



## EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA PILETA LÍQUIDA OBTENIDA POR EL PROCESO GMAW UTILIZANDO LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

DIMITRY V. BUBNOFF<sup>1</sup>, J.E. MUSA<sup>2</sup>, T.R.M. LOURENÇO<sup>1</sup>, JOSE A. DE CASTRO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Federal Fluminense/UFF

Escuela de Ingeniería Industrial

Av. dos Trabalhadores 420 Vila Sta. Cecília, CEP 27255-125, Volta Redonda/RJ, Brasil

<sup>2</sup>Centro Universitario de Volta Redonda/UNIFOA

Av. Paulo Erlei Alves Abrantes 1325 Três Poços, Volta Redonda/RJ, Brasil

(Recibido 17 de mayo de 2015, revisado 5 de noviembre de 2015, para publicación 27 de noviembre de 2015)

**Resumen** – La geometría de las pozas de fusión fue estudiada con la finalidad de adquirir conocimiento sobre el proceso de solidificación y demostrar la eficacia del método de termografía infrarroja para evaluar las distribuciones de temperaturas en piezas durante la soldadura. En este sentido fueron realizados varios procedimientos de soldaduras, que fueron monitoreados por una cámara infrarroja y comparados con mediciones realizadas a través de termopares, adecuadamente posicionados en la pieza. La termografía infrarroja evolucionó mucho por ser una técnica de inspección no invasiva para la evaluación de temperatura de las superficies de una amplia gama de materiales. El presente trabajo evalúa la potencialidad de la técnica de termografía infrarroja para estudio de los tratamientos térmicos y procesos de soldadura, posibilitando un mejor entendimiento de los fenómenos dentro de la poza de fusión durante la soldadura.

**Palabras clave** – Termografía infrarroja, soldadura, discontinuidades.

### 1. INTRODUCCIÓN

La termografía infrarroja es una excelente herramienta, aunque explorada de manera muy moderada en la metalurgia, que posibilita la caracterización de las propiedades asociadas al comportamiento térmico a partir del análisis de distribución de temperatura superficial y también permite un análisis más detallado de los defectos [1].

La termografía es una tecnología de ensayo no-destructiva que permite la obtención de imágenes térmicas de la superficie de los objetos. Las imágenes son posibles en virtud de la emisión de energía en el espacio por todo cuerpo, a una temperatura superior al cero absoluto, también conocida como radiación térmica, en forma de ondas electromagnéticas [2].

La realización de imágenes infrarrojas presentan ventajas, tal como, la medición de temperaturas sin contactar el objeto, visualización en largas distancias y de grandes superficies, detección del gradiente de temperatura en una superficie de forma, identificación de discontinuidades y pérdidas de calor sin la necesidad de pausar la producción industrial [3]. Conocer las técnicas de monitorización ya existentes, perfeccionarlas y desarrollar nuevas tecnologías significan una manutención de mejor calidad y, consecuentemente, con menor número de horas paradas en la planta industrial [4].

En la última década, la termografía infrarroja sigue encontrando creciente receptividad por parte de la industria, pues esta herramienta permite la obtención de resultados confiables, cuanto al tamaño, como en la localización de defectos [5-6].

Las características metalúrgicas dependen de la energía y del calor presente en el proceso de soldadura. Para obtener características metalúrgicas satisfactorias, los eventos térmicos que ocurren durante el proceso deben ser controlados. Esos eventos térmicos (tasa de enfriamiento, principalmente) son responsables de los principales aspectos metalúrgicos del cordón de soldadura [7].

Algunas investigaciones que utilizan sensores en soldadura robótica por arco, fueron dirigidas a la de-

tección de la geometría de junta, geometría y localización de la piletta líquida mediante imágenes de infrarrojo [1].

La relevancia del estudio se impone por la posibilidad de acompañar la cinética de la transformación de fase durante la solidificación y el posterior enfriamiento, a través de un análisis infrarrojo.

Los resultados obtenidos revelan que la termografía infrarroja puede detectar cambios en la piletta líquida, convirtiéndola en base experimental para estudios teóricos, con el propósito de obtener modelos matemáticos [8] para la mejor comprensión de los fenómenos metalúrgicos. En este contexto, el estudio presentado contribuye favorablemente a la metalurgia [9-10].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El metal de base utilizado en este trabajo fue el acero de bajo carbono 1010/CSN 4,5 mm laminado en caliente y decapado en formato de chapa plana, con dimensiones 4,5 mm de espesura y 200 mm x 60 mm de longitud y anchura respectivamente. El gas utilizado en las pruebas fue una mezcla de Argón 80% y CO<sub>2</sub> 20%. La soldadura se efectuó por medio del proceso MIG/MAG utilizando el equipamiento MigPulse4000 del Laboratorio de Soldadura de la EEIMVR.

Una cámara FLIR T200 fue utilizada para capturar las imágenes infrarrojas y utilizando el *software* ThermaCAM™ Researcher2001 (FLIR Systems) fueron hechas las transferencias de las imágenes para la computadora y la conversión para otros formatos. Este modelo de cámara tiene resolución real integrada que llega hasta 200 x 150 pixels y sensibilidad de 0,1°C.

La cámara fue posicionada de modo que focalizase el arco eléctrico (o CPs) en el ángulo de 90° del plano de las piezas ensayadas. Las fotos obtenidas después de cada prueba, fueron analizadas en una computadora auxiliar, para procesamiento posterior. La distancia entre el espécimen inspeccionado y la cámara se mantuvo en 0,5 m, la cual ha producido el mejor foco.

La sala de ensayos se mantuvo entre 20 y 26°C, porque puede haber variación superior a 1°C durante la prueba. Lo mismo ocurre con la humedad relativa de la sala, que también necesita mantenerse entre 50% y 70%. Los artefactos térmicos derivados de ropas, o del ambiente externo, son eliminados.

También se utilizó el Matlab2010®, con el *toolbox* de procesamiento de imágenes, para desarrollar la aplicación que hace la lectura del archivo que contiene las informaciones de los marcadores y realiza el registro de la imagen.

En este trabajo los distintos formatos de la piletta de fusión fueron obtenidos variando los dos parámetros del proceso – la corriente y la velocidad de soldadura. Rangos entre 100-200 A para la corriente y de 6-19 mm/s para la velocidad fueron establecidas como región de estudio.

Los parámetros de soldadura mantenidos constantes durante la soldadura de cada uno de los cordones son mostrados en la tabla 1.

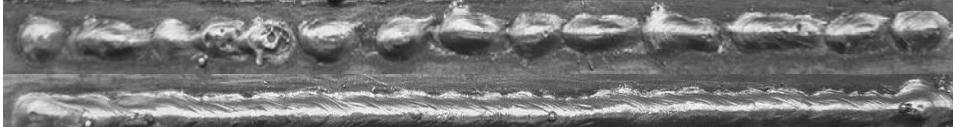
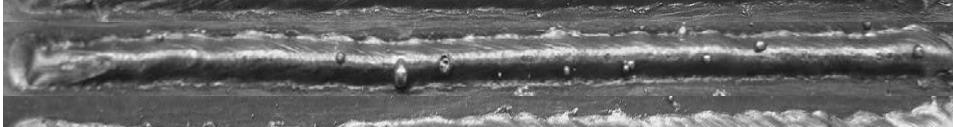
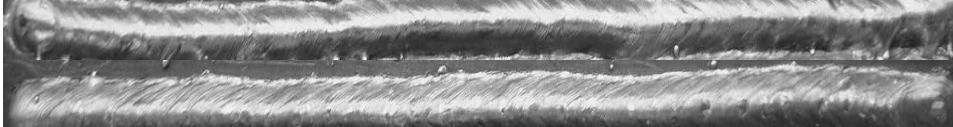
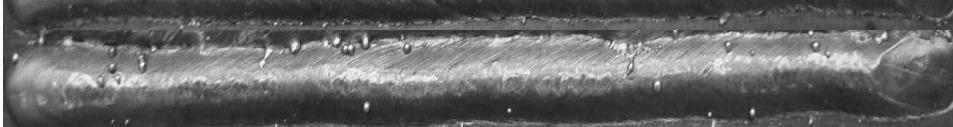
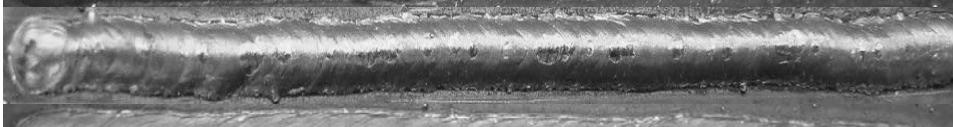
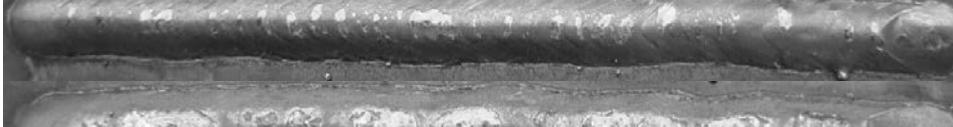
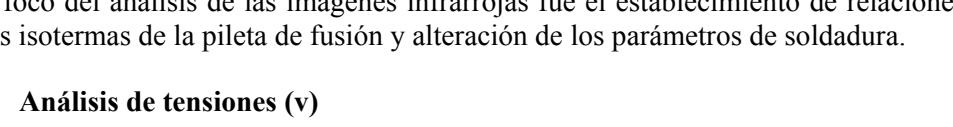
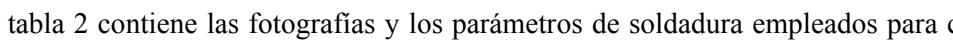
## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta parte son presentados, comparados y discutidos los resultados pertinentes a los aspectos del ciclo térmico de soldadura, obtenidos a través de la medición de temperatura en la superficie del cordón, con auxilio de la termografía infrarroja. Todos los cordones de soldadura fueron fotografiados y confrontados con las imágenes infrarrojas.

Tabla 1. Valores de los parámetros utilizados para la soldadura.

Material base	Acero 1010 (espesura = 4,5mm)
Tipo de gas	Aire (80%) + CO <sub>2</sub> (20%)
Caudal de gas (L/mm)	13
Electrodo	Negativo EWTh-2
Longitud electrodo	7 mm

Tabla 2. Condiciones utilizadas en los testes y cordones de soldadura.

	19 mm/s 100 A
	19 mm/s 150 A
	19 mm/s 200 A
	11 mm/s 100 A
	11 mm/s 150 A
	11 mm/s 200 A
	6 mm/s 100 A
	6 mm/s 150 A
	6 mm/s 200 A

El foco del análisis de las imágenes infrarrojas fue el establecimiento de relaciones entre la geometría de las isoterma de la piletas de fusión y alteración de los parámetros de soldadura.

### 3.1. Análisis de tensiones (v)

La tabla 2 contiene las fotografías y los parámetros de soldadura empleados para cada uno de los cordones hechos.

Los cambios en el formato del cordón de soldadura son vinculados a los parámetros de corriente y velocidad. Modificando la velocidad, se modifica la anchura de la soldadura, lo que puede ser visto comparando un cordón hecho con baja corriente, 150 A y una velocidad de 19 mm/s, con un cordón con las siguientes características: 150 A y 6 mm/s.

Para estas pruebas, la corriente y la velocidad de soldadura se encuentran entre 100-150-200 A y 6-11-19 mm/s, respectivamente.

La corriente de soldadura tiene relación directa con la cantidad de calor transferido a la pieza, siendo, por lo tanto, una variable fundamental para determinar la cantidad de fusión en el metal base y la penetración de la soldadura. La tensión también tiene relación con la penetración – sus variaciones causan efectos en la columna del arco, cuando el calor generado es transmitido principalmente en la dirección radial. Siguiendo esta lógica, los formatos de las piletas de fusión, obtenidos durante los ensayos, pueden ser correlacionados con las alteraciones en la tensión.

La tabla 3 muestra la relación entre los datos de la tabla 2 (velocidad y amperaje) y la Tensión registrada.

Tabla 3. Tensiones X Velocidad/Amperaje.

Alta mm/s	V	Media mm/s	V	Baja mm/s	V
19-100 A	25	11-100 A	25	6-100 A	25
19-150 A	26	11-150 A	26	6-150 A	26
19-200 A	28	11-200 A	28	6-200 A	28

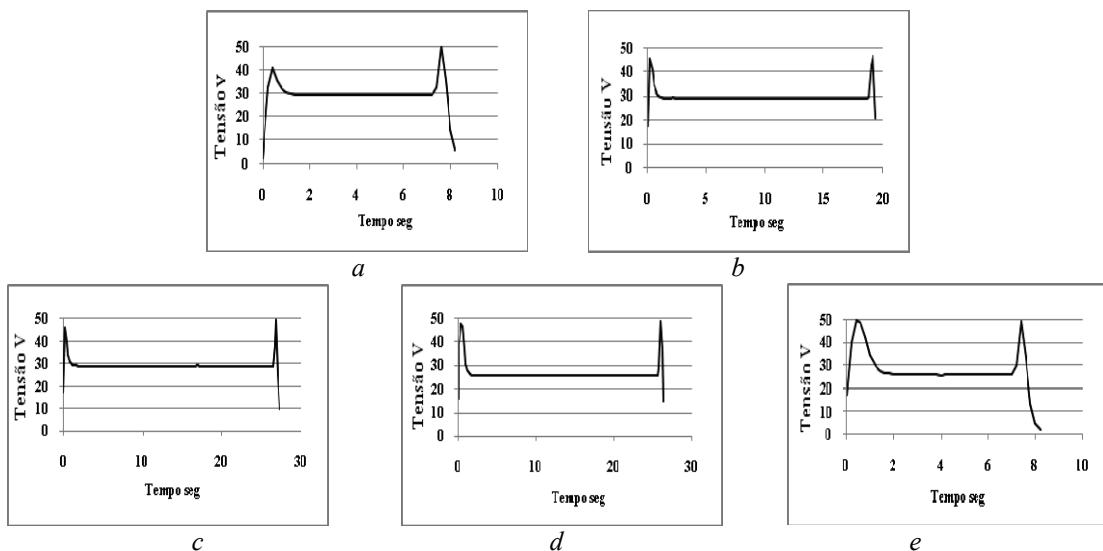


Fig. 1. Señales de tensión para los cordones: a) 19 mm/s 200 A, b) 11 mm/s 200 A, c) 6 mm/s 200 A, d) 6 mm/s 150 A, e) 19 mm/s 150 A.

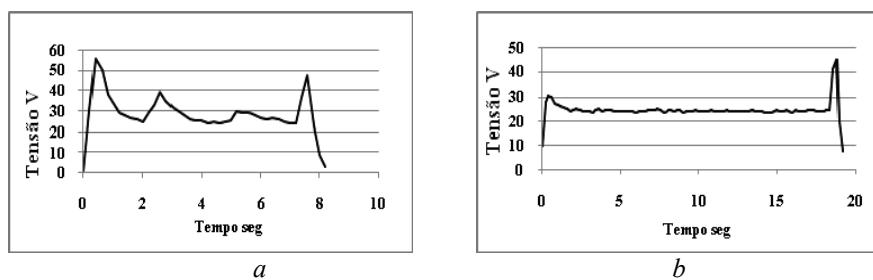


Fig. 2. Señales de tensión para los cordones: a) 19 mm/s 100 A, b) 11 mm/s 100 A.

da durante los ensayos correspondientes.

La primera evaluación de los datos presentados en la tabla anterior lleva a la siguiente conclusión: tensión (V) está intensamente ligada a la intensidad de corriente (A), si la intensidad de corriente no cambia, la señal de tensión se mantiene estable en el tiempo, eso puede ser visto también en las figuras abajo.

En la Fig. 1 podemos observar el mismo comportamiento para todos los parámetros de soldadura, o sea: apertura del arco determinando tiempo de soldadura y el cierre del arco (todo está en consonancia con

En la Fig. 1 podemos observar el mismo comportamiento para todos los parámetros de soldadura, o sea: apertura del arco, determinando tiempo de soldadura y el cierre del arco (todo está en consonancia con los datos de la tabla 2).

Todavía existen dos gráficos que nos llaman la atención, pues presentan un comportamiento muy distinto al comportamiento observado en las Fig. 1. Estos gráficos se pueden ver en la Fig. 2.

La Fig. 2 retrata dos procedimientos de soldadura: a) con velocidad alta y amperaje bajo, b) con velocidad media y amperaje bajo.

No hay duda que el cordón obtenido con 19 mm/s a 100 A, presenta mayores variaciones de tensión (entre 23 – 40 V) – este hecho puede ser comprendido como un indicador de discontinuidades. También el próximo cordón soldado con 11 mm/s 100 A manifiesta constantes oscilaciones de la señal de tensión, aunque en menor escala (entre 22 – 26 V) – eso podría indicar una tendencia para surgimiento de discontinuidades.

La detección de las discontinuidades, además del monitoreo de las variables eléctricas, fue acompañada por la termografía infrarroja.

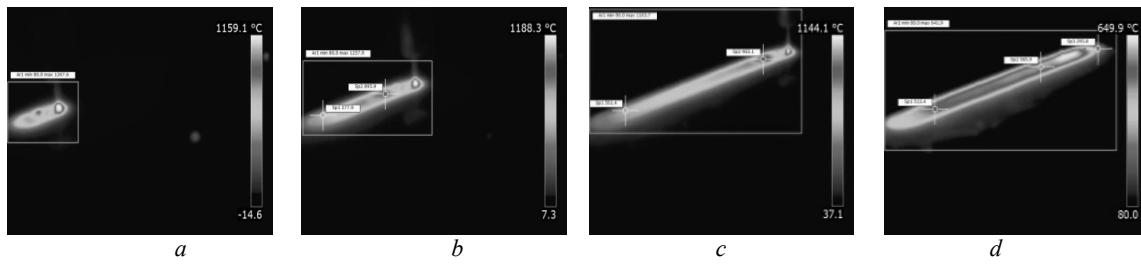


Fig. 3. Secuencia de imágenes de infrarrojo para un cordón hecho con 200 A y 6 mm/s de velocidad de soldadura a los: (a) 5 segundos, (b) 15 segundos, (c) 25 segundos y (d) 10 segundos después del final, respectivamente.

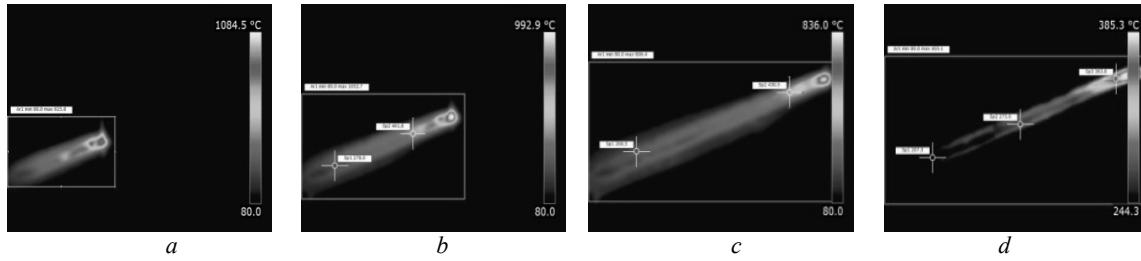


Fig. 4. Secuencia de imágenes de infrarrojo para un cordón hecho con 100 A y 11 mm/s de velocidad de soldadura a los: (a) 3 segundos, (b) 9 segundos, (c) 15 segundos y (d) 10 segundos después del final, respectivamente.

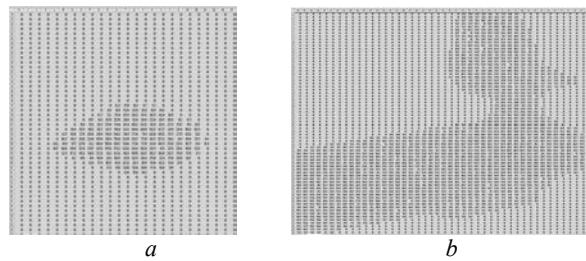


Fig. 5. Imagen Infrarroja en Excel: a) comienzo de la soldadura, b) final de la soldadura.

### 3.2. Análisis de las imágenes infrarrojas

Algunas imágenes de infrarrojo son presentadas en la Fig. 3, para un cordón soldado con una corriente de 200 A y una velocidad de 6 mm/s en diferentes instantes de tiempo.

La Fig. 3(a) presenta una visión de la piletta de fusión en el comienzo del cordón cuando el arco es abierto. La Fig. 3(b) corresponde a la imagen obtenida 15 segundos después del inicio del proceso de soldadura. La Fig. 3(c) es la imagen en el final del cordón, cuando el arco está cerrándose, y la Fig. 3(d) corresponde al cordón enfriándose después de 10 segundos de la finalización del proceso.

La Fig. 4 presenta una secuencia de imágenes de infrarrojo para un cordón hecho con una corriente 100 A y una velocidad de 11 mm/s en distintos instantes de tiempo. En la Fig. 4(a) tenemos una visión de la piletta de fusión en el comienzo del cordón cuando se abre el arco. La Fig. 4(b) corresponde a la imagen obtenida nueve segundos después de empezar el proceso de soldadura. La Fig. 4(c) es la imagen en el final del cordón, cuando el arco está presto a cerrarse y la Fig. 4(d) corresponde al cordón enfriándose después de 10 segundos de la finalización del proceso.

Comparando las Fig. 3 y 4 – el enfriamiento fue más rápido en la última figura, el cordón (100 A/11 mm/s), considerando los parámetros empleados en la ejecución de la soldadura.

Los resultados obtenidos con la termografía infrarroja se basan en la distribución espacial de temperaturas analizadas y visualizadas por la radiación térmica emitida por la superficie de la probeta.

Esta distribución, que es una decodificación de la radiación en forma de color, donde cada color es interpretado como una señal térmica de una determinada región, puede ser interpretada numéricamente por el software en la forma de datos del Excel.

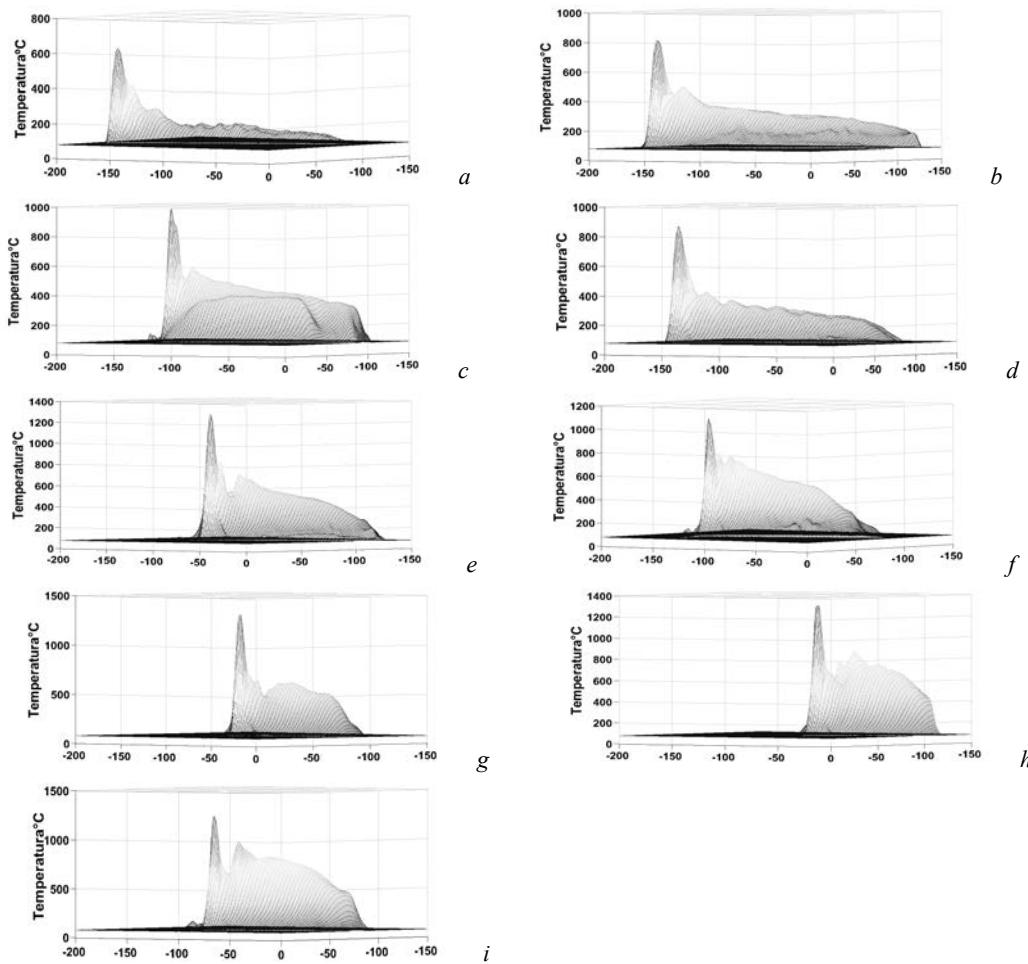


Fig. 6. Proyecciones en forma de superficies 3D para los cordones: a) 19 mm/s – 100 A, b) 11 mm/s – 100 A, c) 6 mm/s – 100 A, d) 19 mm/s – 150 A, e) 11 mm/s – 150 A, f) 6 mm/s – 150 A, g) 19 mm/s – 200 A, i) 6 mm/s – 200 A.

La Fig. 5 presenta una transformación numérica de una imagen infrarroja para una matriz en Excel, en la Fig. 5(a) podemos ver la distribución de temperatura en la superficie del cordón de soldadura en el comienzo del ensayo, y la Fig. 5(b) representa la fase final del experimento, donde se puede ver el flujo de calor del soplete de soldadura.

Uno de los métodos aplicados para tratamiento y análisis de las imágenes térmicas es el Matlab2010®.

En las figuras abajo se presentan (en 3D) las superficies de las chapas sometidas a la soldadura, que permiten diagnosticar los factores como velocidad de soldadura, temperatura y corriente, buscando mejor comprensión de la influencia de los parámetros de soldadura sobre los efectos térmicos y, consecuentemente, sobre la geometría del cordón.

Analizando las superficies 3D, vistas en la Fig. 6, podemos considerar como un aspecto referente a la superficie el hecho de que con el aumento de velocidad de soldadura, la altura del cordón tiende a disminuir – Fig. 6(a) y 6(c), y también que, con el aumento de corriente, los cordones empiezan a engrosar – Fig. 6(g) e 6(i).

Para que el aporte térmico disminuya, la velocidad de soldadura debe aumentar y/o la corriente disminuir. Todos los gráficos que representan soldaduras a baja velocidad 6 mm/s (independiente de la corriente) demuestran la clara influencia del aporte térmico en una pequeña área frente a la zona de fusión, o delante del frente de solidificación – Fig. 6(c, f, i). Este hecho prueba que la velocidad de soldadura prevalece sobre la intensidad de corriente, o sea, ejerce más influencia sobre el proceso de soldadura.

Las imágenes a y b (Fig. 6) son las más importantes – son los cordones hechos con 19 mm/s y 11 mm/s respectivamente. La corriente es 100 A para ambos casos. En otras palabras, se refieren a velocidades altas/medias con corrientes bajas.

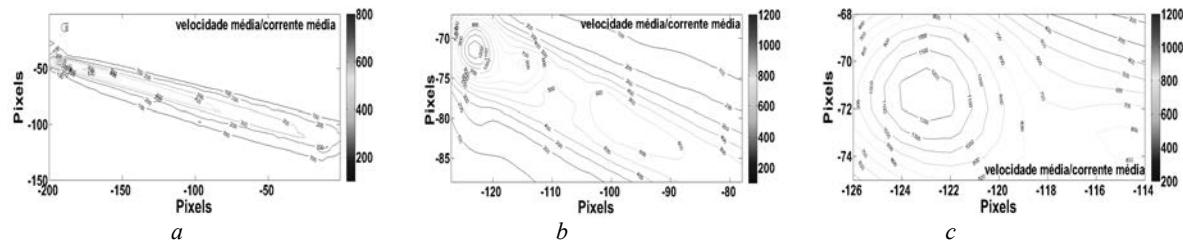


Fig. 7. Distribución de la temperatura a lo largo del cordón de soldadura, 11 mm/s – 150 A: a) área total, b) área menor, c) área de piletas.

En la Fig. 6(a) – velocidad alta/corriente baja – podemos observar que la línea que está demarcando la temperatura máxima a lo largo del proceso está con el mismo comportamiento de la señal de la tensión, Fig. 2(a) – 19 mm/s 100 A – o sea, oscilaciones de la tensión están reflejándose en el gráfico de distribución de temperatura en 3D. En realidad, estas figuras representan la 1<sup>a</sup> imagen de la tabla 2, que es el caso de discontinuidades.

En la Fig. 6(b) también se puede notar una influencia, entre el comportamiento de la tensión (Fig. 2b) y de la distribución de temperatura. Aunque este vínculo sea menos representativo que en el caso de la Fig. 6(a), se puede ver, sin dificultades, que esta influencia está presente en la forma de oscilación de temperatura interna en el rango de 200-250°C - este fenómeno demuestra cierta tendencia a las discontinuidades.

A partir de las imágenes infrarrojas fueron extraídos isotermales, con la intención de analizar la distribución de temperatura en los cordones de soldadura.

En la Fig. 7(a) se puede ver la evolución de la temperatura de la chapa medida experimentalmente con el auxilio de la termografía infrarroja, para velocidad y corriente medias (11 mm/s y 150 A en este trabajo). Los termogramas ponen a disposición informaciones sobre la temperatura en el área seleccionada y presentan las imágenes visuales de la distribución de las isotermales en la probeta.

Estas imágenes permiten analizar la distribución de temperaturas por toda la probeta, en cualquier área de interés, lo que se puede considerar una gran ventaja cuando se compara la termografía infrarroja con el uso de termopares.

La Fig. 7(a) permite un análisis detallado de los cambios de temperatura a lo largo del cordón de soldadura, incluyendo la zona térmicamente afectada (ZTA). El flujo de calor en la ZTA, que es función directa de la conductividad térmica y de los gradientes térmicos, debe ser mantenido dentro de determinados límites, para que se pueda controlar la microestructura resultante. Diferentes condiciones de enfriamiento ejercen diferentes influencias sobre las propiedades mecánicas y metalúrgicas y pueden provocar efectos perjudiciales, por este motivo es de gran importancia monitorear la temperatura y la tasa de enfriamiento de la ZTA, además de determinar la extensión de la ZTA en relación con la línea de centro del cordón de soldadura.

La Fig. 7(b) demuestra un área menor que en la Fig. 7(a), en la cual se pueden ver las variaciones térmicas de la mitad del cordón de soldadura. Al aumentar la distancia desde el centro del cordón, la temperatura bajó y está en el rango de 400-500°C. Cada punto de estas regiones presentará una variación diferente de temperatura debido al aporte de calor momentáneo. El conocimiento de la disipación del calor es importante para prever las tensiones y distorsiones residuales, que pueden causar una reducción de la resistencia mecánica.

La piletas de fusión están presentadas en la Fig. 7(c), donde están registradas todas las isotermales que demarcan la zona de metal fundido, la temperatura máxima registrada es de 1200°C. El calor afecta directamente las transformaciones metalúrgicas que ocurren en la zona de soldadura.

Para comparar la imagen del cordón hecho con velocidad media y corriente media (11 mm/s-150 A) (Fig. 7), sigue el mapeo de las isotermales para el cordón obtenido con los siguientes parámetros: velocidad baja y alta corriente – 6 mm/s-200 A (Fig. 8).

La Fig. 8 corresponde a los resultados de la distribución térmica referentes a los ensayos con los siguientes parámetros de soldadura: velocidad baja corriente alta, 6 mm/s y 200 A.

Un cambio en la geometría de la ZTA es lo que llama nuestra atención en la Fig. 8, lo que es consecuencia del aumento del aporte térmico.

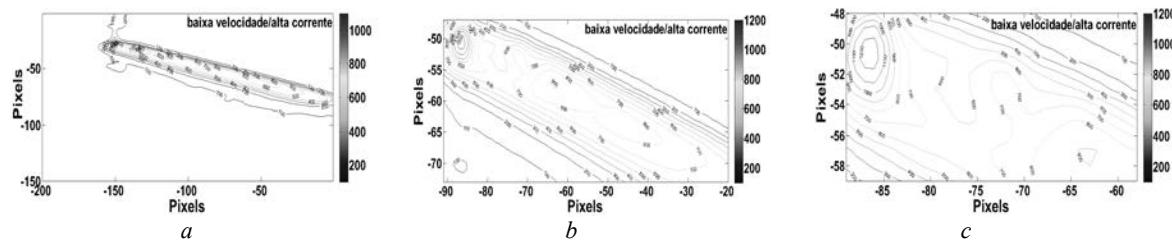


Fig. 8. Distribución de la temperatura a lo largo del cordón de soldadura, 6 mm/s-200 A: a) área total, b) área menor, c) área de poza.

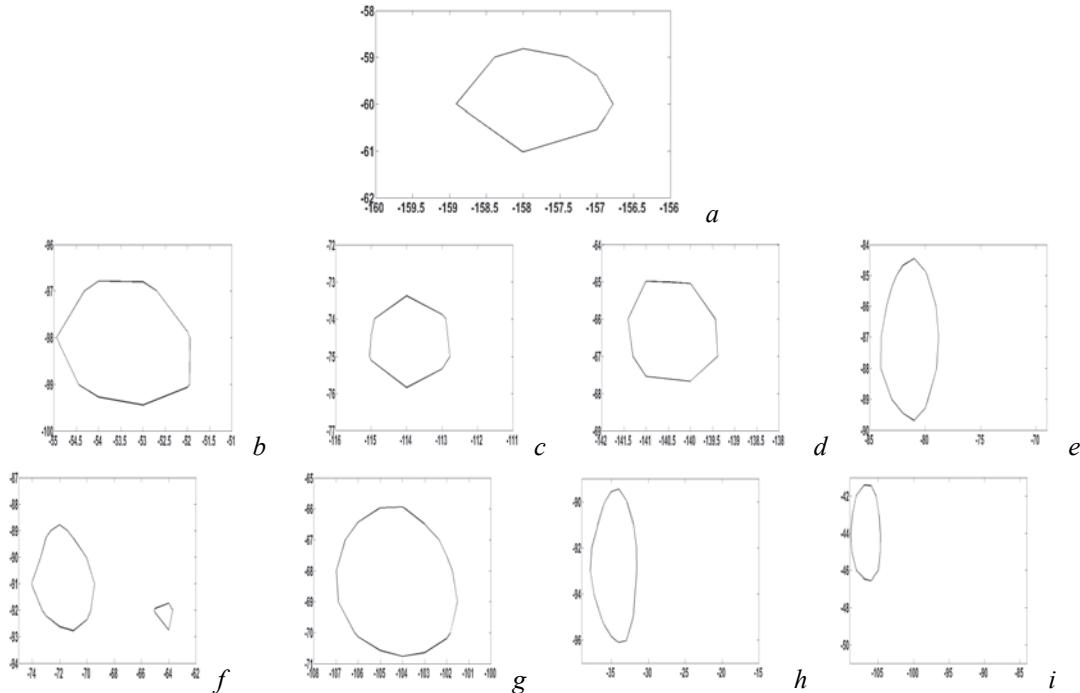


Fig. 9. Isothermas de 1000°C para los distintos cordones: a) 19 mm/s-100 A, b) 11 mm/s-100 A, c) 6 mm/s-100 A, d) 19 mm/s-150 A, e) 11 mm/s-150 A, f) 6 mm/s-150 A, g) 19 mm/s-200 A, h) 11 mm/s-200 A, i) 6 mm/s-200 A.

Comparando las Fig. 7(b) y 8(b) podemos observar las influencias del aporte de energía y de la velocidad, una menor velocidad de soldadura resultó en temperaturas más elevadas debido a un mayor aporte térmico durante el proceso. Si en la Fig. 7(b), la temperatura en el medio del cordón estaba entre 400-500°C, con una velocidad menor, el intervalo de temperatura en esta misma área aumentó para 500-800°C. Este cambio influencia los ciclos térmicos, consecuentemente, la estructura cristalina y propiedades finales del material.

La Fig. 8(c) permite un análisis detallado del área de piletas de fusión, la temperatura máxima registrada es de 1200°C. Conocer la distribución de calor en la chapa es esencial para prever efectos térmicos indeseados. Los resultados ilustrados revelan la habilidad de la cámara infrarroja en adquirir, no destrutivamente, y con alta precisión, datos a lo largo del ciclo de enfriamiento.

A partir de las imágenes obtenidas por medio de la cámara de infrarrojo para cada uno de los cordones fabricados y, después, con un pos-procesamiento, fueron extraídas las isoterma que demarcan la piletas de fusión. En la Fig. 9 son presentados los diferentes formatos de las isoterma de la poza de fusión para cada uno de los cordones hechos.

Para el análisis fueron escogidas las isoterma a 1100°C, que está cerca de la temperatura recomendada en la literatura [11].

Los perfiles de la piletas de fusión se transforman dependiendo de los parámetros de soldadura. La piletas producida con las siguientes condiciones de soldadura – velocidad baja/media, amperaje alto/medio –

presenta un formato elíptico con alargamiento en el eje vertical – Fig. 9(e, h, i). La piletta de fusión, formada con parámetros de soldadura – velocidad alta, amperaje alto/medio, mostrada en las Figs. 9(d, g), presenta un formato redondo. Un amperaje bajo, con velocidad alta/media, forman una piletta elíptica con alargamiento en el eje horizontal – Fig. 9(b, c)

En estos perfiles el frente de solidificación cambia constantemente en función del perfil elíptico de la superficie de la piletta de fusión, de los granos que no encontraron la dirección ideal de crecimiento, favoreciendo la formación de un mayor número de granos con menor tamaño, y del aspecto menos columnar, dando origen a una estructura más favorable a mayor calidad de la junta soldada.

La Fig. 9(a) muestra la piletta obtenida con los siguientes parámetros de soldadura – velocidad alta, amperaje bajo. Esta piletta presenta un formato de gota – una condición favorable para el surgimiento de las discontinuidades. La piletta en formato de gota es resultado de la influencia de la velocidad de enfriamiento mayor que la velocidad de solidificación.

La piletta de fusión, tipo gota, favorece la formación de los granos columnares, como consecuencia de que el frente de intercambio de calor permanece prácticamente inalterado, dando al frente de solidificación una orientación relativamente constante con relación a la dirección de la soldadura, lo que favorece el crecimiento desde la línea de fusión hasta el centro de la soldadura. Las gotas – Fig. 9(a) – tienen una tendencia de alargarse en el eje horizontal, y, en el momento en que el arco no ofrece el calor satisfactorio empiezan a desmembrarse dentro de la poza provocando discontinuidades.

Analizando la Fig. 2(a) podemos ver claramente que esta es la única imagen donde la línea de tensión varía entre 22V y 40V, continuando el análisis en la Fig. 6(a), que es una presentación en 3D de la distribución de la temperatura del mismo caso, se torna evidente el motivo por lo cual la línea de temperatura varía mucho. La tensión está ligada al arco de soldadura. Si la tensión sufre grandes variaciones, el arco se transforma, provocando cambios en el aporte térmico y en la distribución de la temperatura, lo que se puede observar en la imagen 3D.

Todas estas variaciones son el origen de las discontinuidades en la soldadura, como se puede observar en la primera imagen de la tabla 2; en la Fig. 2(a); Fig. 6(a) y Fig. 9(a) – isoterma 1100°C.

También debemos llamar la atención en el experimento que tiene los siguientes parámetros: velocidad media 11 mm/s y amperaje baja – 100 A. En este caso, la tensión presentó una variación en el rango de 5 V – Fig. 2(b). Este evento tuvo su reflejo en la variación de temperatura interna, lo que se puede ver en la Fig. 6(b) en 3D. Haciendo un análisis del conjunto de imágenes de este caso, concluimos que, al igual que cuando la soldadura no presenta 100% de discontinuidades, se demuestra una fuerte tendencia de llegar a esta condición. La cuarta imagen de la tabla 2, así como las Fig. 2(b); 6(b) y 9(b) – isoterma 1100°C en forma de gota – comprueban este hecho.

Ocurre el siguiente fenómeno en los casos de las isotermas en forma de gota: cuando la velocidad de solidificación no corresponde a velocidad de soldadura, surge un desfasaje entre el frente de solidificación y el frente de fusión. Esta última toma forma de una gota alargada, lo que genera limitación de calor en el final de la piletta, provocando el surgimiento de discontinuidades.

#### 4. CONCLUSIONES

Variaciones de velocidad de soldadura y de intensidad de corriente permitieron el análisis de los efectos de estos parámetros sobre la geometría del cordón de soldadura, auxiliando la comprensión de los fenómenos de solidificación.

Los principales factores en el desarrollo térmico son: distribución de temperatura durante la soldadura, tiempo de permanencia en esas temperaturas, velocidad de enfriamiento - todos estos datos se pueden obtener con la ayuda de la termografía infrarroja.

Cada matriz de velocidad e intensidad de corriente establece un área específica para cada soldadura. La termografía infrarroja ofrece un análisis de las características geométricas de las isotermas de la piletta de fusión, permitiendo la discretización de cada cordón.

El sistema de control y monitoriamente por medio de la termografía infrarroja facilita el análisis de las predisposiciones de la geometría de la piletta de fusión. Estos resultados experimentales abren caminos para estudios teóricos sobre los gradientes térmicos y sus efectos sobre la estructura de los materiales. La

distribución volumétrica de calor, que se mueve a lo largo de la chapa, puede ser estudiada a través del método de los elementos finitos aliados a la distribución superficial de temperaturas, que es dada por la termografía infrarroja.

Aunque la simulación numérica de los procesos de soldadura ha sido ampliamente utilizada en investigaciones para explicar la naturaleza física de eventos metalúrgicos, la termografía infrarroja ofrece un análisis térmico completo de toda la área definida para estudio, incluyendo el medio que la rodea, representando una ventaja incontestable.

La relevancia de este estudio y su contribución para el área de metalurgia adviene de la posibilidad de utilizar el análisis por infrarrojo para evaluar las evoluciones de la temperatura en la piletta de fusión durante su solidificación y enfriamiento.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud a CAPES.

## REFERENCIAS

- [1] Plotnikov, Y.A., Winfree, W.P., "Advanced Image Processing for Defect Visualization in Infrared Thermography", NASA Langley Research (2004)
- [2] Silva, R.N.T., Magnani, F.S., Lima, R.C.F., "Algumas Aplicações do Uso da Termografia na Detecção de Falhas", IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife – PE (2006)
- [3] de Souza, J.B., Sacomano, J.B., Papalardo, F., "A Funsão Manutensão em Usinas Siderúrgicas", *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **18**(2), 19-33 (2014)
- [4] Brito, J.N., "Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos", Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Tese (2002)
- [5] Ray, B.C., Hasan, S.T., Clegg, D.W., "Evaluation of Defects in FRP Composites by NDT Techniques", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **26**(12), 1187-1192 (2007)
- [6] Riegert, G., Pfleiderer, K., Gerhard, H., Solodov, I., Busse, G., Modern methods of NDT for inspection of aerospace structures, European Congress on Non-Destructive Testing (2006)
- [7] Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q., *Soldagem fundamentos e tecnologia*, 3<sup>a</sup> edição atualizada, Belo Horizonte: Editora UFMG (2009)
- [8] Al-Karaw, J., "Application of Infrared Thermography to the Analysis of Welding Processes", Magdeburg, Germany: Institute of Fluid Dynamic and Thermodynamics Otto-Von Guericke University (2004)
- [9] Clinton, A.M., Guerra, M. de S.L., "Análise da viabilidade técnica para utilização da termografia na detecção de defeito em solda cobre aço", *Science & Engineering Journal*, **23**(1), 57-64 (2014)
- [10] Palacios, A.M.G., "Uso de Técnicas de Termografia para Detecção de Descontinuidades no Processo GTAW através do Monitoramento da Poça de Fusão", Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Dissertação (2010)
- [11] Komanduri, R., "Thermal analysis of the arc welding process: Part II. Effect of variation of thermophysical properties with temperature", *Metallurgical and materials transactions B*, June, 483-500 (2001)

## EVALUATION OF THE WELD POOL GEOMETRY OBTAINED BY GMAW USING INFRARED THERMOGRAPHY

**Abstract** – The geometry of the weld pool was studied in order to acquire process knowledge and reinforce the effectiveness of infrared thermography method to evaluate the temperature distributions. Several tests were carried out and monitored by an infrared camera. On the other hand, infrared thermography has evolved as a non-invasive inspection technique for the surface temperature measurement of several types of materials. Therefore, the present work pursues to evaluate infrared thermography as a potential tool for heat treatment and welding studies, and better understand the metallurgical processes within the weld pool during the temperature evolutions.

**Keywords** – Infrared thermography, Welding, Weld discontinuities.

