

Caracterización de las **PARTÍCULAS ULTRAFINAS** en suspensión generadas por la *soldadura de planchas de acero*

Este estudio se centra en la caracterización de las partículas ultrafinas emitidas durante el proceso de soldadura de acero utilizando mezclas de Ar+CO₂, y su objetivo es analizar cuáles son, de entre los parámetros principales del proceso, aquellos que pueden influir en la propia emisión. Se halló que la cantidad de partículas ultrafinas emitidas (medidas en número de partículas y área de la superficie de depósito en la región alveolar) depende claramente de la distancia al frente de soldadura, así como de los principales parámetros de la soldadura, a saber: la intensidad de la corriente y el aporte térmico durante el proceso. La emisión de partículas ultrafinas en suspensión parece aumentar con la intensidad de la corriente, al igual que la tasa de formación de humo. Al comparar las mezclas de gas testadas, se observa una emisión mayor en las mezclas más oxidativas, es decir, mezclas con un mayor contenido de CO₂, que proporcionan una mayor estabilidad del arco. Estas mezclas generan concentraciones mayores de partículas ultrafinas (medidas en número de partículas por cm³ de aire) y una mayor área de la superficie de depósito de las partículas en la región alveolar, lo que incrementa la peligrosidad de la exposición del trabajador.

Por **J.F. GOMES**. IBB – Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia / Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Área Departamental de Engenharia Química. UNIDEMI, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, FCT, Universidade Nova de Lisboa. **R. M. MIRANDA**. ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Área Departamental de Engenharia Química.

La soldadura de arco se utiliza ampliamente en la construcción con metal en todo el mundo. Sin embargo, puede generar humos peligrosos que pudieran resultar perjudiciales para la salud del soldador ⁽¹⁾ y se estima que, en la actualidad, entre el 1 y el 2 por ciento de los trabajadores de distintos ámbitos profesionales (lo que supone más de 3 millones de personas) están sometidos a humos de soldadura y a la acción del gas ⁽²⁾. Estos autores han demostrado también una correlación entre los parámetros del proceso bajo gas activo (MAG), es decir, de los modos de transferencia del metal aportado, y la cantidad de humos formados, expresada como tasa de formación de humos. Además, las mezclas de gas también influyen en los humos (cantidad y composición), ya que a mayor contenido de oxígeno en el gas, mayor es la formación de humos que



se observa. Con la aparición de nuevos tipos de procedimientos de soldadura y nuevos consumibles, el número de soldadores expuestos a los humos de soldadura crece constantemente, a pesar de la mecanización y la automatización de los procesos⁽³⁾. Al mismo tiempo aumenta también el número de publicaciones sobre estudios epidemiológicos⁽⁴⁾ y de dispositivos de protección para soldadores. Aparte de esto, también se ha señalado con gran preocupación el efecto de las partículas ultrafinas, de rango nanométrico, en la salud humana⁽⁵⁻⁷⁾, dado que los procesos industriales macroscópicos comunes, como la soldadura, pueden generar también partículas ultrafinas en suspensión⁽⁸⁻⁹⁾. Ya hace mucho tiempo que se admitió el efecto perjudicial para la salud de la inhalación de aerosoles ultrafinos y se han hecho diversos esfuerzos para minimizar la exposición a los mismos, tales como reglamentos específicos sobre emisiones y la fijación de objetivos de calidad del aire en microambientes de trabajo.

Al considerar la exposición humana a los contaminantes del aire, resulta de gran interés la exposición a las partículas en suspensión, y en concreto a sus fracciones más finas, como las partículas submicrónicas. Los límites de exposición vigentes en los centros de trabajo, que se determinaron hace ya mucho tiempo, se basan en la masa de la partícula, pero este criterio podría no resul-

Hace tiempo ya se admitió el efecto perjudicial para la salud de la inhalación de aerosoles ultrafinos y se han hecho esfuerzos para minimizar la exposición a los mismos

Latinstock

tar del todo adecuado en lo que se refiere a las nanopartículas, ya que estos materiales se caracterizan de hecho por tener un área de superficie de gran tamaño (tomando como referencia un mismo volumen, las nanopartículas tiene un área de superficie mayor que las micropartículas, por ejemplo), lo que se ha señalado como una característica distintiva que podría llegar a convertir una sustancia inerte en tóxica, aun conservando la misma composición química, pero mostrando interacciones muy distintas con los fluidos biológicos y las células ⁽¹⁰⁻¹¹⁾. Por tanto, cada vez cobra mayor interés la evaluación de las condiciones de trabajo y de la exposición personal sobre la base del área de la superficie de las partículas. Es bien sabido que el depósito en los pulmones es la vía más expeditiva para que las partículas en suspensión entren en el cuerpo y sean causa potencial de efectos adversos para la salud. Si las partículas ultrafinas se instalan en los pulmones y permanecen en

Para evaluar la exposición es importante conocer el área de la superficie de las partículas ultrafinas emitidas, ya que pueden depositarse en los pulmones o pasar al sistema circulatorio

ellos se producirá actividad química en superficie e interactuarán con el cuerpo, y existirá entonces potencial para la exposición y la dosificación. Oberdörster ⁽¹²⁾ demostró que el área de la superficie desempeña un papel importante en la toxicidad de las nanopartículas, y es esta la medición que muestra una correlación más directa con los efectos adversos para la salud provocados por las partículas. Por tanto, con el fin de poder evaluar la exposición, es importante conocer el área de la superficie de las partículas ultrafinas emitidas, ya que potencialmente pueden depositarse en la parte inferior de los pulmones, como en los alvéolos, y obstruirlos, o incluso pasar al sistema circulatorio, lo que provoca su distribución en distintos órganos finales ⁽¹³⁾.

En 1996, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) desarrolló un modelo integral de depósito pulmonar para los aerosoles radioactivos. Son necesarios varios parámetros para construir el modelo: frecuencia respiratoria, volumen pulmonar, actividad, respiración nasal/bucal, etc., y las curvas de depósito que se obtienen a partir del modelo (para el depósito en las regiones traqueo-bronquial y alveolar) pueden variar en función de estos parámetros. Para las aplicaciones de higiene industrial, ACGIH ⁽¹⁴⁾ definió un trabajador de referencia a fin de obtener las curvas correspondientes al depósito en las regiones traqueo-bronquial y alveolar de los pulmones. Sobre la base del modelo de la ICRP, la curva del depósito traqueo-bronquial representa la fracción de aerosol que se deposita en la región traqueo-bronquial de los pulmones, mientras que la curva de depósito alveolar representa la fracción de aerosol que se deposita en la región alveolar de los pulmones. Dependiendo del aerosol objeto de análisis y al objeto de valorar la exposición, lo más frecuente es probar aerosoles que se depositan en una zona específica de los pulmones humanos. Por lo que respecta a las partículas ultrafinas, debido a su muy reducida dimensión, los efectos en la salud estarían relacionados con su depósito profundo en las regiones alveolares de los pulmones, por lo que la medida que cobra interés es la fracción respirable del aerosol, ya que es interesante calcular la superficie potencial de los alvéolos que quedará obstruida por la presencia de esas partículas ultrafinas.

Este trabajo está en línea con los trabajos preliminares de estos autores que demostraban la presencia de partículas



Latinstock

Tabla 1. Composición química de los materiales utilizados como base (% w/w)

Tipo de acero	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	N
S235 JR	0.017	1.40	0.035	0.035	–	nada	nada	–
AISI 304	0.08	2.0	0.045	0.030	0.75	8.0-10.5	18-20.0	0.10

Tabla 2. Composición química del alambre sólido utilizado (% w/w)

Tipo de alambre	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	Mo
AWS 5.18 ER70S-6	0.06-0.15	–		0.35	0.8-1.15	0.15	0.15	0.50	0.15
AWS A5.9 ER316 LSi	0.03	1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	11-14	18-20	0.75	2.0-3.0

ultrafinas en los procesos de soldadura, por ejemplo bajo gas activo (MAG) ^(4,15), y tiene por objeto evaluar las emisiones de partículas ultrafinas emitidas en la soldadura en acero, a la vez que intenta correlacionarlas con los parámetros que intervienen en el proceso y, por tanto, con los modos de transferencia del metal fundido aportado. Se han llevado a cabo otros estudios similares sobre humos de soldadura generados en otros procesos, tales como la soldadura manual por arco metálico (MMA), la soldadura de arco bajo gas inerte (MIG) y la soldadura de arco de gas con electrodo de tungsteno (TIG) para electrodos de acero inoxidable ⁽¹⁶⁾. Los estudios precedentes no valoraron el área de la superficie de depósito de las partículas emitidas.

Materiales y métodos

Las pruebas de soldadura MAG se efectuaron en laboratorio, utilizando un escenario experimental consistente en una máquina automática de soldadura Kemppi, modelo ProMig 501, controlada, que aseguró un arco eléctrico estable y una velocidad de soldadura constante y, por tanto, la posibilidad de repetir el proceso de soldadura.

Se hicieron cordones de soldadura sobre placas de acero al carbono de 3 mm de grosor S235 JR con la composición química que se muestra en la Tabla 1. La prueba se realizó también en placas de acero inoxidable austenítico de 10 mm de grosor AISI 304 con la composición química que se muestra tam-

bién en la Tabla 1. Los consumibles de soldadura utilizados fueron un alambre sólido AWS 5.18 ER79S-6 de 1 mm de diámetro para el acero al carbono y un alambre sólido AWS ER316 LSi de 0,8 mm de diámetro para el acero inoxidable. La composición de ambos alambres se muestra en la Tabla 2. Los parámetros operativos utilizados se muestran en la Tabla 3 para el acero al carbono y en la Tabla 4 para el acero inoxidable. Se testaron distintas condiciones de soldadura, variando la mezcla del gas de protección, la intensidad de la corriente y el voltaje, a fin de producir modos de transferencia de cortocircuito, modular y spray. La máquina de soldadura ajustó automáticamente el voltaje en función de la velocidad de alimentación del alambre. Las

Tabla 3. Condiciones de la prueba experimental de soldadura de acero al carbono

Mezcla de gas		ARCAL 21 (90% Ar + 10% CO ₂)		
Prueba		1	2	3
Velocidad de alimentación del alambre (m/min)		4.0	6.3	11.2
Modo de transferencia		Cortocircuito	Globular	Spray
Mezcla de gas		ATAL (82% Ar + 18% CO ₂)		
Prueba		1	2	3
Velocidad de alimentación del alambre (m/min)		4.0	6.3	No logrado
Modo de transferencia		Cortocircuito	Globular	Spray
Mezcla de gas		100% CO ₂		
Prueba		1	2	3
Velocidad de alimentación del alambre (m/min)		5.0	7.5	No logrado
Modo de transferencia		Cortocircuito	Globular	Spray

Tabla 4. Condiciones de la prueba experimental de soldadura de acero inoxidable

Mezcla de gas		ARCAL 12 (95% Ar + 5% CO ₂)		
Prueba		1	2	3
Velocidad de alimentación del alambre (m/min)		5.0	7.0	9.0
Modo de transferencia		Cortocircuito	Globular	Spray
Mezcla de gas		ARCAL 121 (81% Ar + 18% He + 1% CO ₂)		
Prueba		1	2	3
Velocidad de alimentación del alambre (m/min)		5.0	7.0	9.0
Modo de transferencia		Cortocircuito	Globular	Spray
Mezcla de gas		ARCAL 129 (91% Ar + 5% He + 2% CO ₂ + 2% N ₂)		
Prueba		1	2	3
Velocidad de alimentación del alambre (m/min)		6.0	7.0	9.8
Modo de transferencia		Cortocircuito	Globular	Spray

condiciones de cada ensayo se repitieron dos veces. Las pruebas se separaron entre sí con intervalos de tiempo que permitieran cierta disipación del aerosol en la atmósfera cerrada de la zona de pruebas.

El gas de protección se seleccionó entre las mezclas industriales de uso más frecuente que generan grandes cantidades de humo de soldadura⁽¹⁷⁾, lo que implica grandes cantidades de dióxido de carbono y oxígeno para mejorar la penetración y la anchura del cordón. De entre los modos de transferencia de metal fundido más utilizados en soldadura⁽¹⁷⁾, también se optó por aquellos que producen gran cantidad de humo. Todas las pruebas de soldadura se realizaron en posición plana. Air Liquide fue el proveedor de las mezclas gaseosas.

A fin de evaluar las emisiones de partículas ultrafinas en el ambiente circundante a la soldadura, la prueba se realizó como se muestra en la Figura 1 (utilizando NSAM). Durante la prueba se apagó el extractor y las puertas y ventanas del taller se mantuvieron cerradas.

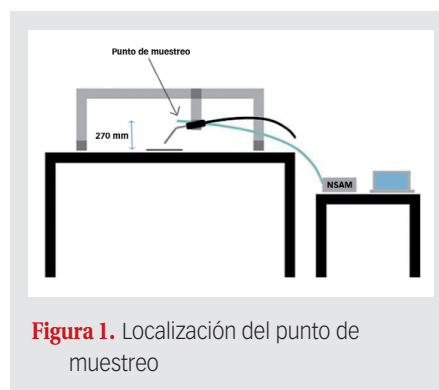


Figura 1. Localización del punto de muestreo

Para medir la exposición a las partículas ultrafinas se utilizó un monitor NSAM TSI, modelo 3550, que mide el área de la superficie de las partículas depositadas en los pulmones humanos, concretamente en la región alveolar - ADSA (del inglés *Alveolar Deposited Surface Area*), expresada como micrómetros cuadrados por centímetro cúbico de aire ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$). El funcionamiento de este equipo se basa en la difusión de la carga de las partículas de la muestra con independencia de su tamaño, forma y aglomeración, como analiza Gomes⁽⁴⁾, seguida de la detección de la carga del aerosol

utilizando un electrómetro, como se describe en otro lugar⁽¹⁵⁾, y calcula el área de la superficie de las partículas ultrafinas susceptibles de depósito en la región alveolar del pulmón, utilizando el modelo de depósito de ACGIH⁽¹⁴⁾ antes citado. Debido a la inexistencia de un valor límite de exposición específico para partículas ultrafinas, para cada medición se obtuvo un valor base a efectos de comparación.

Asimismo, se recogieron partículas utilizando un muestreador de aerosoles (*Nanometer Aerosol Sample-NAS*) TSI, modelo 3089, con rejillas de cobre de 3 mm de diámetro recubiertas de polímero para su observación posterior mediante microscopio de transmisión electrónica (TEM), Hitachi, modelo H-8100 II, equipado con sonda para espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS).

Resultados y análisis

Los datos medidos en cada prueba de soldadura se recogen en las siguientes figuras como sigue: figuras 2 a 4, referidas al acero al carbono, y figuras 5 a 7, al acero inoxidable. En cada una de ellas, la cifra más alta representa el ADSA, expre-

El gas de protección empleado en la prueba se seleccionó entre las mezclas industriales de uso más frecuente que generan grandes cantidades de humo de soldadura

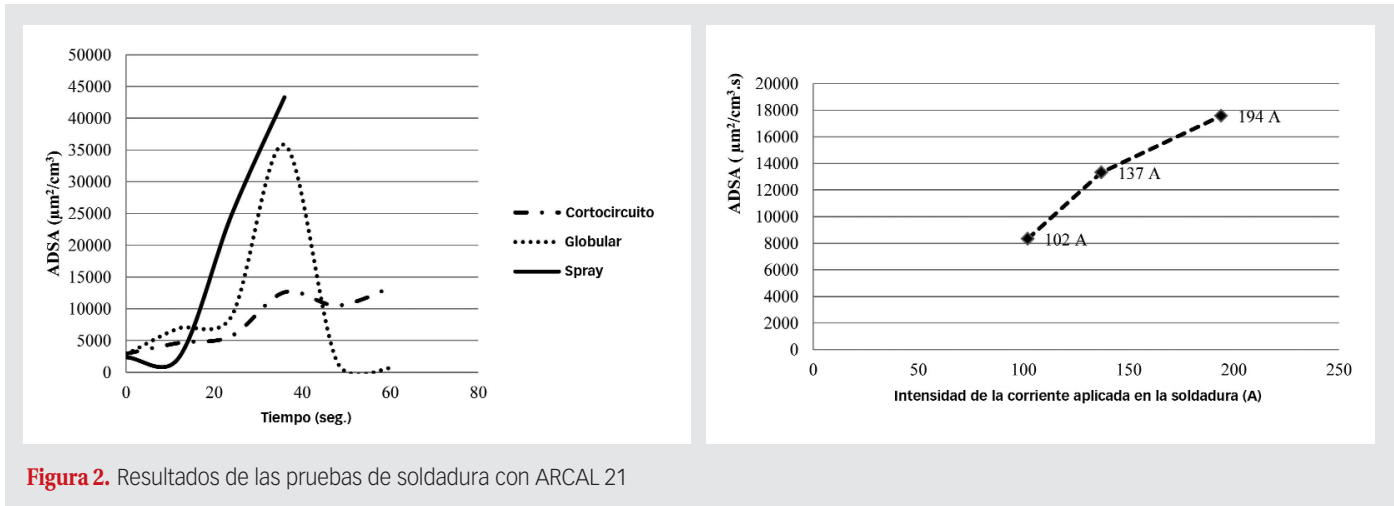


Figura 2. Resultados de las pruebas de soldadura con ARCAL 21

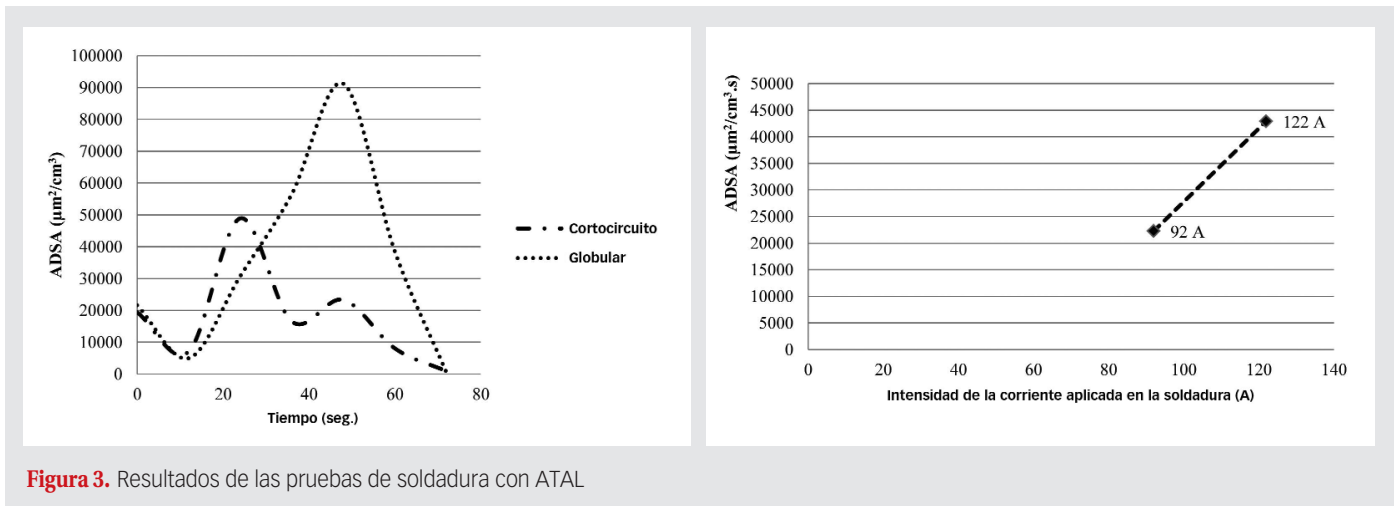


Figura 3. Resultados de las pruebas de soldadura con ATAL

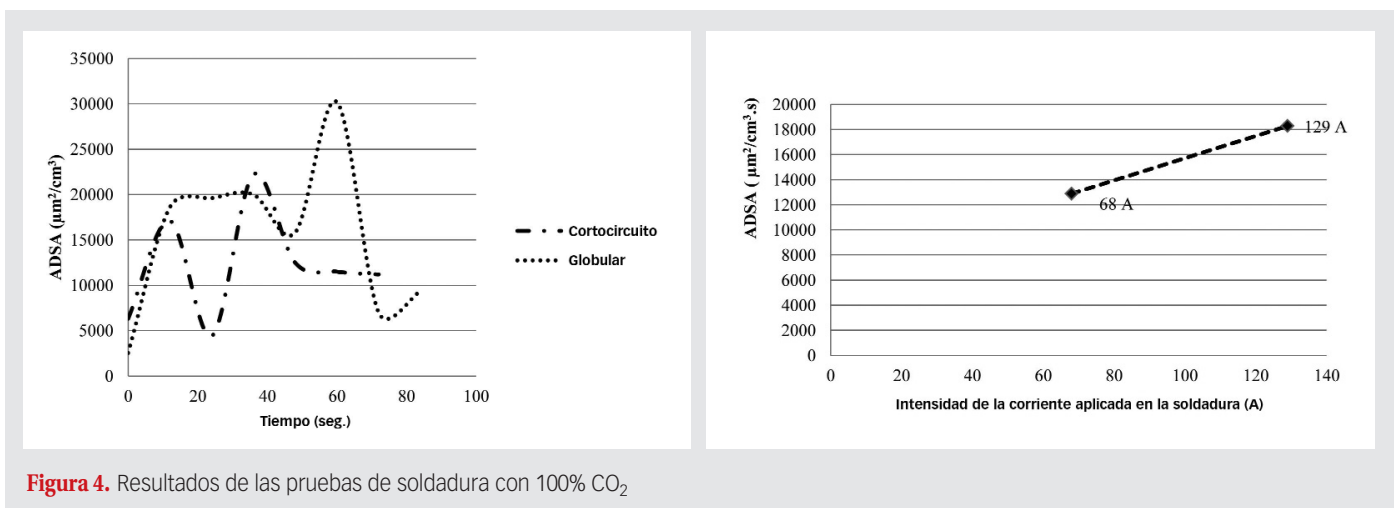


Figura 4. Resultados de las pruebas de soldadura con 100% CO_2

sado en micrómetros cuadrados por centímetro cúbico de aire ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), correspondiente a la región alveolar de los pulmones, en función del tiempo de exposición para cada modo de transferencia (cortocircuito, globular y spray).

La figura inferior representa el ADSA en función de la intensidad de la corriente aplicada en la soldadura.

Debe señalarse que estos gráficos no muestran los datos puntuales del ADSA, sino las curvas integradas co-

rrespondientes a todo el tiempo de soldadura, lo que significa que los gráficos muestran los valores del ADSA acumulados durante toda la prueba. Las pruebas de soldadura duraron entre 30 y 84 segundos.

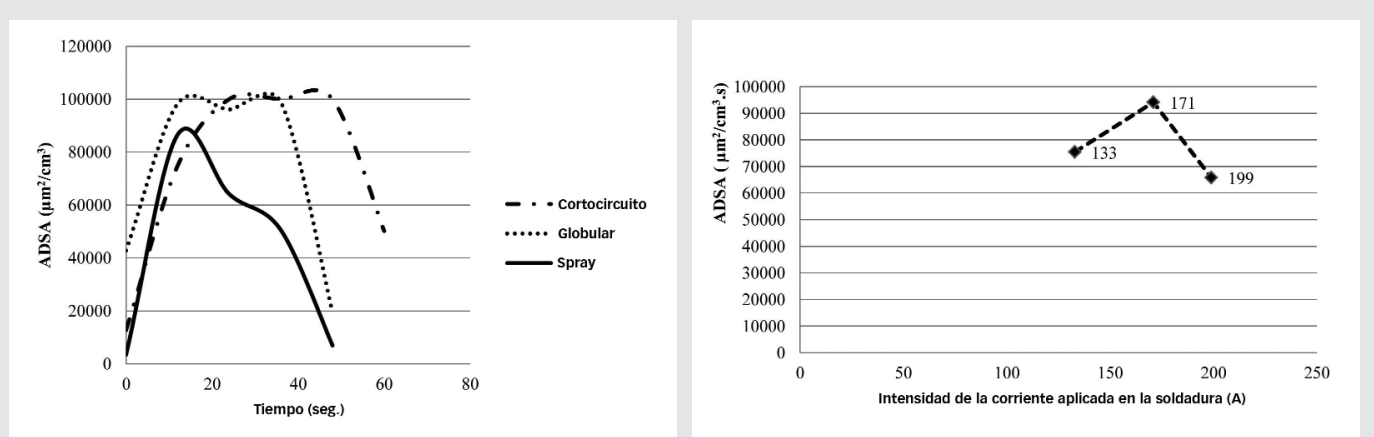


Figura 5. Resultados de las pruebas de soldadura con ARCAL 121

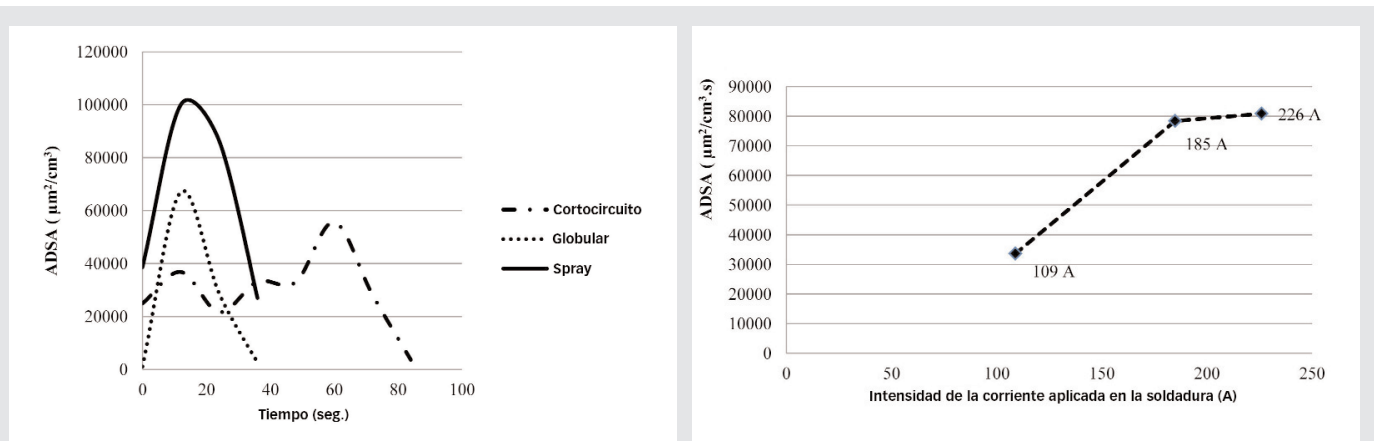


Figura 6. Resultados de las pruebas de soldadura con ARCAL 129

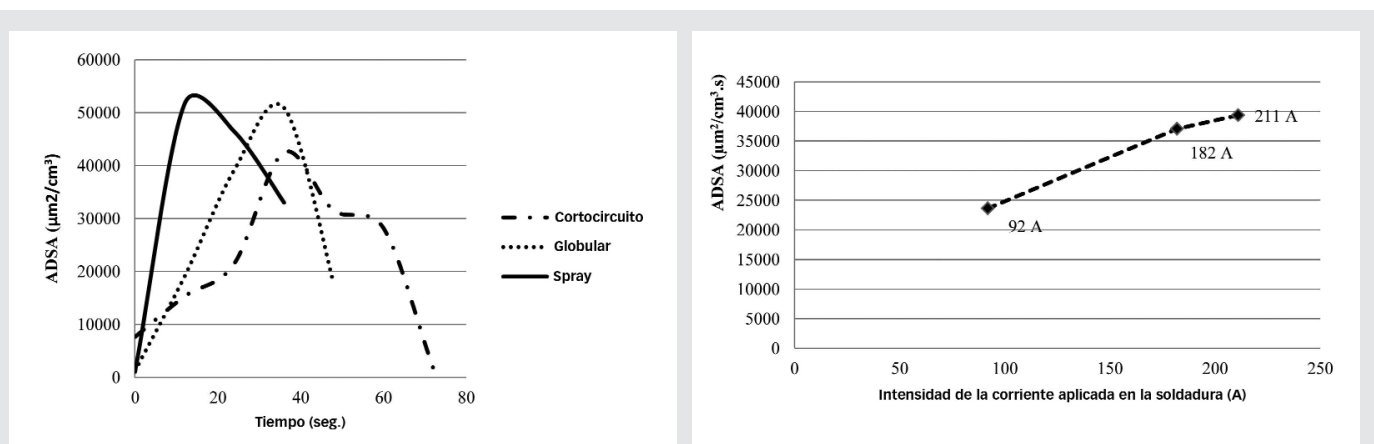


Figura 7. Resultados de las pruebas de soldadura con ARCAL 12

Se puede ver que tanto los modos de transferencia aplicados como las mezclas de gas utilizadas influyen notablemente en la emisión de nanopartículas. La Tabla 5 muestra los valores medios del ADSA obtenidos durante la prueba de soldadura con acero al carbono.

Para la mezcla de gas ARCAL 21, el modo de transferencia spray es el que arroja valores más altos del ADSA, y lo mismo ocurre con las otras mezclas gaseosas: los valores del ADSA aumentan al incrementar los valores

en los parámetros que intervienen en la soldadura. Cabría esperar que los valores más altos del ADSA se obtuvieran para el cien por cien de CO_2 ; sin embargo, no fue este el comportamiento obtenido para esa mezcla de gases, sino para ATAL, con

Tabla 5. Valores medios del ADSA obtenidos durante las pruebas de soldadura de acero al carbono

Mezcla de gas y modo de transferencia utilizados	ADSA media ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$)		
	ARCAL 21	ATAL	100% CO ₂
Cortocircuito	8.325	22.266	12.899
Globular	13.306	42.896	18.292
Spray	17.574	–	–

Tabla 6. Valores medios del ADSA obtenidos durante la prueba de soldadura de acero inoxidable

Mezcla de gas y modo de transferencia utilizados	ADSA media ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$)		
	ARCAL 12	ARCAL 121	ARCAL 129
Cortocircuito	23.637	75.390	33.644
Globular	37.054	94.136	78.361
Spray	39.376	65.829	80.861

solo el 18 por ciento de CO₂. Con el uso de ATAL, los valores del ADSA más altos se obtuvieron en el modo de transferencia de cortocircuito, en lugar de en el modo spray, lo que se corresponde con una mayor intensidad de corriente.

La Tabla 6 muestra los valores medios del ADSA obtenidos para la solda-

dura de acero inoxidable: de nuevo, los valores del ADSA se incrementan al aumentar la intensidad de la corriente, excepto con ARCAL 121, lo que era de esperar, teniendo en cuenta que el modo spray arroja resultados más altos que los del modo de transferencia globular. Esto podría deberse a los parámetros de

soldadura utilizados: posiblemente la intensidad de corriente utilizada (199 A) representa una zona en la que la tasa de emisión de humos es relativamente baja, como se muestra en la Figura 8, lo que genera un valor menor en comparación con los otros modos de transferencia. De hecho, ARCAL 121 es la mezcla gaseosa que provoca mayores emisiones de nanopartículas, medidas en ADSA. Otra causa posible está relacionada con el alto contenido en He en la mezcla gaseosa (18 por ciento): dado que el He tiene un valor de energía de ionización muy alto, 24.58 eV, el resultado es un arco

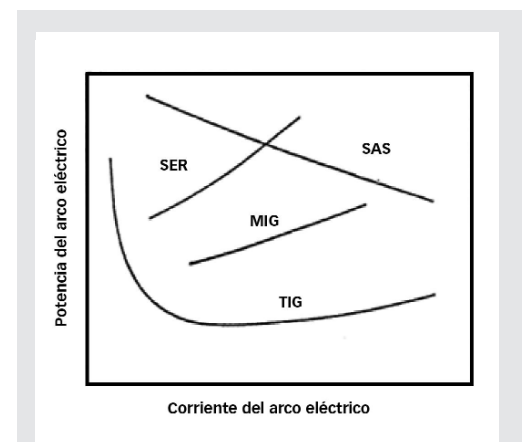
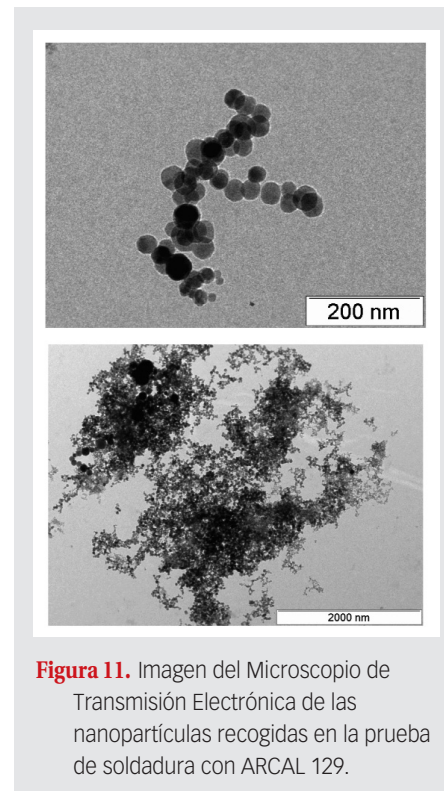
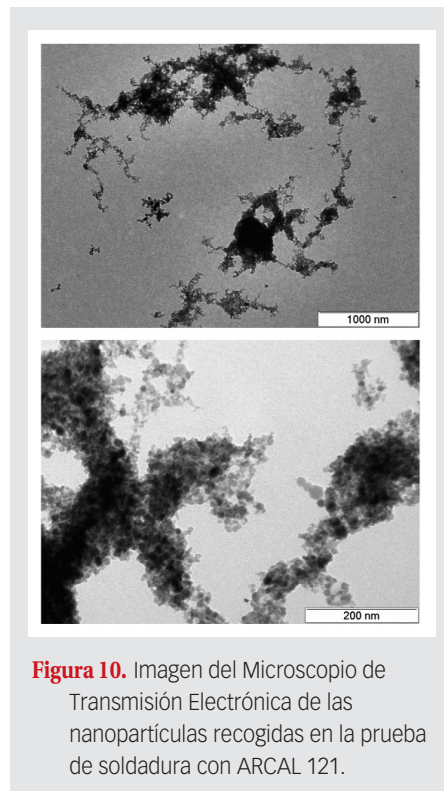
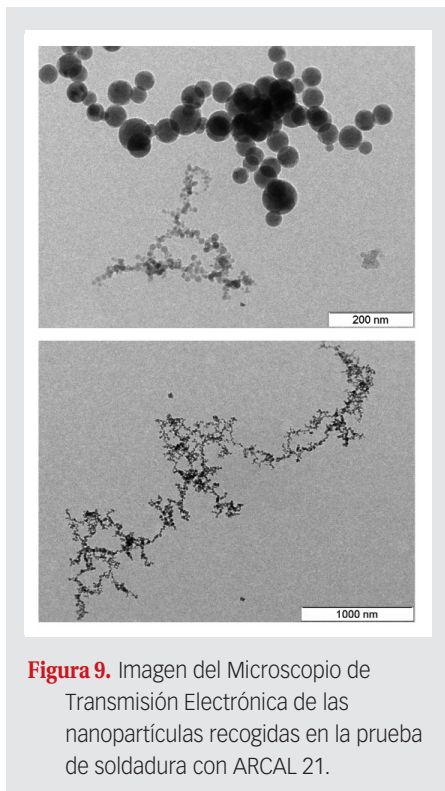


Figura 8. Relación entre potencia del arco eléctrico y corriente en distintos procesos de soldadura⁽¹⁷⁾



eléctrico con temperaturas más elevadas capaces de producir una mayor volatilización de elementos tanto del material de base como de los consumibles.

Al comparar las tablas 5 y 6, es posible observar también que el valor del AD-SA es mayor en la soldadura en acero inoxidable que en la soldadura en acero al carbono.

Las figuras 9 a 11 muestran las nanopartículas recogidas con el equipo NAS: la Figura 9 muestra las partículas de la soldadura de acero al carbono con ARCAL 21 y las figuras 10 y 11 se refieren a la soldadura en acero inoxidable con ARCAL 121 y ARCAL 129, respectivamente.

Las nanopartículas que se muestran en la Figura 9 son esféricas, amorfas y su dimensión oscila entre 10 y 90 nm, presentándose agregadas. Con respecto a la soldadura en acero inoxidable, las nanopartículas son también esféricas y amorfas, aglomeradas, con dimensiones de entre 10 y 40 nm.

Se sometió a las partículas a análisis



Latinstock

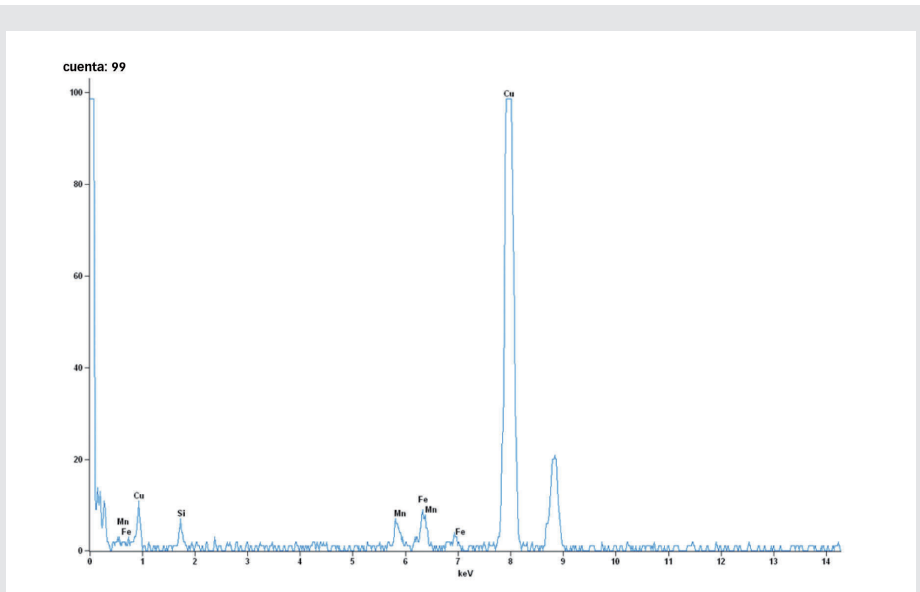


Figura 12. Composición química de las nanopartículas recogidas en la prueba de soldadura con ARCAL 21

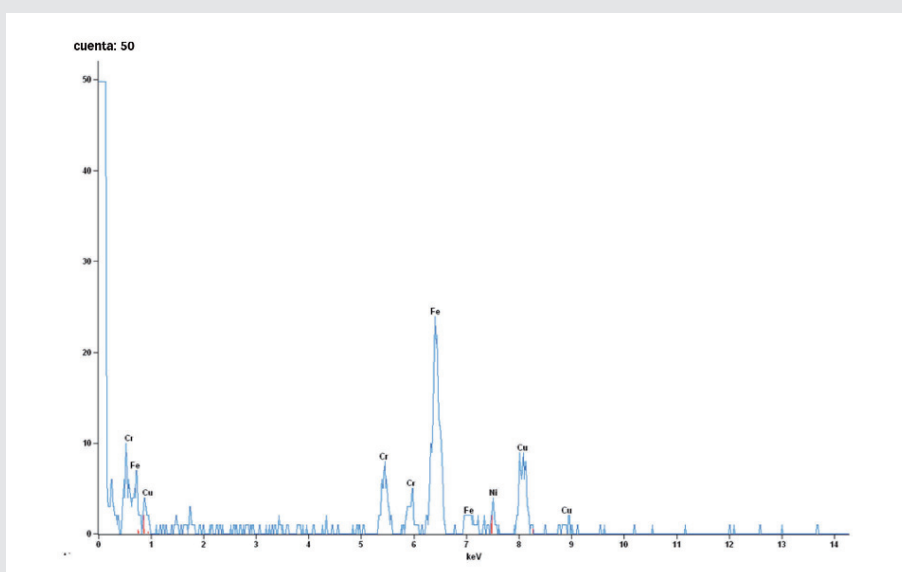


Figura 13. Composición química de las nanopartículas recogidas en la prueba de soldadura con ARCAL 129

químico por EDS, y los espectros obtenidos se recogen en las figuras 12 y 13 para el acero al carbono (ARCAL 21) y para el acero inoxidable (ARCAL 129), respectivamente. En cuanto al acero al carbono, los elementos detectados fueron hierro, silicio y manganeso (también se observa cobre, pero su presencia se

debe a la rejilla utilizada para la recogida de las nanopartículas). En el caso del acero inoxidable, los elementos detec-

tados fueron hierro, cromo y níquel, que confirman su origen: tanto el material de base como el consumible.

Conclusiones

De este trabajo pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La emisión de nanopartículas, medidas en ADSA, se incrementa con el aumento de valor en los parámetros de la soldadura, como la intensidad de la corriente y la tensión.
- Respecto de los modos de transferencia estudiados, el modo spray es el que arroja valores más altos de emisión de nanopartículas.
- El modo de cortocircuito arrojó los valores medios del ADSA más bajos para todas las mezclas gaseosas testadas. Debe señalarse que este modo de transferencia es el que muestra los valores más bajos de intensidad de corriente y de tensión, lo que tiene como resultado una menor temperatura del arco eléctrico y, por tanto, menor volatilidad de los elementos del material de base y de los consumibles.
- El modo de transferencia globular, en la mayoría de las condiciones testadas, genera valores intermedios del ADSA entre los del modo cortocircuito y el modo spray. Este modo de transferencia es conocido por generar inestabilidad en el arco, de lo que resulta que no es la inestabilidad sino la temperatura del arco eléctrico la causa principal de emisión de nanopartículas.
- En relación con la soldadura de acero al carbono, la mezcla gaseosa compuesta por 82% Ar +18% CO₂ generó altos valores del ADSA, lo que no era

La emisión de nanopartículas, medidas en ADSA, se incrementa con el aumento de valor en los parámetros de la soldadura, como la intensidad de la corriente y la tensión

Las nanopartículas emitidas en las pruebas con acero inoxidable mostraron la presencia de níquel y cromo, que son elementos potencialmente carcinógenos

un resultado previsible, ya que estudios anteriores realizados sobre las emisiones de humos mostraron que la formación de humo es directamente proporcional a la presencia de CO₂ en la mezcla gaseosa.

- En relación con el acero inoxidable, la mezcla gaseosa compuesta por 81% Ar + 18% He + 1% CO₂ produce altos valores del ADSA, lo que parece estar motivado por la elevada presencia de He en la mezcla. Dado que el He tiene una gran energía de ionización, el arco eléctrico resultante alcanza mayor temperatura, lo que produce una mayor volatilización de los elementos tanto del material de base como del consumible.
- Comparando los materiales de base utilizados, cabe reseñar que los valores del



Latinstock

ADSA más elevados se obtuvieron para el acero inoxidable, comparado con el acero al carbono. Asimismo, las nanopartículas emitidas en las pruebas con acero inoxidable mostraron la presencia de níquel y cromo, que son elementos potencialmente carcinógenos.

- Las partículas recogidas, tanto en las pruebas con acero al carbono como en las del acero inoxidable, tenían dimensiones nanométricas, la mayoría de ellas entre 10 y 100 nm. ♦

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo prestado por FUNDACIÓN MAPFRE a través de la Beca Ignacio Hernando de Larramendi. Los autores agradecen también a Catarina Pereira, António Campos, Miguel Bento y Tiago Pereira su colaboración en el desarrollo de las pruebas de soldadura. Los autores expresan igualmente su agradecimiento al Dr. Telmo Santos, de FCT-UNL, por su ayuda en el análisis de datos, y a la Dra. Patricia Carvalho, de Microlab-IST, que llevó a cabo el análisis con microscopio electrónico.

Referencias

- [1] Gomes, J. *Higiene e segurança da soldadura*, 1983, ISQ: Oeiras.
- [2] Pires, I., Quintino, L., Miranda, R., Gomes, J. Fume emissions during gas metal arc welding, *Toxicology & Environmental Chemistry*, 2006, 88, 385-394.
- [3] Ascenço, C., Gomes, J., Cosme, N., Miranda, R. Analysis of welding fumes, *Toxicology & Environmental Chemistry*, 2005, 87, 345-349.
- [4] Gomes, J., Albuquerque, P., Miranda, R., Vieira, M. Determination of airborne nanoparticles from welding operations, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2012, 75, 747-755.
- [5] Jenkins, N., Eager, T. Chemical analysis of welding fume particles, *Welding Journal*, 2005, Supp., 87-93.
- [6] Dasch, J., D'Arcy, J. Physical and chemical characterization of airborne particles from welding operations in automotive plants, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2008, 5, 444-454.
- [7] Buonanno, G., Morawska, L., Stabile, L. Exposure to welding particle in automotive plants, *Journal of Aerosol Science*, 2011, 42, 295-304.
- [8] Moroni, B., Viti, C. Grain size, chemistry and structure of fine and ultrafine particles in stainless steel welding fumes, *Aerosol Science*, 2011, 40, 938-949.
- [9] Elihn, K., Berg, P., Liden, G. Correlation between airborne particle concentrations in seven industrial plants and estimated respiratory tract deposition by number, mass and elemental composition, *Journal of Aerosol Science*, 2011, 42, 127-141.
- [10] Oberdörster, G., Gelein, R., Ferin, J., Weiss, B. Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles, *Inhalation Toxicology*, 1995, 7, 111-124.
- [11] Rickerby, D., Morrison, M. Nanotechnology and the environment: A European perspective, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2007, 8, 19-24.
- [12] Oberdörster, G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles, *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2001, 74, 1-8.
- [13] Kreyling, W., Semmler, M., Erbe, F., Mayer, P., Takenaka, S., Schulz, H., Oberdörster, G., Ziesenis, A. Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low, *Journal of Toxicology and Environmental Health - A*, 2002, 65, 511-535.
- [14] Phalen, R. Particle size-selective sampling for particulate air contaminants, Ed. J.H. Vincent, 1999, ACGIH: Cincinnati.
- [15] Gomes, J., Albuquerque, P., Miranda, R., Santos, T., Vieira, M. Comparison of deposited surface area of airborne ultrafine particles generated from two welding processes, *Inhalation Toxicology*, 2012, 24, 774-781.
- [16] Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S., L'Vov, B., Ebert, M., Koch, W., Ellingsen, D., Thomasen, Y. Physicochemical characterization of different welding aerosols, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, 399, 1773-1780.
- [17] Pires, I., Quintino, L., Miranda, R. Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate, *Materials and Design*, 2007, 28, 1623-1631.