

Optimización del proceso de soldadura GTAW en placas de Ti6Al4V

(Optimization of the GTAW process for Ti6Al4V plates)

Celso Cruz¹, Guillermo Hiyane², José Daniel Mosquera-Artamonov³, Juan Manuel Salgado L¹

¹Centro de Ingeniería y Desarrollo industrial. Querétaro. México. ecruz@cidesi.mx; msalgado@cidesi.mx

²División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Qro, México. guillermo.hiyane@uaq.mx,

Posgrado en ingeniería de sistemas, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Mty, México. xoce15@ingenieros.com

Resumen

La soldadura de aleaciones ferrosas ha sido ampliamente utilizada durante muchos años en México. Con la llegada de la industria Aeroespacial, nuevas aleaciones, procesos y retos también. Un ejemplo de esto es la soldadura GTAW en materiales como el Titanio 6Al4V utilizada en partes de los aviones. En este trabajo se realizaron pruebas mecánicas y no destructivas con la finalidad de probar parámetros fijos y móviles para la obtención de los criterios de calidad adecuadas al proceso y aportar a la industria datos que le permitan mejorar dichos procesos y ser competitiva. Para esto se seleccionaron tres niveles de parámetros y calores de aporte pues esta variable está relacionada con las características metalúrgicas y en cierto grado con la sanidad. Se probaron niveles altos, medios y bajos variando el voltaje, amperaje y la velocidad encontrando que los valores supuestos no cumplían la tenacidad a la entalla Charpy. Para optimizarlo y alcanzar el valor objetivo se realizó un diseño central compuesto utilizando los tratamientos medio y alto que arrojaron mejores propiedades encontrando el cumplimiento con los criterios de calidad y los parámetros, y el calor de aporte adecuados para tener una respuesta óptima.

El experimento logró mejorar la tenacidad de la soldadura hasta 12 Joules cumpliendo con la resistencia a la tensión, esfuerzo de cedencia y elongación mínimo especificado para el material base.

Palabras claves: Titanio Ti6Al4V, calor de aporte, voltaje, tenacidad, diseño de experimentos.

Resumo: *Soldagem de ligas ferrosas tem sido amplamente utilizada por muitos anos no México. Com o advento da indústria aeroespacial, novas ligas, os processos e os desafios também. Um exemplo disto é o material de soldadura TIG 6AL4V como titânio usados em peças de aeronaves. Neste trabalho, ensaios mecânicos e não destrutivos, a fim de testar os parâmetros fixos e móveis para a obtenção de determinados critérios de qualidade para o processo e fornecer dados da indústria que vão melhorar esses processos foram realizados e ser competitivo. Para isso três níveis de parâmetros de entrada e calores foram selecionados para esta variável está relacionada com as características metalúrgicas e até certo ponto com a cura. Baixos níveis de alta, média e foram testados através da variação da tensão, corrente e velocidade constatação de que os valores assumidos não cumpriu a Charpy entalhe tenacidade. A fim de otimizar e alcançar o valor-alvo, um desenho composto central foi realizada utilizando a médio e tratamentos de alta apresentou melhores propriedades encontrando cumprimento dos critérios e parâmetros de qualidade e fornecimento de calor adequada para resposta óptima. O experimento não conseguiu melhorar a tenacidade da solda até 12 Joules cumprindo a resistência à tração, limite de escoamento e alongamento mínimo especificado para o material de base.*

Palavras-chave: Titanium Ti6Al4V, a entrada de calor, tensão, tenacidade, projeto de experimentos.

Abstract: *Welding of ferrous alloys has been widely used for many years in Mexico. With the arrival of the Aerospace industry, new alloys, processes and challenges as well. An example of this is the GTAW welding materials such as Titanium 6AL4V, which is applied in the manufacturing of aeronautical components. In this work, mechanical and non-destructive tests were carried out, in order to get fixed and adjustable parameters for achieving a suitable quality in the welding process and to provide data to the industry with which improving in this process is attainable. In order to reach the goal of this work, three heat levels and parameters were chosen and the*

Recebido em 11/12/2013, texto final em 11/02/2014.

* Autor para quem toda a correspondência deve ser encaminhada: Celso cruz:
ecruz@cidesi.mx

results were related to the metallurgical characteristics of the weldment, with which a smooth weld can be achieved. High, medium and low parameters in voltage, amperage and speed were tested. There was found that the assumed values for the titanium welding did not meet the Charpy notch toughness. To optimize and achieve the target value, there was a central design using medium and high treatments that yielded best properties. The results met the critical to quality parameters; and the heat input was suitable for an optimal response.

The results achieved with the experiment were an improvement on the toughness up to 12 Joules. The other properties like tensile strength, yield strength and elongation fulfil the base metal specification.

Key words: Titanium 6AL4V, heat input, voltage, toughness, design of experiments.

1. Introducción

Los diseños de experimentos son una herramienta muy poderosa en la optimización de procesos, sin embargo en muchos casos poco se utilizan debido al rigor necesario para realizar los análisis, no hay tiempo o simplemente el ingeniero encargado del área desconoce de la metodología.

En la literatura existen análisis de regresión convencional en datos experimentales de soldadura TIG con la finalidad de encontrar la interacción entre los factores controlables y las variables respuesta [1]. También se han realizado diseño de experimentos (DOE) 2^5 ; así como también la introducción de redes neuronales con la finalidad de probar el efecto de los parámetros geométricos de una junta soldada en sus propiedades mecánicas encontrando que las principales interacciones se deben a la velocidad de soldadura (a), la tasa de alimentación (b), el porcentaje de limpieza (c) y la corriente (e). Dicha conclusión fue encontrada considerando la altura de refuerzo de soldadura; mientras que el ancho del refuerzo de soldadura está afectado por los mismos factores además de la interacción de (a) con (e) [1].

Por otro lado, también han sido reportados estudios donde se pretende optimizar las características geométricas del proceso TIG utilizando el método Taguchi así como la relación “Grey”. Donde se plantea un arreglo ortogonal L_{16} (4^4), con la relación grey es posible conocer los parámetros más robustos del proceso TIG analizado [2]. Se han trabajado en la optimización de características geométricas. Sin embargo también hay trabajos donde se buscó maximizar la resistencia a la tensión, la penetración y el área de penetración así como minimizar la zona afectada por el calor, el ancho y altura del cordón de soldadura [2].

El método Taguchi se ha empleado además en la optimización del proceso de soldadura por puntos [3]. El uso de un arreglo ortogonal L_{18} (3^4) ha sido empleado para probar la interacción de la fuerza de presión del electrodo, la corriente de soldadura, diámetro del electrodo y el tiempo de soldadura. Encontrando que el factor de influencia más importante es la corriente eléctrica en el control de la resistencia al corte [3].

Los diseños de experimentos son una herramienta muy eficiente que maximiza el conocimiento ganado de los datos experimentales [4]. Además que provee una herramienta robusta para diseñar y analizar experimentos eliminando observaciones redundantes. Lo anterior se puede corroborar con el trabajo de Varis et al [5] en el cual se aplicó el método Taguchi para conocer las variables que afectan el proceso de soldadura por fricción. En

dicho trabajo pudo concluirse que la frecuencia de oscilación y la presión de fricción no son de importancia estadística así como tampoco la entrada de potencia. Varis et al analizó las etapas de dicho proceso y realizó un diseño de experimentos para ver el peso de las variables estudiadas mediante un DOE fraccionado 2^3 y posteriormente aplicó un arreglo ortogonal L_4 del método Taguchi [5].

No obstante, pocos esfuerzos se han orientado a buscar los parámetros óptimos para la obtención de propiedades mecánicas como tensión, cedencia, elongación e impacto Charpy en aleaciones de Ti6Al4V. Esto puede tener una gran importancia e interés debido a la llegada desde hace varios años gran número de industrias aeroespaciales que utilizan aleaciones especiales como Ti6Al4V.

De la literatura se conoce que la velocidad tiene un efecto en la cantidad de metal depositado, mientras la corriente en la profundidad de la penetración. Estos parámetros junto con el voltaje proporcionan un calor de aporte (heat input) a la junta el cual es variable esencial en los procesos por arco. En el caso de las aleaciones Ti6Al4V la limpieza es muy importante por tal motivo se ha establecido un procedimiento para realizarla pues el uso de las manos desnudas ha probado ser factor que va en detrimento de la sanidad dado a la grasa de las manos [6].

El objetivo de este trabajo es determinar los parámetros óptimos de soldadura GTAW sobre placas de Ti6Al4V, que permitan alcanzar todas las características críticas de calidad que están estipuladas en la ASTM B265 grado 5 unido a una tenacidad de 10J usando la prueba Charpy; además de conocer los parámetros óptimos que al ser aplicados en el proceso de soldadura permitan una reducción de costos de desperdicio, horas de inspección y materiales; y por último También puede reducir la incertidumbre del impacto que los parámetros pueden tener en la soldadura estudiada en este artículo.

2. Metodología

Este trabajo experimental fue iniciado con un análisis de modo y efecto de falla “AMEF” con el objetivo de obtener información. Se realizó una lluvia de ideas con los equipos de usuarios-expertos en el proceso; además de buscar algunas causas de variación. Lo anterior es importante para reducir el número de experimentos. Los resultados de la herramienta “AMEF” muestran que las variables de mayor importancia son la velocidad de soldadura, la corriente eléctrica (A), el voltaje (V) y el calor de aporte.

2.1 Fabricación de los cupones de prueba

Para fabricar los cupones de prueba; se utilizó una máquina de soldadura GTAW marca Fronius modelo GO-FER III con gas de protección por boquilla y respaldo. Para el diseño de la junta se utilizó el indicado por la norma AWS [6] en una placa de titanio 6Al4V de 5mm de espesor clasificada por ASTM B265 como grado 5, numero M54.

El material de aporte utilizado fue un AWS 5.16, clasificado como ERTi-5Eli Coldwire cuyo número F55 en forma de barra de 1.14 mm de diámetro. La velocidad de alimentación utilizada fue de 10 m.min-1, el flujo de gas de protección de la boquilla fue de 1.4 m³.hr-1 y en el respaldo de 1.7 m³.hr-1. La temperatura de precalentamiento fue de 25°C y la temperatura entre pasos de 200°C. El electrodo utilizado fue EWTh-1 de 3.18 mm de diámetro. Una vez preparados los cupones la junta se preparó en una fresadora marca Arsenal y se procedió a soldarlos conforme a los parámetros mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros utilizados para los primeros experimentos en los cupones de prueba.

Nivel	VARIABLES	Medio	Bajo	Alto
Bajo	Amperes	100	90	110
	volts	8.3	8.6	8.9
	Velocidad (mm.min-1)	95	85.5	104.5
	Calor aportado (kJ.mm-1)	0.524	0.543	0.562
Medio	Amperes	125	112	137
	volts	9.6	9.8	9.9
	Velocidad (mm.min-1)	95	86	105
	Calor aportado (kJ.mm-1)	0.758	0.766	0.775
Alto	Amperes	133	123	137
	volts	10	9.8	11
	Velocidad (mm. min-1)	85	78	97
	Calor aportado (kJ mm-1)	0.939	0.927	0.932

2.2 Realización de ensayos mecánicos

Una vez preparados los cupones de prueba se procedió a realizar un ensayo no destructivo por radiografía para verificar sanidad y obtener por cupón una probeta de tensión en el sentido transversal a la soldadura y una probeta para el ensayo Charpy con la entalla centrada en la soldadura. Las probetas de tensión utilizadas fueron de ancho 6mm como lo estipula ASTM E8-08. Las dimensiones de las probetas Charpy fueron de 10x2.5x55mm como está estipulado en ASTM E23-08.

La velocidad de prueba utilizada para las pruebas de tensión fue de 0.005 mm min-1 y 10 mm min-1 para la cedencia y tensión obtenidas con base a la norma ASTM E8-08. Para obtener el esfuerzo a la tensión, el esfuerzo a la cedencia al 0.2% y la elongación a 25 mm, se realizaron las pruebas acorde a la ASTM E8-08. Teniendo como nivel bajo (-1) 0.55 kJ.mm-1, el medio (0) 0.75 kJ.mm-1 y el alto (+1) 0.95 kJ.mm-1, por cada nivel se realizaron tres repeticiones. Cabe mencionarse que la

prueba de impacto Charpy se realizó acorde a la norma ASTM E23-08, los niveles utilizados son los mismos que en las pruebas anteriores e igualmente se realizaron tres repeticiones por nivel.

2.3 Diseño central compuesto

Con el fin de lograr los valores de tenacidad óptimos en soldadura de Titanio 6Al4V, se planteó un diseño central compuesto con tres factores: Voltaje (9.6 V-9.9 V), Amperaje (125 A-137 A) y la velocidad (95 mm.min-1 -105 mm.min-1), el cual está estructurado con 8 puntos al cubo, 6 puntos centrales y 6 puntos axiales. Teniendo un $\alpha=1.68179$, el diseño se replicó una vez. Las pruebas se realizaron aleatoriamente, las pruebas fueron ejecutadas acorde la norma ASTM E23-08. En la tabla 2 se presenta el diseño experimental usado, con los valores codificados para esta investigación [7].

Tabla 2. Diseño central compuesto usado

Corrida	Puntos	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Velocidad (mm.min-1)	
8	Axial	9.50	131	100	
12		9.75	141.09	100	
10		9.75	120.91	100	
3		9.75	131	91.59	
6		9.75	131	108.41	
5		10.00	131	100	
20		9.75	131	100	
11		9.75	131	100	
2		Central	9.75	131	100
17			9.75	131	100
7	9.75		131	100	
16	9.75		131	100	
1	9.6		125	105	
19	9.6		125	95	
13	9.6		137	105	
9	Puntos al cubo		9.6	137	95
18			9.9	125	105
4			9.9	125	95
14		9.9	137	95	
15		9.9	137	105	

3. Resultados

La Tabla 3 muestra los resultados en esfuerzo de tensión, el esfuerzo a la cedencia, la elongación y prueba Charpy.

Tabla 3. Prueba de tensión ASTM E8-08 para obtener el esfuerzo a la tensión en MPa, el esfuerzo a la cedencia al 0.2% en MPa, obtener la elongación a 25mm y prueba Charpy

Calor	Esfuerzo a la tensión			Esfuerzo a la cedencia al 0.2% en MPa.		
	Nivel bajo (-1)	Nivel medio (0)	Nivel alto (+1)	Nivel bajo (-1)	Nivel medio (0)	Nivel alto (+1)
Bajo(-1) 0.55 kJ.mm-1	817.77	825.35	1135.55	551.62	586.21	1070.83
	707.73	705.1	899.8	571.51	578.46	878.09
	783.04	627.77	1056.81	568.75	600.66	1015.7
Medio (0) 0.75 kJ.mm-1	1172.77	1185.73	1012	1107.65	1065.63	941.98
	1148.47	1155.77	997.9	1116.32	1045.16	935.53
	1161.47	1155.92	1178	1106.59	1060.49	1071.69
Alto(+1) 0.95 kJ.mm-1	1171.14	1098.24	989.37	1061.76	1055	864.84
	968.33	1009.55	994.58	873.29	1006.56	845.99
	1022.54	907.24	993.16	911.04	861	867.72
Valor mínimo 895 MPa			Valor mínimo 759 MPa			
Calor	Elongación a 25mm			Prueba de Charpy		
	Nivel bajo (-1)	Nivel medio (0)	Nivel alto (+)	Nivel bajo (-1)	Nivel medio (0)	Nivel alto (+)
Bajo(-1) 0.55 kJ.mm-1	2.68	2.09	2.36	8	4	8
	2.8	1.85	2.2	6	6	8
	2.83	2.87	2.56	6	8	6
Medio (0) 0.75 kJ.mm-1	4.49	6.3	12.29	4	4	8
	4.21	6.22	12.91	4	4	8
	3.82	6.54	12.4	5	4	8
Alto(+1) 0.95 kJ.mm-1	8.58	4.06	8.46	12	2	4
	7.2	3.82	5.55	10	6	6
	5.75	3.86	6.89	10	4	4
Valor mínimo 10%			Valor mínimo 10 Joules			

Tabla 4. Resultados de los tratamientos utilizados en el diseño central compuesto.

Corrida	Esfuerzo de tensión (MPa)	Esfuerzo de cedencia 0.2% (MPa)	Elongación a 25 mm (%)	Energía (J)
1	1024.57	907.89	9.13	6
2	1031.47	902.80	7.09	4
3	1017.68	927.27	7.01	6
4	1015.71	892.15	11.22	10
5	970.20	833.85	4.92	8
6	1026.89	893.87	11.73	6
7	1036.17	921.37	10.24	6
8	1031.42	914.31	11.06	9
9	1035.08	918.90	8.31	7
10	1025.86	918.90	10.00	10
11	1040.52	912.78	12.32	3
12	1002.72	982.22	5.75	8
13	945.77	910.96	3.90	6
14	888.46	872.33	1.89	4

15	1034.85	842.99	11.38	8
16	1036.58	943.44	11.00	8
17	1035.00	940.00	11.20	8
18	1038.38	948.35	11.00	8
19	1040.00	947.00	11.10	8
20	1033.00	937.87	11.40	8
Mínimo	895.00	759.00	10.00	10

Tabla 5. Análisis de varianza para el diseño central compuesto.

Fuente	GL	SC Sec	SC Ajust	CM Ajust	P
Regresión	6	57.609	57.609	9.602	0.000
Lineal	3	22.135	35.393	11.798	0.000
Amperaje	1	4.740	14.924	14.924	0.001
voltaje	1	17.386	4.295	4.295	0.045
Vel. Sol	1	0.010	13.276	13.276	0.002
Voltaje*Voltaje	1	7.046	8.839	8.839	0.007
Vel. Sol*Vel. Sol	1	13.303	13.303	13.303	0.002
Amperaje*Voltaje	1	15.125	15.125	15.125	0.001
Error residual	13	11.341	11.341	0.872	
Falta de ajuste	8	11.341	11.341	1.418	
Error puro	5				
Total	19	68.95			

GL: Grados de libertad; SC Sec: Sumatoria de cuadrados secuenciales; SC Ajust: Sumatoria de cuadrado ajustados; CM: Cuadrados medios ajustados; F: Estadístico F; P: Estadístico P

En la Tabla 3 puede verse que los mejores parámetros son aquellos denominados calor medio nivel alto y medio pues en su mayoría cumplen los valores críticos de la calidad “CTQ” (valor mínimo).

La Tabla 4 muestra los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas por la prueba de tensión y la prueba Charpy para el diseño central compuesto (DCC) planteado. Se puede observar que el tratamiento 4 y el 10 son los que cumplen con todas las características críticas de calidad requeridas para este proceso de soldadura.

La tabla 5 muestra el análisis de varianza, el cual presenta un coeficiente de correlación 83.55%. El análisis de varianza presentado esta depurado, es decir se eliminaron las variables e iteraciones que no son significativas estadísticamente.

En la Figura 1 se muestra la gráfica de contorno del diseño central compuesto, en donde se aprecia que al incrementar el amperaje y el voltaje la tenacidad de la soldadura también incrementa.

Las Figuras 2 a la 4 presentan las curvas de superficie para el

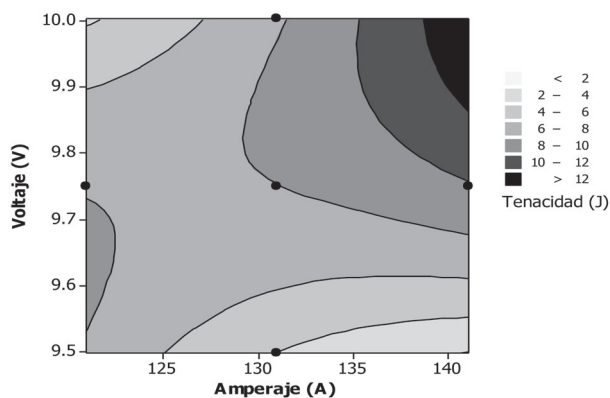


Figura 1. Grafica de contorno del experimento

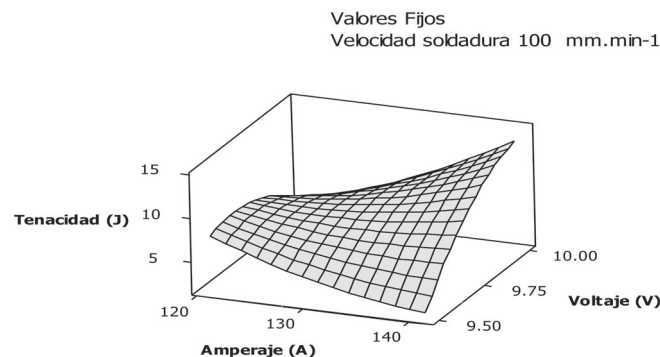


Figura 2. Grafica de superficie de Voltaje, Amperaje con 100 mm.min-de velocidad

DCC, permitiendo conocer como varía la tenacidad del material con respecto al voltaje, amperaje y velocidad de soldadura.

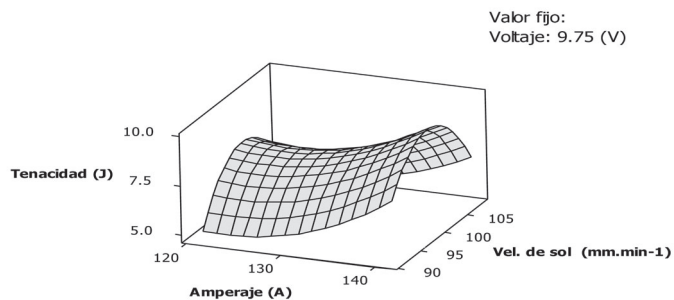


Figura 3. Grafica de superficie de velocidad de soldadura, Amperaje con voltaje de 9.75V

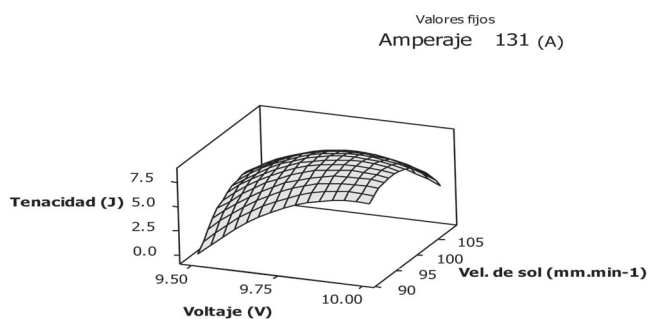


Figura 4. Grafica de superficie de velocidad de soldadura, Voltaje con Amperaje de 131 A.

Mientras que la relación amperaje con voltaje permite aumentar la tenacidad del Titanio 6Al4V al momento de aumentar estas dos variables (Figura 2), no se presenta la misma relación al momento de aumentar la velocidad de soldadura con el aumento del amperaje (Figura 3) dado que la máxima tenacidad tiene unos límites en las velocidades usadas al momento de hacer la soldadura. (97.5 mm.min-1 - 102.5 mm.min-1). Para la relación voltaje con la velocidad de soldadura la mayor tenacidad se presenta en valores céntricos a los límites de experimentación.

Finalmente se determinaron los niveles óptimos de las tres variables analizadas buscando cumplir con los CTQ's (valores mínimos de las tablas 3-6). La Figura 5 muestra el grafico de la función de la deseabilidad, para la optimización de parámetros en el proceso de soldadura del Titanio 6Al4V.

Los valores de amperaje, voltaje y velocidad de soldadura que pueden obtener los CTQ's son los siguientes:

Amperaje=141, Voltaje=10, Velocidad de soldadura= 99.91 mm.min-1. Con los parámetros mencionados anteriormente y los mencionados en la Tabla 3 se deben obtener una junta con las propiedades mecánicas deseadas, cuya tenacidad sea igual o superior a 12.8 Joules.

Como puede verse en la Tabla 3, los parámetros de soldadura que cumplen con el valor de tenacidad Charpy de 10J son aquellos denominados calor medio nivel alto y medio; por lo que puede decirse que estos valores cumplen con los valores críticos de la calidad (CTQ). En la Figura 6 se muestra un corte transversal de una probeta que fue soldada con un calor de aporte de 0.55 KJ.mm-1. Cabe mencionarse que este valor es el resultado de diferentes combinaciones de valores, como los mostrados en la

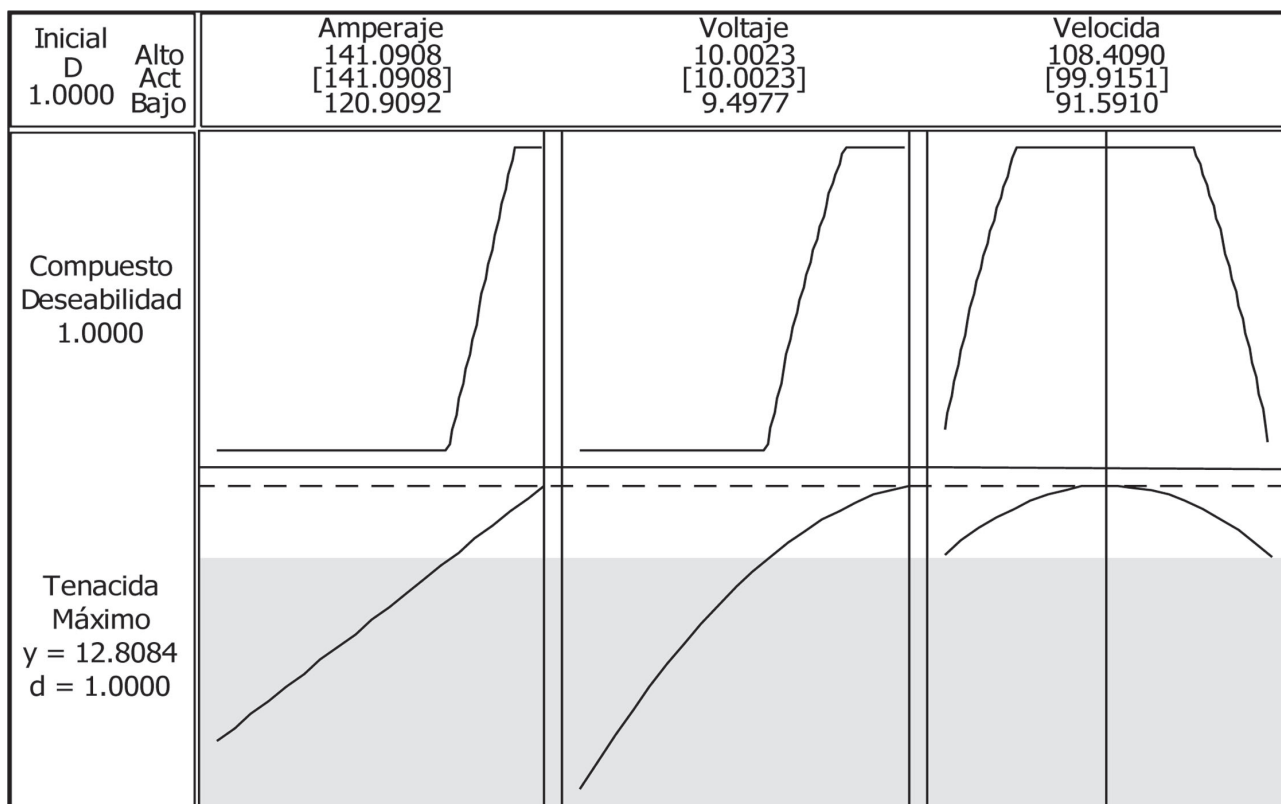


Figura 5. Grafica de función de deseabilidad para la variable respuesta tenacidad

Tabla 4. De lo anterior puede verse que un valor de calor de aporte muy bajo lleva a unas propiedades mecánicas no deseadas además de defectos de soldadura como el mostrado en la Figura 9. Este defecto es conocido como una fusión incompleta y es relacionado comúnmente a valores de corrientes muy bajas o velocidades de depósito de soldadura muy altas.

Por otro lado la Figura 7 muestra un corte transversal de una probeta que fue soldada con un calor de aporte de 0.75 KJ.mm-1 y puede observarse que no existe fusión incompleta en el metal de aporte como ocurre con un calor menor a este valor. Por otro lado puede observar que en este caso los granos del metal de aporte son de tipo columnar con granos equiaxiales muy finos en el centro y en el caso de la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) se observar un crecimiento de grano por recrystalización. Mientras que en el caso de un calor de aporte menor se observan granos más finos en la ZAT y granos de tipo columna en el metal de aporte, pero no es posible determinar la presencia de granos finos equiaxiales. Este hecho es muy importante porque las propiedades mecánicas serán diferentes en ambos casos, como lo demuestra la tabla 3.

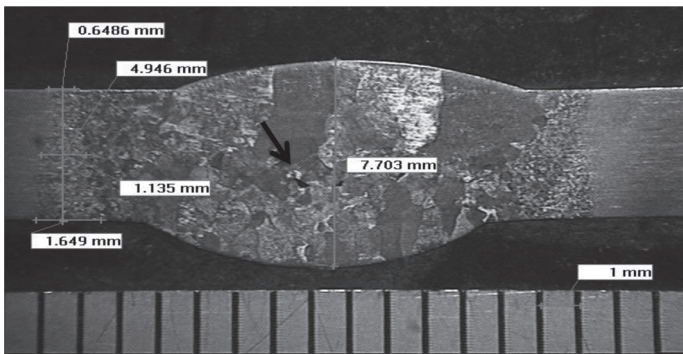


Figura 6. Corte transversal de una probeta con un calor aportado de 0.55 KJ.mm-1. Se puede observar la presencia de un defecto en el núcleo del metal de aporte.

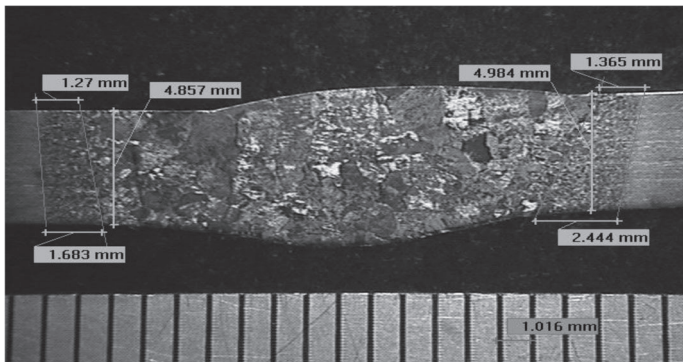


Figura 7. Corte transversal de una probeta con calor aportado de 0.75KJ.mm-1. No se observan defectos en el metal de aporte.

3.1 Corrida de prueba para confirmar resultados

Una vez obtenidos los parámetros óptimos se procedió a soldar nuevamente otros tres cupones de prueba para verificar si no se degradaron las propiedades de resistencia y si finalmente pudo alcanzarse la tenacidad requerida. Como primer paso se

procedió a revisar visualmente la placa conforme a los requisitos normativos aplicables [7].

La Figura 8 muestra la unión soldada y puede apreciarse que no se presenta descoloración alguna u algún defecto superficial relevante.



Figura 8. Imagen final de la soldadura aplicada en los cupones de prueba para verificación

Un complemento a la inspección visual fue además una radiografía con la finalidad de revisar la sanidad interna de los cupones. La radiografía no revelo la presencia de discontinuidades internas que llevaran al rechazo de las soldaduras aplicadas (Figura 9).



Figura 9. Radiografía de unión soldada de los cupones de prueba de verificación

Posteriormente se realizaron ensayos de tensión conforme a ASTM E8-08 y de impacto Charpy conforme ASTM E-23. La Figura 10 muestra las curvas esfuerzo-deformación de los experimentos y la Tabla 6 los resultados de la corrida de confirmación.

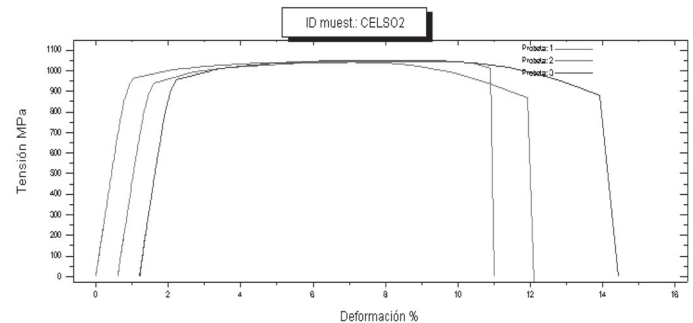


Figura 10 Curvas esfuerzo deformación de los cupones de verificación

En la Tabla 6 se aprecia que las tres probetas cumplen con los criterios de calidad mínimos exigidos para esta soldadura, usando los niveles óptimos de los factores controlables del proceso.

Tabla 6 Resultados de los experimentos de los cupones de verificación.

Probeta	Esfuerzo de tensión (MPa)	Esfuerzo de Cedencia 0.2% (MPa)	Elongación a 25mm (%)	Energía (J)
1	1043.52	935.95	12.28	12
2	1042.57	939.47	11.34	12
3	1049.90	941.53	12.38	11
Mínimo	850	759	10	10

4. Conclusiones

Los datos analizados para el diseño central compuesto presentaron un nivel de correlación superior al 80%, teniendo como factores de control el voltaje, amperaje y la velocidad de soldadura.

Tanto el voltaje como el amperaje con su iteración hacen que la tenacidad del material aumente. Para la relación amperaje y velocidad de soldadura, la mayor tenacidad se presenta cuando aumenta el amperaje y la velocidad de soldadura esta entre (97.5 mm.min-1 -102.5 mm.min-1), obteniendo la tenacidad mínima con un amperaje de 130. Finalmente para la relación voltaje y velocidad de soldadura, el valor de tenacidad aumenta al aumentar el voltaje y teniendo la velocidad de soldadura sobre los rangos (97.5 mm.min-1 -102.5 mm.min-1).

Los parámetros óptimos en soldadura GTAW sobre placas de Ti6Al4V, que permiten alcanzar todas las características críticas de calidad que están estipuladas en la ASTM B265 grado 5 unido a una tenacidad de 10J usando la prueba Charpy son: Amperaje=141, Voltaje=10, Velocidad de soldadura= 99.91 mm.min-1.

Los parámetros óptimos logran un balance entre resistencia, ductilidad, tenacidad y sanidad. Con lo cual se puede inferir que dicha unión posee características mecánicas y metalúrgicas adecuadas.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de ingeniería y Desarrollo industrial unidad Querétaro por la financiación de la presente investigación. J.D. Mosquera-Artamonov agradece CONACYT por la beca de postgrado.

6. Referencias Bibliográficas

[1] Dutta, P.; Kumar, P.D. Modeling of TIG welding process using conventional regression. *Journal of materials processing technology*, v.184, i. 1-3 p.56-68. 2007.

[2] U Esme et al. Optimization of weld bead geometry in tig welding process using grey relation analysis and taguchi method. *Materials and technology* v. 43, n. 3 , p.143-149. 2009.

[3] Eşme, U. Application of Taguchi method for the optimization of resistance spot welding process. *The Arabian journal for science and engineering*, v.34, n 2b, p.519-528. 2009.

[4] Fischer, R. *The design of experiments*. Oliver-Boyd , n/a. 1935.

[5] Vairis, A.; Petousis, M. Designing experiments to study welding processes: using the Taguchi method. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, v.2, n.1, p.99-103. 2009.

[6] Leon, M. I. A.; Chaparro, J.; Sanchez, C.V. M. Comportamiento mecánico de uniones soldadas de Ti-6Al-Av con dano previo por fatiga. *Memorias Tecnicas del 4 congreso internacional de ingenierias* ,p.1-8. 2011

[7] Montgomery D. *Diseño y Análisis de Experimentos*. México, Editorial Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega editores, Segunda edición. 2004. 427-466.

[8] American Welding Society. AWS D17.1 Specification for fusion welding for aerospace applications. 2001, p.45.