

Influencia de la Atmosfera de N₂ en los Parámetros Operacionales y la Microestructura del Depósito en el Recargue Duro con FCAW

Jorge Luis García-Jacomino¹ , Valtair Antonio Ferraresi² , Amado Cruz-Crespo¹ , Americo Scotti² 

¹ Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Centro de Investigación de Soldadura – CIS, Facultad de Ingeniería Mecánica, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Universidade Federal de Uberlândia, Grupo Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem – LAPROSOLDA, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, Uberlândia, MG, Brasil.

Como citá: García-Jacomino JL, Ferraresi VA, Cruz-Crespo A, Scotti A. influencia de la atmosfera de N₂ en los parámetros operacionales y la microestructura del depósito en el recargue duro con FCAW. Soldagem & Inspeção. 2022;27:e2702. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI27.02>

Resumen: Se aborda el estudio de la influencia de la atmosfera de nitrógeno sobre el comportamiento de los parámetros de soldadura (corriente y tensión) y en las propiedades de los depósitos de alambres tubulares auto-protegidos utilizados en el proceso FCAW para el recargue de piezas y partes sometidas a abrasión severa. Son evaluados tres materiales de aporte para este tipo de aplicación: Uno de alto cromo, otro de alto cromo y aleado con niobio y el tercero con menores contenidos de cromo y aleado también con titanio. Se realizan depósitos en las condiciones indicadas por los fabricantes para los alambres (en cuanto a parámetros de régimen) con y sin protección de gas nitrógeno, mediante fuente de soldadura en modo de tensión constante. El uso de protección gaseosa adicional (N₂) modifica los parámetros de soldadura a la vez que modifica la microestructura, influyendo en las propiedades mecánicas de los depósitos. Los depósitos obtenidos fueron caracterizados por microscopía óptica, confirmando la influencia del nitrógeno sobre el comportamiento operacional y sobre los depósitos para los tres alambres utilizados.

Palabras claves: Recargue duro; FCAW; Comportamiento operacional.

Influence of the N₂ Atmosphere on the Operational Parameters and the Microstructure of the Hardfacing Deposited by FCAW

Abstract: The study of the influence of the nitrogen atmosphere on the behavior of the welding parameters (current and voltage) and on the properties of the deposits of self-protected tubular wires used in the FCAW process for the recharging of pieces and parts subjected to severe abrasion is debated. Three filler materials are evaluated for this type of application: one with high chromium, another with high chromium and alloyed with niobium and the third with lower chromium content and also alloyed with titanium. Deposits are made under the conditions indicated by the manufacturers for the wires (in terms of regime parameters) with and without nitrogen gas protection, using a constant voltage mode welding source. The use of additional gaseous protection (N₂) modifies the welding parameters while modifying the microstructure, influencing the mechanical properties of the deposits. The deposits were characterized by optical microscopy, confirming the influence of nitrogen on the operational behavior and on the deposits for the three wires used.

Keywords: Hard recharge; FCAW; Operational behavior.

1. Introducción

Buchely [1] considera que la técnica de recargue duro (*Hardfacing*) es una de las vías más económica y útiles para mejorar el rendimiento de los componentes sometidos a condiciones de desgaste severo. Crook y Hutchings [2, 3] concuerdan en que es un método comúnmente empleado para mejorar propiedades de las superficies de las herramientas agrícolas, componentes para minería, equipos de preparación del suelo y otros. En publicación reciente, Aldemi [4] plantea que en la industria brasileña es tradicional la aplicación de recargue superficial por soldadura manual con electrodo revestido o de forma automática, mediante soldadura por arco sumergido, cuando la geometría o las dimensiones son favorables. Sin embargo, debido a la productividad superior en comparación con SMAW y mejor flexibilidad en relación con SAW, el proceso de soldadura por arco con alambre tubular se ha convertido en una importante alternativa para recargue. Esto coincide con Mohamat [5], que expone que es de uso común también en diferentes industrias para la unión del acero y sus aleaciones.

Recibido: 17 Ene., 2021. Aprobado: 24 Sept., 2021.

E-mail: jacomino@uclv.edu.cu (JLGJ)



Este es un artículo publicado en acceso (*Open Access*) abierto bajo la licencia *Creative Commons Attribution Non-Commercial*, que permite su uso, distribución y reproducción en cualquier medio, sin restricciones siempre que sin fines comerciales y que el trabajo original sea debidamente citado.

Una amplia variedad de consumibles para el recargue duro por soldadura está disponible comercialmente para la protección contra el desgaste. Vázquez [6] y Gregory [7] plantean que los depósitos tienen una microestructura compuesta por carburos dispersos en la matriz de austenita, se utilizan ampliamente para aplicaciones resistentes a la abrasión y se clasifican típicamente según la dureza esperada. Sin embargo, Chattrjee [8] considera que la resistencia a la abrasión de una aleación de recargue depende de muchos otros factores, tales como, el tipo, la forma y distribución de fases duras, la dureza y comportamiento de endurecimiento por deformación de la matriz. Ellis [9] y Noble [10] coinciden que los parámetros de soldadura pueden afectar las propiedades de los depósitos de recargue duro.

Existe una discusión en la literatura sobre el uso del nitrógeno como elemento formador de compuestos en el cordón de soldadura. Gonzalez y Achar [11, 12] coinciden que la contaminación del cordón de soldadura con pequeñas cantidades de nitrógeno puede afectar las propiedades mecánicas o provocar porosidades, que se asocian generalmente con baja resistencia de la soldadura así como la fragilización. A su vez, Stoloff [13] considera que el nitrógeno libre en solución sólida es perjudicial para la dureza y debe ser minimizado. Sin embargo Lau [14], Evans [15], Chandra [16] realizan investigaciones sobre el efecto del nitrógeno en la microestructura de la soldadura y su influencia en las propiedades mecánicas concluyendo que no solo tiene efectos negativos, pues su uso controlado puede contribuir al aumento de la dureza del metal, resistencia y tenacidad. En reciente trabajo, Ilman [17] estudia el efecto del nitrógeno y titanio en la soldadura y concluye la posibilidad de utilizar nitrógeno como una adición intencionada en la aleación, y que bajo algunas circunstancias, las adiciones de nitrógeno puede ser beneficioso.

En la literatura consultada se reporta el uso de técnicas estadísticas no paramétricas para el estudio de los parámetros operacionales en el proceso de soldadura [18]. Además, estas han sido aplicadas a estudios en otros campos, donde tampoco se tiene certeza de que las variables tienen una distribución normal [19].

De lo planteado se espera que la utilización del N₂ como gas de protección adicional en el proceso FCAW conduzca a cambios en comportamiento operacional y la microestructura, por lo que se propone como objetivo: evaluar el efecto de la atmósfera de nitrógeno sobre el comportamiento operacional y sobre la microestructura del depósito en el recargue duro por FCAW con diferentes materiales de aporte.

2. Materiales y Métodos

Se utilizan alambres tubulares autoprottegidos para recargue disponibles en el mercado. Estos alambres tienen 1,6 mm de diámetro y los elementos químicos principales son el Fe, Cr y C con diferentes contenidos, uno de ellos tiene Ti y otro Nb. La clasificación y composición química nominal de acuerdo a la norma DIN 8555 [20] del depósito se muestran en la Tabla 1.

Para la soldadura, se utiliza una fuente multiprocesos comercial (MTE Digitec 600), ajustada para funcionar en modo tensión constante, fue usada en corriente continua con polaridad positiva (CC+), en una mesa automatizada de coordenadas. Está instalación, por su diseño, permite mantener constante la velocidad de soldadura y la distancia de contacto a la pieza durante el funcionamiento del proceso. La instalación, acoplada a una computadora a través de una tarjeta de adquisición de datos, posibilita el registro de los valores instantáneos de corriente y voltaje, a una frecuencia de 5 kHz, una resolución de 12-bit, durante un tiempo entre 25 y 30 s.

Tabla 1. Características de los alambres tubulares.

Tipo de electrodo	Dureza**		Composición química (%)***						
	HRC	C	Cr	Mn	Si	Nb	B	Mo	Ti
MF 10-GF-55-GPS	58	1,80	6,50	1,20	0,70			0,80	5,00
MF 10-65-GR	65	5,26	18,38	0,52	1,15	4,20	0,38		
MF 10-GF-65-GR	60	5,00	27,00	1,50	1,50				

valor medio. *resto en Fe.

Se realizan depósitos para establecer los parámetros operacionales del proceso para cada tipo de alambre, partiendo de los indicados por los fabricantes [21], como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de regulación para operación del proceso de soldadura.

Alambre	Probetas	Tensión	DCP	VA	VS
		(V)	(mm)	(m/min)	(mm/s)
MF 10-GF-55-GPS	A y B	28	25	10	8
MF 10-65-GR	C y D	30	25	10	8
MF 10-GF-65-GR	E y F	30	25	10	8

DCP: Distancia de Contacto a la Pieza. VA: Velocidad de alimentación del Alambre. VS: Velocidad de Soldadura.

Para la obtención de las muestras y los registros, se realizan cordones sobre planchas de acero AISI 1020 (150x50x12) mm en posición plana. Los depósitos se realizan con los parámetros mostrados en la Tabla 2 para cada tipo de alambre con (probetas B, D y F) y sin (probetas A, C y E) atmosfera protectora de N₂ a un flujo constante de 15 L/min. Para lograr la reproducibilidad de los experimentos, desde el punto de vista del control de los parámetros, los depósitos se realizan en una instalación automatizada para la soldadura.

Con el objetivo de obtener las informaciones relacionadas con la estabilidad de funcionamiento y consecuentemente la influencia de la atmosfera de nitrógeno en el proceso, se realiza el procesamiento de los registros de valores instantáneos de corriente y voltaje con el empleo del paquete estadístico SPSS, versión 18.0.

De los depósitos, se extraen secciones en el sentido trasversal al cordón. Las probetas se preparan según la Norma ASTM [22] y atacadas con Nital al 4% para revelar las macrografías. El ataque para obtener la microestructura se realiza con agua regia (20 mL HNO₃ y 60 mL HCl). Para la microscopia óptica se utiliza el microscopio óptico metalográfico OLYMPUS modelo BX51M (las imágenes se adquieren con una cámara digital acoplada).

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización de los parámetros operacionales del proceso

3.1.1. Resultados para el alambre tipo MF 10-GF-55-GPS (probetas A y B)

Los oscilogramas de corriente de soldadura y tensión de arco, obtenidos durante las soldaduras, se muestran en la Figura 1. Se observa un comportamiento típico para la transferencia guiada por escoria, con y sin cortocircuitos. La frecuencia de tensión < 15 V para los más de 140000 puntos de medición es de 7,74 Hz para la probeta sin nitrógeno (A) y de 6,54 Hz para la probeta con protección gaseosa de nitrógeno (B).

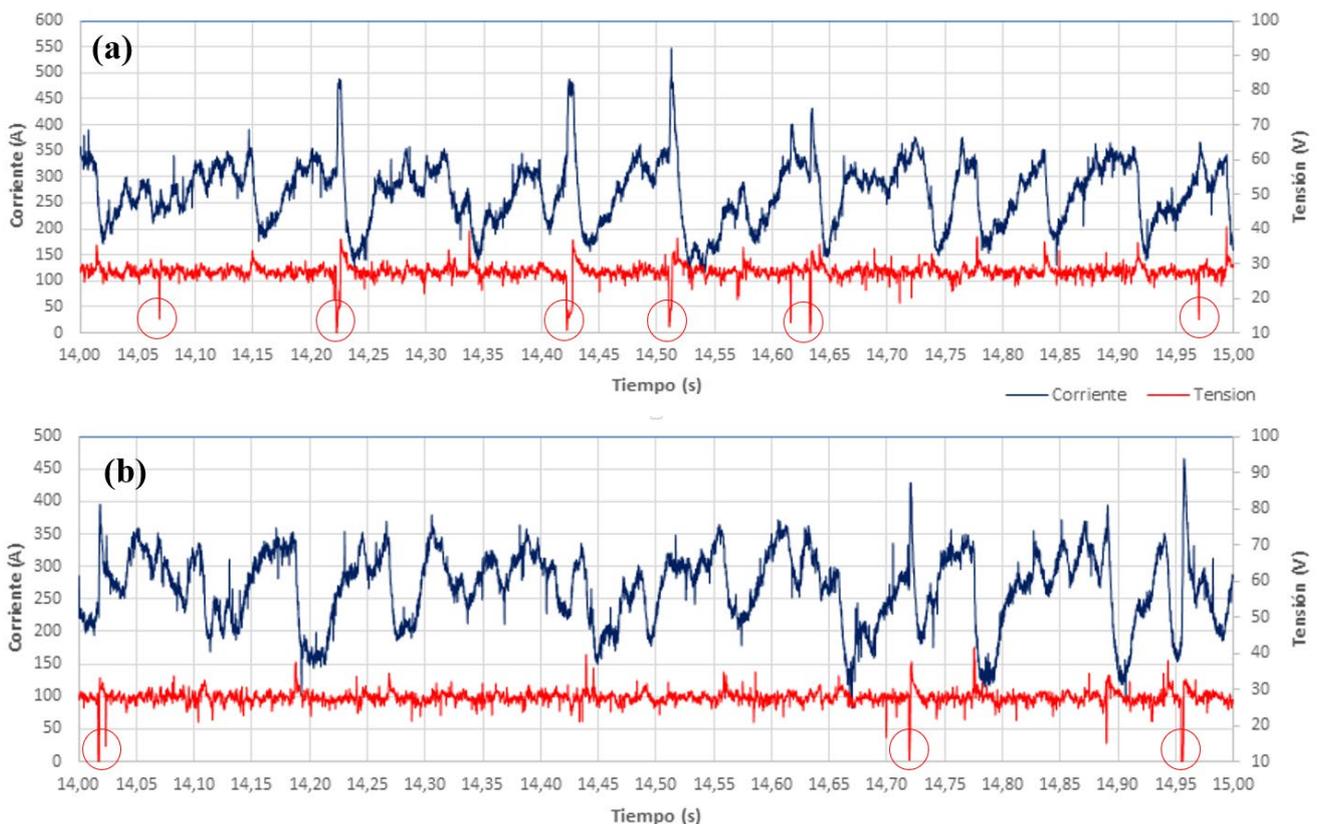


Figura 1. Oscilograma de corriente y tensión para alambre tipo MF 10-GF-55-GPS, (a) sin nitrógeno, (b) con nitrógeno. *Los cortocircuitos están señalizados con círculos rojos.*

La Tabla 3 muestra los estadísticos de resumen calculados a partir de los datos de la corriente de soldadura. Incluye medidas de tendencia central y medidas de variabilidad.

Tabla 3. Resumen estadístico para los valores de corriente de soldadura con alambre MF 10-GF-55-GPS.

Estadísticos	UM	Probetas	
		A (sin N2)	B (con N2)
Recuento	U	141235	140425
Promedio	A	268,8	264,0
Mediana	A	276,5	269,3
Moda	A	301,7	285,3
Desviación Estándar	A	57,6	53,9
Coefficiente de Variación	%	21,4	20,4
Mínimo	A	12,1	24,0
Máximo	A	574,9	549,0
Rango	A	577,0	525,0

En cuanto a las medidas de tendencia central, la probeta A tiene una media de 268,8 A con una mediana de 276,5 A; la probeta B tiene una media de 264 A con una mediana de 269,3 A. Se evidencia que la corriente mayor es la de la probeta A. Esta diferencia expresada porcentualmente, tomando como base a la probeta A, muestra que la corriente en la probeta B es menor 1,8%. La muestra que menor dispersión tiene en la corriente de soldadura es la probeta B (con nitrógeno), con un coeficiente de variación del 20%, mientras para la probeta A es de 21%. A priori, basado en los estadísticos descriptivos, se puede suponer que las distribuciones de los valores de corriente de soldadura no tienen diferencias significativas, por lo que el uso de nitrógeno como gas de protección y elemento de aporte, no afecta los parámetros del proceso aplicado. La aplicación de técnicas estadísticas no paramétricas permite establecer si existen o no estas diferencias significativas, sin tener que partir del supuesto que las distribuciones de las muestras provienen de distribuciones normales.

La Tabla 4 muestra los resultados de la prueba no paramétrica *Mann-Whitney*, al comparar las medianas de las dos poblaciones (corriente de probeta A y corriente de probeta B, debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas, con un nivel de confianza del 95,0%. Los resultados mostrados en la Tabla 4 demuestran que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza (valor-P es menor que 0,05). Esto indica que el uso de nitrógeno influye sobre la corriente de soldadura en el proceso FCAW a causa de su efecto ionizante en la columna del arco y su alta entalpia [23].

Tabla 4. Comparación de las medianas de las muestras de la probeta A y B.

Comparación de Medianas
Mediana de la probeta A (muestra 1): 276,53
Mediana de la probeta B (muestra 2): 269,32
<i>Prueba W de Mann-Whitney para comparar medianas</i>
Hipótesis Nula: mediana1 = mediana2
Hipótesis Alt.: mediana1 <> mediana2
Rango Promedio de muestra 1: 145348,
Rango Promedio de muestra 2: 136287,
W = 9,27849E9 valor-P = 0
Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Para demostrar que las muestras no provienen de la misma población, se realiza la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*. En los resultados mostrados en la Tabla 5 se evidencia que la distancia máxima entre las dos distribuciones es de 0,0730802 y debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones, con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 5. Comparación de las distribuciones de las dos muestras (probetas A y B).

Prueba de Kolmogorov-Smirnov
Estadístico DN estimado = 0,0730802
Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 19,3923
Valor P aproximado = 0

Los resultados de los test estadísticos aplicados permiten asegurar, con un nivel de confianza del 95%, que las distribuciones de la corriente de soldadura, cuando se suelda con y sin protección de nitrógeno son diferentes, lo que evidencia la influencia en los parámetros de soldadura con el alambre MF 10-GF-55-GPS. Esto se debe al efecto ya referido efecto del nitrógeno sobre las características del arco.

3.1.2. Resultados para el alambre tipo MF 10-65-GR (probetas C y D)

Los oscilogramas de corriente y voltaje, obtenidos durante las soldaduras, se muestran en la Figura 2. Se observa que el tipo de transferencia es guiada por escoria, con y sin cortocircuito. La frecuencia de voltajes < 10 V para los más de 130000 puntos de medición es de 6,54 Hz para la probeta sin nitrógeno (C) y de 9,60 Hz para la probeta con protección gaseosa de nitrógeno (D).

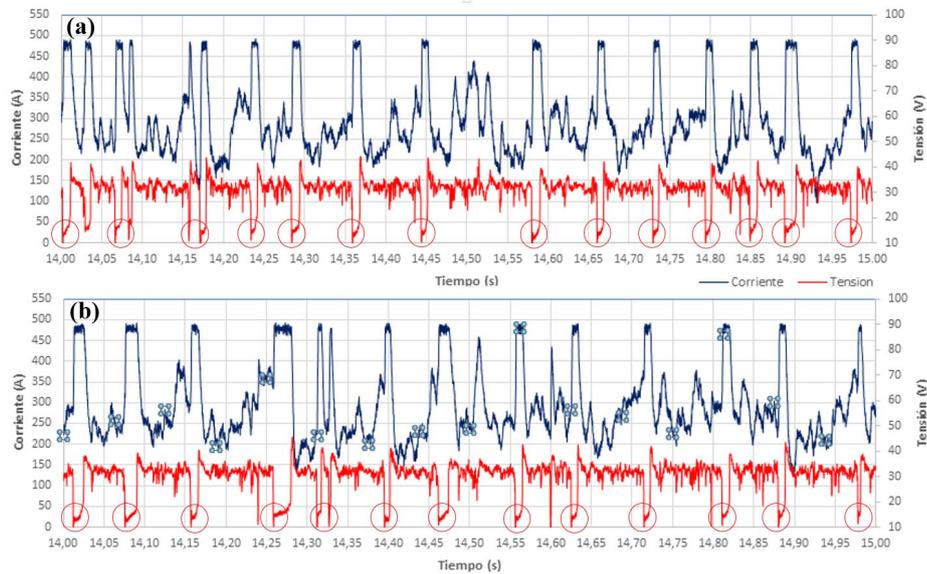


Figura 2. Oscilograma para alambre tipo MF 10-65-GR, (a) sin nitrógeno, (b) con nitrógeno. Los cortocircuitos están señalizados con círculos rojos.

La Tabla 6 muestra el resumen de los estadísticos, calculados a partir de los datos de la corriente de soldadura. Incluye medidas de tendencia central y medidas de variabilidad.

Tabla 6. Resumen estadístico para los valores de corriente de soldadura con alambre MF 10-65-GR.

Estadísticos	UM	Probetas	
		C	D
Recuento	U	133888	137532
Promedio	A	300,6	291,4
Mediana	A	279,8	268,7
Moda	A	478,7	481,0
Desviación Estándar	A	92,3	90,9
Coefficiente de Variación	%	30,7	31,2
Mínimo	A	10,8	11,1
Máximo	A	496,0	496,0
Rango	A	485,2	484,9

En cuanto a las medidas de tendencia central, la probeta C tiene una media de 300,5 A con una mediana de 279,8 A; la probeta D tiene una media de 291,4 A con una mediana de 268,8 A. Se evidencia que la corriente mayor es la de la probeta C. Esta diferencia expresada porcentualmente, tomando como base a la probeta C muestra que la corriente en la probeta D es menor 3,07% .

La medida de dispersión indica que la muestra que menor dispersión tiene en la corriente de soldadura corresponde a la probeta C (sin nitrógeno), con un coeficiente de variación del 30,7% y la mayor a la probeta D, con un coeficiente de variación del 31,2% .

Similar a las probetas A y B, se puede suponer que las distribuciones de los valores de corriente de soldadura no tienen diferencias significativas. La Tabla 7 muestra los resultados de la prueba no paramétrica *Mann-Whitney*, al comparar las medianas de las dos poblaciones (corriente probeta C y corriente probeta C)

Tabla 7. Comparación de las medianas de las muestras de la probeta C y D.

Comparación de Medianas

Mediana de la probeta C (muestra 1): 279,78

Mediana de la probeta D (muestra 2): 268,75

Prueba W de Mann-Whitney para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana1 = mediana2

Hipótesis Alt.: mediana1 <> mediana2

Rango Promedio de muestra 1: 140685,

Rango Promedio de muestra 2: 130868,

W = 8,54095E9 valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95,0%. Esto indica que el uso de gas nitrógeno influye sobre la corriente de soldadura en el proceso FCAW. Para demostrar que las muestras no provienen de la misma población, se realiza la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*.

Tabla 8. Comparación de las distribuciones de las dos muestras (probetas C y D).

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Estadístico DN estimado = 0,0613825

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 15,9881

Valor P aproximado = 0

En los resultados mostrado en la Tabla 8 se evidencia que la distancia máxima entre las dos distribuciones es de 0,0613825 y debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un nivel de confianza del 95,0%.

Los resultados de los test estadísticos aplicados permiten asegurar, con un nivel de confianza del 95%, que las distribuciones de la corriente de soldadura, cuando se suelda con protección de nitrógeno son diferentes, lo que evidencia la influencia en los parámetros de soldadura con el alambre MF 10-65-GR.

3.1.3. Resultados para el alambre tipo MF 10-GF-65-GR (probetas E y F)

Los oscilogramas de corriente y voltaje, obtenidos durante las soldaduras, se muestran en la Figura 3. Se observa que el tipo de transferencia es guiada por escoria con y sin cortocircuito. La frecuencia de voltajes < 11,5 V para los más de 120000 puntos de medición es de 17,73 Hz para la probeta sin nitrógeno (E) y de 18,12 Hz para la probeta con protección gaseosa de nitrógeno (F).

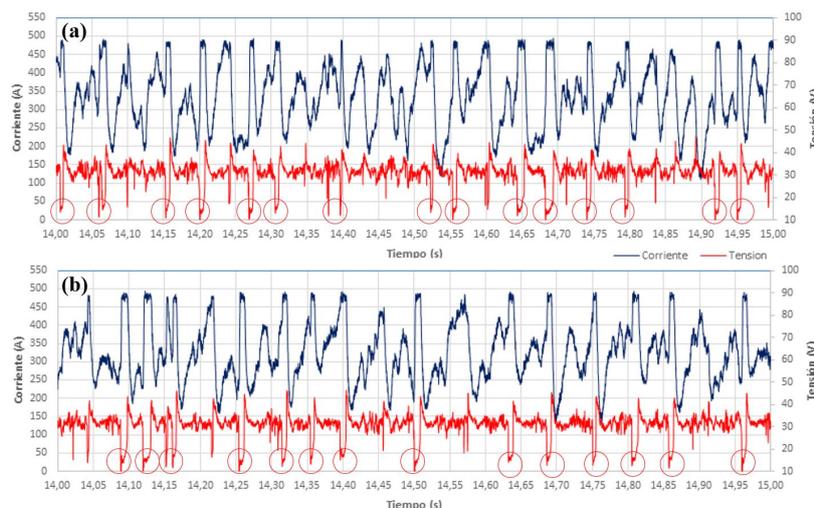


Figura 3. Oscilograma para alambre tipo MF 10-GF-65-GR, (a) sin nitrógeno, (b) con nitrógeno. Los cortocircuitos están señalizados con círculos rojos.

La Tabla 9 muestra el resumen de los estadísticos, calculados a partir de los datos de la corriente de soldadura. Incluye medidas de tendencia central y medidas de variabilidad.

Tabla 9. Resumen estadístico para los valores de corriente de soldadura con alambre MF 10-GF-65-GR.

Estadísticos	UM	Probetas	
		E	F
Recuento	U	122768	122468
Promedio	A	332,6	324,3
Mediana	A	335,5	319,2
Moda	A	478,5	481,0
Desviación Estándar	A	90,5	89,4
Coefficiente de Variación	%	27,2%	27,6%
Mínimo	A	8,3	10,3
Máximo	A	497,7	496,3
Rango	A	489,42	486,02

En cuanto a las medidas de tendencia central, la probeta E tiene una media de 332,6 A, con una mediana de 335,5 A; la probeta F tiene una media de 324,28 A, con una mediana de 319,4 A. Se evidencia que la corriente mayor es la de la probeta E. Esta diferencia, expresada porcentualmente, tomando como base a la probeta E, muestra que la corriente en la probeta F es menor 4,8%.

La medida de dispersión indica que la variante que menor dispersión tiene en la corriente de soldadura corresponde a la probeta E (sin nitrógeno), con un coeficiente de variación del 27,2% y la mayor dispersión corresponde a la probeta F, con un coeficiente de variación del 27,6% .

Similar a los casos anteriores, se puede suponer que las distribuciones de los valores de corriente de soldadura no tienen diferencias significativas. La Tabla 10 muestra los resultados de la prueba no paramétrica *Mann-Whitney*, al comparar las medianas de las dos poblaciones (corriente probeta E y corriente probeta F).

Tabla 10. Comparación de las medianas de las muestras de la probeta E y F.

Comparación de Medianas
Mediana de la probeta E (muestra 1): 335,5
Mediana de la probeta F (muestra 2): 319,24
<i>Prueba W de Mann-Whitney para comparar medianas</i>
Hipótesis Nula: mediana1 = mediana2
Hipótesis Alt.: mediana1 <> mediana2
Rango Promedio de muestra 1: 126214,
Rango Promedio de muestra 2: 119014,
W = 7,07611E9 valor-P = 0
Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95,0%. Esto indica que al usar gas nitrógeno afecta la corriente de soldadura en el proceso FCAW.

Para demostrar que las muestras no provienen de la misma población, se realiza la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*.

Tabla 11. Comparación de las distribuciones de las dos muestras (probetas E y F).

Prueba de Kolmogorov-Smirnov
Estadístico DN estimado = 0,0687704
Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 17,028
Valor P aproximado = 0

En los resultados mostrados en la Tabla 11 se evidencia que la distancia máxima entre las dos distribuciones es de 0,0687704 y, debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones, con un nivel de confianza del 95,0%.

Los resultados de los test estadísticos aplicados permiten asegurar, con un nivel de confianza del 95%, que las distribuciones de la corriente de soldadura, cuando se suelda con protección de nitrógeno, son diferentes, lo que evidencia la influencia en los parámetros de soldadura con el alambre MF 10-GF-65-GR.

3.1.4. Consideraciones generales sobre los parámetros del proceso

Una valoración inicial sobre la influencia de nitrógeno como protección gaseosa adicional y elemento de aleación para las reacciones concurrentes en la poza de soldadura, indica que existe una interacción que afecta a los parámetros de soldadura. Esto está reflejado en las discusiones realizadas para cada tipo de alambre utilizado, no obstante, la Tabla 12 muestra un resumen.

Tabla 12. Resultados de los parámetros del proceso de soldadura.

Alambre	P	N ₂	I _{sm}	E	s	T _{sm}	s	Lim	FC
		(L/min)	(A)	(J/mm)	(A)	(V)	(V)	(V)	(Hz)
MF 10-GF-55-GPS	A	0	268,8	930,7	57,6	27,7	2,2		7,7
	B	15	264,0	914,1	53,9	27,7	2,2	< 15	6,5
MF 10-65-GR	C	0	300,6	1131,0	92,3	30,1	6,5		6,5
	D	15	291,4	1100,0	90,9	30,2	6,2	< 10	9,6
MF 10-GF-65-GR	E	0	332,6	1276,4	90,5	30,7	5,7		8,1
	F	15	324,3	1236,4	89,4	30,5	5,8	< 11,5	7,8

P: código de la probeta. N₂: se refiere si se usa o no flujo de gas. I_{sm}: Corriente de soldadura media. E: Energía del arco. s: desviación estándar. T_{sm}: Tensión de soldadura media del arco. Lim: límite de tensión para establecer FC. FC: Frecuencia de cortocircuitos con transferencia (probable).

Aunque no resultaría del todo válido una comparación entre los tres alambres, debido a las diferentes composiciones químicas (Tabla 1), se pueden realizar algunas consideraciones. Con respecto a la corriente de soldadura media y consecuentemente la energía del arco, se observa que disminuye al usar N₂ en todos los alambres. Con respecto a la desviación estándar, medida de la dispersión de los valores, es común que sea menor cuando se usa N₂, lo que puede ser resultado de una mayor estabilidad del arco. Las tensiones de soldadura medias (T_{sm}) son similares, no existiendo una tendencia común, pero si resalta una dispersión menor que la corriente. En el caso de la frecuencia de cortocircuito es similar, no existe una tendencia general, pero resalta el alambre MF 10-GF-55-GPS, que bajo el N₂ aumenta en un 46,8%. En todos los alambres tubulares autoprotegidos utilizados es evidente que el N₂ interacciona con el sistema durante el proceso de soldadura variando los parámetros del proceso FCAW.

3.2. Caracterización por microscopía óptica

3.2.1. Aspectos morfométricos de las macrografías de la sección transversal de los cordones de soldadura

En la Figura 4 se observan las macrografías de la sección transversal de los depósitos con los diferentes alambres utilizados. A partir de las macrografías fueron determinadas las áreas del metal fundido y las áreas del metal depositado y sobre la base de estas se determina la dilución alcanzada y los factores de forma (Tabla 13). Esto permite valorar la posible influencia del uso del N₂ sobre la geometría y forma del depósito de soldadura.

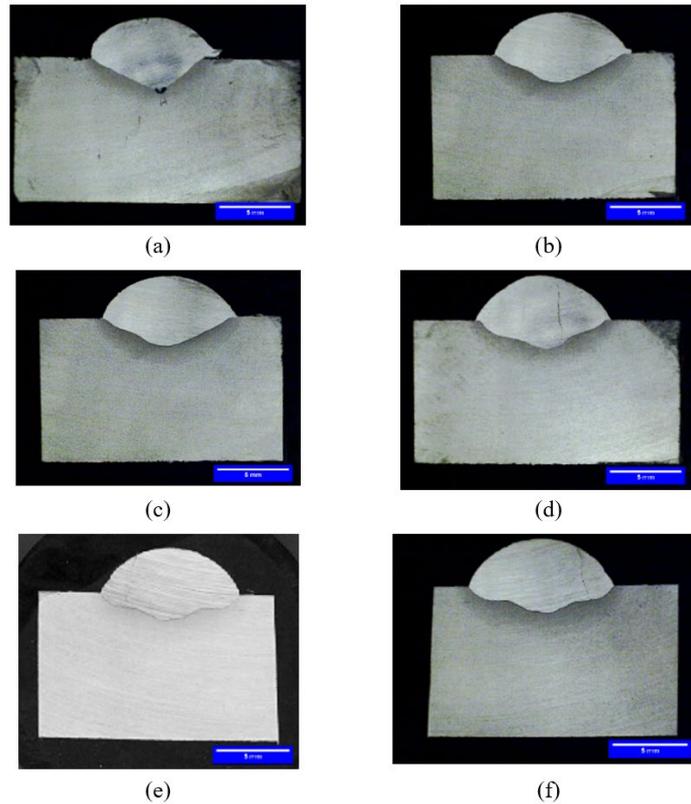


Figura 4. Macrografías de la sección transversal de los cordones de soldadura. (a) y (b) alambre MF 10-GF-55-GPS sin N₂ y con N₂; (c) y (d) alambre MF 10-65-GR sin N₂ y con N₂; (e) y (f) alambre MF 10-GF-65-GR sin N₂ y con N₂.

Para las probetas A y B, la dilución mostrada en la Tabla 13 indica que para este alambre existe una mayor penetración cuando se utiliza N₂, esto puede traer consigo un efecto negativo al disminuir la dureza esperada en el depósito. En el caso del índice de convexidad, cuando se suelda con N₂ aumenta. Sin embargo, la RA es mayor producto de tener un depósito con mayor relación entre el ancho y el alto.

Por otra parte, para las probetas C y D, la dilución indica que para este alambre disminuye la penetración cuando se utiliza N₂. En el caso del índice de convexidad, cuando se suelda con N₂ aumenta, consistente con el aumento de área. Sin embargo, la RA es menor producto de tener un depósito con menor relación entre el ancho y el alto.

Tabla 13. Aspectos morfométricos de los depósitos para el alambre.

Probeta	Área del cordón			Dilución (%)	IC (%)	Factores de forma			
	Superior (mm ²)	Inferior (mm ²)	Total (mm ²)			Ancho (mm)	Alto (mm)	RA	Circ
A	20,8	7,6	28,4	26,9	31,9	8,5	5,1	1,7	0,66
B	21,9	8,4	30,3	27,7	33,0	9,3	4,9	1,8	0,69
C	21,6	8,6	30,3	28,5	31,4	9,3	4,9	1,8	0,69
D	22,5	8,2	30,8	26,8	33,1	9,3	5,1	1,8	0,70
E	24,2	8,4	32,7	25,9	32,1	9,7	5,0	2,0	0,68
F	24,2	8,4	32,6	25,9	33,1	9,7	5,0	2,0	0,68

IC: Índice de Convexidad ((altura de refuerzo/ancho del cordón) x 100). RA: relación de aspecto (ancho del del depósito/altura total del depósito). irc: factor de redondeo ($4\pi \times (\text{área del depósito}/(\text{perímetro})^2)$).

Finalmente, para las probetas E y F, la dilución indica que para este alambre existen penetraciones similares con o sin protección de N₂ esto puede suponer que no existe interacción entre el gas y los elementos de aleación, manteniendo constante las propiedades de dureza esperada en el depósito. En el caso del índice de convexidad, cuando se suelda con N₂ aumenta. En el caso de los factores de forma en ambos depósitos es similar.

3.2.2. Caracterización mediante microscopia óptica de la sección transversal de los cordones de soldadura

La Figura 5 muestra las micrografías de la sección transversal de los depósitos de soldadura de los diferentes alambres. En las micrografías de las probetas A y B se evidencia pequeños carburos primarios polidispersos, que de acuerdo a la composición son presumiblemente carburos de titanio en una matriz eutéctica. Se define muy bien la morfología de estos carburos, manifestación de su sistema cristalino cubico, grupo espacial Fm3m. En el caso de la muestra B (con N₂), se observa que el tamaño de los carburos disminuye, aumenta la fracción de carburos y aparecen poros de mayor tamaño. Estos fenómenos podrían estar relacionados con la interacción de los elementos químicos aleantes durante el proceso de soldadura con el N₂.

En las micrografías de las probetas C y D se evidencia la formación de carburos de niobio (color gris) en una matriz eutéctica con estructuras dendríticas de austenita. Se define muy bien la morfología de estos carburos manifestación de su sistema cristalino monoclinico, grupo espacial C2/m. En el caso de la muestra D se aprecia un engrosamiento de la austenita atribuible al efecto austenitizante del N₂. Aparecen manchas oscuras, que pudiera estar relacionado con la formación de porosidad [23] durante el proceso de soldadura con el N₂.

En las micrografías de las probetas E y F se observa la presencia de carburos primarios longitudinales del tipo M₇C₃, con cierta presencia de eutéctica, a partir de los altos contenidos de Cr y Fe del alambre [24]. En el caso de la muestra F se observa que la microestructura es más fina y oscura, pudiendo estar relacionada con la nucleación de centros embrionarios producto de la reacción del N₂ con los elementos de aleación. Esta estructura más fina puede mejorar las propiedades mecánicas del depósito.

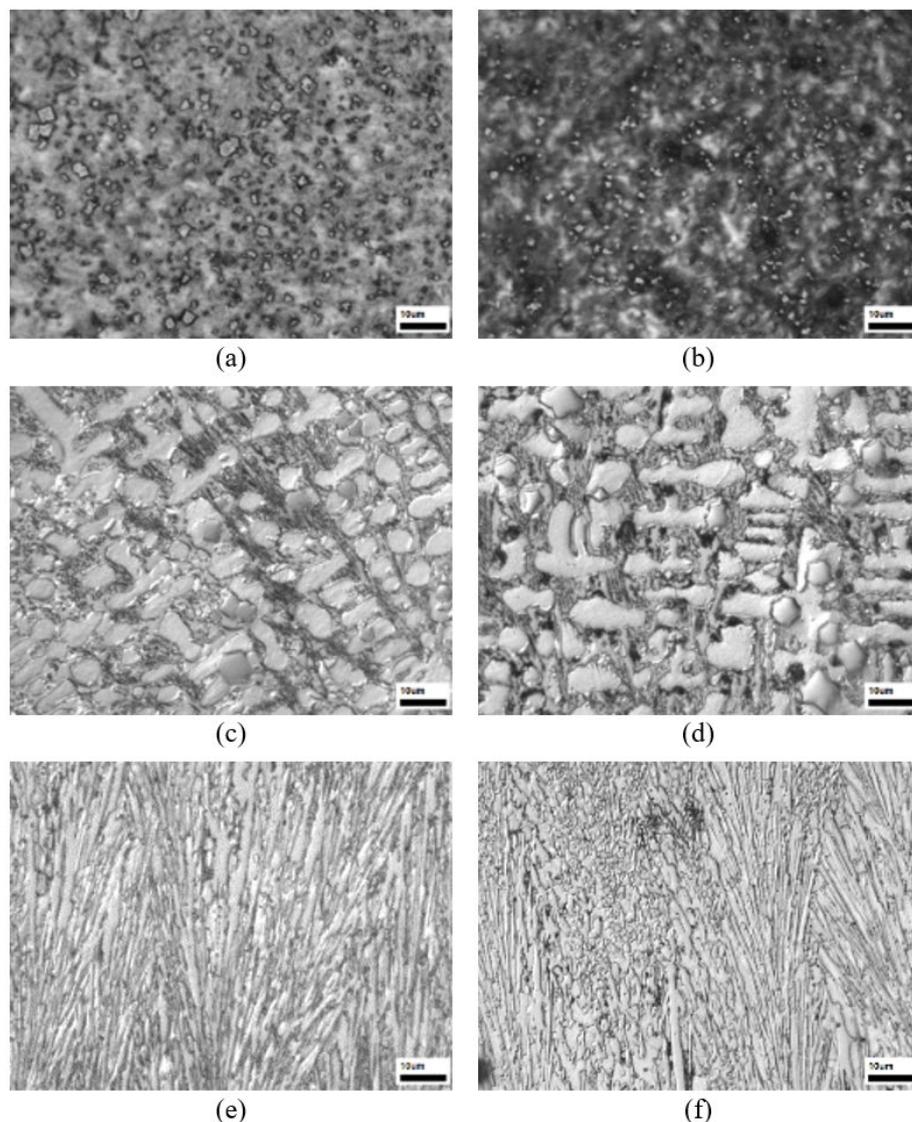


Figura 5. Micrografías de la sección transversal de los cordones de soldadura. (a) y (b) alambre MF 10-GF-55-GPS sin N₂ y con N₂; (c) y (d) alambre MF 10-65-GR sin N₂ y con N₂; (e) y (f) alambre MF 10-GF-65-GR sin N₂ y con N₂.

El empleo de N₂ como gas de protección adicional propicia cambios en patrón microestructural, directamente interrelacionado con la interacción con la composición química del consumible utilizado. Como regla existe un refinamiento de la microestructura y la aparición de microporos. Estos últimos como es conocido no afectan el desempeño al desgaste de estos recubrimientos [24].

4. Conclusiones

Los resultados del procesamiento estadístico a los valores de tensión y corriente de soldadura muestran que existe una influencia de la atmosfera de N₂ en todos los alambres estudiados. Cuando se suelda con N₂, la corriente media de soldadura disminuye. Sin embargo, disminuye la dispersión de sus valores, pudiendo estar asociado a una mayor estabilidad del arco.

El formato del depósito es influenciado por la presencia de N₂, experimentándose un aumento del índice de convexidad para todos los alambres, que se interpreta como un aumento de la altura de los depósitos.

La caracterización por microscopia óptica muestra que el uso del N₂ provoca cambios en la microestructura. Se experimenta una tendencia al refinamiento en el caso de los alambres. En el caso del alambre MF 10-GF-55-GPS hay presencia de pequeños carburos primarios polidispersos de titanio en una matriz eutéctica. En el caso del alambre MF 10-65-GR hay presencia de carburos de niobio en una matriz eutéctica con estructuras dendríticas de austenita. En el caso del alambre MF 10-GF-65-GR hay presencia de carburos primarios longitudinales del tipo M₇C₃, con cierta presencia de eutéctica.

Agradecimientos

Los autores muestran su agradecimiento al Programa de Cooperación Interuniversitaria CAPES-Brasil / MES-Cuba debido a que este trabajo se vincula al proyecto CAPES/MES-CUBA PROJETOS 146/12.

Referencias

- [1] Buchely MF, Gutierrez JC, León LM, Toro A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*. 2005;259(1-6):52-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>.
- [2] Crook P. Friction and wear of hardfacing alloys. In Davis JR, editor. *ASM handbook: friction, lubrication and wear technology*. Vol. 18. Ohio: ASM International; 1992.
- [3] Hutchings IM. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. London: Arnold; 1992.
- [4] Lima A, Ferraresi V, Reis R. Performance analysis of weld hardfacings used in the sugar/alcohol industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23(5):1823-1833. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-014-0948-1>.
- [5] Mohamat SA, Ibrahim IA, Amir A, Ghalib A. The effect of flux core arc welding (FCAW) processes on different parameters. *Procedia Engineering*. 2012;41(0):1497-1501. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.341>.
- [6] Vázquez CR, Cribeiro JP, Montero AL. Resistencia al desgaste: comportamiento frente al desgaste abrasivo de las aleaciones con tendencia a la formación de carburos aplicadas por soldadura. *Soldadura y tecnologías de unión*. 2000;11(62):9-12.
- [7] Gregory EN. Surfacing by welding. *Welding Institute Research Bulletin*. 1980;21(1):9-13.
- [8] Chatterjee S, Pal TK. Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron. *Wear*. 2003;255(1-6):417-425. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00101-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00101-7).
- [9] Ellis T, Garrett GG. Influence of process variables in flux cored arc welding of hardface deposits. *Surface Engineering*. 1986;2(1):55-66. <http://dx.doi.org/10.1179/sur.1986.2.1.55>.
- [10] Noble DN. Abrasive wear resistance of hardfacing weld deposits. *Metal construction*. 1985;17(9):605-611.
- [11] González JC. Simple method to estimate nitride and nitrogen contents in self-shielded FCAW weld metal. *Journal of Materials Science Letters*. 1987;6(1):111-112. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01729448>.
- [12] Achar DRG, Koçak M, Evans GM. Effect of nitrogen on toughness and strain age embrittlement of ferritic steel weld metal. *Science and Technology of Welding and Joining*. 1998;3(5):233-243. <http://dx.doi.org/10.1179/stw.1998.3.5.233>.
- [13] Liebowitz H. *FRACTURE: an advanced treatise*. New York: Academic Press; 1969. Fracture of metals. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-449706-1.50001-9>.
- [14] Lau TW, Sadowski MM, North TH, Weatherly GC. Effect of nitrogen on properties of submerged arc weld metal. *Materials Science and Technology*. 1988;4(1):52-61. <http://dx.doi.org/10.1179/mst.1988.4.1.52>.
- [15] Evans GM. Effect of nitrogen on C-Mn steel welds containing titanium and boron. *Welding Research Supplement*. 1998;77:239s-248s.
- [16] Chandra T, et al. Effects of nitrogen on weld metal microstructure and toughness in submerged arc welding. *Materials Science Forum*. 2007;3906:539-543.

- [17] Ilman MN, Cochrane RC, Evans GM. Effect of titanium and nitrogen on the transformation characteristics of acicular ferrite in reheated C–Mn steel weld metals. *Welding in the World*. 2014;58(1):1-10. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-013-0091-x>.
- [18] Sajedifar J, Kokabi AH, Dehghan SF, Mehri A, Azam K, Golbabaee F. Evaluation of operational parameters role on the emission of fumes. *Industrial Health*. 2017;56(3):198-206. [PMid:29237994](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29237994/).
- [19] García-Jacomino JL, Valdés-Arencibia R, Ruiz-Mena L, Quintana-Puchol R, Cruz-Crespo A, Alvarez-Luna M. Uso del procesamiento de imágenes digitales para medir los parámetros morfométricos de partículas. *Boletín Científico Técnico INIMET*. 2015;1:14-27.
- [20] Deutsches Institut für Normung. *Filler metals used in surfacing*. Berlin: Deutsches Institut für Normung; 1983. p. 1-8.
- [21] Welding Alloys Group. *Products & services: anti-abrasion*. 2016. [acceso el 25 feb. 2016]. Disponible: <http://www.welding-alloys.com/products-services/wa-welding-consumables/hardfacing-cored-wires/anti-abrasion.html>.
- [22] Doering A, Danks D, Mahmoud S, Scott J. Evaluation of ASTM G65 abrasive: spanning 13 years of sand. *Wear*. 2011;271(9-10):1252-1257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.051>.
- [23] Scotti A, Ponomarev V. *Soldagem Mig/Mag*. 2. ed. Brasil: ArtLiber; 2014.
- [24] Cruz-Crespo A, Fernández-Fuentes R, Ferraresi AV, Gonçalves RA, Scotti A. Microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloys deposited by S-FCAW and cold solid wires. *Soldagem e Inspeção*. 2016;21(3):342-353. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2103.09>.