



Dominios magnéticos en piezas de acero AISI 4340 soldado con electrodos revestidos*

Antonio Iván Ruiz Magaña

Especialidad: Ingeniería mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se analizó el comportamiento del depósito de diferentes electrodos: como el E-7018, de 4 mm de diámetro; el E-312-16, de 3,2 mm de diámetro y el UTP 65, de 3,2 mm de diámetro, empleados en la soldadura del acero AISI 4340, el cual está considerado como un acero del tipo cromo-níquel-molibdeno. Para determinar las propiedades mecánicas de cada uno de los electrodos se prepararon muestras del material con dimensiones de 100 x 50 mm, se sometieron a ensayo no destructivos (END), como el ruido magnético Barkhausen luego del ciclo térmico de soldadura. Las señales Barkhausen, así como las microestructuras obtenidas, demostraron que la soldadura del acero AISI 4340 con electrodos del tipo E-7018 promueve la formación de la fase sigma a partir de la ferrita e introduce una dureza de 498,70 HV, lo que la convierte en una estructura frágil. Se concluye que es más favorable el empleo de electrodo del tipo UTP 65 que origina espectro Barkhausen de menor intensidad, estructura del tipo austenita-ferrita con dureza de 315 HV.

Palabras clave: acero AISI 4340; electrodo E-7018 soldadura; electrodos revestidos; ruido magnético Barkhausen.

* Trabajo tutorado por el Dr. C. Tomás Fernández Columbié
Recibido: 1 diciembre 2015 / Aceptado: 4 septiembre 2016.

Magnetic domains in AISI 4340 steel pieces welded with coated electrodes

Abstract: The performance of different electrodes such as electrode E-7018 of 4 mm diameter, electrode E-312-16 of 3,2 diameter and the UTP 65 of 3,2 diameter, used in welding steel AISI 4340, was analyzed, considered like a chrome-nickel-molybdenum type. To determine the mechanical properties of each electrode used, material sample with dimensions of 100 x 50 mm were prepared and undergo to nondestructive testing (NDT) such as Barkhausen noise after the welding thermal cycle. The Barkhausen signals and the microstructures obtained show that AISI 4340 steel welding electrode type E-7018 promotes the formation of sigma phase from ferrite and introduces a hardness of HV 498, 70 what makes it a fragile structure. Proving that the use of the UTP 65 electrode type is the most favorable who creates Barkhausen spectrum of a lower intensity, structure of austenite-ferrite type with hardness of 315 HV.

Key words: steel AISI 4340; E-7018 welding electrode; covered electrodes; magnetic Barkhausen noise.

Introducción

El acero se utiliza para la fabricación de estructuras utilizadas en proyectos de gran escala en muchas áreas de la industria tales como: la petrolera, la ferroviaria y la construcción. La aplicación del acero en la industria se debe a que este material posee buena elasticidad, plasticidad y alta resistencia mecánica (Jiles, 2000).

Una avería en las estructuras de acero puede causar accidentes provocando pérdidas humanas, económicas y daños ecológicos. Los accidentes pueden ser evitados monitoreando el estado de la estructura de acero para detectar a tiempo las averías que pudieran causar las fallas de estas estructuras de acero.

El ruido magnético Barkhausen es un fenómeno que ocurre en los materiales ferromagnéticos. Heinrich Barkhausen observó, por primera vez, en 1919, el fenómeno de cambios discontinuos en la magnetización de un material ferromagnético al aplicarle una intensidad de campo magnético H variante en el tiempo (Jiles, 2000). Los cambios discontinuos en la magnetización producen una señal que parece ruido que se le conoce, en honor a su descubridor, como ruido magnético Barkhausen (RMB).

Desde el punto de vista tecnológico, contar con un método de END que permita la detección de cualquier anomalía en las estructuras de acero y la evaluación de propiedades magnéticas de los aceros, tiene un gran impacto industrial en la mayoría de las áreas económicas en donde se utiliza este material.

La potencialidad de los métodos magnéticos para evaluar los defectos en las estructuras de acero han permitido que estos métodos ganen interés por parte de la industria, por lo que ahora es uno de los campos en desarrollo de evaluación no destructiva de materiales más importante (Jiles, 2000; Pérez-Benítez, 2007).

El RMB depende de los parámetros empleados para la magnetización, como la frecuencia (Jiles, 2000 y Moorthy *et al.*, 2003) y la intensidad de magnetización (Padovese *et al.*, 2000). Depende también de las características del material como el tamaño de grano (Capó-Sánchez *et al.*, 2009), el contenido de carbono (Capó-Sánchez *et al.*, 2004) y el estado de tensiones (Anglada-Rivera *et al.*, 2001). Una de las potencialidades del RMB es su utilización en el monitoreo de uniones soldadas para identificar las variaciones estructurales, efectos de tratamientos térmicos o la presencia de defectos.

Algunos de los trabajos de RMB en soldaduras han sido realizados en microestructuras simuladas con tratamientos térmicos (Park, Kim & Hong, 2000) y en soldaduras reales para evaluar el efecto del tratamiento térmico después de la soldadura o el desempeño de la unión soldada sometida a fatiga (Lachmann, Nitschke-Pagel & Wohlfahrt, 2000).

El cambio en la magnetización de la muestra genera "saltos", diferentes a los de un movimiento suave y continuo (Stewart, Stevens & Kaiser, 2004). Estos saltos llegan a ser abruptos y son producto de los rápidos cambios discontinuos en la magnetización del material, los cuales son originados por cambios en el tamaño y orientación de los dominios magnéticos; dicho de otra forma, son las interacciones del movimiento entre las paredes de los dominios y los puntos de anclaje que actúan como barreras del movimiento, los cuales se interpretan como imperfecciones en el material (Serna y Padovese, 2007).

En las uniones soldadas de aceros al carbono se presenta una variación microestructural, como consecuencia de los ciclos térmicos, la cual debe ser controlada para garantizar el desempeño para el que fueron proyectados. Los cambios que ocurren en la zona fundida y en la zona de influencia térmica determinan la calidad de las uniones soldadas. Los cambios que se inducen en estas zonas provocan alteraciones, las cuales al estar tensionadas provocan un aumento del campo magnético aplicado. El aumento en la inducción se presenta de manera discontinua, como respuesta al movimiento de las paredes de dominio magnético. En las uniones soldadas con diferentes electrodos, estos dominios magnéticos varían según la influencia de la temperatura. Se hace necesario establecer, a partir de los dominios magnéticos y las paredes de dominios, las variaciones superficiales y la microestructura en la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica (ZIT) del acero AISI 4340, luego de ser sometido a proceso de soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos.

Composición química del acero AISI 4340

La composición química estándar de esta aleación se refleja en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 4340

| C | Mn | Ni | Cr | Mo | Si |
|-----------|---------|--------|---------|---------|-----------|
| 0,38-0,43 | 0,6-0,8 | 1,65-2 | 0,7-0,9 | 0,2-0,3 | 0,15-0,40 |

Se considera un acero grado maquinaria al cromo-níquel-molibdeno de la más alta tenacidad, por su alto contenido de níquel, tratado (bonificado), empleado para piezas

y partes de maquinaria de las más severas exigencias para uso general. Se surte en estado recocido y tratado. Por presentar un contenido de carbono desde 0,38 % hasta 0,43 % se considera un material ferromagnético, por lo que el mismo puede ser sometido a ensayo no destructivo como el ruido magnético Barkhausen.

Preparación de la junta

Para determinar el comportamiento microestructural del material se prepararon muestras de la ballesta; se cortaron nueve probetas que fueron soldadas con diferentes tipos de electrodos del tipo E-7018, UTP 65 y E-312-16. Se emplearon los siguientes procedimientos:

1. Preparación del biselado en X previo a la soldadura.
2. Pre calentamiento del material.
3. Soldadura.

Para realizar el proceso de soldadura a ninguna de las muestras se le aplicó pre calentamiento. Los parámetros de soldadura empleados aparecen en la Tabla 2, los mismos se seleccionaron a partir del tipo y del diámetro del electrodo.

Tabla 2. Parámetros para la soldadura de las probetas

| No | Electrodo | AMP | Veloc (kg/h) | Tensión U | Diámetro |
|----|-----------|-----|--------------|-----------|----------|
| 1 | E-312-16 | 150 | 1,12 | 26 | 3,2 |
| 2 | E-312-16 | 150 | 1,12 | 26 | 3,2 |
| 3 | E-312-16 | 150 | 1,12 | 26 | 3,2 |
| 4 | UTP 65 | 120 | 1,12 | 25 | 3,2 |
| 5 | UTP 65 | 120 | 1,12 | 25 | 3,2 |
| 6 | UTP 65 | 120 | 1,12 | 25 | 3,2 |
| 7 | E-7018 | 160 | 1,12 | 28 | 4,0 |
| 8 | E-7018 | 160 | 1,12 | 28 | 4,0 |
| 9 | E-7018 | 160 | 1,12 | 28 | 4,0 |

Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 100 mm y un ancho de 50 mm; se cortaron longitudinalmente de la sección de la ballesta. Se procedió a puntarla en ambos extremos para de esta forma evitar alabeo y distorsiones; fueron sometidas a proceso de soldeo en disímiles condiciones. La selección de los diferentes electrodos se basa en buscar un material de aporte que, en dependencia de la deposición, también pueda emplearse para atenuar los problemas que ocurren en el cordón de soldadura.

Características de los materiales de aporte

El electrodo consta de un revestimiento a base de sustancias químicas que cumplen varias funciones y posee, además, un extremo no revestido que permite fijarlo en el

portaelectrodo. La elección de los electrodos se realizó según recomendaciones (AWS-A5-28-79, ASME SFA 5.28, 2006)

Electrodo UTP 65: Electrodo especial austenítico ferrítico de excelentes características de soldabilidad y alta resistencia mecánica. El UTP 65 tiene una gran variedad de aplicaciones en el mantenimiento y reparación; sobre todo en el campo de maquinaria para construcción (obras públicas) donde se le prefiere debido a su aplicación segura y sin problemas. La composición del depósito es de: C, Cr, Mn, Ni, Fe, Mo y Si.

Electrodo E-7018: Según la AWS se clasifica en: INFRA 718, básico de bajo hidrógeno. Se emplea para propósitos generales en la fabricación de tuberías y líneas de tuberías de alta presión, calderas, recipientes a presión, fundiciones de aceros, aceros templados y revenidos, construcción de embarcaciones. La composición del depósito es de C, Mn, Si, S y P. La penetración es escasa y hay poca pérdida.

Electrodo E-312-16: Se clasifica según la AWS/ASME: SFA-5.4, suelda en todas posiciones, excepto vertical descendente. Genera un arco suave de fácil encendido y reencendido con escasas salpicaduras que deposita un cordón de soldadura con contornos suaves de superficie lisa, excelente acabado y fácil remoción de escoria. Las características de sus depósitos de soldadura son: alta resistencia a la corrosión, a la escamación hasta temperaturas de 1 100 °C, al agrietamiento y a la fluencia térmica (creep) hasta 850 °C. Se utiliza en soldadura de aceros al carbono, de baja, media y alta aleación, con o sin tratamiento térmico, aceros de composición desconocida, aceros para herramientas de alta sensibilidad al agrietamiento.

Cálculo del calor aportado

El calor aportado se calculó con base en la ecuación 1.

$$Q = \frac{U_a \cdot I_s}{V_s} \quad (1)$$

Donde:

Q- calor aportado, kJ/mm;

U_a- tensión del arco, V;

I_s- corriente de soldadura, A;

V_s- velocidad de soldadura, mm/s.

Equipos empleados en la experimentación

Microscopio óptico: Se empleó un microscopio óptico binocular, marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.

Pulidora metalográfica: La pulidora metalográfica empleada, marca MONTASUPAL, se utilizó para lograr el acabado final, se empleó un paño de fieltro grueso y como sustancia abrasiva el óxido de cromo (Pasta GOI). Las características de la máquina son: voltaje -250 V, corriente -2,5 A, número de revoluciones -300-1 000 rev/min, potencia del motor -3,7 kW.

Máquina para soldar: La máquina soldadora tipo transformador produce corriente alterna. La potencia es tomada directamente de una línea de fuerza eléctrica y transformada en un voltaje requerido para soldar. La regulación de los parámetros se realizó modificando la velocidad de soldadura, actuando para ello sobre la corriente y la tensión de arco. Se soldó con corriente directa electrodo positivo.

Preparación de las muestras para el análisis metalográfico

Corte: Las muestras utilizadas presentan un tamaño de 100 x 50, para ello se utilizó una fresadora vertical, en la que, tras sujetar la muestra con las mordazas, se procedió a realizar el corte de la pieza, al mismo tiempo que se vierte un líquido refrigerante sobre la herramienta y la muestra, evitando el calentamiento excesivo de la probeta. Los regímenes de corte seleccionados fueron $n = 150$ rev/min y $S = 25$ mm/rev.

Desbaste: La dirección de desbaste se gira 90° al pasar de un papel al siguiente, habiendo previamente aclarado la probeta con un chorro de agua, con el fin de eliminar las posibles virutas y restos de granos de la última lija utilizada. La superficie de la probeta, desbastada hasta el grano más fino y limpia, se pasa por unos paños impregnados en algún abrasivo. El tipo de abrasivo y de paño dependen del material de la probeta. El utilizado en este caso fue pasta GOI en el pulido grueso y de $1 \mu\text{m}$ en el caso del segundo pulido y como paños se utilizó fieltro.

Ataque: Para atacar ambos materiales con alto contenido en cromo y níquel se ha elegido el reactivo ácido oxálico y nital al 5 %. Preparado el reactivo, se vierte un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. El tiempo de ataque es muy variable y solo la práctica o la observación repetida de la probeta al microscopio indican cuándo debe darse por terminado.

Preparación de las muestras para la medición del RMB

Para atacar ambos materiales con alto contenido en cromo y níquel se ha elegido el reactivo ácido oxálico y nital al 5 %. Preparado el reactivo, se vierte un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. El tiempo de ataque es variable y solo la práctica indica el fin. El RMB fue medido en las superficies de la unión soldada con un barrido cada 1 mm. A partir del metal base, en la distancia de 40 mm hasta el centro del cordón, fueron realizadas uniones soldadas a tope de uno, dos y tres pases, con preparación de bisel en V, utilizando el proceso SMAW con electrodo E-7018, el electrodo UTP 65 y el electrodo E-312-16.

Metodología para la medición del ruido magnético Barkhausen

La señal de RMB obtenida de un material ferromagnético por el sistema experimental comúnmente se procesa para obtener algunos parámetros cuantitativos y cualitativos que son empleados para relacionar sus valores con las propiedades del material. Los parámetros más comunes son el valor RMS, el valor de la energía y la envolvente de la señal de RMB. Los parámetros cuantitativos son el valor RMS y de energía y se definen, según Pérez-Benítez (2007) como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{RMB}^2(t) dt} [V] \quad (2)$$

Donde T es el período de la señal de RMB y se denota a la señal de RMB por V (t) RMB como una función del tiempo.

$$Energía = \sum_i^n \left[\int_0^{T_i} V_i^2(t) dt \right] [V^2 \cdot s] \quad (3)$$

Donde n es el número de saltos Barkhausen que forman la señal de RMB e i indica el salto Barkhausen, según Carlson y otros investigadores (2007).

La forma de la envolvente es un parámetro cualitativo que forma una curva y se define:

$$Env = (j = 1, \dots, N_p) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{\Delta T(j-1)}^{\Delta T j} V_{RMB}^2(t) dt} [V] \quad (4)$$

Donde se obtienen N_p puntos obtenidos cada uno obtenido en $\Delta T = \frac{T}{N_p}$ segundos sobre el período T de la señal de RMB.

Para explicar estos procesos, partimos del modelo propuesto por Pérez-Benítez y demás investigadores (2005) y teniendo en cuenta que para el caso de los dominios de 90° grados Jiles (2000) dedujo otra expresión para el campo coercitivo que actúa sobre las paredes de estos dominios, la cual toma en cuenta la influencia que tienen las tensiones residuales que se generan en los bordes de grano producto de la magnetostricción, la cual está dada por:

$$h_R = \frac{\pi \bar{T}}{\mu_0 I_s d_g} \quad (5)$$

Donde \bar{T} es el valor medio de tensiones residuales presentes en el material, d_g es el diámetro del grano, e I_s la magnetización de saturación.

Análisis de los regímenes de soldadura

El calor aportado para cada cordón se determinó en correspondencia con los regímenes de soldadura. El acero 4340 presenta elementos en su composición química como el Cr, que dificulta la soldadura, y el C que a mayor cantidad de este se compromete la soldabilidad del acero. Ambos elementos provocan alteraciones tanto en la zona fundida (ZF) como en la zona de influencia térmica (ZIT).

A partir de la ecuación 1 y para una U_a de 25 Vols, una I_s de soldadura de 120 A y una velocidad de 1,12 m/s, el electrodo UTP 65 tiene un calor aportado en la unión soldada de 2 678,5 kJ/mm. Para la tensión del arco de 26 Vols, una I_s de soldadura de 150 A y una velocidad de 1,12 m/s, el electrodo E-316-12 tiene un calor aportado en la unión soldada de 3 482 kJ/mm. Para una U_a de 28 Vols, una I_s de soldadura de 160 A y una

velocidad de 1,12 m/s, el electrodo E-7018 tiene un calor aportado en la unión soldada de 4 000 kJ/mm.

Para juntas de pequeño espesor la penetración depende de la tensión de arco, la velocidad de avance y principalmente de la corriente. La penetración varía alrededor de un valor inestimable con la velocidad y la tensión; sin embargo, con la corriente, la variación es lineal. Las funciones principales de la tensión (voltaje) son estabilizar el arco y proporcionar un cordón liso, sin salpicaduras. Para electrodos de 3,2 mm y 4 mm, la tensión de arco no influye significativamente en el ancho del cordón; influye notablemente en el refuerzo.

Análisis del depósito por el diagrama de Schaeffler

Al unir materiales de la misma composición química el punto correspondiente al metal depositado se encontrará entre la recta trazada por los puntos correspondientes al metal base y al electrodo. Su ubicación específica dependerá del grado de dilución con que se trabaje. En el proceso arco manual el valor típico es de 30 %. Se empleó el diagrama para analizar el depósito de los electrodos E-312-16 y del electrodo UTP 65, tal y como se muestra en la Figura 1; no se consideró el electrodo E-7018 ya que tanto el electrodo como el material base (AISI 4340) se consideran totalmente ferrítico.

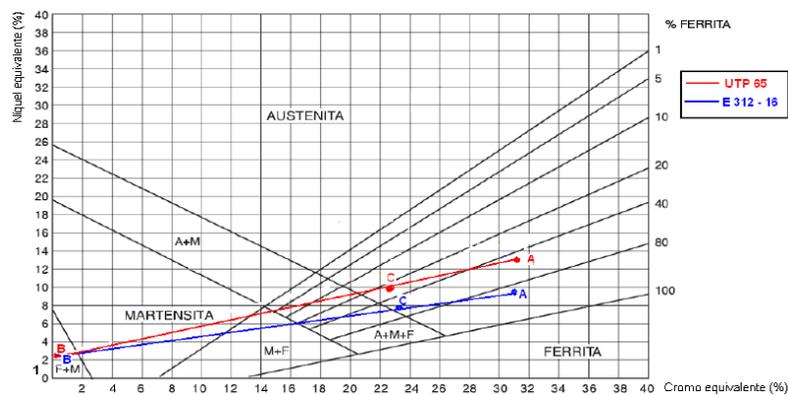


Figura 1. Depósito del electrodo UTP 65 y del electrodo E-312-16.

En la figura la línea roja representa el depósito del electrodo UTP 65 y la azul del electrodo E-312-16; el punto B para ambas uniones se corresponde con el material base, el cual se puede observar que se encuentra en el campo de F + M, ya que el Cr y el Ni se encuentran ubicados en esta zona.

Para el electrodo UTP 65 se obtiene un 45 % aproximado de ferrita y para el electrodo E-312-16 un aproximado de 83 % de ferrita, por lo que, al realizar la unión soldada, se va a obtener una estructura generalmente del tipo ferrita, pero se requiere la aplicación de calentamiento para evitar el agrietamiento en frío, también el material aportado puede presentar estructuras: austenítica, con pequeñas cantidades de martensita, austenítico-ferrítica, con algún contenido de martensita y austenítico-ferrítica.

A partir de la composición química del AISI 4340 y el material de aporte (E-7018) se considera que para garantizar una unión soldada libre de figuración se debe realizar el cálculo de la temperatura de calentamiento para el electrodo. Para un carbono equivalente de 1,62 %, esta temperatura sería de 657 °C.

Para realizar el proceso de soldadura con el electrodo E-7018 se requiere de la aplicación de una temperatura de precalentamiento de 657 °C, la misma evitará la fisuración del cordón luego de solidificado y existirá un mejor control en la precipitación de los carburos de cromo, tal como lo reportan Mertinger y demás investigadores (2007).

Análisis de la microestructura

La Figura 2 muestra las micrografías del cordón de relleno y la zona de crecimiento en el acero AISI 4340 luego de efectuado el proceso de soldadura.

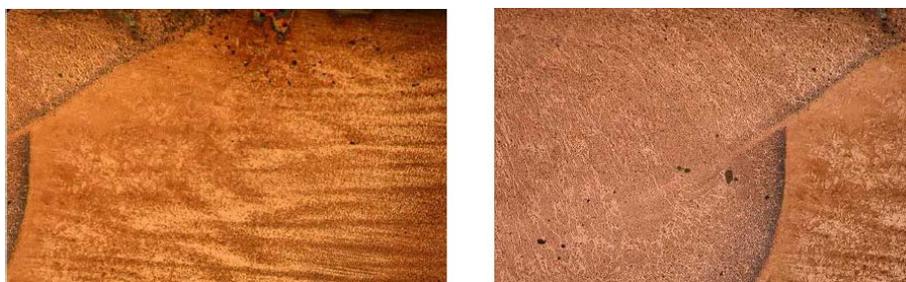


Figura 2. a) Micrografía de la Zona de afectación térmica ZAT. b). Zona de crecimiento.

Se comprobó mediante el análisis metalográfico que el procedimiento no fue el adecuado, ya que se obtuvo martensita en la zona de crecimiento de grano.

Se pudo observar cómo se afecta térmicamente el material debido al calor de aporte generado por el proceso y cómo varía la zona afectada térmicamente de acuerdo al proceso, además de que la soldadura multipasadas realiza un efecto de tratamiento

térmico sobre el cordón anterior por lo que disminuye la dureza de la ZAT en la zona de dicho cordón. La formación de martensita se evidencia en la zona de crecimiento de grano, lo cual es indicativo de que la disminución de la velocidad de enfriamiento no fue la suficiente como para impedir la formación de la martensita, cuya presencia vuelve susceptible a la unión al agrietamiento en frío.

Análisis de la señal Barkhausen en las muestras soldadas

Se analizó la señal Barkhausen para el depósito con los diferentes electrodos (Figura 3) con lo cual se puede apreciar el comportamiento de esta señal para cada uno de ellos.

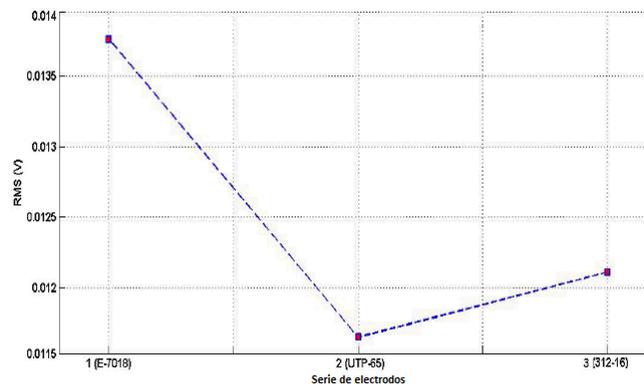


Figura 3. Señal Barkhausen para el depósito con los diferentes electrodos.

La dependencia obtenida en el análisis del depósito con los tres electrodos está influenciado por la magnetización del material, que tiene la característica de ser ferromagnéticos, así como por el estado de tensiones del mismo a través de la magnetostricción. Existe una señal más pronunciada para el electrodo E-7018, ya que la deformación plástica y el ciclo térmico impuesto han aumentado las regiones con alta densidad de dislocaciones que impiden el movimiento de las paredes de dominio, debido al menor tamaño del grano, que induce mayor dureza en la unión soldada.

Se observa para el electrodo E-312-16 una menor densidad de dislocaciones y una menor señal Barkhausen, con respecto al electrodo E-7018, lo cual también está asociado con cambios peculiares de la estructura de dominio, aunque en menor dominio, existe un menor tamaño de grano.

Para el electrodo UTP 65 se observa una disminución del salto Barkhausen, lo cual está influenciado por el crecimiento del tamaño del grano, que provoca que la envolvente se

desplace hacia el campo coercitivo ($H = 0$) y se produzcan cambios dimensionales en la nucleación del acero.

Los aceros, en general, presentan un coeficiente de magnetostricción positivo. Por esta razón, el vector de magnetización en los granos de acero se orienta generalmente en la dirección cristalográfica $\langle 100 \rangle$. Al aplicar una tensión mecánica a las muestras de acero, la estructura magnética de los dominios se modifica de manera que se minimice la energía total (mayormente constituida por la energía magnetostática, la magnetoelástica y la de anisotropía). A este proceso se le conoce como efecto magnetoelástico, lo que ha sido reportado por Martínez y demás investigadores. (2010).

Análisis de la señal Barkhausen del depósito con electrodo E-7018

A diferencia del metal de soldadura, la zona afectada térmica solo es influenciada por los ciclos térmicos del proceso de soldadura, ya que la composición química se afecta notablemente debido a que no existe similitud con el metal de aporte y el acero 4340, lo cual está en función de las transformaciones en estado sólido.

Las micrografías (Figura 4) son las obtenidas durante el proceso de soldadura, realizadas con electrodos del tipo E-7018. En ellas se representa la señal del RMB en la ZF y la ZIT y la Figura 5 se corresponde con las estructuras de ambas zonas.

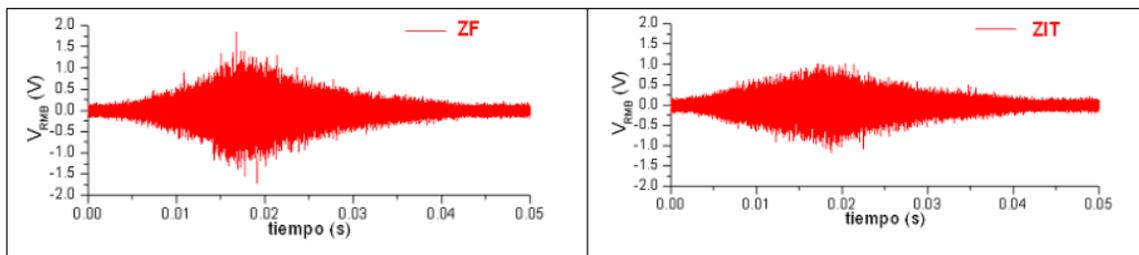


Figura 4. Micrografías a) RMB de la zona b) RMB de la zona Influencia térmica

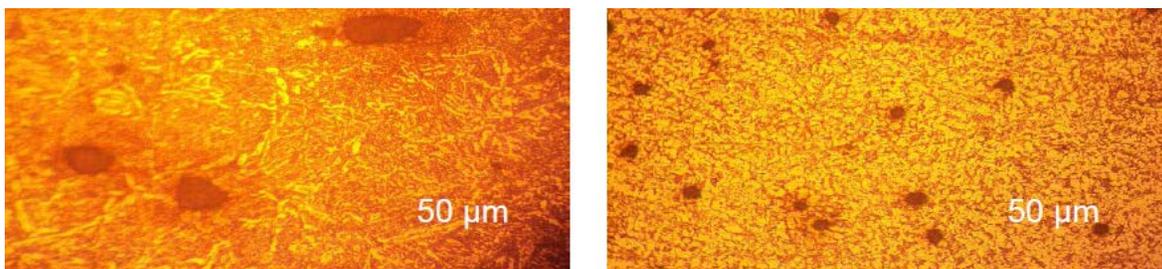


Figura 5 (a). Zona fusión. (b) ZIT

La Figura 5 (a) y (b) muestran la dependencia del número de saltos de RMB para el acero 4340, luego del proceso de soldadura en la zona fundida y en la zona de influencia térmica. En la Figura 5 (b) se aprecia una disminución de la cantidad de saltos de RMB de todas las dimensiones, lo que ocurre con el incremento del tamaño de grano, además de disminuir la energía de las avalanchas. La presencia de menor cantidad de saltos está asociado a la soldadura multipasada, la cual se convierte en un tratamiento de recocido en la unión soldada que hace que exista un tamaño de grano normalizado.

La Figura 5 (b) correspondiente a la zona de fusión muestra una frontera con cantidad razonable de ferrita que ayuda a evitar el crecimiento de grano, pero al mismo tiempo podría promover el debilitamiento del material en esta zona por la formación de la fase sigma a partir de la ferrita.

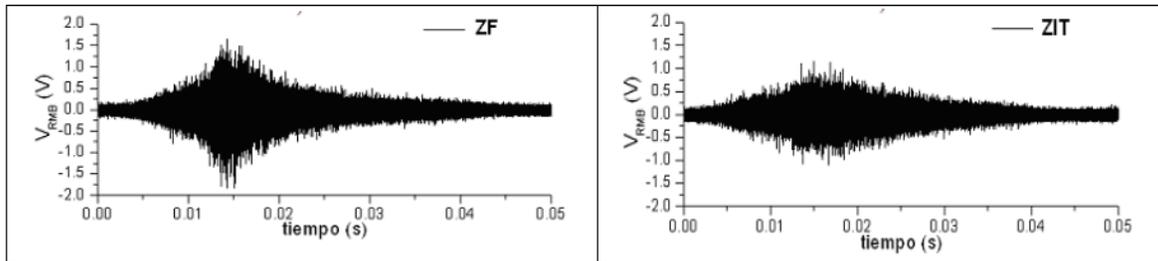
En la microestructura de la Figura 5 (b) se ha obtenido una mezcla de ferrita poligonal y perlita, la cual es resultado del enfriamiento lento, por lo que permite que los átomos de carbono encuentren lugares intersticiales en los bordes de la ferrita, entonces precipita en placas de cementita que crecen adjuntas a placas de ferrita para formar el constituyente perlita dentro del rango de temperaturas de 550 °C a 720 °C.

El paso de relleno de la unión soldada presenta transformaciones de fase en la ZAT, diferentes a las encontradas en el paso de raíz, como lo es la bainita superior y ferrita Widmanstätten. Estas microestructuras se caracterizan por presentar un elevado contenido de carbono debido a las velocidades de enfriamiento a las que se forman. La bainita superior se origina a partir de placas de ferrita que tiene a su alrededor una elevada concentración de carbono. Este carbono, cuando alcanza su máxima concentración, se transforma en cementita, lo cual brinda a la morfología característica de plumas, mientras que la ferrita Widmanstätten lleva se caracteriza por contener una elevada concentración de carbono a los lados de sus placas.

Análisis de la señal Barkhausen del electrodo E-312-16

El efecto de la soldadura en la unión entre el acero 4340 y el electrodo E-312-16, debe considerarse como una unión disímil, ambos materiales presentan composición química diferentes, acentuado por el elevado contenido del material base. En la Figura

6 se observa la señal del RMB en la ZF y la ZIT y las Figuras 7 (a) y 6 (b) se corresponden con las microestructuras de la unión soldada con el electrodo E-312-16.



6. a) RMB de la zona fundida b) RMB de la zona influencia térmica.

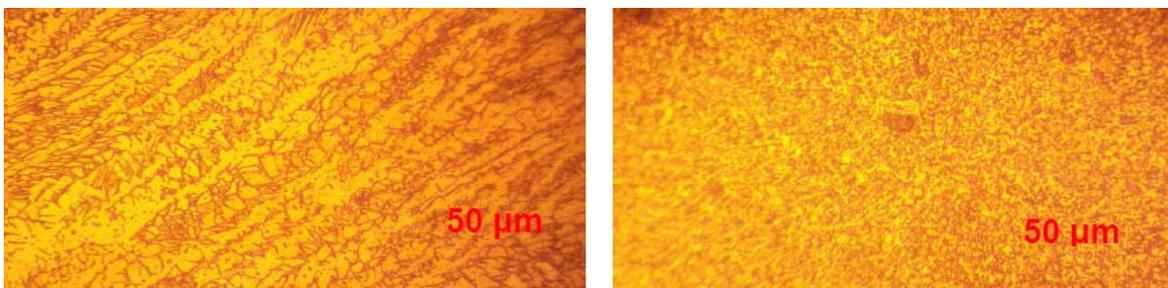


Figura 7 (a). Zona fusión. (b) ZIT.

En las figuras se muestra una señal del salto de RMB muy similar a la obtenida con el electrodo E-7018. La Figura 7 se corresponde con la zona fundida, en la que se mantiene, con este electrodo (E-312-16), un incremento de la señal obtenida, la cual disminuye para la ZIT (7 b), asociado de igual manera a la soldadura multipasada.

En la Figura 7 (a) se observa que al aplicar, durante el proceso de soldadura, temperaturas superiores a 900 °C en el acero 4340, con el electrodo E-312-16, por la composición química que deposita el metal de aporte, ocurre una disminución en el porcentaje de fase sigma y, por lo tanto, el de ferrita aumenta, mientras que pequeñas islas de austenita secundaria vuelven a formarse bordeando el grano ferrítico.

En la microestructura de la Figura 7 (b) se presenta la ferrita de borde de grano, que es la primera morfología que se forma durante el enfriamiento, teniendo como ubicación preferencial los bordes de grano de austenita, aunque también puede localizarse dentro de los granos de la austenita, por lo que presenta una estructura bien definida. Durante la formación de ferrita el carbono es expulsado, dando lugar a la formación de cementita (Fe C) así como a la generación de ferrita acicular a partir de inclusiones no metálicas.

Este cambio puede ser ocasionado por las elevadas temperaturas, en las cuales la aleación experimenta la transformación-ferrita hasta existir una totalidad de ferrita columnar, aproximadamente antes de pasar a la fase líquida, por lo cual todos los elementos alógenos son reincorporados a la matriz ferrita, afectando directamente a la fase sigma, que es formada por el Cr y el Mo principalmente.

Análisis de la señal Barkhausen del depósito con electrodo UTP 65

Para las uniones soldadas con electrodo UTP 65 se estudiaron las transformaciones de fase de cada una de las aleaciones afectadas por los ciclos térmicos; se utilizaron los mismos parámetros que se emplearían en la fabricación de las uniones soldadas disímiles. La Figura 8 muestra las microestructuras obtenidas. En la Figura 9 aparece la señal del RMB.

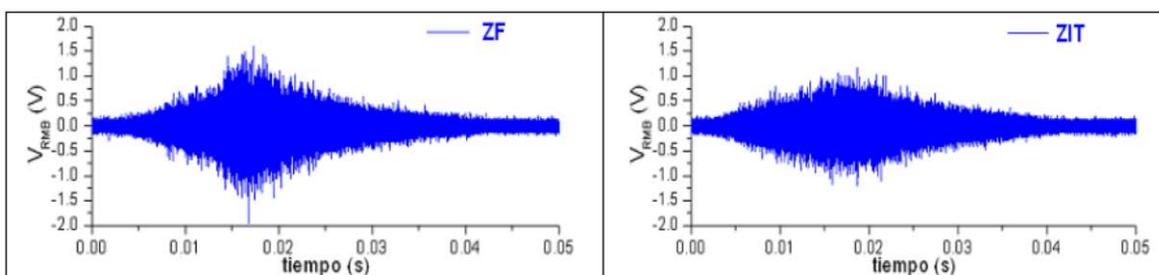


Figura 8. a) RMB de la zona fundida b) RMB de la zona influencia térmica.

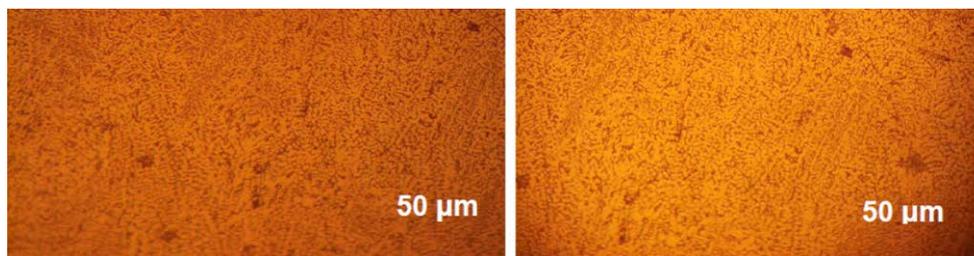


Figura 9 (a). Zona fusión. (b) ZIT

Se observa que con el electrodo UTP 65 se han obtenidos resultados en la señal del RMB de menor intensidades, lo cual queda demostrado en las microestructuras obtenidas. En la Figura 9 (a) y (b) se puede observar una estructura de solidificación del tipo austenita-ferrita, es decir, una ferrita eutéctica en una matriz austenítica, donde en la zona fundida se percibe mayor cantidad de precipitados dentro de la matriz ferrítica y en la frontera de fusión.

Por otro lado, se mantiene un mayor balance de fases ferrita/austenita, el cual resulta de su elevado porcentaje de Cr y Mo como formadores de ferrita y el Ni como

estabilizadores de la austenita, pues ayuda a mantener las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión.

Análisis de los lazos de histéresis

Los lazos de histéresis, de los cuales se obtienen los valores de la coercitividad (H_c) y de la polarización remanente (J_r) del acero AISI 4340 soldado con los electrodos (E-7018; E-312-16 y UTP 65), se muestran en la Figura 10 (a, b y c). Para cada acero se muestra un par de lazos de histéresis obtenido a lo largo de la dirección del eje de fácil magnetización.

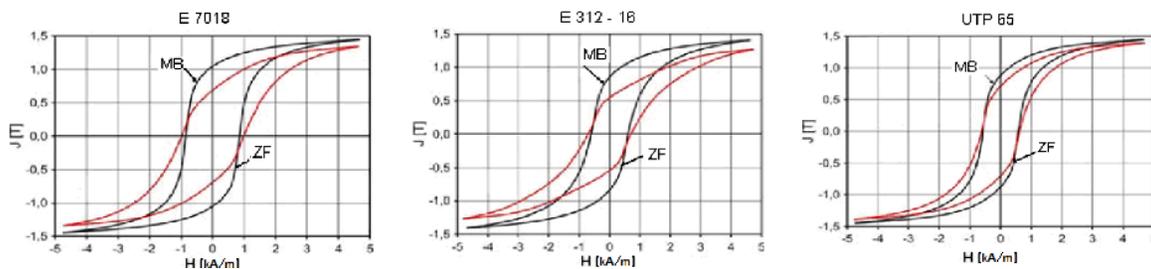


Figura 10. Lazos de histéresis obtenidos en la dirección del EFM (L-dirección longitudinal) y en la dirección del EDM (T-dirección transversal) del acero 4340 soldado con diferentes electrodos. (a) Lazo electrodo E-7018. (b) Lazo electrodo E 312 16. (c) Lazo electrodo UTP 65.

En la figura se puede apreciar el cizallamiento de los lazos de histéresis en la dirección del EDM lo que demuestra la anisotropía magnética de estos aceros. El origen del proceso de histéresis en los materiales magnéticos recae en la existencia de imperfecciones, en forma de dislocaciones o impurezas en el material, que incrementan las pérdidas energéticas durante el proceso de magnetización. La anisotropía magnetocristalina es otro de los mecanismos que ayudan en el proceso de histéresis.

En los sólidos anisotrópicos, determinados ejes cristalográficos en el material, favorecen a la orientación de los momentos magnéticos a lo largo de esas direcciones, lo que conlleva a un estado de menor energía y, por lo tanto, más estable. El resultado de este proceso es la rotación discontinua e irreversible de los momentos magnéticos que induce a cierta conmutación o salto, reportado por Das, Joarder & Mitra (2004).

Análisis de la envolvente

En la Figura 11 se muestran las señales de la envolvente de RMB obtenidas a lo largo del EFM y del EDM del acero AISI 4340, soldada con los electrodos E-7018 y E-312-16. Se observa que existe una diferencia más notable en la forma de la señal envolvente de RMB para el EFM, respecto al EDM de cada acero.

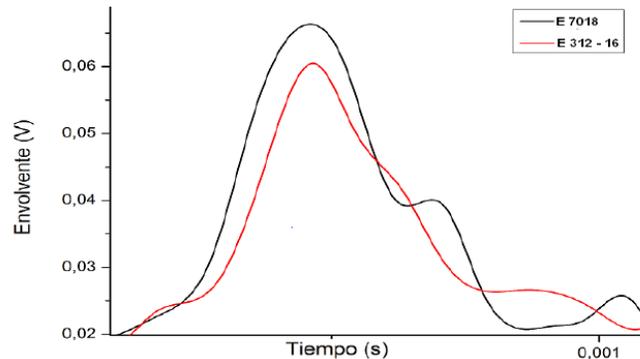


Figura 11. Señales de las envolventes para el electrodo E-7018 y E 312-16.

El valor máximo de la envolvente de la señal de RMB se reporta en cada una de las curvas de la Figura 11, EFM con respecto al EDM. Los valores fueron obtenidos para cada una de las muestras soldadas a lo largo de los dos ejes de magnetización y promediados de tres mediciones.

Los valores máximos de la señal envolvente se advierten para la muestra soldada con el electrodo E-7018 y luego un ligero descenso para el electrodo E-312-16. Las envolventes son ligeramente diferentes, lo que está relacionado con sus propiedades magnéticas, como son: las variaciones del contenido de carbono en el electrodo E-7018, que tiene una anisotropía magnética mayor, así como el cambio de fases al someterlo a tratamientos térmicos (ciclo de soldadura).

La soldadura con electrodo E-312-16 deposita una estructura del tipo austenítica, por el contenido del Ni que es de un 13 %, lo cual lo convierte en un material amagnético, no susceptible al ruido magnético Barkhausen.

Determinación de perfiles de microdurezas

Se realizaron mediciones de perfiles de microdurezas, en correspondencia con los resultados obtenidos en el proceso de soldadura. Los ensayos se realizaron en cada una de las zonas analizadas (ZF y ZIT); la Tabla 3 recoge estos resultados.

Tabla 3. Comportamiento de la microdureza y la dureza

| Zona | | Dureza HV | Dureza HRC |
|-----------------|-----|-----------|------------|
| Zona / E-7018 | ZF | 498,70 | 48,7 |
| | ZIT | 325,37 | 32,8 |
| Zona / E-312-16 | ZF | 494,42 | 49,5 |
| | ZIT | 320,16 | 30,8 |
| Zona / UTP 65 | ZF | 315,12 | 30,25 |
| | ZIT | 300 | 29,3 |

En la zona afectada térmicamente, en la región que corresponde a la zona de crecimiento de grano (ZIT), se rebasa de forma significativa la dureza desde 300 hasta 325 HV, lo cual es indicativo de la fuerte posibilidad de que se presente el de agrietamiento en frío.

Los resultados de la dureza Vickers son consistentes con los obtenidos en la aplicación del RMB, ya que como se observa hay una mayor dureza en el electrodo E-7018 (498,70 HV), precedido por el E-312-16 (494,42 HV) y, por último, el UTP 65 (315,12 HV).

El mayor valor de dureza está influenciado por la microestructura resultante obtenida ya que tanto el MB como el material de aporte presenta en su composición elevado contenido de carbono y cromo, que propician el endurecimiento de esta zona producto al ciclo térmico de soldadura impuesto. Por otro lado, hay que significar que debido al depósito de los cordones presumiblemente haya existido un tratamiento de recocido, que introdujera un recocido en la zona de fusión y por eso la dureza tenga una disminución.

Conclusiones

Se determinó el calor aportado para cada uno de los electrodos empleados en el proceso de soldadura de la ballesta, atendiendo la temperatura de precalentamiento para el electrodo E-7018 y las consideraciones de los electrodos UTP 65 y E-316-12 por el diagrama de Schaeffler.

Fueron analizadas las zonas fundidas y las zonas de influencia térmica de cada muestra soldada, en correspondencia con los electrodos utilizados y el ciclo térmico impuesto.

El análisis con el empleo del ruido magnético Barkhausen permitió caracterizar el efecto del ciclo térmico aplicado al acero AISI 4340 soldado con diferentes tipos de electrodos.

Referencias bibliográficas

- ANGLADA-RIVERA, J.; PADOVESE, L. R. & CAPO-SANCHEZ, J. 2001: Magnetic Barkhausen noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size. *Journal of magnetism and magnetic materials* 231(2): 299-306.
- CAPÓ-SÁNCHEZ, J. & PADOVESE, L. 2009: Magnetic Barkhausen noise measurement by resonant coil method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 321(18): 57-62.
- CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; PEREZ-BENITEZ, J. A.; PADOVESE, L. R. & SERNA-GIRALDO, C. 2004: Dependence of the magnetic Barkhausen emission with carbon content in commercial steels. *Journal of materials science* 39(4): 1367-1370.
- CARLSON, A. B.; CRILLY, P. B. R.; JANET, C. A.; PAUL, B. C. & JANET, C. R. 2007: *Sistemas de comunicación a Una introducción a las señales y el ruido en las comunicaciones eléctricas*. 4 ed. MacGraw Hill.
- CHIKAZUMI, S. 1964: *Physics of Magnetism*. John Wiley and Sons, New York.
- DAS, S.; JOARDER, A. & MITRA, A. 2004: Magnetic Barkhausen emissions and microstructural degradation study in 1.25 Cr–0.50 Mo steel during high temperature exposure. *NDT & E International* 37(3): 243-248.
- JILES, D. C. 2000. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. *Czechoslovak Journal of Physics* 50(8): 893-924.
- LACHMANN, C.; NITSCHKE-PAGEL, T. H. & WOHLFAHRT, H. 2000: Characterisation of residual stress Relaxation in Fatigue Loaded Welded Joints by X-Ray Diffraction and Barkhausen Noise Method. *Materials Science Forum* 347-349: 374-379.
- MARTÍNEZ-ORTIZ, P.; ESPINA-HERNÁNDEZ, J. H.; HALLEN, J. M. & LINARES, R. 2010: Caracterización de aceros API-5L por medio de la medición de ruido magnético Barkhausen. *Científica* 14(2): 81-87.

- MERTINGER, V.; NAGY, E.; TRANTA, F. & SÓLYOM, J. 2008: Strain-induced martensitic transformation in textured austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering: A* 481: 718-722.
- MOORTHY, V.; SHAW, B. A. & EVANS, J. T. 2003: Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis. *NDT & E International* 36(1): 43-49.
- PADOVESE, L.; CAPÓ, J. & ANGLADA-RIVERA, J. 2000: Medição da tensão mecânica em aço carbono através da emissão magnética de Barkhausen. In: XIX Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos. São Paulo, Brasil, agosto.
- PARK, D. G.; KIM, C. G. & HONG, J. H. 2000: Microstructural dependence of Barkhausen noise and magnetic relaxation in the weld HAZ of an RPV steel. *Journal of magnetism and magnetic materials* 215: 765-768.
- PÉREZ-BENÍTEZ, J. A. 2007: *Estudio del ruido magnético de Barkhausen en aceros al carbono*. Tesis doctoral. Universidad de Oriente.
- PÉREZ-BENÍTEZ, J. A.; CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; ANGLADA-RIVERA, J. & PADOVESE, L. R. 2005: A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels. *Journal of magnetism and magnetic materials* 288: 433-442.
- SERNA, G. & PADOVESE, L. 2007: El ruido magnético de Barkhausen: un método para monitorear microestructuras en uniones soldadas. *Scientia et Technica* Año XIII, No 36, septiembre.
- STEWART, D. M.; STEVENS, K. J. & KAISER, A. B. 2004: Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel. *Current Applied Physics* 4(2): 308-311.