

Un caso de estudio: optimización de la soldadura de tubería de acero inoxidable

A case to study: stainless steel pipe welding optimization

C. Hernández, T. Robert*, G. Salas, J. Ramírez y M. E. Noguez
Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química,
Universidad Nacional Autónoma de México,
04510, México, D. F.
Fax: 622-52-28; e-mail: robertn@servidor.unam.mx

Resumen

Durante la producción de tubería con costura de acero inoxidable ferrítico (AISI 409L) y austenítico (AISI 304) el paso crítico es la soldadura. En este trabajo se analizaron las condiciones de operación en esa etapa: aporte energético suministrado (voltaje y amperaje) y velocidad de formado. Se propusieron condiciones de operación que garantizaran la homogeneidad del producto terminado. Esto se realizó en los siguientes pasos: diagnóstico de las condiciones de operación (amperaje y voltaje de la soldadura y velocidad de formado del tubo), homogeneización de esos valores basándose en los resultados estadísticos del proceso, proposición de rangos de operación fundamentados en el aporte energético proporcionado, aumento de la velocidad de formado de la tubería y la determinación metalográfica del ángulo óptimo de afilado del electrodo en cada tubo necesario para disminuir el tamaño de la soldadura y de la zona afectada por el calor. Los resultados obtenidos son: el establecimiento de los rangos de operación y un incremento en la productividad de 24.6% promedio.

Palabras claves: Soldadura, acero inoxidable, tubo, tubería.

Abstract

Welding is the critical step in the ferritic (AISI 409L) and austenitic (AISI 304) stainless steel pipe production. In this work the operation conditions are analyzed at that stage: energy input (welding amperage and voltage) and pipe forming velocity. Operation conditions guaranteeing the homogeneity of the product were proposed. This was done in the following steps: homogenization of those values based on the process statistical data, proposition of operation ranges based on the energy input given, increment in the pipe forming speed and re-adjustment of the process conditions and metallographic determination of the optimal angle of the electrode sharpened for each pipe. The results obtained are: establishment of the production working ranges and an average productivity increment of 24.6%.

Key words: Welding, stainless steel, pipe, piping.

1 Introducción

El presente trabajo se desarrolló en una fábrica de tubos de acero inoxidable con costura que tenía una gran variación de propiedades en productos de un mismo tipo (clase de acero, diámetro y espesor del tubo) y un porcentaje elevado de rechazos por falla de la soldadura. El objetivo de este trabajo es estandarizar y controlar las características de la operación de formado de tubería de acero inoxidable de cada uno de los tipos producidos. En

este trabajo se presentan únicamente cinco tipos de tubería, tres de acero AISI 304 y dos de AISI 409L.

2 Antecedentes

Se produce tubería de acero inoxidable austenítico y ferrítico sobre pedido, por lo que la gama de productos es amplia.

La fabricación de tubería de acero inoxidable con costura se realiza por un doblez progresivo de la lámina hasta alcanzar un perfil anular y una unión mediante

soldadura de tungsteno con gas inerte, conocida generalmente como TIG (Tungsten Inert Gas) o como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), Fig. 1.

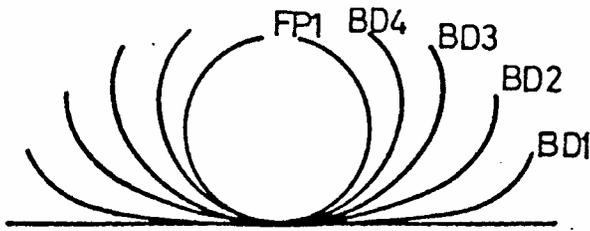


Fig. 1. Esquema del doblado sucesivo para formar una sección circular. BD significa dado de doblado y FP1 paso donde el fleje toma la forma de tubo, posteriormente se suelda.

2.1 Aporte energético

Un aspecto fundamental en la soldadura es el aporte térmico, que es la cantidad de energía que introduce una fuente calórica (un arco) por unidad de longitud de soldadura, expresada en joules por metro o milímetro. Se define como la relación de la potencia total de entrada de la fuente térmica, en wats, con su velocidad de desplazamiento (Connor, 1991). Considerando que la fuente de calor es un arco, entonces

$$Q = \frac{P}{V} = \frac{EI}{V} \quad (1)$$

donde:

Q = Aporte térmico, joules por mm,

P = Potencia de la fuente de calor de entrada total, wats,

V = Velocidad de desplazamiento de la fuente de calor, mm/s,

E = Voltaje, volts,

I = Intensidad de corriente, amperes.

En la Ec. (1) se observa que el aporte térmico es inversamente proporcional a la velocidad de soldado y directamente proporcional a la intensidad de corriente y al voltaje aplicado.

Si se desea una determinación precisa del efecto del arco sobre el material a soldar, entonces se deberá usar el aporte térmico neto:

$$Q_{\text{NETO}} = f Q = \frac{f P}{v} = \frac{f EI}{v} \quad (2)$$

donde f es la eficiencia de la transferencia de calor (el calor real transferido a la pieza de trabajo dividida por el calor total generado por la fuente calórica (Connor, 1991). Debido a la eficiencia del sistema utilizado en este trabajo,

soldadura GTAW automatizada, (Connor, 1991) se determinó un valor de $f = 0.6$.

2.2 Metalurgia de aceros inoxidable austeníticos (AISI 304)

Son aceros con estructura austenítica y no magnéticos que no se pueden endurecer para formar martensita por temple. Siempre son austeníticos a temperatura ambiente.

Los aceros austeníticos son más fáciles de soldar que los ferríticos. En los aceros austeníticos el crecimiento de grano no es un gran problema (Lula, 1989).

El mayor problema de los aceros austeníticos es la sensibilización, que es mucho más común que en los ferríticos. La sensibilización consiste en la precipitación de carburos, del tipo $M_{23}C_6$, que ocasiona zonas pobres en Cr produciendo, principalmente, una disminución en su capacidad de inoxidable, que origina la corrosión intercrystalina. (Inchaurza, 1981). La sensibilización se puede producir por calentamiento prolongado o enfriamiento lento a través del rango crítico de temperatura: 425 – 815°C. La temperatura más crítica es alrededor de 650°C donde la permanencia por unos pocos segundos es suficiente para sensibilizar. (Lula, 1989).

La tubería de uso industrial (austenítica) se somete a un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos y de disolución de los carburos que se han precipitado en los límites de grano del material debido al proceso de soldadura.

Para eliminar estos carburos precipitados se introduce la tubería en un horno que está en un rango de temperatura de 1000-1050°C y posteriormente se enfría bruscamente en agua, manteniendo así disueltos a los carburos en la fase austenítica.

La tubería se distorsiona debido al tratamiento térmico al que ha sido sometido, por lo que es necesario enderezarlo por medios mecánicos. También debido al tratamiento térmico se forma una película de óxido sobre la tubería que debe ser removida. La remoción se da por inmersión del material en una solución de ácido nítrico y ácido fluorhídrico con una composición y temperatura específica, que le confiere un aspecto estético.

2.3 Metalurgia de aceros inoxidable ferríticos. (AISI 409L)

Son aceros con estructura ferrítica a cualquier temperatura y no presentan transformación martensítica por lo que no pueden endurecerse por tratamiento térmico. Prácticamente sólo pueden endurecerse por deformación en frío. Contienen un porcentaje de Cr entre 11.5 y 30% como principal elemento de aleación y un contenido de carbono controlado en los más bajos niveles posibles. (Inchaurza, 1981).

Tienen bajo coeficiente de endurecimiento por deformación, lo cual hace que tengan buena ductilidad y

que puedan ser formados mecánicamente en geometrías muy complejas, (Inchaurza 1981). Los aceros inoxidables ferríticos se usan casi exclusivamente en la condición de recocido (Lula, 1989).

Uno de los graves problemas que presentan los aceros inoxidables ferríticos es la tendencia al crecimiento de grano al ser sometidos a un calentamiento de recristalización. Este problema se presenta comúnmente en la zona afectada por calor en materiales que han sido sometidos a operaciones de soldadura. Por lo general, estos aceros son difíciles de soldar (Inchaurza 1981).

La sensibilización en los aceros ferríticos se puede eliminar calentándolos alrededor de 750 °C durante aproximadamente una hora y después enfriándolos al aire. (Lula, 1989).

La temperatura de transición es la ambiente o ligeramente superior. En este tipo de aceros se presenta una fragilización muy especial, conocida como fragilidad de 475°C o fragilidad azul, en el rango de temperaturas entre los 400 – 565 °C, haciéndose mas severa con mayor contenido de cromo (Lula, 1989), (Dieter, 1976), (Verhoeven, 1987). En algunos casos se puede formar la frágil fase sigma (Inchaurza, 1981).

3 Metodología de análisis

La metodología utilizada para optimizar el proceso de soldadura es la siguiente:

3.1 Diagnóstico de las condiciones de operación.

3.2 Homogeneización preliminar de los parámetros operativos para cada caso específico (tipo de acero y de tubería).

3.3 Validación en la línea de proceso.

3.4 Incremento de la velocidad de formado y ajuste de los parámetros operativos (aporte energético y velocidad de operación).

3.5 Afilado de electrodo y reajuste de los parámetros operativos.

3.1 Diagnóstico de las condiciones de operación

En esta primera etapa se encontró que, para un mismo tipo de tubo (tipo de acero y dimensiones), cada operador utilizaba diferentes condiciones de voltaje, amperaje y velocidad de formado, dando por resultado una gran heterogeneidad en las propiedades del producto. Consultando la bitácora de operación de la empresa se comprobó que esta situación imperaba comúnmente.

3.2. Homogeneización de los parámetros operativos para cada caso específico (Tipo de acero y de tubería)

Para la determinación de los parámetros operativos se tomó en consideración lo siguiente:

La velocidad de formado del tubo permanece constante, para simplificar la experimentación.

Las variaciones en el espesor del material son del orden de milésimas de pulgadas y no afectan sensiblemente las condiciones de operación, por lo que se puede considerar, con confiabilidad, que el espesor es constante.

De acuerdo a las recomendaciones de la American Welding Society (AWS), la separación entre el metal base y el electrodo no debe ser mayor a 1 cm en uniones soldadas a tope. El voltaje está ligado proporcionalmente a esta distancia por lo que, se propuso que esta variación no podría ser mayor a 1.5 V.

Para partir de una base real, de la bitácora de operación de la planta se seleccionaron los valores de amperaje y voltaje que hubieran resultado en tubería con las mejores propiedades mecánicas, para cada tipo de tubo y de acero. Con esos valores se calculó el aporte térmico proporcionado en cada caso.

Conjuntando las consideraciones mencionadas (voltaje y velocidad de formado constante) y el aporte térmico óptimo, se calcula un nuevo valor de amperaje, en cada caso. Estos datos originaron tablas de parámetros de operación que debían probarse en la línea de producción. Ver tablas 1 y 1A.

3.3 Validación de los parámetros de operación propuestos

Debido a que se trata de un proceso continuo de soldadura longitudinal, el tiempo para las pruebas era limitado. La experimentación con los nuevos parámetros se realizaba, preferentemente, 2.5 m antes de la unión de punta y cola de la bobina o se experimentaba con los nuevos parámetros en pequeños tramos de tubería (aproximadamente 6 m). Una vez que el tramo experimental era unido, se retiraba del molino y se procedía a su análisis.

El análisis metalográfico se realizó tomando muestras dos veces por cada turno de trabajo, mientras que el muestreo para las pruebas mecánicas se hizo cada tres tubos fabricados.

Las pruebas a las que se somete la tubería para determinar características y detectar posibles fallas en la soldadura (grietas, porosidades y fracturas) son:

Mecánicas. En la mayoría de los casos el material se lleva hasta la fractura o hasta el límite en capacidad de la máquina. La detección de fallas se hace visualmente. Las pruebas que se realizan, de acuerdo a la norma ASTM A-450-76a, son:

- a) Expansión. Consiste en tomar un segmento de tubo, aproximadamente 30 cm y expandirlo hasta un 25%, aproximadamente.
- b) Abocinado. Se deforma el tubo por medio de una prensa hidráulica sobre un cono metálico, lográndose una deformación mayor que en la expansión.

c) Aplastamiento. Se aplasta el tubo por medio de una prensa hidráulica.

Metalográficas. Las observaciones recomendadas por Connor, 1991, son:

- a) Macrográfico. Se selecciona un segmento de la zona de la soldadura y se le da un decapado rápido que permite observar el tamaño del cordón y la penetración de la soldadura.
- b) Micrográfico. Se toman como muestras pequeños tramos del tubo, de aproximadamente 5 cm de longitud, de la zona de interés y se preparan para su observación en el microscopio óptico. Para los aceros inoxidable ferríticos se utilizó el reactivo de ataque Vilella, mientras que para los austeníticos ácido oxálico (electrolítico) y agua regia (inmersión). Se determina la zona afectada por el calor, el tamaño de grano, el tamaño del cordón de soldadura y la existencia de defectos como falta de penetración, microfracturas y corrosión intercrystalina.

Si la tubería formada con los nuevos parámetros superaba las pruebas de control de calidad de la norma bajo la cual se estaba fabricando, se montaban los parámetros en línea, teniendo el operador que respetar el rango suministrado para su fabricación.

3.4 Incremento de la velocidad de formado y ajuste de los parámetros operativos.

El aumento en la velocidad de formado es un punto crucial para la compañía ya que permite aumentar la productividad y la eficiencia de la línea; a mayor velocidad mayor producción de tubería.

De acuerdo a la Ec. 1, si se produce un aumento en la velocidad de formado disminuye el valor del aporte térmico, lo que indica que si existe un aumento en la velocidad, es necesario aplicar una mayor cantidad de energía para mantener el nivel del aporte térmico que permita mantener las características deseadas en la soldadura.

Las tablas de los parámetros óptimos de operación, en función del aporte térmico, permiten mantener bajo control las características del proceso, lo que da oportunidad de realizar modificaciones en la velocidad de formado de tubería.

Con la ayuda de la Ec. 3 es posible obtener el valor de aporte térmico modificado con respecto al aumento de velocidad.

$$Q_m = \frac{(V_f Q_0)}{V_0} \quad (3)$$

donde

Q_m .- Aporte térmico modificado

Q_0 .- Aporte térmico original.

V_f .- Velocidad final de soldado

V_0 .- Velocidad inicial de soldado

El aumento en el aporte térmico debe ser proporcional a la velocidad de formado, es decir, si la velocidad es aumentada en un 50% es necesario aumentar el aporte térmico en esta proporción.

El aumento al aporte térmico, de acuerdo a las consideraciones hechas, solamente puede ser realizado aumentando el valor de la intensidad de corriente. El valor del voltaje permanece constante porque la separación entre el electrodo y el metal base no se modifica.

Se calcula la intensidad de corriente de la misma forma que en el inciso 3.2, basándose en el aporte térmico modificado a la nueva velocidad de formado.

3.5 Afilado de electrodo y ajuste de los parámetros operativos.

La quinta etapa de esta experimentación consiste en tratar de aumentar la penetración y reducir la zona afectada por calor así como el ancho del cordón de soldadura, ya que mientras menores sean ambos se tendrán mejores propiedades metal-mecánicas. Para esto, se siguen las recomendaciones hechas por la AWS con respecto al ángulo que es necesario dar a la punta del electrodo, entre 30° y 60°. El diámetro del electrodo usado es 1/8".

El aumento en la penetración se da bajo las mismas condiciones de operación, es decir, sin aumentar los niveles de consumo de energía; en algunos casos hasta puede disminuir. Esto se considera benéfico ya que, además de reducir los niveles de esfuerzos producidos por la operación de soldado, involucra una reducción conjunta de la zona afectada por calor y del tamaño del cordón de soldadura.

El afilado del electrodo se da por esmerilado manual, debe realizarse de manera tal que las rayaduras ocasionadas vayan en la misma dirección que el flujo de los electrones para no provocar interferencias en el mismo. Debido a que los electrodos son muy frágiles, esta operación debe ser realizada con gran cuidado para evitar que se fracturen o queden rebabas en la punta que puedan dar lugar a contaminación en el metal fundido, originando concentradores de esfuerzos que puedan producir fallas por agrietamiento en el cordón de soldadura.

4 Resultados y discusión

En la etapa de diagnóstico se detectó que las diferencias, en promedio, eran de 60 a 75 amperes y de 5 a 7 V, lo que originaba divergencias en el aporte térmico de 3 a 5 kJ/mm.

Para la 2ª fase de la experimentación, inciso 3.2, se propusieron rangos de operación basados en el aporte

térmico.

Al principio, se crearon rangos donde las variaciones en la intensidad de corriente no fueron superiores a 10 Amperes y las variaciones permitidas en el aporte térmico de 0.1 kJ/mm, esto se puede apreciar en el ejemplo de un rango de operación mostrado en la tabla 1:

Tabla 1. Parámetros de operación para el tubo de 1" Ø, Calibre 18, Acero 304. Norma de fabricación ASTM A-269

A Térmico (kJ/mm)	Intensidad A	Tensión V	Velocidad mm/min
1.64	183.05	13	880
1.63	183.90	13	880
1.62	182.77	13	880
1.61	181.64	13	880
1.59	180.51	13	880
1.58	179.38	13	880

Con un rango de operación tan pequeño no es posible corregir fallas en la calidad de la soldadura por lo que no es aceptable.

Se decidió dar un margen de 50 amperes y la máxima variación aceptada en el aporte térmico de 0.5 kJ/mm, esto permite hacer frente a los problemas comunes de operación como son: pérdida de penetración, intermitencias, falla en pruebas mecánicas etc. Una vez validada esta sugerencia con un producto (inciso 3.3), se determinó que éste sería el criterio para crear los rangos de operación finales. Las tablas 1A - 5A muestran los rangos validados:

Tabla 1A. Parámetros de operación para el tubo de 1" Ø, Calibre 14, Acero 304. Norma de fabricación: ASTM A-554.

A Térmico KJ/mm	Intensidad A	Tensión V	Velocidad. mm/min
1.80	165.35	12.7	700
1.87	170.44	12.8	700
1.94	175.45	12.9	700
2.01	180.38	13.0	700
2.08	185.24	13.1	700
2.15	190.03	13.2	700
2.22	194.74	13.3	700

Tabla 2A. Parámetros de operación para el tubo de 1 5/8" Ø, Calibre 16, Acero 304. Norma de fabricación: ASTM A-554.

A Térmico kJ/mm	Intensidad A	Tensión V	Velocidad mm/min
1.53	160.85	13.0	820
1.60	166.92	13.1	820
1.67	172.90	13.2	820
1.74	178.80	13.3	820
1.81	184.60	13.4	820

1.89	191.33	13.5	820
1.96	196.96	13.6	820

Tabla 3A. Parámetros de operación para el tubo de 4 1/2" Ø, Calibre 16, Acero 304. Norma de fabricación ASTM A-554

A Térmico kJ/mm	Intensidad A	Tensión V	Velocidad mm/min
1.51	125.83	10.0	500
1.58	130.36	10.1	500
1.65	134.80	10.2	500
1.72	139.16	10.3	500
1.79	143.43	10.4	500
1.86	147.62	10.5	500
1.93	151.73	10.6	500

Tabla 4A. Parámetros de operación para el tubo de 1 1/2" Ø, Calibre 19, Acero 409L, Norma de fabricación: Ingria 003-90.

A Térmico KJ/mm	Intensidad A	Tensión V	Velocidad. mm/min
0.72	100.93	10.7	900
0.79	109.72	10.8	900
0.86	118.35	10.9	900
0.93	126.82	11.0	900
1.00	135.14	11.1	900
10.7	143.30	11.2	900
1.14	151.33	11.3	900

Tabla 5A. Parámetros de operación para el tubo de 1 1/2" Ø, Calibre 14, Acero 409L, Norma de fabricación: Ingria 003-90.

A Térmico KJ/mm	Intensidad A	Tensión V	Velocidad. mm/min
2.01	189.11	12.4	700
2.08	194.13	12.5	700
2.15	199.07	12.6	700
2.22	203.94	12.7	700
2.29	208.72	12.8	700
2.36	213.44	12.9	700
2.43	218.08	13.0	700

En los rangos mostrados anteriormente la variación en la intensidad de corriente en el proceso no es mayor a 40 Amperes, en la tensión es menor a 1.0 Volts, mientras que en el aporte térmico es menor 0.5 kJ/mm. Cada uno de estos rangos se considera como operativo dentro de línea. Con la aceptación de estos parámetros es factible controlar las características de soldadura y favorecer la repetitividad del proceso, lo que nos permite obtener productos de calidad homogénea.

En la cuarta fase, (inciso 3.4) se incrementó la velocidad y se modificaron los rangos de operación

previos. La implantación de estos parámetros en línea siguió la misma metodología que en la etapa anterior, tablas 1B – 5B de los parámetros de operación modificados:

Tabla 1B. Parámetros de operación para el tubo de 1" Ø, Calibre 14, Acero 304. Norma de fabricación: ASTM A-554

A. Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Velocidad (mm/min)
2.36	258.39	13.7	900
2.43	264.13	13.8	900
2.5	269.78	13.9	900
2.57	275.36	14.0	900
2.64	280.85	14.1	900
2.71	286.27	14.2	900
2.78	291.61	14.3	900

Tabla 2B. Parámetros de operación para el tubo de 1 5/8" Ø, Calibre 16, Acero 304. Norma de fabricación: ASTM A-554

A Térmico (kJ/mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Velocidad mm/min
1.86	218.56	13.9	980
1.93	225.17	14.08	980
2.00	231.68	14.1	980
2.07	238.10	14.2	980
2.14	244.43	14.1	980
2.21	250.67	14.3	980
2.28	256.83	14.4	980

Tabla 3B. Parámetros de operación para el tubo de 4 1/2" Ø, Calibre 16, Acero 304. Norma de fabricación ASTM A-554

A térmico kJ/mm	Intensidad A	Tensión V	Velocidad mm/min
2.10	156.72	13.4	600
2.17	160.74	13.5	600
2.24	164.71	13.6	600
2.31	166.61	13.7	600
2.38	172.46	13.8	600
2.45	176.26	13.9	600
2.52	180.00	14.0	600

Tabla 4B. Parámetros de operación para el tubo de 1 1/2" Ø, Calibre 19, Acero 409L. Norma de fabricación: Ingria 003-90.

A Térmico KJ/mm	Intensidad A	Tensión V	Velocidad. mm/min
1.05	183.19	11.5	1200
1.12	193.68	11.6	1200
1.19	203.99	11.7	1200
1.26	214.12	11.8	1200
1.33	224.09	11.9	1200

1.40	233.89	12.0	1200
1.47	243.53	12.1	1200

Tabla 5B. Parámetros de operación para el tubo de: 1 1/2" Ø, Calibre 14, Acero 409L, Norma de fabricación: Ingria 003-90.

A Térmico KJ/mm	Intensidad A	Tensión V	Velocidad. Mm/min
2.44	259.98	13.3	850
2.51	265.44	13.4	850
2.58	270.82	13.5	850
2.65	276.12	13.6	850
2.72	281.34	13.7	850
2.79	286.49	13.8	850
2.86	291.56	13.8	850

Debido al aumento de la velocidad de formado, el incremento en productividad del producto 1 fue el 28.6%, del 2 fue el 19.5%, del 3 fue el 20.0%, del 4 fue el 33.3%, y del 5 el 21.4, dando un incremento promedio de 24.6%

En la quinta fase de la experimentación (inciso 3.5), como el rango del ángulo del electrodo propuesto por la AWS es muy grande (30 a 60°) se realizaron pruebas con diferentes ángulos, lográndose determinar que el óptimo para la operación es de 42°.

El afilado es manual por lo que se aceptó un rango de 40 a 45°. Con este ángulo se favorece la penetración debido a que el calor generado se concentra en una zona de menor tamaño, ocasionando que la zona de soldadura disminuya y, por tanto, la Zona Afectada por Calor (ZAC) asociada a ella, también.

Durante el análisis metalográfico se observan estas reducciones, además de la forma característica de la soldadura GTAW, conocida como copa de vino, Fig. 2. En la Fig. 3, se ve deformada esta copa de vino; es decir la zona superior disminuye, lo que nos indica que el calor suministrado está siendo concentrado en un área menor lo que provoca que la penetración se vea favorecida.

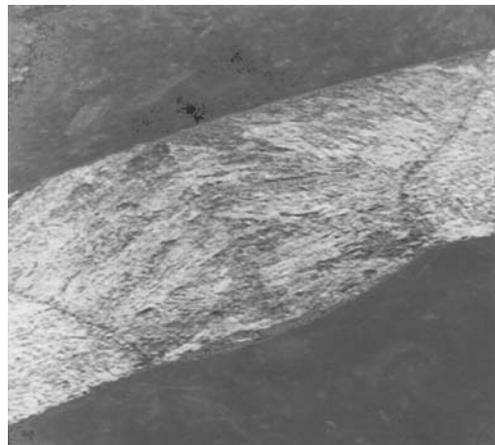


Fig. 2. Forma típica de copa de vino de la soldadura GTAW, mostrando cordón de soldadura ancho.

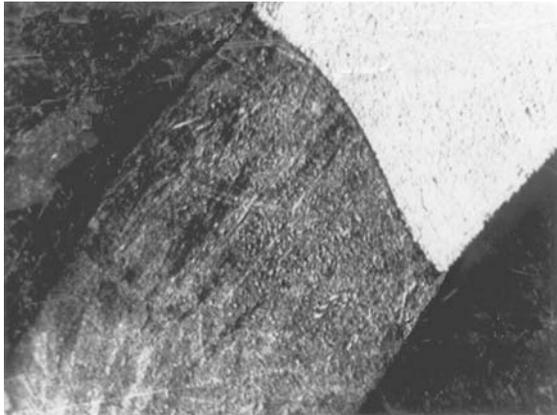


Fig. 3. Disminución de la zona de copa de vino de la soldadura.

Los tamaños de la zona soldada y de la ZAC disminuyeron. En la Tabla 6 se muestran algunos de estos datos.

Tabla 6. Ejemplos de disminución de la ZAC y el cordón de soldadura con el electrodo afilado.

Muestra	Tipo de Acero	ZAC (mm)	Cordón (mm)	Cordón + ZAC (mm)
1	304	1.20	4.50	5.71
2	304	0.53	3.85	4.12

La disminución promedio de la zona en la parte ancha de la copa característica de la soldadura GTAW es de 2.2 veces (220%).

5 Conclusiones

El concepto de aporte térmico permite crear rangos de

operación confiables.

Se homogeneizaron las condiciones de operación del proceso para cada producto, garantizando así la calidad repetitiva de la tubería.

El ángulo óptimo de afilado del electrodo es 42°, esta operación es crítica y se requiere mucha precisión y cuidado al efectuarla.

Se incrementó la productividad 24.6 % en promedio, debido al aumento de velocidad de formado.

6 Referencias

- Connor L.P, (1991), *Welding Handbook*, Vol. 1, Welding Technology, American Welding Society, 33, 35, 274, 513, 515-516.
- Dieter G, (1976), *Mechanical Metallurgy*, 2ª Ed, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. México, 210.
- Hernández CA, (1999), *Análisis del proceso de formado de tubería de acero inoxidable con costura*, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Inchaurza A, (1981), *Aceros Inoxidables y aceros resistentes al calor*, Editorial Limusa, México, 41, 75, 77.
- Lula RA, (1989), *Stainless Steel*, American Society for Metals, USA, 52, 55, 57, 60-63.
- Norma A-249, *Specifications for Welded Austenitic Stainless Steel Boiler, Superheater, Heat Exchanger and Condenser Tubes*.
- Norma ASTM A-269, *Specifications for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel tubing for General Service*.
- Norma A-312, *Specifications for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel Bars*.
- Norma ASTM-A-554, *Specifications for Welded Stainless Steel Mechanical Tubing*.
- Norma: Ingria 003-90.
- Verhoeven J, (1987), *Fundamentos de Metalurgia Física*, Editorial Limusa, México, 564.