

Utilización de las cascarillas provenientes de las acerías en los revestimientos de electrodos convencionales AWS-ASME SFA 5.1/ 5.1M

Luis Cesar Cáceres Linares ¹, Julio Uza Teruya ², Jorge Alfonso Ugarte³

¹ Nexsol SRL, Los Brillantes 343, La Victoria, Lima, Perú,

^{2,3}Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Lima, Perú.

Recibido el 14 de junio 2024. Aceptado el 10 de agosto 2024. Publicado el 11 de febrero 2025

Resumen

Inherentemente a la producción y al uso de los aceros se generan óxidos de hierro o cascarillas que en algunos casos se reprocessan y en otros no. Sobre esto último, en el presente artículo se plantea una alternativa para un manejo de estos residuos dándosele un valor agregado mediante la incorporación en un revestimiento de electrodos como formador de escoria del cordón de soldadura durante el soldeo en los electrodos convencionales.

Descriptor: *Iron oxide, Slag, Recycled*

Abstract

Generation of iron oxides or scales is inherently to the production and use of steels, that in some cases are recycled and not in some others. Regarding the latter, this paper proposes an alternative for management of this waste, by developing an added value product such as a coating for conventional electrodes.

1. Introducción

La generación de cascarillas es inherente al proceso de fabricación del acero que es la principal fuente generadora de cascarillas.

En una planta típica nacional la producción del acero se realiza mediante la tecnología del Horno Eléctrico en donde se obtiene el acero líquido con las especificaciones requeridas para el producto. Luego, el acero líquido se solidifica bajo condiciones controladas usando el proceso de colada continua que produce las barras sólidas o palanquillas para la laminación. La laminación empieza con el calentamiento de la palanquilla a una temperatura entre 1100 °C a 1200 °C para luego ir deformándolo progresivamente a las distintas formas y tamaños requeridos por el mercado. En todas estas operaciones de solidificación, calentamiento y deformación se genera óxidos que deben ser removidos de material para la obtención de un

producto garantizando. La generación de cascarillas continúa a través de las diversas y múltiples aplicaciones de este producto siderúrgico en donde ya no se tiene un control ni manejo de estos residuos llamados cascarilla de acería de laminación [1].

El Residuo sólido o desecho más importante que se genera como subproducto procede del tren de laminación en caliente de acero. La cantidad de masa específica oscila entre 20 y 50 kg/ton de acero acabado. La cascarilla está formada en su mayor parte por óxidos de hierro que varían de 70 a 75% y por eso puede ser reutilizada.

La formación de la cascarilla depende de diversos factores como son: la atmósfera del horno de recalentar, su temperatura y tiempo de calentamiento, el contenido en SO₂ en los gases del horno, las características físicas y composición del acero, los tipos de aleantes, etc.

En la cascarilla están presentes, además de hierro en forma elemental (Fe°), tres tipos de óxidos de hierro y hierro metálico [2]:

- Wustita (FeO),
- Hematitas (Fe2O3)
- Magnetita (Fe3O4)

La composición química de la cascarilla varía en función del tipo de acero y el proceso empleado. El contenido de hierro fluctúa normalmente en aprox. 70,0% en peso y contiene trazas de metales no férreos.

La cascarilla tiene forma de escamas cuyo tamaño es ≥ 1600 micrones en promedio. La distribución de tamaño depende del punto del proceso en el que se genere. Las partículas más pequeñas de la cascarilla (tamaño de partícula < 0,1 mm) son denominadas “lodo de cascarilla”, se recogen generalmente en las unidades de tratamiento del agua de proceso, localizadas cerca de los laminadores. La presente investigación establece un mecanismo que permita su reutilización

2. Metodología

2.1 Procesamiento de la cascarilla

Este producto se recolecta en la planta Siderúrgica en las zonas del horno de recalentado, tiene un tamaño de partículas que varía de 16 mm a 50 μm. Este producto tiene un alto contenido en hierro metálico y bajo contenido en metales no férreos y compuestos alcalinos, se puede adecuar a su reutilización en la producción de electrodos Rutil-Celulósicos.

En las tablas 1 y 2 se describe las características de la cascarilla encontradas en la cascarilla de la planta de Aceros Arequipa.

La cascarilla pasa por una etapa de chancado y molienda, para reducirla a un tamaño de partícula que permita su utilización en la extrusión para electrodos. Para establecer el rango granulométrico necesario de la mezcla con los otros minerales que conforman el revestimiento para electrodos durante su extrusión, se efectúa un análisis empleando el método de Distribución Rosin-Rammler.

Tabla 1: Distribución Granulométrica Cascarilla de Acería

MALLA	TAMAÑO DE PARTICULA (μm)	PESO (g)	% PESO	% ACUM. (+)	% PASSING
5/8	1600	102.2	2.60	2.60	97.40
1/2	2700	90.2	2.30	4.90	95.10
3/8	9510	194.1	4.94	9.84	90.16
4	4762	1088.5	27.21	37.05	62.95
8	3350	612.8	15.80	52.85	47.15
5	2360	588.8	14.94	67.79	32.21
10	2000	186.7	4.71	72.50	27.50
20	850	689.9	17.57	90.07	9.93
30	600	110.9	2.82	92.89	7.11
40	425	88.9	2.21	95.10	4.90
50	300	47.1	1.20	96.30	3.70
70	212	42.1	1.07	97.37	2.63
100	150	30.3	0.77	98.14	1.86
150	106	13.6	0.35	98.49	1.51
200	75	15.7	0.40	98.89	1.11
270	53	13.8	0.35	99.24	0.76
fondo	-	25.8	0.66	100.00	0.00
TOTAL		3927.50	100.00	-	-

Análisis Químico

Tabla N° 2: Composición química cascarilla

Pr od	Al	Ca	Cu	Mn	Si	C	Sn	V	S
Std	0.2 5	0.3 2	0.0 4	0.5 3	0.1 0	0.00 2	0. 13	0. 28	0.0 11
M1	0.2 4	0.2 4	0.0 4	0.5 4	0.0 4	0.00 7	0. 11	0. 23	0.0 07
M40	0.2 5	0.4 6	0.0 4	0.5 4	0.0 4	0.00 4	0. 06	0. 26	0.0 08

Std: cascarilla originaria de la siderúrgica,

M1: chancadora de rodillo,

M40: cascarilla a la salida del molino de bolas.

2.2 Análisis granulométrico usando el Diagrama Rosin-Rammler (RR)

El método de Rosin Rammler [3] establece la determinación del porcentaje acumulado del material calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$R(d) = 100 \cdot e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^n} \quad (1)$$

Dónde:

R(d): es el porcentaje acumulado del material retenido,

d : Tamaño de la partícula

d' : Tamaño medio de la partícula

n : Es una medida de la propagación de tamaños de partículas (parámetro de distribución)

Los parámetros d' y n del método RR pueden estimarse usando software o a través de regresión lineal de los datos representados gráficamente en un diagrama de RR.

De la ecuación (1) se obtiene que:

$$\log\left(\log\frac{100}{R(d)}\right) = n \cdot \log d - n \cdot \log d' + \log(\log e) \quad (2)$$

Entonces y son constantes para el material dado.

La última expresión se transforma en

$$\log(\log e) - n \cdot \log d' = c$$

donde “e” es el número de Euler [4], la combinando de las ecuaciones (2) y (3) obtenemos la siguiente ecuación (4).

$$\log\left(\log\frac{100}{R(d)}\right) = n \cdot \log d + c \quad (4)$$

Graficando en escala doble logarítmica 100/R (d) versus d obtenemos el correspondiente. La comparación de una escala lineal frente a la logarítmica se muestra en la Figura 1, la ventaja de emplear una escala lineal logarítmica es que no sufre congestión de puntos de data en una región de tamaños más finos de apertura [6] necesarios para la presente investigación.

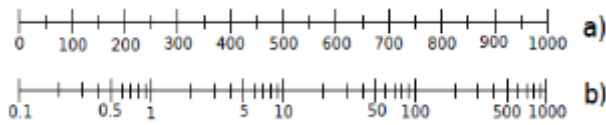


Figura 1: Comparison of linear (a) and logarithmic, (b) X-axis [5]

Podemos comparar tres escalas diferentes, que pueden ser utilizadas como eje Y de distribución del tamaño de partícula como se muestra en la Fig. N.º 2, teniendo en cuenta el comportamiento de doble logaritmo de 100/R es claro, que un eje solo puede contener valores que van desde 0 a 100%, que son los límites de exclusión. Sobre todo sólo los valores entre 0,1 y 99,9% se pueden graficar como la Fig. 2 (c) [4].

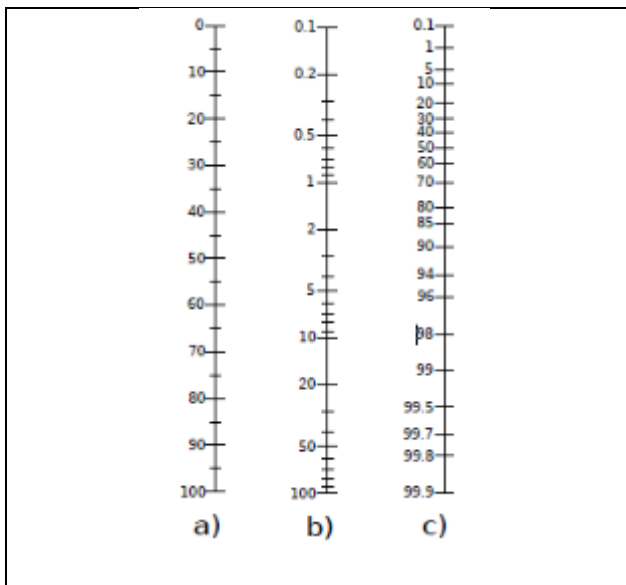


Figura 2: Comparison of linear (a) and double logarithmic (Rosin-Rammler) (b) Y-axis [5]

Aunque logarítmicamente el eje Y de escala log-log puede ser utilizado como recta de aproximación lineal durante un intervalo de tamaño, presenta la desventaja que puede contraer severamente la región por encima de 50% acumulativo y especialmente en la región por encima del 75% [3]. Ello se resuelve con la combinación de ejes logarítmicos con doble logarítmicos utilizados en el diagrama RR. La aproximación lineal permite obtener fácilmente los parámetros de la distribución de tamaño RR que describe completamente la distribución del tamaño se pueden obtener.

El parámetro tamaño d' puede ser determinado por la clasificación del material dado en un tamaño de malla. Esta sustitución en la ecuación 1, va a producir una constante de material de aprox. 36,79% retenido. El parámetro tamaño es, por lo tanto, un tamaño de partícula en la que la línea de aproximación cruza el valor de 36,79%. El valor más alto es el d», el grueso del material.

El parámetro distribución n se puede calcular utilizando la fórmula dada como ecuación (5), donde [d1, R (d1)] y [d2, R (d2)] son datos aleatorios alineados a los puntos de la aproximación. Cuanto más bajo sea el valor del parámetro de distribución más amplia es la distribución del tamaño del material [4], [6].

$$n = \frac{\log\left(\log\frac{100}{R(d2)}\right) - \log\left(\log\frac{100}{R(d1)}\right)}{\log d2 - \log d1} \quad (5)$$

La linealidad de nuestros datos la hemos confirmado usando el software Minitab, [6].

Regression Analysis: log(log(100/Rd)) versus Log d

La regression de la equation es:

$$\text{Log}(\log(100/Rd)) = 0.0946 + 0.137 \text{ Log } d$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.09456	0.01524	6.20	0.000
Log d	0.136649	0.005945	22.99	0.000

S = 0.0106033 **R-Sq = 98.3%** R-Sq(adj) = 98.1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.059411	0.059411	528.42	0.000
Residual Error	9	0.001012	0.000112		
Total	10	0.060423			

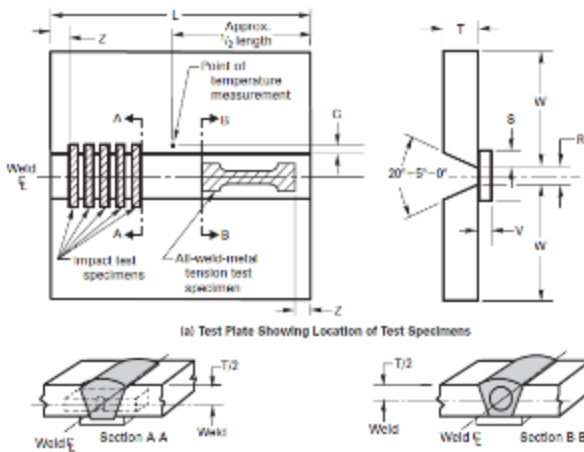


Figura 4: Esquema de preparación Probetas para validación de acuerdo AWS/ASME SFA5.1/SFA5.1M [8]

3.2 Análisis Metalográfico

Para este tipo de test nos adecuamos a la norma ASTM E407 (Figuras 5 y 6) [9].

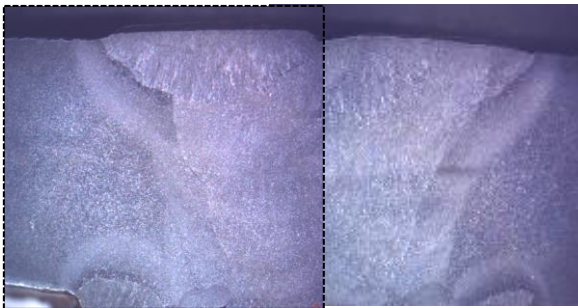


Figura N° 5: Macrografía aumento 10X, Cordón de soldadura con Cascarilla de acero.

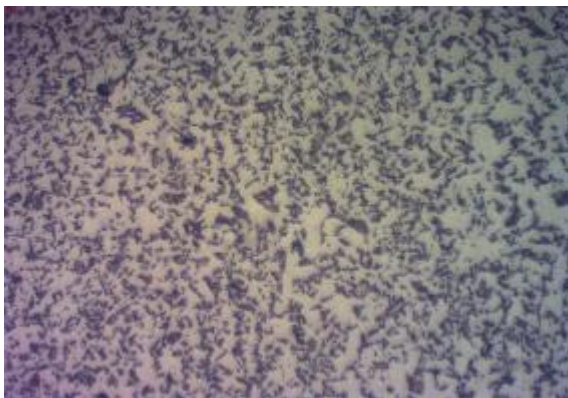


Figura 6: Aumento 500X, Ferrita Acicular en el depósito de soldadura.

3.3 Ensayos Químicos y Mecánicos.

El metal depositado (cordón de soldadura) obtenido con los amperajes arriba indicados, generan los siguientes elementos en la composición química en el metal depositado final:

- 0.50 - 1.25 en peso porcentual (%) de Mn
- 0.30 - 0.50 en peso porcentual (%) de Si
- 0.05 - 0.20 en peso porcentual (%) de C
- 0.00 - 0.03 en peso porcentual (%) de S
- ≤ 0.03 en peso porcentual (%) de P
- 0.2 - 0.30 en peso porcentual (%) de Al

Los valores de ensayo mecánica obtenido son los siguientes:

Tabla 3: Prueba de Tracción

Test	Tensión Máxima (MPa)	Fluencia (MPa)	Elongación (%)
Test 1	479	567	22
Test 2	473	540	29
Test 3	479	567	22

Tabla 4: Prueba de Impacto Charpy V

Test	Temperatura (Celsius)	Área fractura (%)	Impacto (Kpm)
Test 1	20	45	12.8
Test 1	0	38	5.0
Test 1	-20	30	3.6
Test 1	-30	25	3.5
Test 2	20	65	12
Test 2	0	54	5.7
Test 2	-20	40	3.2
Test 2	-30	36	2.8
Test 3	20	61	13.8
Test 3	0	59	11.6
Test 3	-20	48	7.6
Test 3	-30	52	6.6

Conclusiones

1. El reciclaje de cascarilla genera beneficios económicos asociados a su reutilización y reducir la contaminación ambiental por residuos sólidos mediante una economía circular.
2. El electrodo desarrollado en base a la reutilización de la cascarilla de acero, cumple con las especificaciones americana de soldadura AWS-ASME entonces el producto desarrollado puede ser considerado un electrodo de calidad internacional.
3. Con este proyecto nos permite reciclar aprox. el 60% de la cascarilla, especialmente aquella que

contiene un tamaño granulométrico menor a 500 micrones.

Impactos del proyecto:

Impactos internos: Permitió desarrollar tecnología propia y desarrollar nuestro propio know-how, sin necesidad de contar con personal extranjero adicional y mejorar la capacidad de ingreso de la empresa y trabajador.

Impactos externos (a la sociedad):

- Nuestros soldadores locales pueden contar con una opción más de electrodos, que puede competir con los productos importados.
- La posibilidad de fabricar localmente los electrodos, nos permite reducir los costos de operación y amoldar con facilidad a las necesidades del taller, además de reducir los costos del producto final.
- Minimizar los impactos ambientales, mediante el reciclado de la cascarilla de acero.

Agradecimiento

Agradecemos a la corporación Aceros Arequipa y programa Innóvate Perú en él apoyó y con el desarrollo de esta investigación.

Referencias

[1] R. Cuellar, «Cinética de crecimiento, mecanismos de remoción y morfología del óxido de hierro en aceros laminados en una planta compacta de productos planos,» de *Tesis (Doctorado en Ingeniería de Materiales)*, Universidad Autónoma de Nuevo leon, 2005.

[2] Darken, «The System Iron– Oxygen, I: The Wustite Field and Related Equilibria,» , vol. 67. .,» de *D. L. R.W., Introduction to the*

Thermodynamics of Materials, J. Am Chem Soc., 1945, p. 1398.

- [3] P.Aarne Vesilind, «The Rosin-Rammler particle size distribution,» *Resource Recovery and Conservation*, vol. 5, nº 3, pp. 275-277, 1980.
- [4] M. Alderliesten, «Mean Particle Diameters. Part VII. The Rosin-Rammler Size Distribution: Physical and Mathematical Properties and Relationships to Moment-Ratio Defined Mean Particle Diameters,» *Particle & Particle Systems Characterization*, vol. 30, nº 3, p. 230, 2013.
- [5] T. N.-M. Barry A. Wills, « An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery,» de *Mineral Processing Technology*, Elsevier Science & Technology Books, 2006, pp. 257-261.
- [6] M. Douglas, «Other Variations of the Split-Plot Design. En Design and Analysis of Experiments.,» Arizona: John Wiley & Sons, Inc, 2013, p. 646.
- [7] J. Davis, « Heat – Resistant Materials.,» ASM International. Handbook, 1997, p. 591.
- [8] A. W. S. AWS., «SPECIFICATION FOR CARBON STEEL ELECTRODES.,» de . *Norma ASME seccion II part C SFA5.1 / 5.1M*, Houston: ASME International., 2015.
- [9] A. M. Handbook, «Welding, Brazing, and Soldering.,» ASM Metals Handbook, 1993, pp. 136-151.