

## ESTUDIO DE LA FRAGILIDAD EN AZUL DEL ACERO DE ULTRA-ALTA RESISTENCIA ASSAB SUPRA 709

### Blue embrittlement study of ultra high strength steel ASSAB SUPRA 709

#### RESUMEN

El presente artículo muestra el análisis de la fragilidad en azul del acero ASSAB SUPRA 709 cuando se somete a tratamiento térmico (temple y revenido), se estudiaron las variables que afectan el revenido como son tiempo de sostenimiento y velocidad de enfriamiento y cómo estas afectan la fragilidad del material. Los resultados muestran mejoras en el comportamiento mecánico del acero cuando se aumenta el tiempo de sostenimiento y cuando se cambia la velocidad de enfriamiento (aire-aceite) con tendencia a la ductilidad. El estudio busca incrementar la aplicabilidad de este tipo de aceros en la industria nacional.

**PALABRAS CLAVES:** Acero ASSAB SUPRA 709, fragilidad en azul, revenido, resistencia a la tracción.

#### ABSTRACT

*The present article shows the analysis of the fragility in blue of steel ASSAB SUPRA 709 when it is put under heat treatment (quenching and tempering), studied the variables that affect the tempering as they are time of support and speed of cooling and as these affect the fragility of the material. The results show improvements in the mechanical behavior of the steel when the time is increased of support and when the speed of cooling (air oil) with tendency changes to the ductility. The study looks for to increase the applicability of this type of steel in the national industry.*

**KEYWORDS:** ASSAB SUPRA 709 steel, Blue embrittlement, tempering, tensile strength

#### 1. INTRODUCCIÓN

Los aceros de ultra alta resistencia son aceros estructurales con niveles muy altos de resistencia. Estos materiales presentan una resistencia a la fluencia mínima 1380 MPa (ksi 200) aunque no se ha establecido un nivel universal de resistencia para esta clase de aceros.

La mayoría de los aceros de ultra-alta resistencia están disponibles en varios niveles de calidad. El nivel de calidad es determinado por el método de fundición primario o secundario usado en la fabricación de la aleación. Mejoras recientes en las técnicas de refinación como la decarburización argón-oxígeno (AOD) junto con fundición por inducción de vacío (VIM) han mejorado sustancialmente las propiedades. El refundido es realizado típicamente con la técnica de arco de vacío (VAR) la cual mejora la limpieza microestructural. El refundido de electroescoria (ESR) está siendo empleado para procesar algunos grados de estos aceros, la calidad del acero Premium presenta un aumento en la resistencia a la fractura, ductilidad, resistencia a la tracción, y

prolonga la vida a la fatiga para un nivel de esfuerzo dado.

Los aceros de ultra-alta resistencia son tratados térmicamente con equipos y técnicas similares a aquellos empleados para los aceros aleados de construcción. Los aceros de ultra-alta resistencia son templados ordinariamente a durezas específicas, pero para aplicaciones críticas es necesario realizar pruebas mecánicas a tracción para asegurar que una combinación requerida de resistencia y ductilidad ha sido alcanzada. En otras instancias, puede ser necesario realizar pruebas de impacto o resistencia a la fractura para asegurar que un nivel requerido de resistencia a la fractura frágil se ha obtenido.[1]

El objetivo de este estudio es analizar la fragilidad en azul del acero SUPRA 709 cuando se somete a tratamiento térmico (temple y revenido), estudiando las variables que afectan el revenido como son tiempo de sostenimiento y velocidad de enfriamiento y como estas afectan la fragilidad del material. Los resultados muestran mejoras en el comportamiento mecánico del

#### CATALINA JARAMILLO I.

Estudiante X Semestre  
Ingeniería Mecánica.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[cata226@hotmail.com](mailto:cata226@hotmail.com)

#### OSCAR FABIAN HIGUERA C.

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[osfahico@utp.edu.co](mailto:osfahico@utp.edu.co)

#### JUAN FELIPE ARROYAVE L.

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[jfa@utp.edu.co](mailto:jfa@utp.edu.co)

Grupo de Investigaciones en Materiales Avanzados (GIMAV-UTP)

acero cuando se aumenta el tiempo de sostenimiento y cuando se cambia la velocidad de enfriamiento (aire-aceite) con tendencia a la ductilidad. El estudio busca incrementar la aplicabilidad de este tipo de aceros en la industria nacional.

## 2. FRAGILIZACIÓN DURANTE EL REVENIDO

El efecto más útil del revenido es el aumento de la ductilidad y tenacidad del acero. Sin embargo la tenacidad para ciertos aceros puede decrecer. En especial los aceros de alta resistencia, templados y revenidos, son susceptibles de experimentar varios tipos de fragilidad: fragilidad por martensita revenida, fragilidad de revenido y la fragilidad causada por la formación de nitruro de aluminio. Muchas veces hay solape entre dos tipos de fragilización, por ejemplo, la fragilidad por martensita revenida se puede agravar fuertemente por exposición al hidrógeno. Sin embargo, solo consideraremos los dos fenómenos clásicos de fragilidad que ocurren en el revenido: la fragilidad por martensita revenida, o fragilidad en azul y la fragilidad de revenido. La fragilidad por martensita revenida ocurre después de revenir entre 260 y 370°C; también se llama fragilidad de 350°C o fragilidad Krupp. Por otro lado, la fragilidad de revenido ocurre después de revenir o de enfriar a través del intervalo de temperatura 375-575°C.

Las características de ambos tipos de fragilidad son bien conocidas, pero las causas apenas se están dilucidando. En general los efectos son similares, pero la fragilidad en azul es un proceso más rápido, ocurre en una hora, en tanto que la fragilidad de revenido se toma varias horas. En términos generales, la fragilidad en azul se produce cuando ciertos aceros se revienen a 300°C, la austenita se descompone originando películas de cementita en los límites de grano, las cuales, en el caso de concentraciones elevadas de austenita retenida, pueden ser continuas en los límites entre los listones de martensita. Es decir, la cementita intertiras es la principal responsable de la fragilidad en azul al permitir la fácil nucleación de grietas, que luego se propagan a través de los listones de martensita revenida. La fragilidad en azul es acentuada por la segregación de impurezas a los límites de grano.

El aleante más efectivo en eliminar la fragilidad en azul es el silicio, porque retarda la precipitación de la cementita. El otro tipo de fragilidad es la fragilidad de revenido, es llamada reversible porque puede obtenerse, eliminarse y otra vez obtenerse, únicamente por revenidos repetidos es decir, no se necesita una nueva austenización. Se caracteriza también por la elevada temperatura de transición dúctil- frágil, y se obtienen por una estancia prolongada en cierta zona de temperaturas, sobre todo entre 400 y 600°C.

Este fenómeno está asociado con la segregación de ciertos elementos hacia los límites de grano austeníticos, lo cual reduce la cohesión intergranular del acero. Los

elementos que se segregan pertenecen a tres grupos de la tabla periódica: Grupo IVB (C, Si, Ge, Sn), Grupo VB (N, P, As, Sb, Bi) y Grupo VIB (O, S, Se, Te). Se ha demostrado que muchos de estos elementos rebajan sustancialmente la energía superficial del hierro y, por consiguiente, es de esperar que bajen la energía del límite de grano y reduzcan la cohesión. [2, 3]

## 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las probetas utilizadas para el estudio fueron fabricadas utilizando el acero ASSAB SUPRA 709. La composición se muestra en la Tabla 1.

C	Mn	Si	Cr	Mo	S <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>
0.42	0.75	0.28	1.05	0.2	0.004	0.0035

**Tabla 1. Composición química acero SUPRA 709**

Con el fin de estudiar el fenómeno de fragilidad en azul presente en este tipo de aceros en el rango de temperaturas 250 a 400°C, se sometió a tratamiento térmico de temple y revenido a 300°C variando el tiempo a esta temperatura y variando la cinética de enfriamiento, el tratamiento térmico es resumido en la Figura 1. Posteriormente el material se maquinó según los lineamientos norma ASTM E-8 para ensayos de tracción. Para estas pruebas se utilizó la máquina universal de ensayos Modelo UMIB 600 SW.

Las probetas fueron sometidas a un tratamiento térmico de normalizado con el fin de estandarizar la microestructura antes de ser sometida al tratamiento térmico de temple, ya que el material se encuentra en estado de suministro bonificado blando. El normalizado se realizó de la siguiente forma, se calentaron las probetas a 870°C y se mantuvieron a esta temperatura por media hora y se enfriaron al aire. Luego se procedió a austenizar nuevamente el material con el fin de realizar el temple, para este proceso se calentó la probeta hasta alcanzar 870°C y se mantuvo a esta temperatura por media hora, para el enfriamiento se utilizaron 2 tipos de aceite el aceite Shell Voluta C y Shell Rimula X. Las características se muestran en las Tabla 2 y 3.

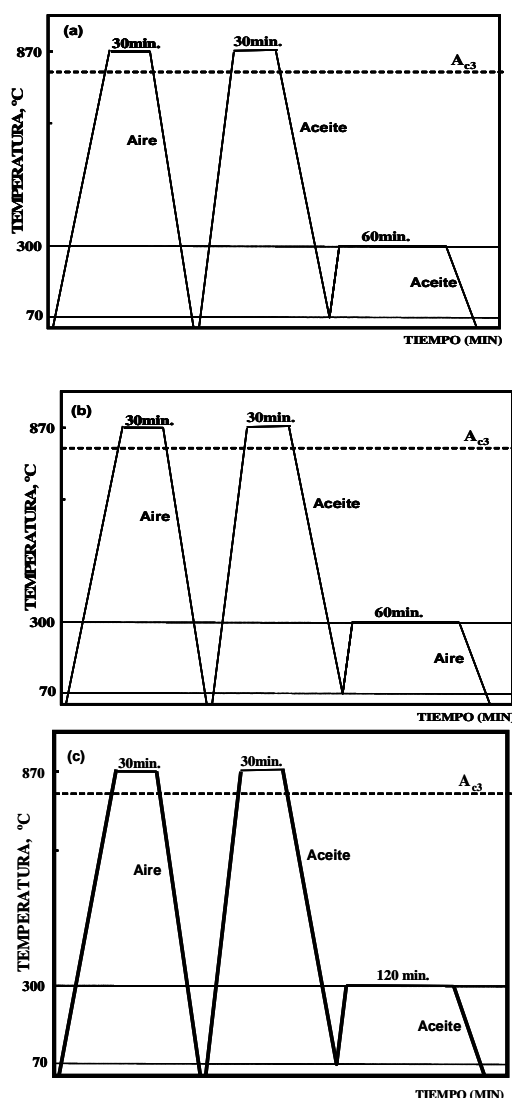
Característica	Método	Valores típicos	
Viscosidad cinemática cSt	ASTM D-445		
• a 40 °C		32.5	176
• a 100 °C		5.3	17.3
Índice de viscosidad	ASTM D-2270	100	101
Densidad a 15° C kg/l	ASTM D-1258	0.869	0.879
Punto de congelación, °C	ASTM D-97	-12	-9
Punto de inflamación, v.c. °C	ASTM D-93	222	237

**Tabla 2. Características técnicas medias aceite Shell Voluta. [12]**

El material luego de ser templado en aceite fue sometido a revenido a temperaturas de 300°C variando el tiempo de sostenimiento entre 1 y 2 horas. Además, se modificó la cinética de enfriamiento mediante la utilización del aceite Shell Voluta C, Shell Rimula X y el aire como agentes enfriadores.

Característica	Método	Valores típicos
Viscosidad cinemática cSt	ASTM D-445	
• a 40 °C		105
• a 100 °C		14.3
Índice de viscosidad	ASTM D-2270	139
Densidad a 15 °C, kg/l	ASTM D-4052	0.890
Punto de congelación, °C	ASTM D-97	-30
Punto de inflamación v.a., °C	ASTM D-92	226

**Tabla 3. Características técnicas medias aceite Shell Rimula X 15W40. [13]**



**Figura 1. (a) Temple y revenido 300°C 1h; enfriamiento en aceite. (b) Temple y revenido 300°C 1h; enfriamiento al aire; (c) Temple y revenido 300°C 2h; enfriamiento al aire.**

**4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS**

**4.1 Efecto de la velocidad de enfriamiento durante el revenido sobre la ductilidad del acero**

En la Figura 2 se observa el comportamiento a la tracción del acero SUPRA 709 sometido a tratamiento de bonificado. Se observa un comportamiento frágil del material al ser sometido a temple en aceite y revenido a 300°C y enfriado al aire. Este comportamiento frágil se cree que es debido al fenómeno conocido como fragilidad en azul propio de aceros con bajos porcentajes de silicio ya que éste retarda la precipitación de la cementita

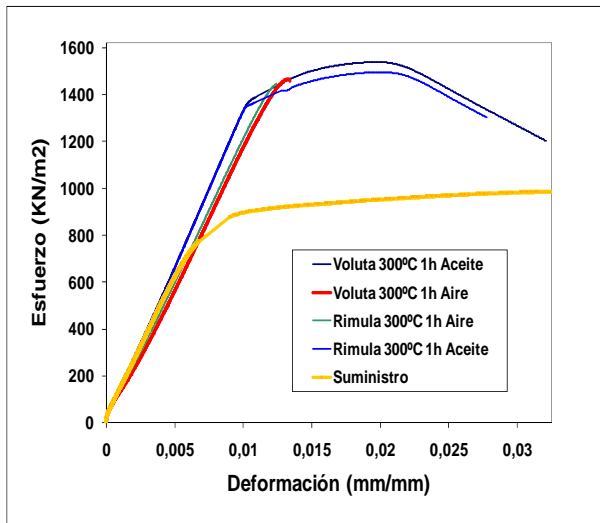
Dicho fenómeno está asociado a la presencia de cementita entre las láminas de martensita, la cementita usualmente se presenta como laminas widmanstätten. La relación de orientación entre la ferrita y la cementita es del tipo Bagaryatski: [6]

$$[100]_{cementita} // [011]_{ferrita}; [010]_{cementita} // [\bar{1}11]_{ferrita}; (001)_{cementita} // (211)_{ferrita}$$

Los planos de la cementita pueden ser paralelos a cualquiera de las dos familias de planos de la ferrita {011} o {112}. La nucleación de la cementita puede ocurrir a temperaturas por encima de 250°C, y se puede presentar por dos mecanismos: precipitación directa desde una solución sólida sobresaturada α o por crecimiento a expensas de la disolución de carburos menos estables como el carburo ε (Fe<sub>2.4</sub>C), (Fe<sub>2</sub>C), Fe<sub>4</sub>C y aceros de alto carbono, el carburo χ (M<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) los cuales se forman en el rango de temperatura de 100 a 200°C. El carburo ε tiene una estructura hexagonal compacta y se presenta en forma de lamina o barra entre las placas de martensita con una relación de orientación de Jack. [6]

$$(101)_{\alpha'} // (101\bar{1})_{\epsilon}; (011)_{\alpha'} // (0001)_{\epsilon}; [111]_{\alpha'} // [12\bar{1}0]_{\epsilon}$$

La precipitación de dichos compuestos esta ligada a fenómenos difusivos por este motivo se procedió a modificar la cinética de enfriamiento con el fin de evitar de cierta manera dichos fenómenos inducidos por el revenido. Para esto se cambio el medio de enfriamiento durante el revenido de aire a aceite. Se observa un cambio bastante significativo obteniéndose un comportamiento dúctil en este rango de temperatura. Al comparar el comportamiento a la tracción del material sometido a revenido en aceite, se observa un mejor comportamiento del material enfriado en aceite Shell Voluta C, debido a que este aceite es un aceite rápido que presenta una alta cinética de enfriamiento de piezas metálicas debido a su baja viscosidad en comparación con el Shell Rimula X.



**Figura 2. Efecto de la velocidad de enfriamiento durante el revenido.**

Las resistencias a la tracción promedio obtenida en estas pruebas son:

VOLUTA C 300°C 1h Aceite	VOLUTAC	1538,2 Mpa
RIMULA 300°C 1h Aire		1444, 8 Mpa
RIMULA 300°C 1h Aceite	RIMULA	1494, 8Mpa
VOLUTA C 300°C 1h Aire		1550,2 Mpa

**4.2 Efecto del tiempo de revenido sobre la ductilidad del acero.** En la Figura 3 se muestra el comportamiento a la tracción del acero SUPRA 709 sometido a tratamiento térmico de bonificado. Se observa cómo el comportamiento frágil obtenido durante el revenido a 300°C y enfriamiento al aire, es modificado a un comportamiento dúctil con solo un aumento en el tiempo de sostenimiento. La relación entre la temperatura y el tiempo de revenido puede ser descrita por el parámetro de Hollomon:[6]

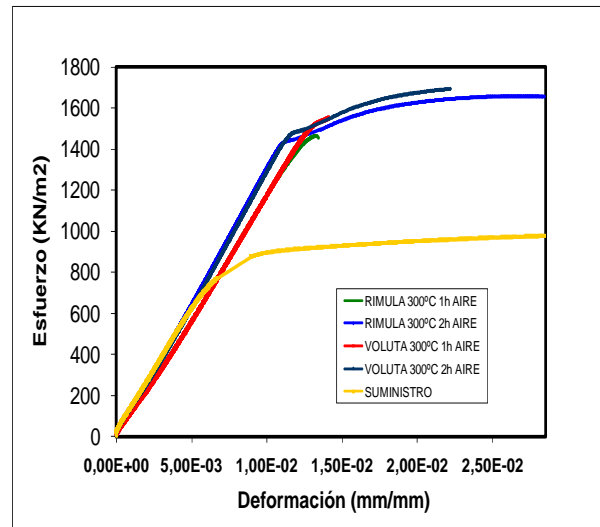
$$P = T(C + \text{Log}t) \quad (1)$$

donde P es el parámetro Hollomon, C es la constante de Hollomon y Jaffe, T es la temperatura (K) y t es el tiempo en horas.

La constante de Hollomon y Jaffe puede ser calculada como:

$$C = 21.3 - (5.8 * \%C) \quad (2)$$

Con el manejo de este parámetro se pueden obtener buenas propiedades mecánicas en los aceros durante el revenido, ya sea aumentando o disminuyendo el tiempo de sostenimiento a bajas y altas temperaturas respectivamente.



**Figura 3. Efecto tiempo de revenido.**

Se obtuvieron valores de resistencia a la tracción mas elevados al modificar el tiempo de sostenimiento que al variar el medio de enfriamiento durante el revenido, pero no es el recomendado para este material ya que su comportamiento sigue siendo relativamente frágil.

Las resistencias a la tracción promedio obtenida en estas pruebas son:

RIMULA 300°C 1h Aire		1444,8 Mpa
VOLUTA C 300°C 1h Aire		1550,2 Mpa
RIMULA 300°C 2h Aire		1659,3 Mpa
VOLUTA C 300°C 2h Aire		1693,6 Mpa

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los aceros de ultra alta resistencia son susceptibles al fenómeno de fragilidad en azul durante el tratamiento térmico de temple y revenido a 300°C, la austenita se descompone originando películas de cementita en los límites de grano, las cuales, en el caso, de concentraciones elevadas de austenita retenida, pueden ser continuas en los límites entre los listones de martensita. Es decir la cementita intertiras es la principal responsable de la fragilidad en azul al permitir la fácil nucleación de grietas.

Se obtuvieron mejoras en el comportamiento mecánico al aumentar la cinética de enfriamiento y el tiempo de sostenimiento durante el revenido. Debido a que la austenita retenida se transforma en bainita y no en carburos estables y metaestables del tipo  $M_3C$ ,  $M_2C$ ,  $M_4C$  y  $M_5C_2$ .

## 6. BIBLIOGRAFÍA

### Referencias de libros:

- [1] ASM international, Metal Handbook, Properties and selection: irons, steel and high performance alloys. Vol. 1, 1990. p.449.
- [2] ASM international, Metal Handbook, Heat treating. Vol. 4, 1991. p.35, 67 y 207.
- [3] Valencia, Tecnología del tratamiento térmico de los metales, 2nd ed., Editorial Universidad de Antioquia, 1992, p.62 Y 123.
- [4] Valencia, Transformaciones de fase en metalurgia, 2nd ed., Editorial Universidad de Antioquia, 1998, p.69 Y 136.
- [5] G. Dieter, Mechanical Metallurgy, 2nd ed, McGraw Hill, 1988, p.325.
- [6] G. Totten. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. Taylor & Francis. 2006.

### Referencias de publicaciones periódicas:

- [7] K.O. Lee, J.M. Kim, M.H. Chin, S.S. Kang. "A study on the mechanical properties for developing a computer simulation model for heat treatment process". Journal of Materials Processing Technology 182 (2007) 65–72
- [8] N.V. Luzginova, L. Zhao, J. Sietsma. "Bainite formation kinetics in high carbon alloyed steel" Materials Science and Engineering A (2007).
- [9] D.V. Edmondsa, K. He F.C. Rizzo, B.C. De Cooman, D.K. Matlock, J.G. Speer "Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment" Materials Science and Engineering A 438–440 (2006) 25–34
- [10] ZHAO Hong-zhuang , LIU Xiang-hua, WANG Guo-dong, Progress in Modeling of Phase Transformation Kinetics. Journal of iron and steel research, international. 2006, 13(3): 68-73

### Normas:

- [11] E-8. Standard test methods for tension testing of metallic materials ASTM Standard. 2004.

### Boletín Técnico:

- [12] Shell Voluta Oils. Aceite para tratamientos térmicos. España 1998.

- [13] Shell RIMULA X Oil 15W40. Lubricante de altas prestaciones SHPD para motores diesel pesados. España. 2001.