

Aceros inoxidable dúplex sometidos a tratamiento térmico de normalizado

Laura Sáenz^a, J. Chávez^b, R. González^b, A. Corona^b, Z. Tineo^b

^aDepartamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Latacunga, Ecuador

^bDepartamento de Materiales y Procesos de Fabricación /Facultad de Ingeniería /Escuela de Mecánica, Universidad de Carabobo

lasaenz@espe.edu.ec

Resumen—En la investigación se evalúa el comportamiento mecánico de los aceros inoxidable dúplex SAF 2205 y 2507 sometidos a tratamientos térmicos de normalizado a las temperaturas de 900, 950 y 1000°C por tiempo de 7 min para el SAF 2205 y 15 minutos para el SAF 2507. Se determinó que la resistencia mecánica aumento de manera considerable el mayor valor se encontró a 900°C. Se determinó que los valores de K_{IC} para las condiciones de normalizado de 900°C y 950°C, decaen fuertemente en ambos aceros con respecto a la condición original. Sin embargo se refleja claramente que para la condición de normalizado a 1000°C recupera en su totalidad el K_{IC} , y para el rango de temperatura de 700°C a 900°C los valores de tenacidad de impacto sufren una drástica disminución, causada por la aparición de fases intermetálicas.

Palabras Claves—Aceros inoxidable dúplex, comportamiento mecánico, ductilidad, resistencia mecánica, tenacidad de impacto y tratamiento térmico de Normalizado.

Abstract—In the research the mechanical behavior of SAF 2205 and 2507 duplex stainless steels subjected to normalized heat treatments at temperatures of 900, 950 and 1000 °C for 7 minutes for SAF 2205 and 15 minutes for SAF 2507 were evaluated. It was determined that the mechanical strength increased considerably, showing that the highest of values was found at 900 °C. It was determined that the K_{IC} values for the normalized conditions of 900 °C and 950 °C, reduce strongly in both steels with respect to the original condition. However, it is clearly reflected that for the normalized condition at 1000 °C, for that condition recovers that property in its entirety, and for the temperature range from 700 °C to 900 °C the impact toughness values suffer a drastic decrease, caused by the appearance of intermetallic phases.

Keywords— Ductility, duplex stainless steel, impact toughness, normalized thermal treatment and strength Stress.

I. INTRODUCCIÓN

Los aceros dúplex poseen una notable combinación de propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, producto de su estructura bifásica austenita-ferrita. La ferrita aporta alta resistencia mecánica y a la corrosión, mientras que la austenita ductilidad y resistencia a la corrosión uniforme. La resistencia a la corrosión es superior a la de los aceros austeníticos convencionales, sin que se experimente una pérdida en la ductilidad considerable de los mismos. Sin embargo, las propiedades de los mismos son sensibles a variaciones en su composición química, especialmente de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno [1], [2]. Los aceros dúplex además de poseer las fases de ferrita y austenita, también pueden formarse otras fases secundarias debido a variaciones en la temperatura a la que se encuentren expuestos, por lo general producto de algún tratamiento térmico. La formación de estas fases, modifica la microestructura original del acero, lo cual influye

directamente en sus propiedades mecánicas, variando su dureza, resistencia mecánica, tenacidad a la fractura, entre otras. Por lo que pudiera destinarse el acero a aplicaciones específicas en función del comportamiento mecánico que presente a una determinada temperatura [3].

El acero inoxidable dúplex SAF 2205 es un material muy adecuado para el servicio en ambientes que contienen cloruros y sulfuro de hidrógeno. El material es adecuado para su uso en tuberías de producción y líneas de flujo para la extracción de gas y petróleo desde pozos, en las refinerías y en las soluciones de procesos contaminados con cloruros, también es particularmente adecuado para intercambiadores de calor en donde se utiliza agua salobre como medio de enfriamiento [4]-[7].

Los Aceros inoxidable dúplex 2507 también conocidos como de alto contenido de nitrógeno, acero de alta aleación con un valor PRE mayor o igual a 42 y una composición química de 25% de cromo, 7% de níquel, 3.7% de molibdeno y 0.27% de nitrógeno. Se caracteriza por una muy buena resistencia a la corrosión por cloruros, combinado con muy alta resistencia mecánica. El acero inoxidable SAF 2507 es particularmente adecuado para uso en ambientes agresivos como el agua de mar clorada. [5]. El objetivo de la investigación es el de evaluar del comportamiento mecánico de los aceros inoxidable dúplex SAF 2205, y SAF 2507 sometidos a tratamientos térmicos de normalizado a las temperaturas de 900, 950 y 1000°C por tiempo de 7 y 15 minutos para estudiar como varían sus propiedades mecánicas con miras a incrementar sus aplicaciones industriales.

II. MÉTODO

A. Material

Los materiales utilizados son aceros inoxidable dúplex tipo SAF 2205 y SAF 2507, la composición química se encuentra especificada en la Tabla I.

TABLA I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX SAF, 2205 Y 2507 [9,10]

Acero inoxidable Dúplex	% C	% Cr	% Ni	% Mo	% N
SAF 2205	0,019	22,4	5,66	3,12	0,18
SAF 2507	0,020	25	7	4	0,27

B. Ensayos Mecánicos

El ensayo de tracción fue realizado en una maquina marca Galdabini de capacidad 20 toneladas, se utilizaron probetas de tracción planas para el acero SAF 2205 de 8,5mm de

espesor y cilíndricas de 20 mm de diámetro para el acero SAF 2507 de acuerdo a las especificaciones ASTM A-370 (ver Fig. 1). Para el ensayo de impacto se utilizó un péndulo marca Tinius Olsen con capacidad de 0-30 Kpm utilizaron tamaño subsize de 55x 10x 7,5 mm y 55 x 10 x 5 mm de acuerdo a las especificaciones ASTM E-23. Las dimensiones de las probetas se muestran en la Fig. 2.

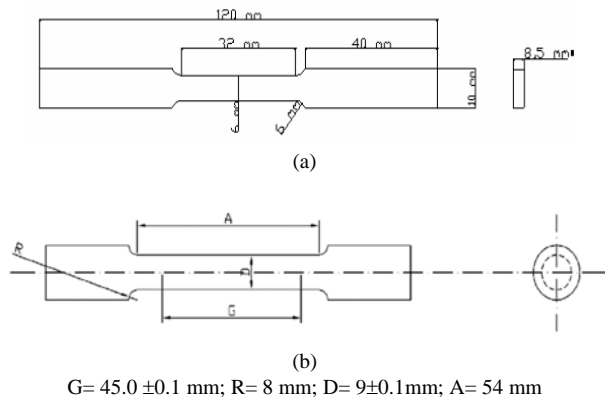


Fig. 1. Dimensiones de las probetas de tracción a) SAF 2205 [9] y b) SAF 2507, diámetro 20 mm [10].

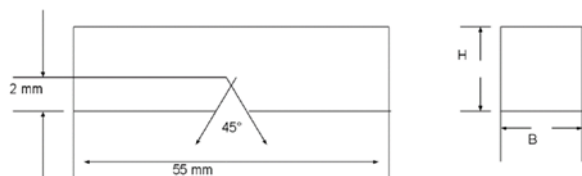


Fig. 2. Dimensiones de la probeta Charpy en V a) SAF 2205, H = 10 mm y B = 7,5 mm [9] y b) SAF 2507, H = 10 mm y B = 5 mm [10].

La microscopía electrónica de barrido MEB, se realiza en microscopio marca Jeol modelo JSM-5300.

C. Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico de normalizado se realizó en un horno de marca Thermolyne modelo 4800, las condiciones se especifican en la Tabla II [9 y 10].

TABLA II
CONDICIONES DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE NORMALIZADO PARA CADA ACERO [9,10]

Acero	Condiciones de exposición
SAF 2205	Temperatura: 900, 950 y 1000°C Tiempo de normalizado: 7 minutos.
SAF 2507	Temperatura: 900, 950 y 1000°C Tiempo de normalizado: 15 minutos.

La tenacidad de impacto y fractura se determinaron para los dos aceros, el factor de intensidad de esfuerzo, K_{IC} se calculó a partir de la relación empírica de Barsom y Rolfe [12] (1). Para la determinación de la tenacidad de impacto del material se utilizó la relación empírica entre los valores de K_{IC} y CVN propuesta por Barsom, Rolfe y Novak [12] definida en (1).

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = \frac{5}{\sigma_y} \left(CVN - \frac{20}{\sigma_y}\right) \quad (1)$$

donde K_{IC} es el factor de intensidad de esfuerzo crítico bajo condiciones de estado plano de deformación, σ_y es el esfuerzo de fluencia y CVN es el valor de ensayo de impacto Charpy.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

D. Resistencia Mecánica

El acero dúplex 2507 [10] refleja que la resistencia mecánica del acero se va incrementando con respecto a la condición original, obteniéndose el mayor valor al realizar el tratamiento de normalizado a 900°C, pero al incrementar la temperatura del proceso a 1000°C se observó que la resistencia disminuye notablemente con respecto al rango anterior pero manteniéndose levemente por encima de la condición original, esto pudo haberse ocasionado debido a que el material entro en una fase de recuperación, lo que demuestra que el material se ablando casi hasta igualar los valores de elasticidad de la condición original. Por otra parte, el acero dúplex 2205 [9] tiene un comportamiento similar a [10], la resistencia mecánica aumento de manera considerable pudiéndose evidenciar que el rango más alto de valores se encuentra asignado a las temperaturas comprendidas entre 900°C a 950°C y, a partir de 1000°C se muestra un notable decrecimiento de los mismos aunque encontrándose también ligeramente por encima de la condición original. En la Tabla III y Fig. 3 se presentan los resultados de resistencia mecánica (σ_y y $\sigma_{máx}$) y ductilidad (% e y % RA) para ambos aceros.

TABLA III
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX SAF 2507 Y SAF 2205 [9,10]

Acero dúplex	Condición	Esfuerzo fluencia, σ_y (MPa)	Esfuerzo máximo, $\sigma_{máx}$ (MPa)	Deformación Ingeniería, e %	Reducción de Área, RA %
SAF 2205	CO	616	844	53,87	76,87
	TTN 900 °C / 15 min	779	905	28,86	12,58
SAF 2507	TTN 950 °C / 15 min	656	903	36,58	29,36
	TTN 1000 °C / 15 min	621	847	52,91	76,22
SAF 2205	CO	580	752	50,94	64,98
	TTN 900 °C / 7 min	613	786	43,13	39,95
SAF 2507	TTN 950 °C / 7 min	621	783	43,70	40,35
	TTN 1000 °C / 7 min	589	768	50,00	61,54

*TTN= tratamiento térmico de normalizado
CO= condición original

En la Fig. 3 y la Tabla III se puede notar la indiscutible diferencia con respecto a los valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo de los dos aceros inoxidable dúplex estudiados, En la Fig. 3 se observa el aumento de la resistencia mecánica conforme aumenta la temperatura hasta el valor de 900°C, y pasado este empieza a disminuir. Según Ghosh y Mondal [11] cuando los aceros dúplex son expuestos a temperaturas entre 700°C y 900°C, durante los

mismos períodos de tiempo, se ha observado que a medida que se incrementa la temperatura, experimentan un ligero aumento en su esfuerzo de fluencia, así como una pequeña pérdida de ductilidad. Esto es debido a la aparición de las fases secundarias: σ , γ_2 y χ . Sin embargo el incremento del tiempo de exposición a temperaturas dentro del rango mencionado anteriormente, ocasiona aumentos significativos en la dureza del material, no así en su esfuerzo de fluencia y ductilidad que varían ligeramente, aumentando y disminuyendo respectivamente.

E. Ductilidad

Con respecto a la ductilidad de los aceros evaluada a través del porcentaje de reducción de área (ver Fig. 4), en el caso del acero dúplex SAF 2205 se puede apreciar que luego de aplicar el normalizado a la máxima temperatura, el material recupera en un gran porcentaje su ductilidad. Para el acero 2507 se puede decir que el material después de haber sido sometido a un tratamiento térmico de normalizado de 1000°C recupera nuevamente su ductilidad, dicha recuperación entra en presencia cuando al material se le aplica el normalizado a 950°C.

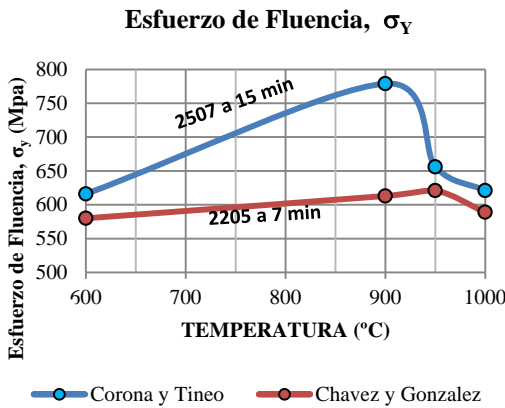


Fig. 3. Esfuerzo de fluencia σ_y en función de la temperatura y [9], [10].

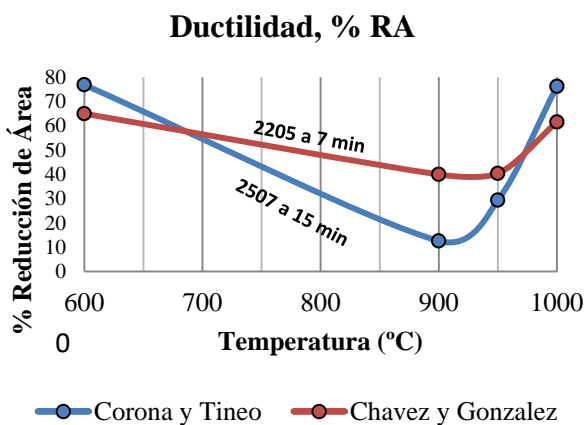


Fig. 4. Ductilidad medida como % reducción de área, %RA en función de la temperatura [9], [10].

F. Tenacidad de Impacto y Fractura

Los resultados de energía absorbida por impacto CVN, determinados a través del ensayo de impacto Charpy en V se observan en la Fig. 5. Se puede observar como los valores de K_{IC} para las condiciones de normalizado de 900°C y 950°C, decaen fuertemente en ambos aceros con respecto a

la condición original, el material no es capaz de absorber altos niveles de energía antes de fracturarse. Sin embargo se refleja claramente que para la condición de normalizado a 1000°C el valor de la tenacidad de impacto se iguala o se acerca en estos aceros al valor de la condición original por lo que se puede concluir que para esa condición recupera en su totalidad esa propiedad, y para el rango de temperatura de 700°C a 900°C los valores de tenacidad sufren una drástica disminución, posiblemente causada por la aparición de fases intermetálicas.

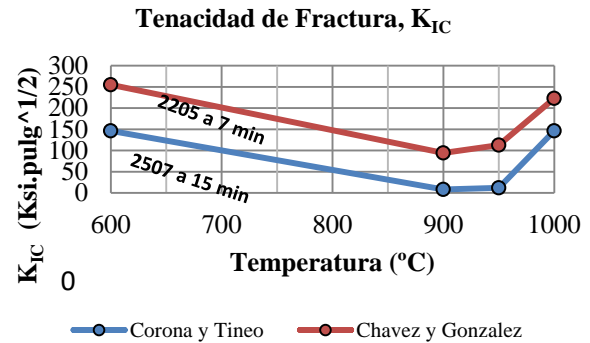


Fig. 5. Tenacidad de fractura, K_{IC} en función de la temperatura [9], [10].

G. Microscopia Electronica de Barrido

En la Fig. 6 para el acero dúplex 2507 por MEB, se observa a 900 °C austenita, ferrita y fase sigma mientras que para 950°C se observa ferrita, austenita y la formación de fase sigma(σ) y austenita secundaria (γ_2) en la interfase austenita-ferrita. La presencia de fase sigma en el acero dúplex género el incremento de resistencia mecánica y dureza a 900 y 950°C, al mismo tiempo se redujo la tenacidad de impacto y tenacidad de fractura. A 1000 °C no hay fase sigma ni austenita secundaria, la microestructura generada por efecto del tratamiento térmico es muy similar a su condición original, con lo que se concluye que la temperatura y el tiempo son factores determinantes.

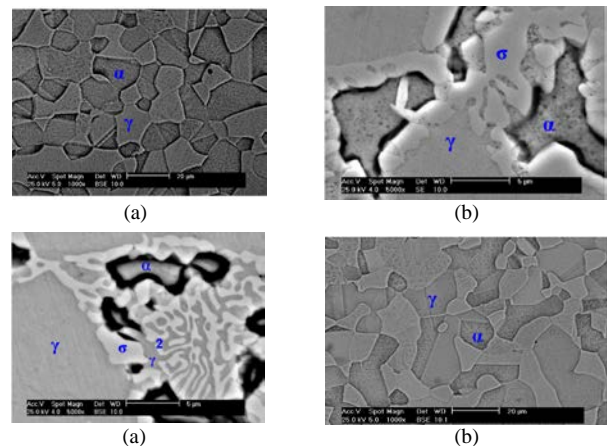


Fig. 6. Microestructura por MEB del acero dúplex 2507 (a) Condición original, normalizado a: (b) 900 °C, (c) 950°C y (d) 1000°C. Reactivo de ataque, $Na_2S_2O_5$ [9,10].

El efecto de los cambios producidos microestructuralmente sobre la tenacidad de impacto del material, la presencia de la fase fragilizante (Sigma) promueve la aparición de grietas microscópicas, que junto con la notable disminución de la ductilidad promueven a el

material a un estado frágil, que lo hace propenso a la fractura por impacto en las condiciones de 900°C y 950°C. para los Normalizados realizados para las temperaturas de 900°C-950°C, los porcentajes de fase sigma son elevados con respecto al porcentaje de la fase ferrítica, provocando una fuerte disminución en la ductilidad, el tiempo de 15 minutos de permanencia en el horno es suficiente para promover la descomposición de la fase ferrítica en fase sigma y austenita secundaria para las temperaturas de 900°C y 950°C, del mismo modo que para la condición de 1000°C, el tiempo es suficiente para que esta fase desaparezca casi completamente.

IV. CONCLUSIONES

La microestructura luego de realizado el tratamiento térmico de normalizado, para el acero dúplex 2507, se observa a 900 °C austenita, ferrita y formación de fase sigma mientras que para 950°C se observa ferrita, austenita, la formación de fase sigma(σ) y austenita secundaria (γ_2) en la interfase de la matriz bifásica (austenita – ferrita). Mientras para el acero dúplex 2205 al realizar el tratamiento térmico de normalizado a 1000°C solo se le observan segregaciones. La temperatura optima de normalizado es de aproximadamente 1000°C porque se produce un notable aumento en la ductilidad de los aceros inoxidable dúplex y se recupera la tenacidad de impacto perdida en las condiciones de 900°C y 950 °C.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Internacional de Molibdeno, Londres Reino Unido. "Directrices prácticas para la fabricación de los aceros inoxidables dúplex". 2012.
- [2] Charles J. "Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties", *Dúplex Stainless Steel '91 Conference Proceedings*, Beaune, Francia, Volumen 1, Página 3. 1991.
- [3] Karlsson, L. "Intermetallic phase precipitation in duplex stainless steels and Weld metals: Metallurgy, influence on properties, welding and testing aspects". WRC bulletin. Vol. 438,
- [4] Olsson, J. Snis, M. Duplex—A new generation of stainless steels for desalination plants. *Desalination* 2007, 205, 104–113. [CrossRef]
- [5] Dabalá, M. Calliari, I. Variola, A. Corrosion behavior of a superduplex stainless steel in chloride aqueous solution. *J. Mater. Eng. Perform.* 2004, 13, 237–240. [CrossRef]
- [6] Machuca, L.L. Bailey, S.I. Gubner, R. Watkin, E.L.J. Ginige, M.P. Kaksonen, A.H. "Crevice corrosion of duplex stainless steels in the presence of natural marine biofilms," *NACE Int. Corros. Conf. Ser.* 2012, 5, 3924–3936.
- [7] Veljkovic, M.; Gozzi, J. "Use of duplex stainless steel in economic design of a pressure vessel," *J. Press. Vessel Technol.* 2007, 129, 155–161. [CrossRef] pp 1-20. 1999.
- [8] Apraiz Barreiro Jose. 2000. "Tratamientos Térmicos de los aceros S.L.," *CIE inversiones editoriales Dossat*. 10ma edición
- [9] Chávez J. y González R. "Evaluación de la tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF 2205 al someterlo a un tratamiento térmico de normalizado," Trabajo especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2006.
- [10] Corona A. y Tineo Z. "Evaluación de la tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF 2507 sometido a un tratamiento térmico de normalizado," Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2007.
- [11] Ghosh S. y Mondal S. "High Temperature ageing behavior of a duplex stainless steel," *Materials Characterization*. Vol. 59, N°. 12, p. 1776-1783. 2008.
- [12] Rolfe, S. y Barson J. "Fracture and fatigue control in structure," Prentice Hall inc. Englewood Cliffs, N.J. 1977.