

Caracterización de Reparación por Soldadura Fuerte en Generadores Eléctricos (Antorcha e Inducción)

Pedro Hernández Gutiérrez¹, Jose Jorge Ruiz Mondragon²,
Jorge Leobardo Acevedo Dávila³ y Carlos Alberto Guevara Chavez⁴

Resumen — Los métodos comúnmente empleados para la reparación de estos componentes son por medio de soldadura fuerte por antorcha (TB) o por inducción (IB), sin embargo se desconoce cuál de los dos procesos ofrece el mejor resultado para la reparación de estos componentes. En este trabajo se realizaron pruebas con estos dos procesos para dos tipos de uniones a tope y a traslape las cuales fueron caracterizadas mediante pruebas mecánicas, microscopía óptica y pruebas de sanidad. Se encontró que las uniones a tope realizadas por antorcha presentan mejor resistencia a la tensión y al corte. En la caracterización se mostró que las piezas cuentan con porosidades siendo las muestras obtenidas por inducción las de mayor porcentaje. Al evaluar la sanidad de la unión se presentaron grietas en las muestras soldadas por inducción. Lo cual sugiere que la técnica de soldadura fuerte por antorcha es el mejor método para la reparación de estos componentes.

Palabras clave — Soldadura Fuerte por Antorcha, Soldadura Fuerte por Inducción, Cobre Electrolítico.

La soldadura fuerte ha sido empleada de forma popular para la reparación de generadores eléctricos¹, usando materiales de aporte con plata los cuales presentan moderadas temperaturas de fusión, en las aleaciones base cobre con bajos contenidos de fósforo, Ag-Cu-P. Estos resultan económicos y presentan buenas propiedades de penetración, ya que es bien sabido que el principio de la soldadura fuerte es basado en la penetración del material de aporte por capilaridad. Se ha encontrado que materiales de aporte como BCuP5 presentan buenas propiedades de capilaridad. Ya que al tener contenidos considerables de plata incrementan la fluidez de la aleación y bajos contenidos de fósforo ayudan a incrementar la mojabilidad sacrificando ligeramente la resistencia a la corrosión².

Se han realizado la fabricación de electrodos modificando su composición química añadiendo elementos como indio, zinc y estaño, sin embargo la modificación química no muestra una mejora considerable en la mojabilidad o la capilaridad del material de aporte. La adición de plata en la composición incrementa la fluidez pero también disminuye las propiedades de resistencia mecánica en la unión.

Los métodos más populares para aplicar la soldadura fuerte es por antorcha (TB) y/o por soldadura fuerte por inducción (IB), sin embargo se han encontrado defectos que afectan directamente a la generación de puntos calientes en zonas de las bobinas, lo cual se relaciona directamente a la presencia de discontinuidades en la unión incrementando la resistencia del flujo de electrones que atraviesan por estas.

Es de suma importancia asegurar que la sección soldada cubra por completo el área de unión, debido a los elevados niveles de corriente que circula a través de los devanados del estator. Sin embargo, la selección del proceso, la temperatura y el tiempo de soldadura empleado no siempre garantizan un área de contacto pleno, por lo que no es extraño encontrar que las zonas efectivas de soldadura sea sólo la periferia del conductor de cada bastón de estas uniones. Cuando esto sucede, las altas resistencias de contacto de las uniones provocan elevaciones importantes de temperatura que ocasionan que la resina de los capuchones se deteriore por descomposición térmica. Lo cual es causado por una mala aplicación de la soldadura y por la generación de porosidades debido a la baja limpieza de los componentes previo a la unión Karamis et al.², Sisamouth et al.³ y CAO et al.⁴

Las investigaciones más recientes han revelado que las causas que contribuyen al desarrollo de malas uniones se resumen en la falta del control del proceso de soldadura, la distribución del calor inadecuado a lo largo de la unión que se está realizando, cantidades inadecuadas de metal de aporte aplicadas a la unión, enfriamiento repentino y/o la remoción de metal de aporte, la calidad de la unión metálica de la junta. En general esta última tiene un conjunto de variables que determinan la falla de la unión. No existe información que nos indique si alguno de los dos procesos indique alguna ventaja competitiva para la aplicación de la soldadura fuerte.

¹ Pedro Hernández Gutiérrez es Coordinador de Proyectos de la Subgerencia de Capacitación y Certificación de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. pedroh@comimsa.com

² El Dr. Jose Jorge Ruiz Mondragón es Coordinador de Proyectos de la Subgerencia de Investigación y Desarrollo de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. jjorge.ruiz@comimsa.com

³ El Dr. Jorge Acevedo Dávila es Gerente de Desarrollo Tecnológico de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. jacevedo@comimsa.com

⁴ El MC Carlos Guevara Chavez es Coordinador de Especialistas de la Subgerencia de Investigación y Desarrollo de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. carlosguevara@comimsa.com

De ahí nace la necesidad de profundizar en el conocimiento del efecto que tiene el proceso de aplicación de la soldadura fuerte, donde la correcta aplicación de la unión es necesaria para disminuir los puntos calientes y mejorar la eficiencia del paso de corriente a través de los generadores eléctricos.

Procedimiento experimental

El metal base utilizado en la experimentación fue realizado sobre placas de cobre electrolítico (Cu 99.95%) con dimensiones de 0.254 x 0.038 x 0.006m, de largo, ancho y espesor respectivamente, el material de aporte corresponde a la clasificación BCuP-5 de acuerdo a la especificación ASME SFA A5.8, los tipos de configuración de las juntas fueron a Tope y a Traslape como son mostradas en la figura 1.



Figura 1. Configuración de junta utilizados a) Tope b) Traslape

En la tabla 1 se muestra la composición química del metal de aporte correspondiente de un BCuP-5 de acuerdo al código Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX, Welding and Brazing Qualifications.

Tabla. 1 Composición química del metal de aporte %Peso

Clasificación AWS	Número UNS	Cu	P	Ag
BCuP-5	C55284	Bal.	4.8-5.2	14.5-15.5

El proceso de *Soldadura Fuerte por Antorcha* se realizó con gas acetileno como combustible en combinación con oxígeno grado industrial, formando un tipo de flama neutra. El uso de este metal de aporte para soldar de la clasificación BCuP principalmente es utilizado para las uniones de cobre y aleaciones de cobre, aunque tienen un uso limitado en materiales como la plata, tungsteno, y molibdeno. Estos metales de aporte no son recomendables en aleaciones ferrosas base níquel o en aleaciones de cobre-níquel debido al alto contenido de níquel que contienen (> al 10%), lo cual promueve la formación de compuestos intermetálicos en la interface de soldadura confiriéndole características frágiles en la misma. Así mismo se utilizó un fundente de tipo pasta con el fin de favorecer la mojabilidad a través de toda la superficie a unir. La temperatura de aplicación de soldadura por antorcha se utilizó en los rangos de los 700-810°C aproximadamente. Por otra parte el proceso de *Soldadura Fuerte por Inducción* requirió del uso de corriente directa con una fuente de potencia que oscila entre los 16 a los 19KW, mismos rangos de temperatura utilizados en el proceso de antorcha fueron utilizados, y el tiempo efectivo de aplicación oscila entre los 3.2 a los 3.8 minutos para ambos procesos de unión.

El diseño de experimentos de esta investigación fue desarrollada por un factorial 2^K , en la Tabla 2 se muestran los parámetros de soldadura que se estudiaron con sus respectivos niveles. Se pueden observar los dos parámetros que fueron seleccionados como variables de entrada en el diseño de experimentos. Un total de 8 cupones de soldadura fueron evaluados considerando la réplica.

Tabla 2 Parámetros de soldadura Fuerte utilizados en el desarrollo de la experimentación

PROCESO			
TB		IB	
Junta a Tope	Junta a Traslape	Junta a Tope	Junta a Traslape

Las soldaduras se desarrollaron acuerdo al orden aleatorio del diseño de experimentos, una vez que se completaron las soldaduras se llevó a cabo la inspección visual, subsecuentemente un análisis metalográfico fue llevado a cabo por microscopía óptica (MO). Las pruebas de tensión se realizaron bajo los requerimientos de la norma ASTM E-08 y las pruebas de sanidad (Doble) conforme a los requerimientos del estándar B2.2 *Standard for Brazing Procedure and Performance Qualification*.

Resultados y discusiones

Inspección visual y análisis de cupones soldados

La apariencia de las soldaduras por antorcha e inducción son mostradas en la Figura 2. Las características de las soldaduras fuertes dependen en gran medida de la configuración de la junta, la cantidad de metal de aporte requerido, tipo de proceso, temperatura de aplicación, posición de soldadura y de la habilidad del soldador.

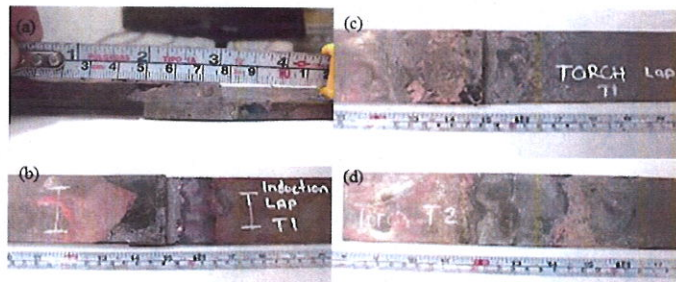


Figura 2. Uniones realizadas por soldadura Fuerte en cobre electrolítico a) Configuración del área de contacto de la junta en traslape, b) Aspecto visual de la unión a traslape por inducción c) Vista superior de la junta a traslape realizada por antorcha y d) Aspecto de la junta a tope realizada por antorcha.

El previo ajuste, la preparación, la limpieza y los cuidados generales dependen en gran medida de la calidad de la unión de soldadura ya que un pequeño desajuste llevara consigo discontinuidades de dimensionamiento, porosidad, entre otras. Para ambas uniones presentaron un llenado completo a toda la periferia de la junta.

Análisis microestructural

El análisis no evidencia un cambio microestructural representativo de las uniones realizadas por antorcha e inducción, en general todas las muestras presentaron microestructuras similares, en la Figura 3 se observa la región de la soldadura – interface – metal base, este último se identifica microestructuralmente con subgranos estrechos con bordes rectilíneos y paralelos que dividen el monocristal, esto se debe a la deformación plástica inicial que adquirió el material inicialmente, adicional a ello presenta aisladamente óxidos de Cu (Cu_2O).

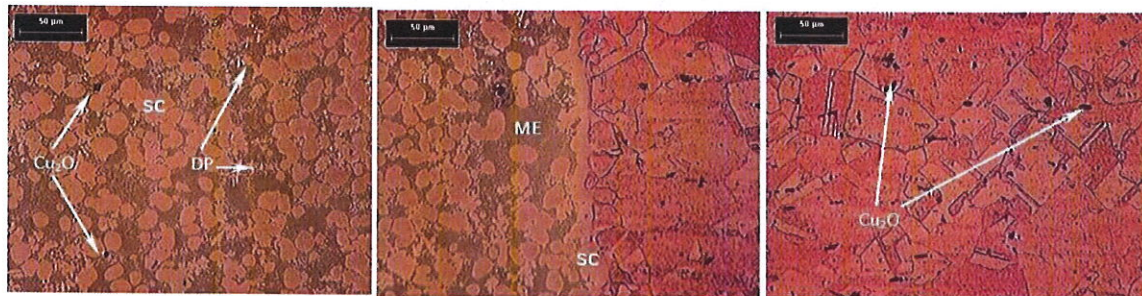


Figura 3 Análisis microestructural de la unión por soldadura Fuerte a) región de soldadura, b) región de la interface metal base – soldadura y c) metal base (Cu electrolítico).

Las tres regiones diferentes en la microestructura de la soldadura son obtenidas con material de aporte BCuP-5 los cuales son observados en la Figura. 3. Estas regiones son las dendritas de solución sólida de cobre (SC), la matriz eutéctica de Ag-Cu-P (ME) y las dendritas ricas en plata alrededor del eutéctico (DP), respectivamente.

Tanto la solución sólida de cobre como las dendritas ricas en plata presentan formas irregulares, tamaños y orientaciones al azar inmersas en la matriz. En la Figura 4 se presenta la macrografía de una unión de tipo traslape realizada por antorcha en la cual se puede evidenciar la formación de rechupes por contracción y porosidades.

Varios investigadores^{2,3,4} mencionan que la principal causa de la formación de estas discontinuidades es la falta de limpieza, la baja fluidez del material de aporte y el calentamiento no homogéneo a lo largo de la unión. Para ambos procesos se evidencian una buena fluidez del metal de aporte, con una aceptable solidificación, tanto para la soldadura como en la interface. En las probetas unidas por el proceso de antorcha se presentó una porosidad aproximadamente del 2% de la longitud total de la unión, en tanto a las pruebas por Inducción se

presentó un porcentaje aproximado del 10% de la longitud total. Los requerimientos mínimos de aprobación de los códigos que rigen la soldadura fuerte fluctúan entre el 15 al 20% de la longitud total de la junta.

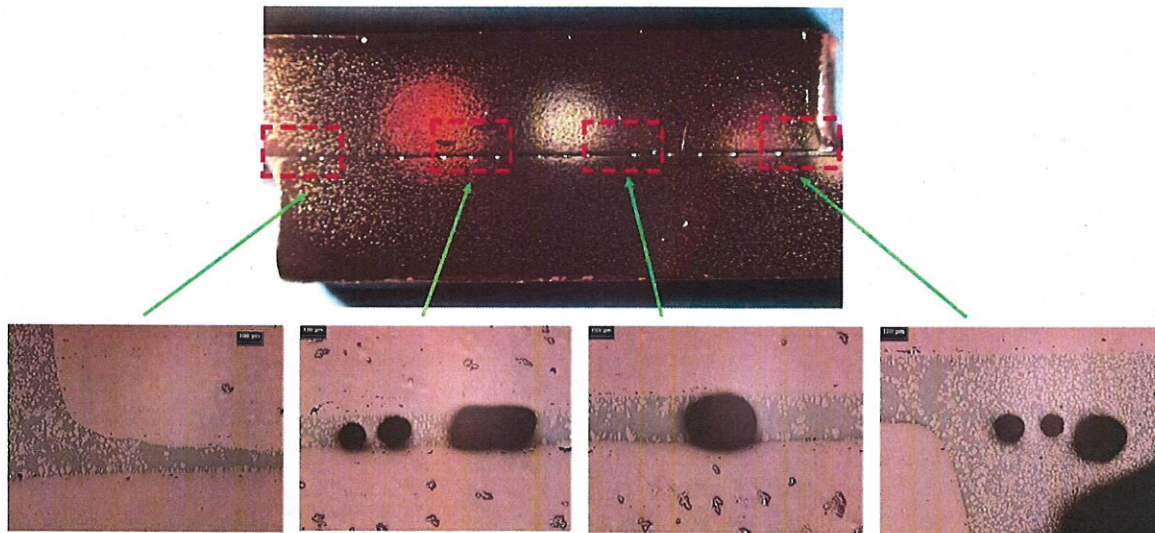


Figura 4. Mapeo de sección transversal de la unión a traslape realizada con soldadura fuerte por antorcha.

Pruebas Mecánicas

El comportamiento mecánico es evidenciado en la Tabla 3, en las pruebas de tensión de sección reducida muestran que para los cupones soldados por antorcha resultaron con mejores propiedades mecánicas para ambas uniones, a tope y a traslape.

Conjuntamente puede observar que los valores más bajos de la carga máxima y esfuerzo máximo las presentan las uniones realizadas por inducción.

Existe una analogía con la porosidad presente en las uniones y la pérdida de resistencia, para ambas uniones se observó que a medida que aumenta la porosidad también aumenta la pérdida de resistencia de la unión independientemente del tipo de configuración de junta.

Tabla 4. Resultados de pruebas de ensayo de tensión

Identificación	Junta	Carga Máxima (Kgf)	Esfuerzo máximo(psi)	Zona de ruptura
T1 A	Tope	3510	30653	Soldadura
T2 A	Tope	2320	19693	Soldadura
T1 I	Tope	1847	16124	Soldadura
T2 I	Tope	1373	12028	Soldadura
T1 A	Traslape	3770	N/A	Soldadura
T2 A	Traslape	3630	N/A	Soldadura
T1 I	Traslape	3200	N/A	Soldadura
T2 I	Traslape	2530	N/A	Soldadura

A=Antorcha I=Inducción

Con respecto a las pruebas de sanidad solo se evaluaron las uniones a tope, unidas por ambos procesos (antorcha e inducción) los cuales de los cuatro especímenes solo uno presento fractura evidenciando la presencia de discontinuidades presentes en la zona de ruptura, los resultados se muestran en la Tabla 5, los resultados arrojan que las uniones realizadas por antorcha presentaron mejores resultados y es atribuido a la escasa porosidad y contracción de metal solidificado presente en la unión de soldadura. La figura 5 muestra los especímenes de dobléz en la cual se aprecia la falla del espécimen realizado por inducción en la zona de unión.

Tabla 5. Resultados de evaluación de pruebas de sanidad (DobleZ)

Identificación	No probeta	Zona de ruptura	Observaciones
D1 Antorcha	1	Sin ruptura	Sin discontinuidad
D2 Antorcha	2	Sin ruptura	Sin discontinuidad
D1 Inducción	3	Soldadura	Grietas presentes en soldadura
D2 Inducción	4	Sin ruptura	Sin discontinuidad

En la figura 6(a) se muestra la influencia de los parámetros en el comportamiento de la carga máxima considerando todas las muestras del diseño de experimentos. Se puede observar que el proceso de unión influye en la resistencia presentando mejores resultados el proceso por antorcha esto se atribuye al calentamiento homogéneo a través de la unión soldada que le confiere mayor fluidez y por ende mayor mojabilidad a la unión en cuanto al tipo de junta las mayores resistencias las presentaron las uniones a traslape debido a que el área de contacto entre los materiales base es mayor que en las juntas a tope.

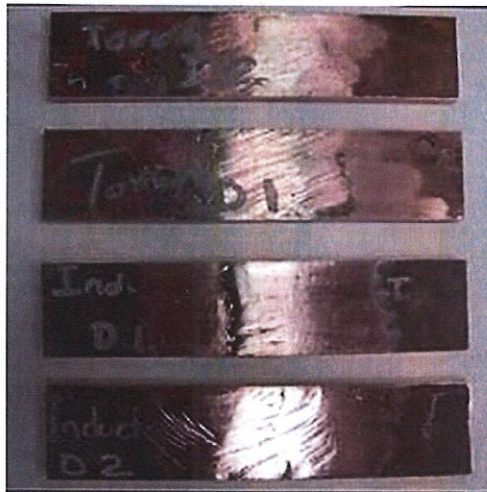


Figura 5. Especímenes de doblez

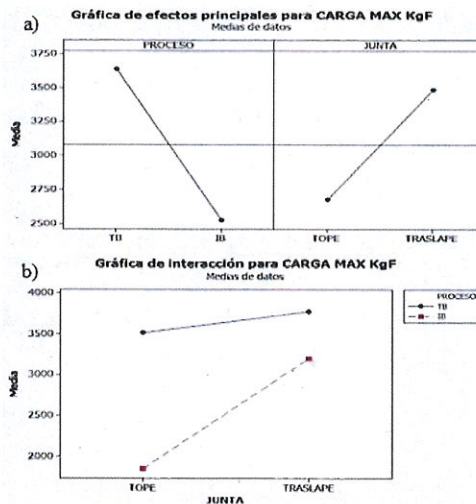


Figura 6. a) Efectos principales de Carga Max b) Interacción

En la figura 6 (b) se presenta la interacción de ambas variables (proceso y tipo de junta), en la cual se observa que para los mejores resultados los presento la unión a tope en el cual el incremento de carga máxima soportada es mínimo en relación al tipo de junta, por otro lado en el proceso de inducción existe una mejoría significativa en el incremento de la carga máxima en uniones de tipo traslape.

Comentarios Finales

Conclusiones

De acuerdo a la experimentación de soldadura fuerte por antorcha e inducción en cobre electrolítico se concluye lo siguiente:

No existe un cambio microestructural representativo en las uniones por ambos procesos.

El material de aporte BCuP-5 provee características de baja fluidez por ende el proceso de soldadura requiere de un calentamiento homogéneo para que exista una buena capilaridad entre los materiales a unir.

El contenido de Ag en el material de aporte ayuda a proveer fluidez pero disminuye la resistencia mecánica.

Las características de la geometría del inductor requieren ser específicas para cada tipo de junta de tal manera que provean un calentamiento uniforme en toda el área de la unión a soldar.

Los materiales como el Cu electrolítico su conductividad eléctrica y térmica es muy alta, por lo que requiere de tener los cuidados especiales al controlar la temperatura, que estén dentro los rangos óptimos de aplicación.

El calentamiento provisto por antorcha resulto mucho más adecuado para la realización de uniones en reparaciones de generadores eléctricos.

La uniones realizadas por antorcha presentan mejores propiedades tanto mecánicas como de sanidad comparación a las realizadas por inducción.

La el 2% de la porosidad presentada es atribuida a la limpieza previa antes de realizar la aplicación de soldadura para ambos procesos, sin embargo en las aplicaciones realizadas por inducción la presencia del porosidad por arriba del 2% se atribuye a la falta de homogeneidad de calentamiento en la unión a soldar y a la geometría del inductor.

La limpieza es determinante para promover o disminuir la cantidad de porosidad

Recomendaciones

La temperatura de precalentamiento es de gran importancia debido a que tiene gran influencia en la formación de defectos tales como porosidades, sobre exposición al ciclo térmico, discontinuidades, sin dejar al lado, la falta de mojado en la superficie de la unión, otro aspecto de suma importancia es la pre-limpieza de la unión ya que poca o nula limpieza incrementa el contenido de porosidad en la interface del metal base y el metal de aporte

Referencias

¹John J. Stephens, K. Scott Weil, Brazing and soldering: proceedings of the 3rd international brazing April-24 - 26, 2006, San Antonio, Texas, US, 349.

²M.B. Karamis, A. Tasdemirci, F. Nair, "Microstructural analysis and discontinuities in the brazed zone of copper tubes", Journal of Materials Processing Technology, 141, 2003, 302 - 312.

³L. Sisamouth, M. Hamdi, T. Ariga, "Investigation of gap filling ability of Ag-Cu-In brazing filler metals", Journal of Alloys and Compounds, 504, 2010, 325 - 329

⁴J. Cao1, L.X. Zhang, H.Q. Wang, L.Z. Wu and J.C. Feng, "Effect of Silver Content on Microstructure and Properties of Brass/steel Induction Brazing Joint Using Ag-Cu-Zn-Sn Filler Metal", J. Mater. Sci. Technol., 2011, 27(4), 377 - 381