

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN ALEACIONES DE ALUMINIO USANDO UN MODELO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

JENNIFER LUZ VILLA DOMÍNGUEZ

**SUSTENTACIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO
DE MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

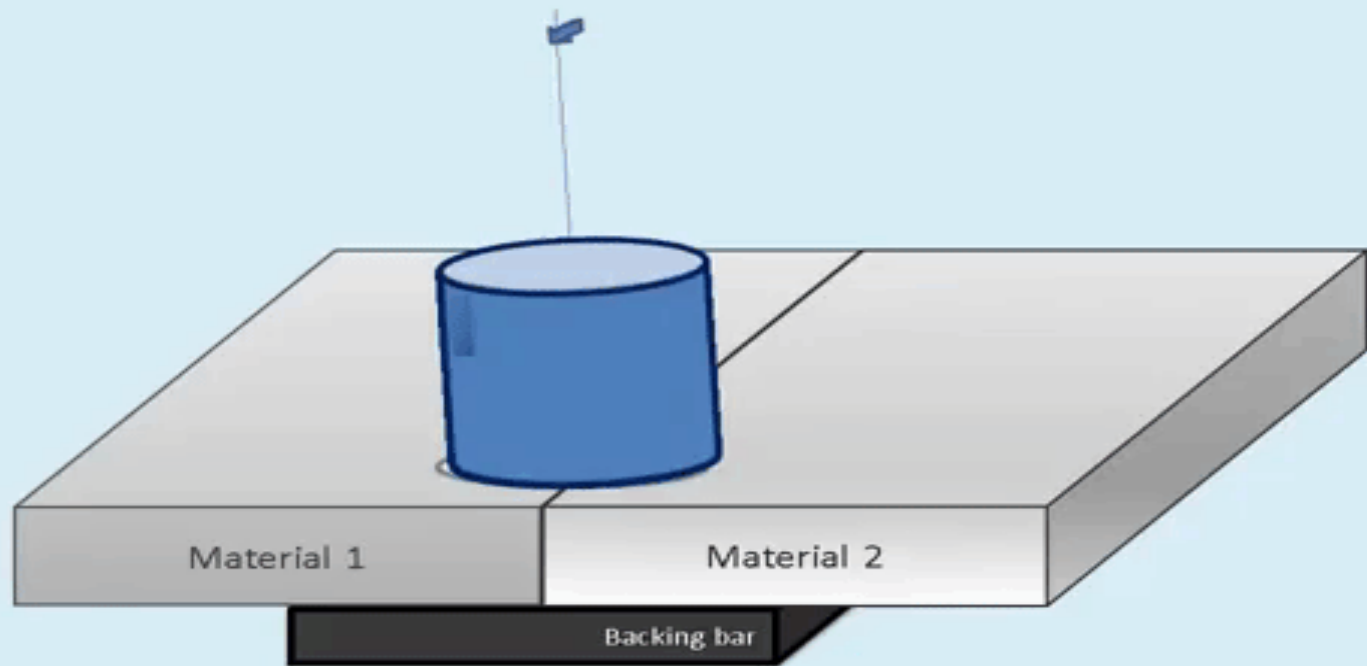
DIRECTORES:

JIMY UNFRIED SILGADO, PhD.

FRANZ QUESADA TATIS, MSc.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA**

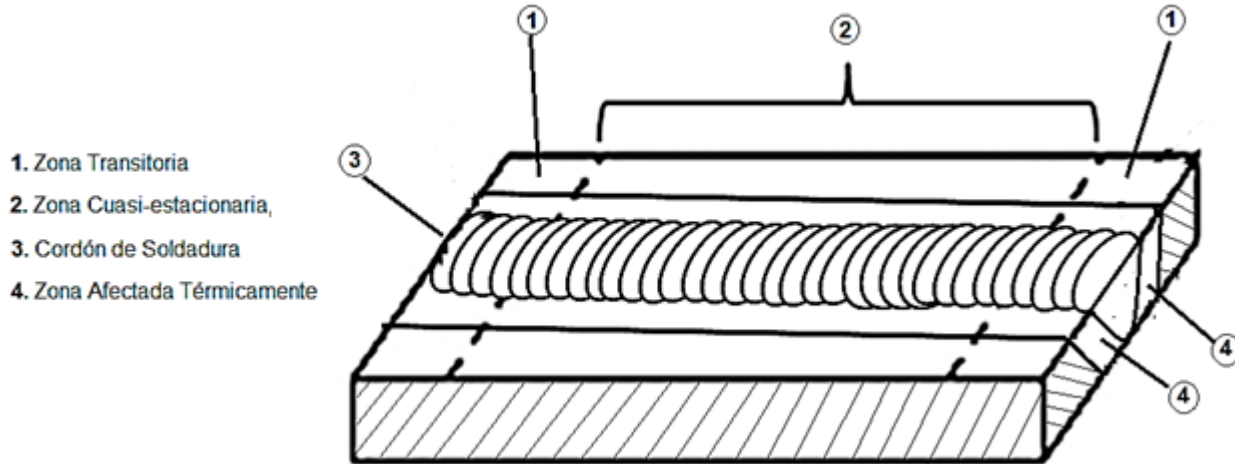
26 - 10 - 2016



Feng et al. (1998)

PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN

Figura 4. Análisis iunta soldada [3]



- 1. Zona Transitoria
- 2. Zona Cuasi-estacionaria,
- 3. Cordón de Soldadura
- 4. Zona Afectada Térmicamente

Pacheco et. al. 2014

Figura 6. Diagrama proceso SFA

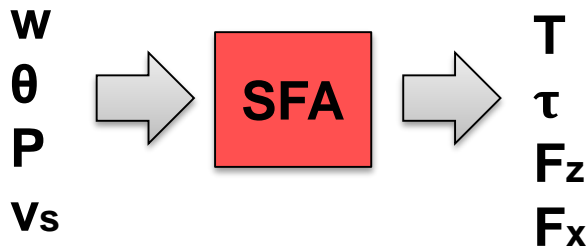
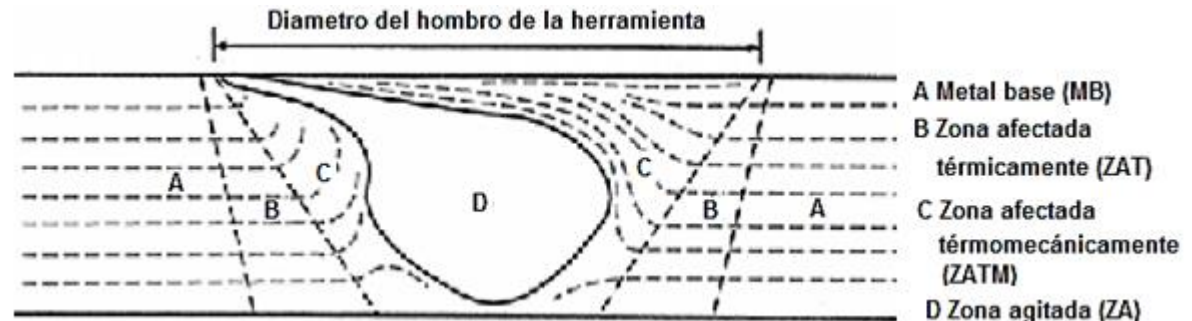


Figura 5. Zonas generadas en la junta soldada [4]



Murillo et. al. 2008

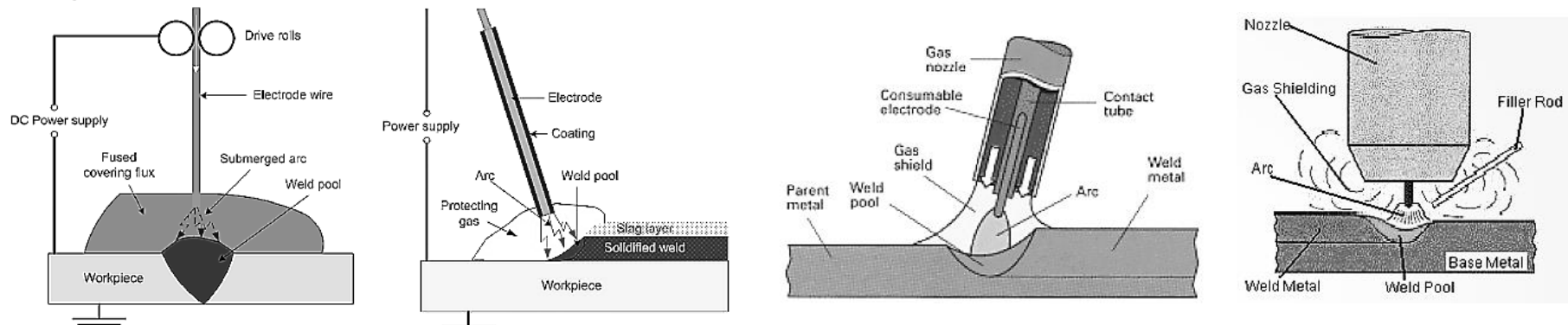
EFICIENCIA TÉRMICA EN PROCESOS DE SOLDADURA CONVENCIONAL

Tabla 1. Eficiencia térmica en procesos de soldadura por arco eléctrico [3].

PROCESO DE SOLDADURA		EFICIENCIA TÉRMICA, FACTOR η	
		Intervalo	Media
Soldadura SAW		0,91-0,99	0,95
Soldadura SMAW		0,66-0,85	0,76
Soldadura GMAW	CO ₂ -Acero	0,75-0,93	0,84
	Ar-Acero	0,66-0,70	0,68
Soldadura GTAW	Ar-Acero	0,25-0,75	0,50
	He-Al	0,55-0,80	0,68
	Ar-Al	0,22-0,46	0,34

Pacheco et. al. 2014

Figura 7. Procesos de soldadura por arco eléctrico [5].



<http://www.weldingengineer.com/>

PREGUNTA PROBLEMA

¿Podría construirse exitosamente una metodología simple y coherente para determinar la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción-agitación teniendo en cuenta variables directas (velocidades, torque, geometrías) e indirectas (tipo de máquina, etc.) del proceso?

VALORES DE EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO SFA EN LA LITERATURA

Tabla 2. Eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción agitación.

Referencia	Año	Autores	Material /Herramienta /Maquina	Método de cálculo	Eficiencia térmica, η_{Ter} (%)	
					Aplicación 1	Aplicación 2
[6]	2007	Vilaça et. al.	AA2024-T351/ Hombro concavo pin cilindrico y Hombro Plano pin roscado/ Robot	Código analítico iSTIR y experimentación	Aplicación 1	89 (Promedio)
					Aplicación 2	93 (Promedio)
[7]	2003	Dickerson et. al.	AA6082-T6/2024-T3	Análisis elementos finitos	89	
			AM60 Hombro Plano y pin cilindrico roscado / Simulación		91	
[8]	2004	Schmidt et. al.	AA2195-T8 / Hombro Plano pin cilindrico liso / Simulación	Análisis elementos finitos	88	
[9]	2003	Chao et. al.	AA2195-T8 Hombro Plano pin cilindrico roscado/ Simulación	Análisis elementos finitos	95	

OBJETIVO GENERAL

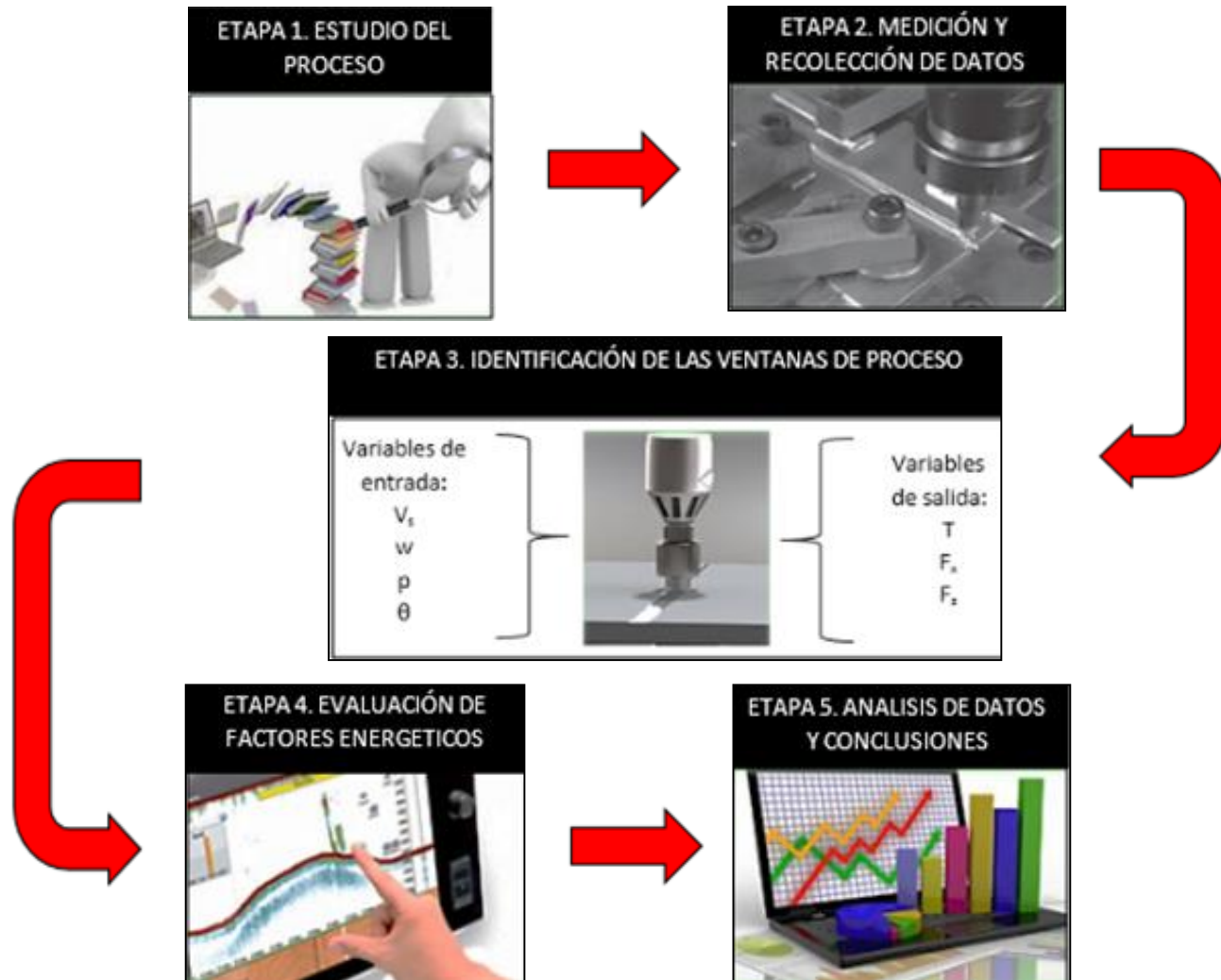
Evaluar la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción agitación de juntas de aluminio estructural mediante modelos teórico experimentales empleando dos tipos de geometría herramientas en dos tipos de máquinas, para el desarrollo del proceso y su posterior comparación.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Establecer una metodología de trabajo que emplee modelos matemáticos para el cálculo de la eficiencia térmica del proceso SFA.
2. Medir los parámetros de operación que intervienen en la entrada de calor y trabajo mecánico en el proceso SFA, mediante dispositivos y equipos especializados bajo las distintas condiciones operaciones, para alimentar los modelos establecidos en la metodología.
3. Determinar la eficiencia térmica del proceso SFA, relacionando el trabajo mecánico realizado por la máquina empleada y la energía transferida en forma de calor a la junta soldada.
4. Establecer las variables que influyen significativamente en la eficiencia térmica del proceso de soldadura SFA

METODOLOGÍA

Figura 8. Metodología de trabajo para la evaluación energética del proceso SFA



DISCUSIÓN Y RESULTADOS

EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO SFA BAJO DISTINTAS CONDICIONES

Tabla 4. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina especializada SFA, empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de adherencia

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Torque	Yield Stress	Entrada de Calor al proceso	Potencia Mecánica	Eficiencia Térmica
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	Fz (N)	τ (Nm)	σ_{yield} (Pa)	Q (w)	Pmec (w)	%
Plana	201509170001	1000	100	1326,67	4200	11	6.350.853	1107,76	1154,13	95,98

Tabla 5. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina especializada SFA, empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de deslizamiento

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Coefficiente de fricción	Torque Calculado	Esfuerzo de Contacto	Entrada de Calor del proceso	Potencia Mecánica	Eficiencia Térmica
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	Fz (N)	@°C	τ (Nm)	Tcontacto (Pa)	Q (w)	Pmec (w)	%
Plana	201509170001	1000	100	1326,67	4200	0,337	11,04	5.562.158	970,19	1158,32	83,76

Experimental Calculado Ajustado Resultado Teórico

EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO SFA BAJO DISTINTAS CONDICIONES

Tabla 6. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina especializada SFA, empleando una herramienta de hombro concéntrico para el enfoque de adherencia

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Torque	Yield Stress	Entrada de Calor al Proceso	Potencia Mecánica	Eficiencia Térmica
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	Fz (N)	T (Nm)	σ_{yield} (Pa)	Q (w)	Pmec (w)	%
Concéntrica	201509170000	1000	100	64,32	3449,28	13,73	6.350.853	1107,76	1437,91	77,04

Tabla 7. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina especializada SFA, empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de deslizamiento

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Coefficiente de fricción	Torque	Esfuerzo de Contacto	Entrada de Calor al Proceso	Potencia Mecánica	Eficiencia Térmica
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	Fz (N)	@°C	τ (Nm)	$\tau_{contacto}$ (Pa)	Q (w)	Pmech (w)	%
Concéntrica	201509170000	1000	100	64,32	3449,28	0,47	13,73	6.370.749	1111,23	1437,91	77,28

Experimental		Calculado		Ajustado		Resultado		Teórico	
--------------	--	-----------	--	----------	--	-----------	--	---------	--

EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO SFA BAJO DISTINTAS CONDICIONES

Tabla 8. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada para SFA, empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de adherencia

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Torque	Yield Stress	Entrada de Calor al Proceso	Potencia Mecánica	Eficiencia Térmica
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	Fz (N)	T (Nm)	σ_{yield} (Pa)	Q (w)	Pmec (w)	%
Plana	201306250001	100	1000	1326,67	4200	11,04	6.350.853	1107,76	1158,32	95,63

Tabla 9. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada para SFA, empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de deslizamiento

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Coefficiente de fricción	Torque	Esfuerzo de Contacto	Entrada de Calor al Proceso	Potencia Mecánica	Eficiencia Térmica
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	Fz (N)	@°C	τ (Nm)	tcontacto (Pa)	Q (w)	Pmec (w)	%
Plana	201306250001	100	1000	1326,67	4200	0,337	11,04	5.562.158	970,19	1158,32	83,76

Experimental		Calculado		Ajustado		Resultado		Teórico	
--------------	--	-----------	--	----------	--	-----------	--	---------	--

EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO SFA BAJO DISTINTAS CONDICIONES

Tabla 10. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada para SFA, empleando una herramienta de hombro en espiral para el enfoque de adherencia

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Torque	Yield Stress	Entrada de Calor al Proceso	Potencia Mecánica	Eficiencia Térmica
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	Fz (N)	T (Nm)	σ_{yield} (Pa)	Q (w)	Pmec (w)	%
Espiral	201306250002	97	900	1326,67	7466,67	14,69	6.350.853	996,98	1386,65	71,9

Tabla 11. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada SFA, empleando una herramienta de hombro en espiral para el enfoque de deslizamiento

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Coefficiente de fricción	Torque	Esfuerzo de Contacto	Entrada de Calor al Proceso	Potencia Mecánica	Eficiencia Térmica
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	Fz (N)	@°C	τ (Nm)	$\tau_{contacto}$ (Pa)	Q (w)	Pmec (w)	%
Espiral	201306250002	97	900	1326,67	4200	0,409	14,69	6.756.013	1060,59	1386,65	76,49

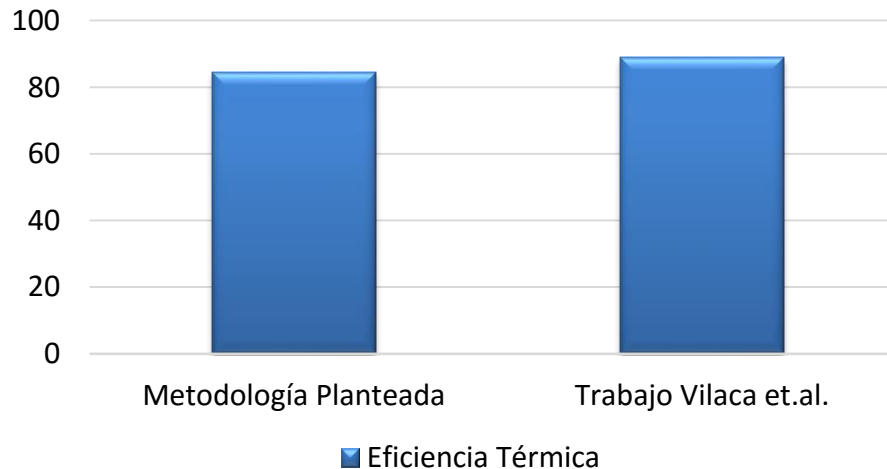
Experimental		Calculado		Ajustado		Resultado		Teórico	
--------------	--	-----------	--	----------	--	-----------	--	---------	--

EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO SFA BAJO DISTINTAS CONDICIONES

TABLA 12. Aplicación del modelo de enfoque de deslizamiento al trabajo realizado por Vilaça et. al. (2007) [6]

Descripción Aplicación No. 1	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Fuerza Axial	Torque	Coefficiente de fricción	Potencia Mecánica	Esfuerzo de Contacto	Entrada de Calor al Proceso	Eficiencia Térmica
	w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (kN)	Fz (kN)	τ (Nm)	@°C	Pmec (w)	τ_{contacto} (Pa)	Q (w)	%
Hombro concavo y pin roscado cilindrico	800	100	1,8	11	34	0,47	2980,67	82873386	2376,16	83,3%
	800	100	2,3	11	40	0,47	3354,23	105475219	3024,21	90,2%
	800	200	2,7	14	45	0,47	4197	105475219	3024,21	80,0%

Eficiencia Térmica



CONCLUSIONES

- Las eficiencias térmicas alcanzadas para el proceso fueron elevadas en todos los casos analizados ($\eta \geq 0.72$). Para el caso en el cual se empleó la herramienta plana en una maquina fresadora adaptada para el proceso y una maquina especializada en SFA se presentaron en ambos casos eficiencias por encima del 90% para el modelo de adherencia y para el modelo de deslizamiento por encima del 80%, lo que evidencia una diferencia de aproximadamente 10% entre ambos enfoques estudio. Por el contrario, en el caso de la soldadura con herramienta de hombro modificado, concéntrico y en espiral los valores de eficiencia están en el orden de un 82 a un 88%, por lo cual la diferencia entre los enfoques de los modelos es mínima.
- En las herramientas con perfiles modificados se presentan ciclos térmicos con temperaturas uniformes y hay mayor trabajo plastificante; mientras que para las herramientas con perfil de hombro plano un perfil de temperatura con mayor pendiente, logrando un mayor trabajo generando calor que deformando el material. Por ende, al emplear el modelo de adherencia en soldadura con herramientas de perfil plano debido a que las variables empleadas dependen de la temperatura, este modelo logra ajustarse mejor al proceso que el modelo de deslizamiento.

CONCLUSIONES

- La metodología aplicada demostró que permite el cálculo de la eficiencia térmica del proceso para cualquier estudio a desarrollar o desarrollado. No obstante, requiere de un cálculo preciso de la temperatura de trabajo en la zona agitada para poder dar una buena aproximación en el valor del torque, de no tenerse se puede emplear la temperatura límite de medición del esfuerzo de fluencia del material a soldar.
- Esta metodología a pesar de ser robusta permite evidenciar la sensibilidad de las variables de salida y proceso. Las variables a las cuales la eficiencia térmica presenta alta sensibilidad son: el coeficiente de fricción μ , la fuerza axial F_z , la temperatura de la zona agitada, el torque τ y la velocidad rotacional w .

BIBLIOGRAFÍA

[1] Jerry E. Gould y Zhili Feng, "Heat Flow Simulation For Friction Stir Welding Of Aluminum Alloys", Journal of Materials Processing and manufacturing Science, vol. 7, pp 185-194, 1998.

[2] Isaith Berdugo y Rafael Ospino, "Influencia De La Geometría De La Herramienta Sobre Los Parámetros De Soldadura Por Fricción-Agitación-SFA En Aleaciones De Aluminio AA1100-H14", Tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia 2013

[3] Jorge Luis Pacheco Yepes, "Modelado dinámico del aporte de calor en juntas soldadas de aleaciones de aluminio de la serie 5xxx obtenidas con procesos de soldadura al arco con protección gaseosa", Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia 2014.

[4] Orlanis Murillo Murillo, "Desarrollo Del Proceso De Soldadura FSW A Partir De Una Maquina Fresadora"., Tesis de pregrado Universidad del valle, Santiago de Cali, Colombia. 2008.

[5] Welding Engieneer, Acceso 12 Octubre 2016, disponibles: <http://www.weldingengineer.com/>

[6] Pedro Vilaça, Luísa Quintino, Jorge F. dos santos, Rudoft Zettler y Sharham Sheikhi, "Quality assessment of friction stir welding joints via an analytical thermal model, iSTIR," Materials Science and Engineering, pp. 501-508, lisboa, Portugal, 2007

BIBLIOGRAFÍA

- [7] Terry Dickerson, Qing-yu Shi y Hugh R. Shercliff, "Heat Flow Into Friction Stir Welding Tools," de 4th International Symposium on Friction Stir Welding, pp. 1-11 Utah, USA, 2003
- [8] H. B. Schmidt y J. H. Hattel, "An analytical model of the heat generation in friction stir welding," » Modeling And Simulation In Materials Science And Engineering," vol 58, pp. 143-157, Denmark, 2004
- [9] Yuh J. Chao, X. Qi y W. Tang "Heat Transfer in Friction Stir Welding- Experimental and Numerical Studies," Transactions of the ASME, pp. 138-145, Columbia, USA 2003.
- [10] J. Cui, Z. W. Chen y J. D. Robson., "A Model Relating Tool Torque And Its Associated Power And Specific Energy To Rotation And Forward Speeds During Friction Stir Welding/Processing," vol. 50 pp. 1023-1030, Manchester UK 2010
- [11] J. A. Querin, y J.A. Schneider "Developing An Alternative Heat Indexing Equation For FSW," vol. 91 pp. 76-82, 2012
- [12] Moataz. Attallah, "Microstructure-Development of Friction Stir Welds in Aluminium-Based Alloys", Tesis Doctorado, Universidad de Birmingham Inglaterra, 2007.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN