

## ANÁLISIS DE FALLA DE HOJAS DE SIERRA

**Alejandro Burgueño<sup>(1)</sup>, Hernán G. Svoboda<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Laboratorio de Soldadura, Centro de Mecánica, Colectora de Av. General Paz 5445, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

(Tel: 5411-47246200 int: 6517), [burgueno@inti.gov.ar](mailto:burgueno@inti.gov.ar)

<sup>(2)</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materiales y Estructuras, Las Heras 2214, CONICET, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

(Tel: 5411-45143009), [hsvobod@fi.uba.ar](mailto:hsvobod@fi.uba.ar)

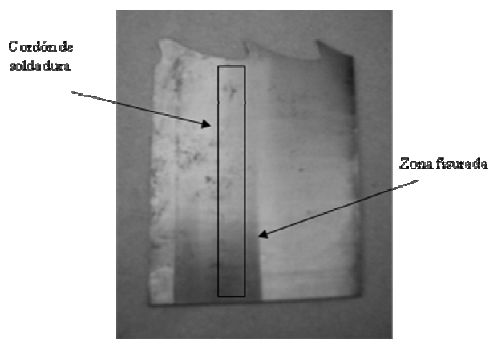
**Palabras clave:** acero, soldadura, zona afectada por el calor, martensita, fisuración asistida por hidrógeno

### RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el análisis de falla de una hoja de sierra sinfín de acero, utilizada en la industria maderera. Estas herramientas de corte se fabrican a partir de un fleje de chapa de 1 mm de espesor de acero de alto carbono al que se le mecanizan los dientes, luego se suelda en sus extremos, se le realiza un tratamiento térmico post-soldadura y se efectúa el mecanizado final. La falla se produce en servicio con cierta frecuencia, observándose fisuras en la zona de la unión soldada. El objetivo del presente trabajo fue determinar la causa probable de la falla de hojas de sierra sinfín analizando los fenómenos involucrados en la ocurrencia de la misma, a fin de diseñar medidas correctivas. Se analizaron distintas muestras correspondientes a diferentes etapas del proceso de fabricación. Se determinó la composición química del material. Se analizó la macro y microestructura del metal base y de la unión soldada, mediante técnicas de microscopía óptica (LM) y de microscopía electrónica de barrido (SEM). Se realizaron perfiles de microdureza (HV1kg) y análisis de las superficies de fractura. El material empleado para la fabricación de las hojas de sierra es un acero de alto carbono del tipo SAE1070. El proceso de soldadura empleado es GMAW mecanizado, empleando un alambre macizo ER70S6 de 0,8 mm de diámetro y mezcla Ar-20%CO<sub>2</sub> como gas de protección. Las fisuras se producen en forma transversal al eje principal del fleje, paralelas al cordón de soldadura. Se ubican en la zona afectada por el calor de grano grueso, cercanas a la línea de fusión y estarían asociadas a las tensiones de tracción que sufre el componente en servicio, sumadas a las tensiones residuales del proceso de soldadura. En dicha zona se detectó una estructura martensítica de alta dureza. La superficie de fractura en la etapa inicial es del tipo intergranular. La fisuración frío, asistida por hidrógeno es típica en la soldadura de este tipo de aceros de alto contenido de carbono. Debido a lo observado se habría producido fisuración en frío al finalizar la soldadura en la zona afectada por el calor. Estas fisuras durante el servicio habrían crecido por fatiga hasta atravesar el espesor de la hoja de sierra. Asimismo, se identificaron diferentes defectos asociados a un procedimiento de soldadura deficiente. A partir de los resultados obtenidos se propusieron medidas correctivas a fin de evitar la ocurrencia de dichas fallas en las hojas de sierra.

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analizó la causa probable de la falla de hojas de sierra sinfín utilizadas en la industria maderera. Para la fabricación de estas hojas de sierra se emplea un fleje de acero de alto carbono de, aproximadamente, 8 metros de longitud, 10 cm de ancho y 1 mm de espesor. Sobre este fleje se mecanizan los dientes y luego se unen sus extremos mediante soldadura. Durante el servicio se producen fisuras paralelas al cordón de soldadura que atraviesan el espesor. Dichas fisuras se localizan en la zona central, respecto al ancho del fleje y junto al cordón de soldadura. En la figura 1 se observa una de las muestras fisuradas recibidas.



**Figura 1.-** Muestra recibida fallada en servicio.

Estos flejes son soldados empleando un proceso semiautomático con alambre macizo y protección gaseosa (GMAW) que ha sido mecanizado. El electrodo utilizado es clasificado según la norma ANSI/AWS A5.18 como ER70-S6 de 0,8 mm de diámetro. Como gas de protección se utiliza la mezcla Ar-18%CO<sub>2</sub>. El caudal del mismo ronda los 5 L/min. La junta se precalienta mediante el calentamiento de un respaldo de cobre, que también se emplea como cubrejunta, sin medir la temperatura de precalentamiento.

Posteriormente al proceso de soldadura se realiza un tratamiento térmico a aproximadamente 500°C durante 5 minutos. El calentamiento se produce mediante soplete.

De acuerdo con la información suministrada por el fabricante, las sierras operan a temperatura ambiente durante 7 a 8 horas diarias. En general, la falla se da alrededor de 25 a 30 días de servicio.

El objetivo del presente trabajo es determinar la causa probable de la falla de hojas de sierra sinfín. Asimismo la comprensión de los fenómenos involucrados en la ocurrencia de la falla de dicho elemento permitirá diseñar medidas correctivas durante el proceso de fabricación tendientes a evitar dichas fallas en servicio.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A fin de determinar la causa probable de la falla en estudio se realizaron diversos ensayos sobre una serie de muestras recibidas por parte del solicitante.

Se recibieron muestras correspondientes a las distintas etapas del proceso de fabricación: como soldada, con tratamiento térmico de revenido, con y sin amolado del cordón y muestras falladas en servicio. Todas estas muestras fueron fabricadas de acuerdo a los procedimientos usuales de fabricación. También se estudiaron muestras realizadas exclusivamente para este estudio.

Se determinó la composición química del material base empleado para la elaboración de las hojas de sierra.

Se realizó la caracterización macroestructural de la soldadura observándose el perfil del cordón y la presencia de defectos. Asimismo se prepararon probetas metalográficas para la caracterización microestructural, tanto del material base como de la soldadura (Zona Afectada por el Calor y Metal de Soldadura).

Se realizaron ensayos de microdureza Vickers en las distintas zonas (metal base, ZAC y MS), para las distintas muestras analizadas (como soldada, con revenido, fallada en servicio).

Asimismo, se realizó un análisis cualitativo del sistema de tensiones actuantes en servicio y su relación con los defectos hallados.

Finalmente, se analizaron las fisuras producidas, a través de análisis fractográfico con microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1.- Composición química

La Tabla I muestra el resultado del análisis químico del material base, expresados en porcentaje en peso (wt%).

**Tabla I.** Composición química del material base.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0,71	0,65	0,17	0,034	0,002	0,10	0,10	0,08

Los resultados mostraron que se trata de un acero de alto contenido de carbono, sin presencia significativa de otros aleantes, correspondiente a un SAE/AISI 1070. Sin embargo el valor del fósforo se presenta algo elevado. En general se limita el contenido máximo de este elemento ya que el mismo es fragilizante especialmente para aceros de alto carbono en estado templado y revenido [1].

A partir de esta información se calculó el carbono equivalente del material [2], el cual es CE= 0,89 y la temperatura de inicio de transformación martensítica Ms=210°C [3]. Materiales con este

valor de carbono equivalente presentan problemas de soldabilidad, por lo que se requiere medidas para evitar fenómenos de fisuración asistida por hidrógeno, tales como precalentar la junta, entre otras [4].

En cuanto al metal de soldadura, debido a que se empleó para la realización de las uniones soldadas un alambre macizo del tipo ANSI/AWS ER70-S6, que corresponde a un acero de bajo carbono, se tiene por el efecto de dilución, un contenido de carbono medio.

### 3.2.- Observación visual y macrográfica

La muestra fallada en servicio se observó macroscópicamente en la zona fisurada. En la figura 2 se puede ver un detalle una de las fisuras observadas.

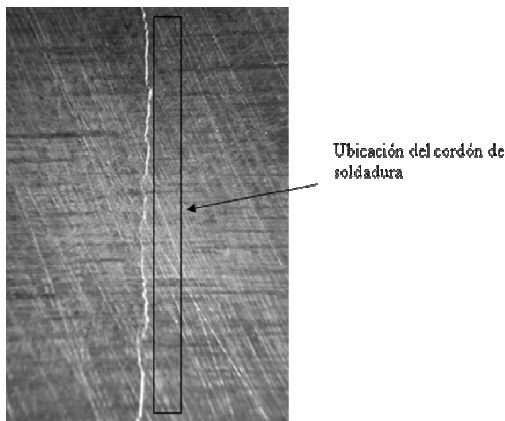


Figura 2. Detalle de una fisura observada.

La foto corresponde a la fisura que atraviesa todo el espesor de la hoja de sierra. Las rayas en la superficie se originan al momento de amolar la sobremonta y la raíz del cordón en el proceso de fabricación. La fisura presenta una orientación paralela al cordón de soldadura, ubicada en la zona central del ancho de la hoja de sierra.

Asimismo, se observó una curvatura de la hoja de sierra, asociada con la deformación durante el servicio, indicando la zona traccionada de la hoja al curvarse elásticamente sobre la polea en la cual trabaja. Esto indicaría el lado de inicio de la fisura, en relación a la zona que trabajó en tracción. En este sentido, la fisura habría comenzado del lado traccionado y se propagó a través del espesor hasta alcanzar el lado opuesto.

Cabe destacar que la zona donde se presenta la fisura (centro del ancho de la hoja de sierra) coincide con aquella donde las tensiones residuales de soldadura, tanto longitudinales como transversales, son de tracción y máximas [4]. A su vez, la hoja de sierra trabaja con una cierta tensión sobre las poleas, que produce la tracción de la unión soldada.

Las tensiones actuantes sobre la hoja de sierra que podrían haber producido las fisuras observadas están asociadas a la superposición de las tensiones residuales del proceso de soldadura y a las tensiones de trabajo. Estas últimas se componen de la tensión de montaje y las tensiones cíclicas de trabajo, presentando dos ciclos por vuelta. Debido al tipo de cargas se tiene una sollicitación cíclica que podría llevar a fallas por fatiga.

Como ya fue mencionado, también se contó con muestras soldadas especialmente para el desarrollo de este trabajo.

En la figura 3 se ve una fotografía de la muestra soldada y tratada térmicamente.

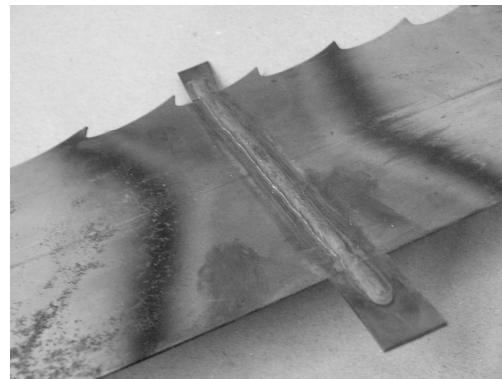


Figura 3. Fotografía de dos muestras sin amolar.

Como puede verse en la figura, la geometría del cordón no es satisfactoria, presentando una excesiva sobremonta y un ángulo de mojado muy pobre.

Asimismo, se observa una cantidad excesiva de metal depositado para el espesor de la chapa. A su vez, en algunas de estas muestras se observaron fisuras en el cordón de soldadura. En la figura 4 se pueden ver algunas de estas fisuras.



Figura 4. Fisuras en el cordón de soldadura.

Estos defectos no tendrían relación con la falla en

estudio dado que la sobremonta se elimina previamente a la puesta en servicio de las hojas de sierra, sin embargo, ponen de manifiesto deficiencias en el procedimiento de soldadura. También se encontraron defectos geométricos en el cordón de soldadura los cuales están asociados a la cantidad de material depositado, a los parámetros de proceso y al mojado del metal de soldadura sobre el material base. En las figuras 5 y 6 se observan dichos defectos.

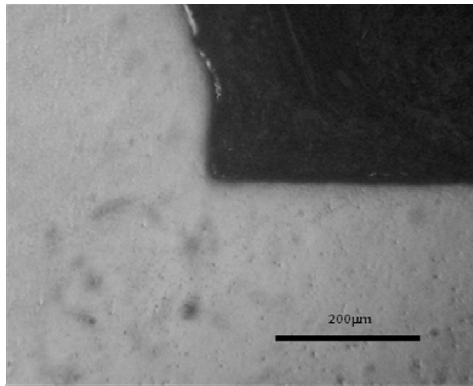


Figura 5. Ángulo de contacto en el talón del cordón.

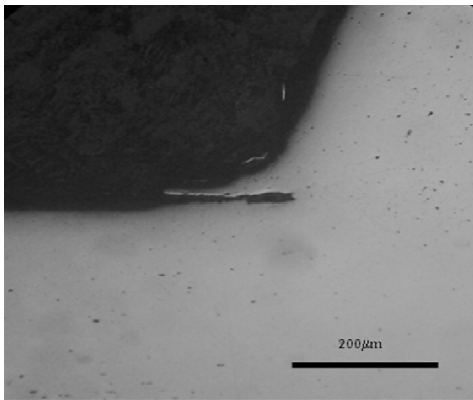


Figura 6. Defecto “metal frío” en el talón del cordón.

Estos defectos actúan como concentradores que incrementan el valor de las tensiones residuales que se producen durante la soldadura del fleje. Se han reportado en la literatura problemas de fisuración en frío asociados a un ángulo de contacto muy agudo en el talón del cordón de soldadura [4]. Asimismo, defectos del tipo “metal frío” también producen concentración de tensiones que en condiciones de trabajo asociadas a cargas cíclicas afectan fuertemente la vida en servicio [4]. En este sentido, podrían producirse fisuras en frío durante el enfriamiento a partir de dichos concentradores que no sean removidas durante el amolado.

### 3.3.- Caracterización microestructural

A partir de una de las muestras falladas se extrajeron cortes transversales para la preparación de probetas metalográficas.

En la figura 6 se observa la microestructura tanto del metal de soldadura como de la zona afectada por el calor de la muestra fallada.

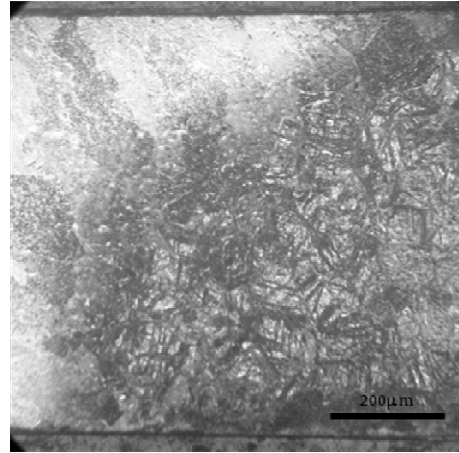


Figura 6. Microestructura del metal de soldadura y de la ZAC.

La microestructura del material base consiste en martensita revenida. La microestructura del metal de soldadura está constituida principalmente por granos columnares con distintas morfologías ferríticas (ferrita acicular, ferrita con segundas fases alineadas y no alineadas, etc.).

La zona afectada por el calor presenta una microestructura constituida por martensita revenida, con una importante zona de grandes granos (Zona Recristalizadas de grano Grueso - ZRG) seguida por una estructura mucho más fina (Zona Recristalizada de grano Fino - ZRF).

En la figura 7 se puede observar la zona fisurada de la muestra fallada en servicio.

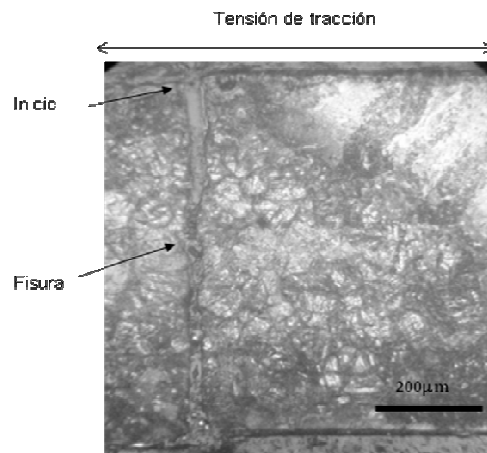
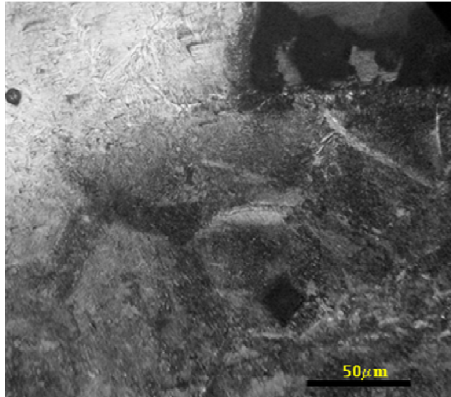


Figura 7. Microestructura en la zona de la fisura pasante.

Como puede verse en esta figura la fisura inició en la ZAC-ZRG, en la zona del talón del cordón y se propagó en forma ortogonal a la dirección de aplicación de las tensiones de tracción a través de la zona afectada por el calor. Esta zona es la de mayor dureza y fragilidad debido a la presencia de un tamaño de grano grande.

Asimismo, se analizaron muestras soldadas a las que no se les removió el cordón de soldadura. En la figura 8 se puede ver un corte transversal de una de estas muestras.

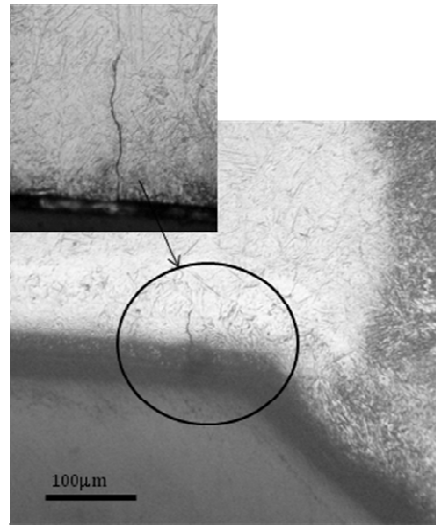


**Figura 8.** Microestructura en la zona del talón de la soldadura.

Se puede apreciar que el ángulo de mojado entre el cordón y la superficie del fleje es muy agudo, menor de 90°. Esta geometría de cordón no es deseable por el efecto concentrador de tensiones que implica. A su vez, se puede ver el tamaño de grano grande (alrededor de 100 micrones) obtenido en la ZAC-ZRG.

En este sentido, dicha zona es la más susceptible a la fisuración en frío durante la soldadura debido a la presencia de una microestructura de alta dureza y fragilidad como la martensita de alto carbono, tamaño de grano grueso, tensiones residuales, mayor contenido de hidrógeno difusible desde el metal de soldadura y la presencia de un concentrador de tensiones relativamente severo en el talón [5,6]. En este caso el nivel de hidrógeno difusible no es elevado debido a que el consumible es un alambre macizo que introduce bajos niveles de dicho elemento. Sin embargo la limpieza del alambre y el caudal de gas de protección juegan también un rol importante al respecto del contenido de hidrógeno difusible en el metal de soldadura. El caudal de gas empleado para en este procedimiento (5 L/min) es significativamente menor que lo usualmente recomendado (12 a 18 L/min).

En muestras que no se emplearon en servicio, en condición como soldada, se detectaron fisuras nucleadas desde la superficie en la ZAC-ZRG. En la figura 9 se puede ver una de ellas, en la ZAC cercana a la raíz.



**Figura 9.** Fisura nucleada desde la superficie en la ZAC-ZRG, cercana a la raíz.

Como puede verse, esta fisura se produjo en la ZAC-ZRG en una muestra sin tratamiento térmico. Esto indica que la fisuración se produjo luego de soldar, presumiblemente, según un proceso de fisuración asistida por hidrógeno.

Defectos como estos no habrían sido removidos con el amolado debido a la ubicación y a la magnitud de los mismos. Esto indicaría que las hojas de sierra podrían haber sido puestas en servicio con defectos pre-existentes, que reducen su vida útil.

En cuanto a la microdureza, en la tabla II se muestran los resultados de microdureza Vickers medidos en las distintas zonas de las diferentes probetas analizadas (como soldada y con tratamiento térmico de revenido). Se puede apreciar el efecto del tratamiento térmico (TTPS) sobre la disminución de la dureza, principalmente en la ZAC (de  $\approx 500$  HV a  $\approx 360$  HV).

**Tabla II.** Microdureza Vickers (HV1kg) en el metal base (MB), la ZAC y el metal de soldadura (MS) con y sin tratamiento térmico post soldadura (TTPS).

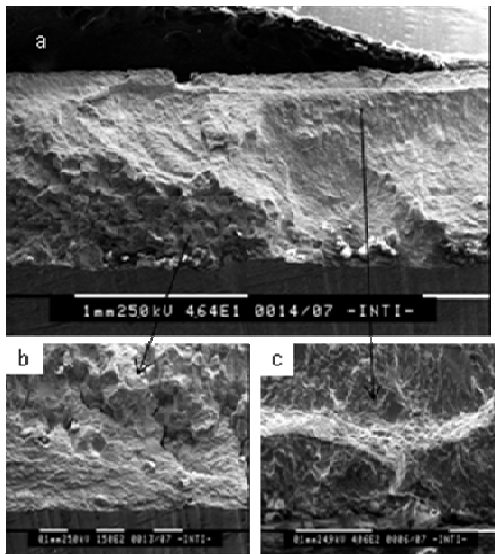
Condición	HV <sub>MB</sub>	HV <sub>ZAC</sub>	HV <sub>MS</sub>
Como soldado	482	503	301
Con TTPS	453	365	260

La disminución de dureza observada está asociada al revenido de la martensita en la ZAC. En el metal de soldadura y en el metal base no se presentan variaciones significativas. En general se admite que para valores menores a 350HV en la ZAC la susceptibilidad a la fisuración asistida por hidrógeno es baja. A su vez se confirma que luego de la soldadura la dureza en la zona afectada por el

calor es muy elevada superando los 500HV. En cuanto al alivio de tensiones, debida a la corta duración de dicho tratamiento, no sería significativa la disminución de dichas tensiones residuales, siendo habitual tratamientos de 650°C durante por lo menos 1 hora hasta 4 horas, para lograr dicho objetivo [5]. A su vez, el nivel de tensiones residuales esperado para esta soldadura sería elevado debido al volumen de material aportado, a pesar de presentar un bajo espesor.

### 3.4.- Fractografía

A fin de caracterizar las superficies de fractura asociadas a las fisuras, las muestras falladas en servicio se cortaron y se observaron al microscopio electrónico de barrido (SEM). Imágenes de microscopía electrónica de barrido al respecto se pueden ver en la figura 11.



**Figura 11.** Imágenes SEM de la superficie de fractura de la falla. a) Imagen general, b) superficie de fractura intergranular, c) fractura dúctil del último ligamento remanente.

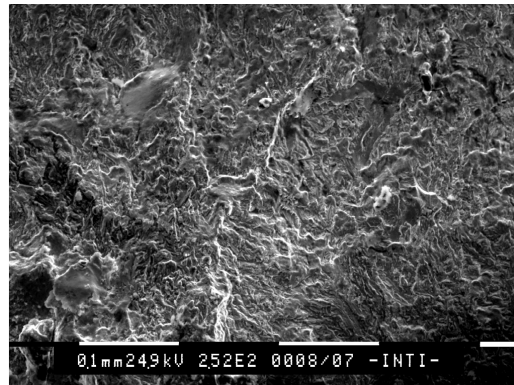
La figura 11a muestra la superficie de fractura, donde el inicio se ubicaría en la zona inferior de la imagen. La superficie de fractura no presenta indicios de deformación plástica a nivel microscópico ni de clivaje (fractura frágil). En la zona de inicio se pueden identificar superficies de fractura intergranular (figura 11b) y en la zona de propagación crecimiento por fatiga. La zona del inicio, como se indicó en la figura 6 corresponden, a la ZAC-ZRG. Este hecho es consistente con la baja ductilidad de esta zona y por lo tanto con la observación de fractura intergranular. En la figura 11c se observa una zona de fractura dúctil correspondiente al último ligamento remanente.

En la figura 12 se observa un detalle de la zona de fractura intergranular. El aspecto de la fractura intergranular y de las fisuras secundarias da evidencia de la presencia de un mecanismo de fisuración asistido por hidrógeno [7].



**Figura 12.** Detalle de la zona de fractura intergranular.

En la figura 13 se observa una imagen de la superficie de fractura en la zona de propagación, asociada al fenómeno de fatiga.



**Figura 13.** Superficie de fractura en la zona de propagación por fatiga.

Las tensiones residuales, sumadas a una estructura martensítica frágil de grano grueso provocan que la estructura tenga una alta susceptibilidad a la fragilización por presencia de hidrógeno. Esto produce la nucleación de microfisuras que luego se propagarán por un mecanismo de fatiga propio del servicio de los elementos estudiados.

## 4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de los diversos ensayos realizados sobre muestras falladas en servicio, muestras correspondientes a las distintas etapas de fabricación y muestras soldadas para el presente trabajo, así como de la discusión de los

mismos, se puede concluir que:

- El material corresponde a un acero del tipo SAE 1070, presentando un contenido de P algo elevado. El carbono equivalente es de CE=0,89, por lo que presenta problemas de soldabilidad y una alta tendencia a la fisuración asistida por hidrógeno, requiriendo procedimientos calificados para su correcta soldadura.
- La microestructura en la condición como soldada en la ZAC está constituida por martensita de alto carbono con una dureza superior a los 500HV. Luego del revenido a 500°C durante 5 minutos la dureza en la ZAC disminuye hasta alrededor de 360 HV. Los valores de dureza del metal de soldadura y del material base no se afectaron sensiblemente con el tratamiento térmico post-soldadura. Sin embargo este tratamiento térmico no sería efectivo para la eliminación de tensiones residuales.
- Las fisuras que produjeron la falla se iniciaron en la ZAC-ZRG, en las adyacencias de la línea de fusión, y se propagaron a través de la ZAC desde la superficie externa traccionada. La dirección de propagación fue ortogonal a la dirección de aplicación de las tensiones cíclicas del servicio al que están sometidos dichos elementos.
- No se observó deformación plástica macroscópica ni microscópica asociada a la fractura.
- La superficie de fractura presenta un carácter mixto, inter y transgranular, asociado a la acción de mecanismos de generación de fisuras asistidas por hidrógeno y propagación por fatiga.
- A partir de la inspección macroscópica de los cordones de soldadura se encontraron varias clases de defectos: fisuras en el cordón de soldadura, exceso de sobremonta, y concentradores de tensión severos en el talón asociados a un ángulo de mojado agudo y pliegues.
- A su vez, se detectaron microfisuras en la ZAC-ZRG de muestras en condición como soldada, nucleadas desde la zona cercana al talón del cordón.
- Las condiciones del proceso de fabricación influyeron para que se produjesen microfisuras asistidas por hidrógeno, las cuales se propagaron por fatiga en servicio. Un bajo caudal de gas de protección podría permitir el ingreso contaminantes de la atmósfera como O, N e H. La geometría del cordón y la energía aportada, contribuyen a las tensiones residuales, la concentración de tensiones y la formación de defectos.

*La causa de la falla analizada estaría asociada a la fisuración asistida por hidrógeno en la zona afectada por el calor cercana a la línea de fusión, durante la soldadura, debido a la formación de una estructura martensítica de alta dureza (500HV) y grano grueso, un contenido de P elevado, tensiones residuales del proceso de*

*soldadura, presencia de hidrógeno difusible y concentradores geométricos de tensión.*

*Dichas microfisuras generadas durante la soldadura no habrían sido removidas durante el amolado del cordón y las tensiones residuales no habrían sido relevadas durante el TTPS.*

*Debido al servicio de las hojas de sierra se generan tensiones cíclicas de tracción máximas en una de las superficies, las que se suman a la tensión de montaje y a las tensiones residuales, lo que produciría la propagación de las microfisuras pre-existentes por fatiga.*

Se recomiendan las siguientes acciones tendientes a eliminar la ocurrencia de la falla mencionada:

-Calificación del procedimiento de soldadura. Esto implica en estudio de los parámetros de proceso (tensión, corriente, velocidad de soldadura, etc.) y consumibles utilizados, ajuste del caudal del gas de protección, diámetro del alambre, temperatura de precalentamiento, TTPS, etc.

-Realización de ensayos no destructivos para la detección de defectos superficiales, de modo de evitar la entrega hojas de sierra fisuradas.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Carbon and Alloy Steels, SAE J411, 1989, SAE Handbook, Vol. 1, Society of Automotive Engineers, pág. 2.01-2.03.
- [2] Kou, S., Welding Metallurgy, Segunda edición, John Wiley and Son, New Jersey, pag. 416.
- [3] Bates C. E., Totten G. E. y Brennan R. L., Quenching of Steel. En: ASM Handbook Volume 2 "Heat Treating". Segunda edición electrónica, ASM International, pag. 189.
- [4] ASM, ASM Handbook, Vol. 19: Fatigue and Fracture, 1996, ASM International, pp. 2562.
- [5] AWS, Welding Handbook Vol. 1, Novena edición, American Welding Society, Miami, 2000.
- [6] Smith, R. B., Weldability Considerations for Carbon Steels. En: ASM Handbook Volume 6 "Welding, Brazing, and Soldering". Segunda edición electrónica. ASM International, pag. 1564-1599.
- [7] ASM, High Carbon Steels: Atlas of Fractographs. En: ASM Handbook Vol. 12 "Fractography"; Segunda edición electrónica. ASM, pag. 504-525.