

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES – ITBA

ESCUELA DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

SOLDABILIDAD E INTEGRIDAD

MICROESTRUCTURAL DE ACERO PARA

TORRES PORTANTES DE

AEROGENERADORES

AUTOR: D'Andrea, Agustín Emmanuel (Leg. Nº 54058)

TUTOR: Oyarzabal, Nicolás Andrés

Distribución

Aires

Interna Ternium Ar

Instituto Tecnológico de Buenos

Creado por

Agustín D'Andrea Calidad de Producto

Autorizado por

Roberto Bruna Calidad de Producto



Soldabilidad e integridad microestructural de acero para torres portantes de aerogeneradores

Fecha 21/07/2018 Total de Páginas 53

Abstract

La demanda actual de chapa gruesa para torres eólicas requiere de aceros de alta resistencia y tenacidad. Para conseguir un adecuado balance de estas propiedades se necesita un conocimiento fundamental de la relación existente entre el diseño de aleación, proceso termomecánico (TMP), transformación, microestructura final y propiedades mecánicas resultantes. En este trabajo se presenta el desarrollo de una práctica de laminación empleando aceros microaleados con Nb-V-Ti para cumplir con los requerimientos de la norma UNE 10025-2 grado S355J2-N. Se llevaron a cabo múltiples ensayos en un laminador reversible para obtener distintos espesores finales de chapa gruesa con anchos de 2500mm. Las chapas obtenidas fueron caracterizadas mediante ensayos destructivos y no destructivos para evaluar la microestructura y las propiedades obtenidas.

La chapa con mejores características obtenidas se soldó mediante soldadura por arco sumergido para su posterior ensayo y consecutivamente la evaluación de la soldabilidad de esta.

Se obtuvo una mejora significativa de la tenacidad a bajas temperaturas (-20°C/-40°C) a partir de una microestructura más refinada y uniforme con una práctica de laminación controlada. Los parámetros de mayor influencia fueron el porcentaje de reducción en los primeros pases de laminación (>12%), la deformación total por debajo de la temperatura de no recristalización (Tnr) de la austenita en los pases finales (>60%) y la temperatura final de laminado (<860°C).

En cuanto a la soldabilidad, los resultados obtenidos fueron satisfactorios, obteniendo buenas propiedades microestructurales, ausencia de fisuras luego del ensayo de plegado y altos valores de resistencia (502MPa) y tenacidad (190J absorbidos en el metal de aporte y 120J en la zona afectada por el calor, ensayados a -20°C).

Palabras clave: laminación controlada, torres eólicas, acero HSLA, microestructura, acondicionamiento de la austenita, soldadura SAW, S355

1 Índice

1	ÍNDI	CE	3
	1.1	ÍNDICE DE GRÁFICOS	4
	1.2	ÍNDICE DE IMÁGENES	4
	1.3	ÍNDICE DE TABLAS	5
2	INTR	ορμετιόν	6
-			
	2.1	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	6
	2.2	SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA EN LA ARGENTINA	6
	2.3	ASPECTOS LEGALES	7
3	MAR	CO TEÓRICO	8
	3.1	GENERADORES EÓLICOS	
	3.1.1	Introducción a los aerogeneradores	8
	3.1.2	Importancia del diseño de la torre	9
	3.1.3	Solicitaciones que debe resistir la torre	10
	3.2	ACEROS HSLA	10
	3.2.1	Introducción	10
	3.2.2	Composición química	10
	3.2.3	Acero EN10025 S355	11
	3.2.4	Laminación reversible	13
	3.3	SOLDABILIDAD	13
	3.3.1	¿Qué es la soldabilidad?	13
	3.3.2	Diagrama de Graville	14
	3.3.3	Selección del consumible	15
	3.3.4	Precalentamiento	16
	3.4	Soldadura	16
	3.4.1	Soldadura SAW	16
	3.4.2	Defectos encontrados en la soldadura	18
	3.4.3	Tenacidad de la unión soldada	20
4	DETE	RMINACIÓN DE LA PRÁCTICA DE LAMINACIÓN ÓPTIMA Y SELECCIÓN DEL ACERO ÓPTIMO	20
	4.1	PLATES LAMINADOS	20
	4.2	METODOLOGÍA DE TRABAJO	21
	4.3	TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO	22
	4.4	ENSAYOS REALIZADOS	22
	4.4.1	Ensayos de tracción	26
	4.4.2	Ensayo de tracción Z	28
	4.4.3	Ensayos de Charpy	31
	4.4.4	Resultados obtenidos vs requisitos establecidos por norma UNE 10025 – 2	32
	4.4.5	Microestructura	33
	4.4.6	Micrografía	35
	4.5	ANÁLISIS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN CONTROLADA	36
	4.6	CONCLUSIONES PARA LA PRÁCTICA DE LAMINACIÓN	37

5	DETE	RMINACIÓN DE LA TENACIDAD Y SOLDABILIDAD DE LA UNIÓN	38			
5	1	MÉTODO DE ENSAYO				
5	2	PROPIEDADES DEL METAL BASE				
	5.2.1	Propiedades a la tracción del metal base				
	5.2.2	Propiedades de tenacidad del metal base				
	5.2.3	Propiedades microestructurales del metal base				
5	3	ENSAYOS REALIZADOS				
	5.3.1	Estudio macroscópico				
	5.3.2	Dureza Vickers transversal				
	5.3.3	Análisis metalográfico				
	5.3.4	Charpy V				
	5.3.5	Tracción				
	5.3.6	Plegado lateral	51			
6	CON	CLUSIONES	51			
7	CON	IENTARIOS FINALES	52			
8	REFERENCIAS					

1.1 Índice de gráficos

6
4
.5
2
2
3
4
6
2

1.2 Índice de imágenes

8
9
12
12
17
18
19
26
29
29
35

Figura 4.4-7 - Microestructura por microscopio óptico 256X y 640X	35
Figura 5.2-1 - Microestructura del metal base (9540)	39
Figura 5.3-1 - Aspecto de la muestra analizada	40
Figura 5.3-2 - Aspecto luego de macroataque	40
Figura 5.3-3 - Ubicación de las improntas de medición de dureza Vickers	41
Figura 5.3-4 - Zonas en la muestra de soldadura	43
Figura 5.3-5 - Detalle microscópico zona 1	43
Figura 5.3-6 - Detalle microscópico zona ZAC entre aporte 1 y MB1	44
Figura 5.3-7 - Detalle microscópico MB1	44
Figura 5.3-8 - Detalle microscópico aporte MAG	44
Figura 5.3-9 - Detalle microscópico zona ZAC aporte MAG con MB1	45
Figura 5.3-10 - Detalle microscópico aporte 3	45
Figura 5.3-11 - Detalle microscópico zona ZAC entre aporte 3 y MB1	46
Figura 5.3-12 - Detalle microscópico Zona ZAC entre aporte 1 y MB2	46
Figura 5.3-13 - Detalle microscópico MB2	46
Figura 5.3-14 - Detalle microscópico zona ZAC de aporte MAG y MB2	47
Figura 5.3-15 - Detalle microscópico aporte 2	47
Figura 5.3-16 - Detalle microscópico zona ZAC entre aporte 2 y MB2	48
Figura 5.3-17 - Ubicación de las probetas de Charpy	49
Figura 5.3-18 - Probetas luego del ensayo de plegado lateral	51

1.3 Índice de tablas

Tabla 3.2-1 - Composición química de acero HSLA fabricado en Ternium	11
Tabla 3.2-2 - Propiedades del acero utilizado	12
Tabla 4.1-1 - Dimensiones de semielaborados, finales y toneladas laminadas	20
Tabla 4.2-1 - Diferencias operativas entre las dos pruebas de laminación desarrolladas	21
Tabla 4.3-1 - T. de precalentamiento para la 1era prueba de laminación	22
Tabla 4.3-2 - T. de precalentamiento para la 2da prueba de laminación	22
Tabla 4.4-1 - Ensayos realizados sobre las muestras	23
Tabla 4.4-2 - Procedimientos de normalizado	24
Tabla 4.4-3 - Datos de laminación.	25
Tabla 4.4-4 - Resultados de ensayos tensiles.	27
Tabla 4.4-5 - Calificaciones de la norma	30
Tabla 4.4-6 - Resultados de los ensayos de tracción en Z	30
Tabla 4.4-7 - Resultados obtenidos en los ensayos de Charpy	31
Tabla 4.4-8 - Valores de resistencia y fluencia para plates en condición As Rolled	33
Tabla 4.6-1 - Práctica de correcta receta de laminación	37
Tabla 5.2-1 - Propiedades del metal base obtenidas por ensayo de tracción	38
Tabla 5.2-2 - Resultados del ensayo de Charpy del metal base a -20°C.	38
Tabla 5.2-3 - Resultados del ensayo de Charpy del metal base a -40°C.	38
Tabla 5.2-4 - Propiedades de la microestructura del metal base	39
Tabla 5.3-1 - Valores de dureza Vickers medidos	41

2 Introducción

2.1 Justificación del proyecto

La demanda actual por fuentes de energía renovable (por ej. eólica, solar) junto con el creciente precio de los combustibles fósiles y los efectos nocivos que estos producen al medioambiente conducen a la implementación progresiva de generación eléctrica a partir de energías renovables.

La energía eólica representa un alto porcentaje de la energía generada a partir de fuentes renovables. Esta es generada en parques eólicos compuestos por grupos de aerogeneradores montados sobre torres de acero, lo que conlleva a un aumento en la demanda de aceros estructurales planos.

Dada la alta competencia y la apertura actual del mercado, es necesario desarrollar y caracterizar un acero y su comportamiento frente a la soldadura para justificar la calidad de este y así proteger el mercado interno. Toda torre eólica que se fabrique debe asegurar una adecuada performance dado que su rotura podría generar accidentes, daños materiales y hasta pérdida de vidas humanas.

2.2 Situación actual de la energía eólica en la Argentina

Según los especialistas, la Argentina cuenta con una excelente calidad de recurso eólico, principalmente en la zona de la Patagonia. Sumado a lo anterior, en el país se posee la tecnología y empresas necesarias para la fabricación e instalación de torres eólicas. Se cuenta entonces con los requerimientos para que el país explote el recurso eólico a una mayor escala a la actual.

Entre 1994 y 2002 Argentina contaba con solo 30 MW instalados principalmente por cooperativas eléctricas. Esta situación fue cambiando rápidamente a partir de la licitación del Programa de Generación Eléctrica a partir de Energías Renovables (GENREN) [1]. El 30 de junio de 2010 tuvo lugar la adjudicación del Programa GENREN, licitación que se llevó a cabo a través de la estatal ENARSA y del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Resultando adjudicados proyectos según el *Gráfico 2.2-1*.



Proyectos adjudicados

Gráfico 2.2-1 - Distribución de adjudicaciones en energías renovables.

Hasta el momento, de los 754 MW adjudicados para energía eólica, solamente se encuentran en marcha cerca de 180 MW (menos de 100 molinos) y existen otros 100 MW en fase de construcción.

En la actualidad, la energía eólica en Argentina sigue estando muy poco desarrollada si se tiene en cuenta que los parques de importancia son pocos y recientes, también cuando se compara con el desarrollo en la región. A finales del año 2016, el país contaba con 271 MW (6,2MW por millón de habitantes) de potencia eólica instalada, que sería algo menor si se tienen en cuenta los equipos fuera de servicio. Eso ubica al país por detrás de países de la región como Brasil y Chile, que poseen 8715 MW (43MW por millón de habitantes) y 933 MW (52MW por millón de habitantes) respectivamente. En el caso de Brasil, representa más de 15 veces el desarrollo argentino, siendo que en ese país el desarrollo eólico comenzó más tarde que en Argentina y su recurso natural es menos abundante.

Cabe destacar que existe una gran cantidad de proyectos, viables económicamente, a la espera de financiamiento.

2.3 Aspectos legales

Existe una serie de leyes y resoluciones para estimular el desarrollo de la energía eólica como fuente de energía renovable.

A través de la Ley Nacional Nº 25019 sobre "Régimen Nacional de Energía Eólica y Solar", que declara de interés nacional a la generación de energía eléctrica de origen eólico y solar en todo el territorio nacional, el Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos de la Nación, a través de la Secretaría de Energía promueve la investigación y el uso de energías no convencionales o renovables.

La ley 26.190/2006 establece que el 8% del consumo de energía eléctrica debe provenir de fuentes renovables hacia finales de 2016. El régimen ofrece subsidios y una serie de beneficios fiscales como devolución anticipada de IVA y amortización acelerada de bienes u obras.

La resolución 108/2011 de la Secretaría de Energía, permite a empresas privadas presentar propuestas de generación ofreciendo contratos a 15 años y en dólares, aunque no brinda garantía soberana a los proyectos.

Al no haberse alcanzado el objetivo de la ley 26.190/2006, este fue pospuesto según la ley 27.191 (programa Renov-Ar), promulgada en octubre de 2015, que establece un objetivo de 8% de participación de energías renovables en la matriz energética para 2018, y 20% (10 GW) en 2025 [2].

El Programa Renov-Ar se compone de "rondas" para la construcción de unidades de generación de 1GW a partir de fuentes renovables, de las cuales ~0.6GW corresponden a energía eólica. Esto representa un aproximado de 240 molinos de 80 m, con 110 a 180 toneladas de plates (chapa gruesa) por torre.

Esta primera ronda representa un consumo aproximado de 30 a 50Mt de acero.

3 Marco teórico

3.1 Generadores eólicos

3.1.1 Introducción a los aerogeneradores

Los aerogeneradores, como su nombre indica, son máquinas cuya función es generar energía eléctrica a partir de la energía que contiene el viento. Se encuentran en constante evolución tecnológica con lo cual día a día se obtienen generadores más eficientes y junto con el desarrollo del acero, torres más livianas y resistentes.

Estos cuentan con cuatro partes constructivas principales:

- La góndola: En ella se alojan los componentes fundamentales del aerogenerador. Estos son los elementos mecánicos y eléctricos tales como la caja multiplicadora, el generador, sistemas de control, etc.
- Rotor y palas del rotor: Son las partes encargadas de convertir la energía del viento en movimiento rotacional para el generador. Generalmente se encuentran fabricadas en fibra de vidrio reforzada o de fibra de carbono. Tienen una estructura central resistente y luego las cubiertas exteriores que le confieren el perfil aerodinámico.
- El generador eléctrico: Es donde el movimiento de rotación del rotor se transforma en energía eléctrica. Suele ser un generador asíncrono o de inducción. En los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 500 y 1.500 kW.
- La torre: Esta soporta las partes antedichas y en altura para aprovechar la velocidad del viento. El presente trabajo se basará en el desarrollo de un acero para estas y en el estudio de la soldabilidad de este.

En la Figura 3.1-1 se esquematizan las partes mencionadas anteriormente.



Figura 3.1-1 - Componentes principales de un aerogenerador.

3.1.2 Importancia del diseño de la torre

Las torres pueden ser de diseño tubular o de celosía. Actualmente se hace mayor uso de las de diseño tubular debido a su gran rigidez y a que genera un menor impacto visual.

Por otro lado, el mantenimiento en las torres tubulares se facilita ya que su diseño permite la incorporación de escalera dentro de la misma.

Su diseño resulta de vital importancia ya que conforme aumenta la adopción de esta tecnología, aumentan los accidentes causados por esta.

Los principales accidentes se deben a:

- Rotura en las palas del rotor.
- Fuegos debido a falta de mantenimiento.
- Caída de la torre por diseño deficiente.

Estos conllevan elevados costos para las empresas y pueden llegar a resultar en fatalidades.

En la *Figura 3.1-2* se observa la falla de una torre eólica.



Figura 3.1-2 - Falla en torre eólica.

3.1.3 Solicitaciones que debe resistir la torre

La torre es uno de los componentes más solicitados tanto por las cargas combinadas variables que debe soportar como por las hostiles condiciones de su lugar de emplazamiento (temperaturas bajo cero, fuertes vientos cambiantes, ambiente salino).

Las cargas sobre el aerogenerador se deben principalmente a:

- Fuerzas generadas por gravedad.
- Fuerzas debidas a movimientos sísmicos.
- Vientos ejercidos en palas y en la torre.

Para el diseño de la torre se deben tener en cuenta:

- Fuerza de drag ejercida por el viento y los momentos flexores que esta genera.
- Resistencia a la fatiga.
- Frecuencias de resonancia.
- Transición dúctil frágil del acero utilizado.
- Comportamiento frente a la corrosión.
- Condición de pandeo.

3.2 Aceros HSLA

3.2.1 Introducción

El acero HSLA - High Strength Low Alloy (alta resistencia y baja aleación) es un tipo de aleación metálica con muy buenas características en lo que respecta a su soldabilidad y a su conformabilidad. Esto se debe principalmente a los bajos porcentajes de carbono que poseen. Para conferirle las características mecánicas requeridas, se utiliza una serie de aleantes en diferentes proporciones según las propiedades buscadas. Principalmente, se logra una estructura de grano refinado y con buena resistencia a la corrosión debido a su bajo contenido de perlita.

3.2.2 Composición química

Los aceros microaleados difieren de otros aceros en que no son fabricados para cumplir una composición química específica sino para cumplir con determinadas propiedades mecánicas. 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 o zirconio.

Los aceros HSLA pueden dividirse en seis categorías:

• Aceros para intemperie, los cuales contienen pequeñas cantidades de elementos aleantes como cobre y fósforo para mejorar la resistencia a la corrosión.

- Aceros microaleados ferriticoperlíticos, contienen muy pequeñas adiciones de carburo o formadores de carbonitruros como niobio, vanadio y o titanio para generar endurecimiento por precipitación y refinamiento de grano.
- Aceros perlíticos as-rolled, pueden ser aceros al carbono-manganeso, pero pueden incluir también pequeñas adiciones de otros elementos aleantes para aumentar la resistencia, tenacidad, conformabilidad y soldabilidad.
- Aceros de ferrita acicular, contienen bajo carbono (menos de 0,05%). Tienen una combinación de alto límite elástico, soldabilidad, conformabilidad y buena tenacidad.
- Aceros de doble fase, tienen una microestructura de martensita dispersa en una matriz de ferrita y proveen una buena combinación de ductilidad y alta resistencia.
- Aceros con forma de inclusión controlada, proveen alta ductilidad y tenacidad mediante pequeñas adiciones de calcio, zirconio y titanio para controlar la forma de las inclusiones de sulfuro.

Estas categorías no son necesariamente grupos separados, un acero HSLA puede tener características de más de uno de estos grupos [3].

Como ejemplo de lo mencionado, en la *Tabla 3.2-1* se muestra la composición química correspondiente a el acero HSLA usado en este trabajo, el mismo fue colado en la planta de Ternium-Siderar ubicada en San Nicolás.

	Grado	С	Mn	Si	Р	S	Al
		0,081	1,350	0,170	0,013	0,005	0,049
	9540	Cr	Ti	Мо	Nb	Ni	V
		0,026	0,019	0,001	0,048	0,017	0,007

Tabla 3.2-1 - Composición química de acero HSLA fabricado en Ternium.

Dicho acero posee excelentes características en lo que respecta a su resistencia, tenacidad y soldabilidad.

Se trata de un acero de ferrita acicular y según los ensayos realizados, posee un límite elástico mayor a 400MPa y la energía de impacto absorbida a -20°C supera los 350J con una rotura completamente dúctil.

Este acero estructural está proyectado para ser utilizado en la fabricación de torres eólicas las cuales están sometidas a solicitaciones complejas. Por lo tanto, las características de soldabilidad, tenacidad, resistencia a la corrosión y tensión de fluencia son fundamentales.

3.2.3 Acero EN10025 S355

La norma técnica de referencia para la Argentina es la IRAM-IAS U 500-42 (equivalente a EN 10025-2).

El acero S355 es el material utilizado por excelencia en las torres eólicas. Este es utilizado en distintas variantes según los tratamientos termomecánicos que se le hayan aplicado.

En el caso de estudio, se seleccionó un S355J2-N, donde J2 indica el requisito mínimo de energía absorbida a determinada temperatura y N indica que debe estar normalizado.

En la *Tabla 3.2-2* se muestran las propiedades mecánicas que exige la norma para este acero para espesores de chapa entre 16mm y 40mm.

Propiedades requeridas para acero S355J2-N					
Límite elástico	Resistencia a la	Alargamiento	Energía mínima		
mínimo [MPa]	tracción [Mpa]	tras rotura [%]	absorbida a -20° [J]		
345	470 a 630	22	>27		

Tabla 3.2-2 - Propiedades del acero utilizado.

Este será utilizado en forma de plates rolados en forma de cilindros y luego soldados mediante soldadura SAW – Submerged Arc Welding (soldadura por arco sumergido).

Parte de dicho proceso puede observarse en la Figura 3.2-1.



Figura 3.2-1 - Rolado, soldadura por arco sumergido y virolas terminadas.

La ruta que sigue el material hasta convertirse en los plates utilizados es mostrada en la Figura 3.2-2



Figura 3.2-2 - Ruta de proceso para obtener los plates.

El proceso comienza introduciendo el arrabio al horno de aceración al oxígeno donde, mediante el soplado de oxígeno puro, el arrabio se convierte en acero. Luego, el acero pasa al horno cuchara donde el mismo se desulfura y se ajusta la composición química a la deseada. Teniendo el acero con la composición requerida, este pasa a la colada continua de última generación con control de la solidificación mediante la técnica de reducción suave. Por último, los planchones obtenidos se procesan termomecanicamente en un laminador reversible controlando el porcentaje de reducción por pasada y las temperaturas de horno y de laminación.

3.2.4 Laminación reversible

El proceso termomecánico de laminado se desarrolló en Laminados Industriales S.A. (LISA) dado que el laminador de Ternium-Siderar no tiene la capacidad de laminar en los anchos y espesores requeridos para la fabricación de torres eólicas.

En LISA se cuenta con un laminador reversible en el cual el planchón invierte su sentido de avance en cada pasada de laminación a diferencia del laminador de Ternium-Siderar en el cual el planchón es sometido a un tren de laminación continuo.

Actualmente, este tipo de laminador es el único instalado en el país.

3.3 Soldabilidad

3.3.1 ¿Qué es la soldabilidad?

Es la mayor o menor facilidad con que un metal permite que se obtengan soldaduras sanas y homogéneas, que respondan a la necesidad para las que fueron concebidas incluyendo códigos de fabricación.

Se tienen variadas expresiones para obtener un parámetro sobre la soldabilidad del material entre estas, la más relevante es la del carbono equivalente (CE) la cual se muestra a continuación.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

En el caso del acero utilizado en este estudio, y en base a su composición química, el mismo tiene el siguiente valor de CE.

$$CE = 0,3423$$

Un componente de gran importancia para la soldabilidad es el espesor a soldar pues tiene influencia en la templabilidad del acero. A mayor espesor soldado, aumenta la disipación de calor pues depende de la sección que lo transmite. A partir de lo antedicho, surge la siguiente expresión para obtener un valor de carbono equivalente modificado en función del espesor.

$$CE^* = CE(1 + 0,005 \text{ x e})$$

Con la cual se obtuvo un valor de carbono equivalente modificado CE^{*} =0,3857.

Como regla general, un acero se considera soldable si el carbono equivalente según la fórmula del International Institute of Welding (CEIIW) es menor a 0,4%, por lo que el acero en estudio puede estimarse como soldable. Este valor estaría indicando cómo los elementos de aleación presentes en el acero afectan las transformaciones características favoreciendo la formación de microestructuras susceptibles a fisuración por hidrógeno en la zona afectada por el calor (ZAC). La fisuración en frío se suele observar cerca del metal de soldadura donde la dureza y el contenido de hidrogeno son mayores [4].

3.3.2 Diagrama de Graville

El diagrama presentado en el *Gráfico 3-3-1* es una herramienta útil para evaluar la necesidad de precalentamiento o tratamiento térmico post-soldadura basándose únicamente en la composición química del material.

En el mismo se relaciona el porcentaje de carbono y el carbono equivalente distinguiéndose tres zonas:

Zona I: Aceros de bajo carbono y bajo endurecimiento, no susceptibles a fisuras.

Zona II: Aceros con mayor porcentaje de Carbono y bajo endurecimiento, el riesgo a fisuras en la ZAC puede ser evitado mediante el control de la velocidad de enfriamiento, por medio del aporte térmico o en menor extensión el precalentamiento.

Zona III: Aceros con elevado porcentaje de carbono y alto endurecimiento y en todas las condiciones de soldadura pueden producir microestructuras susceptibles a fisuras.



Gráfico 3.3-1 - Diagrama de Graville.

Considerando los valores de carbono equivalente y de porcentaje de carbono del acero en análisis, se observa que el mismo pertenece a la Zona I del diagrama de Graville, por lo que debería presentar excelentes propiedades de soldabilidad.

3.3.3 Selección del consumible

Para el desarrollo del metal de aporte se tiene que tener en cuenta que este disuelve un cierto porcentaje del metal base. En todos los casos es preferible el uso de aporte con hidrógeno controlado cuando se sueldan aceros de alta resistencia.

Tomando como referencia las normas AWS, se tienen solo dos especificaciones para seleccionar el aporte y el fundente para aceros HSLA con soldadura por arco sumergido, la AWS A5.17 y la AWS A5.23 [5].

A continuación, se presenta el sistema de clasificación usado por las normas en cuestión.

Indica flux



Los electrodos son clasificados en base a su composición química y los fundentes se clasifican en base a las propiedades mecánicas del metal de soldadura que se deposita.

En el caso del presente trabajo, la designación de la combinación fundente-electrodo es F7A8-EM12K que hace referencia a un fundente que producirá un metal de soldadura que tendrá una resistencia no menor a 70.000psi y que en el ensayo de Charpy V resistirá como mínimo 20ft-lb a -60°C al depositarse junto con un electrodo EM12K.

3.3.4 Precalentamiento

Consiste en aplicar calor al metal base hasta que se alcanza cierta temperatura y luego mantener dicha temperatura durante un tiempo determinado. El tener una temperatura mayor permite una difusión más rápida del hidrógeno disminuyendo las probabilidades de desarrollar fisuración en frío.

El calor necesario para el precalentamiento se aplica generalmente con sopletes de gas o calentadores de resistencia eléctrica.

Hay que tener en cuenta que, a mayores temperaturas de precalentamiento, mayor será el tiempo de enfriamiento. La cantidad de calor requerido para producir uniones soldadas libres de grietas y dúctiles depende de:

- La temperatura ambiente.
- Calor aportado por el arco.
- Disipación de calor de la junta.
- Composición química del acero (soldabilidad).
- Contenido de oxígeno del metal depositado.
- Grado de restricción en la junta.

Se cuenta con dos métodos básicos para determinar las condiciones para prevenir la fisuración en frío:

- Control de dureza en la ZAC: Se asume que la fisura no ocurrirá si la dureza en la ZAC se mantiene por debajo de ciertos valores.
- Control del porcentaje de hidrógeno: El método de control del hidrógeno se basa en la hipótesis que la fisura no ocurrirá si la cantidad promedio de hidrógeno que permanece en la junta luego que fue enfriada hasta los 50°C no excede un valor crítico que depende de la composición del acero y el grado de restricción.

Usando este método se puede estimar la temperatura de precalentamiento necesaria para permitir la difusión suficiente de hidrógeno fuera de la junta [6].

3.4 Soldadura

3.4.1 Soldadura SAW

La soldadura SAW es un procedimiento de soldadura por arco donde la unión se logra calentando con uno o varios arcos el electrodo y el metal base obteniendo una soldadura de fase líquida.

Las soldaduras en fase líquida son aquellas en las que se alcanzan temperaturas superiores al punto de fusión del material a unir y del metal de aporte que pudiera ser utilizado como consumible en la unión soldada; de este modo se genera una pileta líquida.

En la soldadura por arco sumergido, el extremo de un electrodo continuo de alambre desnudo se inserta en un montículo de fundente (flux) que cubre el área o la unión que se va a soldar, esto confiere el nombre a este procedimiento de soldadura. Se enciende el arco y un mecanismo alimentador de alambre comienza a introducir el electrodo en la unión a una velocidad controlada, y el alimentador se desplaza manual o automáticamente a lo largo de la soldadura. En la soldadura mecanizada o automática, la pieza de trabajo puede desplazarse debajo de un alimentador de alambre estacionario.

En todo momento, se alimenta fundente adicional adelante del electrodo y a su alrededor, y se distribuye continuamente sobre la unión. El calor producido por el arco eléctrico funde progresivamente parte del fundente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base, creando una pileta líquida debajo de una capa de escoria líquida. El baño fundido cerca del arco presenta mucha turbulencia y burbujas de gas ascienden rápidamente a la superficie del charco.

El fundente flota sobre el metal fundido y protege por completo la soldadura de la atmósfera de la zona de soldadura.

Aplicado a juntas a tope, se trata de un proceso de múltiples pasadas. Luego de cada pasada, se deja enfriar hasta una temperatura definida para prevenir el excesivo calor en la junta. El proceso de soldadura por arco sumergido resulta en una soldadura uniforme con una estructura de grano fina. Una de las ventajas de tener múltiples pasadas es que el calor generado genera un refinamiento parcial de grano.



En la Figura 3.4-1 se observa un esquema de un procedimiento de soldadura SAW.

Figura 3.4-1 - Procedimiento SAW.

Las desventajas de este procedimiento son el tiempo requerido para completar una unión y la distorsión que puede ocurrir en esta debido al encogimiento al momento de enfriarse. De todas formas, un buen procedimiento de soldadura puede evitar o, en su defecto, minimizar estos problemas. La estructura del metal de soldadura puede ser descripta como una dispersión de ferrita y perlita con algo de bandeado de ferrita a lo largo de los bordes de grano austeníticos. Las bandas de ferrita se eliminan con el calor entregado en las sucesivas pasadas [7].

La soldadura por arco sumergido se usa convencionalmente para largos cordones de soldadura con grandes secciones transversales. Para espesores mayores a 20 mm las fisuras en la solidificación resultan en un gran desafío.

3.4.2 Defectos encontrados en la soldadura

La mayoría de las fallas en soldadura son generalmente debidas a condiciones de soldadura inadecuadas o sobreesfuerzos en la pieza.

La fisuración en frío observada en la ZAC se da cuando la ductilidad local no es suficiente para soportar las tensiones residuales de la soldadura.

La baja ductilidad ocurre cuando la microestructura contiene fases duras y fases frágiles y la fisuración en frío se ve potenciada por el hidrógeno difundido en solución sólida que se presenta mayormente debido a el material de aporte y a un secado insuficiente del mismo.

La combinación de baja ductilidad en la ZAC e hidrógeno libre generan la peor situación.

En la *Figura 3.4-2* se observa las zonas indicadas en una junta a tope.



Figura 3.4-2 - Zonas principales en una unión soldada.

Para mantener en un nivel bajo el contenido de hidrógeno se puede hacer lo siguiente:

- Eliminar la humedad del fundente calentándolo en un horno (según las recomendaciones del fabricante).
- Quitar todo resto de aceite, grasa o suciedad del electrodo y del material base.
- Subir la temperatura de trabajo para que una mayor cantidad de hidrógeno pueda escapar durante la operación de soldadura. Esto puede hacerse continuando el "precalentamiento" hasta que se haya soldado por completo la unión, o aplicando post-calentamiento durante varias horas a la unión soldada antes de dejarla enfriar hasta la temperatura ambiente.

La fisuración en frío es fuertemente dependiente de la composición química del metal base, grandes concentraciones de carbono y otros aleantes tales como manganeso, cromo, silicio, molibdeno, vanadio, cobre y níquel tienden a aumentar la dureza y a disminuir la soldabilidad.

Las imperfecciones encontradas en la soldadura se pueden dividir en imperfecciones cortas y en imperfecciones sistemáticas.

En los casos en que la soldadura tenga 100 mm de longitud o más, las imperfecciones se consideran cortas si en los 100mm que contengan el máximo número de imperfecciones la longitud total de las mismas es menor o igual a 25 mm.

En los casos en que la soldadura mida menos de 100 mm de longitud, las imperfecciones se consideran cortas si su longitud total es menor o igual al 25 % de la longitud de la soldadura.

Las imperfecciones sistemáticas son imperfecciones que se distribuyen a intervalos regulares en la soldadura a lo largo de toda la longitud examinada, estando las imperfecciones de manera individual dentro de los límites establecidos por la norma [8].

Dos imperfecciones adyacentes, que estén separadas por una distancia inferior a la mayor medida de la imperfección más pequeña, se deben considerar como una imperfección individual.

En la Figura 3.4-3 se observan los típicos defectos que pueden encontrarse en una unión soldada.



Figura 3.4-3 - Defectos posibles en una unión soldada.

La aprobación o reprobación de la soldadura dependerá del tamaño de dichas imperfecciones y del nivel de calidad seleccionado.

3.4.3 Tenacidad de la unión soldada

La tenacidad es una medida de la cantidad de energía que puede absorber el material antes de su rotura, esta depende fuertemente del contenido de aleantes.

En la mayoría de los aceros modernos la zona de menor tenacidad es la que se encuentra cerca de la zona de fusión. La microestructura óptima para lograr una buena tenacidad en la ZAC es bainita acicular fina de bajo carbono.

La fragilización de los bordes de grano puede resultar en fractura intergranular. Este tipo de fractura por lo general se encuentra relacionada con el contenido de fósforo en el material. El fósforo tiene la tendencia a difundir a los bordes de grano lo que resulta crítico cuando se lleva a cabo un tratamiento térmico para reducir las tensiones internas [9]. Altos contenidos de ferrita acicular mejoran la resistencia y la tenacidad de la soldadura.

La formación de ferrita acicular depende de la fracción en volumen, composición, tamaño y distribución de inclusiones no metálicas en la soldadura.

Cuanto menor sea el diámetro promedio de las inclusiones, mayor será la fracción en volumen de ferrita acicular [10]. Además, el diámetro medio de las inclusiones estará más influenciado por el calor aportado que por el porcentaje de CO2 en la protección.

4 Determinación de la práctica de laminación óptima y selección del acero óptimo

4.1 Plates laminados

Ternium Siderar brinda materia prima de calidad a Laminados Industriales S.A quien se ocupa del proceso de laminación para la obtención de los plates destinados a la producción de torres eólicas.

	Dime	nsiones fi	nales	Dimensio	nes semi	elaborado	Peso	Reducción	Reducción
Grado	Espesor		Ancho	Espesor	Largo	Ancho	laminado	bajo Tnr	sobre Tnr
						[mm]	[Ton.]	[%]	[%]
	38,1	2500	6000	199	1451	2265	5,1	6	78
5045	31,7	1500	6000	199	1451	1810	4,1	12	78
	25,4	2500	6000	199	1128	1965	3,5	6	86
	31,7	2500	6000	200	1280	2255	4,5	6	83
7045	25,4	2500	6000	199	1231	1775	3,4	21	79
7045	25.4 ^ª	2500	6000	199	1115	1943	3,4	65	66
	22.2 ^a	2500	6000	199	1115	1505	2,6	61	71
	38,1	2500	6000	199	1247	2365	4,6	18	55
7540	31,7	2500	6000	198	1245	1625	3,1	23	75
7340	25,4	2500	6000	199	1247	1830	3,6	47	74
	19,1	2500	6000	198	1245	1620	3,1	75	66
0540	25.4 ^a	2500	6000	197	1314	1674	3,4	62	61

Tabla 4.1-1 - Dimensiones de semielaborados, finales y toneladas laminadas.

Dentro del procedimiento de laminación, son de gran importancia los porcentajes de reducción obtenidos al laminar por encima y por debajo de la temperatura de no recristalización (Tnr) ya que los mismos afectan significativamente las propiedades microestructurales obtenidas. En la *Tabla 4.1-1* se indican las dimensiones tanto de los semielaborados empleados como las de los plates obtenidos, detallándose el peso de material sometido al proceso termomecánico y los porcentajes de reducción tanto por encima como por debajo de la Tnr.

4.2 Metodología de trabajo

La laminación de este producto se desarrolló mediante una práctica de proceso termomecánico controlado, la cual tiene como objetivo principal refinar el tamaño de grano para una mejora simultánea de las propiedades mecánicas y la tenacidad. Para cumplimentar con una correcta receta es necesario conocer la temperatura de transformación Ar3 (transformación austenita-ferrita) la cual se puede determinar mediante expresiones analíticas ya conocidas [11].

$$Ar_3(^{\circ}C) = 910 - 273C - 74Mn - 57Ni - 16Cr - 9Mo - 5Cu$$

Todos los elementos químicos expresados en porcentaje en peso.

Teniendo en cuenta que se desarrollaron dos procesos de laminación diferentes, cuyas diferencias operativas se describen en la *Tabla 4.2-1*, en base a el marco teórico consultado, se decide realizar acciones correctivas en la segunda receta respecto de la primera para de esta forma intentar lograr la mayor cantidad de reducción posible por debajo de Tnr (mayor al 60%) sin esperas, asegurándose así la presencia de granos poligonales de ferrita finos en la matriz lo cual ayudaría a obtener la mejor combinación de resistencia y tenacidad deseada [12]. En la siguiente tabla adjunta se detallan las marcadas diferencias entre la primera prueba de laminación y la segunda.

Variables	1era prueba de laminación [ºC]	2da prueba de laminación [ºC]
T. de precalentamiento [ºC]	1170	1200
Tiempo de permanencia [min]	~400-500	~400
Reducción por debajo de Tnr [%]	0-10	>60
Esperas/frenos	Por encima y por debajo de Tnr	Por encima de Tnr

Tabla 4.2-1 - Diferencias operativas entre las dos pruebas de laminación desarrolladas.

Cada una de las muestras de los plates laminados fueron sometidas posteriormente a un exhaustivo análisis metalográfico detallando estructura resultante, tamaño de grano, nivel de bandeado, decarburación y limpieza inclusionaria. Este análisis no permite visualizar las mejoras obtenidas.

4.3 Temperaturas de precalentamiento

En la *Tabla 4.3-1* y en la *Tabla 4.3-2* se ven las temperaturas de precalentamiento utilizadas para cada plate en cada prueba de laminación y según su espesor final de laminación. Las temperaturas recomendadas son entre 1150°C y 1180°C para asegurar una completa disolución de los precipitados de elementos microaleantes y por otro lado evitar un excesivo crecimiento de grano.

Grado	Espesor [mm]	Temperatura de precalentamiento [ºC]
5045	38,1	1170
5045	31,7	1170
5045	25,4	1170
7045	31,7	1170
7045	25,4	1170
7045	25,4	1170
7540	38,1	1125
7540	31,7	1125
7540	25,4	1125
7540	19,1	1125

Grado	Espesor [mm]	Temperatura de precalentamiento [ºC]
7045	22,5	1200
7045	25,4	1200
9540	25,4	1200
9540	25,4	1200

Tabla 4.3-1 - T. de precalentamiento para la 1era prueba de laminación.

Tabla 4.3-2 - T. de precalentamiento para la 2da prueba de laminación.

Como se observa en las tablas, las temperaturas de precalentamiento en ciertos casos fueron mayores a las recomendadas.

4.4 Ensayos realizados

El producto fue sometido a diferentes ensayos y tratamientos con el objetivo de que este cumpla con las normativas exigidas. Entre ellos se pueden mencionar tratamiento térmico de normalizado a diferentes temperaturas y condiciones de ensayo, ensayos mecánicos de tracción, ensayo de impacto (Charpy V Notch) [13], tracción perpendicular a la superficie [14] (tracción en Z), y ensayos no destructivos de ultrasonido [15].

Laminación	Muestra	Grado	Espesor	Ensayo de tracción	Ensayo de	Ultrasonido	Tracción en 7
	As-Rolled			traction	Charpy		-
			25,4	Х	Х	-	-
		5045	31,7	Х	Х	Х	-
			38,1	Х	Х	-	-
			19,1	-	-	х	-
		7045	25,4	х	х	-	-
			31,7	Х	Х	-	-
			19,1	Х	Х	Х	Х
		7540	25,4	Х	Х	-	-
		7340	31,7	Х	Х	Х	-
			38,1	Х	Х	Х	Х
1era nrueba	Normalizado						
(baia		5045	25,4	Х	-	-	-
reducción			31,7	Х	-	-	-
por debajo	B		38,1	Х	-	-	-
de Tnr)		7045	25,4	Х	-	-	-
			31,7	Х	-	-	-
		5045	25,4	Х	-	-	-
			31,7	-	-	-	-
			38,1	Х	-	-	-
		7045	25,4	Х	-	-	-
			31,7	Х	-	-	-
		7540	19,1	Х	Х	-	-
	с		25,4	Х	Х	-	-
			31,7	Х	Х	-	-
		75.40	38,1	Х		-	-
	D	/540	19,1 29.1	-	X	-	-
2da prueba	As-Rolled		30.1	-	^	-	-
>60% por		7045	22,2	Х	Х	-	-
debaio de			25,4	Х	Х	-	-
Tnr)		9540	25,4	х	х	-	-

En la *Tabla 4.4-1* se indica que ensayos se realizaron sobre cada muestra según su grado y espesor.

Tabla 4.4-1 - Ensayos realizados sobre las muestras.

Donde A, B, C y D hacen referencia a las diferentes condiciones de normalizado que se llevaron a cabo en la primera prueba de laminación.

Se realizaron tratamientos térmicos de normalizado a un grupo de probetas, en un horno con atmósfera controlada (40% Nitrógeno – 40% Hidrógeno y 20% Monóxido de Carbono).

Las condiciones de normalizado fueron las siguientes:

Normalizado A: fue el primero en realizarse. Se ingresaron las probetas al horno a la temperatura de 700°C, ya que a partir de esa temperatura se puede trabajar con la atmósfera mencionada. Se calentó con una rampa promedio de 2,14 °C/min hasta los 900°C, se mantuvo 10 minutos y se enfrió al aire.

Normalizado B: Se realizó una segunda prueba de normalizado con el mismo horno y atmósfera, en diferentes condiciones de calentamiento.

Para esta prueba en particular se puso el horno en régimen a 900 °C y se introdujeron las probetas a temperatura ambiente. Al abrir la cámara del horno y con el ingreso de la masa fría de las probetas, la temperatura de este bajó. Cuando la temperatura volvió a estabilizarse en 900°C se mantuvieron 20 minutos para luego enfriarlas al aire.

Normalizado C: Utilizando el mismo horno se realizó un normalizado con atmósfera controlada a muestras de 4 plates pertenecientes al grado 7540.

Se introdujeron las probetas a temperatura ambiente con el horno a 870°C y una vez que la temperatura se estabilizó se mantuvo 20 minutos, para luego retirar y enfriar al aire.

Normalizado D: Siempre trabajando con el mismo horno, se procedió a un nuevo tratamiento de normalizado. En este caso se introdujeron 2 muestras pertenecientes a plates de grado 7540.

Se llevó el horno a una temperatura de 1000°C. Las muestras se ingresaron al mismo a temperatura ambiente (sin previa permanencia en la cámara de precalentamiento), seteando en ese instante el horno a 870 °C, se mantuvieron las probetas durante 20 minutos en su interior y finalmente se sacaron las muestras del horno y se dejaron enfriar al aire libre.

En la Tabla 4.4-2 se detallan las condiciones en las que se efectuó cada TT.

Normalizado	Lugar de ensayo	Condiciones de ensayo
Α	Durmetal tratam. térmicos	900°C 10min de permanencia
В	Durmetal tratam. térmicos	900°C 20min de permanencia
С	Durmetal tratam. térmicos	800°C 20min de permanencia
D	Durmetal tratam. térmicos	Censado horno 1000°C Aplicación termocupla 870°C 20min de permanencia

Tabla 4.4-2 - Procedimientos de normalizado.

Sobre las muestras del primer laminado se realizaron cuatro TT alterándose no solo las condiciones de trabajo, sino también, en algunos casos, se colocó una termocupla testigo perforando las probetas, para de esta forma realizar un exhaustivo control de la temperatura en el interior del material. Los objetivos de estas pruebas fueron obtener un menor tamaño de grano, la menor heterogeneidad y nivel de bandeado posible pudiéndose lograr de esta forma cumplir con las exigencias de las normativas en cuestión [16]. En él *Gráfico 4.4-1*, se aprecian las alteraciones en la microestructura del material para las diferentes condiciones de normalizado.



Gráfico 4.4-1 - Alteraciones microestructurales en diferentes condiciones de TT.

En la *Tabla 4.4-3* se observan los datos relevados para los diferentes procedimientos de laminado que se llevaron a cabo, diferenciando los porcentajes de reducción obtenidos con el laminador reversible aplicando frenos (%Re bajo TNR C/F) y sin la aplicación de estos (%Re bajo TNR S/F).

La aplicación de frenos entre pasadas resulta un parámetro de gran influencia ya que incide en el tiempo disponible para el crecimiento de grano, la disminución de temperatura entre pasadas y en el tiempo total del proceso.

Grado/Espesor	Prueba de LAM	Tiempo de permanencia	%Re bajo TNR S/F	%Re bajo TNR C/F	TFL
7045 / 25,4mm	1 ER Prueba	532 min	0%	20,7%	912ºC
7540 / 25,4mm	1 ER Prueba	405min	10%	47,6%	865ºC
7045 / 22,2mm	2 DA Prueba	395min	65%	65%	860ºC
7045 / 25,4mm	2 DA Prueba	444min	61,4%	61,4%	890ºC
9540 / 25,4mm	2 DA Prueba	476min	62,4%	68,3%	860ºC
9540 / 25,4mm	2 DA Prueba	451min	66,9%	68,9%	890ºC

Tabla 4.4-3 - Datos de laminación.

4.4.1 Ensayos de tracción

En la *Figura 4.4-1* se muestran cuatro de las probetas tracción utilizadas para determinar el material y la práctica de laminado óptimos.



Figura 4.4-1 - Probetas de tracción para selección de acero.

En la *Tabla 4.4-4* se observan los resultados obtenidos al realizar los ensayos de tracción para los distintos grados de acero y para las diferentes pruebas de normalizado. De acuerdo con los límites establecidos por norma planteados en la *Tabla 3.2-2*, los valores que se encontraron por debajo de los requerimientos se indican en rojo.

Laminación	Muestra	Grado	Espesor	Tensión de fluencia [Mpa]	Tensión de rotura [Mpa]	Alargamiento [%]
	As-Rolled					
			25,4	396	493	32
		5045	31,7	376	465	29
			38,1	335	456	36
		7045	25,4	384	472	31
			31,7	390	488	29
			19,1	467	565	28
		7540	25,4	444	553	30
			31,7	458	555	25
			38,1	393	518	25
	Normalizado)				
1era prueba		5045	25,4	313	434	37
(baja	А		31,7	326	438	37
reducción por debajo de Tnr)		7045	38,1	316	439	36
		/045	25,4	330	432	20
	В	5045	31,7	322	428	38
		5045	25,4	330	445	50
			51,7 20 1	-	-	25
		70/15	25 /	225	435	30
		7045	23, 4 31 7	335	430	33
		7540	19.1	467	565	28
			25,4	444	553	30
	С		31,7	458	555	25
			38,1	393	518	25
	_	7540	19,1	-	490	-
	D		38,1	-	460	-
2da prueba	As-Rolled					
(reducción		7045	22,2	437	505	29
>60% por		7045	25,4	401	503	27
debajo de Tnr)		9540	25,4	421	498	31

Tabla 4.4-4 - Resultados de ensayos tensiles.

A partir de los resultados anteriores, queda en evidencia el bajo desempeño en los ensayos de tracción para el acero 5045, por lo que se lo excluyo del análisis al cambiar la receta de laminación.

4.4.2 Ensayo de tracción Z

Generalmente, los aceros presentan propiedades de deformación perpendiculares a la superficie (a través del espesor) diferentes a las obtenidas en la dirección de la superficie. Esta anisotropía en las propiedades puede llevar a dificultades en estructuras soldadas, por ejemplo, desgarro laminar. [14]

No existe relación directa entre estas propiedades y la integridad de estructuras dado que el riesgo de desgarro laminar se ve afectado principalmente por el tipo de estructura y diseño y proceso de soldadura. Es por esto, que los valores mínimos de reducción de área de este estándar no pueden asegurar que no ocurrirá desgarro laminar.

Sin embargo, la reducción en el área es un buen indicador de la resistencia al desgarro laminar. Por ejemplo, el riesgo de desgarro laminar disminuye con el aumento de la reducción de área a través del espesor.

Es posible mejorar las propiedades a través del espesor mediante la mejora de la práctica de laminación.

El ensayo de tracción en Z, también denominado ensayo de delaminación interna somete a la probeta a una carga perpendicular a su superficie.

En este caso, se procedió a determinar si los plates grado 7540 cumplen con los requisitos de la norma BS 10164. Se analizaron espesores de 19,1mm y 38,1mm de los que se tomaron muestras de sus extremos, las cuales fueron luego sometidas a las condiciones de ensayo de acuerdo con lo establecido por la norma en cuestión.

Las muestras de los dos planchones se obtuvieron de Laminados Industriales S.A., una vez recibidos, sobre cada uno de ellos se efectuaron cortes en sus extremos conformando las muestras A y B según la *Figura 4.4-2*.



|--|

Figura 4.4-2 - Ubicación de las muestras.

Teniendo las muestras A y B en el laboratorio, se procedió a su mecanizado en función de lo exigido por la norma.

La Figura 4.4-3 muestra el formato de las probetas de tracción en Z según como figura en la norma.



Figura 4.4-3 - Formato de las probetas del ensayo de tracción en Z.

En la *Figura 4.4-4* se observan las probetas luego de haber sido ensayadas.



Figura 4.4-4 - Probetas del ensayo de tracción en Z.

Según la norma, para cada uno de los casos, los ensayos se realizan por triplicado, corroborando el porcentaje de estricción sufrido por el material en cada uno de ellos, midiéndose además el resultado promedio de los mismos.

De acuerdo con la calidad del material la norma específica Z15 - Z25 - Z35 y para cada uno de ellos el mínimo valor de porcentaje de reducción de área (porcentaje de estricción) que deberá sufrir el material luego del ensayo (ver *Tabla 4.4-5*).

Clases y valores mínimos de reducción de área						
	Reducciór	n de area [%]				
Clase	Clase Promedio mínimo de Valor individual					
	tres pruebas	mínimo				
Z15	15	10				
Z25	25	15				
Z35	35	25				

Tabla 4.4-5 - Calificaciones de la norma.

Si los valores están por debajo de estos mínimos de estricción el material se rechaza, caso contrario será aceptado.

Los resultados obtenidos de los ensayos fueron los que se muestran en la Tabla 4.4-6.

	Parámetros					
		Diámetro inicial	Sección inicial	Diámetro final	Sección final	Estricción
	MUESTRA 1	5,88mm	27,15mm ²	4,48mm	15,76mm ²	41,95%
Espesor:	MUESTRA 2	5,90mm	27,34mm ²	4,40mm	15,21mm ²	44,38%
Extremo A	MUESTRA 3	6,00mm	28,27mm ²	4,30mm	14,52mm ²	48,64%
	PROMEDIO					44,99%
	MUESTRA 1	6,00mm	28,27mm ²	4,20mm	13,85mm ²	51,00%
Espesor:	MUESTRA 2	6,00mm	28,27mm ²	4,55mm	16,86mm ²	42,49%
Extremo B	MUESTRA 3	5,95mm	27,81mm ²	4,50mm	15,90mm ²	42,80%
Extreme B	PROMEDIO					45,60%
	MUESTRA 1	9,90mm	76,97mm ²	7,45mm	43,59mm ²	43,36%
Espesor:	MUESTRA 2	9,95mm	77,75mm ²	6,55mm	33,69mm ²	56,66%
Extremo A	MUESTRA 3	9,90mm	76,97mm ²	6,00mm	28,27mm ²	63,27%
	PROMEDIO					54,43%
Espesor: 38,1mm Extremo B	MUESTRA 1	9,95mm	77,75mm ²	6,50mm	33,18mm ²	57,32%
	MUESTRA 2	9,95mm	77,75mm ²	6,40mm	32,16mm ²	58,63%
	MUESTRA 3	9,90mm	76,97mm ²	6,10mm	29,22mm ²	62,03%
	PROMEDIO					59,32%

Tabla 4.4-6 - Resultados de los ensayos de tracción en Z.

Los resultados dieron satisfactorios en todas las muestras (ensayadas cada una por triplicado), es decir, el porcentaje de estricción está ampliamente por encima (tanto en los valores individuales, como para valor promedio) de los que la norma solicita para poder aceptar el material, aun en el caso más exigente (Z35).

4.4.3 Ensayos de Charpy

Para cumplir con los requerimientos, el material se ensaya a -20°C, pero a modo de obtener un producto que vaya más allá de las exigencias de la norma, se evaluó también su comportamiento a -40°C, complementando el análisis también a temperatura de 0°C.

En la *Tabla 4.4-7* se muestran los resultados de los ensayos aplicados a los diferentes grados de acero para cada prueba de laminación. En rojo se indican los casos donde no se cumplió con los 27J de energía absorbida requeridos por la norma.

		Charpy longitudinal						
Grado	Fsnesor	0°		-20°		-40°	-40°	
Grado	Lapeson	Energía		Energía		Energía		
		absorbida [J]	dúctil [%]	absorbida [J]	dúctil [%]	absorbida [J]	dúctil [%]	
1era pr	ueba sin	normalizar						
	25,4	220	77	191	57	15	0	
5045	31,7	260	85	211	60	42	10	
	38,1	253	85	98	27	9	0	
7045	25,4	272	85	264	85	123	23	
7045	31,7	253	72	222	40	24	0	
	19,1	241	100	225	100	219	100	
7540	25,4	78	17	27	7	13	0	
7540	31,7	143	33	38	7	12	0	
	38,1	219	73	141	30	14	0	
1era pr	ueba con	normalizado						
	19,1	-	-	257	57	253	0	
7540	25	-	-	240	60	150	10	
	32	-	-	262	27	202	0	
2da prueba sin normalizar								
7045	22,2	-	-	249	100	139	38	
7043	25,4	-	-	279	100	139	41	
9540	25,4	-	-	>350	100	322	100	

Tabla 4.4-7 - Resultados obtenidos en los ensayos de Charpy.

Al implementar la segunda práctica de laminación con receta mejorada, se obtuvo una mejora significativa tanto en los valores de energía absorbida como en los valores de área dúctil tras rotura, superando holgadamente con los requisitos para el grado S355J2.

4.4.4 Resultados obtenidos vs requisitos establecidos por norma UNE 10025 - 2

En los *Gráficos 4.4-2* y *4.4-3*, se muestran los grados de acero que obtuvieron los mejores resultados en los ensayos de tracción para la primera y para la segunda prueba de laminación. Para complementar, en la *Tabla 4.4-8* se indican los valores que dieron origen a los gráficos descriptos.



Gráfico 4.4-2 - Porcentaje de alargamiento vs Resistencia a la tracción.



Gráfico 4.4-3 - Tensión de fluencia vs Resistencia a la tracción.

Grado	Espesor	Prueba de	Tension de fluencia	Resistencia a la	Alargamiento
Grauo	[mm]	laminación	(As Rolled)	tracción (As Rolled)	[%]
7045	25,4	1 ER Prueba 7045	396	472	32
7540	25,4	1 ER Prueba 7540	444	553	30
7045	22,2	2 DA Prueba 7045	437	505	29
7045	25,4	2 DA Prueba 7045	401	503	27
9540	25,4	2 DA Prueba 9540	423	497	29
9540	25,4	2 DA Prueba 9540	418	499	32

Tabla 4.4-8 - Valores de resistencia y fluencia para plates en condición As Rolled.

Como puede observarse, tanto los valores de fluencia y resistencia a la tracción, como los de porcentaje de alargamiento, se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma.

4.4.5 Microestructura

Según las modificaciones realizadas sobre la segunda receta de laminación respecto de la primera, se obtuvieron estructuras acordes a lo esperado, lo cual se manifestó a su vez en los resultados de los ensayos realizados sobre las muestras del material.

Esta evolución estructural que puede mencionarse como una mejora en la microestructura del producto se observa en el *Grafico 4.4-4*, en el que se detecta claramente que al trabajar con menores temperaturas finales de laminación (TFL), y porcentajes de reducción mayores a 60% por debajo de Tnr sin esperas se obtiene un producto confiable en cuanto a propiedades mecánicas, ya que de esta manera se logra obtener menor grado de bandeado, menor tamaño de grano y una cierta mejora en la homogeneidad en los mismos.



Gráfico 4.4-2 - TFL vs reducción bajo Tnr.

Ahora bien, al modificar la receta de laminación en la segunda prueba se logra obtener una mejora de la tenacidad del material, lo cual se manifiesta en el porcentaje de área dúctil medido sobre cada una de las probetas luego de efectuar sobre ellas el ensayo de Charpy correspondiente, ver *Gráfico 4.4-5*.



Gráfico 4.4-3 - Energía Absorbida Vs % Área dúctil



Figura 4.4-5 - 100% Area dúctil, material segunda prueba de laminación.

Se aprecia una notable evolución del área dúctil en ambos grados de acero, incluso para el grado 7540/9540 (aceros de química similar) el material no llega a romper luego del ensayo, por lo cual, según lo indicado en tablas anteriormente adjuntas en el informe, la energía absorbida supera los 350 Joules con un área dúctil del 100% tal como se observa en la *Figura 4.4-5*.

4.4.6 Micrografía

En la *Figura 4.4-6* se observa la micrografía obtenida al utilizar el microscopio de barrido electrónico con una muestra de acero 7540 y espesor 19,1mm previamente sometida al ensayo de Charpy. La muestra presenta un aspecto de fractura dúctil en toda su superficie detectándose la presencia de dimples (hoyuelos), típico de este tipo de fractura.



Figura 4.4-6 - Microestructura obtenida tras el ensayo de Charpy 500X y 1000X.

En la *Figura 4.4-7* se observan las micrografías obtenidas por el microscopio óptico de la misma muestra, realizándose en forma complementaria una medición de tamaño de grano (según norma IRAM-IAS U 500-122), como consecuencia de haber detectado estructuras del tipo dúplex.



Figura 4.4-7 - Microestructura por microscopio óptico 256X y 640X.

Se observó una estructura constituida por granos poligonales de ferrita proeutectoide y de perlita laminar. Se aprecian zonas en donde la constituyente ferrita presenta variación en su tamaño de grano, alternando entre un índice G = 7 – 8 (se estima 20%) y un G = 11 – 12 (se estima 80%). Donde un mayor índice G representa un tamaño de grano menor.

4.5 Análisis del proceso de laminación controlada

Una forma de evaluar el correcto comportamiento del material es analizar la resistencia que el material ofrece a ser deformado (MFS – Mean Flow Stress) en cada una de las pasadas de laminación efectuadas. Es por ello por lo que en el *Gráfico 4.5-1*, se representa lo antes mencionado, siempre apuntando a comparar plates de la primera prueba de laminación (7540 en este caso) contra un grado similar de la segunda (9540).

El descenso del MFS en ciertas pasadas puede atribuirse a que el material sufrió recristalización metadinámica durante el proceso termomecánico.

La recristalización metadinámica (MDRX, por sus siglas en inglés) se define como un proceso de recristalización estática (desarrollado después de la deformación) sin un tiempo de incubación, donde los núcleos se forman durante el proceso de recristalización dinámica previo.



Gráfico 4.5-1 - MFS (Resistencia a la deformación) vs nº de pasadas efectuadas.

En el pase número 20 para la primera prueba, se observó una acumulación de la deformación sin recristalización en las posteriores pasadas, esto generó que al finalizar el proceso de laminación quede un tamaño de grano mayor al buscado. Por el contrario, para la segunda prueba de laminación pudo observarse una disminución en la resistencia a la deformación luego del pase número 20 la cual indica que ocurrió recristalización.

4.6 Conclusiones para la práctica de laminación

De acuerdo con los desarrollos experimentales empleados, en lo que respecta a el proceso de laminación controlada y poniendo en juego los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos realizados sobre las muestras del material laminado, se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a propiedades del material y la factibilidad de optimización del proceso.

Se puede hacer hincapié en que las dos pruebas realizadas sirvieron no solo para seleccionar cual es el grado de acero con mejores atributos para dicha aplicación, sino además llegar al punto de poder establecer cuáles serían los pasos adecuados a seguir en el proceso para lograr plates dentro de los valores especificados por la normativa vigente.

Así, se puede desarrollar la *Tabla 4.6-1* que indica lo concluido en lo que respecta a los aspectos para tener en cuenta a la hora de desarrollar el proceso de laminación controlada en Laminados Industriales. La experiencia demuestra que una correcta receta de laminación sería la siguiente:

Práctica o	Práctica de laminación Proyecto torres eólicas - LISA					
Temp. de precalentamiento1150ºC-1180ºC						
Tiempo de precalentamiento	<300 minutos					
Porcentaje de reducción	Máxima reducción posible en primeras 8 pasadas >10% (objetivo 12% mínimo) Por debajo de Tnr un mínimo de 60-70% sin esperas o frenos					
Esperas/Frenos	Evitar frenos inmediatamente antes o por debajo de la temperatura de Tnr. En caso de ser necesarios, practicarlos durante los primeros pases de laminación aprovechando la rotación del planchón.					
TFL	<890ºC (objetivo 860ºC máximo)					

Tabla 4.6-1 - Práctica de correcta receta de laminación.

Desarrollando el producto de esta forma, se obtiene una notable mejora en las propiedades mecánicas del acero respecto de las primeras pruebas, lo cual es atribuible a un menor tamaño de grano, una mejora en su homogeneidad y menores valores de bandeado lo cual se refleja en los ensayos mecánicos realizados, cuyos valores obtenidos avalan lo observado microscópicamente.

Más allá de desarrollar esta receta de laminación, de aquí en adelante, es importante destacar que uno de los aspectos fundamentales a corregir son los tiempos de permanencia en horno de precalentamiento (hoy en día en los hornos de LISA es de entre 400-500min aproximadamente) ya que mayores tiempos de permanencia inducen a un aumento en el tamaño de grano austenítico, desfavorable para obtener las características buscadas. Se recomienda entonces, tener tiempos de precalentamiento menores a 300 minutos.

5 Determinación de la tenacidad y soldabilidad de la unión

5.1 Método de ensayo

- Se obtuvieron plates de acero S355-J2 con un espesor de 25,4 mm suministrados por LISA (Laminados Industriales SA).
- Previo a la soldadura se realizaron biselados en doble V según datos de fabricante de torres eólicas.
- Se soldaron los plates mediante soldadura por arco sumergido (SAW) a tope con penetración total y con el material de aporte correspondiente según las normas mencionadas anteriormente.
- Se procedió a fabricar probetas bajo norma para realizar los ensayos requeridos.

5.2 Propiedades del metal base

Previo a este trabajo, se determinaron las propiedades del metal base a soldar mediante ensayos de tracción, Charpy V, macrografías, micrografías y ensayo de ultrasonido.

5.2.1 Propiedades a la tracción del metal base

En la *Tabla 5.2-1* se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de tracción. Se denota que el metal base cumple holgadamente con lo requerido por la norma.

Tensión de	Resistencia a la tracción	Alargamiento
fluencia [Mpa]	[Mpa]	[%]
418	499	32

Tabla 5.2-1 - Propiedades del metal base obtenidas por ensayo de tracción.

5.2.2 Propiedades de tenacidad del metal base

En los resultados de los ensayos de Charpy mostrados en la *Tabla 5.2-2* y en la *Tabla 5.2-3* se observa la alta tenacidad que tiene el metal base superando ampliamente los 27J a -20°C de energía absorbida exigidos por la norma.

Charpy longitudinal a -20°C [Joules]						
1	2	3	PROMEDIO			
>350	>350	>350	>350			

Tabla 5.2-2 - Resultados del ensayo de Charpy del metal base a -20°C.

Charpy longitudinal a -40°C [Joules]					
1	2	3	PROMEDIO		
348	346	350	348		

Tabla 5.2-3 - Resultados del ensayo de Charpy del metal base a -40°C.

En este caso, las probetas no llegaron siquiera a romper lo que indica un buen comportamiento del acero a bajas temperaturas y una baja temperatura de transición dúctil-frágil.

5.2.3 Propiedades microestructurales del metal base

En la *Figura 5.2-1* se observa la microestructura del metal base usado para el presente proyecto. En la misma, se observa un tamaño de grano promedio de 19.2 μ m.



Figura 5.2-1 - Microestructura del metal base (9540).

En la *Tabla 5.2-4* se caracteriza la microestructura del metal base para diferentes secciones de una misma muestra.

En este caso, los valores de tamaño de grano se obtienen a partir de lo especificado en la norma ASTM E112 "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size".

Muestra	Microestructura	Tamaño de grano			
		% Espesor	С	34 Espesor	
Borde	Estructura orientada, con presencia de bandas de perlita laminar. Presenta tamaño de grano ferrítico heterogéneo.	7 y 9	7 y 9	7 y 9	
Centro	Estructura orientada con presencia de bandas de perlita laminar. Presenta tamaño de grano ferrítico heterogéneo	7 y 9	7 y 9	7 y 9	

Tabla 5.2-4 - Propiedades de la microestructura del metal base.

Puede observarse una dispersión de ferrita y perlita lo cual provee un buen balance de límite elástico, soldabilidad, conformabilidad y tenacidad.

5.3 Ensayos realizados

A continuación, se da una breve introducción a los ensayos practicados y los resultados obtenidos.

5.3.1 Estudio macroscópico

La soldadura de la muestra consistió en una primera pasada de soldadura MAG, y luego se terminó con diferentes pasadas de soldadura SAW. El aspecto general de la misma se aprecia en la *Figura 5.3-1*.



Figura 5.3-1 - Aspecto de la muestra analizada.

Se cortó la muestra transversalmente al cordón soldado y se preparó superficialmente. Luego, se realizó un macroataque con ácido en caliente. El resultado de este puede observarse en la *Figura 5.3-2*.



Figura 5.3-2 - Aspecto luego de macroataque.

En los macroataques realizados no se observaron anomalías de la soldadura como poros, falta de fusión ni atrapes de escoria.

5.3.2 Dureza Vickers transversal

Se llevaron a cabo ensayos de dureza Vickers para relevar el perfil de durezas en el cordón de soldadura. Los mismos se realizaron bajo la norma ASTM E92 (Standard Test Methods for Vickers Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials). En el corte transversal de la probeta se realizaron tres perfiles de durezas. En la *Figura 5.3-3* se aprecian las improntas en donde se midieron las durezas.



Figura 5.3-3 - Ubicación de las improntas de medición de dureza Vickers.

En la *Tabla 5.3-1* se detallan los valores de durezas correspondientes a los tres, los valores recuadrados con color gris oscuro corresponden a las zonas afectadas por el calor (ZAC).

Línea cara superior	1	2	3	4	5	6	7
	138	146	171	172	170	180	180
	8	9	10	11	12	13	
נחען	182	170	183	190	146	144	
Línea	14	15	16	17	18	19	20
Linea central [HV]	155	153	181	188	165	188	186
	21	22	23	24	25		
	182	183	181	155	157		
	26	27	28	29	30	31	32
Línea cara	147	169	181	190	184	202	202
inferior [HV]	33	34	35	36	37	38	39
	170	185	190	192	158	173	-
	40	41					
	145	139					

Tabla 5.3-1 - Valores de dureza Vickers medidos.

Se puede observar que el metal base ronda en promedio los 148 HV y las durezas de las zonas ZAC están entre los 163 -184 HV, superándolo un poco en la línea central de mayor segregación.



A continuación, en el *Gráfico 5.3-1 se* muestra la distribución de valores de dureza en función del sector donde se realizó el barrido.

Gráfico 5.3-1 - Valores de dureza medidos.

Resulta importante no superar valores de dureza superiores a 250HV ya que esto indicaría la presencia de fases duras. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios al no haberse superado los 190HV en ninguna de las mediciones.

5.3.3 Análisis metalográfico

Para la observación mediante microscopía óptica se preparó la superficie del corte transversal y se la atacó con reactivo Nital para el revelado de la estructura metalográfica.

En la *Figura 5.3-4* se puede observar las distintas pasadas que constituyen la soldadura de la muestra. Siendo las zonas 1, 2 y 3, las pasadas de soldadura SAW, las zonas MB zonas correspondientes al metal base y la zona MA la zona de metal de aporte por soldadura MAG.



Figura 5.3-4 - Zonas en la muestra de soldadura.

Aporte 1: Granos columnares constituidos por ferrita acicular con perlita en estado de esferoidización intermedio, en borde de grano se aprecia ferrita poligonal (*Figura 5.3-5*)



Figura 5.3-5 - Detalle microscópico zona 1.

Zona ZAC entre material de aporte 1 y metal base 1 (MB1): Granos bastos compuestos por placas de ferrita proeutectoide con perlita en estado de esferoidización intermedio y ferrita poligonal en límite de grano (*Figura 5.3-6*).



Figura 5.3-6 - Detalle microscópico zona ZAC entre aporte 1 y MB1.

Metal base (MB1): Granos poligonales de tamaño heterogéneo de ferrita proeutectoide con bandas de perlita laminar (*Figura 5.3-7*).



256X

640X

Figura 5.3-7 - Detalle microscópico MB1.

Aporte MAG: Granos columnares constituidos por ferrita acicular con vestigios de perlita, se observa ferrita poligonal en borde de grano (*Figura 5.3-8*).





Zona ZAC entre material de aporte MAG y metal base 1 (MB1): Granos bastos compuestos por placas de ferrita proeutectoide con perlita en estado de esferoidización intermedio en límite de grano (*Figura 5.3-9*).



Figura 5.3-9 - Detalle microscópico zona ZAC aporte MAG con MB1.

Aporte 3: Granos columnares constituidos por ferrita acicular y perlita en estado de esferoidización intermedio, con ferrita poligonal y del tipo Widmanstatten en borde de grano (*Figura 5.3-10*)



Figura 5.3-10 - Detalle microscópico aporte 3.

Zona ZAC entre material de aporte 3 y metal base 1 (MB1): Granos bastos compuestos por placas de ferrita proeutectoide con perlita en estado de esferoidización intermedio (*Figura 5.3-11*).



Figura 5.3-11 - Detalle microscópico zona ZAC entre aporte 3 y MB1.

Zona ZAC entre material de aporte 1 y metal base 2 (MB2): Granos bastos constituidos por placas de ferrita proeutectoide con perlita en estado de esferoidización intermedio y ferrita poligonal en límite de grano (*Figura 5.3-12*).



Figura 5.3-12 - Detalle microscópico Zona ZAC entre aporte 1 y MB2.

Metal base 2(MB2): Granos poligonales de tamaño heterogéneo de ferrita proeutectoide con bandas de perlita laminar (*Figura 5.3-13*).





Zona ZAC entre material de aporte MAG y metal base 2 (MB2): Granos bastos compuestos por placas de ferrita proeutectoide con perlita en estado de esferoidización intermedio (*Figura 5.3-14*).



Figura 5.3-14 - Detalle microscópico zona ZAC de aporte MAG y MB2.

Aporte 2: Granos columnares constituidos por ferrita acicular y perlita en estado de esferoidización intermedio, con ferrita poligonal y del tipo Widmanstatten en borde de grano (*Figura 5.3-15*)



Figura 5.3-15 - Detalle microscópico aporte 2.

Zona ZAC entre material de aporte 2 y metal base 2 (MB2): Granos bastos constituidos por placas de ferrita proeutectoide con perlita en estado de esferoidización intermedio y ferrita poligonal en límite de grano (*Figura 5.3-16*).



Figura 5.3-16 - Detalle microscópico zona ZAC entre aporte 2 y MB2.

Las técnicas usadas para mantener el tamaño de grano pequeño incluyeron el agregado de aleantes y bajas temperaturas finales en el laminado en caliente.

El control del tamaño de grano se realizó microaleando con V y Nb que producen carburos muy finos. Éstos limitan la recristalización de la austenita y/o el crecimiento de grano durante la laminación en caliente que finaliza a bajas temperaturas y como resultado la ferrita que se forma desde la austenita en el enfriamiento es muy fina.

En general, se obtuvieron altos contenidos de ferrita acicular lo que mejora la resistencia y la tenacidad de la soldadura.

Las estructuras Widmanstatten encontradas son típicas en aceros hipoeutectoides enfriados a velocidades cercanas a la crítica, como sucede en la soldadura. La ferrita acicular es un fino constituyente Widmanstatten, el cual es nucleado con una óptima dispersión intergranular de partículas de óxidos, sulfuros y silicatos. La naturaleza bloqueante de la ferrita acicular junto con tamaños de grano chicos, proveen una máxima resistencia a la propagación de grietas por clivaje.

Desde el punto de vista metalográfico, es de gran importancia no haber observado estructuras de transformación del tipo bainitas y martensitas en las zonas afectadas por el calor, ya que se trata de estructuras indeseables debido a su fragilidad. Esto se refleja también en las durezas medidas, al no haberse encontrado valores que superen los 250HV.

5.3.4 Charpy V

El ensayo de Charpy V fue llevado a cabo bajo la norma ASTM E23 (Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials).

Con el mismo se buscó relevar la tenacidad de la unión soldada tanto en la ZAC como en el metal de aporte (MA).

Se realizaron ensayos por triplicado a 0°C, - 20°C y -40°C en la ZAC y en el MA según lo exigido por la norma AWS D1.1 (ver Figura), totalizando 18 probetas Charpy Tipo Standard (entalla "V" 10x10x55) ensayadas. Para llegar a las temperaturas de ensayo, se utilizó como medio refrigerante una mezcla de hielo seco y alcohol etílico.



Figura 5.3-17 - Ubicación de las probetas de Charpy.

En la *Tabla 5.3-2* se presentan los resultados de energía absorbida, además del porcentaje de área de fractura dúctil.

	0°C		-20°	с	-40°C	
Zona	Energía absorbida [J]	Area dúctil [%]	Energía absorbida [J]	Area dúctil [%]	Energía absorbida [J]	Area dúctil [%]
ZAC	214	92	190	95	201	95
МА	141	70	120	42	21	5

Tabla 5.3-2 - Resultados de energía absorbida y área de fractura dúctil.

A la temperatura de -20°C todos los ensayos superan los 27 Joules determinados como valor límite mínimo para el material base (Charpy longitudinal según European standard steel S355N-J2).

Los valores más bajos obtenidos se encontraron para las probetas extraídas en MA a la temperatura de -40°C. Esta baja significativa encontrada en el valor de energía absorbida por el metal de aporte a -40°C indica que se dio transición dúctil/frágil a una temperatura superior a la del resto de la pieza, aun así, se sigue cumpliendo con las propiedades exigidas para el material.

5.3.5 Tracción

El ensayo de tracción fue llevado a cabo bajo la norma ASTM E8 (Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials). Los mismos fueron realizados en una maquina universal de ensayos Baldwin, modelo 400.000 B.T.E. serie nº 400BTE-1001, capacidad máxima: 200.000 kgf (se utilizaron las escalas de 40.000 kgf y 200.000 kgf.

Por norma, los ensayos se realizaron por triplicado buscando relevar el límite de fluencia, la resistencia a la tracción y la zona de rotura de la unión soldada.

En la Tabla 5.3-3 - Resultados de los ensayos de tracción. se tienen los valores obtenidos en cada ensayo.

Ensayo	Fluencia [Mpa]	Resistencia a la tracción [Mpa]	Lugar y tipo de rotura
1	392	502	Dúctil fuera de soldadura (Figura 5.3-18)
2	356	502	Dúctil fuera de soldadura (Figura 5.3-19)
3	353	503	Dúctil fuera de soldadura (Figura 5.3-20)





Figura 5.3-18 - Aspecto de la probeta 1 traccionada.



Figura 5.3-19 - Aspecto de la probeta 2 traccionada.



Figura 5.3-20 - Aspecto de la probeta 3 traccionada.

Las tracciones realizadas permiten determinar que la fluencia supera los 345 MPa y la resistencia a la tracción se encuentra en el rango de 470-630 MPa (valores establecidos según norma S355 para plates de acero de uso estructural).

En ninguna de las probetas la rotura se produjo en la soldadura o zona afectada por el calor.

5.3.6 Plegado lateral

El ensayo de plegado fue llevado a cabo bajo la norma ASTM E190 (Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds).

Se mecanizaron probetas con dimensiones de 3/8" de ancho x 250mm de largo x el espesor de la chapa (25,4 mm).

El mismo consistió en plegar mediante un mandril de 38mm de diámetro 2 probetas de la unión soldada para realizar un examen visual para la aprobación de la unión.

En la Figura 5.3-21 se muestran las probetas luego de haber sido ensayadas.



Figura 5.3-18 - Probetas luego del ensayo de plegado lateral.

En la figura anterior se observa la zona del cordón de soldadura luego de haber plegado la probeta. Ambas muestras presentaron resultados satisfactorios al no haberse producido fisuras luego del ensayo, lo que indica un buen desempeño del acero frente a la soldadura.

6 Conclusiones

Sin duda los aceros HSLA tienen una gran aplicación actual. Junto con sus propiedades y las mejoras que se podrán alcanzar en el futuro se prevé que su uso crezca linealmente con el tiempo. Es por esto, que la caracterización de la soldabilidad y la tenacidad de estos es de gran importancia.

Dentro de los procesos de soldadura existentes, la soldadura SAW representa un método moderno y con buenos resultados por lo que hoy en día se considera como la mejor opción al momento de soldar este tipo de aceros si se busca tanto calidad en la unión como alta productividad. Se deberá tener especial atención al momento de definir el procedimiento de soldadura ya que este determinará las propiedades finales de la unión y la probabilidad de encontrar defectos en la misma.

El desarrollo del trabajo permitió, a partir de diferentes espesores y grados de acero, establecer un procedimiento de laminación óptimo y seleccionar el grado de que mejor se adapta a los requerimientos

para el acero más utilizado en la fabricación de torres eólicas (S355J2). Para determinar lo antedicho, se llevaron a cabo diferentes ensayos mecánicos. Los ensayos de tracción permitieron perfeccionar la receta de laminación y excluir grados de acero del estudio. Se realizaron también ensayos de tracción perpendicular a la superficie (tracción Z) para determinar la resistencia al desgarro laminar, obteniendo resultados satisfactorios en todos los casos ensayados. Por último, se estudió la tenacidad del acero mediante ensayos de Charpy y se encontró una mejora significativa con la receta de laminación mejorada.

A partir de los resultados obtenidos en todos los ensayos, se puedo determinar que el grado 9540 con la práctica de laminación mejorada, es el acero que mejor cumple con las exigencias para el grado S355J2. Es de gran importancia el seguimiento de los procedimientos desarrollados en LISA S.A. para lograr una optimización continua.

El acero obtenido en LISA S.A. (grado 9540) fue enviado a una metalúrgica (MISA S.A.) donde se lo biseló y luego soldó con los mismos parámetros y condiciones en que se lo realiza para torres eólicas para luego someterlo a ensayos mecánicos y de ultrasonido. Con los ensayos de tracción realizados, se obtuvieron valores dentro de los márgenes exigidos por norma y con fractura dúctil y fuera de la zona de soldadura. Los ensayos de Charpy dieron también valores dentro de lo exigido por norma, pero con bajos valores de energía absorbida en la zona del metal de aporte a -40°C, lo cual indica que se dio transición dúctil-frágil en esa región. Por último, se realizaron ensayos de plegado para los cuales no se detectaron fisuras luego del ensayo.

La obtención de resultados satisfactorios garantiza la factibilidad de utilización de este acero en el mercado.

La baja explotación del recurso eólico en el país, junto con las políticas favorables para la implementación de la energía eólica, representan una gran oportunidad para el desarrollo de este tipo de energía y así también para la incorporación del acero desarrollado en este trabajo.

Es menester informar al clúster eólico argentino sobre los avances realizados en la fabricación de materia prima nacional para torres eólicas para que las empresas encargadas del diseño de estas lo tengan en consideración.

7 Comentarios finales

El presente trabajo ha sido enriquecedor en lo académico, aprendiendo temas fuera del plan de estudios y afianzando conocimientos adquiridos y en lo personal, lidiando con múltiples empresas y expertos, lo que me aporto una visión global del mercado del acero y el de las torres eólicas.

8 Referencias

[1] Integración energética argentina S.A. – Energías renovables Recuperado de http://www.enarsa.com.ar/renovables

[2] Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación. – Recuperado de http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/norma.htm

[3] HSLA Steels – ASM-International. 2001

[4] Soldabilidad de los aceros Recuperado de https:/metfusion.wordpress.com/2013/08/10/soldabilidad-de-los-aceros.

[5] AWS D1.1 - Structural Welding code.

[6] Guía de métodos alternativos para determinar el precalentamiento en la soldadura de aceros estructurales – INTI.

[7] Fracture Toughness and Fatigue Properties of Steel Plate Butt Joints Welded by Submerged Arc and Electroslag Welding Procedures – James D. Culp.

[8] UNE-EN ISO 5817 - Uniones soldadas por fusión de acero, níquel, titanio y sus aleaciones.

[9] Weldability of HSLA steels - Compañía brasilera de metalurgia y minería.

[10] Weld metal mechanical and microstructural properties in flux-cored-arc-welding of a structural steel-Indian Institute of science.

[11] Flat Rolling Fundamentals – Vladimir B. Ginzburg, pp31-32

[12] Determination of recrystallization stop temperature of an HSLA Steel – Prabal Kumar Ray.

[13] ASTM E23 – Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.

[14] BS EN 10164 - Steel products with improved deformation properties perpendicular to the surface of the product.

[15] UNE _EN 10160 – Examen por ultrasonidos de los productos planos de acero de espesor igual o superiores a 6mm (Método de reflexión).

[16] Caracterización de plates de acero F36 por proyecto de construcción de torres eólicas. W. Chiapparoli, D. Cavaleri, M.Bertucelli - Instituto Argentino de Siderurgia.