

Análisis de la microestructura del

## ► **acero inoxidable**

luego de un tratamiento térmico para minimizar los efectos no deseados en la tenacidad por la presencia de carburos de cromo de morfología facetada.



# Caracterización del acero inoxidable AISI 420 y los efectos de la presencia de carburos de cromo en la estructura martensítica

## *Characterization of Stainless Steel AISI 420 and the Effects of the Presence of Chromium Carbides in the Martensitic Structure*

### RESUMEN

El estudio analiza la microestructura del acero inoxidable AISI 420 luego del tratamiento térmico de temple. Mediante el uso de técnicas de caracterización como la microscopía óptica y electrónica de barrido, se constata la presencia de carburos de cromo de morfología facetada, y de distribución alineada sobre la estructura martensítica. Estos afectan la tenacidad de las láminas de cuchillos al producir la fragilidad de los mismos. Análisis de composición química y mecánica de la fractura que complementan los resultados sugieren posibles soluciones a estos efectos no deseados.

### ABSTRACT

*A study on the microstructure of AISI 420 stainless steel after hardening heat treatment is discussed. Characterization techniques such as light microscopy and scanning electronic microscopy shows that the presence of chromium carbides and his distribution aligned at the martensitic structure affect the microstructure, producing fragility. Chemical composition analysis and fracture mechanics to complementing the results suggest possible solutions to these undesirable effects.*

### INTRODUCCIÓN

Utensilios de cocina como las láminas de cuchillos deben presentar dureza para garantizar resistencia al filo. Al mismo tiempo, deben ser resistentes a la oxidación y corrosión por razones de higiene, Así como tenaces para ser utilizados en operaciones de corte. Sin embargo, láminas de acero AISI 420 producidas por tratamiento de temple y revenido demostraron fragilidad cuando fueron usadas para cortar carne bovina, lo que pone en riesgo la integridad del operador.

Este tipo de láminas deben poseer la suficiente resiliencia para deformarse en operación y recuperar posteriormente su forma. En principio, la fragilidad de una lámina de acero inoxidable puede ser el resultado de una dureza inadecuada luego del temple o una mala aplicación del revenido. Otros factores a considerar son la composición química del material, la microestructura, los concentradores de tensiones, etc. El análisis de la microestructura y su composición química tienen que revelar informaciones importantes sobre los mecanismos que afectan la tenacidad del material en cuestión. Asimismo, ensayos de dureza en las láminas deben ser aplicados para constatar que un excesivo valor puede afectar la resistencia a la flexión, pues estas deben deformarse lo suficiente en operación sin llegar a la ruptura. Finalmente, un análisis en la región de rotura debe mostrar si existieron mecanismos de ruptura dúctil o frágil. La figura 1 presenta una lámina de cuchillo luego de un ensayo de flexión.



### Palabras Claves

Martensita, carburos de cromo, temple.

### Key words

Martensite, Chromium Carbides, Quench.



Figura 1. Lámina de cuchillo luego de ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.

## FUNDAMENTOS

Los aceros inoxidables martensíticos se caracterizan por la presencia de cromo, es su principal elemento de aleación (de 11,5% a 18,0%). Son endurecibles por tratamiento térmico de temple lo que aumenta la resistencia a la corrosión y evita la precipitación de carburos. Su dilatación térmica es igual a la de los aceros al carbono. Presentan, además, transición dúctil – frágil en la estructura BCC (cúbica de cuerpo centrado) [1], así como baja soldabilidad. Pueden ser divididos en:

- Bajo carbono, también llamado tipo turbina.
- Medio carbono, conocido como tipo cuchillo.
- Alto carbono, o resistente al desgaste.

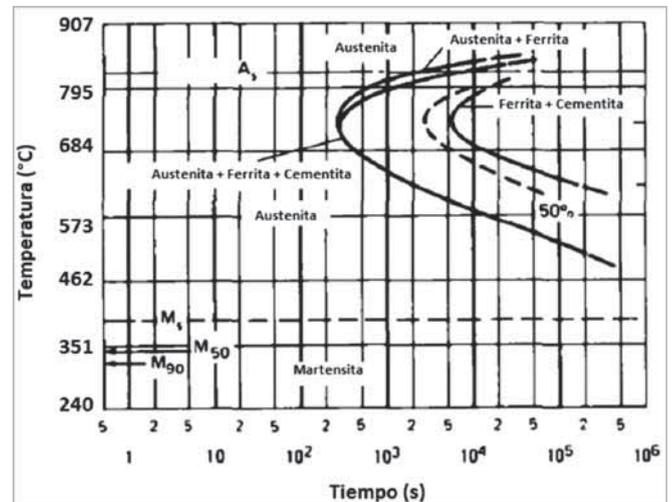
Estos aceros son ferromagnéticos, fácilmente conformados en frío o caliente (sobre todo si el contenido de carbono es bajo). Presentan resistencia a la corrosión por agua y ciertos químicos. A medida que aumenta el contenido de carbono esta disminuye, en tanto que se eleva con el contenido de cromo. El níquel también incrementa la resistencia a la corrosión. Un ejemplo es el acero del tipo AISI 431, con bajo contenido de carbono, alto cromo y presencia de níquel. Todos los aceros inoxidables martensíticos son templables y debido a la alta templabilidad por el alto contenido de cromo pueden, generalmente, ser enfriados al aire; algunos otros lo son en aceite y agua (tenores de carbono más bajos) [2].

Luego del temple, se administra un tratamiento de revenido a baja temperatura (generalmente entre 150 °C y 400 °C) para aliviar las tensiones. El revenido se aplica a aceros con bajos contenidos de carbono en un rango de 550 °C a 750 °C, durante 1 a 4 horas. Se debe evitar el calentamiento entre 450 °C y 600 °C, pues ello afecta la tenacidad y la resistencia a la corrosión. Para una completa recuperación de las propiedades, el tratamiento de recocido se hace en el intervalo de 725 °C a 915 °C [3].

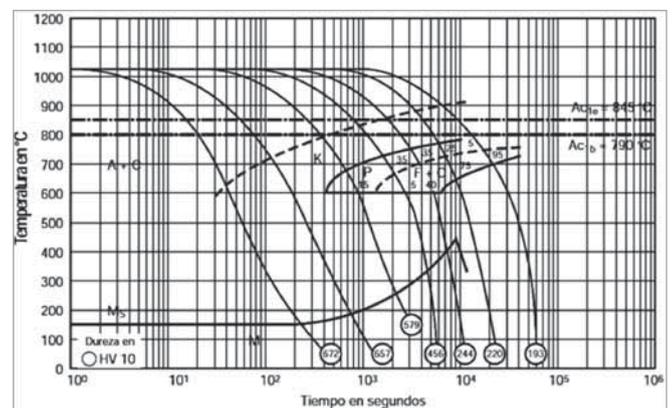
La figura 2 muestra las curvas TTT (tiempo – transformación – temperatura) que describen las microestructuras generadas fuera de equilibrio. Se observa que la presencia de cromo desplaza la curva hacia la derecha lo que favorece la templabilidad y la formación de la estructura martensítica a tasas de enfriamiento más lentas (inclusive al aire). Esto también es conveniente en lo que respecta a la tenacidad, pues enfriamientos más lentos no producirán microfisuras, aumento de tensiones residuales, ni alteraciones dimensionales en las piezas tratadas [4] [5]. Las figuras 3 y 4 muestran la microestructura de un acero inoxidable AISI 420 antes y después del tratamiento térmico de temple, respectivamente. En la estructura bruta (sin temple) se observan granos de ferrita y carburos de cromo que se formaron durante el proceso de solidificación (figura 3). Lo deseable es que estos carburos se

encuentren esferoidizados y distribuidos de manera dispersa. Si estos están alineados, la tenacidad puede verse afectada, pues tales carburos probablemente favorecen el crecimiento de grietas y la posterior ruptura del material, si es utilizado en operaciones que produzcan deformación [6].

Luego del temple se distingue la típica morfología de la martensita (figura 4). Los carburos de cromo coexisten en esta fase, pues el tratamiento de temple no los disuelve en la matriz del material. Para la completa disolución de tales carburos de cromo, las temperaturas deben alcanzar valores superiores a 1.000 °C, lo que ocasiona el aumento del tamaño de grano y alteraciones de la tenacidad [7].



(a)



(b)

Figura 2. Curvas TTT para el acero AISI 420. (a) Curvas de transformación isotérmica. (b), Curvas de enfriamiento continuo [adaptado de [4]].

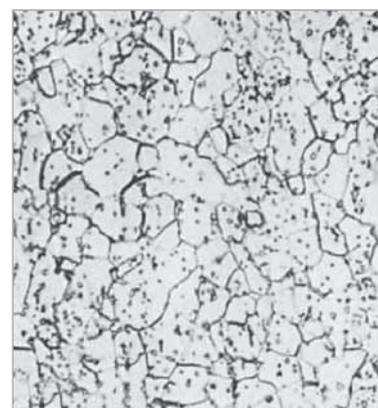
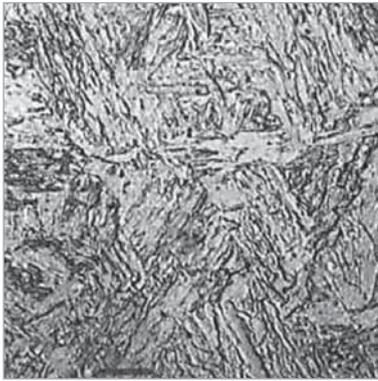
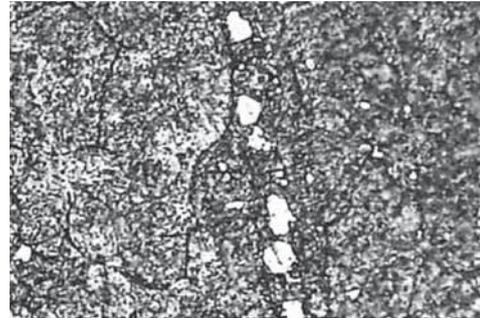


Figura 3. Microscopía óptica del acero inoxidable martensítico AISI 420 antes del tratamiento térmico de temple. Se observan granos de ferrita y carburos de cromo dispersos en la matriz. 500x. Ataque: Vilella. [Adaptado de [5]].



**Figura 4.** Microestructura del acero inoxidable martensítico AISI 420 luego del tratamiento térmico de temple. Se observan agujas de martensita. 500x. Ataque: Vilella [adaptado de [4]].



(b)

**Figura 5.** Microestructura de la sección transversal de la lámina AISI 420. (a) 500x; (b), 1000x. Se observa una matriz martensítica con carburos de cromo. Ataque: Kalling I. Fuente: Elaboración propia.

## METODOLOGÍA

El objetivo de esta contribución es estudiar las posibles causas de la baja tenacidad que presentaron las láminas de acero durante su uso. Para los análisis se emplearon láminas fracturadas del acero AISI 420 cuya composición química fue determinada por medio de espectrometría de emisión óptica (OES, por sus siglas en inglés). Los elementos y sus proporciones son presentados en la tabla I.

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo
0,28	0,45	0,30	10,69	0,11	0,02

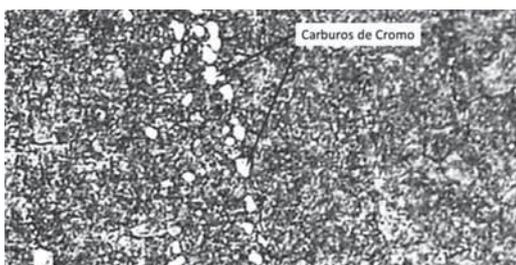
**Tabla I.** Composición química del AISI 420. Elaboración propia.

Las muestras fueron retiradas de la lámina fracturada en servicio y sometidas a los métodos metalográficos convencionales de corte y lijado, seguidos de pulido y ataque químico, proceso recomendado para microscopía óptica y electrónica. Las secciones transversales de las piezas fueron elegidas de acuerdo a procedimientos de la norma ASTM E3-01, y atacadas químicamente con el reactivo Kalling I [8]. También se recolectaron los datos de dureza en condiciones de tratamiento térmico según la norma ASTM E10-07a [9] [10]. Finalmente, se realizaron análisis en las fracturas de las láminas mediante microscopía electrónica de barrido para determinar el tipo de falla durante el uso de dichas láminas.

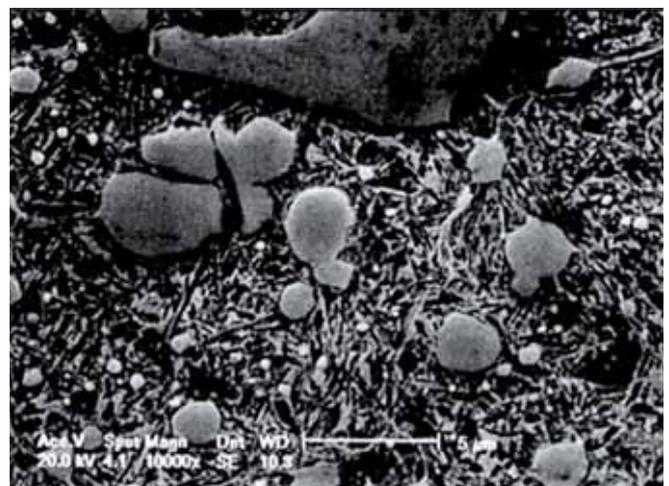
## RESULTADOS

### A. Análisis metalográficos en láminas fracturadas en servicio

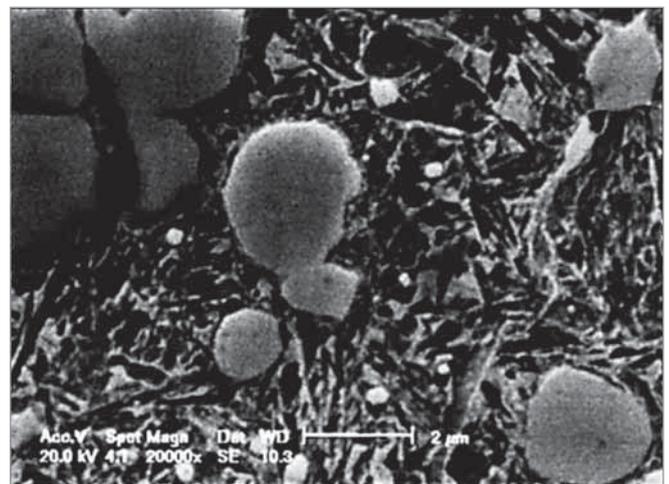
Luego de cortar las piezas, las secciones transversales fueron primero analizadas bajo microscopía óptica. En la figura 5 se observa una estructura martensítica revenida con la presencia de carburos de cromo alineados.



(a)



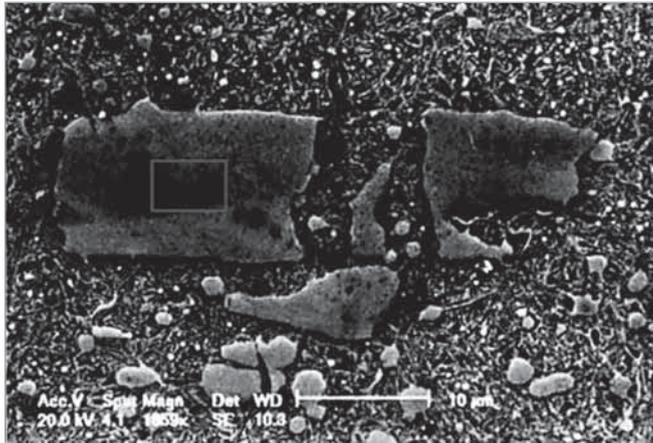
(a)



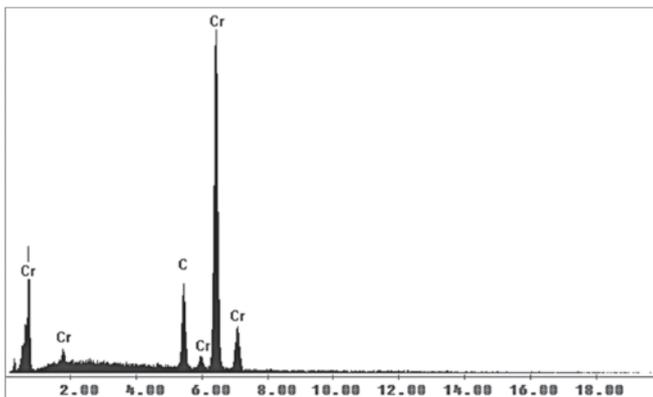
(b)

**Figura 6.** SEM con detalles de los carburos de cromo sobre un fondo de martensita revenida. (a) 10000x, (b) 20000x. Los carburos presentan una morfología esferoidizada. Ataque: Kalling I. Fuente: Elaboración propia.

Estos carburos de cromo de estructura facetada adquirieron su morfología durante el proceso de solidificación. El cromo no se difundió en solución sólida en la matriz de hierro-carbono. Adoptaron un alineamiento en los granos del material debido al proceso de laminación en caliente al momento de fabricar las láminas. Las figuras 8 y 9 muestran las regiones de las fracturas de las láminas de los cuchillos. Algunas de estas regiones presentaron fractura dúctil mientras que otras presentaron planos de clivaje, lo que evidencia la existencia de fractura frágil.

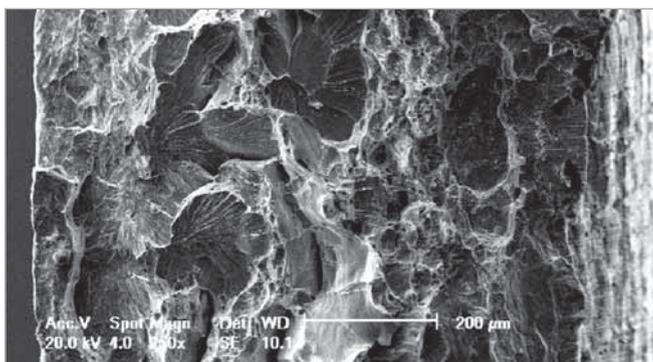


(a)

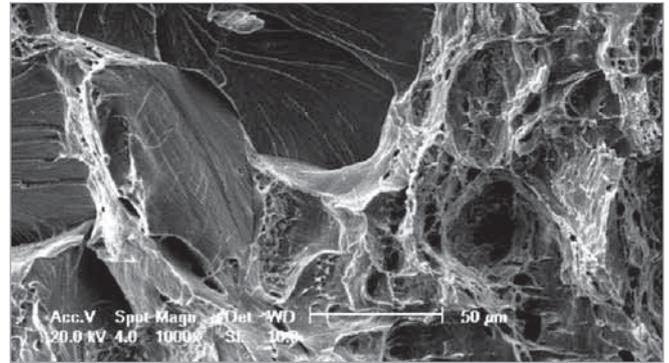


(b)

**Figura 7.** Análisis cualitativo de la composición química de la región en destaque sobre un carburo de cromo. (a) Los precipitados presentan morfología facetada en un fondo de martensita revenida. (b) El espectro de energía muestra la presencia de cromo y carbono. Fuente: Elaboración propia.



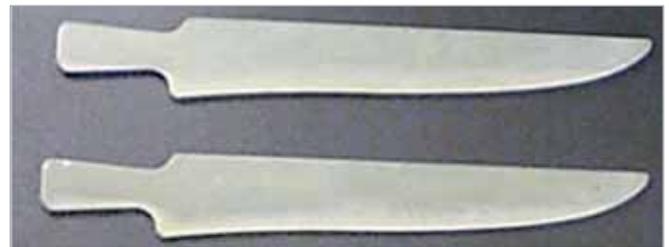
**Figura 8.** Superficie de fractura. Se observan áreas de fractura dúctil y áreas de fractura frágil (planos de clivado). Aumento 250x.



**Figura 9.** Superficie de fractura. Detalle de la figura 8. Planos de clivaje. Aumento 1000x. Fuente: Elaboración propia.

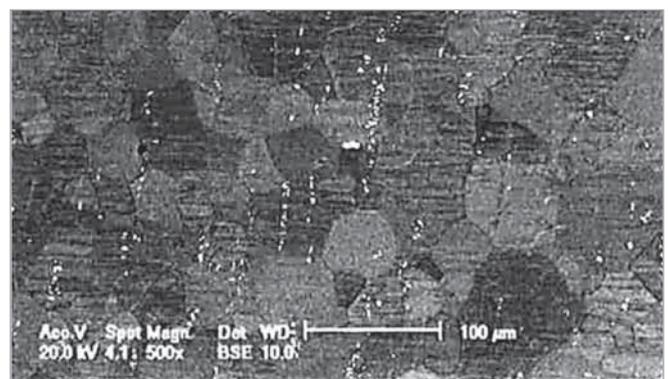
### B. Tratamientos térmicos en láminas proporcionadas por el fabricante

La figura 10 muestra láminas de AISI 420 sin tratamiento térmico entregadas por el fabricante para el presente estudio. Antes del temple, las láminas se precalentaron a 550 °C en tres periodos de tiempo (30, 60 y 90 minutos). Luego, fueron austenitizadas por 15 minutos a una temperatura de 1000 °C. Su enfriamiento se realizó en aceite para temple ILQUENCH 1 de Castrol.

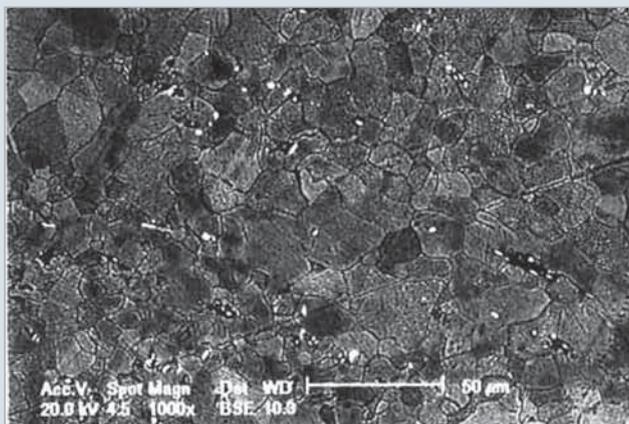


**Figura 10.** Láminas de AISI 420 sin tratamiento térmico proporcionadas por el fabricante. Fuente: Elaboración propia.

Después del enfriamiento, las láminas pasaron por un tratamiento de revenido a 300 °C por 20 minutos. La figura 11 muestra del arreglo de los carburos de cromo en dichas láminas antes del precalentamiento (a) y su reordenamiento en la microestructura posterior al proceso (b). Se observa que los carburos de cromo ya no se encuentran alineados. El precalentamiento que produjo mejores resultados fue el de 90 minutos. La figura 12 presenta la microestructura luego del revenido de las láminas.



(a)



(b)  
**Figura 11.** Carburos de cromo en una microestructura de granos de ferrita. (a) Carburos alineados. 500x. (b) Carburos dispersos luego del precalentamiento a 550 °C en un intervalo de 90 minutos. 1000x. Ataque: Kalling I. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 12.** Microestructura luego del tratamiento de revenido. Martensita revenida y carburos de cromo dispersos. 1000x. Ataque: Kalling I. Fuente: Elaboración propia.

### C. Ensayos de dureza

La tabla II muestra los valores de dureza HRC y HV (Escala Rockwell C y Escala Vickers, respectivamente) de las láminas que presentaron fractura en servicio (promedio de 3 ensayos). Están dentro del rango permitido por el fabricante. Cabe mencionar que tales láminas ya poseen estructura de martensita revenida. La tabla III exhibe los valores de dureza de las láminas proporcionadas por el fabricante luego del tratamiento de temple y revenido realizado en laboratorio.

Muestra	HRC	HV
01	55	600
02	54	580

**Tabla II.** Durezas de las láminas fracturadas en servicio (martensita revenida) Fuente: Elaboración propia.

Muestra	HRC	HV
01	52	530
02	52	530

**Tabla III.** Durezas de las láminas ofrecidas por el fabricante (martensita revenida) Fuente: Elaboración propia.

### CONCLUSIONES

El análisis metalográfico reveló la presencia de carburos ricos en cromo, alineados y de morfología facetada, lo que probablemente indica que esos precipitados son los responsables de la fractura de la lámina en servicio.

Además de ser ricos en cromo, los carburos presentan alto contenido de carbono. En ese sentido, los granos del material poseen una composición química diferente (el cromo y el carbono deben estar presentes en solución sólida en el acero), lo que probablemente afecta la resistencia a la corrosión.

La dureza de las láminas fracturadas en servicio no fue determinante en la falla del material en uso.

De acuerdo con el análisis de las microestructuras y durezas obtenidas, el tratamiento con mejor resultado en términos de dispersión de los carburos fue el de precalentamiento de 90 minutos. Las micrografías (Figura 11) muestran una distribución parcial de dichos carburos en la martensita, los cuales son responsables de la fragilidad del material. En esas condiciones hay una mejora en las propiedades mecánicas del acero en estudio. Sin embargo, estudios futuros podrían optimizar el tiempo de precalentamiento a valores menores.

### REFERENCIAS

- [1] Strobel, E. (2005). Estudo da Resistência a Corrosão do Aço Inoxidável Martensítico CA6NM em Meio Marinho Sintético. Tesis del Programa de Posgraduación en Ingeniería y Ciencia de los Materiales de la Universidade São Francisco. Itatiba, Brasil.
- [2] Chiaverini, V. (2005). Aços e Ferros Fundidos. (6ª. ed.). São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- [3] Colpaert H. (2008). Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns (4ª. ed).. São Paulo: Blucher.
- [4] Vander G. (1991) Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels. Pensilvania: ASM International.
- [5] ASM International (1995). Heat Treating Processes and Related Technology: Practices and Procedures for Irons and Steels. Ohio: ASM International.

- [6]** Guimarães A. & Mei P. (2004). "Precipitation of Carbides and Sigma Phase in AISI Type 446 Stainless Steel under Working Conditions". *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156.
- [7]** Fortinox S.A. Manual Técnico de Aceros Inoxidable (2013). Una empresa del grupo Thyssen Krupp. Buenos Aires, Argentina.
- [8]** ASTM Standard E3-01 (2001). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. American Society for Testing and Materials.
- [9]** ASTM Standard E10-07 (2007). Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials.

## ACERCA DE LOS AUTORES

### César Nunura

Es ingeniero mecánico por la Pontificia Universidad Católica de Río Grande do Sul (PUCRS - Brasil). Maestría en Ingeniería de Procesos de Fabricación por la Universidad Federal de Río Grande do Sul (UFRGS – Brasil). Doctorado en Ingeniería de Materiales por la Pontificia Universidad Católica de Río Grande do Sul (PUCRS - Brasil). Técnico en Mantenimiento Industrial

por el Senati de Lima. Experiencia en el área de Análisis Numérico en Transferencia de Calor, Materiales, Metalurgia Física y Ensayos no Destructivos. Es investigador del CNPq (Consejo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Brasil). Responsable del Laboratorio de Ensayos de Materiales de Tecsup – Lima.

@cnunura@tecsup.edu.pe

### César Lecaros

Tiene estudios de maestría en Ingeniería y Ciencias de los Materiales en la Pontificia Universidad Católica del Perú. Ingeniero mecánico por la Universidad Nacional de Ingeniería, con especialización en Materiales de Ingeniería. Especialización en Automatización de la Producción en Senai, -Brasil. Especialista en Metrología, con capacitaciones en México y Brasil. Miembro de la American Society of Mechanical Engineers (ASME).

@clecaros@tecsup.edu.pe

### Agradecimientos:

A Tecsup por las oportunidades profesionales, en especial al Ing. Javier Ganoza (Gestión Industrial y Mecánica – Tecsup) por el incentivo y apoyo constante a la investigación.

A la Pontificia "Pontificia Universidad Católica de Río Grande del Sur" por el uso del Laboratorio de Metalografía y Tratamientos Térmicos (Lamett) y al Centro de Microscopía y Microanálisis (CEMM) de la Facultad de Ingeniería (FENG).