

Cuantificación de los microconstituyentes o fases metalográficas de un acero ASTM A 36 soldado con electrodo revestido

Helder Xavier Celestino

hcelestino@ismm.edu.cu

Ledennis Torres Suárez

lstorres@ismm.edu.cu

Tomás Fernández Columbié

ternandez@ismm.edu.cu

Universidad de Moa

Resumen: Se cuantificó a través del procesamiento digital de imágenes los microconstituyentes en un acero ASTM A 36 soldado a tope con preparación de bordes por medio de la soldadura por arco eléctrico con electrodo E 7018. Fueron preparadas muestras con bisel de 30 y 35°, las cuales fueron denominadas MI para el primero y MII para el segundo. Se identificó las fases, los límites de grano y el área presente en la microestructura de este acero visualizados en un elemento denominado píxel. Se determinó que, en la zona fundida y en la afectada por el calor para el bisel de 30° la fase que predomina es la perlítica con un 82,25 %, la cual ocupa la mayor distribución sobre el área de la matriz y en el de 35°, hay una tendencia de mantenerse la misma, pero con un 56,82 %; lo cual está asociado a la entrada de calor por efecto del ciclo térmico y a el tipo de ángulo empleado.

Palabras claves: procesamiento digital de imágenes; microconstituyentes; fases; píxel.

Qualification of microconstituents or metallographic phases of an ASTM A 36 steel welded with a shield electrode

Abstract: The microconstituents in a butt welded ASTM A 36 steel with edge preparation by means of electric arc welding with electrode E 7018 were quantified through digital image processing. Samples with bevels of 30 and 35o were prepared, which were called MI for the former and MII for the latter. The phases, the grain boundaries and the area present in the microstructure of this steel visualized in an element called pixel were identified. It was determined that, in the molten zone and in the zone affected by heat for the 30o bevel, the phase that predominates is pearlitic with 82.25%, which occupies the greatest distribution over the area of the matrix and in that of 35th, there is a tendency to remain the same, but with 56.82%; which is associated with the heat input due to the effect of the thermal cycle and the type of angle used.

Keywords: digital processing of images; microconstituents; phase; pixel.

Introducción

Una aleación es una combinación, de propiedades metálicas que está compuesta de dos o más elementos, de los cuales, al menos uno es un metal, sus propiedades físicas y químicas son, en general, similares a la de los metales, sin embargo, las propiedades mecánicas tales como la dureza, ductilidad, tenacidad pueden ser diferentes según su estructura metalográfica o fases presentes en ella (Askeland, Fulay & Wright, 2013).

Las diversas fases y constituyentes presentes en la microestructura de las aleaciones puede ser caracterizada a través de la metalografía a color, la cual refiere Field (2000), permite la identificación y cuantificación, por el contraste de su debido a que es una técnica de muestreo que se emplea con el fin de facilitar el reconocimiento microestructural y lograr extraer mayor información de ella, para cuantificar, aspectos considerados importantes en las imágenes obtenidas mediante microscopía óptica, microscopía de barrido o microscopía de transmisión.

El procesamiento digital de imágenes ha adquirido notación en las tecnologías de la información y el cómputo. Al conjunto de técnicas y procesos para resaltar la información contenida en una imagen con el uso de una computadora como herramienta se le conoce como procesamiento digital de imágenes (PDI). El interés en el estudio se basa en dos áreas de aplicación fundamentales: a) El mejoramiento de la calidad de la información contenida en una imagen con el fin de que esta pueda ser interpretada por los humanos, y b) El procesamiento de los datos contenidos en un escenario a través de una máquina de percepción autónoma (Zhang, 2017).

Según Burge y Burger (2016) el procesamiento de imágenes está precedida por varios pasos, los que se realizan uno tras otro para hacer posible la extracción de datos de interés de la escena observada. Comienza con la captura de una imagen, luego esta se convierte a una forma que pueda ser tratada con computadoras digitales. A este proceso se conoce como digitalización. En los aceros normalizados o recocidos, de medio y bajo contenido de carbono, tienen como característica la presencia de dos fases distinguibles: perlita y ferrita. Desde el punto de vista visual, estos aceros muestran una microestructura de ferrita continua, con un color predominantemente blanco, con islas o gránulos de perlita que se muestran de un color oscuro.

La metalografía cuantitativa fundamenta sus procedimientos en la Estereología, ciencia que permite analizar la forma tridimensional de los sólidos a partir de la información obtenida con secciones bidimensionales o planas de los mismos. Esta no busca reconstruir un objeto tridimensional en su totalidad, usa secciones o muestras del material en estudio, con la aplicación de técnicas de estimación no paramétrica (parámetros geométricos) como el volumen y el área. La estimación resultante es válida sobre hechos fundamentalmente geométricos y orientados en la teoría clásica de muestreo estadístico, es por ello que los métodos estereológicos son casi siempre suposiciones libres y, pero aplicables en las ciencias de los materiales (Koch *et al.*, 2019).

Fenómenos metalúrgicos en la soldadura de los aceros

Diferentes fenómenos metalúrgicos, cambios físicos y mecánicos se producen durante el proceso de soldadura. Es de importancia conocer y predecirlos con el objetivo de asegurar la integridad de los componentes durante el servicio (Jung y Tsai, 2004). Bhatti *et al.* (2015) han desarrollado modelos analíticos y numéricos con la intención de conocer el comportamiento térmico y mecánico y especialmente, predecir las distorsiones o tensiones residuales que se desarrollan en el proceso.

Una unión soldada, afirma Abedi (2017), es un compuesto de tres regiones: la zona de fusión, la afectada por el calor, y de los metales básicos no afectados. La de fusión es el material que se funde durante la soldadura, confinado por la línea de fusión y tiene una composición química similar a la del metal base. En la afectada por el calor, que la zona adyacente a la de fusión, el material tiene sometido a un ciclo térmico que transforma la microestructura del material, el cual no es alterado por soldadura.

En juntas de aceros con preparación de bordes, en cuanto a los efectos en la evolución microestructural, refieren Adak, Mukherjee & Pal (2015) que, a mayor ángulo de bisel, la microestructura es similar a la del metal base porque el enfriamiento es más lento y la entrada de calor es menor, pero la zona afectada por el calor (ZAC) es más ancha. Por otro lado, plantea Xiong (2014) que, a menor ángulo, las zonas de la soldadura son más marcadas debido a que la intensidad de corriente se eleva para realizar una penetración más efectiva y el cordón tiene un enfriamiento más rápido, así mismo la ZAC es menor, lo que ocasiona que la microestructura tenga fases más duras en la zona térmica y el metal de aporte.

De acuerdo con Suresh-Kumar (2014), durante la soldadura, el crecimiento de los cristales se forma con la misma orientación cristalina que los granos de metal base parcialmente fundidos y recibe el nombre de crecimiento epitaxial, mecanismo de los procesos de soldadura por fusión, que posibilita la coalescencia buscada para tener continuidad entre el metal base y el de soldadura. Durante el crecimiento de estos granos iniciados epitaxialmente, se produce una selección de unos a expensas de otros, formándose una textura de crecimiento.

Este crecimiento competitivo como lo exponen Kang & Park (2008), se produce debido a que cada grano posee direcciones preferenciales de crecimiento. Por lo tanto, aquellos que poseen esa orientación, o cercana a ella, tendrán mayor oportunidad de acomodarse. La formación de la estructura primaria o de solidificación resulta del pasaje de líquido a sólido, por el cual se obtiene una crecida epitaxialmente a partir de los granos parcialmente fundidos del metal base y se corresponde a una determinada fase estable a la temperatura de solidificación.

Las transformaciones de fase en estado sólido tienen importancia tecnológica, fundamental en los aceros, ya que permiten obtener propiedades mecánicas según sea el tratamiento termomecánico a que es sometido un material de una composición química dada. Durante la soldadura del acero, el enfriamiento se produce en forma continua, depende del material, proceso, espesor de las chapas, calor aportado, precalentamiento, temperatura de interfase (Askeland, Fulay & Wright, 2013).

El objetivo del trabajo es cuantificar las fases metalográficas de un acero ASTM A 36 soldado con electrodo revestido E 7018 y con preparación de bordes a 30 y 35°.

Desarrollo experimental

Soldadura de las muestras

Para realizar el proceso de unión del acero ASTM A 36 con biseles a 30 y 35°, se realizó una junta a tope con preparación de bordes en simple V (Figura 1), en planchas de 250x300x14 mm, según recomendaciones de la norma AWS D11.2. Se seleccionó un electrodo de aporte recubierto para soldadura por arco eléctrico.

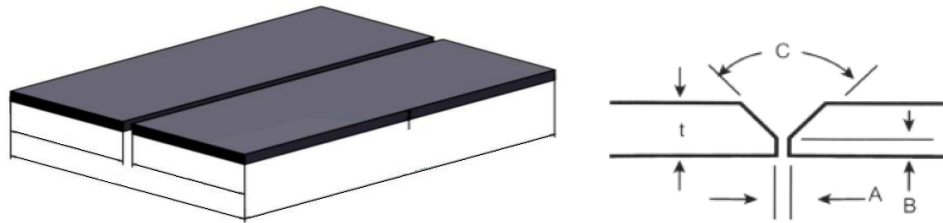


Figura 1. Junta de soldadura.

En la tabla 1 se muestra los parámetros para la soldadura manual por arco eléctrico (SMAW). del acero ASTM A 36, los cuales están en correspondencia con la preparación de bordes realizado a las probetas de ensayos.

Tabla 1. Parámetros para el proceso de soldadura

Longitud del arco (mm)	4
Diámetro del electrodo (mm)	4
Temperatura de fusión (°C)	1 539
Temperatura de ignición (°C)	32
Rendimiento (%)	0,75
Conductividad térmica (W/mK)	54

El electrodo, este determina la intensidad de soldeo. Si es baja para un diámetro dado, se ocasionará inestabilidad del arco. Si, por el contrario, es excesiva se puede originar erosión y fusión de la punta, así como inclusiones en el metal soldado. Con corriente directa tienen su máxima capacidad de conducción de corriente.

Preparación metalográfica de la probeta

Las muestras para la observación metalográfica se cortaron con longitud de 15 x 15. El corte se realizó con una fresa de disco, con el empleo de abundante refrigeración, con el objetivo de alterar las estructuras del mismo, para la observación las mismas fueron encapsuladas. En la figura 2 se muestra las probetas encapsuladas para realizar las operaciones de desbaste y pulido y garantizar el manejo de las mismas. Fueron denominadas M1 y M2.

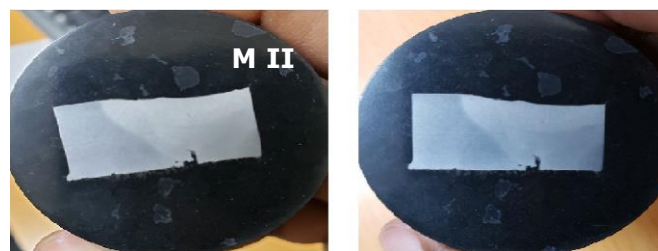


Figura 2. Encapsulado de las muestras.

La codificación con M I y MII, la primera para el bisel de 30° y la segunda para el de 35°. Se realizó el encapsulado, ya que, al realizar análisis microestructural en bordes de muestras deformadas, es importante conservar un ángulo de 90° en toda el área a observar.

Microscópico para la microscopía óptica

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, se empleó un microscopio óptico marca NOVEL modelo NIM – 100, las cuales se acoplaron en un dispositivo con plastilina para la nivelación de las mismas. Se realizó para observar el comportamiento microestructural y emplearla para establecer la comparación luego de realizado el proceso de soldadura. La figura 3 se corresponde con la estructura del acero ASTM A 36.

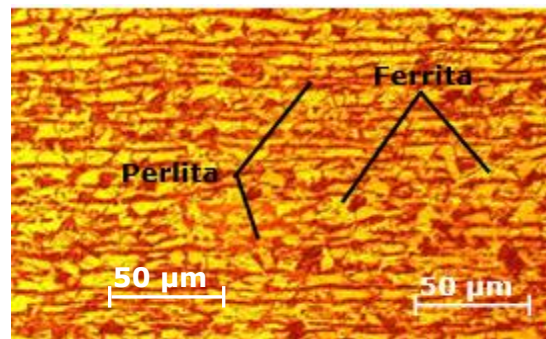


Figura 3. Microestructura del acero ASTM A 36.

La microestructura del acero está compuesta por una estructura de ferrita + perlita. Se observan los granos de ferrita (zonas blancas) y colonias de perlita (zonas oscuras), presentan una estructura bandeada como resultado del proceso de conformado en caliente de este material. Se seleccionó la zona del metal base, lo más alejado de donde pudiera tener influencia el ciclo térmico de soldadura, el objetivo de este análisis fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que nos permitiera determinar los cambios en la zona fundida y en la zona de influencia térmica.

Microscopio óptico para el análisis de imágenes

Para el análisis de las imágenes de las muestras metalográficas se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca echoLAB. Realiza la reflexión de la luz de la probeta pulida, con una cámara digital acoplada, la cual va desde el microscopio hacia una laptop marca LENOVO, donde se encuentra un programa analizador de

imágenes tomadas desde la cámara, se evalúan las fases, tamaño del grano, inclusiones, afectaciones en los granos, en la misma se elabora un reporte técnico con estas características. En la figura 4 se muestra las etapas empleadas.

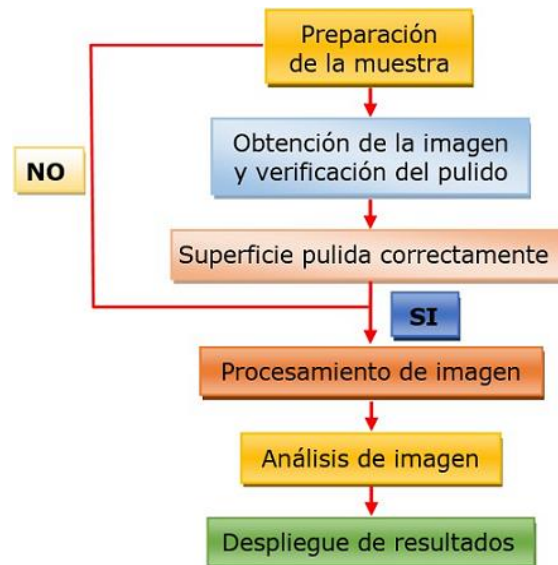


Figura 4. Etapas para el procesamiento digital de imagen.

Aunque las tres primeras etapas no tienen que ver con el procesamiento, son importantes para el análisis, ya que la imagen es la fuente de la información requerida. En ellas radica la preparación de la muestra. Se consideró para la obtención de datos fiables. Obtener un pulido de la muestra es fundamental para garantizar superficies con ruido relativamente bajo (debido a la rugosidad de la superficie), niveles de gris homogéneos, sin sombras, sin abolladuras ni material desprendido que confunda al sistema con falsos poros o bordes, y fronteras de grano definidas.

La iluminación se dispuso de manera tal, que el haz de luz fuera lo más perpendicular a la superficie de la plataforma, para evitar sombras y una iluminación heterogénea. Una vez logrado esto, la lámpara se conservó igual para todas las muestras tanto en ubicación como en intensidad de iluminación. Como la imagen también se ve influenciada por la abertura del diafragma se optó por mantenerlo constante.

Luego de realizado el proceso de análisis de imágenes, los resultados fueron tabulados. Se consideró los datos de las fases a partir de los microconstituyentes, a los cuales se les determinó el área de los granos y el por ciento que ocupa sobre la matriz. En la tabla 2 muestra el procedimiento para el análisis de los microconstituyentes según norma ASTM A-247.

Tabla 2. Procedimiento para el análisis de los microconstituyentes.

Datos de las fases		
Microconstituyentes	Área	Área %
1	Área 1	Área 1
2	Área 2	Área 2
3	Área 3	Área 3

El análisis de imagen fue necesario para estimar los porcentajes de los microconstituyentes presentes en la zona fundida, la afectada por el calor (ZAC) y la interfase, con los cuales a su vez se puede estimar la dureza en esta zona.

Resultados y discusión

Análisis del por ciento de microconstituyentes

El método para la determinación del tamaño de grano, fase o microconstituyentes en la zona de la unión soldada está estandarizado según las normas ASTM E-122. Con el "Software de Procesamiento de Imágenes" se determinó el tamaño de grano y porcentajes de fases, así como componentes e inclusiones que tienen efecto sobre las propiedades mecánicas del acero ASTM A 36. La figura 5a se corresponde con el análisis realizado en la muestra patrón y la 5b, las fases.

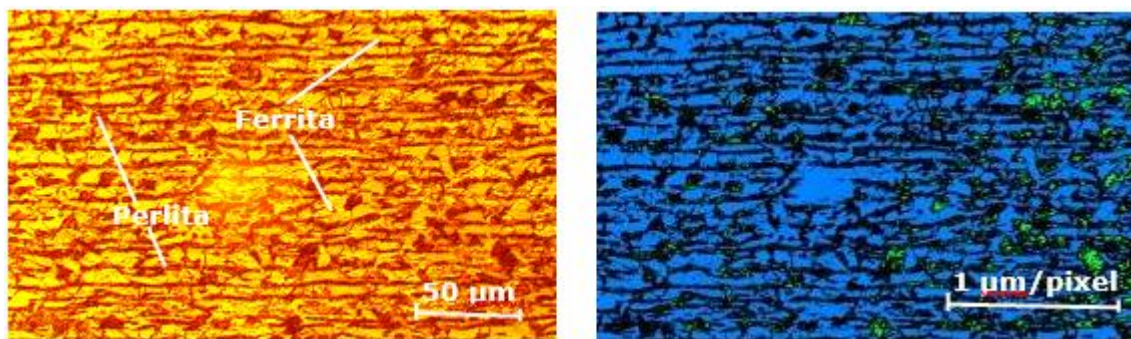


Figura 5 a) Muestra patrón. b) Microconstituyentes.

Al realizar la medición del tamaño de grano mediante los métodos estereológicos según la norma ASTM E112 (1996) en la muestra patrón se determinó la presencia de tres fases en la microestructura. En la figura 6 se muestra la distribución de las mismas.

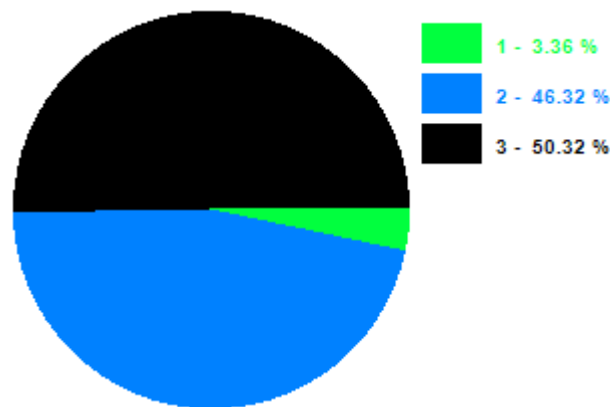


Figura 6. Distribución de las fases en la muestra patrón.

En la tabla 3 se muestra la cuantificación de las mismas sobre el área que ocupan.

Datos de las fases		
Microconstituyentes	Área	Área %
Precipitados	28 277	3,36
Perlita	389 871	46,32
Ferrita	423 580	50,32

En la estructura de la muestra patrón se obtuvo que, la misma presenta una distribución sobre la matriz de ferrita-perlita y la presencia de precipitados, presumiblemente de sulfuro de manganeso (MnS), asociado a la cantidad de este elemento en la composición química, la primera con un 50,32 %, la segunda con un 46,32 % y la tercera de 3,36 % que garantizan el 100 % de la distribución en esta estructura.

Se realizó el análisis en la muestra MI, correspondiente al bisel de 30°. La figura 7a se corresponde con la zona fundida y la 7b las fases presentes.

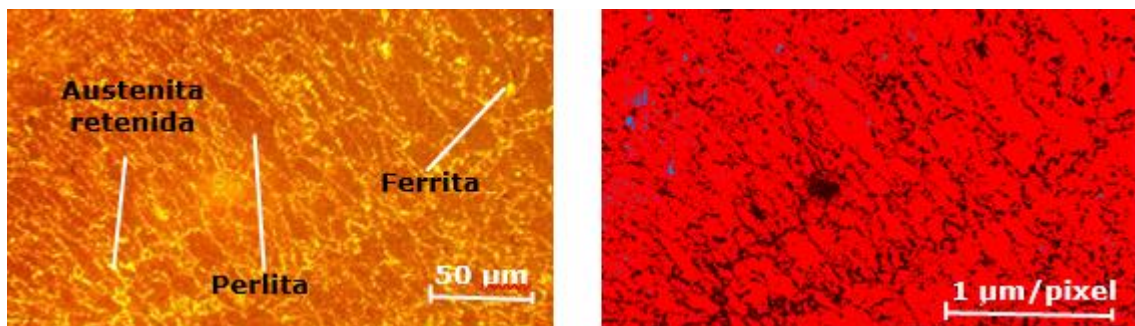


Figura 7 a) Zona fundida. b) Microconstituyentes.

En la ZF del acero ASTM A 36, con bisel de 30°, la fase perlítica (rojo) ocupa la mayor distribución con un 82,25 % sobre el área de la matriz, se observa que, la austenita

retenida (marrón) es de un 17,27 % y la ferrita poligonal (azul) con un total de 0,47 %. Lo cual permite plantear que, la mayor fase se corresponde con la perlita, lo cual es atribuible a que, durante el proceso de soldadura el flujo de calor, al fundir ambos materiales, provoca mayor temperatura por el efecto del bisel, lo que origina la formación de una nueva estructura, con la formación de nuevos granos y fases.

En la figura 8 se muestra la distribución que ocupan los diferentes microconstituyentes en la zona fundida del bisel de 30°.

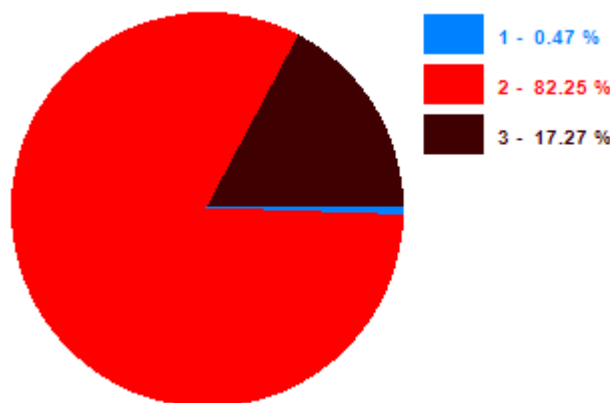


Figura 8. Distribución de los microconstituyentes.

En la tabla 4 se muestra la distribución de las áreas en la estructura.

Tabla 4. Área de los microconstituyentes en la estructura

Datos de las fases (ZF)		
Microconstituyentes	Área	Área %
Ferrita poligonal	3 987	0,47
Perlita	692 348	82,25
Austenita retenida	145 393	17,27

Se analizó la zona afectada por el calor que se generó en este bisel de 30°, con lo cual se determinó los patrones de la microestructura en el acero ASTM A 36. La figura 9a se corresponde con la zona afectada por el calor y la 9b con los microconstituyentes presentes en la misma, donde quedó identificado los granos y límites o bordes de grano, que se caracterizan por separar en regiones el material.

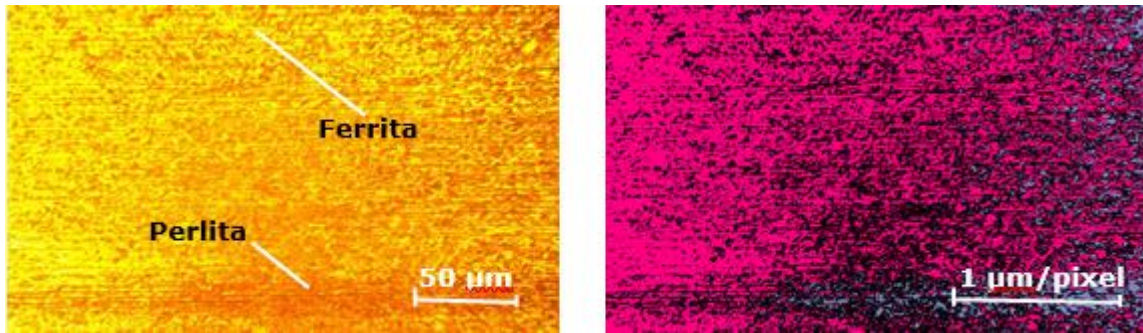


Figura 9. a) Zona afectada por el calor. b) Microconstituyentes.

En la ZAC la ferrita ocupa un área de 53,82 %, precedida por la perlita con 39,76 % y los precipitados de 6,42 %. Se observa que, a pesar que en la microestructura estos no son perceptible, en la imagen a color se obtiene la relevancia de los mismos. La distribución es atribuible a que, en esta zona, aunque existe flujo de calor, tiene una menor incidencia que en la zona fundida.

En la figura 10 se muestra la distribución que ocupan los diferentes microconstituyentes en la zona afectada por el calor para el bisel de 30°.

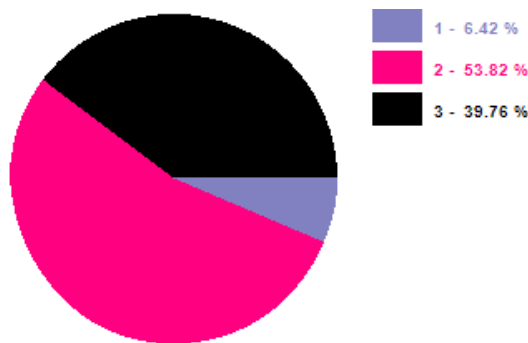


Figura 10. Distribución de los microconstituyentes.

Y en la tabla 5 se muestra la distribución de las áreas en la estructura.

Tabla 5. Área de los microconstituyentes en la estructura

Datos de las fases (ZF)		
Microconstituyentes	Área	Área %
Precipitados	54 071	6,42
Ferrita	453 006	53,82
Perlita	334 651	39,76

Al efectuar el procesamiento de imágenes en esta muestra, correspondiente al bisel de 30°, se puede observa que, a través de este procedimiento se determinó que, esta estructura cristalina u ordenamiento atómico obedece a los patrones de puntos de red

que son posiciones definidas matemáticamente que, al ubicarse los átomos en estas posiciones, forman esta estructura o cristales que para un acero hipoeutéctico, al aumentar de tamaño y al hacer presión unos contra otros, cada uno actúa de acuerdo con el estado de su crecimiento. También se comprobó que los granos surgen primero en la línea de fusión, en donde la temperatura es relativamente baja, y crecen con diferente rapidez, comportamiento que fue descrito además por Nascimento-Ngaca y Fernández-Columbié (2021).

Se realizó el mismo procedimiento en la muestra MII, perteneciente al bisel de 35°. La figura 11a se corresponde con la zona fundida y la 11b con las fases presentes.

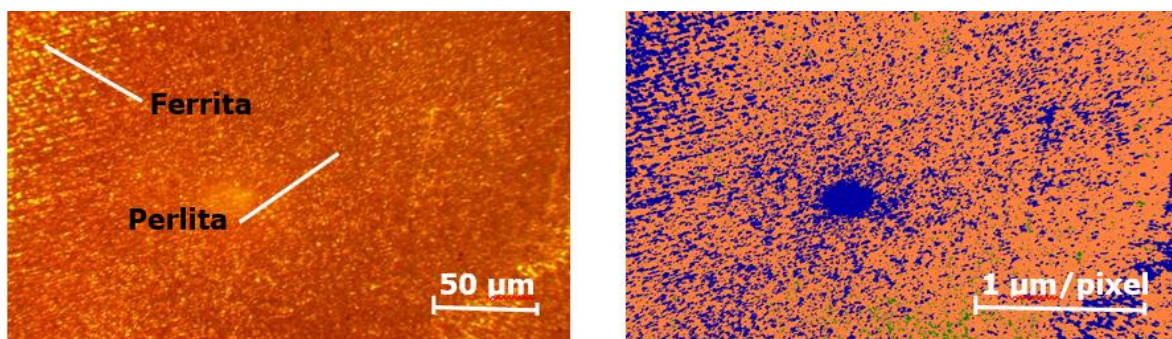


Figura 11. a) Zona fundida. b) Microconstituyentes.

En esta zona el área de la perlita sobre la matriz es de un 72,55 %, de 25,95 % de ferrita y un 1,5 de precipitados. En esta zona, la imagen muestra una mayor densidad del color correspondiente a la fase perlítica. Indicativo que, por efecto del ciclo térmico y la apertura de la preparación del borde, se requiere de mayor aporte de calor. En la figura 12 se muestra la distribución de estos en la estructura.

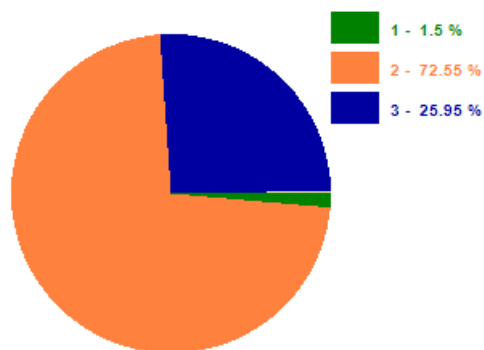


Figura 12. Distribución de los microconstituyentes.

En la tabla 6 se muestra la distribución de las áreas en la estructura.

Tabla 6. Área de los microconstituyentes en la estructura

Datos de las fases (ZF)		
Microconstituyentes	Área	Área %
Precipitados	12 597	1,5
Perlita	610 711	72,55
Ferrita	218 420	25,95

Con el procesamiento, al determinar el área y el por ciento de área, se puede plantear que, una de las variables dentro de la microestructura que define la respuesta mecánica del material es el tamaño de grano y que por el aporte de calor introducido en las planchas con bisel a 35°, existe una solidificación inicialmente con una estructura completamente ferrítica, luego transita por una transformación de fase en la cual la austenita primaria y secundaria crece en los bordes del grano de ferrita. Los granos de perlita se descomponen en granos más finos, por lo que presentan coalescencia de perlita, criterio referido por Nascimento-Ngaca y Fernández-Columbié (2021).

En la figura 13a se muestra la Zona afectada por el calor para el bisel de 35° y en la 13b los microconstituyentes obtenidos en esta zona.

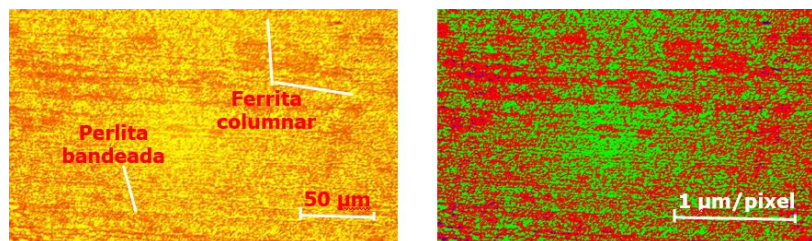


Figura 13 a) Zona afectada por el calor. b) Microconstituyentes.

Los microconstituyentes o fases presentes en esta zona, al quedar limitados por un color diferente lo identifica en correspondencia con su posición en la matriz. En la muestra analizada se observa la caracterización de cada una de las fases en esta zona.

En la figura 14 se muestra la distribución que ocupan los mismos sobre la matriz de la unión formada por el depósito del electrodo E 7018.

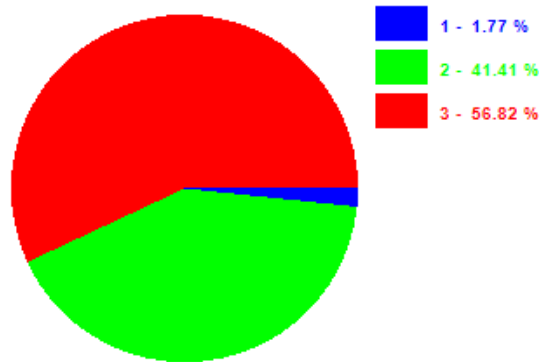


Figura 14. Distribución de las fases en la zona afectada por el calor.

En la tabla 7 se muestra el área que ocupan los mismos en la estructura.

Tabla 7. Área de los microconstituyentes en la estructura

Datos de las fases (ZF)		
Microconstituyentes	Área	Área %
Precipitados	14 890	1,77
Ferrita columnar	348 591	41,41
Perlita	478 247	56,82

En la distribución de las fases presentes, la mayor área en la zona afectada por el calor para el bisel de 35° la ocupa la presencia de la perlita (rojo) con un 56,82 %, precedida por la ferrita columnar con un 41,41% (verde) y la presencia de algunos precipitados (azul) con un total de 1,77 %. Por los resultados obtenidos de los diferentes microconstituyentes en esta zona se puede plantear que, en la microestructura final, la fase primaria permanece en el núcleo de la fase perlítica, con ferrita distribuida sobre la matriz.

De acuerdo con los resultados del comportamiento microestructural y el de los microconstituyentes obtenidos por medio del procesamiento digital de imágenes, en las diferentes zonas del acero ASTM A 36, con preparación de bordes a 30 y 35°, se puede plantear que, por efecto del ciclo térmico, el calor ha modificado las estructuras de los materiales bases, donde la formación de fases consistente fundamentalmente en ferrita y perlita.

Conclusiones

Se realizó a través del procesamiento de imágenes muestras de uniones soldadas de acero ASTM A 36 preparadas con bisel de 30 y 35°, las cuales fueron obtenidas por proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo E 7018.

El área de las estructuras se determinó a partir del volumen de fracción de las fases donde se consideró la fracción del constituyente de interés, con el empleo del valor de intensidad y datos de los objetos visualizados en un elemento denominado píxel.

Al realizar el análisis de los microconstituyentes o fases en la zona fundida y en la afectada por el calor para el bisel de 30° la fase perlítica con un 82,25 % ocupa la mayor distribución sobre el área de la matriz y en el de 35°, es la misma, pero con un 56,82 %.

Referencias bibliográficas

- ABEDI, S. 2017. Investigación de falla de una soldadura defectuosa de una tubería de transmisión de productos petrolíferos. *Revista de análisis y prevención de fallas* 17(1): 30-37.
- ADAK, D.; MUKHERJEE, M.; PAL, T. 2015. Development of a direct correlation of bead geometry, grain size and HAZ width with the GMAW process parameters on bead-on-plate welds of mild steel. *Transaction of the Indian Institute of metals* 68(9): 839-849.
- ASKELAND, D.; FULAY, P. & WRIGHT, W. 2013. *Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales*. In *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3rd ed., J. Hernández, Ed. México: CIENGAGE Learning, pp. 3–22.
- ASTM 1996. International, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, p. 2.
- BHATTI, A.; BARSOU, Z.; MURAKAWA, H.; BARSOU, I. 2015. Influence of thermomechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion. *Materials and Design* 65(5): 878-889.
- BURGE, M. & BURGER, W. 2016. *Digital image processing*, 2nd ed. New York: Springer International Publishing.
- FRIELD, J. 2000. *Principles of Image Analysis, in Practical Guide to Image Analysis*. 1st ed., United States of America: ASM International, pp. 75–101.

- KANG, J & PARK, C. 2008. Characterization of bainitic microstructures in low carbon hsla steels. *International Journal of Modern Physics B*. 22(31): 5965-5970.
- JUNG, G. & TSAI, C. 2004. Plasticity-based distortion analysis for fillet welded thin-plate t-joints. *Welding Journal* 83(6): 177-187.
- KOCH, D.; DESPOTOVIC, M.; LEIBER S.; SAKEENA, M.; DÖLLER, M. Y ZEPPELZAUR, M. 2019. Análisis de la imagen inmobiliaria: una revision de la literature. *Revista de literature inmobiliaria* 27(2): 269-300.
- NASCIMENTO-NGACA, A. & FERNÁNDEZ COLUMBIÉ, T. 2021. Influencia del ángulo de bisel en la soldadura a tope de un acero ASTM A 36 soldado con electrodo revestido. *Ciencia & Futuro* 11(3): 36-47.
- SURESH-KUMAR, K. 2014. Analytical modeling of temperature distribution, peak temperature, cooling rate and thermal cycles in a solid works piece welded by laser welding process. *Procedia Materials Science* 6(1): 821-834.
- XIONG, J. 2014. Bead geometry prediction for robotic GMAW based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis. USA: Springer Science+Business Media. 25(5): 157-163.
- ZHANG, Y. 2017. *Introduction to Image Analysis*, in *Image Engineering, Volume II: Image Analysis*, 1st ed., Beijing: DE GRUYTER, pp. 1-25.