



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

# Análisis y estudio de los parámetros de la soldadura GTAW para un modelo matemático

M.C. y T. Homero Roldán Rubio es estudiante de doctorado en CIATEQ. A.C., Santiago de Querétaro, Querétaro. [homerorr@gmail.com](mailto:homerorr@gmail.com).

Dr. Guillermo Ernesto Frades Castedo es Coordinador Académico de los posgrados de CIATEQ A.C., Santiago de Querétaro [gfrades@ciateq.mx](mailto:gfrades@ciateq.mx).

### Resumen

La soldadura se encuentra presente en cada proceso o aplicación industrial. Para un verdadero entendimiento de esta tecnología se necesitan dos cosas, primero la comprensión de las variables y como estas interactúan, segundo cuáles de estos factores estarán presentes en la calidad del producto. Una aproximación adecuada a un modelo matemático, asegurará que se tenga una mejor calidad en la información que se proporciona y es donde se pueden despreciar variables que no afectan al modelo de manera significativa e incrementan la dificultad de solución. Una de las partes que afectan en mayor medida la soldadura es la Zona afectada por el calor, donde se llevan a cabo reacciones fisicoquímicas llamadas cambios de fase. En este trabajo se proponen una serie de variables que la afectan.

### Abstract

The welding is everywhere and is applied in almost every industry or process. But for a real understanding of a technology you need two things, the first one is basic, recognize the variables of importance in the process and the interaction between them, and the second one which factors would affect the quality of the final process highly. A correct approach to a mathematical model will help to ensure the quality of a model, where we can dispense variables that do not affect the process or create noise this allows us to discern the path that will be taken for study. One of the more relevant issues in the welding is the Heat Affected Zone where a group of physicochemical reactions called changes of phase take place, we propose a number of variables that affect this zone.

Palabras clave—Soldadura, Parámetros, GTAW, TIG, Modelado.

### **Introducción**

La soldadura es la técnica utilizada para la unión de piezas metálicas u otros materiales entre los que figuran los plásticos, por lo general a través de la aplicación de calor. Esta técnica fue descubierta mediante un estudio de cómo manipular el hierro así como otros metales en formas útiles [1, 2]. Otra forma de entender la soldadura es como un proceso en el que los materiales del mismo tipo o clase fundamental, como lo son los metales, se reúnen, para unirse y convertirse en uno, a través de la formación de enlaces químicos primarios, ocasionalmente secundarios bajo la acción combinada de calor y presión [3, 4, 5].



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Los procesos modernos de soldadura por fusión son una consecuencia de la necesidad de obtener una unión continua de placas de acero u otros materiales. El remachado ha demostrado tener desventajas en la unión de ciertas geometrías, especialmente para recipientes cerrados tales como calderas y objetos sometidos a altas presiones [1].

Este trabajo se enfocará en la soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) que es una soldadura por arco eléctrico por medio de un electrodo no consumible, con protección por medio de gas inerte, que usualmente es una combinación de gases que incluye argón o helio. Como una ventaja a considerar en esta soldadura, es que permite o no el uso de material de aporte, de igual forma, permite la soldadura de materiales heterogéneos. Esta soldadura tiene otros nombres con los que se conoce como son TIG (Tungsten Inert Gas) y WIG (Wolfram Inert Gas) usado en Europa. Cuando el material de aporte es utilizado, se añade a la piscina de soldadura desde una varilla o alambre, que es derretido por medio del calor generado dentro del arco eléctrico, en lugar de ser transferido por medio del electrodo consumible que funge como material de aporte en una gran variedad de procesos de soldadura por arco tal como lo es la GMAW. El tungsteno resulta ser un buen material para el electrodo dado su alto punto de fusión que es de 3,410 °C [5].

### **Metodología**

#### Material

Los aceros inoxidable son aleaciones base hierro químicamente complejas pero se podrían definir de una manera sencilla como una aleación metálica cuya composición química contiene un mínimo de entre un 10.5% a un 12% de cromo [6], además de otros elementos como lo son el manganeso, molibdeno, silicio, níquel, entre otros dependiendo de su clasificación.



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

El gran número de elementos de aleación presentes en estos aceros hace posible una amplia gama de posibles fases o estructuras cristalinas básicas [6]. La gran cantidad de los elementos dentro de la aleación hace que exista una desviación en el comportamiento con respecto a las que tienen una mayor cantidad de hierro puro; en consecuencia, los cálculos que podrían predecir las posibles fases son más complejos.

Para fines de la experimentación se utilizará un acero inoxidable 201 con las especificaciones internacionales UNS20100 / EN1.4372 / JIS SUS 201 que es un acero que se puede encontrar para grosores que van desde los 0.25 a 4.75 mm y ancho de hasta 1.219 metros, con una composición dada en la tabla 1. Un acero austenítico se puede soldar tanto por fusión como por resistencia, tomándose condiciones especiales para evitar resquebrajo por calor, asegurando que se deposite ferrita en el cordón de soldadura.

Tabla 1. Composición del Acero 201.

Compuesto	% en Peso
Carbono	0.15 máximo
Manganeso	5.5 a 7.5
Fosforo	0.060 máximo
Azufre	0.030 máximo
Silicio	1.00 máximo
Cromo	16.00 a18.00
Níquel	3.50 a 5.50
Nitrógeno	0.25 máximo

La mayoría de los aceros inoxidables utilizados en el mercado son austeníticos, tal es el caso del 201 [6-8]. La serie 200 contiene manganeso y nitrógeno para substituir una parte del níquel presente en la aleación. Estos aceros son llamados



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

de esta forma por la estructura FCC que se presenta a temperatura ambiente, que es la llamada austenita. Algunas de las propiedades presentes en este tipo de aceros inoxidable son:

- 1) *No son magnéticos.*
- 2) *Presentan mejor resistencia a la corrosión en general.*
- 3) *No se le pueden aplicar tratamientos térmicos.*
- 4) *Solo se pueden endurecer por trabajo en frío.*
- 5) *Presentan buena ductilidad y resistencia tanto en bajas como en altas temperaturas, el níquel posee buenas propiedades criogénicas.*
- 6) *Presentan baja resistencia a:*
  - *Estrés y corrosión debido al agrietamiento.*
  - *Corrosión por picaduras.*
  - *Corrosión de hendidura.*

### *Variables de experimentación.*

La experimentación con un equipo de soldadura GTAW y un robot. La soldadura a tope 1G en placas de acero inoxidable, sin preparación o material de aporte. Con las variables de entrada que se presentan a continuación.

Tipo de corriente. El tipo de corriente controla la penetración de la soldadura, el efecto que esta ejerce en la soldadura no es directamente proporcional, sino que tiene un comportamiento exponencial [9]. Los dos tipos de corriente o polaridades pueden ser utilizados en la soldadura GTAW. Cada tipo corriente tiene



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

características individuales que hacen que sea más deseable para las condiciones específicas o con ciertos tipos de metales.

La principal diferencia entre las corrientes es por la forma en la que está dada la distribución del calor y la presencia o grado de limpieza del arco [10], las cuales se pueden catalogar de dos formas: directa y alterna.

La corriente directa se puede presentar en dos formas: Corriente directa de polaridad invertida (CDEP o DCSP) y Corriente directa de polaridad normal (CDEN o DCEN). Cuando se trabaja con corriente directa polaridad invertida (CDEP) la circulación de electrones se produce desde la pieza hacia el electrodo, originando un fuerte calentamiento en este último. Este intenso calor generado en el electrodo tiende a fundir el extremo del mismo, produciendo la contaminación del cordón y de esa forma disminuyen la vida útil del electrodo. Esta polaridad también afecta la forma del cordón, así con esta polaridad se logra obtener cordones anchos y de poca penetración. Por estas razones la CDEP generalmente no se utiliza en los procedimientos GTAW, este tipo de corriente presenta  $2/3$  de calor en el electrodo de tungsteno y  $1/3$  en el material base. La corriente directa de polaridad normal (CDEN) permite obtener mejores resultados por el tipo de penetración que presenta, por lo que se emplea en la soldadura GTAW de la mayoría de los metales y aleaciones, tales como aceros al carbono y de baja aleación, inoxidable, aleaciones de níquel, cobre y sus aleaciones, entre otros. Puesto que la mayor concentración de calor se consigue en la pieza, el proceso de soldeo se realiza más rápido, hay menor deformación del metal base y el baño de fusión es mucho más estrecho y profundo que cuando se suelda con polaridad invertida. Además como la mayor parte del calor se genera en el baño de fusión, pueden utilizarse electrodos de menor diámetro. Debe señalarse que en este tipo de

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

corriente se tiene que un tercio del calor se encuentra en el electrodo de tungsteno y el restante en el material base.

La corriente alterna concentra la mitad del calor en la pieza de trabajo y la otra mitad en el electrodo de tungsteno. La corriente alterna proporciona una limpieza catódica (sputtering o chisporroteo), que elimina los óxidos refractarios de las superficies del material base cuando la onda de corriente alterna presente en el electrodo es positivo con respecto a la pieza de trabajo. La corriente alterna es una combinación de la corriente directa de polaridad invertida y la corriente directa de polaridad normal, ya que durante medio ciclo se comporta como una y en siguiente mitad del ciclo como la otra. Cuando la corriente toma el valor cero, cada medio ciclo, en ese momento el arco se apaga momentáneamente y debe ser nuevamente encendido en el siguiente medio ciclo de la onda de corriente. El funcionamiento del arco de corriente alterna trae como resultado una rectificación de media onda en la corriente, provocando ciertos problemas de estabilidad del arco y calidad de la soldadura.

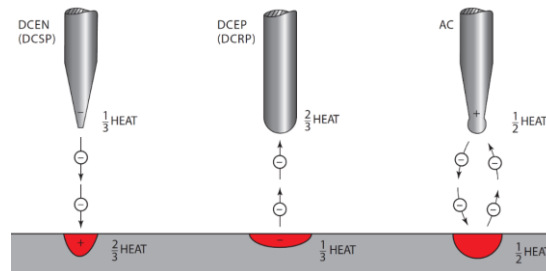


Figura 1. Tipos de corriente y la distribución del calor entre el electrodo y la placa.

Amperaje. La selección del amperaje es una parte crítica para soldar y puede ser predicho basándose en el tamaño del electrodo y la composición del metal para soldar, entre otros factores. El amperaje permite penetrar el metal base y está





## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

dado en términos de tres factores de manera principal: El diámetro del electrodo, el tipo de corriente y el material a ser soldado.

Frecuencia. La frecuencia es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. Según el Sistema Internacional (SI), la frecuencia se mide en hercios (Hz), en México los ciclos de corriente eléctrica es a razón de 60 veces por segundo, o 60 Hz. Basta recordar que la corriente alterna tiene un comportamiento sinusoidal, mientras que en el caso de la directa es el valor absoluto de una función periódica. La frecuencia da el tiempo de duración del arco y al ser una función periódica tiene un comportamiento además de que esta tiene máximos y mínimos a través de un periodo.

Velocidad de desplazamiento. La velocidad de desplazamiento afecta tanto el ancho como a la penetración de una soldadura GTAW Sin embargo, su efecto sobre la anchura es más pronunciada que en la penetración. La velocidad de desplazamiento es importante debido a su efecto en el precio. En algunas aplicaciones, la velocidad de desplazamiento es definida como un objetivo, con las otras variables seleccionadas para lograr la configuración de soldadura deseada a esa velocidad. En otros casos, las trayectorias presentes en la soldadura podría ser una variable dependiente, dados que estas afectan la velocidad de desplazamiento, la selección de las trayectorias nos ayudan para poder obtener una mejor calidad de la soldadura y hacerla uniforme para obtener mejores condiciones posibles con la otra combinación de variables. Independientemente de los objetivos, la velocidad de desplazamiento en general, se fija en la soldadura mecanizada, mientras que otras variables como la corriente o voltaje que son variadas para mantener el control de la soldadura. Es decir, la velocidad de desplazamiento es proporcional al esfuerzo necesario para crear la unión soldada.



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

**Longitud de arco.** La longitud del arco (a veces llamado el hueco de arco eléctrico) es la distancia desde la punta del electrodo a la pieza a soldar [10]. La longitud de arco es importante con este proceso ya que afecta a la anchura de la piscina de soldadura; la cual es proporcional a la longitud del arco. Se busca mantener esta distancia para obtener un arco estable que permita una soldadura constante y con buena calidad.

### Resultados

En base al análisis de variables se concluye que para realizar un modelo matemático adecuado para un sistema de soldadura GTAW, se requiere estudiar cuan significativas son las variables, así como la interacción entre las variables. Para ello se decidió hacer un diseño de experimentos factorial  $2^{5-1}$  que tiene resolución V. En estos diseños los efectos principales y las interacciones dobles tienen alias con interacciones triples o de mayor orden, es decir, los efectos principales e interacciones dobles están limpiamente estimadas. Se presenta en la tabla 2 el diseño de experimentos que se realizará para el desarrollo de esta experimentación.

Tabla 2. Diseño Factorial.

Orden estándar	Tipo de corriente	Amperaje	Frecuencia	Velocidad desplazamiento	Longitud de arco
2	DC	90	60	4	0.1
7	AC	120	120	4	0.8
6	DC	90	120	4	0.8
11	AC	120	60	10	0.8
8	DC	120	120	4	0.1
15	AC	120	120	10	0.1
10	DC	90	60	10	0.8





## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

4	DC	120	60	4	0.8
14	DC	90	120	10	0.1
3	AC	120	60	4	0.1
16	DC	120	120	10	0.8
5	AC	90	120	4	0.1
9	AC	90	60	10	0.1
13	AC	90	120	10	0.8
1	AC	90	60	4	0.8

### Conclusión

Con la información obtenida en este análisis se concluye que para un estudio de la zona afectada por el calor se decide estudiar las variables que se expresan anteriormente para el desarrollo de un modelo matemático que busca comprender el impacto de los cambios en las variables críticas del proceso de soldadura con el fin de que a través de su operación se pueda predecir el comportamiento y minimizar errores a través de procesos automáticos. Estas variables permitirán plantear un modelo que se enfoque en las zonas térmicamente inestables, donde se presentan la mayor cantidad de errores dentro de la soldadura GTAW. Esto ayudará a tener una mejor comprensión de la soldadura GTAW, para ello se recomienda hacer un estudio extensivo de las siguientes variables de salida

- *Dureza.*
- *Micro dureza.*
- *Modificación de microestructura de material base al cordón de soldadura.*
- *Porosidad.*
- *Penetración.*



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Esto permitirá obtener un análisis cuantitativo de la soldadura, que discriminará las variables menos significativas, para poder plantar un modelo por medio de inteligencia artificial.

### **Bibliografía**

- [1] “WELDING”, BRITANNICA ENCYCLOPAEDIA, [HTTP://GLOBAL.BRITANNICA.COM/](http://global.britannica.com/)
- [2] GROOVER M., “FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING: MATERIALS, PROCESSES AND SYSTEMS”, 4TH ED, 2010 JOHN WILEY & SONS, INC.
- [3] SINGH D., “FUNDAMENTAL OF MANUFACTURING ENGINEERING”, CRC PRESS, FIRST EDITION 2008.
- [4] KALPAKJIAN S. Y SCHMID S., “MANUFACTURING ENGINEERING AND TECHNOLOGY”, PRENTICE HALL, 2010.
- [5] MESSLER R., “PRINCIPLES OF WELDING: PROCESSES, PHYSICS, CHEMISTRY AND METALLURGY”, 1999, JOHN WILEY & SONS, INC.
- [6] MCGUIRE M., “STAINLESS STEELS FOR DESIGN ENGINEERS”, 2008, ASM INTERNATIONAL
- [7] CALVO F., “METALOGRAFÍA PRACTICA”, EDITORIAL ALHAMBRA S.A., 1972.
- [8] HATRMAN V., BELL M. & NELSON T., “WELDING METALLURGY”, 2001, AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS).
- [9] GODAZARI M., “MODELLING OF GAS TUNGSTEN ARC WELDING (GTAW) AND GAS METAL ARC WELDING (GMAW) PROCESSES”, 1997, DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS, SCIENCE UNIVERSITY OF TORONTO.
- [10] JEFFUS L., “WELDING: PRINCIPLES AND APPLICATIONS”, SEVENTH EDITION, 2012, DELMAR, CENGAGE LEARNING