes, mientras que componentes como el cromo y el molibdeno son utilizados en servicios a alta temperatura. El proceso utilizado en este tipo de aplicaciones es el de laminar el material, normalizado, recocido y templado.

Vigas y columnas de acero HSLA para edificios se espera que sean competitivas incluso con el hormigón armado y pretensado. Los beneficios van desde un aumento de la capacidad de carga de las columnas, hasta una ganancia de espacio y reducción

de peso. Actualmente se está desarrollando un material compuesto donde se combina el uso de hormigón con barras de acero HSLA de refuerzo. Este tipo de material tiene gran resistencia a compresión en edificios altos, y una buena resistencia al fuego.

2.2.8 Construcción de barcos

Esta aplicación está limitada por consideraciones de rigidez. Dado que los aceros HSLA y los aceros dulces tienen el mismo módulo elástico, la reducción de espesor puede traer consigo la reducción de la rigidez elástica.

Uno de los principales avances sin embargo de los aceros HSLA en este tipo de aplicación fue la no necesidad de aplicar precalentamientos en el proceso de soldadura. En Japón, se están utilizando aceros HSLA con bastante éxito.

2.2.9 Aplicaciones para vehículos y grúas

Se incluye en esta aplicación, camiones, cisternas, grúas móviles y maquinaria pesada. Las propiedades más importantes incluyen la resistencia y tenacidad, resistencia a rotura frágil, soldabilidad y posible mecanización.

En grúas de construcción se necesitan mínimos de límite elástico muy altos para asegurar una gran capacidad para el levantamiento de pesos muertos. Así en grúas, los materiales con mínimos de límite elástico de 960 MPa, ofrecen grandes ventajas económicas y técnicas. Buenas propiedades de resistencia a la rotura frágil se consiguen con aceros de ferrita acicular. La resistencia a ciclos de carga es extremadamente importante, y en especial la resistencia a fatiga de las uniones soldadas que siempre tienen comportamiento inferior al del resto del material al ser afectadas térmicamente.

2.2.10 Aplicaciones en el transporte ferroviario

Existen tres tipos de aceros ampliamente utilizados que son:

- a. ASTM A 633 D: Acero de bajo contenido en carbono, con contenidos de níquel, manganeso, molibdeno y vanadio.
- b. ASTM A 737 B: Acero microaleado con niobio.
- c. ASTM A 808: Acero microaleado con niobio y vanadio.

2.2.11. Aplicaciones para vigas, refuerzos

Se trata de la última área donde se están introduciendo los aceros HSLA. Se busca el aumento de resistencia, la eliminación del tratamiento térmico, tenacidad, soldabilidad, facilidad de mecanizado, etc. En la Tabla 2.2 siguiente se exponen los principales materiales utilizados con sus composiciones y principales aplicaciones.

Tabla 2.2: Productos fabricados con acero HSLA y sus aplicaciones.

Summary of microalloyed bar products, castings and forgings						
Typical composition %						
Steel product	C	Mn	Si	Nb	V	Applications
Hot-rolled bar						
High carbon	0.58	0.8	0.3	0.04	-	Drawn wire having residual-deformation capability
Medium carbon						
Rebar	0.38	1.2	0.2	0.03 (or V)	-	Standard reinforcing bar
Structural	0.35	1	0.25	0.02-0.10	-	Machined automotive parts, or forged vanadium steel
Engineering	0.4	0.8	0.2	-	0.09 (or Nb)	Replaces quenched and tempered steel
Machined bar	0.3	1.2	0.3	0.03	-	Machined bar in automotive and engineering equipment
Low carbon	0.10-0.20	1.65	0.15	0.04	-	Weldable reinforcing bar, Artic concrete structures
Very low carbon	0.1	1.7	0	0.08	-	Cold-headed parts
Heat - treated bar						
Concast billets	0.25	1.3	0.2	0.03	-	Heat-treated parts for tractors and so forth
Engineering	0.6	0.85	0.8	-	0.11	High-strength drawn wire
Rebar	0.18	0.6	0.05	-	0.05	Concrete structures
High carbon	0.58	0.85	2.1	0.15	0.12	
Forgings						
As-forged bar	0.30-0.40	0.8	0.2	-	0.09 (or Nb and 0.50 Cr)	Automotive componets, universal couplings
Crank shafts	0.53	0.8	0.4	0.06 (or 0.10V)	-	Lightweight German automobiles
Small forgings	0.12	1.45	0.35	0.07	0.07 (or 0.015)	Automobile and off-highway equipment

2.3. Microaleantes más comunes

Los elementos de aleación considerados tradicionalmente como microaleantes son el Niobio, Vanadio y Titanio. Dentro de los elementos microaleantes también se incluye el Aluminio puesto que el Nitruro de Aluminio fue el primero empleado en el control del tamaño de grano. La Tabla 2.3 muestra las características de cada uno de estos elementos.

Tabla 2.3: Propiedades de los elementos microaleantes.

	ELEMENTO MICROALEANTE			
	Vanadio	Niobio	Titanio	Aluminio
Precipitados	VC, VN, VCN	NbC, NbN, NbCN	TiO ₂ , TiS, TiC, TiN	AlN
Coefficiente Difusión en Austenita	$2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$5.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$18.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Energía Activación para la migración en Austenita	264 KJ/mol	345 KJ/mol	250 KJ/mol	228 KJ/mol
Densidad a 20°C	6.16 g/cm ³	8.57 g/cm ³	4.507 g/cm ³	2.7 g/cm ³

2.3.1 Vanadio

El Vanadio es el elemento de micro aleación que presenta mayor solubilidad a las temperaturas de tratamiento termo mecánico. Precipita en forma de carburos, nitruros o carbonitruros. Estos carbonitruros son de tamaños relativamente pequeños y coherentes con la matriz, y además juegan un papel endurecedor de la matriz por precipitación a temperaturas más bajas de lo que lo hacen el resto de microaleantes.

Los nitruros de Vanadio (VN) y los carburos de Vanadio (VC) tienen estructuras cúbicas con parámetros de red 4.12 y 4.36 Å respectivamente. El Vanadio posee un coeficiente de difusión en austenita de $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. La energía de activación para la migración de átomos de Vanadio en la austenita es de 264 KJ/mol. La densidad del Vanadio a 20°C es de 6.16 g/cm³. El efecto del Vanadio sobre la estructura de los aceros HSLA se muestra en la Figura 2.3.

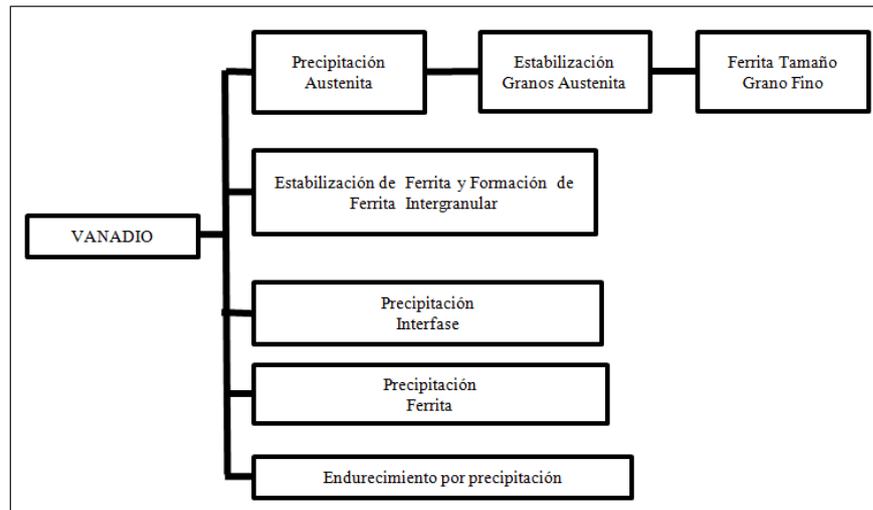


Figura 2.3: Efecto del Vanadio en la transformación y Estructura de los Aceros HSLA

2.3.2 Niobio

Es capaz de formar carbonitruros que endurecen por precipitación en el acero.

A temperaturas de laminación, el Niobio en solución sólida precipita parcialmente en la austenita en forma de carburos, nitruros o carbonitruros. El carburo de Niobio tiene una estructura cúbica con parámetro de red 4.47 \AA , mientras que el nitruro es hexagonal con parámetros de red $a: 2.968 \text{ \AA}$ y $c: 5.535 \text{ \AA}$. El coeficiente de difusión del Niobio en austenita es de $5.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. La energía de activación para la migración de átomos de Niobio en la austenita es de 345 KJ/mol , siendo este elemento junto con el Vanadio los que presentan la mayor energía de activación. Es el microaleante más denso, con una densidad a 20°C de 8.57 g/cm^3 . El efecto del Niobio sobre la estructura de los aceros HSLA viene resumido en la Figura 2.4.

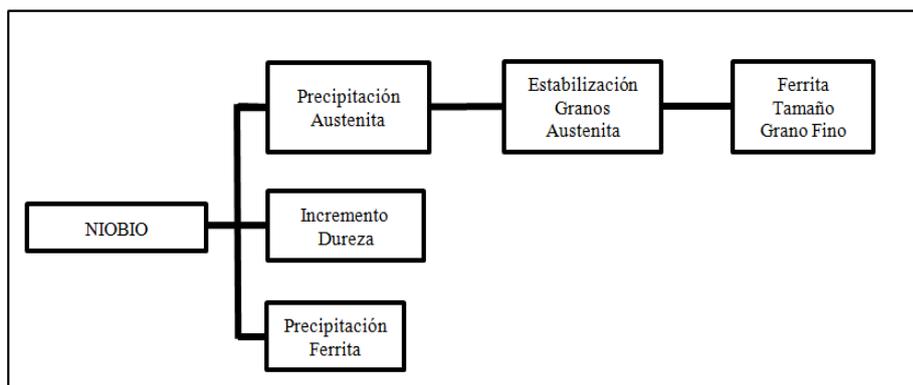


Figura 2.4: Efecto del Niobio en la transformación y Estructura de los Aceros HSLA

2.3.3 Titanio

Este elemento puede formar óxidos, sulfuros, carburos y nitruros. La estructura cristalina de sus carburos y nitruros es cúbica centrada en las caras y los parámetros de red típicos son 4.246 Å para el TiN y 4.313Å para el TiC.

Durante el enfriamiento, los precipitados de nitruro de Titanio son los primeros que se forman, sirviendo como centro de nucleación para el carburo de Titanio. En estas condiciones, la difusión entre ambos precipitados da lugar a la aparición de carbonitruros de composición química variada. Los nitruros de Titanio son buenos afinadores de grano austenítico. El Titanio tiene el menor coeficiente de difusión en austenita con un valor es 1.5×10^{-5} m²/s. La energía de activación para la migración de átomos de Titanio en la austenita es de 250 KJ/mol. La densidad del Titanio a 20°C es de 4.507 g/cm³. El efecto del Titanio sobre la estructura de los aceros HSLA se resume en la Figura 2.5.

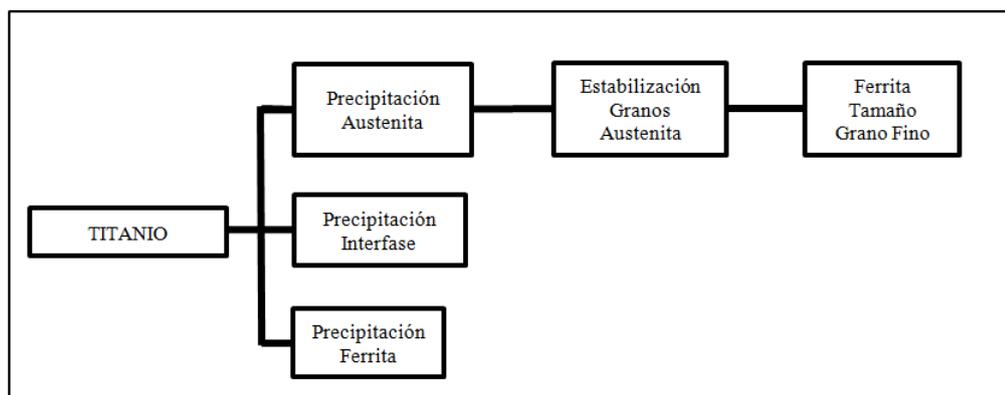


Figura 2.5: Efecto del Titanio en la transformación y Estructura de los Aceros HSLA

2.3.4 Aluminio

Precipita en forma de nitruros. Su disolución se inicia a alta temperatura. Por razones de costos y por su buena propiedad de controlador de grano austenítico es ampliamente utilizado. Los nitruros de Aluminio son hexagonales con parámetros de red a : 3.11\AA y c : 4.975\AA . Es el elemento microaleante que presenta un mayor coeficiente de difusión en la austenita ($18.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). Su energía de activación para la migración de átomos de Aluminio en la austenita es la menor (228KJ/mol). Es el elemento microaleante menos denso con una densidad de 2.7 g/cm^3 .

2.3.5. Otros elementos Microaleantes

El Cerio y las tierras raras añadidos en cantidades muy pequeñas tienen un gran efecto en el control de las inclusiones de sulfuro y en la ductilidad, pero su influencia en la microestructura final no resulta fundamental, razón por la que no se considerarán en el presente trabajo experimental.

2.3.6. Efecto de los diferentes Elementos de Microaleación

En la Tabla 2.4 se resumen los efectos de estos elementos (endurecimiento por precipitación, afino de grano, fijación de Nitrógeno y modificación estructural).

Tabla 2.4: Efectos de los elementos de aleación en las propiedades de los aceros microaleados

Elemento	Endurecimiento por precipitación	Afino de grano	Fijación de Nitrógeno	Modificación estructural.
Vanadio	Elevado	Bajo	Elevado	Moderado
Niobio	Moderado	Elevado	Bajo	Nulo
Titanio	Nulo (<0.02%) Elevado (>0.05%)	Elevado	Elevado	Nulo
Aluminio	Nulo	Elevado	Elevado	Nulo

2.3.7. Efecto combinado

Actualmente la mayor parte de los aceros presentan más de un elemento de microaleación. Estos elementos interactúan unos con otros por lo que su efecto, (mayoritariamente aditivos) debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar un determinado tipo de acero.

Así en el caso de la existencia de más de un elemento de microaleación, aquel que tendrá la mayor influencia será el que genere un carburo o nitruro que precipite a una temperatura mayor. Este hecho viene justificado por las siguientes razones:

- El compuesto que se forma primero es el que antes influye en la modificación microestructural cuando el acero se enfría.
- La formación de carburos y nitruros de un determinado elemento modifica la influencia de los demás elementos microaleantes puesto que disminuye la oportunidad o rebaja la temperatura a la que los carburos y nitruros de estos otros microaleantes se forman.
- Los microaleantes que pueden formar carburos o nitruros a temperatura baja pueden formar carburos o nitruros complejos con un aleante que forme carbonitruros a temperatura elevada. De esta manera se disminuye la cantidad de elementos formadores de compuestos a baja temperatura y, por lo tanto, su efecto se ve disminuido.

- La formación de nitruros reducirá el Nitrógeno en solución y con ello también se verá disminuido el efecto del Nitrógeno en la templabilidad o en la fragilización.

2.4. Mecanismos de endurecimiento

Es importante conocer los distintos mecanismos de endurecimiento que tiene lugar en los aceros, ya que si se hace un uso conveniente de ellos, se puede llegar a lograr una relación entre las diversas propiedades mecánicas convenientes para la aplicación en la que se vaya a emplear.

La resistencia de un acero puede considerarse como la suma de las distintas aportaciones realizadas por distintos mecanismos de endurecimiento:

$$\sigma_y = \sigma_I + \sigma_s + \sigma_p + \sigma_d + \sigma_{ss} + K_y d^{-1/2} \dots\dots\dots(2.1)$$

siendo : σ_I : la tensión de fricción que se opone al movimiento de las dislocaciones

σ_s : es el endurecimiento por solución sólida

σ_p : es el endurecimiento por precipitación

σ_d : es el endurecimiento por densidad de dislocaciones

σ_{ss} : es el endurecimiento debido a la presencia de una subestructura

K_y : Coeficiente de endurecimiento para cada material

d : el tamaño de grano de la matriz

Los mecanismos de incremento del límite elástico son básicamente: endurecimiento por solución sólida, afino de grano, fases precipitadas, por transformación, y endurecimiento por deformación.

2.4.1 Endurecimiento por solución sólida

Los elementos en solución sólida pueden estar en forma sustitucional (ocupando lugares de átomos de hierro en la red) o intersticial (en posiciones intersticiales de la red). En la Figura 2.6 se puede ver un esquema de estos lugares. La presencia de

átomos intersticiales en la red crea una distorsión que actúa sobre las dislocaciones. Es precisamente este hecho el que crea aumento del límite elástico. Los dos elementos intersticiales por excelencia en los aceros son el carbono y el nitrógeno que pueden ocupar estos lugares debido al pequeño tamaño de sus átomos (con radios atómicos de 0.914 y 0.92 Å, para el Carbono y el Nitrógeno respectivamente).

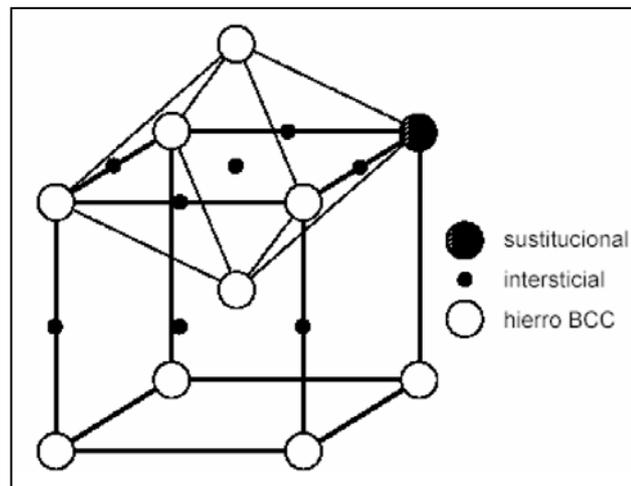


Figura 2.6: Esquema de una celda de hierro BCC con los posibles lugares que ocuparán los elementos en solución sólida.

Los elementos presentes por sustitución producen una distorsión simétrica de la red que tiene un cierto efecto endurecedor moderado. En la Figura 2.7 se aprecia cómo se requieren de importantes cantidades de estos elementos para producir un incremento en el Límite Elástico. Por otro lado, la ferrita admite cantidades muy pequeñas en solución de este tipo de elementos.

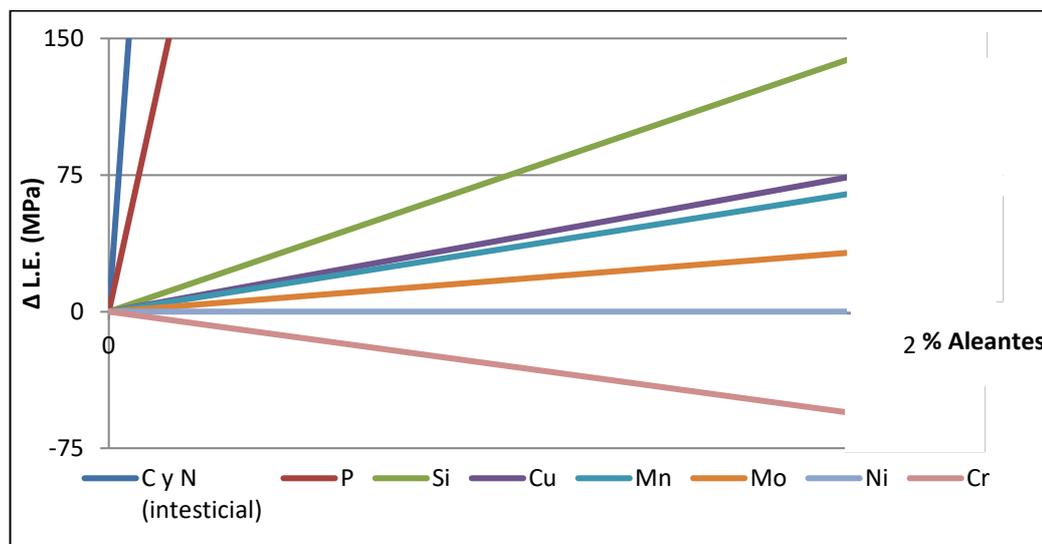


Figura 2.7: Endurecimiento por solución sólida en la ferrita de algunos elementos.

Sin embargo los elementos presentes en forma intersticial generan una distorsión asimétrica que es mucho más efectiva en su acción sobre las dislocaciones, del orden de 10 a 100 veces mayor que los sustitucionales. Igualmente en la Figura 2.7 se aprecia que elementos como el carbono y el nitrógeno tienen una mayor influencia en el Límite Elástico para menores cantidades de los mismos. En general, la presencia de elementos en solución sólida intersticial produce una merma en la ductilidad del acero.

2.4.2. Afino de grano

El afino del tamaño de grano es el único mecanismo que permite mejorar al mismo tiempo las propiedades de tenacidad y resistencia, y es por tanto un factor de vital importancia en la consecución de elevados grados de endurecimiento.

En la Figura 2.8 se puede ver cómo afecta el tamaño de grano de la matriz tanto a la Temperatura de Transición dúctil-frágil como al Límite Elástico de un acero, disminuyendo la primera y aumentando el segundo al disminuir el tamaño de grano.

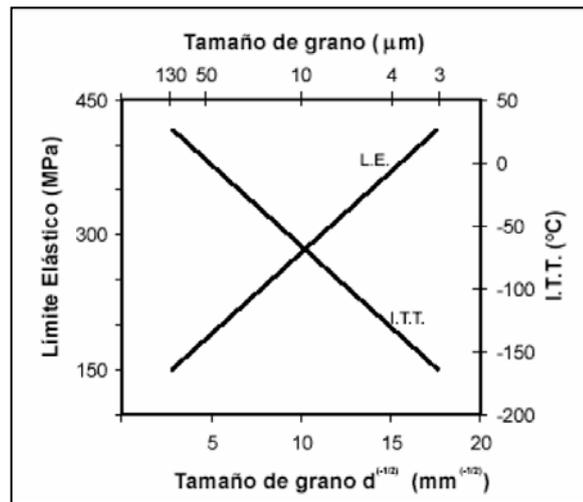


Figura 2.8: Influencia del tamaño de grano de ferrita en el Límite Elástico y en la Temperatura de transición de un acero al carbono.

Este mecanismo de endurecimiento mediante afinado de grano es el fundamental y más ampliamente utilizado en aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA).

2.4.3 Fases Precipitadas

Las fases precipitadas se encuentran dispersas en la ferrita y su efecto endurecedor depende de que se trate de agregados masivos o partículas dispersas y, en este último caso, de su deformabilidad.

El endurecimiento por partículas de segunda fase (precipitados de Nb, Ti y V) es otro de los mecanismos ampliamente utilizados para aceros microaleados. El empleo de la microaleación para mejorar la resistencia puede tener otros efectos, como producir un importante afinado del tamaño de grano y disminuir la tenacidad del acero.

La precipitación es uno de los mecanismos más efectivos en el endurecimiento del acero. La presencia de partículas finas y dispersas por precipitación puede actuar de distinta forma, mejorando sustancialmente la resistencia del acero en función del tamaño de los precipitados. Las más pequeñas actúan como freno para el movimiento de las dislocaciones mientras que las de mayor tamaño anclarán las juntas de grano impidiendo el crecimiento de grano. Con el fin de entender estos efectos, es

necesario comprender los factores que controlan la disolución de los carburos y nitruros que pueden formar los distintos elementos de aleación presentes en el material, así como su cinética de precipitación.

Mecanismos de Precipitación

La disolución de carburos/nitruros a temperaturas elevadas, en el rango austenítico, ofrece una serie de opciones para la consiguiente precipitación a temperaturas más bajas. Estas son:

- a) Precipitación en austenita seguida de una reducción en temperatura, ya sea durante un enfriamiento lento, o durante un mantenimiento isoterma en el rango austenítico.
- b) Precipitación durante la transformación austenita-ferrita, donde la solubilidad disminuye de forma discontinua en la frontera entre ambas fases.
- c) Precipitación en ferrita como consecuencia de un enfriamiento acelerado

a) Precipitación en Austenita

La precipitación de carburos/nitruros de los distintos elementos microaleantes es lenta en la austenita recristalizada o no-deformada, aunque se puede ver incrementada por efecto de la deformación. La intensidad de los precipitados está controlada por la cantidad de deformación acumulada, que determina la densidad de dislocaciones y su distribución, y por el grado de sobresaturación determinada por las relaciones de solubilidad-temperatura. Las dislocaciones, celdas de dislocaciones y fronteras de subgrano de gran ángulo generan gran cantidad de sitios para la precipitación, tanto más rápida será cuanto mayor sea la deformación. La presencia de precipitados no disueltos consecuencia de una disolución parcial, acelerará la precipitación ya que estas partículas actúan como núcleos para la reprecipitación posterior.

Los efectos más importantes de la precipitación en austenita son:

- Retrasar la recristalización por la interacción con las dislocaciones y con los bordes de grano.
- Inhibir el crecimiento de grano por anclaje de los bordes.

b) Precipitación durante la Descomposición de la Austenita

Se ha comprobado que esta precipitación tiene lugar de forma periódica en la intercara /o durante la transformación. Las partículas se forman en bandas paralelas a la intercara, siguiendo la dirección de la intercara incluso cuando esta cambia abruptamente de dirección.

Las distintas morfologías de carbonitruros que pueden tener lugar dependerán esencialmente de la temperatura de transformación. En general los enfriamientos acelerados y la presencia de microaleantes bajan la temperatura de transformación, lo que lleva a una distribución fina de precipitados con un espaciado pequeño entre las líneas.

c) Precipitación en Ferrita

Si se baja progresivamente la temperatura de transformación, ya sea por aumento del contenido de aleantes presentes en el acero o por enfriamientos acelerados, se llegará a una temperatura límite en la que la difusividad de los microaleantes es insuficiente para que la precipitación tenga lugar. Bajo estas circunstancias el microaleante permanece en solución sólida. Manteniendo la temperatura en el rango ferrítico, se observa una reacción de endurecimiento por precipitación, con los carburos y nitruros precipitando tanto en la matriz como en las dislocaciones.

2.4.4. Transformaciones de fase

En los aceros, la influencia de la transformación de fase de la austenita durante el enfriamiento, depende de la temperatura a la cual se produzca y en general cuanto más baja sea la temperatura de transformación mayor será el endurecimiento del acero. Esto se debe a que esta temperatura afecta a todos los mecanismos de endurecimiento de la siguiente manera:

a) Cuanto menor es la temperatura de transformación, más fino es el tamaño de grano, lo cual afecta a aceros ferrítico-perlíticos, bainíticos y HSLA.

b) Cuanto menor es la temperatura de transformación, mayor es la densidad de dislocaciones, además de aumentar la cantidad de soluto retenido en solución sobresaturada.

c) Cuanto menor es la temperatura de transformación, más fina es la dispersión de carburos precipitados, lo que aumenta la resistencia del material.

La introducción de los distintos efectos provocados por estos mecanismos en la tenacidad, obliga a que la evolución de ésta con la temperatura de transformación no muestre una ley progresiva, observándose en algunas transformaciones máximos y mínimos de tenacidad para determinadas temperaturas de transformación.

Tanto la temperatura de transformación (para una determinada condición de enfriamiento) como incluso los productos de transformación son críticamente dependientes del estado previo a la transformación de fase. Así, una austenita recristalizada y una austenita deformada no transformarán a la misma temperatura y no darán iguales tamaños de grano de ferrita. La precipitación en la austenita de carbonitruros de V, Nb o Ti en forma demasiado grosera (aunque puede influir en la recristalización de la austenita) lleva a la eliminación de la potencialidad de estos elementos para producir durante o después de la transformación un endurecimiento importante por precipitación de finas partículas. El punto de partida debe ser por tanto el estudio de la austenita previa a la transformación y de la influencia de los diversos parámetros de composición y deformación en la estructura de la misma.

2.4.5 Endurecimiento por deformación

La introducción en el acero, mediante deformación, de una alta densidad de dislocaciones favorece el aumento del límite elástico. La influencia de las dislocaciones obedece a una expresión del tipo:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k\sqrt{\rho} \dots\dots\dots(2.2)$$

Siendo: σ_0 la tensión de fricción, k coeficiente del material relacionado con el módulo de corte de las dislocaciones y el vector de Burgers, ρ la densidad de dislocaciones.

La tensión de fluencia aumenta conforme la densidad de dislocaciones lo hace, y la velocidad a la que tiene lugar el endurecimiento por deformación depende de la velocidad a la que la densidad de dislocaciones, aumenta con la deformación. Esto significa que la velocidad de endurecimiento por deformación es dependiente de la forma en la que las dislocaciones se distribuyen e interactúan entre sí. Tamaño de granos pequeños dan lugar a velocidades de endurecimiento mayores. La interacción de las dislocaciones con otros factores microestructurales como solutos o precipitados que pueden anclar las dislocaciones impidiendo su movimiento.

Las formas más habituales de introducir dislocaciones son la deformación en frío y los enfriamientos acelerados que además producen un descenso en la temperatura de transformación de la austenita a ferrita con el consiguiente afino microestructural.

2.5. Mejora de las propiedades mecánicas

Resumiendo, se puede mejorar las propiedades de los aceros aumentando su resistencia mecánica conjuntamente con su tenacidad.

Para aumentar la resistencia mecánica se debe tener en cuenta:

1. Aumentar la proporción de perlita mediante mayores contenidos en carbono.
2. Refinar el espaciado interlamelar, por ejemplo mediante enfriamientos acelerados que disminuyen la temperatura de transformación.
3. Reducir el tamaño de grano y el tamaño de las colonias perlíticas.
4. Fomentar la precipitación de carburos y/o nitruros en la ferrita.

Para mejorar la tenacidad se debe tener en cuenta:

1. Disminuir la proporción de perlita en favor de la ferrita, mediante la disminución del el contenido de carbono.
2. Conseguir estructuras lo más finas posibles.

3. Buscar el óptimo entre el espaciado laminar de la perlita y el espesor de la cementita.
4. Eliminar del acero, el Nitrógeno en solución sólida mediante su aleación con elementos que lo precipiten en forma de nitruro.

De lo señalado anteriormente, el factor que mejora tanto la tenacidad como la resistencia del acero es el afino del grano de ferrita o de bainita. Este se consigue a través de del afino del grano de austenita.

Existen tres caminos habituales para conseguir el afino: El primero consiste en optimizar la temperatura a la que se produce la deformación en caliente y las últimas deformaciones aplicadas, de modo que haya el mayor número posible de puntos de nucleación de ferrita. Un segundo camino es la adición de elementos microaleantes, Nb, Ti, V que anclen los bordes de grano y actúen como barreras para las dislocaciones mediante una precipitación fina y dispersa. Por último, el empleo de enfriamientos acelerados que al disminuir la temperatura de transformación afinen el grano ferrítico. El segundo camino descrito supone la base de los aceros microaleados en los que se produce una mejora de las propiedades mecánicas a través de un afino de grano.

2.6. Control del tamaño de grano

Una de las formas más importantes de controlar el tamaño de grano en una aleación es por medio de la adición de una dispersión de partículas de segunda fase, que es uno de los papeles reservados a los elementos microaleantes de los aceros objeto de este estudio.

Usualmente la presencia de partículas de segunda fase lleva aparejada una serie de fenómenos como son:

- Afino de grano: Tiene lugar cuando el material se calienta por debajo de la temperatura de disolución de precipitados. El grano crece hasta un valor máximo a partir del cual se mantiene controlado de manera constante. Este tamaño de grano

máximo aumenta con la temperatura de calentamiento y/o con cantidades decrecientes de fase dispersa. Los granos obtenidos en tales condiciones son de menor tamaño que los del material sin precipitados.

- Crecimiento anormal de grano: Ocurre cuando el material se calienta a temperaturas justo por debajo de la temperatura de disolución de los precipitados, donde parte de ellos están disueltos y parte de ellos coalescen. Su característica fundamental es la heterogeneidad de su topología, puesto que se desarrollan distribuciones no uniformes de formas y/o tamaños de grano, de manera que algunos de ellos crecen más rápidamente que el resto de la matriz en que se engloban.

- Crecimiento normal de grano: Tiene lugar cuando el material se calienta a temperaturas tales que la fase dispersa se disuelve totalmente o bien cuando el tamaño de grano es inferior al obtenido a través del control de los precipitados. Se caracteriza por el mantenimiento de una estructura de grano uniforme; la distribución de formas y/o tamaños permanece constante en todo el material, mientras el tamaño de grano medio aumenta.

Debe apuntarse que la inhibición del crecimiento de grano por partículas puede ocurrir en aleaciones que contengan más de un tipo de precipitados, siendo este caso el que nos ocupa.

CAPITULO III

PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Descripción Experimental

Para la realización de este informe se compararon dos aceros laminados en caliente: una barra corrugada sin elementos microaleantes y otra barra corrugada con elementos microaleantes y con bajo contenido de carbono (HSLA). El procedimiento de fabricación de ambas barras laminadas en caliente, se puede apreciar en las siguientes figuras:

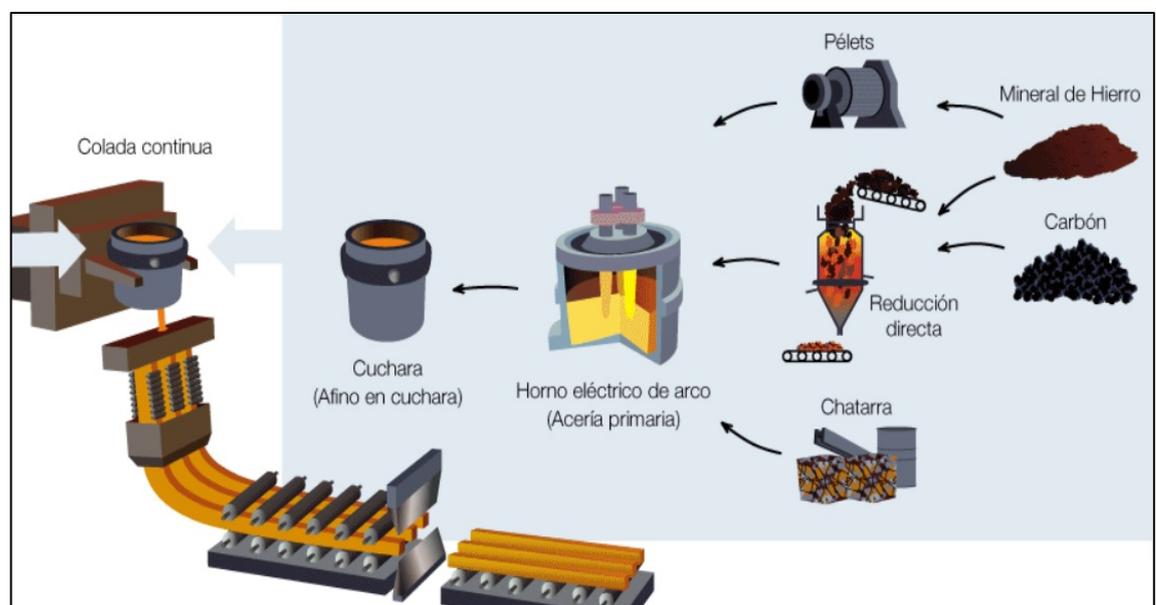


Figura 3.1: Proceso de Acería

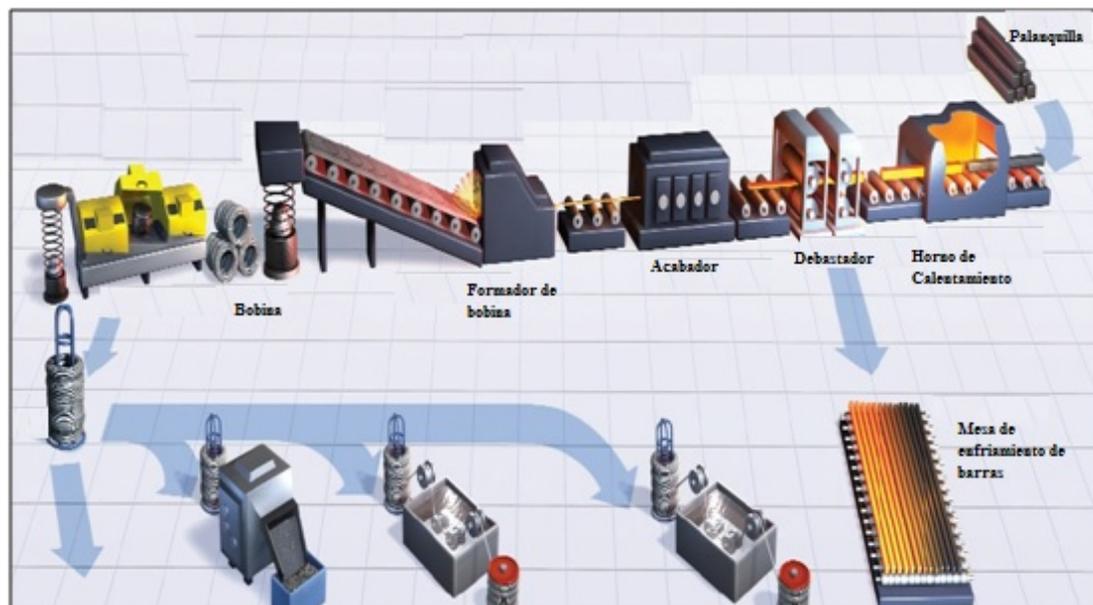


Figura 3.2: Proceso de Laminación.

Dentro del marco experimental se incluyen 3 ensayos realizados a muestras de aceros laminados en caliente sin microaleantes y con microaleantes. Estos ensayos fueron los siguientes:

- Composición química
- Ensayo mecánico
- Ensayo metalográfico

3.1.1. Composición química

El análisis químico se realiza en muestras de colada (Tundish). La muestra es esmerilada y una vez obtenida la superficie plana es analizada en el Espectrómetro de Emisión Óptica. El espectrómetro utilizado para este análisis es el ARL 4460, mostrado en la figura 3.3.



Figura 3.3: Espectrómetro de emisión óptica ARL 4460

Los rangos de composiciones químicas de las coladas con y sin microaleante que finalmente fueron laminadas se pueden apreciar en la tabla 3.1. El detalle de estos análisis se encuentra en los anexos.

Tabla 3.1: Composición química de muestras analizadas.

Muestras de acero	%C	%Mn	%Si	% P	% S	%V	%Nb
Sin microaleante	0.38-0.41	1.30-1.39	0.16-0.29	Max. 0.022	Max. 0.048	Max.0.002	Max.0.002
Con microaleante	0.24-0.26	1.32-1.37	0.23-0.26	Max. 0.021	Max. 0.044	0.043-0.047	0.011-0.015

Una vez realizado el análisis se revisa la huella dejada por el chispeo en la muestra para verificar que el análisis haya sido correcto. En la siguiente figura pueden apreciarse los chispeos realizados a las muestras sin y con microaleante.



Figura 3.4: Huellas de muestras de acero luego del análisis químico.

3.1.2. Ensayo mecánico

Ensayo realizado para determinar las propiedades mecánicas de Límite de Fluencia, Resistencia a la tracción, Alargamiento y doblado a través del ensayo de tracción axial a muestras de barras laminadas de aproximadamente 50 cm. Estas muestras son sujetadas en las mordazas del equipo de tracción para finalmente ser ensayadas.



Figura 3.5: Muestras cortadas en la laminación para los ensayos mecánicos.



Figura 3.6: Máquina de ensayos universales Tinius Olsen, donde se realizan los ensayos de límite de fluencia, resistencia a la tracción y alargamiento.



Figura 3.7: Máquina dobladora para el doblado a 180° según norma de fabricación.

Para el análisis comparativo entre un acero laminado en caliente sin microaleantes y con microaleantes, se ensayaron muestras de distintos diámetros laminados provenientes de palanquillas con los rangos de composición química descrita en la tabla 3.1. Los diámetros ensayados fueron los siguientes:

Tabla 3.2: Diámetros ensayados en la máquina de tracción.

Muestras	Diámetros de barras	
Sin microaleantes	1/2"	5/8"
Con microaleantes	1/2"	5/8"

A continuación se pueden apreciar los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos. El detalle de los resultados se resumen en el anexo.

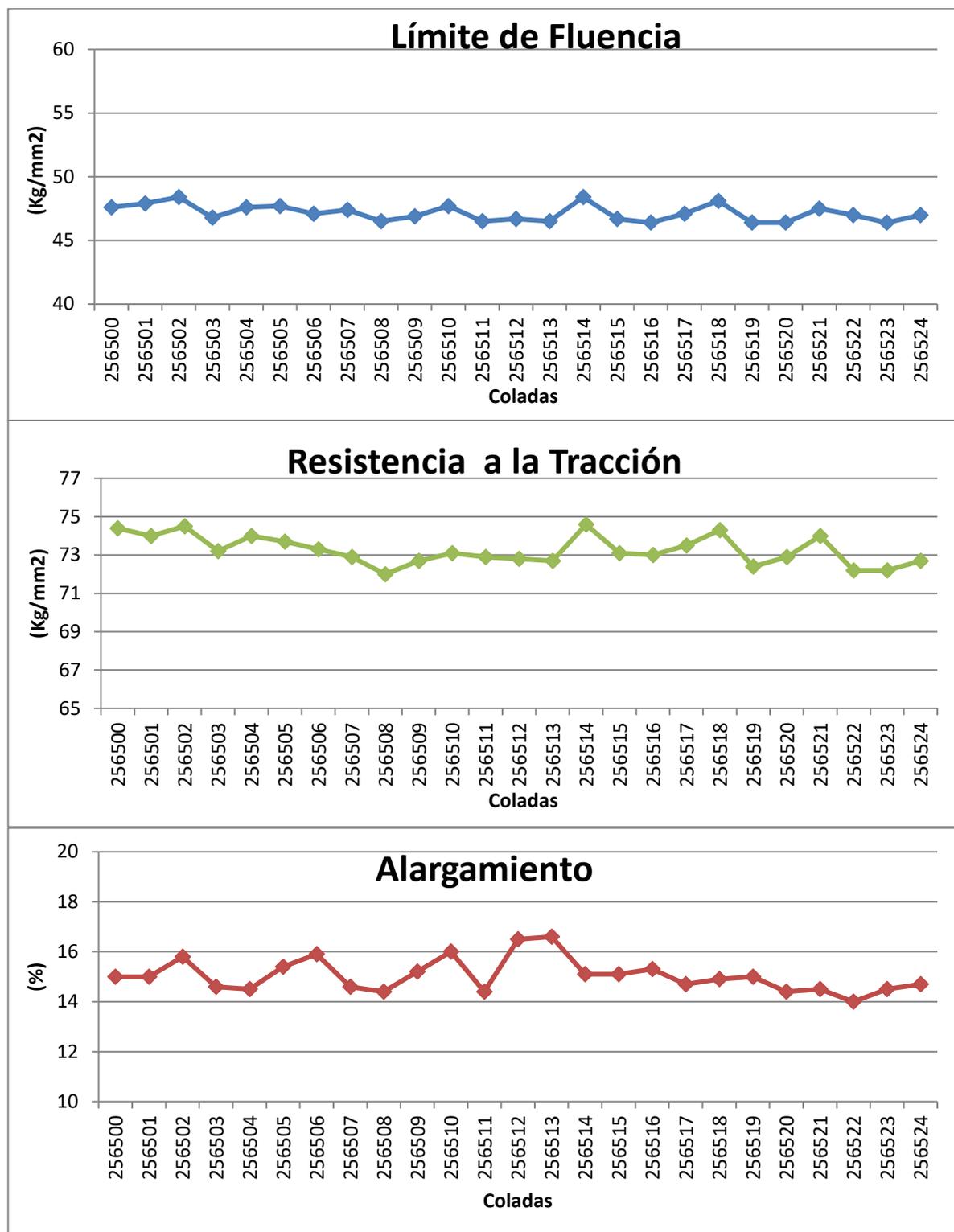


Figura 3.8: Propiedades mecánicas de barra corrugada de 1/2" sin microaleantes.

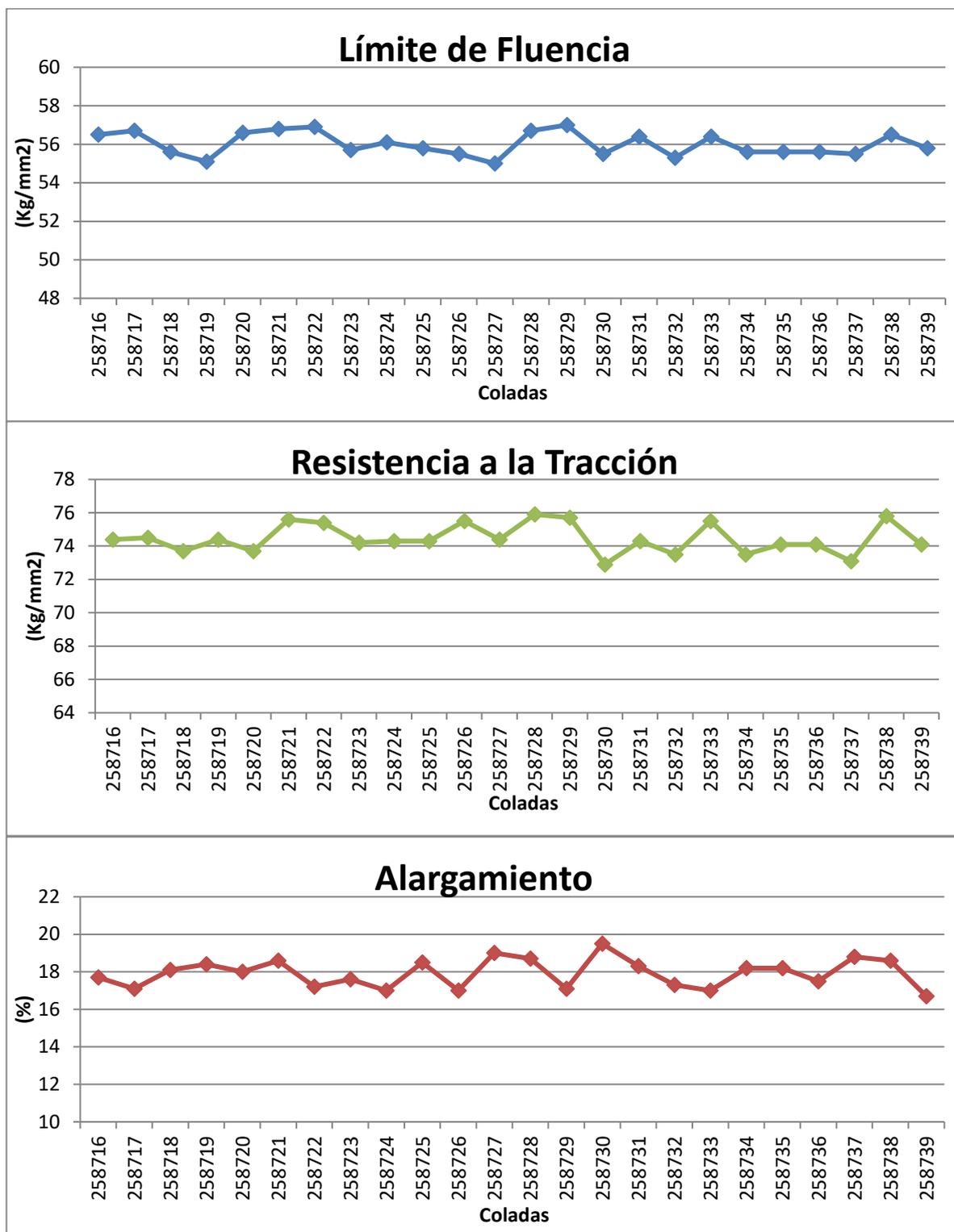


Figura 3.9: Propiedades mecánicas de barra corrugada de ½" con microaleantes.

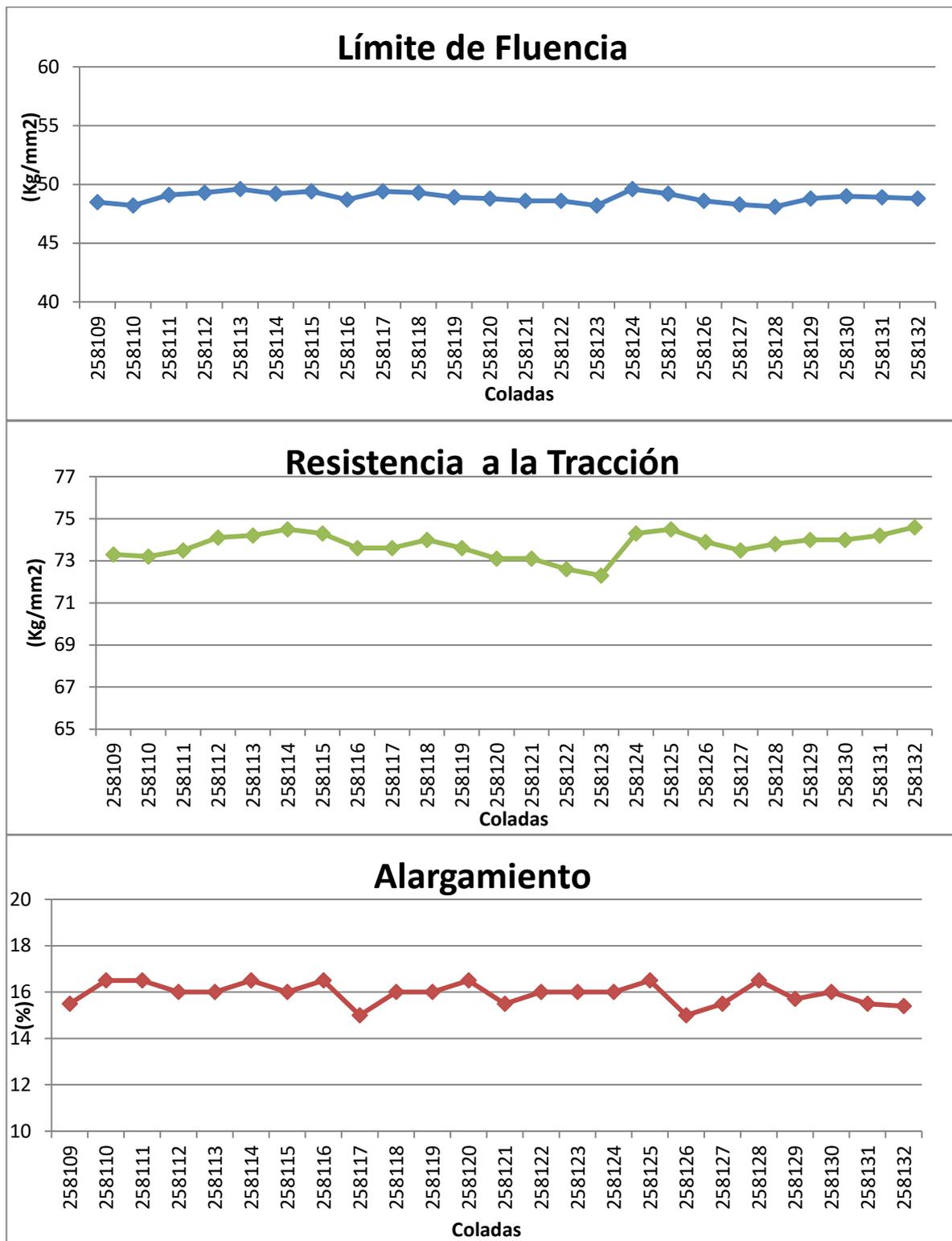


Figura 3.10: Propiedades mecánicas de barra corrugada de 5/8" sin microaleantes.

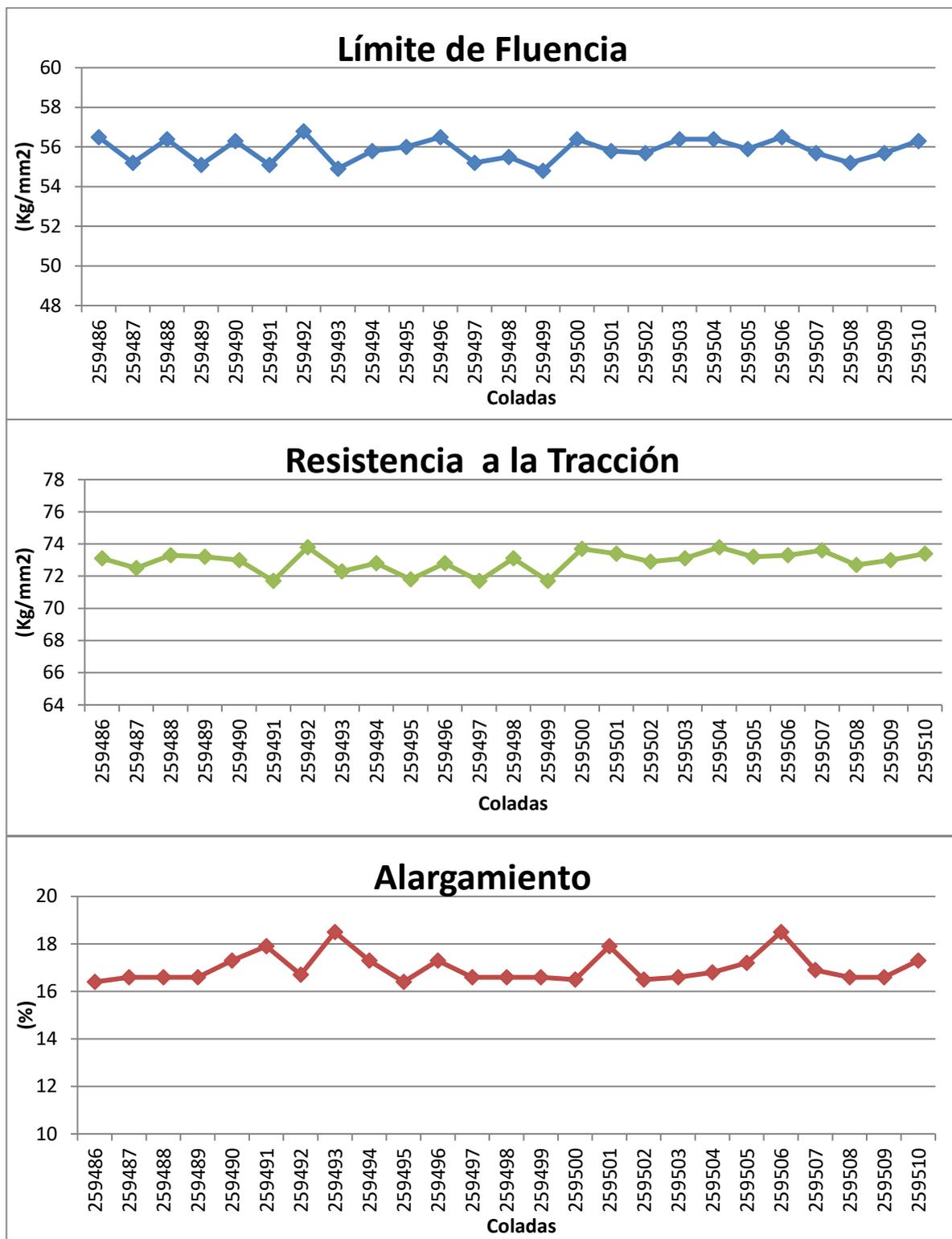


Figura 3.11: Propiedades mecánicas de barra corrugada de 5/8" con microaleantes.

3.1.3. Ensayo Metalográfico

Este ensayo se realizó para visualizar la microestructura de un acero con y sin microaleantes así como para comparar el tamaño de grano.

Las muestras obtenidas de la laminación fueron cortadas a una longitud de 1 pulgada aproximadamente para luego hacerles un corte transversal con el fin de desbastar y atacar la zona longitudinal. El ataque se realizó con Nital (Acido Nítrico) 3% y las zonas inspeccionadas por muestras fueron 2.

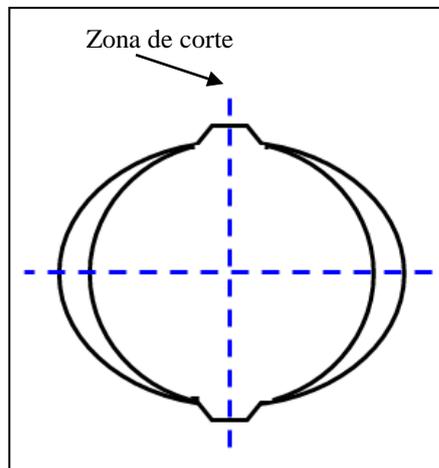


Figura 3.12: Corte transversal para análisis de muestras

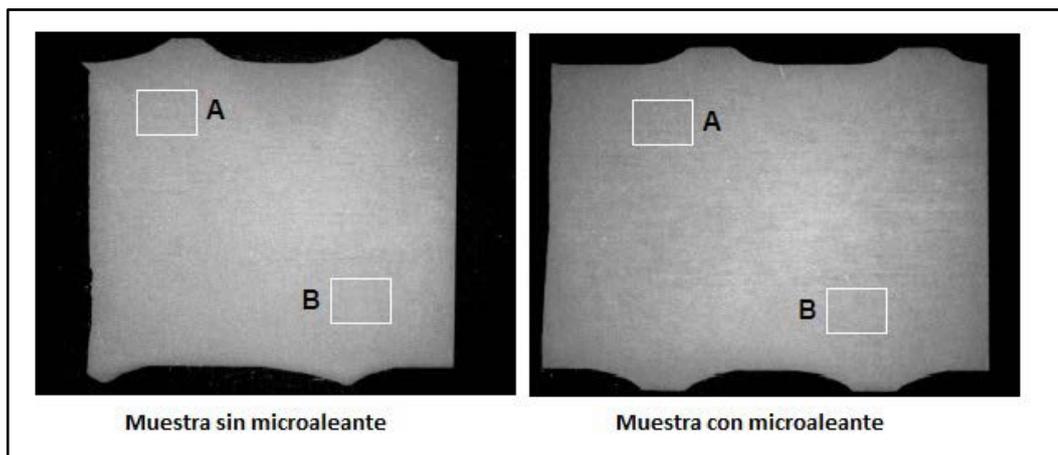


Figura 3.13: Zonas de análisis en cada muestra, 6X.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

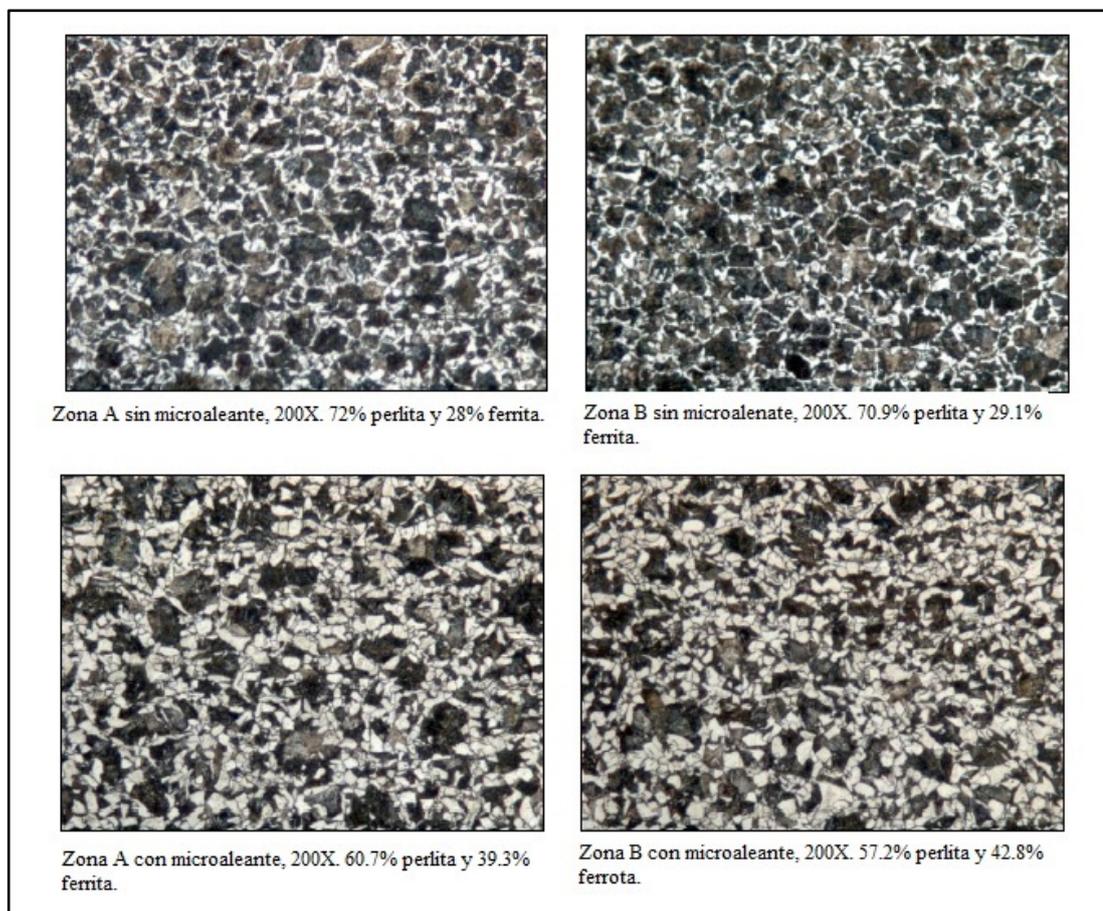


Figura 3.14: Fotomicrografías de muestras.

Del análisis se encontró:

- Un tamaño de grano ASTM G 8.0 (23.25 μm) para la muestra sin microaleante y un tamaño de grano ASTM G 10.0 (11.50 μm) para la muestra con microaleante (HSLA). Estos tamaños de granos en la muestra con microaleante es producto del efecto de los elementos microaleantes los cuales actuaron como afinadores de grano.
- Se puede apreciar que ambas muestras están conformadas por perlita y ferrita; sin embargo, en la muestra con microaleante se encuentra menor presencia de perlita, esto debido a que el contenido de C (0.24%-0.26%) fue menor que en la muestra sin microaleante (0.38%-0.41%).

CONCLUSIONES

1. Claramente se puede observar el efecto de los elementos microaleantes en las propiedades mecánicas de los aceros ensayados. Aumenta considerablemente el límite de fluencia y mantiene la resistencia a la tracción con resultados similares al acero sin microaleante a pesar de tener menor %C.
2. Otro de los efectos positivos de los microaleantes sobre el acero es su propiedad de afinador de grano. Se pudo apreciar en las muestras analizadas una reducción del 50% para el acero con microaleantes (HSLA) en comparación con el acero que no tenía microaleantes.
3. Es importante que para la formación de los carburos y carbonitruros de elementos microaleantes en el rango austenítico y posterior precipitación en la ferrita, se realice una buena práctica en el proceso de laminación controlada permitiendo obtener finalmente endurecer el acero.
4. Si bien es cierto que al utilizar elementos microaleantes hace costoso su proceso de producción, es una buena alternativa para alcanzar las propiedades mecánicas requeridas en ciertas normas técnicas utilizadas en el exterior. Tal es el caso de la norma técnica brasileña NBR 7480 en la cual otras siderurgias utilizan procesos como el Tempcore donde les permite alcanzar las propiedades mecánicas requeridas si añadir elementos microaleantes pero a un costo mucho más elevado.

BIBLIOGRAFIA

1. E. Valencia y H.J. Kestenbach. “*Origen y endurecimiento por dispersión de carbonitruros en un acero comercial microaleado al niobio y laminado en caliente*”. Departamento de ingeniería de materiales, Universidad Federal de San Carlos. Brasil 1998.
2. S. Illescas, J. Fernandez y J.M. Gulemany.”*Estudio del crecimiento de grano de fase austenítica en un acero HSLA de bajo contenido de carbono*”. Departamento de ciencia de materiales e ingeniería metalúrgica, Universidad de Barcelona. España 2007.
3. ASM Internacional. “*High – Strength Low – Alloy Steels*”. Carbon and Alloy Steels, pag 193-202.
4. Samuel Rosario Francia. “*Introducción a los Aceros Especiales*”. Universidad Nacional de San Marcos y Aceros Böhler del Perú S.A.
5. Samuel Rosario Francia. “*Introducción a los Aceros Especiales*”. Universidad Nacional de San Marcos y Aceros Böhler del Perú S.A.
6. Jorge Madías. “*Avances recientes en la laminación de productos largos*”. Asistencia Técnica y capacitación Metallon. Argentina.

7. Richard Bravo. “*Case study: Optimization and cost reduction on Tempcore system used in the steel rebars*”. Instituto de Tecnología Profesor Jorge A. Sabato (CNEA-UNSAM)
8. S.F. Medina. “*Estudio de la cinética de precipitación inducida mediante la determinación de los diagramas de Precipitación- Tiempo- Temperatura (PTT) en aceros microaleados*”. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.
9. Jorge Madías. “*Laminación de aceros microaleados*”. Aceros Arequipa, Pisco-Perú.
10. Siciliano. “*Aceros al Carbono y Microaleados Laminados en Caliente y en Frío*”. San Nicolás, Argentina.

ANEXOS

Tabla 1. Resumen de propiedades mecánicas y químicas de barra corrugada 1/2" sin microaleante.

Colada	Fluencia	Tracción	Alargamiento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	V	Al	Nb	Ti	N	O	Pb
256500	47.6	74.4	15.0	0.38	1.34	0.24	0.022	0.025	0.11	0.07	0.01	0.21	0.051	0.001	0.000	0.001	0.003	104.7	42.9	0.001
256501	47.9	74.0	15.0	0.39	1.31	0.23	0.021	0.028	0.11	0.06	0.01	0.21	0.042	0.001	0.002	0.002	0.002	98.4	106.7	0.001
256502	48.4	74.5	15.8	0.40	1.32	0.23	0.015	0.030	0.10	0.07	0.01	0.20	0.046	0.001	0.000	0.001	0.002	91.1	39.0	0.002
256503	46.8	73.2	14.6	0.38	1.36	0.24	0.021	0.030	0.10	0.06	0.01	0.19	0.041	0.003	0.000	0.001	0.003	105.0	85.0	0.000
256504	47.6	74.0	14.5	0.40	1.34	0.27	0.019	0.034	0.10	0.06	0.01	0.20	0.038	0.002	0.001	0.001	0.003	110.0	83.0	0.000
256505	47.7	73.7	15.4	0.39	1.33	0.26	0.022	0.027	0.08	0.06	0.01	0.19	0.037	0.002	0.001	0.001	0.004	109.0	61.0	0.000
256506	47.1	73.3	15.9	0.39	1.36	0.25	0.017	0.033	0.09	0.06	0.01	0.20	0.036	0.002	0.000	0.002	0.003	102.0	35.0	0.000
256507	47.4	72.9	14.6	0.39	1.32	0.23	0.021	0.036	0.10	0.06	0.01	0.18	0.048	0.003	0.001	0.001	0.003	103.9	19.0	0.002
256508	46.5	72.0	14.4	0.38	1.36	0.24	0.020	0.030	0.11	0.05	0.00	0.16	0.029	0.002	0.000	0.001	0.003	93.6	46.0	0.001
256509	46.9	72.7	15.2	0.39	1.32	0.22	0.015	0.037	0.10	0.05	0.01	0.19	0.054	0.002	0.001	0.001	0.003	98.0	40.4	0.002
256510	47.7	73.1	16.0	0.40	1.33	0.22	0.014	0.039	0.10	0.05	0.01	0.18	0.058	0.002	0.001	0.002	0.003	111.1	70.5	0.002
256511	46.5	72.9	14.4	0.38	1.32	0.24	0.014	0.041	0.10	0.06	0.01	0.20	0.053	0.002	0.000	0.001	0.002	102.5	50.6	0.002
256512	46.7	72.8	16.5	0.40	1.31	0.22	0.016	0.044	0.11	0.05	0.01	0.20	0.051	0.002	0.000	0.001	0.002	86.4	92.6	0.001
256513	46.5	72.7	16.6	0.40	1.36	0.25	0.013	0.036	0.10	0.06	0.01	0.20	0.057	0.002	0.000	0.002	0.002	89.0	25.4	0.001
256514	48.4	74.6	15.1	0.40	1.34	0.23	0.017	0.032	0.11	0.06	0.01	0.19	0.048	0.002	0.001	0.001	0.003	88.8	79.0	0.001
256515	46.7	73.1	15.1	0.39	1.36	0.22	0.012	0.029	0.10	0.05	0.01	0.17	0.040	0.002	0.000	0.001	0.003	98.8	23.7	0.001
256516	46.4	73.0	15.3	0.39	1.35	0.22	0.013	0.014	0.10	0.06	0.01	0.19	0.034	0.002	0.001	0.001	0.003	102.8	30.9	0.002
256517	47.1	73.5	14.7	0.40	1.33	0.22	0.013	0.034	0.09	0.06	0.01	0.19	0.039	0.002	0.000	0.001	0.003	104.5	28.6	0.002
256518	48.1	74.3	14.9	0.40	1.36	0.23	0.013	0.035	0.10	0.06	0.01	0.20	0.030	0.002	0.000	0.001	0.003	96.8	80.1	0.001
256519	46.4	72.4	15.0	0.39	1.35	0.25	0.012	0.032	0.09	0.06	0.01	0.20	0.049	0.002	0.001	0.002	0.003	106.1	17.8	0.002
256520	46.4	72.9	14.4	0.40	1.33	0.22	0.014	0.041	0.11	0.05	0.01	0.21	0.058	0.002	0.001	0.002	0.003	114.5	64.3	0.002
256521	47.5	74.0	14.5	0.40	1.34	0.27	0.019	0.034	0.10	0.06	0.01	0.20	0.038	0.002	0.001	0.001	0.003	110.0	83.0	0.000
256522	47.0	72.2	14.0	0.40	1.34	0.22	0.015	0.031	0.11	0.05	0.01	0.19	0.061	0.002	0.001	0.002	0.003	110.0	45.8	0.001
256523	46.4	72.2	14.5	0.40	1.38	0.22	0.012	0.036	0.09	0.04	0.00	0.13	0.035	0.002	0.000	0.001	0.002	110.4	91.2	0.001
256524	47.0	72.7	14.7	0.39	1.35	0.23	0.011	0.036	0.08	0.04	0.00	0.14	0.033	0.002	0.000	0.001	0.002	97.4	89.7	0.001

Tabla 2. . Resumen de propiedades mecánicas y químicas de barra corrugada 1/2” con microaleante.

Colada	Fluencia	Tracción	Alargamiento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	V	Al	Nb	Ti	N	O	Pb
258716	56.5	74.4	17.7	0.25	1.33	0.23	0.021	0.033	0.10	0.07	0.01	0.26	0.024	0.045	0.001	0.014	0.003	122.9	59.8	0.003
258717	56.7	74.5	17.1	0.25	1.33	0.23	0.017	0.041	0.10	0.07	0.01	0.21	0.028	0.047	0.001	0.012	0.002	112.8	24.9	0.003
258718	55.6	73.7	18.1	0.26	1.36	0.23	0.015	0.033	0.07	0.06	0.01	0.23	0.023	0.045	0.003	0.013	0.003	113.3	88.4	0.002
258719	55.1	74.4	18.4	0.25	1.33	0.24	0.015	0.018	0.08	0.05	0.00	0.19	0.019	0.045	0.003	0.012	0.003	118.8	41.6	0.002
258720	56.6	73.7	18.0	0.25	1.33	0.25	0.016	0.036	0.07	0.06	0.01	0.21	0.023	0.046	0.002	0.012	0.003	111.1	18.5	0.002
258721	56.8	75.6	18.6	0.25	1.35	0.23	0.014	0.038	0.07	0.06	0.01	0.22	0.021	0.046	0.002	0.012	0.003	118.9	19.5	0.002
258722	56.9	75.4	17.2	0.24	1.36	0.23	0.016	0.035	0.07	0.06	0.01	0.22	0.020	0.045	0.003	0.012	0.002	121.9	18.8	0.002
258723	55.7	74.2	17.6	0.25	1.37	0.25	0.017	0.034	0.07	0.06	0.01	0.23	0.022	0.046	0.003	0.015	0.003	116.9	40.1	0.003
258724	56.1	74.3	17.0	0.25	1.36	0.24	0.013	0.032	0.07	0.06	0.01	0.23	0.024	0.046	0.003	0.012	0.003	114.3	65.6	0.002
258725	55.8	74.3	18.5	0.26	1.37	0.24	0.017	0.039	0.08	0.06	0.01	0.21	0.029	0.043	0.003	0.013	0.002	114.0	56.1	0.003
258726	55.5	75.5	17.0	0.24	1.34	0.25	0.017	0.028	0.11	0.06	0.01	0.21	0.020	0.043	0.002	0.012	0.003	128.4	63.3	0.002
258727	55.0	74.4	19.0	0.25	1.35	0.23	0.015	0.036	0.10	0.06	0.01	0.20	0.026	0.044	0.002	0.012	0.002	118.7	24.6	0.002
258728	56.7	75.9	18.7	0.25	1.35	0.23	0.019	0.028	0.09	0.06	0.01	0.19	0.024	0.044	0.002	0.012	0.003	114.3	73.0	0.002
258729	57.0	75.7	17.1	0.25	1.32	0.23	0.014	0.014	0.07	0.05	0.01	0.17	0.020	0.044	0.003	0.012	0.003	127.2	99.1	0.002
258730	55.5	72.9	19.5	0.26	1.32	0.24	0.014	0.026	0.08	0.05	0.01	0.18	0.021	0.043	0.002	0.011	0.003	115.1	36.2	0.002
258731	56.4	74.3	18.3	0.25	1.37	0.26	0.014	0.027	0.08	0.05	0.01	0.18	0.021	0.045	0.003	0.012	0.003	112.0	34.3	0.002
258732	55.3	73.5	17.3	0.26	1.34	0.25	0.015	0.031	0.08	0.05	0.01	0.18	0.022	0.047	0.003	0.013	0.003	113.7	48.1	0.002
258733	56.4	75.5	17.0	0.26	1.36	0.23	0.014	0.022	0.07	0.05	0.01	0.18	0.022	0.044	0.002	0.013	0.003	126.6	67.0	0.002
258734	55.6	73.5	18.2	0.25	1.36	0.25	0.014	0.027	0.08	0.05	0.01	0.17	0.022	0.043	0.002	0.013	0.003	122.8	67.0	0.002
258735	55.6	74.1	18.2	0.25	1.32	0.23	0.017	0.023	0.09	0.05	0.01	0.19	0.020	0.044	0.002	0.012	0.004	111.0	19.8	0.002
258736	55.6	74.1	17.5	0.25	1.33	0.24	0.019	0.024	0.09	0.05	0.01	0.18	0.019	0.043	0.003	0.015	0.003	120.5	33.6	0.002
258737	55.5	73.1	18.8	0.25	1.33	0.23	0.014	0.027	0.07	0.06	0.01	0.19	0.020	0.044	0.004	0.013	0.004	113.7	51.4	0.002
258738	56.5	75.8	18.6	0.25	1.33	0.23	0.014	0.029	0.08	0.05	0.01	0.18	0.020	0.044	0.002	0.013	0.003	120.7	31.0	0.002
258739	55.8	74.1	16.7	0.24	1.34	0.24	0.015	0.024	0.10	0.06	0.01	0.17	0.019	0.045	0.003	0.013	0.003	113.1	42.2	0.002

Tabla 3. . Resumen de propiedades mecánicas y químicas de barra corrugada 5/8" sin microaleante.

Colada	Fluencia	Tracción	Alargamiento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	V	Al	Nb	Ti	N	O	Pb
258109	48.5	73.3	15.5	0.40	1.39	0.26	0.015	0.048	0.08	0.06	0.01	0.20	0.039	0.003	0.002	0.002	0.003	114.0	97.0	0.003
258110	48.2	73.2	16.5	0.40	1.39	0.26	0.015	0.048	0.08	0.06	0.01	0.20	0.039	0.003	0.002	0.002	0.003	114.0	97.0	0.003
258111	49.1	73.5	16.5	0.39	1.36	0.25	0.013	0.038	0.08	0.06	0.01	0.20	0.052	0.003	0.002	0.001	0.003	107.8	96.4	0.002
258112	49.3	74.1	16.0	0.39	1.36	0.26	0.015	0.039	0.08	0.06	0.01	0.20	0.035	0.003	0.002	0.001	0.003	103.0	94.3	0.002
258113	49.6	74.2	16.0	0.41	1.35	0.26	0.013	0.034	0.08	0.06	0.01	0.20	0.048	0.002	0.007	0.001	0.003	92.0	93.6	0.002
258114	49.2	74.5	16.5	0.40	1.37	0.26	0.014	0.038	0.08	0.07	0.01	0.22	0.036	0.002	0.003	0.002	0.003	109.2	92.6	0.001
258115	49.4	74.3	16.0	0.39	1.36	0.28	0.014	0.040	0.10	0.06	0.01	0.21	0.043	0.003	0.002	0.001	0.004	94.5	98.7	0.002
258116	48.7	73.6	16.5	0.39	1.39	0.29	0.015	0.037	0.09	0.07	0.01	0.21	0.053	0.003	0.002	0.001	0.003	101.3	85.0	0.002
258117	49.4	73.6	15.0	0.40	1.37	0.28	0.016	0.033	0.09	0.06	0.01	0.22	0.054	0.003	0.002	0.001	0.003	104.1	118.0	0.002
258118	49.3	74.0	16.0	0.40	1.34	0.29	0.015	0.035	0.10	0.07	0.01	0.21	0.047	0.003	0.002	0.001	0.003	102.8	134.3	0.002
258119	48.9	73.6	16.0	0.41	1.30	0.26	0.014	0.036	0.08	0.06	0.01	0.22	0.042	0.003	0.002	0.002	0.003	96.3	128.4	0.002
258120	48.8	73.1	16.5	0.40	1.37	0.17	0.015	0.040	0.07	0.07	0.01	0.22	0.021	0.003	0.002	0.001	0.002	111.2	112.4	0.002
258121	48.6	73.1	15.5	0.40	1.35	0.21	0.012	0.035	0.06	0.06	0.01	0.19	0.039	0.002	0.002	0.001	0.002	130.9	140.1	0.002
258122	48.6	72.6	16.0	0.40	1.37	0.22	0.012	0.040	0.07	0.06	0.01	0.21	0.037	0.003	0.002	0.002	0.002	114.6	112.6	0.002
258123	48.2	72.3	16.0	0.39	1.36	0.21	0.012	0.037	0.07	0.07	0.01	0.23	0.025	0.003	0.002	0.001	0.003	113.6	99.3	0.002
258124	49.6	74.3	16.0	0.40	1.35	0.25	0.013	0.036	0.07	0.06	0.01	0.18	0.032	0.003	0.002	0.001	0.003	112.5	112.2	0.002
258125	49.2	74.5	16.5	0.41	1.37	0.24	0.013	0.037	0.08	0.06	0.01	0.19	0.049	0.003	0.002	0.001	0.002	103.7	148.0	0.002
258126	48.6	73.9	15.0	0.40	1.39	0.25	0.022	0.031	0.09	0.05	0.01	0.19	0.023	0.003	0.004	0.002	0.003	110.8	132.4	0.002
258127	48.3	73.5	15.5	0.41	1.39	0.23	0.017	0.037	0.08	0.06	0.01	0.19	0.031	0.003	0.003	0.002	0.003	111.6	105.1	0.004
258128	48.1	73.8	16.5	0.40	1.35	0.16	0.015	0.018	0.08	0.06	0.01	0.21	0.049	0.002	0.002	0.001	0.002	99.5	79.6	0.003
258129	48.8	74.0	15.7	0.41	1.38	0.23	0.016	0.035	0.09	0.06	0.01	0.21	0.045	0.003	0.003	0.002	0.003	104.4	82.6	0.003
258130	49.0	74.0	16.0	0.41	1.38	0.24	0.014	0.031	0.09	0.06	0.01	0.20	0.052	0.002	0.002	0.002	0.003	109.6	93.8	0.002
258131	48.9	74.2	15.5	0.41	1.38	0.24	0.014	0.031	0.09	0.06	0.01	0.20	0.052	0.002	0.002	0.002	0.003	109.6	93.8	0.002
258132	48.8	74.6	15.4	0.41	1.36	0.25	0.020	0.040	0.11	0.06	0.01	0.20	0.049	0.003	0.002	0.002	0.003	114.1	103.6	0.002

Tabla 4. . Resumen de propiedades mecánicas y químicas de barra corrugada 5/8” con microaleante.

Colada	Fluencia	Tracción	Alargamiento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	V	Al	Nb	Ti	N	O	Pb
259486	56.5	73.1	16.4	0.26	1.33	0.24	0.014	0.033	0.07	0.05	0.00	0.16	0.026	0.047	0.003	0.012	0.003	129.10	97.60	0.002
259487	55.2	72.5	16.6	0.26	1.37	0.23	0.012	0.041	0.06	0.05	0.00	0.17	0.028	0.045	0.003	0.013	0.002	139.80	83.50	0.002
259488	56.4	73.3	16.6	0.26	1.37	0.23	0.012	0.041	0.06	0.05	0.00	0.17	0.028	0.045	0.003	0.013	0.002	139.80	83.50	0.002
259489	55.1	73.2	16.6	0.26	1.37	0.23	0.012	0.041	0.06	0.05	0.00	0.17	0.028	0.046	0.003	0.013	0.002	139.80	83.50	0.002
259490	56.3	73.0	17.3	0.25	1.36	0.25	0.011	0.026	0.05	0.05	0.01	0.17	0.027	0.045	0.003	0.012	0.003	131.70	78.90	0.002
259491	55.1	71.7	17.9	0.25	1.36	0.25	0.011	0.026	0.05	0.05	0.01	0.17	0.027	0.046	0.003	0.012	0.003	131.70	78.90	0.002
259492	56.8	73.8	16.7	0.26	1.36	0.25	0.012	0.021	0.07	0.05	0.00	0.17	0.028	0.043	0.003	0.013	0.003	142.40	42.90	0.002
259493	54.9	72.3	18.5	0.26	1.36	0.25	0.012	0.021	0.07	0.05	0.00	0.17	0.028	0.043	0.003	0.013	0.003	142.40	42.90	0.002
259494	55.8	72.8	17.3	0.26	1.36	0.24	0.012	0.024	0.07	0.05	0.00	0.17	0.031	0.043	0.004	0.013	0.003	147.30	71.80	0.002
259495	56.0	71.8	16.4	0.26	1.36	0.24	0.012	0.024	0.07	0.05	0.00	0.17	0.031	0.045	0.004	0.013	0.003	147.30	71.80	0.002
259496	56.5	72.8	17.3	0.25	1.35	0.23	0.012	0.025	0.07	0.06	0.01	0.17	0.028	0.044	0.003	0.012	0.004	125.60	105.40	0.003
259497	55.2	71.7	16.6	0.26	1.35	0.23	0.015	0.033	0.08	0.05	0.01	0.17	0.030	0.043	0.003	0.012	0.003	119.10	35.20	0.002
259498	55.5	73.1	16.6	0.26	1.35	0.23	0.015	0.033	0.08	0.05	0.01	0.17	0.030	0.044	0.003	0.012	0.003	119.10	35.20	0.002
259499	54.8	71.7	16.6	0.26	1.35	0.23	0.015	0.033	0.08	0.05	0.01	0.17	0.030	0.043	0.003	0.012	0.003	119.10	35.20	0.002
259500	56.4	73.7	16.5	0.25	1.36	0.24	0.017	0.024	0.11	0.06	0.01	0.18	0.029	0.047	0.003	0.012	0.003	149.10	92.60	0.002
259501	55.8	73.4	17.9	0.25	1.33	0.24	0.011	0.036	0.10	0.05	0.01	0.16	0.034	0.047	0.002	0.013	0.003	139.90	54.60	0.002
259502	55.7	72.9	16.5	0.25	1.34	0.24	0.011	0.038	0.08	0.05	0.01	0.15	0.036	0.046	0.002	0.012	0.003	135.30	22.60	0.003
259503	56.4	73.1	16.6	0.25	1.36	0.25	0.012	0.040	0.08	0.05	0.01	0.15	0.034	0.045	0.002	0.013	0.003	133.50	25.20	0.004
259504	56.4	73.8	16.8	0.25	1.34	0.23	0.016	0.037	0.09	0.05	0.01	0.16	0.043	0.046	0.002	0.013	0.003	131.20	45.70	0.002
259505	55.9	73.2	17.2	0.25	1.35	0.23	0.012	0.044	0.08	0.05	0.01	0.18	0.040	0.046	0.002	0.012	0.002	123.50	52.50	0.004
259506	56.5	73.3	18.5	0.25	1.36	0.24	0.013	0.028	0.08	0.05	0.01	0.18	0.041	0.047	0.002	0.013	0.003	140.00	54.00	0.003
259507	55.7	73.6	16.9	0.24	1.36	0.25	0.013	0.036	0.09	0.05	0.01	0.18	0.040	0.045	0.002	0.013	0.003	120.60	75.50	0.003
259508	55.2	72.7	16.6	0.24	1.35	0.23	0.011	0.044	0.07	0.05	0.01	0.18	0.040	0.043	0.002	0.012	0.002	143.70	62.30	0.002
259509	55.7	73.0	16.6	0.25	1.37	0.25	0.012	0.041	0.07	0.05	0.01	0.18	0.040	0.047	0.002	0.012	0.003	137.80	30.20	0.002
259510	56.3	73.4	17.3	0.25	1.36	0.25	0.011	0.040	0.06	0.05	0.00	0.16	0.031	0.045	0.002	0.012	0.003	139.90	78.50	0.002