


## Tech Note. Embrittlement of duplex stainless steels SAF 2205 y SAF 2507 subjected to artificial aging heat treatments

Laura Sáenz <sup>\*,a,b</sup> , Krishna Aguilera <sup>c</sup> , Reinaldo Heredia <sup>c</sup>, Trino Romero <sup>d</sup> ,  
Caterine Donoso <sup>b</sup> , Marcos Singaña <sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Centro de Investigación de Materiales CIM, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>b</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Quito, API715231B, Ecuador.

<sup>c</sup>Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>d</sup>Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

**Abstract.-** The research studies the embrittlement of SAF 2205 and SAF 2507 duplex stainless steels subjected to artificial aging treatments. Artificial aging treatments were performed Charpy V-shaped tensile and impact specimens, the treatment consisted of two phases, first the solubilization of the steels was carried at temperatures between 1100 °C and 1200 °C with times between 1 h and 2 h, and second, the artificial aging was carried out at temperatures of 475 °C, 700 °C, 850 °C, 870 °C, and 900 °C. There are several factors that affect the mechanical characteristics of stainless steels, for example, the existence of micro-segregations and the precipitation of secondary phases, which can take place during solidification, shaping, heat treatment, welding operations, etc. The study carried out allowed the construction of curves that show the changed in the mechanical behavior obtained from the SAF 2205 and SAF 2507 duplex steels, where it is observed that as aging time increases, ductility, mechanical strength, and impact toughness are reduced. In the microstructure was observed the precipitation of sigma and Chi secondary phases.

**Keywords:** microstructure; annealing; ultimate tensile stress; elongation; toughness.

## Nota Técnica. Fragilización de aceros inoxidables dúplex SAF 2205 y SAF 2507 sometidos a tratamientos térmicos de envejecimiento artificial

**Resumen.-** La investigación estudia la fragilización de los aceros inoxidables dúplex SAF 2205 y SAF 2507 sometidos a tratamientos de envejecimiento artificial. Las probetas de tracción e impacto Charpy en V fueron sometidas a tratamiento de envejecimiento artificial que constó de dos fases, primero se realizó la solubilización a temperaturas entre 1100 °C y 1200 °C con tiempos entre 1 h y 2 h, y segundo el envejecimiento artificial fue realizado a temperaturas de 475 °C, 700 °C, 850 °C, 870 °C y 900 °C. Existen varios factores que afectan a las características mecánicas de los aceros inoxidables, por ejemplo, la existencia de micro segregaciones y la precipitación de fases secundarias, que pueden tener lugar durante la solidificación, conformado, tratamiento térmico, operaciones de soldadura, entre otros. El estudio realizado permitió la construcción de curvas que muestran los cambios en el comportamiento mecánico de los aceros dúplex SAF 2205 y SAF 2507, donde se observa que a medida que incrementa el tiempo de envejecimiento, se reduce la ductilidad, resistencia mecánica y tenacidad de impacto. En la microestructura se observó la precipitación de fases secundarias sigma y Chi.

**Palabras clave:** microestructura; recocido; esfuerzo máximo; ductilidad; tenacidad.

Recibido: 19 de enero, 2021.

Aceptado: 16 de marzo, 2021.

### 1. Introducción

Los primeros aceros inoxidables dúplex que aparecieron en la historia estaban compuestos

básicamente por cromo y níquel, y estos han sido denominados aceros de primera generación, se produjeron en Suecia en el año 1930, para ser usados en la industria del papel con la finalidad de reducir los problemas de corrosión que se presentaban regularmente es esa industria. De acuerdo con la Asociación Internacional de Molibdeno [1], el molibdeno ha pasado a formar parte de los componentes básicos incrementando

\* Autor para correspondencia:

Correo-e:lsaenz29@gmail.com (L. Sáenz)

así la resistencia, estos han sido denominados aceros de última generación. Investigaciones de Nilsson [2] y Charles [3] encontraron que 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 estos son sensibles a variaciones en su composición química, especialmente de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno. En [4] y [5] se determinó que los aceros dúplex además de poseer las fases de ferrita y austenita, también pueden aparecer 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. Pohl [4], Llorca-Isern [6], Kim [7] y Ferro [8], han reportado que la precipitación de fases intermetálicas en aceros inoxidables dúplex (SSD) y aceros inoxidables súper dúplex (SSSD) ha sido producto de los tratamientos isotérmicos realizados al acero, verificándose precipitación suficiente para deteriorar las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión en tiempos mayores de 100 segundos a temperaturas en el rango entre 850 °C y 950 °C. Durante el enfriamiento de los SSD, la precipitación de la austenita está acompañada de precipitación de otras fases ( $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $\sigma$ , Chi  $\chi$ , Laves,  $\alpha'$ ) dependiendo de la temperatura máxima alcanzada y del tiempo de permanencia en el intervalo de precipitación. Estas fases intermetálicas precipitan por nucleación en sitios de alta energía como puntos triples de granos,

límite de grano, inclusiones, dislocaciones y vacancias y es favorecida por la distribución preferencial de los elementos aleantes en la ferrita y en la austenita. Así el molibdeno, cromo y silicio se disuelven preferencialmente en la ferrita favoreciendo la precipitación de fases intermetálicas, mientras que el manganeso, níquel y nitrógeno se difunden preferencialmente en la austenita. En [4] han indicado que la austenita secundaria,  $\gamma_2$ : aparece cuando se realiza un recocido a altas temperaturas, próximas o incluso incluidas en el dominio monofásico de ferrita, tras el enfriamiento, la ferrita se encuentra enriquecida de elementos gammágenos. Un posterior calentamiento a temperaturas comprendidas entre 600 °C y 900 °C produce la transformación de la ferrita en austenita, y es esta nueva austenita formada lo que se denomina austenita secundaria. Pohl [4], Llorca-Isern [6], Kim [7] y Ferro [8] indicaron que la fase  $\sigma$  es la más perjudicial de todas las fases que puedan precipitar en los aceros dúplex, influye directamente en la tenacidad y resistencia a la corrosión, afecta la ductilidad en caliente y frío, favorece la aparición de grietas muy finas. El intervalo de aparición en el que se evidencia esta fase es de aproximadamente (550 °C–900 °C) precipitando en las uniones triples o en los límites de grano ferrita/austenita, coexiste con fases como los nitruros de cromo, la austenita secundaria, la fase Chi, la fase R, la fase Pi, la fase Tao, las cuales afectan su nucleación y crecimiento, concordando con los estudios de Pohl [4], Llorca-Isern [6], Kim [7] y Ferro [8]. Los estudios realizados por Pohl [4], Ghosh y Mondal [9], Kim [7] y Ferro [8], han mostrado que la fase Chi,  $\chi$  es una fase intermetálica, se forma en los límites de las fases ferrita-austenita, creciendo hacia el interior de la ferrita y puede ser identificada usando difracción de electrones en el microscopio electrónico de transmisión. Esta fase suele aparecer en el rango de temperatura de 700 °C a 900 °C y en cantidades menores que la fase  $\sigma$ , además de que ocurre en tiempos menores, y es considerada metaestable ya que actúa como facilitadora para la formación de fase  $\sigma$ , descomponiéndose completamente en ella después de largos tiempos de exposición. El efecto de esta fase sobre la tenacidad y el comportamiento

contra la corrosión son perjudiciales, y se dificulta separar de la fase sigma. Pohl [4] define la Fase R, como una fase intermetálica trigonal que puede precipitar en el intervalo de temperaturas de 550 °C a 800 °C, influyen en la fragilización y disminución de las propiedades anticorrosivas. Esta fase presenta una composición aproximada de (16-30) %Cr, (3-5) %Ni, y (25-40) %Mo. Pohl [4], Kim [7] y Ferro [8] definen la Fase pi,  $\pi$  como una estructura cristalina cúbica y al igual que la fase R, contribuye a la fragilización y corrosión por picadura cuando el material ha sido sometido a un tratamiento isotérmico de envejecimiento a 600 °C. Esta fase contiene aproximadamente 28 %Fe, 35 %Cr, 3 %Ni y 34 %Mo. Pohl [4], Kim [7] y Ferro [8] han encontrado que la precipitación de nitruros de cromo ( $\text{Cr}_2\text{N}$ ) se presenta en el intervalo de temperaturas entre 700 °C y 900 °C por el enfriamiento rápido desde altas temperaturas de solubilización como consecuencia de una sobresaturación de nitrógeno en la ferrita. Ocurre preferencialmente en los límites de grano ferrita/ferrita, presentándose como partículas alargadas que precipitan intergranularmente. Pohl [4], Kim [7] y Ferro [8] han encontrado que a temperaturas inferiores a 500 °C las reacciones de precipitación de las fases mencionadas son relativamente lentas, lo que produce un fenómeno denominado fragilización, exactamente a una temperatura de 475 °C. La formación de estas fases influye directamente en las propiedades mecánicas y anticorrosivas de los aceros inoxidables dúplex. Topolska y Lawanoski [10], indicaron que el endurecimiento por precipitación es un poderoso método para controlar el endurecimiento óptimo por dispersión, es decir para aumentar la dureza y resistencia de las aleaciones. El endurecimiento por precipitación se basa en los cambios de la solubilidad de sólido con la temperatura para producir partículas finas de una impureza de fase, que impiden el movimiento de dislocaciones o defectos a través de la estructura del cristal. Dado que las dislocaciones son a menudo los operadores dominantes de la plasticidad, esto sirve para endurecer el material. Las impurezas desempeñan la misma función que los refuerzos en los materiales compuestos

reforzados. Así como la formación de hielo en el aire puede producir nubes, nieve o granizo, dependiendo de la historia térmica de una porción dada de la atmósfera, la precipitación de los sólidos puede producir diferentes tamaños de partículas, que tienen propiedades radicalmente diferentes. A diferencia del temple ordinario, las aleaciones deben mantenerse a temperatura elevada durante horas para permitir que la precipitación tenga lugar, este retardo de tiempo se denomina envejecimiento. Topolska y Lawanoski [10] encontraron que cuando los aceros inoxidables dúplex son expuestos a altas temperaturas de operación incluso durante pequeños períodos de tiempo, precipitan diversas fases secundarias. Resulta de interés, por lo tanto, el estudio del efecto de la formación de estos precipitados, sobre el comportamiento mecánico de los aceros dúplex, para determinar si influyen favorablemente o no sobre las propiedades mecánicas de los mismos. Sin embargo, esta familia de aceros sufre fragilización cuando son expuestos a un rango de temperaturas, lo que limita sus aplicaciones. Topolska S. y Lawanoski J. [10], indican que la severa caída en la tenacidad de impacto y resistencia mecánica y ductilidad que puede ocurrir en el material hace necesaria una mayor investigación sobre su respuesta al envejecimiento a temperaturas intermedias y altas con el fin de precisar la confiabilidad de estos cuando son sometidos a tales condiciones en servicio. La presente investigación tiene como objetivo evaluar la fragilización de los aceros dúplex SAF 2205 y SAF 2507 sometidos a tratamientos térmicos de envejecimiento.

## 2. Procedimiento experimental

### 2.1. Material

Se utilizaron muestras de aceros inoxidables dúplex SAF 2205, y SAF 2507, la composición química se muestra en la Tabla 1.

### 2.2. Tratamientos térmicos

Se realizaron tratamientos térmicos de solubilización con posterior envejecimiento artificial a probetas de aceros dúplex de tracción y Charpy en V de acuerdo con las normas para ensayos de

Tabla 1: Composición química de los aceros inoxidables dúplex

% peso	SAF 2205	SAF 2507
%C (máx.)	0,03	0,02
%Cr	21 – 23	25
%Ni	4,5 – 6,5	7,0
%Mo	2,5 – 3,5	4
%N	0,08 – 0,2	0,27

tensión e impacto ASTM A370-17 [11] y ASTM E23-17 [12] respectivamente, a las condiciones del tratamiento especificadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Especificaciones de los tratamientos térmicos realizados a las probetas de tracción y Charpy en V de aceros inoxidables dúplex SAF2205 y SAF 2507

Aceros dúplex	Condiciones Solubilización	Condiciones Envejecimiento artificial
SAF2205 Sáenz [13]	1120 °C por 2 horas	475 °C por 1, 2, 6,5, 12, 24, 40 y 120 horas.
SAF2205 Griman y Marcano [14]	1020 °C por 1 hora	475 °C por 14, 24, 72 y 120 horas.
SAF2205 Grippi y Ocando [15]	1100 °C por 1 hora	850 °C por 48, 54 y 60 minutos.
SAF2205 Plaza [16]	1100 °C por 1 hora	850 °C por 6, 12 y 24 horas.
SAF2507 Mosquera y Tiamo [17]	1100 °C por 90 minutos	700 °C por 24, 48, 72 y horas.
SAF2205 Sáenz et al. [18]	1010 °C por 2 horas	850 °C por 0,5; 1, 5, 24 y 48 horas.
SAF2507 Mejias et al. [19]	1120 °C por 2 horas	850 °C por 6, 12 y 24 horas.
SAF2507 Arruti [20]	1100 °C por 90 minutos	870 °C por 2, 4, 6 y 10 minutos.
SAF2507 Mejias [21]	1100 °C por 90 minutos	900 °C por 2, 4, 6 y 10 minutos.

### 2.3. Ensayos mecánicos

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina Universal marca Galdabini de 20 ton de capacidad, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM A – 370-17 [11] se utilizaron probetas planas y cilíndricas. Los ensayos de impacto Charpy en V, se realizaron con un péndulo marca Karl Frank, con un intervalo de 0 hasta 30 Kp.m, acorde con la Norma ASTM E-23-17 [12].

## 3. Resultados

### 3.1. Resistencia mecánica

En la Figura 1, se muestran las curvas de resistencia mecánica en función del tiempo de envejecimiento para los aceros inoxidables dúplex SAF 2205 y 2507 para las condiciones especificadas en la Tabla 2, donde se observa que el esfuerzo de fluencia del acero inoxidable dúplex SAF 2205 genera una familia de curvas de comportamiento similar, a pesar de arrojar valores distintos del esfuerzo a la misma temperatura del tratamiento, como es el caso de 475 °C, reportado por Sáenz [13] y Griman y Marcano [14], se asume fue debido al tamaño de las probetas utilizadas por Sáenz [13], probetas cilíndricas tipo sub-size, los posibles elementos aleantes o impurezas que componen las muestras de estudio o al proceso de mecanizado que recibió cada probeta, debido a que eran de dimensiones y forma diferente. Puede notarse que para tiempos prolongados de envejecimiento y una temperatura inferior, el esfuerzo de fluencia se incrementa consecuentemente, por lo que se puede concluir que mientras mayor sea el tiempo de envejecimiento del acero dúplex, la resistencia mecánica se incrementa y provoca el endurecimiento al acero dúplex. En la Figura 1, se muestran resultados del estudio de envejecimiento realizados por Grippi y Ocando [15] y Plaza [16] al acero inoxidable dúplex SAF 2205 a 850 °C, se encontró que, para periodos cortos de exposición y altas temperaturas (850 °C), inicialmente el esfuerzo disminuye considerablemente y no es sino a partir de una hora que empieza a incrementar la resistencia mecánica, se presume que es debido a la formación de fase sigma lo cual será estudiado posteriormente con el estudio de la microestructura. En la Figura 1, Arruti [20] encontró que para el acero SAF 2507 mientras mayor es la temperatura del tratamiento térmico de envejecimiento mayor es la resistencia mecánica del acero, esto sucede para las temperaturas de 870 °C, en Mejias [21] a 900 °C, pero el estudio realizado por Mosquera y Tiamo [17] a 700 °C se encuentra un punto de inflexión a 72 horas y luego disminuye la resistencia mecánica. Por otra

parte, el comportamiento mecánico es inverso para Cepeda [22] a la temperatura de 685 °C, donde se observa que a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento la resistencia mecánica disminuye. Las investigaciones realizadas por Llorca-Isern [6], Kim [7] y Ferro [8], Arruti [20], Cepeda [22], Mejias [19] y Sáenz [18] han encontrado que los comportamientos de la resistencia mecánica de los aceros inoxidable dúplex están asociados con los precipitados (carburos, nitruros) o las partículas de segunda fase ( $\sigma$ ,  $\chi$ ,  $\alpha'$ ,  $\gamma_2$ ) que se han formado para cada una de las condiciones de las variables temperatura y tiempo en las que se han realizado los tratamientos térmicos de envejecimiento. En la Figura 1, se puede observar que el esfuerzo de fluencia tiende a incrementar a medida que incrementa el tiempo de envejecimiento del acero, generando así un leve incremento en la resistencia mecánica del acero inoxidable dúplex 2507 que puede ser provocado a la descomposición de la fase ferrita por la difusión de sus elementos aleantes (cromo y molibdeno), a elevadas temperaturas, lo que trae como consecuencia la formación de las fases sigma ( $\sigma$ ), Chi ( $\chi$ ), y austenita secundaria ( $\gamma_2$ ) como se observa en la Figura 1. En los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas por Llorca-Isern [6], Kim [7] y Arruti [20], los precipitados se presentan en forma de partículas finas que se oponen al movimiento de las dislocaciones obligándolas a pasar a través de estos.

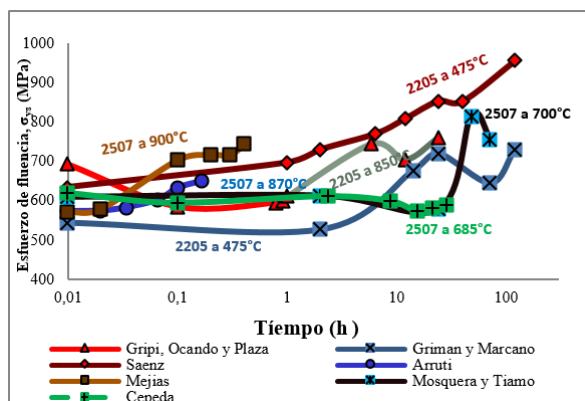


Figura 1: Curva de Resistencia Mecánica ( $\sigma_{y,s}$ ) en función del tiempo de envejecimiento de los aceros inoxidable dúplex SAF 2205 y 2507 sometidos a tratamientos de envejecimiento artificial

El esfuerzo de fluencia  $\sigma_{y,s}$  se incrementa con el tiempo de envejecimiento, y provoca la fragilización del acero dúplex, debido a la formación de fases inestables a diferentes temperaturas y a la alta concentración de precipitados que favorece la formación de microgrietas y da lugar a superficies de fractura frágil, con una escasa reducción en el diámetro de la zona calibrada de las probetas ensayadas.

### 3.2. Ductilidad

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la ductilidad evaluado a través del porcentaje de deformación de Ingeniería (%e), se puede observar que a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento, el %e se mantiene en rangos de valores de poca fluctuación y a partir de cierto tiempo comienzan a disminuir, lo que indica que el material se endurece por efecto del tratamiento térmico de envejecimiento por la formación de precipitados o a la reducción de la cantidad de dislocaciones que dificultan y limitan la capacidad de deformación a medida que aumenta el tiempo del tratamiento térmico de envejecimiento. Sáenz [13] y Griman y Marcano [14] encontraron que para el acero 2205 a 475 °C, aumenta la ductilidad a medida que incremento el tiempo de envejecimiento (Figura 2), este comportamiento es similar al reportado por Grippi y Ocando [15] y Plaza [16] para la temperatura de 850 °C.

Cepeda [22], y Mosquera y Tiamo [17] han reportado que para el acero 2507 a 685 °C y 700 °C respectivamente, existe endurecimiento del material hasta 28 h y 70 h de tratamiento respectivamente, mientras que Arruti [20] a 870 °C, y Mejias [21] y Mejias [19] a 900 °C, encontraron que el endurecimiento se evidencia en tiempos muy cortos de 0,16 h y 0,4 h. Este comportamiento evidencia la formación de fases secundarias, como la fase sigma en cortos periodos de exposición del tratamiento térmico de envejecimiento en este rango de temperaturas (850 °C y 900 °C). En las investigaciones realizadas por Llorca-Isern [6], Kim [7], Arruti [20], Cepeda [22], Sáenz [18] y Mejias [19], se observa claramente que, aunque se produce un ligero aumento en la resistencia del acero dúplex 2507, ocurre una

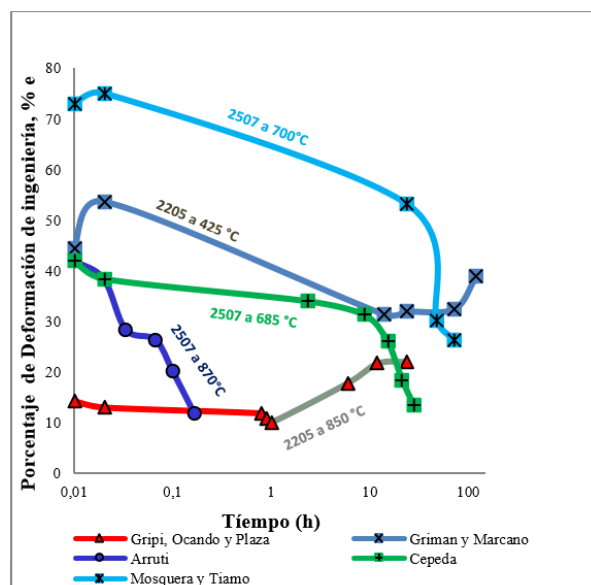


Figura 2: Curva de Ductilidad en función del tiempo de envejecimiento de los aceros inoxidable dúplex SAF

importante reducción de la ductilidad, producida por la formación de precipitados como la fase Chi ( $\chi$ ) y la fase sigma ( $\sigma$ ) las cuales se pueden observar en la Figura 3. En la Figura 2 se muestra como el aumento en la temperatura tiene una influencia negativa en la ductilidad del material, aun cuando el tiempo de exposición de las probetas dentro del horno es considerablemente reducido con respecto a otros. Arruti [20], encontró que para la temperatura de 870 °C, se reflejó que con sólo 2 minutos de tratamiento el porcentaje de reducción de área disminuye un 45% y fue disminuyendo progresivamente entre 4 y 10 minutos de envejecimiento, incluso el tratamiento de solubilización produce un efecto adverso en la ductilidad del acero dúplex. Las investigaciones de Arruti [20], Cepeda [22], Mosquera y Tiamo [17], y Mejias [21] arrojaron que el comportamiento mecánico de la resistencia y la ductilidad del acero dúplex estudiado 2507, están en concordancia con la investigación previa de Ghosh y Mondal [9], en la cual se determinó que la formación de precipitados como la fase Chi ( $\chi$ ) hacia el interior de los granos de ferrita y de fase Sigma ( $\sigma$ ) a lo largo de los límites de las fases austenita/ferrita, produce en un acero dúplex un pequeño incremento en

la resistencia del material pero una significativa reducción en los valores de su ductilidad, cuando es sometido a altas temperaturas de envejecimiento, aun si el tiempo del tratamiento es corto.

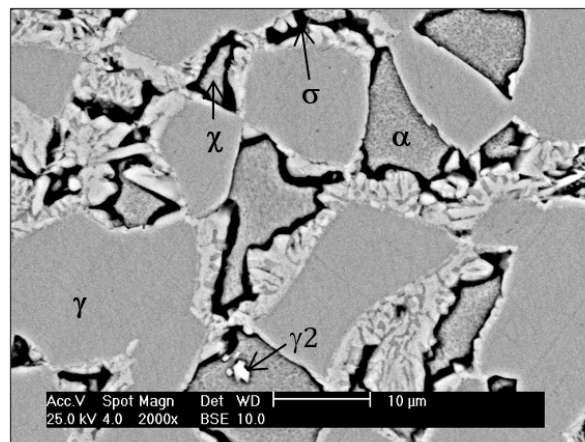


Figura 3: Microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2507 observado mediante SEM (X2000), en su condición original, solubilizada a 1100°C por 90 min y envejecida isotérmicamente a 870°C por 10 min., se observan las fases ferrita y austenita y las fases secundarias sigma, Chi y austenita secundaria ( $\sigma$ ,  $\chi$ ,  $\gamma_2$ ) [20].

### 3.3. Tenacidad de impacto

De los estudios realizados por Sáenz [18], Griman y Marcano [14], Grippi y Ocando [15], Plaza [16], Cepeda [22], Mosquera y Tiamo [17], Arruti [20] y Mejias [21] se pueden resumir en la Figura 4 donde se observa que para todos los aceros inoxidables dúplex 2205 y 2507 sometidos al tratamiento de envejecimiento realizado a las temperaturas de 475 °C, 850 °C y para el 2507 a las temperaturas de 685 °C, 700 °C, 870 °C y 900 °C, a medida que se incrementa el tiempo de envejecimiento la tenacidad de impacto cae bruscamente, siendo más crítica a temperaturas altas (870 °C y 900 °C) donde la fragilización del acero es inmediata, antes de una hora de tratamiento, lo que indica la formación de precipitados de segunda fase como lo son la fase Sigma ( $\sigma$ ) y Chi ( $\chi$ ) que provocan que el acero se fragilice a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento, es decir, pierde su capacidad de absorber energía, los resultados

se observan en la microestructura reportados en la Figura 3 [20]. La tenacidad de impacto evaluada a través de la energía absorbida por impacto disminuyó considerablemente para los estudios en comparación, puede observarse en la Figura 4 que el par tiempo–temperatura va a influir directamente en el descenso de los valores de la tenacidad de impacto. Esto se debe a la formación de precipitados (como las fases:  $\alpha'$ ,  $\sigma$ ,  $\chi$ , carburos y nitruros), tal como lo demuestran los estudios realizados por Llorca-Isern [6], Kim [7], Arruti [20], Cepeda [22] y Mejías [21]. Por otra parte, Nilsson [2] observó que, en la estructura original del material, estos impiden el movimiento de las dislocaciones durante la deformación, forzando a que éstas pasen a través de las partículas del precipitado, cortándolas, lo que incrementa la posibilidad de iniciación de microgrietas, conduciendo a un comportamiento frágil del material. Nilsson [2] encontró que tan sólo una fracción de volumen del uno por ciento de precipitados puede ocasionar que la energía absorbida por impacto del material alcance un valor equivalente a un tercio de la presentada en su condición original. Se presume que la disminución drástica en la energía absorbida por impacto del material se deba principalmente a la formación de fase Sigma ( $\sigma$ ) en los límites de las fases austenita/ferrita y ferrita/ferrita. La fase Sigma ( $\sigma$ ) es una fase secundaria que fragiliza a los aceros dúplex incluso cuando aparece en pequeñas cantidades. Una vez que precipita, una pequeña deformación en el material puede producir fracturas frágiles con una estructura fina y transcristalina de partículas de fase Sigma ( $\sigma$ ). Las grietas tienden a crecer a través de las partículas de esta fase por largas distancias, favoreciendo al comportamiento frágil del material. Investigaciones realizadas por Nilsson [2], han demostrado que los aceros dúplex toleran hasta un contenido de fase Sigma ( $\sigma$ ) del 2 al 5% antes de alcanzar una energía absorbida por impacto crítica de 32 J encontrada por Hau *et al.* [23]. El acero inoxidable dúplex 2205 a 475 °C cumple con esta relación encontrada por Hau [23], mientras que el resto de los aceros fragiliza bruscamente por lo que limita el uso del

acero inoxidable dúplex 2507 a temperaturas altas (685 °C, 700 °C, 850 °C y 900 °C) donde la energía absorbida por impacto es inferior a 32 J.

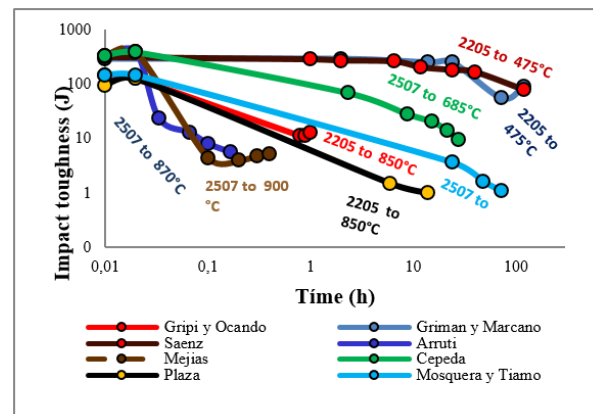


Figura 4: Curva de Tenacidad de impacto en función del tiempo de envejecimiento de los aceros inoxidables dúplex SAF 2205 y 2507 sometidos a tratamientos de envejecimiento artificial

#### 4. Conclusiones

El estudio realizado permitió la construcción de curvas que muestran el comportamiento mecánico de los aceros inoxidables dúplex SAF 2205 y SAF 2507 sometidos a tratamiento térmico de envejecimiento artificial realizado a las temperaturas de 475 °C, 700 °C, 850 °C, 870 °C y 900 °C. Los tratamientos de envejecimiento artificial al cual fueron sometidos los aceros inoxidable dúplex SAF 2205 y SAF 2507, ocasionaron el aumento de resistencia mecánica, así como la pérdida de ductilidad y tenacidad de impacto a medida que se incrementó el tiempo de envejecimiento, ocasionada por la presencia de fases secundarias como lo son la fase Sigma, Chi y austenita secundaria en los aceros inoxidables duplex estudiados. El acero duplex 2205 para altas y bajas temperaturas mantiene la ductilidad o tienen menor tendencia a endurecer o formar precipitados, mientras que el 2507 incrementa la resistencia mecánica a tiempos de envejecimiento muy cortos, endurece tempranamente provocando la fragilización del acero, limitando su uso.

## 5. Referencias

- [1] Asociación Internacional de Molibdeno, *Directrices prácticas para la fabricación de los aceros inoxidables dúplex*. Londres, Reino Unido: International Molybdenum Association(IMOA), 2012.
- [2] J. Nilsson, “Super Duplex Stainless Steels,” *Materials Science and Technology*, vol. 8, no. 8, pp. 685–700, 1992.
- [3] J. Charles, “Superduplex, stainless steels: structure and properties,” in *Duplex stainless steels’91*, vol. 1. Les Ulis, France: Les Editions de Physique, 1991.
- [4] M. Pohl, O. Storz, and T. Glogowski, “Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel,” *Materials Characterization*, vol. 58, no. 1, pp. 65–71, 2007.
- [5] F. M. Elsabbagh, R. M. Hamouda, and M. A. Taha, “On microstructure and microhardness of isothermally aged UNS S32760 and the effect on toughness and corrosion behavior,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 25, pp. 275–284, 2014.
- [6] N. Llorca-Isern, I. López-Jiménez, H. López-Luque, M. V. Biezma, and A. Roca, “Study of the precipitation of secondary phases in duplex and superduplex stainless steel,” in *Materials Science Forum*, vol. 879. Trans Tech Publications, 2017.
- [7] S.-K. Kim, K.-Y. Kang, M.-S. Kim, and J.-M. Lee, “Low-Temperature Mechanical Behavior of Super Duplex Stainless Steel with Sigma Precipitation,” *Metals*, vol. 5, no. 3, pp. 1732–1745, 2015.
- [8] P. Ferro, F. Bonollo, and G. Timelli, “Sigma phase precipitation modelling in a UNS S32760 superduplex stainless steel,” *La Metallurgia Italiana*, vol. 104, no. 5, pp. 7–12, 2012.
- [9] S. K. Ghosh and S. Mondal, “High temperature ageing behavior of a duplex stainless-steel material,” *Materials Characterization*, vol. 59, no. 12, pp. 1776–1783, 2008.
- [10] S. Topolska and J. Lawanoski, “Effect of microstructure on impact toughness of duplex and super duplex stainless steel,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 36, no. 2, 2009.
- [11] ASTM A 370, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, American Society for Testing and Materials, USA, 2018.
- [12] ASTM E 23, *Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, American Society for Testing and Materials, USA, 2014.
- [13] L. Sáenz, “Naturaleza fractal de la deformación plástica de un acero inoxidable dúplex envejecido,” *Revista Ingeniería y Sociedad*, 2011.
- [14] J. Griman and J. Marcano, “Evaluación de la tenacidad de impacto del acero inoxidable dúplex SAF 2205 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento 475 °C,” Trabajo de Grado de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2005.
- [15] L. Grippi and A. Ocando, “Evaluación de la tenacidad de impacto del acero inoxidable dúplex SAF 2205 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento 850 °C con unos tiempos de 48, 54 y 60 minutos,” Trabajo de Grado de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2006.
- [16] L. Plaza, “Evaluación de la tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF 2205 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 850 °C, con unos tiempos de 6,12 y 24 horas,” Trabajo de Grado de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2007.
- [17] M. Mosquera and R. Tiamo, “Evaluación de la tenacidad de impacto de un acero inoxidable duplex SAF 2507 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 700 °C,” Trabajo de Grado de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2008.
- [18] L. Sáenz, O. Hilders, and H. R., “Estudio del acero inoxidable dúplex SAF 2507 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 850 °C por tiempos entre 1 hora y 48 horas,” *Revista Facultad de Ingeniería UCV*, vol. 22, no. 3, pp. 21–30, 2007.
- [19] A. Mejías, J. Arruti, J. Cepeda, and L. Sáenz, “Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de un acero inoxidable dúplex 2507,” *Revista Ingeniería UC*, vol. 17, no. 3, pp. 28–39, 2010.
- [20] J. Arruti, “Determinación de la influencia del tratamiento térmico realizado a una temperatura de 870 °C durante tiempos comprendidos entre 2 y 10 minutos sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de un acero inoxidable dúplex,” Trabajo de Grado de Maestría, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2009.
- [21] A. Mejías, “Evaluación de la tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF 2507 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 900 °C,” Trabajo de Grado de Maestría, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2009.
- [22] J. Cepeda, “Determinación de la influencia del tratamiento térmico realizado a una temperatura de 685 °C sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de un acero inoxidable dúplex SAF 2507,” Trabajo de Grado de Maestría, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2009.
- [23] J. Hau and A. Seijas, Eds., *Sigma Phase Embrittlement of stainless steel in FCC Service. NACE 61st Annual Conference & Exposition*, no. 6578. NACE, 2006.